



발 간 등 록 번 호

11-1482023-100007-10

2025

국가온실가스 인벤토리 보고서

National Greenhouse Gas Inventory Report of Korea



기후에너지환경부
온실가스종합정보센터

이용자를 위하여

1. 국가 온실가스 통계는 국가 온실가스 통계관리 위원회의 심의·의결을 거쳐 2025년 12월에 공표된 1990년부터 2023년까지의 최신 통계 정보를 담았다.
2. 국가 온실가스 통계는 2006 IPCC GL과 지구온난화지수(제5차 IPCC 평가보고서)에 따라 산정되었다.
3. 동 보고서는 국제기준*에서 제시한 NID 목차를 준수하고 있다.
※ QA/QC에 대한 내용은 동 보고서 1.5장(QA/QC)에 총괄적으로 설명하고 있으며, 각 부문별로는 해당 내용을 포함하고 있지 않다.
* Decision 5/CMA.3 Guidance for operationalizing the modalities, procedures and guidelines for the enhanced transparency framework referred to in Article 13 of the Paris Agreement, Annex V Outline of the national inventory document, pursuant to the modalities, procedures and guidelines for the transparency framework for action and support referred to in Article 13 of the Paris Agreement¹
4. ‘국가 온실가스 인벤토리’는 인위적으로 발생하는 온실가스 배출원과 흡수원 목록별로 국가에서 산정한 온실가스 배출량 및 흡수량 수치(IPCC)를 의미하며, 탄소중립기본법에서는 동일한 개념을 ‘온실가스 통계’로 정의하고 있으므로 본 보고서에서는 같은 개념에 대하여 언급할 시 ‘온실가스 통계’로 명시하고 있다.
5. 본 보고서의 모든 수치는 반올림 값이므로, 일부 배출·흡수원 항목별 합계와 총계가 일치하지 않는 경우도 있다.

2025년 국가온실가스 인벤토리 보고서

요약

제1장 서론

1.1 온실가스 인벤토리 및 기후변화 배경 정보	1-3
1.1.1 기후변화 배경 정보	1-3
1.1.2 온실가스 통계 배경 정보	1-4
1.2 제도적 체계	1-7
1.2.1 국가 담당조직	1-7
1.2.2 통계 작성 절차	1-9
1.2.3 정보 기록관리	1-10
1.3 방법론 및 자료 출처	1-12
1.3.1 산정 방법	1-12
1.3.2 활동자료 출처	1-12
1.3.3 국가 고유 배출·흡수계수	1-16
1.4 주요 카테고리 분석 결과	1-17
1.4.1 방법론	1-17
1.4.2 분석결과	1-18
1.5 품질 보증 및 관리(QA/QC)	1-21
1.5.1 품질 보증 및 관리 절차	1-21
1.5.2 국가승인통계	1-22
1.5.3 국가 고유 배출·흡수계수에 대한 QA/QC 및 검증	1-23
1.6 통계 완전성	1-25
1.7 통계 단위	1-26

제2장 국가 온실가스 배출 및 흡수 추이

2.1 국가 온실가스 배출 및 흡수 추이 분석	2-3
2.1.1 총론	2-3
2.1.2 실질 국내총생산(GDP) 대비 온실가스 총배출량	2-5
2.1.3 온실가스 증감	2-6
2.2 온실가스별 배출 및 흡수 추이 분석	2-8
2.2.1 이산화탄소(CO ₂)	2-9
2.2.2 메탄(CH ₄)	2-10
2.2.3 아산화질소(N ₂ O)	2-12
2.2.4 수소불화탄소(HFCs), 과불화탄소(PFCs), 육불화황(SF ₆) 및 삼불화질소(NF ₃)	2-13
2.3 분야별 배출 및 흡수 추이 분석	2-15
2.3.1 에너지	2-15
2.3.2 산업공정 및 제품 사용	2-17
2.3.3 농업	2-20
2.3.4 토지이용, 토지이용 변화 및 임업	2-23
2.3.5 폐기물	2-25

제3장 에너지

3.1 개요	3-3
3.2 연료연소(1.A.)	3-5
3.2.1 국제빙커링	3-6
3.2.2 연료의 원료 및 비에너지 소비	3-8
3.2.3 에너지산업(1.A.1.)	3-9
3.2.4 제조업 및 건설업(1.A.2.)	3-22
3.2.5 수송(1.A.3.)	3-27
3.2.6 기타(1.A.4.)	3-43
3.2.7 미분류 부문(1.A.5.)	3-48
3.3 탈루(1.B.)	3-51
3.3.1 고체연료(1.B.1.)	3-52
3.3.2 석유 및 천연가스(1.B.2.)	3-56
3.4 CO ₂ 이송 및 저장(1.C.)	3-65
3.4.1 배출원 개요	3-65

제4장 산업공정 및 제품 사용

4.1 개요	4-3
4.2 광물산업(2.A.)	4-6
4.2.1 시멘트 생산(2.A.1.)	4-7
4.2.2 석회 생산(2.A.2.)	4-9
4.2.3 유리 생산(2.A.3.)	4-11
4.2.4 탄산염의 기타 공정 사용(2.A.4.)	4-14
4.3 화학산업(2.B.)	4-19
4.3.1 암모니아 생산(2.B.1.)	4-20
4.3.2 질산 생산(2.B.2.)	4-22
4.3.3 아디프산 생산(2.B.3.)	4-24
4.3.4 카프로락탐, 글리옥살, 글리옥살산 생산(2.B.4.)	4-25
4.3.5 카바이드 생산(2.B.5.)	4-27
4.3.6 석유화학제품 및 카본블랙 생산(2.B.8.)	4-29
4.3.7 불소화합물 생산(2.B.9.)	4-45
4.4 금속산업(2.C.)	4-50
4.4.1 철강 생산(2.C.1.)	4-51
4.4.2 합금철 생산(2.C.2.)	4-54
4.4.3 알루미늄 생산(2.C.3.)	4-56
4.4.4 마그네슘 생산(2.C.4.)	4-58
4.4.5 납 생산(2.C.5.)	4-60
4.4.6 아연 생산(2.C.6.)	4-62
4.4.7 기타 금속 생산(2.C.7.)	4-63
4.5 비에너지 제품 및 용매 사용(2.D.)	4-66
4.5.1 윤활제 사용(2.D.1.)	4-67
4.5.2 파라핀 왁스 사용(2.D.2.)	4-69
4.6 전자산업(2.E.)	4-71
4.6.1 반도체(2.E.1.)	4-72
4.6.2 디스플레이(2.E.2.)	4-74
4.6.3 광전지(2.E.3.)	4-77
4.7 오존층파괴물질의 대체물질 사용(2.F.)	4-79
4.7.1 냉장 및 냉방(2.F.1.)	4-80
4.7.2 수지발포제(2.F.2.)	4-82

4.7.3 화재방재(2.F.3.)	4-85
4.7.4 에어로졸(2.F.4.)	4-87
4.7.5 용매(2.F.5.)	4-89
4.8 기타 제품 제조 및 사용(2.G.)	4-91
4.8.1 충전기기(2.G.1.)	4-92
4.8.2 제품 사용으로 인한 N ₂ O (2.G.3.a.)	4-94

제5장 농업

5.1 개요	5-3
5.2 장내발효(3.A.)	5-6
5.2.1 소(3.A.1.)	5-7
5.2.2 양(3.A.2.), 돼지(3.A.3.), 기타 가축(3.A.4.)	5-10
5.3 가축분뇨처리(3.B.)	5-13
5.3.1 소(3.B.1.), 양(3.B.2.), 돼지(3.B.3.), 기타 가축(3.B.4.)	5-14
5.3.2 간접 N ₂ O 배출(3.B.5.)	5-23
5.4 비재배(3.C.)	5-26
5.4.1 수리답(3.C.1.)	5-27
5.4.2 천수답(3.C.2.)	5-35
5.5 농경지토양(3.D.)	5-38
5.5.1 직접배출(3.D.1.)	5-38
5.5.2 간접배출(3.D.2.)	5-47
5.6 작물잔사소각(3.F.)	5-51
5.6.1 곡류(3.F.1.)	5-52
5.6.2 두류(3.F.2.)	5-54
5.6.3 기타(3.F.5.)	5-56
5.7 석회시용(3.G.)	5-58
5.7.1 배출원 개요	5-58
5.7.2 방법론	5-59
5.7.3 시계열 일관성	5-60
5.8 요소시용(3.H.)	5-61
5.8.1 배출원 개요	5-61
5.8.2 방법론	5-62

5.8.3 시계열 일관성	5-63

제6장 토지이용, 토지이용 변화 및 임업

6.1 개요	6-3
6.1.1 배출·흡수원 개요	6-3
6.1.2 토지이용(Land-use) 정의 및 개요	6-4
6.1.3 토지이용 데이터베이스에 대한 정보	6-7
6.2 산림지(4.A.)	6-9
6.2.1 산림지로 유지된 산림지(4.A.1.)	6-11
6.2.2 타토지에서 전용된 산림지(4.A.2.)	6-15
6.2.3 산림지에서 바이오매스 연소에 의한 배출(4.IV.A.)	6-15
6.3 농경지(4.B.)	6-18
6.3.1 농경지로 유지된 농경지(4.B.1.)	6-18
6.3.2 타토지에서 전용된 농경지(4.B.2.)	6-19
6.4 초지(4.C.)	6-23
6.4.1 초지로 유지된 초지(4.C.1.)	6-24
6.4.2 타토지에서 전용된 초지(4.C.2.)	6-24
6.5 습지(4.D.)	6-28
6.5.1 습지로 유지된 습지(4.D.1.)	6-29
6.5.2 타토지에서 전용된 습지(4.D.2.)	6-36
6.6 정주지(4.E.)	6-39
6.6.1 정주지로 유지된 정주지(4.E.1.)	6-40
6.6.2 타토지에서 전용된 정주지(4.E.2.)	6-42
6.7 기타토지(4.F.)	6-42
6.8 수확된 목재제품(4.G.)	6-42

제7장 폐기물

7.1 개요	7-3
7.2 폐기물매립 (5.A.)	7-6
7.2.1 관리형 매립 (5.A.1.)	7-6
7.2.2 비관리형 매립 (5.A.2.)	7-13

7.3 고형폐기물의 생물학적 처리 (5.B.)	7-17
7.3.1 퇴비화 (5.B.1.)	7-18
7.3.2 바이오가스시설에서의 혐기성 소화 (5.B.2.)	7-20
7.4 폐기물소각 및 노천소각 (5.C.)	7-22
7.4.1 폐기물소각 (5.C.1.)	7-22
7.5 하·폐수처리 (5.D.)	7-28
7.5.1 하수처리(5.D.1.)	7-29
7.5.2 폐수처리(5.D.2.)	7-34

부록

부록 1. 주요 배출원 분석 결과	부록-3
부록 2. 용어 설명	부록-16
부록 3. 참고문헌	부록-17

표 1-1 분야별 온실가스 통계 관장기관 및 산정기관	1-8
표 1-2 국가 온실가스 통계 작성 연간 일정	1-10
표 1-3 분야별 자료원	1-12
표 1-4 주요 배출원 분석 결과(LULUCF 포함)	1-19
표 1-5 주요 배출원 분석 결과(LULUCF 제외)	1-20
표 1-6 국가통계 품질관리체계	1-23
표 1-7 국가 온실가스 배출·흡수계수 검증항목 및 검증요소	1-24
표 1-8 완전성 적용 항목	1-25
표 1-9 온실가스별 지구온난화지수(GWP)	1-26
표 2-1 분야별 온실가스 배출량 및 증감률	2-4
표 2-2 실질 국내총생산(GDP)당 온실가스 총배출량(1990-2023)	2-5
표 2-3 분야별 전년 대비 온실가스 총배출량 증감 기여도(1991-2023)	2-7
표 2-4 온실가스별 배출량 및 증감률(1990-2023)	2-8
표 2-5 분야별 CO ₂ 배출량 및 흡수량(1990-2023)	2-10
표 2-6 분야별 CH ₄ 배출량(1990-2023)	2-11
표 2-7 분야별 N ₂ O 배출량(1990-2023)	2-12
표 2-8 분야별 불소계 온실가스 배출량(1990-2023)	2-14
표 2-9 에너지 분야 온실가스 배출량(1990-2023)	2-15
표 2-10 에너지 분야 온실가스별 배출량(1990-2023)	2-17
표 2-11 산업공정 및 제품 사용 분야 온실가스 배출량(1990-2023)	2-18
표 2-12 산업공정 및 제품 사용 분야 온실가스별 배출량(1990-2023)	2-20
표 2-13 농업 분야 온실가스 배출량(1990-2023)	2-21
표 2-14 농업 분야 온실가스별 배출량(1990-2023)	2-23
표 2-15 토지이용, 토지이용 변화 및 임업 분야 온실가스 배출량 및 흡수량(1990-2023)	2-24
표 2-16 토지이용, 토지이용 변화 및 임업 분야 온실가스별 배출량 및 흡수량(1990-2023) ..	2-24
표 2-17 폐기물 분야 온실가스 배출량(1990-2023)	2-25
표 2-18 폐기물 분야 온실가스별 배출량(1990-2023)	2-27
표 3-1 에너지 분야 부문별 온실가스 배출량(1990-2023)	3-4
표 3-2 에너지 분야 연료연소 부문별 온실가스 배출량(1990-2023)	3-6
표 3-3 국제항공·해운 부문 온실가스 배출량(1990-2023)	3-7

표 3-4 국제빙커링 부문 활동자료 수집방법(1990-2023)	3-8
표 3-5 국제빙커링 부문 연료 소비량(1990-2023)	3-8
표 3-6 연료의 원료 및 비에너지 소비에 따른 배출량 보고	3-9
표 3-7 에너지산업 부문 온실가스 배출량(1990-2023)	3-10
표 3-8 철강 업종의 배출원 구분	3-13
표 3-9 코크스 생산 관련 국가 고유 탄소배출계수	3-14
표 3-10 탄소배출계수	3-14
표 3-11 에너지산업 부문 활동자료 수집방법(1990-2023)	3-16
표 3-12 에너지산업 부문 연료별 소비량(1990-2023)	3-16
표 3-13 1990-1996년 석유정제 부문 정제가스와 B-C유 소비량 추정	3-17
표 3-14 국가 고유 발열량	3-18
표 3-15 그 외 연료의 발열량 및 전환계수	3-19
표 3-16 에너지산업 부문 CH ₄ 및 N ₂ O 배출계수	3-21
표 3-17 공공 전기 및 열 생산 부문 CH ₄ 및 N ₂ O 배출계수	3-21
표 3-18 제조업 및 건설업 부문 온실가스 배출량(1990-2023)	3-23
표 3-19 제조업 및 건설업 부문 활동자료 수집방법(1990-2023)	3-24
표 3-20 제조업 및 건설업 부문 연료별 소비량(1990-2023)	3-24
표 3-21 제조업 및 건설업 부문 CH ₄ , N ₂ O 배출계수	3-25
표 3-22 수송 부문 온실가스 배출량(1990-2023)	3-27
표 3-23 국내항공 부문 온실가스 배출량(1990-2023)	3-28
표 3-24 일반항공기의 배출계수	3-30
표 3-25 민간항공기의 순항 시 배출계수	3-31
표 3-26 민간항공기의 기종별 LTO당 배출계수와 연료 사용량	3-31
표 3-27 1990-2008년 일반항공기 연료 소비량 추정방법	3-32
표 3-28 국내항공 부문 활동자료 수집방법(1990-2023)	3-32
표 3-29 국내항공 부문 연료별 소비량과 이착륙 횟수(1990-2023)	3-32
표 3-30 도로수송 부문 온실가스 배출량(1990-2023)	3-33
표 3-31 도로수송 부문 CH ₄ , N ₂ O 배출계수	3-35
표 3-32 도시가스(LNG) 배출계수	3-35
표 3-33 도로수송 부문 활동자료 수집방법(1990-2023)	3-35
표 3-34 도로수송 부문 연료별 소비량(1990-2023)	3-36
표 3-35 철도 부문 온실가스 배출량(1990-2023)	3-37
표 3-36 철도 부문 CH ₄ , N ₂ O 배출계수	3-37
표 3-37 철도 부문 활동자료 수집방법(1990-2023)	3-38
표 3-38 철도 부문 연료별 소비량(1990-2023)	3-38
표 3-39 국내해운 부문 온실가스 배출량(1990-2023)	3-39

표 3-40 국내해운 부문 CH ₄ , N ₂ O 배출계수	3-39
표 3-41 국내해운 부문 활동자료 수집방법(1990-2023)	3-40
표 3-42 국내해운 부문 연료별 소비량(1990-2023)	3-40
표 3-43 기타수송 부문 온실가스 배출량(1990-2023)	3-41
표 3-44 기타수송 부문 CH ₄ , N ₂ O 배출계수	3-42
표 3-45 기타수송 부문 활동자료 수집방법(1990-2023)	3-42
표 3-46 기타수송 부문 연료별 소비량(1990-2023)	3-42
표 3-47 기타 부문 온실가스 배출량(1990-2023)	3-44
표 3-48 기타 부문 CH ₄ , N ₂ O 배출계수	3-45
표 3-49 기타 부문 활동자료 수집방법(1990-2023)	3-46
표 3-50 기타 부문 연료 소비량(1990-2023)	3-46
표 3-51 미분류 부문 온실가스 배출량(1990-2023)	3-49
표 3-52 미분류 부문 연도별 활동자료 수집방법(1990-2023)	3-49
표 3-53 미분류 부문 연료 소비량(1990-2023)	3-49
표 3-54 에너지 분야 탈루 부문 온실가스 배출량(1990-2023)	3-52
표 3-55 고체연료 부문 온실가스 배출량(1990-2023)	3-53
표 3-56 고체연료 부문 CO ₂ , CH ₄ 배출계수 및 밀도	3-54
표 3-57 고체연료 부문의 지하 폐광 CH ₄ 배출계수	3-55
표 3-58 고체연료 부문 활동자료 수집방법(1990-2023)	3-55
표 3-59 고체연료 부문 활동자료(1990-2023)	3-55
표 3-60 석유 및 천연가스 부문 온실가스 배출량(1990-2023)	3-57
표 3-61 석유 부문 온실가스 배출량(1990-2023)	3-57
표 3-62 석유 부문 배출계수	3-58
표 3-63 석유 부문 활동자료 수집방법(1990-2023)	3-59
표 3-64 석유 부문 활동자료(1990-2023)	3-59
표 3-65 천연가스 부문 온실가스 배출량(1990-2023)	3-60
표 3-66 천연가스 부문 배출계수	3-61
표 3-67 천연가스 부문 활동자료 수집방법(1990-2023)	3-61
표 3-68 천연가스 부문 활동자료(1990-2023)	3-62
표 3-69 venting 및 flaring 부문 온실가스 배출량(1990-2023)	3-63
표 3-70 venting 및 flaring 부문 배출계수	3-63
표 4-1 산업공정 분야 부문별 온실가스 배출량(1990-2023)	4-5
표 4-2 광물산업 부문별 온실가스 배출량(1990-2023)	4-6
표 4-3 시멘트 생산 부문 온실가스 배출량(1990-2023)	4-7
표 4-4 시멘트 생산 부문 배출계수	4-8

표 4-5 시멘트 생산 부문 활동자료 수집방법(1990-2023)	4-8
표 4-6 시멘트 생산 부문 활동자료(1990-2023)	4-9
표 4-7 석회 생산 부문 온실가스 배출량(1990-2023)	4-10
표 4-8 석회 생산 부문 배출계수	4-10
표 4-9 석회 생산 부문 활동자료 수집방법(1990-2023)	4-11
표 4-10 석회 생산 부문 활동자료(1990-2023)	4-11
표 4-11 유리 생산 부문 온실가스 배출량(1990-2023)	4-12
표 4-12 유리 생산 부문 배출계수	4-13
표 4-13 유리 생산 부문 활동자료 수집방법(1990-2023)	4-13
표 4-14 유리 생산 부문 활동자료(1990-2023)	4-13
표 4-15 탄산염의 기타 공정 사용 부문 온실가스 배출량(1990-2023)	4-14
표 4-16 소다회의 기타 사용 부문 온실가스 배출량(1990-2023)	4-15
표 4-17 소다회의 기타 사용 부문 배출계수	4-15
표 4-18 소다회의 기타 사용 부문 활동자료 수집방법(1990-2023)	4-16
표 4-19 소다회의 기타 사용 부문 활동자료(1990-2023)	4-16
표 4-20 탄산염의 기타 소비 부문 온실가스 배출량(1998-2023)	4-17
표 4-21 탄산염의 기타 소비 부문 배출계수	4-17
표 4-22 탄산염의 기타 소비 부문 활동자료 수집방법(1998-2023)	4-18
표 4-23 탄산염의 기타 소비 부문 활동자료(1998-2023)	4-18
표 4-24 화학산업 부문별 온실가스 배출량(1990-2023)	4-20
표 4-25 암모니아 생산 부문 배출계수	4-21
표 4-26 암모니아 생산 부문 활동자료 수집방법(1990-2011)	4-21
표 4-27 질산 생산 부문 온실가스 배출량(1990-2023)	4-22
표 4-28 질산 생산 부문 배출계수	4-23
표 4-29 질산 생산 부문 활동자료 수집방법(1990-2023)	4-23
표 4-30 질산 생산 부문 활동자료(1990-2023)	4-23
표 4-31 아디프산 생산 부문 배출계수	4-25
표 4-32 아디프산 생산 부문 활동자료 수집방법(1990-2023)	4-25
표 4-33 카프로락탐 생산 부문 배출계수	4-26
표 4-34 카프로락탐 생산 부문 연도별 활동자료 수집방법(1990-2023)	4-27
표 4-35 카바이드 생산 부문 배출계수	4-28
표 4-36 카바이드 생산 부문 활동자료 수집방법(1990-2023)	4-29
표 4-37 석유화학제품 및 카본블랙 생산 부문 온실가스 배출량(1990-2023)	4-30
표 4-38 에틸렌 생산 부문 온실가스 배출량(1990-2023)	4-30
표 4-39 에틸렌 생산 부문 배출계수	4-31
표 4-40 에틸렌 생산 부문 활동자료 수집방법(1990-2023)	4-32

표 4-41 에틸렌 생산 부문 활동자료(1990-2023)	4-32
표 4-42 EDC 및 VCM 생산 부문 온실가스 배출량(1990-2023)	4-34
표 4-43 EDC 및 VCM 생산 부문 배출계수	4-34
표 4-44 EDC 및 VCM 생산 부문 활동자료 수집방법(1990-2023)	4-35
표 4-45 EDC 및 VCM 생산 부문 활동자료(1990-2023)	4-35
표 4-46 산화에틸렌 생산 부문 온실가스 배출량(1990-2023)	4-36
표 4-47 산화에틸렌 생산 부문 배출계수	4-36
표 4-48 산화에틸렌 생산 부문 연도별 활동자료 수집방법(1990-2023)	4-37
표 4-49 산화에틸렌 생산 부문 활동자료(1990-2023)	4-37
표 4-50 아크릴로니트릴 생산 부문 온실가스 배출량(1990-2023)	4-38
표 4-51 아크릴로니트릴 생산 부문 배출계수	4-38
표 4-52 아크릴로니트릴 생산 시 이차제품 생산계수	4-39
표 4-53 아크릴로니트릴 생산 부문 활동자료 수집방법(1990-2023)	4-39
표 4-54 아크릴로니트릴 생산 부문 활동자료(1990-2023)	4-39
표 4-55 카본블랙 생산 부문 온실가스 배출량(1990-2023)	4-40
표 4-56 카본블랙 생산 부문 배출계수	4-41
표 4-57 카본블랙 생산 부문 활동자료 수집방법(1990-2023)	4-41
표 4-58 카본블랙 생산 부문 활동자료(1990-2023)	4-41
표 4-59 기타 부문 온실가스 배출량(1990-2023)	4-42
표 4-60 스티렌 생산 부문 배출계수	4-43
표 4-61 BTX 생산 부문 배출계수	4-44
표 4-62 기타 부문 연도별 활동자료 수집방법(1990-2023)	4-44
표 4-63 기타 부문 활동자료(1990-2023)	4-44
표 4-64 불소화합물 생산 부문 온실가스 배출량(1990-2023)	4-45
표 4-65 부산물 배출 부문 온실가스 배출량(1990-2023)	4-46
표 4-66 불소화합물 생산 중 부산물 배출 부문 기본 배출계수	4-47
표 4-67 불소화합물 생산 중 부산물 배출 부문 활동자료 수집방법(1990-2023)	4-47
표 4-68 불소화합물 생산 중 부산물 배출 부문 활동자료(1990-2023)	4-47
표 4-69 불소화합물 생산 중 탈루 배출 부문 온실가스 배출량(1990-2023)	4-48
표 4-70 불소화합물 생산 중 탈루 배출 부문 배출계수	4-49
표 4-71 불소화합물 생산 중 탈루 배출 부문 활동자료 수집방법(1990-2023)	4-49
표 4-72 불소화합물 생산 중 탈루 배출 부문 활동자료(1990-2023)	4-49
표 4-73 금속산업 부문별 온실가스 배출량(1990-2023)	4-50
표 4-74 철강 생산 부문 온실가스 배출량(1990-2023)	4-51
표 4-75 철강 생산 부문 배출계수	4-53
표 4-76 철강 생산 부문 활동자료 수집방법(1990-2023)	4-53

표 4-77	철강 생산 부문 고로 공정 원료 투입량 및 제품 생산량(1990-2023)	4-53
표 4-78	철강 생산 부문 전기로 공정 전극봉 순수입량(1990-2023)	4-53
표 4-79	철강 생산 부문 탄산염 소비량(1990-2023)	4-54
표 4-80	합금철 생산 부문 온실가스 배출량(1990-2023)	4-55
표 4-81	합금철 생산 부문 배출계수	4-55
표 4-82	합금철 생산 부문 활동자료 수집방법(2007-2023)	4-56
표 4-83	합금철 생산 부문 활동자료(1990-2023)	4-56
표 4-84	알루미늄 생산 분야 온실가스 배출량(1990-2023)	4-56
표 4-85	알루미늄 생산 부문 배출계수	4-57
표 4-86	알루미늄 생산 부문 활동자료 수집방법(2007-2023)	4-57
표 4-87	알루미늄 생산 부문 활동자료(1990-2023)	4-57
표 4-88	마그네슘 생산 부문 온실가스 배출량(1990-2023)	4-58
표 4-89	마그네슘 생산 부문 배출계수	4-59
표 4-90	마그네슘 생산 부문 활동자료 수집방법(1990-2023)	4-60
표 4-91	마그네슘 생산 부문 활동자료(1990-2023)	4-60
표 4-92	납 생산 부문 배출계수	4-61
표 4-93	납 생산 부문 연도별 활동자료 수집방법(1990-2023)	4-61
표 4-94	아연 생산 부문 배출계수	4-63
표 4-95	아연 생산 부문 활동자료 수집방법(1990-2023)	4-63
표 4-96	기타 금속 및 납, 아연 생산 부문 온실가스 배출량(1990-2023)	4-64
표 4-97	기타 금속 생산 부문 배출계수	4-64
표 4-98	기타 금속 생산 부문 활동자료 수집방법(1990-2023)	4-65
표 4-99	기타 금속 및 납, 아연 생산 부문 활동자료(1990-2023)	4-65
표 4-100	비에너지 제품 및 용매 사용 부문별 온실가스 배출량(1990-2023)	4-66
표 4-101	윤활제 사용 부문 온실가스 배출량(1990-2023)	4-67
표 4-102	윤활제 사용 부문 배출계수	4-68
표 4-103	윤활제 사용 부문 활동자료 수집방법(1990-2023)	4-68
표 4-104	윤활제 사용 부문 활동자료 (1990-2023)	4-68
표 4-105	파라핀 왁스 사용 부문 온실가스 배출량(1990-2023)	4-69
표 4-106	파라핀 왁스 사용 부문 배출계수	4-70
표 4-107	파라핀 왁스 사용 부문 활동자료 수집방법(1990-2023)	4-70
표 4-108	파라핀 왁스 사용 부문 활동자료(1990-2023)	4-70
표 4-109	전자산업 부문 온실가스 배출량(1990-2023)	4-71
표 4-110	반도체 부문 배출계수	4-73
표 4-111	반도체 부문 활동자료 수집방법(1997-2023)	4-73
표 4-112	디스플레이 부문 배출계수	4-76

표 4-113 디스플레이 부문 활동자료 수집방법(1999-2023)	4-76
표 4-114 광전지 부문 활동자료 수집방법(2011-2022)	4-78
표 4-115 오존층파괴물질의 대체물질 사용 부문별 온실가스 배출량(1990-2023)	4-80
표 4-116 냉장 및 냉방 부문 온실가스 배출량(1990-2023)	4-80
표 4-117 냉장 및 냉방 부문 배출계수	4-81
표 4-118 냉장 및 냉방 부문 활동자료 수집방법(1992-2023)	4-81
표 4-119 냉장 및 냉방 부문 활동자료(1990-2023)	4-82
표 4-120 수지발포제 부문 배출량(1990-2023)	4-83
표 4-121 수지발포제 부문 배출계수	4-83
표 4-122 수지발포제 부문 활동자료 수집방법(1992-2023)	4-84
표 4-123 수지발포제 부문 활동자료(1990-2023)	4-84
표 4-124 화재방재 부문 배출량(1990-2023)	4-85
표 4-125 화재방재 부문 배출계수	4-86
표 4-126 화재방재 부문 활동자료 수집방법(2008-2023)	4-86
표 4-127 화재방재 부문 활동자료(1990-2023)	4-86
표 4-128 에어로졸 부문 온실가스 배출량(1990-2023)	4-87
표 4-129 에어로졸 부문 배출계수	4-88
표 4-130 에어로졸 부문 활동자료 수집방법(1992-2023)	4-88
표 4-131 에어로졸 부문 활동자료(1990-2023)	4-88
표 4-132 용매 부문 온실가스 배출량(1990-2023)	4-89
표 4-133 용매 부문 배출계수	4-90
표 4-134 용매 부문 활동자료 수집방법(2011-2023)	4-90
표 4-135 용매 부문 활동자료(1990-2023)	4-90
표 4-136 기타 제품 제조 및 사용 부문별 온실가스 배출량(1990-2023)	4-91
표 4-137 충전기기 부문 단계별 배출량(1990-2023)	4-92
표 4-138 충전기기 부문 배출계수	4-93
표 4-139 충전기기 부문 활동자료 수집방법(1990-2023)	4-93
표 4-140 충전기기 부문 활동자료(1990-2023)	4-93
표 4-141 제품(의료용) 사용으로 인한 N ₂ O 부문 온실가스 배출량(1990-2023)	4-94
표 4-142 제품 사용으로 인한 N ₂ O 부문 배출계수	4-95
표 4-143 제품 사용으로 인한 N ₂ O 부문 활동자료 수집방법(2004-2023)	4-95
표 4-144 제품 사용으로 인한 N ₂ O 부문 활동자료(1990-2023)	4-95
표 5-1 농업 분야 부문별 온실가스 배출량(1990-2023)	5-5
표 5-2 장내발효 부문 온실가스 배출량(1990-2023)	5-7
표 5-3 장내발효 부문 소에 의한 온실가스 배출량(1990-2023)	5-7

표 5-4 장내발효 부문 소 CH_4 배출계수	5-8
표 5-5 소 활동자료 수집방법(1990-2023)	5-9
표 5-6 장내발효 부문 소 활동자료(1990-2023)	5-9
표 5-7 장내발효 양, 돼지, 기타 가축에 의한 온실가스 배출량(1990-2023)	5-10
표 5-8 장내발효 부문 양, 돼지, 기타 가축 CH_4 배출계수	5-11
표 5-9 양, 돼지, 기타 가축 활동자료 수집방법(1990-2023)	5-12
표 5-10 장내발효 부문 양, 돼지 기타 가축 활동자료(1990-2023)	5-12
표 5-11 가축분뇨처리 부문 온실가스 배출량 (1990-2023)	5-14
표 5-12 가축분뇨처리 부문 소, 양, 기타 가축에 의한 온실가스 배출량 (1990-2023)	5-14
표 5-13 가축분뇨처리 부문 축종별 CH_4 배출계수	5-16
표 5-14 가축분뇨처리 부문 축종별 연평균 질소 배출량	5-17
표 5-15 가축분뇨처리시설별 N_2O 배출계수	5-18
표 5-16 가축분뇨처리 부문 가축종의 가축단위별 N 배출률($N_{\text{rate}(T)}$)	5-18
표 5-17 가축분뇨처리 부문 축종별 평균 체중(TAM)	5-19
표 5-18 가금류(닭, 오리) 활동자료 수집방법(1990-2023)	5-19
표 5-19 가축분뇨처리 부문 활동자료(1990-2023)	5-20
표 5-20 축종별 가축분뇨처리시설 이용비율($AWMS(T)$)	5-21
표 5-21 가축분뇨처리 부문 간접 N_2O 배출 온실가스 배출량(1990-2023)	5-23
표 5-22 가축분뇨처리시설별 N_2O 간접 배출계수	5-24
표 5-23 가축분뇨처리시설별 처리 시 NH_3 와 NO_x 로 휘산되는 연간 질소 배출률($\text{Frac}_{\text{GasMS}}$) ..	5-25
표 5-24 벼재배 부문 온실가스 배출량 (1990-2023)	5-27
표 5-25 벼재배 부문 수리답에서의 온실가스 배출량(1990-2023)	5-27
표 5-26 벼재배 부문 수리답에서의 일일 CH_4 배출계수(EF_i)	5-29
표 5-27 유기물 무시용 상시담수 논의 기본 배출계수	5-29
표 5-28 재배 전 및 재배 중 물관리 방법별 보정계수(SF_p , SF_w)	5-30
표 5-29 유기물시용 보정계수(SF_o)	5-30
표 5-30 벼재배 물관리 방법 및 유기물 시용에 따른 수리답 면적(1990-2023)	5-31
표 5-31 벼재배 물관리 방법 및 유기물 시용에 따른 수리답 재배면적(2023)	5-32
표 5-32 재배 전 및 재배 중 물관리 방법별 벼 재배면적 비율(1990-2023)	5-33
표 5-33 밭집 유기물 시용·무시용 면적 비율(1990-2023)	5-33
표 5-34 보릿짚 유기물 환원 면적 비율(1990-2023)	5-33
표 5-35 녹비 시용 유기물 환원 면적 비율(1990-2023)	5-34
표 5-36 벼재배 부문 천수답 CH_4 배출량(1990-2023)	5-35
표 5-37 벼재배 부문 천수답에서의 일일 CH_4 배출계수(EF_i)	5-36
표 5-38 벼재배 물관리 방법 및 유기물 시용에 따른 천수답 면적(1990-2023)	5-36
표 5-39 벼재배 물관리 방법에 따른 천수답 재배면적(2023)	5-37

표 5-40	농경지토양 부문 온실가스 배출량(1990-2023)	5-38
표 5-41	농경지토양 부문 직접배출 N ₂ O 배출량(1990-2023)	5-39
표 5-42	농경지토양 부문 작물종별 N ₂ O 배출계수(EF1i)	5-40
표 5-43	농경지토양 부문 질소 투입원별 N ₂ O 직접배출계수	5-40
표 5-44	무기질 비료로 투입되는 작물별 연간 질소투입량 산정방법(2023)	5-41
표 5-45	무기질 비료로 투입되는 작물별 질소 투입량(1990-2023)	5-42
표 5-46	농경지토양 N ₂ O 직접배출 무기질소 부문 활동자료 수집방법(1990-2023)	5-42
표 5-47	가축분뇨로 투입되는 질소 투입량(1990-2023)	5-43
표 5-48	축종별 가축분뇨처리시설별 처리 시 질소 손실률(FracLossMS)	5-44
표 5-49	작물잔사환원에 따른 질소 투입량(1990-2023)	5-45
표 5-50	잔사건물 중 토양환원율 및 소각률	5-45
표 5-51	농경지토양 부문 작물잔사 유래 N 산정을 위한 매개변수	5-46
표 5-52	농경지토양 부문 N ₂ O 간접배출 부문 온실가스 배출량(1990-2023)	5-47
표 5-53	농경지토양 부문 간접배출의 N ₂ O 배출계수	5-49
표 5-54	농경지토양 부문 간접배출의 매개변수	5-49
표 5-55	작물잔사소각 부문 온실가스 배출량(1990-2023)	5-51
표 5-56	작물잔사소각 부문 곡류 온실가스 배출량(1990-2023)	5-52
표 5-57	작물잔사소각 부문 CH ₄ , N ₂ O 배출계수	5-53
표 5-58	곡류 부문 활동자료(1990-2023)	5-53
표 5-59	곡류 부문 매개변수	5-54
표 5-60	작물잔사소각 부문 두류 온실가스 배출량(1990-2023)	5-54
표 5-61	두류 생산량(1990-2023)	5-55
표 5-62	두류 부문 매개변수	5-55
표 5-63	작물잔사소각 부문 기타 온실가스 배출량(1990-2023)	5-56
표 5-64	기타 부문 작물별 생산량 활동자료(1990-2023)	5-57
표 5-65	기타 부문 매개변수	5-57
표 5-66	석회시용 부문 온실가스 배출량(1990-2023)	5-58
표 5-67	석회시용 부문 CO ₂ 배출계수	5-59
표 5-68	석회시용 부문 석회 공급량(1990-2023)	5-59
표 5-69	요소시용 부문 온실가스 배출량(1990-2023)	5-61
표 5-70	요소시용 부문 CO ₂ 배출계수	5-62
표 5-71	요소시용 부문 요소 공급량(1990-2023)	5-62
표 6-1	LULUCF 분야 부문별 온실가스 배출량 및 흡수량(1990-2023)	6-4
표 6-2	국내외 산림지 정의	6-5
표 6-3	임목지와 무림목지의 정의	6-5

표 6-4 토지이용 구분과 토지이용 세부 기준(2023)	6-6
표 6-5 산림지 관련 통계 비교	6-7
표 6-6 산림지 부문 온실가스 배출량 및 흡수량(1990-2023)	6-10
표 6-7 산림지 영급별 면적비율 변화(국립산림과학원, 2021)	6-10
표 6-8 산림지로 유지된 산림지 부문 온실가스 배출량 및 흡수량(1990-2023)	6-11
표 6-9 산림지 부문 주요 수종의 임목 바이오매스 흡수계수	6-12
표 6-10 산림지로 유지된 산림지 부문 연도별 활동자료 수집방법(1990-2023)	6-14
표 6-11 산림지로 유지된 산림지 부문 임상별 임목축적량(1990-2023)	6-14
표 6-12 산림지로 유지된 산림지 부문 임상별 산림면적(1990-2023)	6-14
표 6-13 산림지에서 바이오매스 연소에 의한 배출 온실가스 배출량 및 흡수량(1990-2023) ..	6-15
표 6-14 산림지에서의 바이오매스 연소에 의한 배출 부문 연소효율 및 배출계수	6-16
표 6-15 산림지에서 바이오매스 연소에 의한 배출 부문 활동자료 수집방법(1990-2023)	6-16
표 6-16 산림지에서 바이오매스 연소에 의한 배출 부문 활동자료(1990-2023)	6-16
표 6-17 농경지 부문 온실가스 배출량 및 흡수량(1990-2023)	6-18
표 6-18 타토지에서 전용된 농경지 부문 온실가스 배출량 및 흡수량(1990-2023)	6-19
표 6-19 농경지 토양형별 면적 비율	6-20
표 6-20 기본 토양유기탄소 축적계수(SOC _{REF}) 및 토양유기탄소 축적량(SOC)	6-21
표 6-21 농경지 관리활동 종류별 축적변화계수	6-21
표 6-22 타토지에서 전용된 농경지 부문 활동자료 수집방법(1990-2023)	6-22
표 6-23 농경지 부문 활동자료(1990-2023)	6-22
표 6-24 초지 부문 온실가스 배출량 및 흡수량(1990-2023)	6-23
표 6-25 타토지에서 전용된 초지 부문 배출량 및 흡수량(1990-2023)	6-24
표 6-26 초지 토양형별 면적 비율	6-26
표 6-27 기본 토양 유기탄소 축적계수(SOC _{REF})	6-26
표 6-28 초지 관리활동 종류별 축적변화계수	6-26
표 6-29 타토지에서 전용된 초지 부문 활동자료 수집방법(1990-2023)	6-27
표 6-30 초지 부문 활동자료(1990-2023)	6-27
표 6-31 습지 부문 온실가스 배출량 및 흡수량(1990-2023)	6-28
표 6-32 내륙습지로 유지된 내륙습지 부문 온실가스 배출량 및 흡수량(1990-2023)	6-29
표 6-33 연도별 비결빙일수(1990-2023)	6-30
표 6-34 내륙습지로 유지된 내륙습지 부문 활동자료 수집방법(1990-2023)	6-30
표 6-35 내륙습지로 유지된 내륙습지 부문 면적 활동자료(1990-2023)	6-31
표 6-36 연안습지로 유지된 연안습지 부문 온실가스 배출량 및 흡수량(1990-2023)	6-32
표 6-37 식생 재건시 연간 토양탄소 배출계수(EF _{RE})	6-33
표 6-38 식생 연안습지 회복에 따른 CH ₄ 배출계수(EFRE) 기본값	6-33
표 6-39 연안습지로 유지된 연안습지 부문 활동자료 수집방법(1990-2023)	6-34

표 6-40 연안습지로 유지된 연안습지 부문 면적 활동자료(1990-2023)	6-34
표 6-41 타토지에서 전용된 습지 부문 온실가스 배출량 및 흡수량(1990-2023)	6-36
표 6-42 타토지에서 전용된 습지 부문 활동자료 수집방법(1990-2023)	6-37
표 6-43 타토지에서 전용된 내륙습지 부문 면적 활동자료(1990-2023)	6-37
표 6-44 정주지 부문 온실가스 배출량 및 흡수량(1990-2023)	6-39
표 6-45 정주지로 유지된 정주지 부문 온실가스 배출량 및 흡수량(1990-2023)	6-40
표 6-46 입목 바이오매스 수관면적당 연간 탄소흡수량	6-41
표 6-47 정주지로 유지된 정주지 부문 활동자료 수집방법(1990-2023)	6-41
표 6-48 정주지로 유지된 정주지 부문 면적 활동자료(1990-2023)	6-41
표 6-49 수확된 목재제품 부문 온실가스 배출량 및 흡수량(1990-2023)	6-43
표 6-50 수확된 목재제품 부문 온실가스 배출량 및 흡수량(1990-2023)	6-44
표 6-51 수확된 목재제품의 탄소전환계수 및 반감기 기본값	6-45
표 6-52 수확된 목재제품 부문 활동자료 수집방법(1990-2023)	6-46
표 6-53 수확된 목재제품 부문 제품별 생산량 활동자료(1990-2023)	6-46
표 7-1 폐기물 분야 부문별 온실가스 배출량(1990-2023)	7-5
표 7-2 폐기물매립 부문 온실가스 배출량(1990-2023)	7-6
표 7-3 관리형 매립 부문 온실가스 배출량(1990-2023)	7-7
표 7-4 관리형 매립의 매개변수	7-8
표 7-5 폐기물 성상별 메탄 발생 속도상수 (k)	7-8
표 7-6 관리형 매립의 적용 배출계수 (DOC, DOCF)	7-9
표 7-7 폐기물 매립량 확보 방법	7-10
표 7-8 폐기물매립 부문 산정을 위한 활동자료 출처	7-10
표 7-9 폐기물매립 부문 활동자료 수집방법(1990-2023)	7-11
표 7-10 연도별 관리형, 비관리형 매립지 비율	7-11
표 7-11 관리형 매립의 연도별 유형별 매립 처리량(1990-2023)	7-11
표 7-12 관리형 매립의 연도별 성상별 매립 처리량(1990-2023)	7-11
표 7-13 관리형 매립지의 CH ₄ 회수 현황	7-12
표 7-14 관리형 매립의 CH ₄ 회수량(1990-2023)	7-12
표 7-15 비관리형 매립 부문 온실가스 배출량(1990-2023)	7-13
표 7-16 비관리형 매립의 매개변수	7-14
표 7-17 비관리형 매립의 매립 처리량(평균 매립고 ≥ 5m) (1990-2023)	7-14
표 7-18 비관리형 매립의 연도별 성상별 매립 처리량(평균 매립고 ≥ 5m) (1990-2023) ...	7-15
표 7-19 비관리형 매립의 매립 처리량(평균 매립고 < 5m) (1990-2023)	7-15
표 7-20 비관리형 매립의 연도별 성상별 매립 처리량(평균 매립고 < 5m) (1990-2023) ...	7-15
표 7-21 고형폐기물의 생물학적 처리 부문 온실가스 배출량(1990-2023)	7-17

표 7-22 퇴비화 부문 온실가스 배출량(1990-2023)	7-18
표 7-23 퇴비화 부문 배출계수	7-19
표 7-24 퇴비화 부문 활동자료 수집방법(1994-2023)	7-19
표 7-25 퇴비화 부문 폐기물 처리량 (1990-2023)	7-19
표 7-26 바이오가스시설에서의 혐기성 소화 부문 온실가스 배출량(1990-2023)	7-20
표 7-27 바이오가스시설에서의 혐기성 소화 부문 배출계수	7-21
표 7-28 바이오가스시설에서의 혐기성 소화 부문 활동자료 수집방법(2010-2023)	7-21
표 7-29 바이오가스시설에서의 혐기성 소화 부문 폐기물 처리량 (1990-2023)	7-21
표 7-30 폐기물소각 부문 온실가스 배출량(1990-2023)	7-23
표 7-31 폐기물소각 부문 CO ₂ 매개변수	7-24
표 7-32 폐기물소각 부문 Non-CO ₂ 배출계수	7-25
표 7-33 폐기물 소각량 결정방법	7-26
표 7-34 폐기물 유형별 국내승인통계 기준성상 분류 목록	7-26
표 7-35 폐기물소각 부문 활동자료 수집방법(1990-2023)	7-27
표 7-36 폐기물 종류별 소각 처리량(1990-2023)	7-27
표 7-37 하·폐수처리 부문 온실가스 배출량(1990-2023)	7-28
표 7-38 하수처리 부문 온실가스 배출량(1990-2023)	7-29
표 7-39 하수처리 공법별 배출계수	7-31
표 7-40 공공하수처리 부문 활동자료 수집방법(1990-2023)	7-33
표 7-41 공공하수처리 부문 CH ₄ 활동자료 현황(1990-2023)	7-33
표 7-42 공공하수처리 부문 N ₂ O 활동자료 현황(1990-2023)	7-33
표 7-43 공공하수처리 부문 CH ₄ 회수량(1990-2023)	7-33
표 7-44 미처리/미차집 활동자료 현황(1990-2023)	7-34
표 7-45 폐수처리 부문 온실가스 배출량(1990-2023)	7-35
표 7-46 폐수처리 부문 CH ₄ 배출계수	7-35
표 7-47 폐수처리 부문 활동자료 수집방법(1990-2023)	7-36
표 7-48 폐수처리 활동자료에 대한 업종분류표	7-36
표 7-49 폐수처리 업종별 유입 COD 부하량(1990-2023)	7-37

그림 1-1 기후변화협약 및 파리협정에 따른 국가 온실가스 통계 산정·보고 기준	1-5
그림 1-2 IPCC 지침에 따른 배출량 산정·보고 분야	1-6
그림 1-3 국가 온실가스 통계 작성 체계도	1-8
그림 1-4 국가 온실가스 통계 정보 기록관리 일정 및 절차	1-11
그림 1-5 국가 온실가스 배출·흡수계수 개발·검증 체계도	1-16
그림 1-6 QA/QC 체계도	1-21
그림 1-7 QA/QC 절차 및 세부 내용	1-22
그림 1-8 정기통계 품질 진단 수행절차 및 수행주체	1-23
그림 2-1 분야별 온실가스 배출량 및 흡수량(1990-2023)	2-4
그림 2-2 실질 국내총생산(GDP) 당 온실가스 총배출량(1990-2023)	2-5
그림 2-3 온실가스 증감 기여율(1990-2023)	2-6
그림 2-4 온실가스별 배출량(1990-2023)	2-8
그림 2-5 분야별 CO ₂ 배출량(1990-2023)	2-9
그림 2-6 분야별 CH ₄ 배출량(1990-2023)	2-11
그림 2-7 분야별 N ₂ O 배출량(1990-2023)	2-12
그림 2-8 분야별 불소계 온실가스 배출량(1990-2023)	2-13
그림 2-9 에너지 분야 온실가스 배출량(1990-2023)	2-15
그림 2-10 에너지 분야 세부 부문별 배출 비중	2-16
그림 2-11 에너지 분야 온실가스별 배출 비중(1990-2023)	2-17
그림 2-12 산업공정 및 제품 사용 분야 온실가스 배출량(1990-2023)	2-18
그림 2-13 산업공정 및 제품 사용 분야 세부 부문별 배출 비중	2-19
그림 2-14 산업공정 및 제품 사용 분야 온실가스별 배출 비중(1990-2023)	2-19
그림 2-15 농업 분야 온실가스 배출량(1990-2023)	2-21
그림 2-16 농업 분야 세부 부문별 배출 비중	2-22
그림 2-17 농업 분야 온실가스별 배출 비중(1990-2023)	2-22
그림 2-18 토지이용, 토지이용 변화 및 임업 분야 배출량 및 흡수량(1990-2023)	2-24
그림 2-19 폐기물 분야 온실가스 배출량(1990-2023)	2-25
그림 2-20 폐기물 분야 세부 부문별 배출 비중	2-26
그림 2-21 폐기물 분야 온실가스별 배출 비중(1990-2023)	2-27
그림 3-1 에너지 분야 부문별 온실가스 배출량(1990-2023)	3-3
그림 3-2 연료연소 부문 온실가스 배출량(1990-2023)	3-5

그림 3-3	연료연소 부문별 배출 비중 (1990·2023)	3-5
그림 3-4	국제항공 부문 온실가스 배출량(1990-2023)	3-7
그림 3-5	에너지산업 부문 온실가스 배출량(1990-2023)	3-10
그림 3-6	발전원별 발전량 및 공공전기 및 열생산 부문 배출량 추이(2008-2023)	3-11
그림 3-7	제조업 및 건설업 부문 온실가스 배출량(1990-2023)	3-23
그림 3-8	수송 부문 온실가스 배출량(1990-2023)	3-27
그림 3-9	기타 부문 온실가스 배출량(1990-2023)	3-44
그림 3-10	미분류 부문 온실가스 배출량(1990-2023)	3-48
그림 3-11	탈루 부문 온실가스 배출량(1990-2023)	3-51
그림 3-12	탈루 부문 세부 부문별 배출 비중 (1990·2023)	3-51
그림 3-13	고체연료 부문 온실가스 배출량(1990-2023)	3-53
그림 3-14	석유 및 천연가스 부문 온실가스 배출량(1990-2023)	3-56
그림 4-1	산업공정 분야 부문별 배출비중(1990·2023)	4-4
그림 4-2	산업공정 분야 부문별 온실가스 배출량(1990-2023)	4-5
그림 4-3	광물산업 부문 온실가스 배출량(1990-2023)	4-6
그림 4-4	화학산업 부문 온실가스 배출량(1990-2023)	4-19
그림 4-5	금속산업 부문 온실가스 배출량(1990-2023)	4-50
그림 4-6	비에너지 제품 및 용매 사용 부문 온실가스 배출량(1990-2023)	4-66
그림 4-7	전자산업 부문 온실가스 배출량(1990-2023)	4-71
그림 4-8	오존층파괴물질의 대체물질 사용 부문 온실가스 배출량(1990-2023)	4-79
그림 4-9	기타 제품 제조 및 사용 부문 온실가스 배출량(1990-2023)	4-91
그림 5-1	농업 분야 부문별 배출비중(1990-2023)	5-4
그림 5-2	농업 분야 부문별 온실가스 배출량(1990-2023)	5-4
그림 5-3	장내발효 부문 온실가스 배출량(1990-2023)	5-6
그림 5-4	가축분뇨처리 부문 온실가스 배출량(1990-2023)	5-13
그림 5-5	벼재배 부문 온실가스 배출량(1990-2023)	5-26
그림 5-6	농경지토양 부문 온실가스 배출량(1990-2023)	5-38
그림 5-7	작물잔사소각 부문 온실가스 배출량(1990-2023)	5-51
그림 5-8	석회사용 부문 온실가스 배출량(1990-2023)	5-58
그림 5-9	요소사용 부문 온실가스 배출량(1990-2023)	5-61
그림 6-1	LULUCF 분야 온실가스 배출량 및 흡수량(1990-2023)	6-3
그림 6-2	산림지 부문 온실가스 배출량 및 흡수량(1990-2023)	6-9
그림 6-3	산림지 영급별 면적비율 변화(1965, 2020)(국립산림과학원, 2021)	6-10

그림 6-4 농경지 부문 온실가스 배출량 및 흡수량(1990-2023)	6-18
그림 6-5 초지 부문 온실가스 배출량 및 흡수량(1990-2023)	6-23
그림 6-6 습지 부문 온실가스 배출량 및 흡수량(1990-2023)	6-28
그림 6-7 정주지 부문 온실가스 배출량 및 흡수량(1990-2023)	6-39
그림 6-8 수확된 목재제품 부문 온실가스 배출량 및 흡수량(1990-2023)	6-43
그림 7-1 폐기물 분야 부문별 배출 비중(1990-2023)	7-4
그림 7-2 폐기물 분야 부문별 온실가스 배출량(1990-2023)	7-4
그림 7-3 폐기물매립 부문 온실가스 배출량(1990-2023)	7-6
그림 7-4 고형폐기물의 생물학적 처리 부문 온실가스 배출량(1990-2023)	7-17
그림 7-5 폐기물소각 및 노천소각 부문 온실가스 배출량(1990-2023)	7-22
그림 7-6 하·폐수처리 부문 온실가스 배출량(1990-2023)	7-28

요약

요약(Executive Summary)

ES1 기후변화 및 국가 온실가스 통계 배경 정보

기후변화 배경 정보

우리나라의 연평균 기온은 지난 110여 년간 꾸준히 상승해왔으며, 최근 30년(1991-2020)의 연평균 기온은 과거 30년(1912-1940) 대비 약 1.6℃ 상승하였다. 2024년의 연평균 기온은 14.5℃로, 평년(1991-2020) 대비 1.9℃ 높아 역대(1973년 이래¹⁾) 최고치를 기록했으며, 최근 10년(2015-2024년) 중 7개의 해가 역대 기온 순위 상위 10위에 포함되는 등 기온 상승세가 뚜렷하다²⁾. 이와 함께, 강수량 역시 변동성이 커졌고, 집중호우, 폭염, 열대야, 겨울철 기온 변동폭 확대 등 기후변화로 인한 극한 기상 현상이 더욱 빈번하게 나타나고 있다.

우리나라는 1993년 유엔기후변화협약(United Nations Framework Convention on Climate Change, 이하 UNFCCC)에 가입하여 국제사회의 기후변화 대응 노력에 동참해왔다. 교토의정서 후속 체제로 모든 당사국이 탄소 감축을 위해 행동하는 파리협정³⁾ 체결에 맞춰 2015년에 자발적 국가결정 기여(Intended Nationally Determined Contributions, 이하 INDC)를 UNFCCC에 제출하였으며, 2020년에는 '2050 탄소중립'을 국가 비전으로 공식 선언하였다. 2021년에는 국가 온실가스 감축목표(National Determined Contribution, 이하 NDC)를 상향 조정한 NDC 상향안을 발표하고 UNFCCC에 제출하였다. 같은 해 9월, 「기후위기 대응을 위한 탄소중립·녹색성장 기본법(이하 탄소중립 기본법)」과 시행령을 제정하여 국가 비전과 NDC 상향안을 법적으로 명문화하였다. 이 법은 2050년 탄소중립 실현과 2030년까지 2018년 대비 온실가스 배출량을 35% 이상 감축하는 목표를 명시하고, 다양한 온실가스 감축 정책 수단을 마련하였다. 2025년 12월에는 2035년 국가 온실가스 감축목표(2018년 대비 53-61% 감축)를 수립하여 UNFCCC에 제출하였다.

온실가스 통계 배경 정보

파리협정에 따라 기존 국가 온실가스 통계 산정·보고·검증 체계(Measurement, Reporting and Verification, 이하 MRV)에서 강화된 투명성 체계(Enhanced Transparency Framework, 이하 ETF)

1) 기상관측망을 전국적으로 대폭 확충한 시기인 1973년부터 2024년까지의 순위임

2) 출처: 「한국 기후위기 평가보고서 2025」(기상청, 2025)

3) 파리협정(Paris Agreement)은 2015년 12월 프랑스 파리에서 열린 제21차 유엔기후변화협약 당사국총회(COP21)에서 채택된 전 세계 기후변화 대응을 위한 국제협정이다. 약 195개국이 참여해 2016년 11월 발효되었으며, 산업화 이전 대비 지구 평균기온 상승을 2℃보다 훨씬 낮은 수준으로 유지하고, 1.5℃ 이하로 억제하기 위해 노력하는 것을 목표로 함. 우리나라는 2016년 11월 3일 국회 비준 동의를 거쳐, 2016년 12월 2일부터 공식적인 당사국 자격을 가지게 됨

로 전환되었다. 이에 따라 모든 당사국은 공통보고표(Common Reporting Tables, 이하 CRT)와 국가 온실가스 인벤토리 보고서(National Inventory Document, 이하 NID)를 별도의 보고서 또는 격년 투명성 보고서(Biennial Transparency Report, 이하 BTR)에 포함하여 UNFCCC에 격년 제출하여야 한다⁷⁾.

본 보고서는 ETF의 이행을 위한 투명성 체계 방식·절차·지침(Modalities, Procedures and Guidelines, 이하 MPG) 제48항·제49항의 규정에 따라 국내에서 배출한 7개의 온실가스(이산화탄소(CO₂), 메탄(CH₄), 아산화질소(N₂O), 수소불화탄소(HFCs), 과불화탄소(PFCs), 육불화황(SF₆), 삼불화질소(NF₃))에 대한 배출·흡수량 정보를 담고 있다.

국가 온실가스 통계 산정기준은 MPG 제17항·20항에 따라 2006 기후변화에 관한 정부간 협의체 지침(2006 Intergovernmental Panel on Climate Change Guidelines, 이하 2006 IPCC GL)⁸⁾을 적용하고, 일부 배출원에는 2019 Refinement(2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, 이하 2019 Refinement)⁹⁾의 최신 기준을 적용하였다. 각각의 온실가스가 지구온난화에 기여하는 정도를 수치로 표현한 ‘지구온난화지수¹¹⁾(Global Warming Potential, GWP)’는 MPG 제37항에 따라 제5차 IPCC 평가보고서¹³⁾의 100년 기준 지수를 적용하였다.

또한, MPG 제50항의 규정에 따라 에너지, 산업공정 및 제품 사용, 농업, 토지이용·토지이용 변화 및 임업(Land Use, Land-Use Change and Forestry, 이하 LULUCF)¹⁴⁾, 폐기물 분야로 구분하여 산정하였고 보고연도는 1990년부터 2023년까지 총 34개 연도에 해당한다.

국가 온실가스 통계 산정을 위해 활용된 활동자료는 통계작성지정기관이 생산한 국가승인통계를 우선적으로 활용하였다. 그 외 유관 협회(산업별 협회 등)에서 제공한 통계, 온실가스 목표관리제 및 배출권거래제 사업장의 명세서 등 다양한 출처로부터 수집되었다. 한편, 국가승인통계 외의 자료가 필요한 경우에는 산정기관의 자체 조사 통계, 청정개발체제(Clean Development Mechanism, 이하 CDM) 보고서 등도 보완적으로 활용하였다. 정부는 이러한 비공식 자료의 활용 시, 해당 자료의 원출처와 검증 절차를 확인하는 내부 품질관리(Internal QA/QC) 체계를 강화하고 있으며, 이를 통해 국가 온실가스 통계의 정확성과 신뢰성을 지속적으로 제고하고 있다.

7) 출처: Modalities, procedures and guidelines for the transparency framework for action and support referred to in Article 13 of the Paris Agreement(Decision 18/CMA.1)(UNFCCC, 2018)

8) 출처: 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories(IPCC, 2006)

9) 출처: 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories(IPCC, 2019)

※ 2019 Refinement는 2006 IPCC GL을 보완하는 지침으로 2006 IPCC GL의 과학적 기반을 유지하면서 최신의 과학적 진전 사항을 반영함으로써 산정 정밀도와 적용 가능성을 향상시키기 위해 발간됨

11) 예: 온실가스 배출량 = 활동자료 × 배출계수 × 온실가스별 지구온난화지수

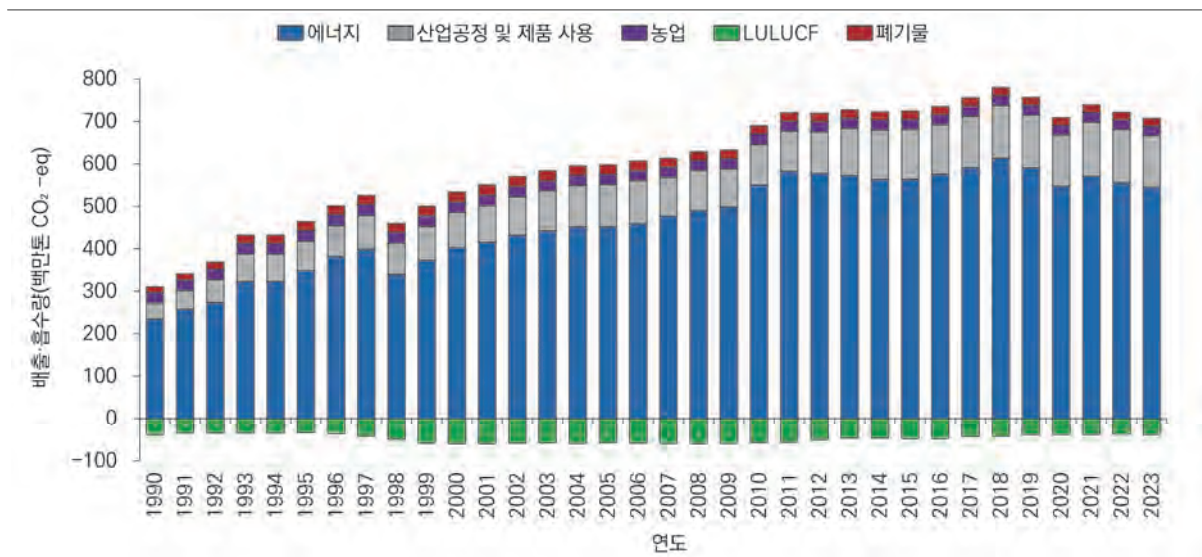
13) 출처: IPCC Fifth Assessment Report(IPCC, 2014)

14) 2006 IPCC GL은 농업과 LULUCF를 통합하여 AFOLU(Agriculture, Forestry and Other Land Use)로 명명함

총배출량

우리나라의 2023년 온실가스 총배출량(LULUCF 제외)¹⁵⁾은 707.2 백만톤 CO₂-eq로 1990년도 총배출량 310.6 백만톤 CO₂-eq에 비해 127.7% 증가하였고 전년도(2022년) 총배출량인 722.0 백만톤 CO₂-eq보다 2.1% 감소, 2018년 배출 정점(780.1 백만톤 CO₂-eq)에 비해서는 9.3% 감소하였다. 2023년 온실가스 순배출량(LULUCF 포함)¹⁶⁾은 667.8 백만톤 CO₂-eq로 1990년도 순배출량 271.5 백만톤 CO₂-eq보다 146.0% 증가하였고, 전년도(2022년) 순배출량 684.1 백만톤 CO₂-eq 대비 2.4% 감소, 2018년도 순배출량 738.6 백만톤 CO₂-eq보다 9.6% 감소하였다(그림 1, 표 1).

우리나라의 배출량은 1990년대 경제성장에 따라 증가 추세를 보였으나, 2000년대 이후 증가율이 점차 둔화하는 경향이 나타났고 2018년 배출 정점 도달 이후에는 감소세로 전환되었다. 2020년 코로나19로 인해 단기적으로 배출량이 전년 대비 6.3% 감소한 후 기저효과로 2021년 배출량이 증가하였으나 2022년, 2023년 배출량은 다시 감소하며 감소 추세를 이어가고 있다. 그 외 단기적으로 배출량 추이 변화가 있었던 해는 1998년과 2009년이다. 1998년에는 외환위기의 영향으로 온실가스 배출량이 전년 대비 12.6% 감소하였고, 이후에는 증가하는 추세를 보이다가(1999-2008년 연평균 증가율 2.6%) 2009년 경기 침체의 영향으로 전년 대비 증가율이 0.6%에 그쳤다.



| 그림 1 | 분야별 온실가스 배출량 및 흡수량(1990-2023)

15) 총배출량은 LULUCF 분야를 제외한 에너지, 산업공정 및 제품 사용, 농업, 폐기물 분야 배출량의 합계로 본 보고서의 국가 총배출량 비중, 증감률, 전 세계 배출량 순위 등의 분석에 활용한 값은 LULUCF 분야를 제외한 총배출량을 기준으로 함

16) 순배출량은 LULUCF 분야의 배출원 및 흡수원을 모두 포함한 전 분야(에너지, 산업공정 및 제품 사용, 농업, 폐기물, LULUCF) 배출량의 합계임

| 표 1 | 분야별 온실가스 배출량 및 증감률

(단위: 백만톤 CO₂-eq)

분야		1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023	증감률(%)	
									1990년 대비	전년 대비
에너지	배출량	234.5	402.5	549.7	613.7	570.5	555.6	545.0	132.4	-1.9
	비중(%)	75.5	75.4	79.7	78.7	77.1	77.0	77.1		
산업공정 및 제품 사용	배출량	37.8	83.1	96.0	123.8	127.8	125.5	121.5	221.4	-3.2
	비중(%)	12.2	15.6	13.9	15.9	17.3	17.4	17.2		
농업	배출량	24.8	24.6	24.5	23.3	22.9	22.8	22.5	-9.1	-1.1
	비중(%)	8.0	4.6	3.6	3.0	3.1	3.2	3.2		
LULUCF	배출량	-39.1	-60.4	-57.4	-41.6	-38.9	-37.9	-39.4	-*	-*
폐기물	배출량	13.4	23.4	19.7	19.3	18.3	18.1	18.2	35.2	0.3
	비중(%)	4.3	4.4	2.9	2.5	2.5	2.5	2.6		
총배출량 (LULUCF 제외)	배출량	310.6	533.6	690.0	780.1	739.5	722.0	707.2	127.7	-2.1
	비중(%)	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0		
순배출량 (LULUCF 포함)	배출량	271.5	473.2	632.6	738.6	700.6	684.1	667.8	146.0	-2.4

주: LULUCF 분야는 배출량과 흡수량을 모두 합한 순흡수량이므로 증감률 별도 표기하지 않음

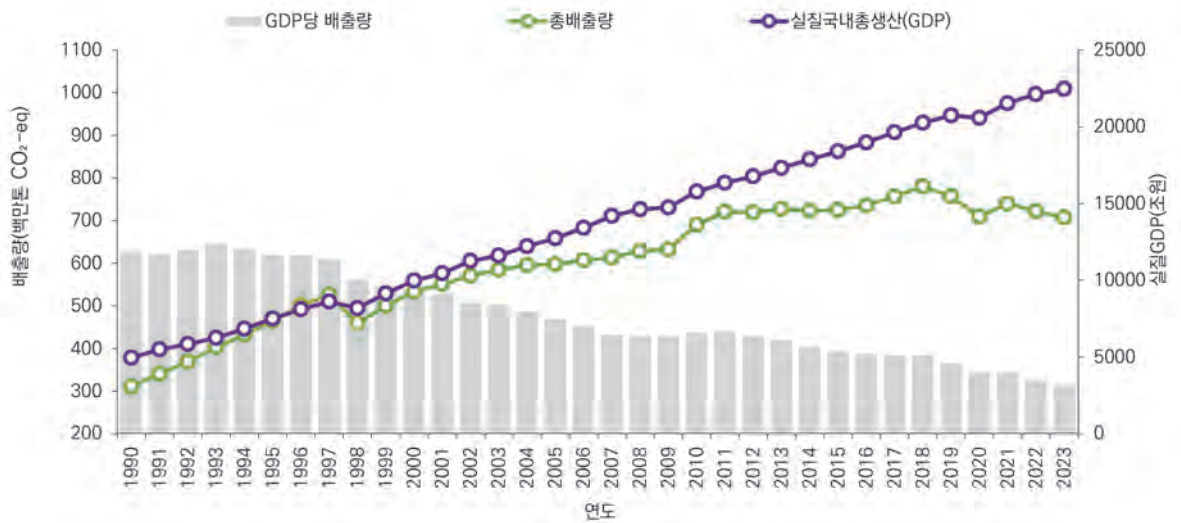
▣ 실질 국내총생산(GDP)¹⁷⁾ 대비 온실가스 총배출량

2023년도 GDP 당 온실가스 총배출량은 314.7 톤 CO₂-eq/10억원으로 1990년도 626.5 톤 CO₂-eq/10억원 대비 49.8%, 2022년도 314.7 톤 CO₂-eq/10억원 대비 3.6% 감소하였다.

우리나라 GDP 당 온실가스 총배출량은 점진적으로 감소하는 추이를 보이며, 2018년 배출정점 도달 이후에는 GDP는 증가하는 반면 배출량은 감소하는 현상이 나타났다. 1990년대에는 GDP 증가율과 온실가스 총배출량 증가율 모두 5-10%로 유사한 증가율을 보였고, 2000년대부터 온실가스 배출량 증가율(2000-2009년 연평균 증가율 1.9%)이 GDP 증가율(2000-2009년 연평균 증가율 4.4%)보다 낮아지기 시작하며 약세한 탈동조화(Weak Decoupling) 현상²⁰⁾이 나타나기 시작했다. 2010년 이후(2010-2017년) 연평균 경제 성장률이 2-3%대로 진입함과 동시에 연평균 총배출량 증가율은 1.4%로 낮아졌고, 총배출량 증가율이 감소세(-3.1%)로 전환된 2018년 이후 탈동조화가 이루어졌다. 다만 1998년 외환위기 회복기(1998-1999년), 2008년 경기 침체 회복기(2010-2011년), 코로나19 회복기(2020-2021년)와 같이 경제가 반등하는 시기에는 일시적으로 GDP와 배출량 모두 전년 대비 급등하는 현상이 관찰되었다.

17) 출처: 국민계정, 경제활동별 GDP 및 GNI(원계열, 실질, 2020년 기준)(한국은행, 2025)(접속일: 2025.12.29.)

20) 온실가스 탈동조화는 온실가스 배출량과 경제성장의 경로가 분리되는 현상을 의미함



| 그림-2 | 실질 국내총생산(GDP) 당 온실가스 총배출량(1990-2023)

| 표 2 | 실질 국내총생산(GDP) 당 온실가스 총배출량(1990-2023)

구분	1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023
총배출량 (백만톤 CO ₂ -eq)	310.6	533.6	690.0	780.1	739.5	722.0	707.2
GDP(천억원)	4,957.4	9,982.9	15,772.5	20,261.0	21,534.2	22,121.6	22,471.8
GDP 당 총배출량 (톤 CO ₂ -eq/10억원)	626.5	534.5	437.4	385.0	343.4	326.4	314.7

ES3 배출·흡수원별 배출량 산정 결과 및 추이

온실가스별 배출 추이

온실가스 중에서는 CO₂가 2023년 기준 총배출량의 87.9%로 가장 큰 비중을 차지하고, 불소계 온실가스가 5.7%(HFCs 4.76%, SF₆ 0.57%, PFCs 0.25%, NF₃ 0.17%), CH₄ 4.8%, N₂O가 1.5% 순으로 나타났다. CO₂ 배출량은 2018년 배출 정점 도달 이후 감소세로 전환되었으며 CH₄ 배출량은 에너지 분야 석탄 생산량 감소, 농업 분야 벼재배 면적의 감소 등으로 인해 1990년 이후 지속적으로 감소하였다. N₂O 배출량의 경우 2000년대 중반 큰 폭으로 감소 후 소폭 증감하는 추이를 보이고 있다. 2023년 불소계 온실가스는 1990년 대비 큰 증가율을 보이는데, 이는 1990년 대비 냉장과 냉방장치의 냉매로 주로 사용되는 HFCs와 반도체, 디스플레이 제조 공정에 주로 사용되는 PFCs, SF₆, NF₃의 사용량이 늘었기 때문이다.

| 표 3 | 온실가스별 배출량 및 증감률(1990-2023)

(단위: 백만톤 CO₂-eq)

온실가스		1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023	증감률(%)	
									1990년 대비	전년 대비
CO ₂	배출량	256.3	462.9	618.4	697.6	651.0	633.8	621.7	142.6	-1.9
	비중(%)	82.5	86.7	89.6	89.4	88.0	87.8	87.9		
CH ₄	배출량	46.8	44.6	40.6	37.1	35.3	35.1	34.2	-26.8	-2.3
	비중(%)	15.1	8.4	5.9	4.8	4.8	4.9	4.8		
N ₂ O	배출량	6.3	14.8	10.5	10.7	10.7	10.6	10.6	68.6	0.3
	비중(%)	2.0	2.8	1.5	1.4	1.4	1.5	1.5		
HFCs	배출량	1.0	6.0	7.6	23.6	30.3	33.1	33.6	3,128.6	1.7
	비중(%)	0.3	1.1	1.1	3.0	4.1	4.6	4.8		
PFCs ¹⁾	배출량	IE,NE,NO	2.5	2.5	3.9	4.7	4.1	1.8	-4.2	-55.8
	비중(%)	-	0.5	0.4	0.5	0.6	0.6	0.3		
SF ₆	배출량	0.2	2.8	10.0	6.2	5.8	4.0	4.0	2,279.5	1.6
	비중(%)	0.1	0.5	1.4	0.8	0.8	0.5	0.6		
NF ₃ ²⁾	배출량	IE,NO	IE,NO	0.4	1.0	1.7	1.5	1.2	262.1	-21.4
	비중(%)	-	-	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2		
총배출량 (LULUCF 제외)		310.6	533.6	690.0	780.1	739.5	722.0	707.2	127.7	-2.1
비중(%)		100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0		

주: 1) PFCs는 최초 통계가 수집된 1997년도를 기준으로 증감률 산정

2) NF₃는 최초 통계가 수집된 2008년도를 기준으로 증감률 산정

분야별 배출량 및 흡수량 추이

에너지

2023년 에너지 분야의 온실가스 총배출량은 545.0 백만톤 CO₂-eq로, 국가 총배출량의 77.1%를 차지하였다. 1990년 234.5 백만톤 CO₂-eq보다 132.4% 증가하였고, 전년 555.6 백만톤 CO₂-eq 보다는 1.9% 감소하였다.

에너지 분야 배출량은 1990년부터 1997년까지 증가하다가 1998년 경제위기로 감소한 이후, 경기회복 및 경제성장의 영향으로 2011년까지 다시 증가하였다. 이후 2014년까지 소폭의 감소세를 보이다가 다시 증가세로 전환되어 2018년 정점에 이르렀다. 2023년까지 에너지 분야는 코로나19의 영향에서 벗어나며 소폭 반등한 2021년을 제외하고는 장기적으로 감소추세를 보이고 있다.

에너지 분야 배출량은 크게 연료연소와 탈루로 구분되며, 2023년 기준 연료연소 부문(1.A.)은 99.4% (541.7 백만톤 CO₂-eq)로 에너지 분야의 대부분을 차지하였고 탈루(1.B.)는 0.6%(3.2 백만톤

CO₂-eq)를 차지하였다. 세부 부문별 비중은 에너지산업(1.A.1.)이 45.5%로 가장 크고, 그 다음으로 제조업 및 건설업(1.A.2.)이 27.0%, 수송(1.A.3.)이 18.0%, 기타(1.A.4.)가 8.3%, 미분류(1.A.5.)가 0.6%, 고체연료(1.B.1.)가 0.4%, 석유 및 천연가스(1.B.2.)가 0.2% 순으로 비중이 큰 것으로 나타났다.

| 표 4 | 에너지 분야 온실가스 배출량(1990-2023)

(단위: 백만톤 CO₂-eq)

부문	1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023	증감률(%)	
								1990년 대비	전년 대비
1.A. 연료연소	223.5	396.8	545.3	610.0	567.1	552.2	541.7	142.4	-1.9
1.A.1. 에너지산업	42.0	136.3	254.6	297.7	259.5	257.6	248.2	490.8	-3.7
1.A.2. 제조업 및 건설업	72.2	115.6	142.1	157.2	157.0	144.5	147.2	104.0	1.9
1.A.3. 수송	36.5	71.9	86.7	98.9	99.6	98.6	97.8	168.0	-0.8
1.A.4. 기타	72.6	70.5	58.9	53.0	48.0	48.5	45.5	-37.4	-6.1
1.A.5. 미분류	0.2	2.4	3.0	3.1	2.9	3.0	3.0	1,547.8	-0.8
1.B. 탈부	11.0	5.7	4.4	3.7	3.4	3.4	3.2	-70.5	-4.7
1.B.1. 고체연료	10.9	5.2	3.6	2.7	2.5	2.4	2.3	-78.6	-3.8
1.B.2. 석유 및 천연가스	0.1	0.5	0.9	1.0	0.9	1.0	0.9	1,348.5	-6.9
합계	234.5	402.5	549.7	613.7	570.5	555.6	545.0	132.4	-1.9

○ 산업공정 및 제품 사용

2023년 산업공정 및 제품 사용 분야의 온실가스 총배출량은 121.5 백만톤 CO₂-eq로, 국가 총배출량의 17.2%를 차지하였다. 1990년 37.8 백만톤 CO₂-eq보다 221.4% 증가하였고, 전년 125.5 백만톤 CO₂-eq보다는 3.2% 감소한 수치이다.

2023년 기준, 금속산업(2.C.), 비에너지 제품 및 용매 사용(2.D.), 오존층파괴물질의 대체물질 사용(2.F.), 기타 제품 제조 및 사용(2.G.) 부문의 배출량은 전년 대비 증가한 반면 광물산업(2.A.), 화학산업(2.B.), 전자산업(2.E.) 부문의 배출량은 감소하였다. 특히, 전자산업의 온실가스 저감효율 개선으로 전자산업(2.E.) 배출량이 전년 대비 47.0%(3.2 백만톤 CO₂-eq) 감소하였고 나프타 분해 시설(Naphtha Cracking Center, NCC) 공정의 원료투입량 감소로 화학산업 부문 배출량이 전년 대비 8.1%(2.5 백만톤 CO₂-eq) 줄어들었다.

2023년 산업공정 및 제품 사용 분야에서의 부문별 배출 비중의 경우, 오존층파괴물질의 대체물질 사용 부문(2.F.)이 27.5%로 가장 큰 비중을 차지하였다. 그 다음으로 화학산업 부문(2.B.)이 23.5%, 광물산업 부문(2.A.)이 23.1%, 금속산업 부문(2.C.) 19.6%, 전자산업 부문(2.E.)이 3.0%, 기타 제품 제조 및 사용 부문(2.G.)이 2.9%, 비에너지 제품 및 용매 사용 부문(2.D.)이 0.5% 순으로 나타났다.

산업공정 및 제품 사용 분야는 활동자료로 국가승인통계, 조합협회 자료, 사업장 조사자료, 사업장 명세서 등 다양한 출처의 자료를 사용한다. 특히 사업장 명세서는 제3자 검증이 완료된 자료로 관장 부처와 GIR이 ①국가통계로서의 완전성, ②시계열 일관성, ③산정방법론 및 계수의 적절성 등을 상세 검토 후 활용하게 된다. 사업장 명세서를 활용하는 하위 부문은 광물산업(2.A.), 화학산업

(2.B.), 금속산업(2.C.), 전자산업(2.E.), 기타 제품 제조 및 사용(2.G.) 부문이다. 사업장 명세서가 존재하지 않는 2006년 이전은 국내 산업과 관련한 조합·협회 자료와 국가승인통계, 사업장 조사자료 등을 활동자료로 사용하였다. 국가 온실가스 통계 기초자료로 사업장 명세서를 활용하는 것은 조합·협회 자료, 사업장 조사자료 등의 일부를 제3자 검증 완료한 사업장 보고 자료로 대체하였다는 데 의의가 있다.

표 5 | 산업공정 및 제품 사용 분야 온실가스 배출량(1990-2023)

(단위: 백만톤 CO₂-eq)

부문	1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023	증감률(%)	
								1990년 대비	전년 대비
2.A. 광물산업	16.4	26.1	28.3	30.5	29.0	28.4	28.0	71.0	-1.4
2.B. 화학산업	7.8	30.1	25.2	31.6	33.4	31.0	28.5	263.9	-8.1
2.C. 금속산업	13.1	18.5	21.4	26.6	22.4	23.0	23.8	81.9	3.2
2.D. 비에너지 제품 및 용매 사용	0.4	0.5	0.5	0.6	0.6	0.6	0.6	79.3	4.3
2.E. 전자산업	IE,NA,NO	3.3	8.8	8.7	8.8	6.8	3.6	62.8	-47.0
2.F. 오존층파괴물질의 대체물질 사용	IE,NO	2.5	7.4	23.1	29.5	32.3	33.4	2,129,432.3	3.3
2.G. 기타 제품 제조 및 사용	0.2	2.2	4.3	2.8	4.2	3.3	3.5	2002.4	8.7
합계	37.8	83.1	96.0	123.8	127.8	125.5	121.5	221.4	-3.2

주: 1) 전자산업 부문은 최초 통계가 수집된 1997년도를 기준으로 증감률을 계산하였다.

2) 오존층파괴물질의 대체물질 사용 부문은 최초 통계가 수집된 1992년도를 기준으로 증감률을 계산함

○ 농업

2023년도 농업 분야 온실가스 총배출량은 약 22.5 백만톤 CO₂-eq로 국가 총배출량의 약 3.2%를 차지하고 있으며, 2022년 농업 배출량은 1990년 대비 9.1%, 전년 대비 1.1% 감소하였다.

농업 분야의 세부 배출원별 배출량의 전년 대비 증감을 살펴보면, 2023년 벼재배 부문(3.C.)의 배출량은 벼재배 면적 감소와 물관리 방법 비율 감소의 영향으로 전년 대비 3.3%(0.2 백만톤 CO₂-eq) 줄어들었다. 벼재배 면적(3년 평균)은 0.8% 감소하였으며, 상시답수 비율은 2.1%p 감소하였다. 장내발효 부문(3.A.) 배출량은 주요 축종의 사육두수 증가 영향으로 전년 대비 0.6%(0.04 백만톤 CO₂-eq) 증가하였다. 축종별로는 한·육우 사육두수가 0.07%²⁴⁾, 말 사육두수가 0.9%²⁵⁾ 증가하였다.

2023년 농업 분야의 부문별 배출량 비중은 벼재배(3.C.) 30.5%, 장내발효(3.A.) 29.9%, 가축분뇨처리(3.B.) 26.5%, 농경지토양(3.D.) 12.5%, 요소사용(3.H.) 0.4%, 작물잔사소각(3.F.) 0.1%, 석회사용(3.G.) 0.01%의 순으로 나타났다.

24) 자료: 한·육우 사육두수 3,693 천마리(2022년) → 3,695 천마리(2023년)(가축동향조사(국가데이터처, 2024))

25) 자료: 말 사육두수 27 천마리(2022년) → 27.3 천마리(2023년)(농림축산식품통계연보(농림축산식품부, 2024))

| 표 6 | 농업 분야 온실가스 배출량(1990-2023)

(단위: 백만톤 CO₂-eq)

부문	1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023	증감률(%)	
								1990년 대비	전년 대비
3.A. 장내발효	3.7	4.3	5.6	5.9	6.5	6.7	6.7	80.8	0.6
3.B. 가축분뇨처리	3.3	4.7	5.4	5.9	5.9	6.0	6.0	81.8	-0.2
3.C. 벼재배	14.1	12.0	10.6	8.5	7.4	7.1	6.9	-51.1	-3.3
3.D. 농경지토양	3.2	3.2	2.8	2.8	2.9	2.9	2.8	-12.2	-1.0
3.F. 작물잔사소각	0.06	0.06	0.05	0.04	0.03	0.03	0.01	-73.3	-43.0
3.G. 석회사용	0.003	0.003	0.003	0.003	0.002	0.002	0.003	6.2	8.7
3.H. 요소사용	0.43	0.28	0.12	0.12	0.11	0.09	0.09	-78.7	0.5
합계	24.8	24.6	24.5	23.3	22.9	22.8	22.5	-9.1	-1.1

○ 토지이용, 토지이용 변화 및 임업

2023년 LULUCF 분야의 순흡수량은 39.4 백만톤 CO₂-eq로 1990년 대비 0.3 백만톤 CO₂-eq, 전년 대비 1.5 백만톤 CO₂-eq 증가하였다.

2023년 LULUCF 분야의 흡수원 중 산림지 부문(4.A.)의 순흡수량은 41.0 백만톤 CO₂-eq으로 LULUCF 분야의 대부분을 차지하였다. 그 다음으로 정주지 부문(4.E.)에서 1.2 백만톤 CO₂-eq, 수확된 목재제품 부문(4.G.)에서 0.4 백만톤 CO₂-eq를 흡수한 것으로 나타났다. 2022년 LULUCF 분야 배출원 중 농경지 부문(4.B.)의 배출량은 2.9 백만톤 CO₂-eq, 습지 부문(4.D.)은 0.4 백만톤 CO₂-eq, 초지 부문(4.C.)의 0.008 백만톤 CO₂-eq으로 나타났다.

LULUCF 분야에서 가장 많은 비중을 차지하는 산림지 부문(4.A.)은 지속적인 재조림 및 산림 경영의 결과로 1995년 이후 순흡수량이 증가하기 시작하여 2008년에 최대치인 61.5 백만톤 CO₂-eq를 기록하였다. 그러나 2010년대부터 최근까지 산림의 노령화로 인한 연간 순생장량 감소와 산림면적 감소에 의해 순흡수량이 감소 추세를 보인다. 2020-2023년은 임목 바이오매스에 의한 흡수량이 비슷한 수준을 유지하고 있으며, 2023년은 산불로 인한 배출량이 전년 대비 1.6 백만톤 CO₂-eq 감소하였다. 그 결과, 2023년의 산림지 부문(4.A.) 순흡수량은 전년 대비 1.7 백만톤 CO₂-eq 증가하였다.

| 표 7 | 토지이용, 토지이용 변화 및 임업 분야 온실가스 배출량 및 흡수량(1990-2023)

(단위: 백만톤 CO₂-eq)

부문	1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023	증감량	
								1990년 대비	전년 대비
4.A. 산림지	-38.2	-60.5	-58.8	-42.6	-40.4	-39.3	-41.0	-0.3	-1.7
4.B. 농경지	-0.03	1.8	3.0	2.6	2.9	2.9	2.9	2.9	0.004
4.C. 초지	-0.67	-0.74	-0.21	-0.04	-0.01	0.001	0.008	0.7	0.007
4.D. 습지	0.34	0.39	0.37	0.39	0.40	0.38	0.39	0.04	0.01
4.E. 정주지	-0.7	-0.9	-1.1	-1.2	-1.2	-1.2	-1.2	-0.5	0.005
4.G. 수확된 목재제품	0.2	-0.5	-0.6	-0.7	-0.6	-0.6	-0.4	-0.7	0.1
합계(순흡수량)	-39.1	-60.4	-57.4	-41.6	-38.9	-37.9	-39.4	-0.3	-1.5

○ 폐기물

2023년 폐기물 분야의 온실가스 배출량은 18.2 백만톤 CO₂-eq으로, 국가 총배출량의 2.6%를 차지하였으며, 1990년 대비 35.2%, 전년 대비 0.3% 증가하였다. 폐기물 분야의 온실가스 배출량은 1990년부터 2001년 배출 정점에 이르기까지 전반적으로 증가하다가 이후 꾸준히 감소 추세를 보이고 있다. 이러한 추세는 가장 큰 배출량 비중을 차지하는 매립 부문(5.A.)의 배출량과 유사한 양상을 보인다. 매립 부문(5.A.)을 제외한 나머지 부문의 경우 1990년 이후 지속적으로 배출량이 증가하다가 2000년대 중반 이후부터는 일정한 수준을 유지하고 있는 것으로 나타났다.

2023년 폐기물 분야의 부문별 배출량 비중은 폐기물매립(5.A.)이 62.3%, 폐기물소각 및 노천소각(5.C.)이 27.3%, 하·폐수처리(5.D.)가 8.5%, 고형폐기물의 생물학적처리(5.B.)가 1.9% 순으로 나타났다.

폐기물 분야 배출량 중 가장 큰 부문을 차지하는 폐기물매립 부문(5.A.)의 온실가스 배출량은 1997년에 최고치인 18.1 백만톤 CO₂-eq에 도달한 이후 점진적으로 감소하는 경향을 보였다. 2005년 이후 음식물류 폐기물 직매립 금지 제도가 시행됨에 따라 음식물류 폐기물이 별도로 재활용 처리(퇴비화, 에너지화)되면서 배출량이 지속적으로 감소하고 있다.

폐기물소각 및 노천소각 부문(5.C.)의 경우, 1990년 대비 785.4%(4.4 백만톤 CO₂-eq) 증가하며 가장 큰 배출량 증가세를 보였다. 이는 인구증가와 경제성장으로 인해 폐기물소각 처리량이 증가하였기 때문이다. 하지만 2018년에 「자원순환기본계획」³⁰⁾이 수립되면서 폐기물 재활용이 늘어나고 생활 폐기물의 소각열 회수를 활용한 발전량 또한 꾸준히 증가하여 배출량이 감소추세를 보이고 있다.

30) 1986년 「폐기물관리법」이 제정되어 기존의 「환경보전법(1977년)」과 「오물청소법(1961년)」으로 이원화되어있던 폐기물 관리체계가 일원화됨. 이후 1992년 「자원의 절약과 재활용 촉진에 관한 법률」이 제정되어 폐기물 처리 중심에서 감량화와 재활용에 역점을 두는 방향으로 폐기물 관리정책의 지향점이 전환됨. 2008년 동법이 개정되면서 폐기물관리정책의 방향이 단순 재활용 중심에서 발생억제와 자원화 확대로 전환되었음. 한편, 정부는 「자원순환기본법(2016년)」 등에 따라 자원순환목표를 설정하고 소요자원 조달 및 투자계획 수립 등을 주요 내용으로 하는 자원순환기본계획을 수립하고 시행계획을 마련함. 상기와 같은 법 및 계획을 기반으로 폐기물 발생을 억제하고 발생된 폐기물의 순환이용 및 적절한 처분을 촉진, 자원순환사회를 만들기 위한 노력을 이행하고 있음

| 표 8 | 폐기물 분야 온실가스 배출량(1990-2023)

(단위: 백만톤 CO₂-eq)

부문	1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023	증감률(%)	
								1990년 대비	전년 대비
5.A. 폐기물매립	12.1	17.3	13.8	12.3	11.8	11.6	11.3	-6.9	-2.5
5.B. 고형폐기물의 생물학적 처리	NE	0.03	0.08	0.26	0.27	0.31	0.35	8,097.9 ¹⁾	11.9
5.C. 폐기물소각 및 노천소각	0.6	4.3	4.0	5.1	4.7	4.5	5.0	785.4	10.8
5.D. 하·폐수처리	0.7	1.8	1.9	1.7	1.6	1.7	1.5	111.8	-10.6
합계	13.4	23.4	19.7	19.3	18.3	18.1	18.2	35.2	0.3

주: 1) 생물학적처리 부문은 최초 통계가 수집된 1994년도를 기준으로 증감률 산정

ES4 기타 정보

MPGs 제51항·제52항에 따라 인간활동으로 발생한 일산화탄소(CO), 질소산화물(NO_x), 비메탄 휘발성 유기화합물(NMVOC), 황산화물(SO_x)과 같은 전구체 물질과 간접 온실가스(indirect CO₂·N₂O)는 보고 권고대상으로, 향후 BTR과 NIR에 각 배출·흡수원별 해당 전구체 물질 및 간접온실가스 배출량 산정결과를 포함할 계획이다.

ES5 주요 배출원 분석(Key Categories Analysis) 결과

MPGs 제25항에 따라 배출량 및 배출량 추세 측면에서 국가 온실가스 배출량에 큰 영향력을 미치는 주요 배출원을 분석하였다. 주요 배출원 산정 방법으로 2006 IPCC GL의 방법론 1(Approach 1)을 적용하였고 LULUCF 분야를 포함한 경우와 포함하지 않은 경우의 수준평가(Level Assessment)와 추세평가(Trend Assessment)를 수행하였다.

주요 배출원 분석은 UNFCCC의 ETF Tool을 활용하여, LULUCF 분야를 포함한 94개³⁵⁾의 배출원 및 흡수원을 세분화한 후, 1990년과 2023년을 기준으로 국가 온실가스 배출량 및 흡수량의 상위 95%에 해당하는 배출원 및 흡수원을 2023년의 주요 배출원으로 판단하였다.

수준평가는 세부 항목의 배출·흡수량이 국가 온실가스 총배출량에 기여하는 정도를 의미한다. 수준 평가 산정을 위해서 2006 IPCC GL에 따라 국가 온실가스 통계에 대한 총기여도에서 세부 항목의 기여도가 차지하는 비중을 계산하였다(2006 IPCC GL 제1권 식 4.1). 국가 통계에서 음수로 표현되는 흡수량은 절댓값을 적용하여 총기여도 및 항목 기여도를 산정하였다.

35) UNFCCC의 ETF Tool 분석에 따라 가스별 94개로 배출원 및 흡수원을 구분하였으며, 주요 카테고리 분석 결과 역시 ETF Tool의 분석 결과에 따름

추세평가는 세부 항목의 기준연도 배출량 비중과 해당 항목의 기준연도 대비 증감률 차이를 고려하여 산정하였으며(2006 IPCC GL 제1권 식 4.2), 세부 항목의 기준연도 배출량이 0인 경우, 2006 IPCC GL 제1권 식 4.3을 적용하였다.

LULUCF 분야를 포함한 경우의 2023년 수준평가 결과, 주요 배출원은 23개로 에너지산업: 고체연료(CO₂), 제조업 및 건설업: 고체연료(CO₂), 도로수송(CO₂), 에너지산업: 기체연료(CO₂), 산림지로 유지된 산림지(CO₂) 등으로 나타났다.

1990년의 수준평가 결과에 따른 주요 배출원은 총 21개로 2022년 수준 평가와 비교하였을 때 냉장 및 냉방(F-gases), 제조업 및 건설업: 기체연료(CO₂), 제조업 및 건설업: 기타화석연료(CO₂), 폐기물소각 및 노천소각(CO₂), 석회생산(CO₂), 전자산업(F-gases), 기타 제품제조 및 소비(F-gases) 등이 차이가 있었다. 해당 부문은 1990년에는 주요 배출원이 아니었으나, 2023년에는 주요 배출원에 포함된 경우이다.

1990년 대비 2023년에 대한 추세평가 결과, 에너지산업: 고체연료(CO₂), 탈루: 고체연료(CO₂), 제조업 및 건설업: 액체연료(CO₂), 기타 분야: 액체연료(CO₂), 산림지로 유지된 산림지(CO₂) 등이 주요 배출원으로 분석되었다.

| 표 9 | 주요 배출원 분석 결과(LULUCF 포함)

CRT 코드	IPCC 온실가스 배출·흡수원	온실 가스	LULUCF 포함			2023년 배출량 (kt CO ₂ -eq.)	Tier1 수준평가 (L _{x,t})	Tier1 수준평가 비중 누계
			2023년 수준평가	1990년 수준평가	추세평가			
1.A.1.	에너지산업: 고체연료	CO ₂	•	•	•	159,568	0.212	0.212
1.A.2.	제조업 및 건설업: 고체연료	CO ₂	•	•	•	103,789	0.138	0.349
1.A.3.b.	도로수송	CO ₂	•	•	•	92,058	0.122	0.472
1.A.1.	에너지산업: 기체연료	CO ₂	•	•	•	67,876	0.090	0.562
4.A.1.	산림지로 유지된 산림지	CO ₂	•	•	•	-41,331	0.055	0.616
2.F.1.	냉장 및 냉방	F-gases	•		•	29,714	0.039	0.656
1.A.4.	기타: 기체연료	CO ₂	•		•	29,380	0.039	0.695
2.B.8.	석유화학제품 및 카본블랙 생산	CO ₂	•	•	•	28,078	0.037	0.732
2.C.1.	철강생산	CO ₂	•	•	•	23,519	0.031	0.763
2.A.1.	시멘트생산	CO ₂	•	•	•	22,737	0.030	0.793
1.A.2.	제조업 및 건설업: 기체연료	CO ₂	•		•	20,936	0.028	0.821
1.A.1.	에너지산업: 액체연료	CO ₂	•	•	•	18,077	0.024	0.845
1.A.2.	제조업 및 건설업: 액체연료	CO ₂	•	•	•	14,650	0.019	0.865
1.A.4.	기타: 액체연료	CO ₂	•	•	•	14,087	0.019	0.883
5.A.	폐기물매립	CH ₄	•	•	•	11,312	0.015	0.898

CRT 코드	IPCC 온실가스 배출·흡수원	온실 가스	LULUCF 포함			2023년 배출량 (kt CO ₂ -eq.)	Tier1 수준평가 (L _{x,t})	Tier1 수준평가 비중 누계
			2023년 수준평가	1990년 수준평가	추세평가			
1.A.2.	제조업 및 건설업: 기타화석연료	CO ₂	•		•	7,174	0.010	0.908
3.C.	벼재배	CH ₄	•	•	•	6,879	0.009	0.917
3.A.	장내발효	CH ₄	•	•		6,739	0.009	0.926
5.C.	폐기물소각 및 노천소각	CO ₂	•		•	4,742	0.006	0.932
2.A.2.	석회생산	CO ₂	•		•	4,110	0.005	0.938
2.E.	전자 산업	F-gases	•		•	3,624	0.005	0.942
3.B.	가축분뇨처리	CH ₄	•	•		3,478	0.005	0.947
2.G.	기타 제품제조 및 소비	F-gases	•		•	3,386	0.004	0.952
4.B.2.	타토지에서 전용된 농경지	CO ₂			•	2,863	-	-
1.B.1.	고체연료	CH ₄		•	•	2,327	-	-
3.D.1.	직접배출	N ₂ O		•	•	1,621	-	-
1.A.3.d.	국내해운: 액체연료	CO ₂		•	•	1,367	-	-
1.A.4.	기타: 고체연료	CO ₂		•	•	721	-	-
1.A.4.	기타: 고체연료	CH ₄		•	•	62	-	-
2.B.10.	기타	CO ₂			•	1	-	-

주: 1) 상위 95%에 해당하는 분야를 •로 표기

2) 2023년 배출량에 대한 수준 평가 순위에 따라 작성한 표이며, 이해를 돕기 위해 1990년 수준평가 및 추세평가 결과를 동일 표에 함께 표기함

3) F-gases는 HFCs, PFCs, SF₆, NF₃의 합

PART

01

서론

- 1.1 온실가스 인벤토리 및 기후변화 배경 정보
- 1.2 제도적 체계
- 1.3 방법론 및 자료 출처
- 1.4 주요 카테고리 분석 결과
- 1.5 품질 보증 및 관리(QA/QC)
- 1.6 통계 완전성
- 1.7 통계 단위

제 1 장 서론

1.1 온실가스 인벤토리 및 기후변화 배경 정보

1.1.1 기후변화 배경 정보

우리나라의 연평균 기온은 지난 110여 년간 꾸준히 상승해왔으며, 최근 30년(1991-2020)의 연평균 기온은 과거 30년(1912-1940) 대비 약 1.6℃ 상승하였다. 2024년의 연평균 기온은 14.5℃로, 평년(1991-2020) 대비 1.9℃ 높아 역대(1973년 이래¹⁾) 최고치를 기록했으며, 최근 10년(2015-2024년) 중 7개의 해가 역대 기온 순위 상위 10위에 포함되는 등 기온 상승세가 뚜렷하다²⁾. 이와 함께, 강수량 역시 변동성이 커졌고, 집중호우, 폭염, 열대야, 겨울철 기온 변동폭 확대 등 기후변화로 인한 극한 기상 현상이 더욱 빈번하게 나타나고 있다. 기후 변화 분석에 따르면 21세기 후반기(2081-2100) 연평균 기온은 2000-2019년 대비 2.3-6.3℃ 상승할 것으로 예측되고 있다³⁾.

○ 국제적 대응 및 국내 정책 발전

우리나라는 1993년 유엔기후변화협약(United Nations Framework Convention on Climate Change, 이하 UNFCCC)에 가입하여 국제사회의 기후변화 대응 노력에 동참해왔다. 2015년 파리협정⁴⁾ 체결에 맞춰 자발적 국가결정기여(Intended Nationally Determined Contributions, 이하 INDC)를 UNFCCC에 제출하였으며, 2020년에는 ‘2050 탄소중립’을 국가 비전으로 공식 선언했다. 2021년에는 국가 온실가스 감축목표(National Determined Contribution, 이하 NDC)를 상향 조정한 NDC 상향안을 발표하고 UNFCCC에 제출하였다.

1) 기상관측망을 전국적으로 대폭 확충한 시기인 1973년부터 2024년까지의 순위임

2) 출처: 「한국 기후위기 평가보고서 2025」(기상청, 2025)

3) 출처: 남한상세 기후변화 전망보고서: SSP 4종 시나리오에 따른 기후변화 전망*(국립기상과학원, 2022)

* IPCC 6차 평가보고서(AR6)의 최신 온실가스 경로(Shared Socioeconomic Pathways, 이하 SSP)에 따라 남한상세 기후변화 시나리오(1km 해상도)로 SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, SSP5-8.5를 개발하고 시나리오별 2081-2100년의 연평균 기온 상승 전망 결과를 제시함

· SSP1-2.6 : 재생에너지 기술 발달로 화석연료 사용이 최소화되고 지속가능한 경제성장이 진행됨을 가정

· SSP2-4.5 : 기후변화 완화 및 사회경제 발전 정도가 중간 단계임을 가정

· SSP3-7.0 : 기후변화 완화 정책에 소극적이며 기술개발이 늦어 기후변화에 취약한 사회구조를 가정

· SSP5-8.5 : 산업기술의 빠른 발전에 중점을 두어 화석연료 사용이 높고 도시 위주의 무분별한 개발 확대를 가정

4) 파리협정(Paris Agreement)은 2015년 12월 프랑스 파리에서 열린 제21차 유엔기후변화협약 당사국총회(COP21)에서 채택된 전 세계 기후변화 대응을 위한 국제협정이다. 약 195개국이 참여해 2016년 11월 발효되었으며, 산업화 이전 대비 지구 평균기온 상승을 2℃보다 훨씬 낮은 수준으로 유지하고, 1.5℃ 이하로 억제하기 위해 노력하는 것을 목표로 함. 우리나라는 2016년 11월 3일 국회 비준 동의를 거쳐, 2016년 12월 2일부터 공식적인 당사국 자격을 가지게 됨

같은 해 9월, 「기후위기 대응을 위한 탄소중립·녹색성장 기본법(이하 탄소중립기본법)」과 시행령을 제정하여 국가 비전과 NDC 상향안을 법적으로 명문화하였다. 이 법은 2050년 탄소중립 실현과 2030년까지 2018년 대비 온실가스 배출량을 35% 이상 감축하는 목표를 명시하고, 다양한 온실가스 감축 정책 수단을 마련하였다. 2025년 12월에는 2035년 국가 온실가스 감축목표(2018년 대비 53-61% 감축)를 수립하여 UNFCCC에 제출하였다.

○ 이행계획 및 분야별 정책 추진

탄소중립기본법 제정 이후, 정부는 2030 NDC 및 탄소중립 달성을 위해 20년 계획기간의 5년 연동 법정계획인 「국가 탄소중립 녹색성장 기본계획(2023)(이하 기본계획)」을 수립하였다. 이 계획은 중장기 분야별·연도별 감축목표와 이행대책을 포함하고 있다. 이를 바탕으로 전 분야에서 온실가스를 다배출하는 업체 및 사업장을 대상으로 배출권거래제를 고도화하고, 무탄소 전원 확대, 건물 에너지 효율기준 강화, 농업·축산업·수산업 분야의 저탄소 기술 보급, 자원순환 강화를 통한 전(全)주기 폐기물 감량, 산림·해양 흡수원의 복원 및 확대, 도시숲과 같은 신규 흡수원 확대 등 분야별 온실가스 감축을 위한 다양한 정책을 시행하고 있다. 또한, 지방자치단체별로도 탄소중립·녹색성장 기본계획을 수립하여 지역 맞춤형 기후변화 대응 정책을 추진하고 있다.

1.1.2 온실가스 통계⁵⁾ 배경 정보

파리협정에 따라 기존 국가 온실가스 통계 산정·보고·검증 체계(Measurement, Reporting, Verification, 이하 MRV)⁶⁾⁷⁾가 강화된 투명성 체계(Enhanced Transparency Framework, 이하 ETF)로 전환되었다. 이에 따라 모든 당사국은 공통보고표(Common Reporting Tables, 이하 CRT)와 국가 온실가스 인벤토리 보고서(National Inventory Document, 이하 NID)를 별도의 보고서 또는 격년투명성보고서(Biennial Transparency Reports, 이하 BTR)에 포함하여 UNFCCC에 격년 제출하여야 한다⁸⁾.

5) 「국가 온실가스 인벤토리」는 인간의 활동에 의해 인위적으로 발생하는 온실가스 배출·흡수원 목록에 대해, 국가별로 정량화한 온실가스 배출·흡수량 수치로(IPCC), 탄소중립기본법에서는 온실가스 통계로 정의하고 있음. 본 보고서에서는 온실가스 통계로 명칭을 통일하되, 「국가 온실가스 인벤토리 보고서(National Inventory Report)」는 국제보고서 명명법이므로 인벤토리로 명시

6) 우리나라는 유엔기후변화협약에 따른 비부속서 I(Non-Annex I) 국가로 CBDR(Common But Differentiated Responsibilities) 원칙에 따라 국가보고서(National Communications, 이하 NC)와 격년갱신보고서(Biennial Update Report, 이하 BUR)를 UNFCCC에 제출함
* NC1(1998.2), NC2(2003.12), NC3(2012.3), NC4(2019.11)와 BUR1(2014.12), BUR2(2017.11), BUR3(2019.11), BUR4(2021.12)

7) BUR4차(2021)까지 우리나라의 온실가스 통계 산정·보고·검증 기준은 UNFCCC의 NC 작성 가이드라인에 따라, 국내에서 발생한 이산화탄소, 메탄, 아산화질소, 수소불화탄소, 과불화탄소, 육불화황의 배출·흡수량에 대해 1996 IPCC GL의 산정방법론을 적용하였으며, 일부 부문에는 IPCC 우수실행지침 2000, IPCC 우수실행지침 LULUCF, 2006 IPCC GL에 따른 산정방법을 적용*. 지구온난화지수에는 제2차 IPCC 평가 보고서상의 지수를 반영함

* Guidelines for the preparation of national communications from Parties not included in Annex I to the Convention(Decision 17/CP.8)
Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories(IPCC, 1996)
Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories(IPCC, 2000)
Good Practice Guidance for Land Use, Land-use Change and Forestry(IPCC, 2003)

8) 출처: Modalities, procedures and guidelines for the transparency framework for action and support referred to in Article 13 of the Paris Agreement(Decision 18/CMA.1)(UNFCCC, 2018)

○ 국가 온실가스 통계 보고 대상 온실가스

본 보고서는 ETF의 이행을 위한 투명성 체계 방식·절차·지침(Modalities, Procedures and Guidelines, 이하 MPG) 제48항·제49항의 규정에 따라 국내에서 배출한 7개의 온실가스(이산화탄소(CO₂), 메탄(CH₄), 아산화질소(N₂O), 수소불화탄소(HFCs), 과불화탄소(PFCs), 육불화황(SF₆), 삼불화질소(NF₃))에 대한 배출·흡수량 정보를 담고 있다.

○ 국가 온실가스 통계 산정기준

국가 온실가스 통계 산정은 MPG 제17항·20항에 따라 2006 기후변화에 관한 정부간 협의체 지침(2006 Intergovernmental Panel on Climate Change Guidelines, 이하 2006 IPCC GL)⁹⁾을 기준으로 작성되었으며, 일부 배출원에는 2019 Refinement(2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, 이하 2019 Refinement)¹⁰⁾의 최신 기준을 적용하였다(1.3장 참조).

또한 각각의 온실가스가 지구온난화에 미치는 영향을 정량화하기 위해, MPG 제37항에 따라 제5차 IPCC 평가보고서¹¹⁾의 100년 기준의 지구온난화지수(Global Warming Potential, 이하 GWP)를 적용하였다(1.7장 참조).



| 그림 1-1 | 기후변화협약 및 파리협정에 따른 국가 온실가스 통계 산정·보고 기준

자료: Anna Schreyögg(2022). Good Practices in GHG Inventories for the Waste Sector(Figures2 편집·번역), Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit(GIZ) GmbH.

9) 출처: 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories(IPCC, 2006)

10) 출처: 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories(IPCC, 2019)

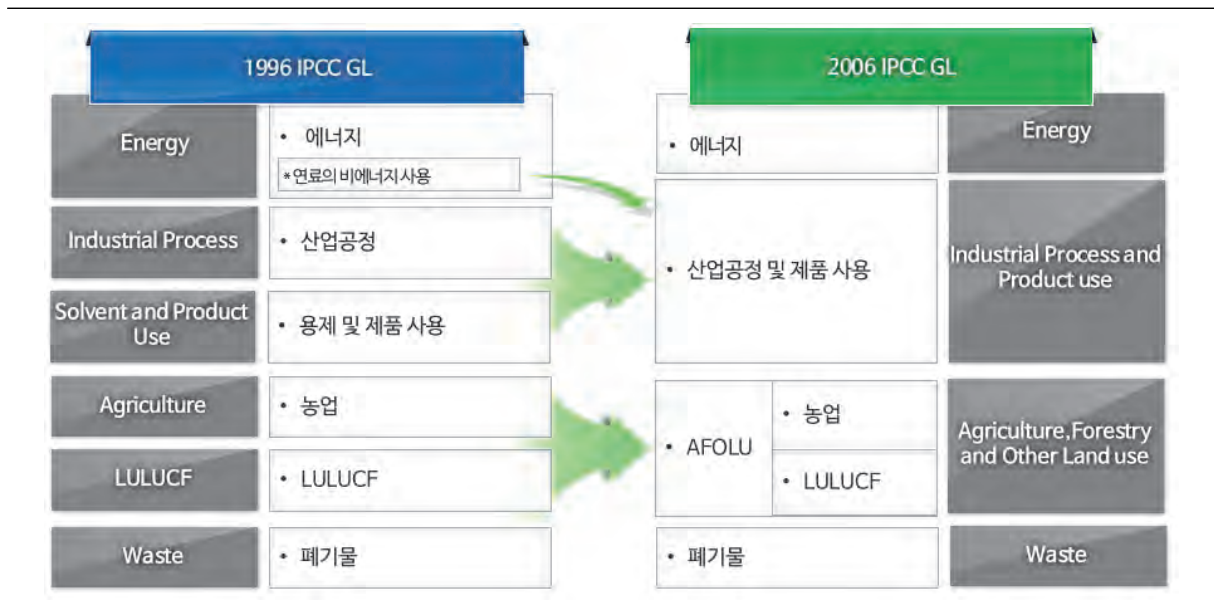
※ 2019 Refinement는 2006 IPCC GL을 보완하는 지침으로 2006 IPCC GL의 과학적 기반을 유지하면서 최신의 과학적 진전 사항을 반영함으로써 산정 정밀도와 적용 가능성을 향상하기 위해 발간됨

11) 출처: IPCC Fifth Assessment Report(IPCC, 2014)

○ 국가 온실가스 통계 산정 분야 및 보고연도

국가 온실가스 통계는 MPGs 제50항의 규정에 따라 에너지, 산업공정 및 제품 사용, 농업, 토지 이용·토지이용 변화 및 임업(Land Use, Land-Use Change and Forestry, 이하 LULUCF), 폐기물, 총 5개 분야로 구분하여 산정하고 있다.¹²⁾

본 보고서의 국가 온실가스 통계는 1990년부터 2023년까지 총 34개 연도에 걸쳐 산정되었으며, 각 5개 분야별 배출량 및 흡수량이 포함되어 있다.



| 그림 1-2 | IPCC 지침에 따른 배출량 산정·보고 분야

12) 2006 IPCC GL에서는 농업과 LULUCF를 통합하여 AFOLU(Agriculture, Forestry and Other Land Use) 분야로 명명함

1.2 제도적 체계

1.2.1 국가 담당조직

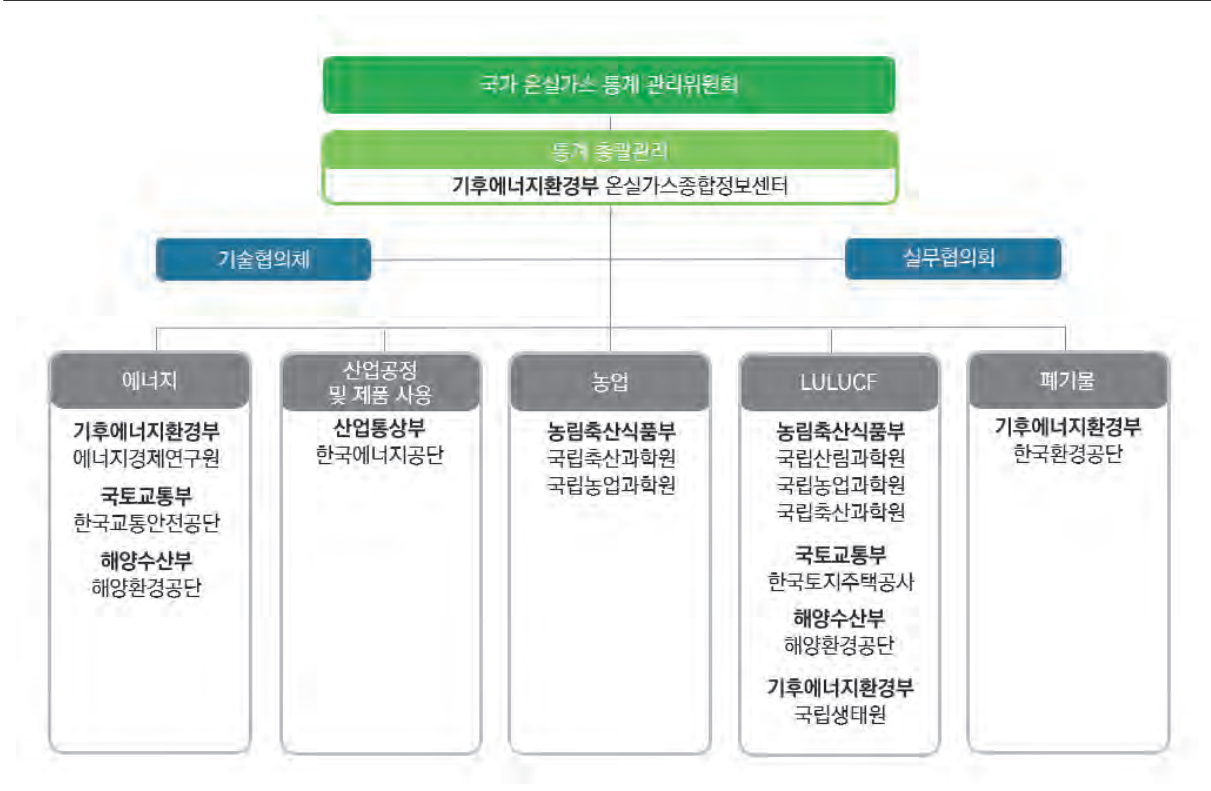
국가 온실가스 통계 검증 및 종합정보관리체계를 구축·운영하기 위하여 2010년 환경부 산하에 온실가스종합정보센터(Greenhouse Gas Inventory and Research Center of Korea, 이하 GIR)를 설립하였다. GIR은 국가 온실가스 통계 총괄관리 계획 수립, 국가 온실가스 통계 산정·보고·검증 지침(이하 MRV 지침) 마련, 국가 온실가스 통계의 검증 및 보고서의 취합·작성, 배출·흡수계수의 검증, 국가 온실가스 통계 보고 시스템의 운영·관리, 국제협력 등의 업무를 수행한다. 또한, GIR은 국가 온실가스 통계의 체계적 관리를 위하여 세 가지 협의체·위원회를 구성 및 운영을 지원한다. 이들 협의체·위원회는 국가 온실가스 통계 관리위원회(이하 관리위원회), 국가 온실가스 통계 실무협의회(이하 실무협의회), 국가 온실가스 통계 기술협의체(이하 기술협의체)로 구분된다.

국가 온실가스 통계 구성 기구별 역할을 살펴보면 기술협의체는 각 부처에서 추천한 국내 온실가스 통계 전문가로 구성된 조직으로, 온실가스 통계, 국가 고유 배출·흡수계수 등에 관한 기술적 자문을 제공한다.

실무협의회는 MRV 지침의 제·개정, 배출·흡수계수의 개발·검증 등을 위한 관계 부처간 협의 기구로 위원장은 GIR 센터장이며, 위원은 국무조정실, 농림축산식품부, 산업통상부, 기후에너지환경부, 국토교통부, 해양수산부, 농촌진흥청, 산림청, 국가데이터처의 과장급 공무원으로 구성된다.

관리위원회는 MRV 지침의 제·개정, 배출·흡수계수의 개발·검증 등 국가 온실가스 통계 관련 주요 사항을 최종적으로 심의·의결하는 기구로, 위원장은 기후에너지환경부 차관이며, 위원은 국무조정실, 농림축산식품부, 산업통상부, 기후에너지환경부, 국토교통부, 해양수산부, 국가데이터처의 국장급 공무원 및 학식과 경험이 풍부한 민간 전문가들로 구성된다. GIR은 간사 기관으로서 관리위원회의 업무를 지원한다.

국가 온실가스 통계 산정과 관련하여 관계 부처는 실무협의회와 관리위원회를 통해 협력체계를 구성하며, 각 전문 분야별 온실가스 통계의 작성·관리를 총괄하는 관장기관의 역할을 수행하고 있다. 관장기관은 해당 분야 통계에 전문성을 갖춘 산하·소속 기관을 산정기관으로 지정하며, 산정기관들은 국가 고유 배출·흡수계수의 개발 및 분야별 온실가스 통계 산정 등 온실가스 통계 작성 관련 실무를 수행한다. 산정기관이 작성한 분야별 온실가스 통계는 관장기관의 검토를 거쳐 GIR에 제출된다.



| 그림 1-3 | 국가 온실가스 통계 작성 체계도

| 표 1-1 | 분야별 온실가스 통계 관장기관 및 산정기관

분야	관장기관	산정기관
에너지	연료연소(발전, 산업) 및 탈루	기후에너지환경부
	수송(항공, 도로, 철도), 건물	국토교통부
	수송(해운) 및 어업	해양수산부
산업공정 및 제품 사용		산업통상부
농업	축산	국립축산과학원
	재배(경종)	국립농업과학원
LULUCF	산림지, 수확된 목재제품	국립산림과학원
	농경지	국립농업과학원
	초지	국립축산과학원
	습지-내륙습지	기후에너지환경부
	습지-연안습지	해양수산부
	정주지, 기타토지	국토교통부
	폐기물	기후에너지환경부
		한국환경공단

- 주: 1) 에너지 분야에 속한 건물·농림업의 에너지 통계에 기반한 온실가스 산정은 에너지경제연구원에서 담당함
 2) 국가 온실가스 인벤토리의 공정성 및 신뢰성 확보를 위해 통계정보에 대해 국가데이터처와 협의
 3) 국가미세먼지정보센터는 온실가스 전구체 물질 및 간접 온실가스 배출량 통계 산정 담당¹³⁾

13) MPGs 제51항·제52항에 따라, 인간활동으로 발생한 일산화탄소(CO), 질소산화물(NOx), 비메탄 휘발성 유기화합물(NMVOC), 황산화물(SOx)과 같은 전구체 물질과 간접 온실가스(indirect CO₂·N₂O)는 보고 권고대상으로, 향후 BTR 및 NIR 보고서에 간접 온실가스의 전구체 물질에 대한 배출량 산정결과를 포함할 계획임

1.2.2 통계 작성 절차

1.2.2.1 준비

국제기준에 부합하는 국가 온실가스 통계의 체계적인 관리를 위하여 관계기관은 5년 단위의 「국가 온실가스 통계 총괄관리계획(이하 총괄관리계획¹⁴⁾」을 수립하고 있다. 총괄관리계획은 온실가스 통계 산정방법의 고도화, 배출·흡수계수의 개발·검증·관리, 활동자료 확보 및 관리, 전산시스템의 구축 및 운영 등 온실가스 통계의 품질 제고에 필요한 제반 사항을 지속적으로 개선하는데 목적이 있다.

GIR은 총괄관리계획에 따른 당해연도 이행계획과 전년도 통계 검증과정에서 도출된 개선 필요사항 등을 반영한 MRV 지침의 개정안을 매년 마련한다. 이 개정안은 실무협의회의 검토 및 관리위원회의 심의를 거쳐 확정되며, GIR은 개정 지침을 전년도 12월까지 관장기관에 제공하고 있다.

각 관장기관은 GIR이 배포한 MRV 지침을 숙지한 후, 이를 기반으로 소관 분야별 배출 및 흡수량 산정을 위한 연간 업무 계획을 수립한다. 또한, 관장기관은 통계 산정에 필요한 자료와 자료 제공 기관이 제공하는 자료에 변동 사항이 있는지 등을 검토하며, 관련 분야에 전문성을 갖춘 산정기관을 지정하여 배출·흡수계수 개발 및 배출량 산정의 역할을 위임한다.

1.2.2.2 산정·보고·검증

산정기관은 분야별 배출·흡수량 산정에 필요한 자료를 제공하는 기관과 협조하여 해당 자료를 수집하고, 총괄기관(GIR)이 배포한 지침에 준하여 배출량을 산정한다. 관장기관은 온실가스 통계 전 과정(활동자료 및 배출계수, 산정방법론 등 통계 수집 및 산정 절차 전반과 산정 결과)에 대하여 품질관리 활동을 수행한다. 그리고 당해연도 3월까지 배출·흡수량 산정 결과, 관련 근거자료 및 해당 분야의 온실가스 통계 보고서를 작성하여 GIR에 제출한다.

GIR은 관장기관이 제출한 분야별 온실가스 통계를 취합하여 국가 온실가스 통계로 통합하고, 온실가스 배출·흡수량 산정방법, 활동자료, 배출·흡수계수의 적절성과 세부 항목별 배출량 계산오류 여부 등을 검증한다. 검증과정에서 오류나 개선이 필요한 사항이 확인되면, 관장기관에 수정·보완을 요청한다. 관장기관은 이를 반영하여 통계를 수정한 후 다시 제출하며, GIR은 수정된 자료에 대해 최종적으로 확인한 후 국가 총괄 통계표 및 국가 온실가스 통계 보고서를 작성한다.

1.2.2.3 확정·공표 및 개선

GIR에서 작성한 국가 온실가스 통계 초안은 실무협의회의 검토와 논의를 거친 후, 관리위원회의 심의를 통해 최종적으로 확정된다. 확정된 통계는 GIR과 국가데이터처의 공식 누리집(홈페이지)을 통해 대외적으로 공표된다.

14) 출처: 제1차 국가 온실가스 통계 총괄관리계획(관계기관 합동, 2015), 제2차 국가 온실가스 통계 총괄관리계획(관계기관 합동, 2020), 제3차 국가 온실가스 통계 총괄관리계획(관계기관 합동, 2025)

이와 같이 공개된 국가 온실가스 통계는 「국가보고서(National Communication, 이하 NC)」, BTR, NID, 그리고 CRT에 활용되며, 이를 통해 우리나라는 UNFCCC 등 국제기구에 국가 온실가스 정보를 공식 제출한다.

온실가스 통계 산정 과정에서 확인된 오류나 개선이 필요한 사항은 그 중요성과 시급성에 따라 단기 또는 장기 과제로 구분하여 관리된다. 단기적으로 개선 가능한 사항은 다음 연도의 MRV 지침 개정 시 반영되며, 구조적이거나 중장기적 개선이 요구되는 사항은 차기 국가 온실가스 통계 총괄관리계획에 포함하여 추진한다. 이러한 피드백 체계는 온실가스 통계의 정확성과 신뢰도를 지속적으로 향상시키기 위한 기반으로 작용하며, 국제기준에 부합하는 국가 통계 체계를 유지하는 데 기여한다.

표 1-2 | 국가 온실가스 통계 작성 연간 일정

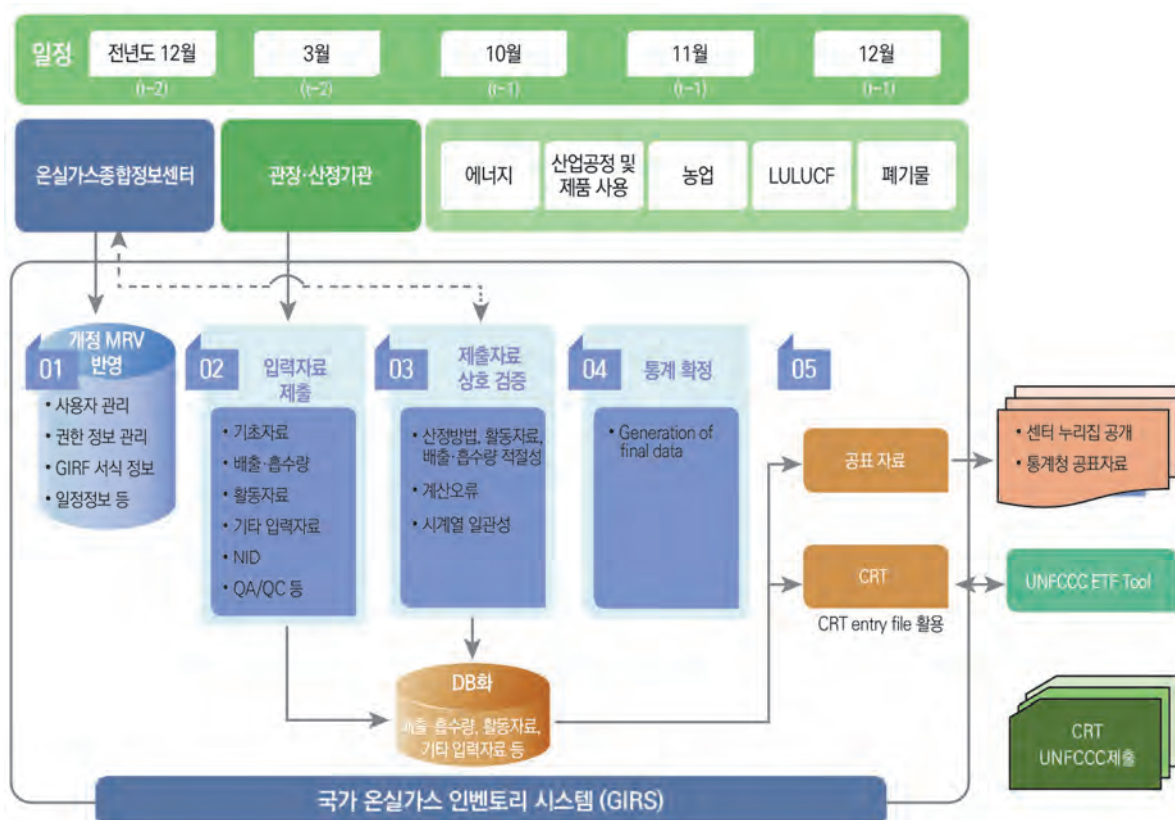
절차	주체	주요 활동	T+1년	T+2년			
				~1월	~3월	~10월	~12월
준비							
MRV 지침* 마련	총괄기관	• 지침 개정안 작성 및 배포					
배출·흡수량 산정을 위한 연간 업무계획 수립	관장기관	• 지침 개정안 숙지 • 통계 산정을 위해 필요한 자료 검토					
산정·보고							
분야별 산정·보고	관장기관, 산정기관	• 분야별 온실가스 통계 산정 • 내부 QA/QC 수행 후 GIR 제출					
검증							
취합 및 검증	총괄기관	• 국가 온실가스 통계 취합 및 총괄 통계표 작성 • 총괄 통계표 및 총괄 보고서 검토 • 분야별 온실가스 통계 수정·보완 요청					
	관장기관	• 분야별 인벤토리 수정·보완 및 재제출					
심의·확정							
최종안 검토	실무협의회	• 국가 온실가스 배출·흡수량 초안 검토 • 국가 온실가스 인벤토리 개선계획 작성					
확정	관리위원회	• 국가 온실가스 인벤토리 심의·확정					
공표							
국내 공표	총괄기관	• 확정 통계 대외 공표					

주: 국가 온실가스 통계 MRV 지침 기준(1990년~T년) (T: 최신 산정 연도)

1.2.3 정보 기록관리

국가 온실가스 통계 자료를 연속적으로 수집하고 축적 및 보존하기 위하여, 배출량 산정에 사용되는 모든 자료는 국가 온실가스 인벤토리 시스템(GHG Inventory Reporting System, 이하 GIRS)을 통해 통합적으로 관리된다. GIRS는 기관 및 역할별 사용자 계정관리, 제출 일정 정보 및 자료 입력을 위한 서식(기초자료, 활동자료, 배출·흡수량, 산정방법 등) 제공 등의 기능을 지원하며, 자료제출에 대한 이력 관리와 검증이력을 저장한다.

GIR은 매년 개정되는 측정·보고·검증(MRV) 지침에 따라 입력자료(활동자료, 산정방법 등)를 갱신하고, 이를 GIRS를 통해 각 산정기관에 배포한다. 산정기관은 배포받은 입력자료(엑셀 파일 형식)와 함께 분야별 NID, QA/QC 보고서 등을 GIRS에 등록한다. 이후 관장기관은 산정기관이 제출한 자료를 확인·검토한 후, 최종적으로 GIRS에 제출한다. 이러한 국내 MRV 절차를 거쳐 생산된 국가 온실가스 통계는 실무협의회와 관리위원회의 심의를 통해 최종 승인된다. 승인된 자료는 국내 공표용으로 활용되며, 동시에 UNFCCC의 온실가스 인벤토리 등록 시스템인 ETF Reporting Tool에 입력 가능한 자료(CRT entry file) 형태로 GIRS에서 자동 생성된다¹⁵⁾.



| 그림 1-4 | 국가 온실가스 통계 정보 기록관리 일정 및 절차

15) ETF Reporting Tool 입력 자료 생성기능은 시험 운영 중

1.3 방법론 및 자료 출처

1.3.1 산정 방법

국가 온실가스 통계는 MPGs 제17항·20항에 따라 2006 IPCC GL의 산정방법을 적용하였다. 다만, 보다 정밀한 산정을 위해 일부 배출원에서는 2013 Supplement(습지)¹⁶⁾와 2019 Refinement에서 제시된 고도화된 산정방법을 보완적으로 적용하였다. 2013 Supplement(습지)를 적용한 부문은 LULUCF 분야 연안습지 부문(4.D.1.c.i.)의 CO₂ 배출·흡수량 산정방법 및 염습지 CO₂ 배출계수이다. 2019 Refinement를 적용한 부문은 총 4개로 에너지 분야 탈루의 지하광산 부문(1.B.1.a.i.)의 CO₂·CH₄ 배출계수, 농업 분야 가축분뇨처리 부문(3.B.) N₂O 산정방법, LULUCF 분야 수확된 목재제품 부문(4.G.)의 CO₂ 배출·흡수량 산정방법 및 배출계수가 있다.

1.3.2 활동자료 출처

국가 온실가스 통계 산정을 위해 활용된 활동자료는 통계작성지정기관이 생산한 국가승인통계를 우선적으로 활용하였다. 우리나라는 「통계법」 제15조에 근거하여 정부 정책의 수립·평가 및 경제·사회현상의 분석에 활용될 수 있는 정량적 정보를 생산하는 기관을 통계 작성 지정기관으로 지정하고 있으며, 이로써 통계의 작성, 보급 및 활용이 체계적으로 관리되고 있다.

실제 활용된 활동자료는 국가데이터처의 자료를 비롯하여, 유관 협회(산업별 협회 등)에서 제공한 통계, 온실가스 목표관리제 및 배출권거래제 사업장의 명세서 등 다양한 출처로부터 수집되었다. 한편, 국가승인통계 외의 자료가 필요한 경우에는 산정기관의 자체 조사 통계, 청정개발체제(Clean Development Mechanism, 이하 CDM) 보고서 등도 보완적으로 활용하였다. 정부는 이러한 비공식 자료의 활용 시, 해당 자료의 원출처와 검증 절차를 확인하는 내부 품질관리(Internal QA/QC) 체계를 강화하고 있으며, 이를 통해 국가 온실가스 통계의 정확성과 신뢰성을 지속적으로 제고하고 있다(자세한 사항은 제1.5장 「품질 보증 및 관리(QA/QC)」 참조).

표 1-3 | 분야별 자료원

분야	자료 및 통계명	통계기관(수집기관)
에너지	에너지통계연보(에너지수급통계)	에너지경제연구원
	석유수급통계	한국석유공사
	에너지총조사	산업통상부
	온실가스 목표관리제 및 배출권거래제 사업장 명세서	기후에너지환경부
	항공운송업체 연료소비량 현황조사	한국교통안전공단
	윤활유 산업자료	한국윤활유공업협회
	선박 LNG 공급량	LNG 공급사
	연도별 폐광 개수	한국광해광업공단

16) 2013 Supplement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories:Wetlands

분야	자료 및 통계명	통계기관(수집기관)
산업공정 및 제품 사용	품목별 유리 생산·출하·재고·내수·수출량	한국에너지공단
	수출입 통계	관세청
	온실가스 목표관리제 및 배출권거래제 사업장 명세서	기후에너지환경부
	광물·화학산업 등 일부 활동자료에 대해 업체별 조사	한국에너지공단
	클링커 생산량	한국시멘트협회
	석회 생산량	한국석회석가공협동조합
	병유리 생산량	한국유리공업협동조합
	석회석, 백운석 소비량	한국철강협회
	알루미늄 생산량	한국비철금속협회
	윤활유 및 그리스 생산/수입/수출량	한국윤활유공업협회
	가스 소비량 등	한국반도체산업협회
	가스 소비량 등	한국디스플레이산업협회
	의약품제조수입실적	식품의약품안전처
	석유화학편람	한국화학산업협회
	CDM 모니터링 보고서	UNFCCC
	에너지통계연보(에너지수급통계)	에너지경제연구원
농업	가축동향조사	국가데이터처
	농림축산식품통계연보	농림축산식품부/국가데이터처
	농림어업조사	국가데이터처
	농업면적조사	국가데이터처
	농림어업총조사	국가데이터처
	농작물생산조사	국가데이터처
	농축산물생산비조사	국가데이터처
	비료사업통계요람	농협경제지주
	비료연감	한국비료협회
LULUCF	산림임업통계연보	산림청
	산림기본통계	산림청
	목재이용실태조사	산림청
	농업면적조사	국가데이터처
	과수 시설재배 현황과 발전방향(1992)	농촌진흥청
	한국의 토양분류 및 해설(2011)	농촌진흥청
	지적통계	국토교통부
	결빙일수	기상청
	국가 블루카본 정보시스템(K-BIS)	해양수산부
폐기물	전국 폐기물 발생 및 처리현황	기후에너지환경부
	전국 폐기물 통계조사	기후에너지환경부
	하수도통계	기후에너지환경부
	산업폐수의 발생과 처리	기후에너지환경부
	수도권매립지 통계연감	수도권매립지관리공사

주: : 국가승인통계

■ 배출권거래제 개요 ■

1. 개요

- 일정 한도 이상 온실가스를 배출하는 사업장을 대상으로 연 단위 배출권을 할당하여 할당 범위 내에서만 배출활동을 허용하는 시장 기반의 온실가스 감축 제도
- 정부는 배출권거래제 도입을 위해 2012년 「온실가스 배출권의 할당 및 거래에 관한 법률(2012.5)」 및 동법 시행령(2012.11)을 제정하여 법적 기반 마련
- 국가 온실가스 감축목표와 연계한 배출권 총수량 등을 공표한 「배출권거래제 기본계획(2014.1)」, 「온실가스 배출권거래제 제1차 계획기간(2015-2017년) 국가 배출권 할당계획(2014.9)」 및 관련 지침을 수립하여 2015년에 배출권거래제 도입

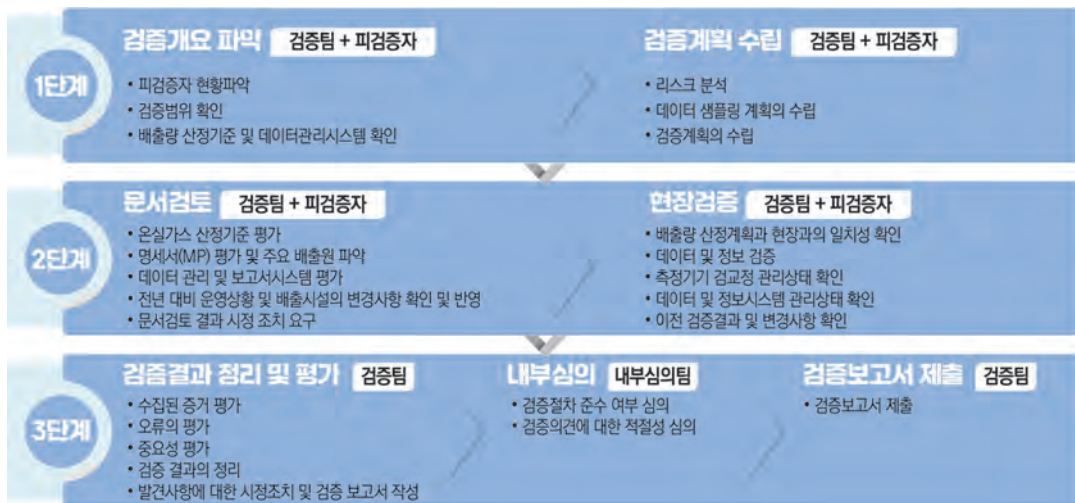
2. 배출권거래제 사업장 지정 기준

- 최근 3년간 온실가스 배출량의 연평균 총량이 12.5 만톤 CO₂-eq 이상인 업체이거나 2.5 만톤 CO₂-eq 이상인 사업장을 하나 이상 보유한 업체는 할당업체로 지정됨(2023년 기준 735개 업체)

3. 배출량 산정기준, 검증 및 제출

- 배출량 산정 및 검증은 최신의 「온실가스 배출권거래제의 배출량 보고 및 인증에 관한 지침」과 「온실가스 배출권거래제 운영을 위한 검증지침」을 따름
- 할당대상업체는 배출시설의 규모 및 세부 배출활동 종류에 따라 최소산정등급(Tier)을 준수하여 직·간접** 배출량을 산정(2023년도 기준 직·간접 배출량 550 백만톤 CO₂-eq)
 - * 50 만톤 이상 : Tier3 이상 산정방법 및 사업장 고유 계수(PS-EF) 적용
 - 5 만 - 50 만톤 미만 : Tier2 이상 산정방법 및 국가 고유 계수(CS-EF) 적용
 - 5 만톤 미만 : Tier1 이상 산정방법 및 기본 계수(D-EF) 적용
- ** (직접배출량) 사업장 내에서 연료를 직접 연소하거나 공정 중 발생하는 배출
(간접배출량) 외부에서 생산된 전력·열을 구입해 사용하면서 발생하는 배출
- 배출권 검증은 기후에너지환경부 장관이 지정·고시한 검증기관을 활용하여 관리업체가 제출한 명세서에 대한 제3자 검증 실시

온실가스 배출량 등의 검증 절차



■ 목표관리제 ■

1. 개요

- 일정 기준 이상 배출하는 업체를 매년 관리대상 업체로 지정하여 목표를 설정하고 온실가스 배출량을 줄이도록 관리하는 제도



- 2010년에 「저탄소 녹색성장 기본법」이 제정된 이후 법에 근거하여 2012년부터 제도를 도입

2. 목표관리제 업체 지정기준

- 관리업체는 업체 단위와 사업장 단위로 구분되며, 매년 조사를 통해 최근 3년간 온실가스 평균값이 5 만톤 CO₂-eq(업체기준) 또는 1.5 만톤 CO₂-eq(사업장기준) 이상인 업체를 지정
- * 관리업체가 「온실가스 배출권의 할당 및 거래에 관한 법률」에 따른 할당대상업체 지정기준에 해당될 때에는 관리업체에서 할당대상업체로 지정이 변경되며, 배출권거래제의 적용을 받는다.

3. 배출량 산정기준, 검증 및 제출

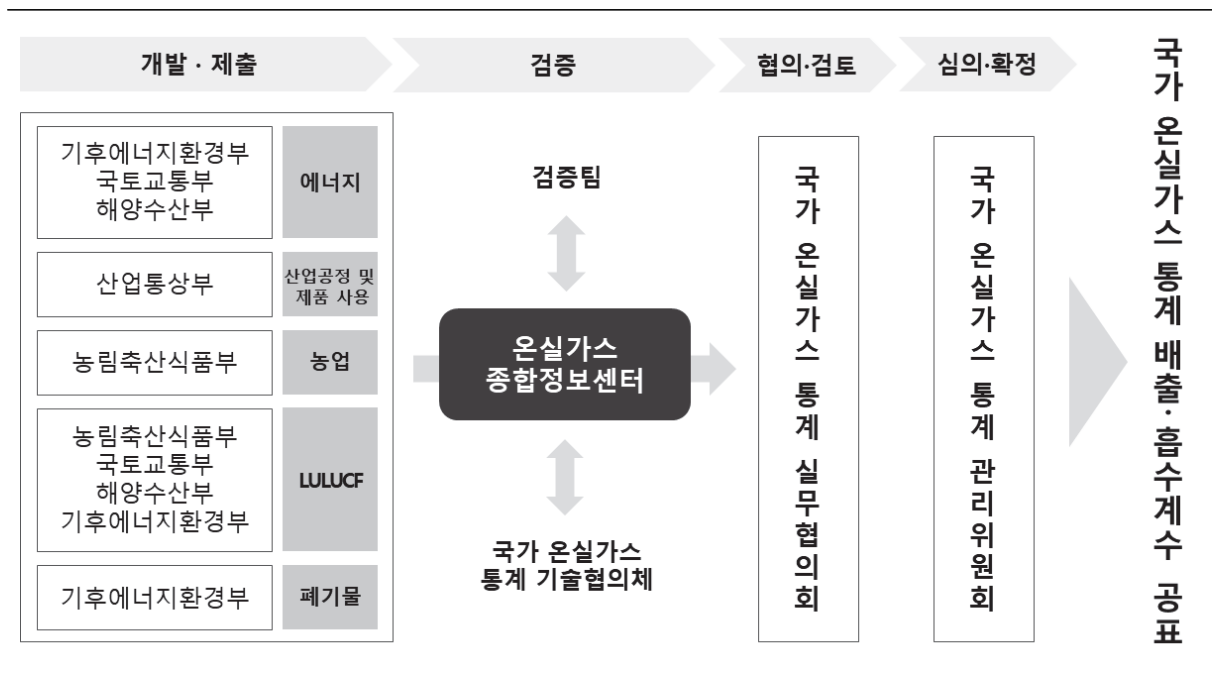
- 배출량 산정 및 검증은 「온실가스 목표관리 운영 등에 관한 지침」과 「온실가스 배출권거래제 운영을 위한 검증지침」을 따름
- 관리업체는 관련 법령에 따라 온실가스 배출량에 관한 명세서를 작성하고, 이에 대한 검증기관의 검증 결과를 첨부하여 부문별 관장기관에게 지정받은 다음 연도 3월 31일까지 전자적 방식으로 제출

1.3.3 국가 고유 배출·흡수계수

통계의 정확성을 높이기 위하여 총괄 및 관장기관 합동으로 5년마다 「국가 온실가스 통계 총괄관리 계획」을 수립하고 있다. 이를 바탕으로 체계적인 국가 온실가스 배출·흡수계수의 개발·검증·관리를 목표로 하는 「국가 온실가스 배출·흡수계수 개발·검증 지침(이하 계수 지침)」을 마련하였으며, 이에 따라 수립한 이행계획을 통하여 국가 고유의 배출·흡수계수를 개발하고 있다.

관장기관은 계수 지침에 따라 국내 여건을 고려한 배출·흡수 활동 특성을 반영하여 계수를 개발한다. 국가 고유 계수 개발에 적용할 수 있는 산정방법으로는 IPCC에서 제시하는 개발방법론, 온실가스 배출 권거래제의 배출량 보고 및 인증에 관한 지침에 따른 개발방법론, 학술적으로 인정된 개발방법론(SCI(E) 게재 등)이 있다.

관장기관이 개발한 배출·흡수계수는 GIR이 검증 절차를 거치며, 이후 실무협의회의 협의·검토와 관리위원회의 심의를 통해 확정·공표된다. 확정된 국가 고유 배출·흡수계수는 MRV 지침 개정 시 반영되며 이는 국가 온실가스 통계 산정의 주요 기초자료로 활용된다. 이러한 국가 고유 계수 개발·검증 체계의 구축은 통계 산정의 정확성과 일관성을 높이는데 중요한 역할을 수행하고 있다.



| 그림 1-5 | 국가 온실가스 배출·흡수계수 개발·검증 체계도

주: 검증팀은 4인 이상 검증위원(GIR 담당자 및 외부전문가)으로 구성하며 검증회의 참석, 검증지침에 따른 세부 검증항목별 검증기록부 및 최종 검증보고서 작성·제출 등 검증업무를 수행한다.

1.4 주요 카테고리 분석 결과

1.4.1 방법론

MPGs 지침 제25항에 따라 배출량 및 배출량 추세 측면에서 국가 온실가스 배출량에 큰 영향력을 미치는 주요 배출원을 분석하였다. 주요 배출원 산정 방법으로 2006 IPCC GL의 방법론 1(Approach 1)을 적용하였고 LULUCF 분야를 포함한 경우와 포함하지 않은 경우의 수준평가(Level Assessment)와 추세평가(Trend Assessment)를 수행하였다.

주요 배출원 분석은 UNFCCC의 ETF Tool을 활용하여, LULUCF 분야를 포함한 94개¹⁷⁾의 배출원 및 흡수원을 세분화한 후, 1990년과 2023년을 기준으로 국가 온실가스 배출량 및 흡수량의 상위 95%에 해당하는 배출원 및 흡수원을 2023년의 주요 배출원으로 판단하였다.

수준평가는 세부 항목의 배출·흡수량이 국가 온실가스 총배출량에 기여하는 정도를 의미한다. 수준평가 산정을 위해서 2006 IPCC GL에 따라 국가 온실가스 통계에 대한 총기여도에서 세부 항목의 기여도가 차지하는 비중을 계산하였다(2006 IPCC GL 제1권 식 4.1). 국가 통계에서 음수로 표현되는 흡수량은 절댓값을 적용하여 총기여도 및 항목 기여도를 산정하였다.

주요배출원 수준평가 산정식

주요배출원 수준평가 = |배출(흡수)량| / 총기여도

$$L_{x,t} = \frac{|E_{x,t}|}{\sum_y |E_{y,t}|}$$

$L_{x,t}$: 인벤토리 연도(t)의 배출(흡수)원 항목 x의 수준평가

$|E_{x,t}|$: t 연도 항목 x의 배출(흡수)량 절댓값(항목 x의 기여도)

$\sum_y |E_{y,t}|$: t 연도 항목별 배출(흡수)량 절댓값의 합산(총기여도)

추세평가는 세부 항목의 기준연도 배출량 비중과 해당 항목의 기준연도 대비 증감률 차이를 고려하여 산정하였으며(2006 IPCC GL 제1권 식 4.2), 세부 항목의 기준연도 배출량이 0인 경우, 2006 IPCC GL 제1권 식 4.3을 적용하였다.

17) UNFCCC의 ETF Tool 분석에 따라 가스별 94개로 배출원 및 흡수원을 구분하였으며, 주요 카테고리 분석 결과 역시 ETF Tool의 분석 결과에 따름

주요배출원 추세평가 산정식

$$T_{x, t} = \frac{|E_{x,0}|}{\sum_y |E_{y,0}|} \times \left| \left[\frac{(E_{x,t} - E_{x,0})}{|E_{x,0}|} \right] - \frac{(\sum_y E_{y,t} - \sum_y E_{y,0})}{|\sum_y E_{y,0}|} \right|$$

$T_{x, t}$: 기준연도(0) 대비 t 연도 배출(흡수)원 x의 추세평가

$|E_{x, t}|$: t 연도 항목 x의 배출(흡수)량 절댓값

$\sum_y |E_{y, t}|$: t 연도 항목별 배출(흡수)량 절댓값의 합산

$E_{x, t}$: t 연도 항목별 x의 배출(흡수)량

$E_{x, 0}$: 기준연도 항목 x의 배출(흡수)량

$\sum_y E_{y, t}$: t 연도 총배출량

$\sum_y E_{y, 0}$: 기준연도 총배출량

주요배출원 추세평가 산정식(기준연도 배출=0)

$$T_{x, t} = \left| \frac{E_{x, t}}{\sum_y |E_{y, 0}|} \right|$$

1.4.2 분석결과

LULUCF 분야를 포함한 경우의 2023년 수준평가 결과, 주요 배출원은 23개로 에너지산업: 고체연료(CO₂), 제조업 및 건설업: 고체연료(CO₂), 도로수송(CO₂), 에너지산업: 기체연료(CO₂), 산림지로 유지된 산림지(CO₂) 등으로 나타났다.

1990년의 수준평가 결과에 따른 주요 배출원은 총 21개로 2023년 수준 평가와 비교하였을 때 냉장 및 냉방(F-gases), 제조업 및 건설업: 기체연료(CO₂), 제조업 및 건설업: 기타화석연료(CO₂), 폐기물 소각 및 노천소각(CO₂), 석회생산(CO₂), 전자산업(F-gases), 기타 제품제조 및 소비(F-gases) 등이 차이가 있었다. 해당 부문은 1990년에는 주요 배출원이 아니었으나, 2023년에는 주요 배출원에 포함된 경우이다.

1990년 대비 2023년에 대한 추세평가 결과, 타토지에서 전용된 농경지(CO₂), 탈루: 고체연료(CO₂), 농경지 토양: 직접배출(N₂O), 국내 해운: 액체연료(CO₂), 기타 분야: 고체연료(CO₂), 기타 분야: 고체연료(CH₄), 화학산업 기타(CO₂) 등이 주요 배출원으로 분석되었다.

| 표 1-4 | 주요 배출원 분석 결과(LULUCF 포함)

CRT 코드	IPCC 온실가스 배출·흡수원	온실 가스	LULUCF 포함			2023년 배출량 (kt CO ₂ -eq.)	Tier1 수준평가 (L _{x,t})	Tier1 수준평가 비중 누계
			2023년 수준평가	1990년 수준평가	추세평가			
1.A.1.	에너지산업: 고체연료	CO ₂	•	•	•	159,568	0.212	0.212
1.A.2.	제조업 및 건설업: 고체연료	CO ₂	•	•	•	103,789	0.138	0.349
1.A.3.b.	도로수송	CO ₂	•	•	•	92,058	0.122	0.472
1.A.1.	에너지산업: 기체연료	CO ₂	•	•	•	67,876	0.090	0.562
4.A.1.	산림지로 유지된 산림지	CO ₂	•	•	•	-41,331	0.055	0.616
2.F.1.	냉장 및 냉방	F-gases	•		•	29,714	0.039	0.656
1.A.4.	기타: 기체연료	CO ₂	•		•	29,380	0.039	0.695
2.B.8.	석유화학제품 및 카본블랙 생산	CO ₂	•	•	•	28,078	0.037	0.732
2.C.1.	철강생산	CO ₂	•	•	•	23,519	0.031	0.763
2.A.1.	시멘트생산	CO ₂	•	•	•	22,737	0.030	0.793
1.A.2.	제조업 및 건설업: 기체연료	CO ₂	•		•	20,936	0.028	0.821
1.A.1.	에너지산업: 액체연료	CO ₂	•	•	•	18,077	0.024	0.845
1.A.2.	제조업 및 건설업: 액체연료	CO ₂	•	•	•	14,650	0.019	0.865
1.A.4.	기타: 액체연료	CO ₂	•	•	•	14,087	0.019	0.883
5.A.	폐기물매립	CH ₄	•	•	•	11,312	0.015	0.898
1.A.2.	제조업 및 건설업: 기타화석연료	CO ₂	•		•	7,174	0.010	0.908
3.C.	벼재배	CH ₄	•	•	•	6,879	0.009	0.917
3.A.	장내발효	CH ₄	•	•		6,739	0.009	0.926
5.C.	폐기물소각 및 노천소각	CO ₂	•		•	4,742	0.006	0.932
2.A.2.	석회생산	CO ₂	•		•	4,110	0.005	0.938
2.E.	전자 산업	F-gases	•		•	3,624	0.005	0.942
3.B.	가축분뇨처리	CH ₄	•	•		3,478	0.005	0.947
2.G.	기타 제품제조 및 소비	F-gases	•		•	3,386	0.004	0.952
4.B.2.	타토지에서 전용된 농경지	CO ₂			•	2,863	-	-
1.B.1.	고체연료	CH ₄		•	•	2,327	-	-
3.D.1.	직접배출	N ₂ O		•	•	1,621	-	-
1.A.3.d.	국내해운: 액체연료	CO ₂		•	•	1,367	-	-
1.A.4.	기타: 고체연료	CO ₂		•	•	721	-	-
1.A.4.	기타: 고체연료	CH ₄		•	•	62	-	-
2.B.10.	기타	CO ₂			•	1	-	-

주: 1) 상위 95%에 해당하는 분야를 •로 표기

2) 2023년 배출량에 대한 수준 평가 순위에 따라 작성한 표이며, 이해를 돕기 위해 1990년 수준평가 및 추세평가 결과를 동일 표에 함께 표기함

3) F-gases는 HFCs, PFCs, SF₆, NF₃의 합

LULUCF 분야를 포함하지 않은 경우의 1990년 및 2023년 상위 95%에 해당하는 수준평가 결과와 추세평가 결과는 표 1-5와 같다.

| 표 1-5 | 주요 배출원 분석 결과(LULUCF 제외)

CRT 코드	IPCC 온실가스 배출·흡수원	온실 가스	LULUCF 제외			2023년 배출량 (kt CO ₂ -eq.)	Tier1 수준평가 (L _{x,t})	Tier1 수준평가 비중 누계
			2023년 수준평가	1990년 수준평가	추세평가			
1.A.1.	에너지산업: 고체연료	CO ₂	•	•	•	159,568	0.226	0.226
1.A.2.	제조업 및 건설업: 고체연료	CO ₂	•	•	•	103,789	0.147	0.372
1.A.3.b.	도로수송	CO ₂	•	•	•	92,058	0.130	0.503
1.A.1.	에너지산업: 기체연료	CO ₂	•	•	•	67,876	0.096	0.599
2.F.1.	냉장 및 냉방	F-gases	•		•	29,714	0.042	0.641
1.A.4.	기타: 기체연료	CO ₂	•		•	29,380	0.042	0.682
2.B.8.	석유화학제품 및 카본블랙 생산	CO ₂	•	•	•	28,078	0.040	0.722
2.C.1.	철강생산	CO ₂	•	•	•	23,519	0.033	0.755
2.A.1.	시멘트생산	CO ₂	•	•	•	22,737	0.032	0.787
1.A.2.	제조업 및 건설업: 기체연료	CO ₂	•		•	20,936	0.030	0.817
1.A.1.	에너지산업: 액체연료	CO ₂	•	•	•	18,077	0.026	0.842
1.A.2.	제조업 및 건설업: 액체연료	CO ₂	•	•	•	14,650	0.021	0.863
1.A.4.	기타: 액체연료	CO ₂	•	•	•	14,087	0.020	0.883
5.A.	폐기물매립	CH ₄	•	•	•	11,312	0.016	0.899
1.A.2.	제조업 및 건설업: 기타화석연료	CO ₂	•		•	7,174	0.010	0.909
3.C.	벼재배	CH ₄	•	•	•	6,879	0.010	0.919
3.A.	장내발효	CH ₄	•	•		6,739	0.010	0.928
5.C.	폐기물소각 및 노천소각	CO ₂	•		•	4,742	0.007	0.935
2.A.2.	석회생산	CO ₂	•		•	4,110	0.006	0.941
2.E.	전자 산업	F-gases	•		•	3,624	0.005	0.946
3.B.	가축분뇨처리	CH ₄	•	•		3,478	0.005	0.951
2.G.	기타 제품제조 및 소비	F-gases			•	3,386	-	-
1.A.5.	미분류: 액체연료	CO ₂			•	3,004	-	-
1.B.1.	고체연료	CH ₄		•	•	2,327	-	-
3.D.1.	직접배출	N ₂ O		•		1,621	-	-
1.A.3.d.	국내해운: 액체연료	CO ₂		•	•	1,367	-	-
1.A.4.	기타: 고체연료	CO ₂		•	•	721	-	-
1.A.4.	기타: 고체연료	CH ₄		•	•	62	-	-

주: 1) 상위 95%에 해당하는 분야를 •로 표기

2) 2023년 배출량에 대한 수준 평가 순위에 따라 작성한 표이며, 이해를 돕기 위해 1990년 수준평가 및 추세평가 결과를 동일 표에 함께 표기함

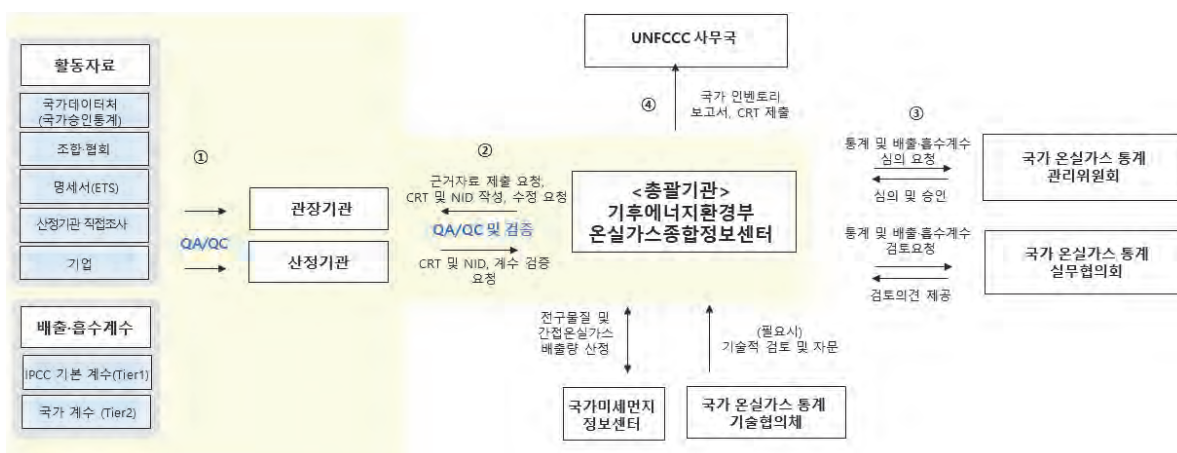
3) F-gases는 HFCs, PFCs, SF₆, NF₃의 합

1.5 품질 보증 및 관리(QA/QC)¹⁸⁾

1.5.1 품질 보증 및 관리 절차

국가 온실가스 통계의 5대 MRV 원칙인 TACCC(투명성, 정확성, 일관성, 완전성, 비교가능성)¹⁹⁾을 높이기 위하여 2006 IPCC GL 기반의 품질보증 및 관리(Quality Assurance/Quality Control, 이하 QA/QC)를 이행하고 있다.

분야별 관장(산정) 기관 및 외부 전문가는 표준화된 점검 항목에 따라 QA/QC 활동을 수행한다. 점검 항목은 모든 분야에 적용되는 공통 항목과 분야별 항목으로 구분된다. 공통 QC 항목은 활동자료, 배출·흡수계수, 산정방법론 등 정확한 배출량 산정을 위하여 기술적으로 점검하여야 하는 항목으로, 부문별 QC는 해당 부문의 온실가스 통계 산정에 필요한 특수 항목들이 포함되어 있으며, 이는 각 부문 특성에 따라 구체적으로 설정된다. 공통 QA 항목은 배출량 산정계획 수립, 배출량 산정·보고 과정에서 일반적으로 점검하여야 하는 항목으로 배출량 산정에 관여하지 않은 외부 전문가가 참여하여 활동자료의 적합성, 배출계수 및 산정식의 지침 준수 여부, 활동자료 및 산정 결과의 시계열 일관성 등을 확인한다.



| 그림 1-6 | QA/QC 체계도

관장(산정)기관은 자체적으로 수행한 QA/QC 활동 결과를 GIR에 보고한다. GIR은 국가 온실가스 통계의 품질 향상을 위하여 관장(산정)기관이 제출한 QA/QC 보고서와 분야별 배출량을 검토하고, 배출량의 정확성을 검증한다. QA/QC 활동과정과 배출량 검증 결과에 따라 개선이 필요한 사항 중 현재 보완이 가능한 사항은 당해 연도 MRV 지침에 반영하고, 단기적으로 개선이 가능한 사항은 차년도

18) Outline of the national inventory document, pursuant to the modalities, procedures and guidelines for the transparency framework for action and support referred to in Article 13 of the Paris Agreement(Decision 5/CMA.3, '21)에 따른 3-7장까지 각 배출/흡수원에 대한 QA/QC 설명은 2장, 1.5에서 포괄적인 QA/QC로 설명함

19) 투명성(Transparency), 정확성(Accuracy), 일관성(Consistency), 완전성(Completeness), 비교가능성(Comparability)

MRV 지침에 반영하며, 장기적으로 개선이 필요한 사항은 「국가 온실가스 통계 총괄관리계획」에 반영하여 지속적으로 국가 온실가스 통계의 품질을 개선하고 있다.

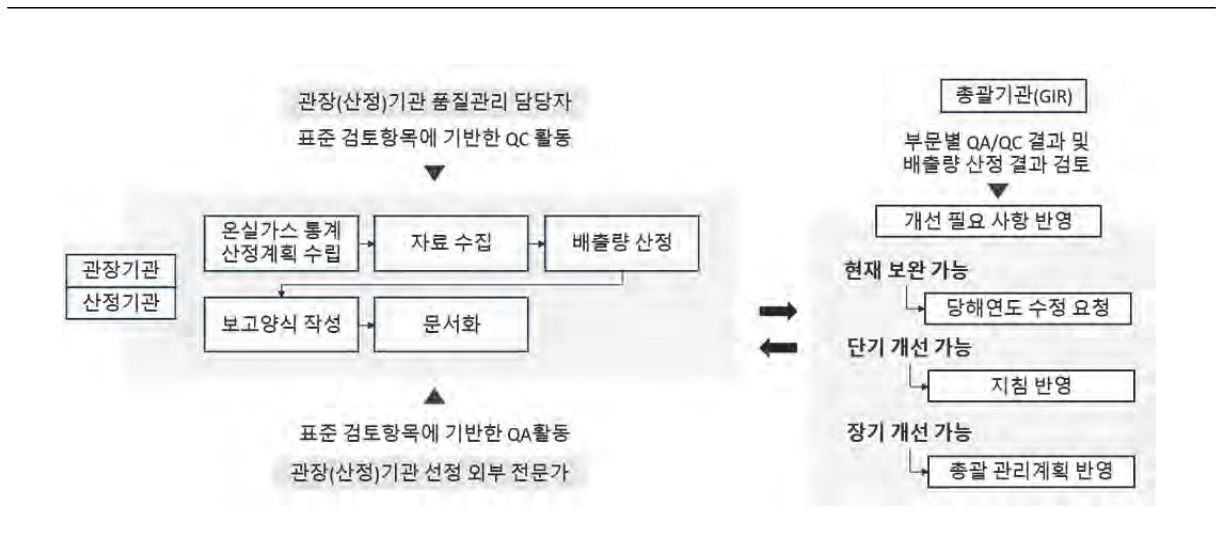


그림 1-7 | QA/QC 절차 및 세부 내용

국가 온실가스 통계 기초자료 중 국가승인통계와 국가 고유 배출·흡수계수에 대한 QA/QC와 검증 절차와 방법은 다음과 같다.

1.5.2 국가승인통계

국가 온실가스 통계 산정을 위한 활동자료의 대부분은 국가승인통계에 해당된다. 국가승인통계란 통계 작성기관이 통계법 제18조 또는 제20조에 따라 국가데이터처장의 승인을 받거나 협의를 거친 통계를 말한다. 국가승인통계는 2014 UN 국가통계 기본원칙²⁰⁾에 따라 국가통계 작성기관들 간의 통계 활동을 효과적으로 조정하여 국가통계 체계의 일관성과 효율성을 확보하고, 각종 의사결정을 합리적으로 수행하기 위한 공공자원으로 활용하는 데 목적이 있다. 이를 위하여 통계 작성기관의 신규통계 작성, 변경·중지, 공표 등 주요 단계에 통계법적 규율이 이루어지며, 통계 작성기관에는 그에 따른 의무와 권리가 부여된다.

법에 따라 승인받은 국가통계는 정기진단, 수시진단, 자체진단 및 품질개선 컨설팅을 포함한 QA/QC 과정을 통하여 관리된다. 정기진단은 국가통계 품질관리 5개년 계획에 따라 주요통계를 선정하고, 전문연구진이 통계정보보고서를 활용하는 기초진단 및 심층·전문진단(자료수집체계, 조사표설계, 표본설계 등)을 통해 진행된다. 수시진단은 품질 문제가 발견된 통계를 정기진단 체계를 준용하여 진단하되, 개별 통계 문제에 따라 세부진단 내용을 추가하는 방식으로 진행된다. 자체진단은 통계작성기관 스스로 소관 통계에 대한 문항에 응답하고 품질 사항을 점검함으로써 자체적으로 품질을 개선하도록

20) 출처: Fundamental Principles of Official Statistics (UN, 2014)

유도한다. 품질개선 컨설팅은 통계 작성기관이 통계전문인력 부족 및 예산제약으로 인하여 자체적으로 추진하기가 어려운 품질개선 과제를 효율적으로 수행할 수 있도록 지원하는 활동으로, 국가데이터처에서 이를 관리한다.

표 1-6 | 국가통계 품질관리체계

구분	정기진단	수시진단	자체진단	품질개선 컨설팅
근거	통계법 제9조	통계법 제10조	통계법 제11조	통계법 제13조
대상	주요 통계 ¹⁾	품질 저하 통계 ²⁾	모든 승인통계 ³⁾	컨설팅 요청 통계
주기	5년	수시	1년	수시
주체	국가데이터처	국가데이터처	작성기관	국가데이터처

주: 1) 정책 수립·평가 또는 다른 통계의 작성 등에 널리 활용되는 통계

2) 상시(언론 등 외부지적)·기획(자체진단 저평가 통계 등) 모니터링을 통해 품질 이슈가 발견된 통계

3) 지자체 공통 통계 및 당해연도 정기·수시 진단 통계, 당해연도 미공표 통계 등은 제외

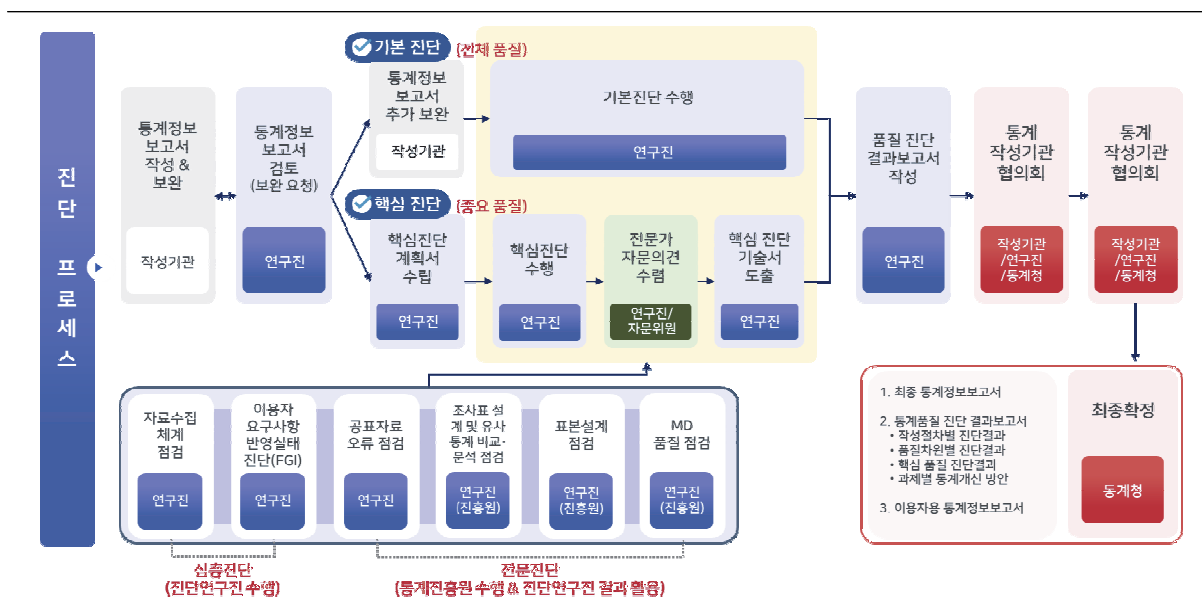


그림 1-8 | 정기통계 품질 진단 수행절차 및 수행주체

자료: 국가데이터처(2024). 제5기('25-'29년) 국가통계 품질관리 기본계획(안)

1.5.3 국가 고유 배출·흡수계수에 대한 QA/QC 및 검증

관장기관은 분야별 배출·흡수계수를 개발하고 이를 개발·검증기준 체크리스트를 통하여 자체적으로 점검한 후 GIR에 제출한다. GIR은 내부 및 외부전문가가 참여한 검증팀, 외부 전문가 중심의 기술협의체를 구성해 관장기관에서 제출한 배출·흡수계수 개발 방법의 적절성, 대표성, 측정·분석 정확성 등을 검증한다. 검증된 배출·흡수계수는 실무협의회의 협의·검토와 관리위원회의 심의를 거쳐 확정 후 공표한다.

GIR과 검증기관은 배출·흡수계수 개발 및 검증 과정에서 6대 검증항목 및 14개 검증요소를 고려한다(표1-7). 우선, IPCC 등에서 제시한 적절한 방법론을 사용하여 배출·흡수계수를 개발하였는지, 표본 대상집단이 배출·흡수량 비율, 생산량 비율 등을 고려하여 적절히 선정되었는지 등을 확인하는 과정을 통하여 계수의 개발방법과 대표성을 검증한다. 또한, 배출·흡수 특성을 고려한 측정·분석 방법론을 선정하였는지, 원시자료에서 극단값 또는 누락값이 발생하였을 때 이를 적합한 방법으로 처리하였는지 등을 검증하여 측정·분석의 정확성을 확보한다. 이와 함께 QA/QC 수행 및 불확도 평가를 검토하여 계수의 타당성을 입증하는 과정도 주요 검증 항목으로 포함된다. 이러한 검증을 거친 배출·흡수계수는 관련 부처가 참여한 실무협의회에서 논의되고 관리위원회 심의를 통해 확정된다. 확정된 국가 배출·흡수계수는 MRV 지침 개정 시 반영되어 국가 온실가스 통계의 신뢰성 있는 기초자료로 활용된다.

표 1-7 | 국가 온실가스 배출·흡수계수 검증항목 및 검증요소

검증항목	검증요소
개발방법론	① 국내·외 배출·흡수량 산정 지침과의 정합성
	② 개발방법론의 적절성
	③ 배출·흡수 특성 고려 여부
계수 대표성	④ 표본 대상 집단의 적절성
	⑤ 표본 수의 적절성
측정·분석 정확성	⑥ 측정·분석 유형 및 방법론의 적절성
	⑦ 측정·분석기관의 신뢰수준
	⑧ 측정·분석기기의 신뢰수준
자료관리	⑨ 자료관리의 적절성
	⑩ 계수 개발 자료 간 시간 범위 일치 여부
품질보증(QA) 및 품질관리(QC)	⑪ 품질보증(QA) 및 품질관리(QC) 활동의 적절성
	⑫ 계수 등가성 평가
불확도	⑬ 불확도 산정 방법의 적절성
	⑭ 불확도 평가

출처: 국가 온실가스 배출·흡수계수 개발 검증 지침(온실가스종합정보센터, 2020)

1.6 통계 완전성

파리협정 MPGs 지침 제30항부터 제32항에 따라, 국가 온실가스 통계 작성 시 전체 배출 수준 및 추세에 주요한 영향을 미치지 않거나, 자료 수집이 현저히 곤란한 부분의 경우 일부 가스 또는 세부 부문을 산정 대상에서 제외할 수 있다. 이 경우 2006 IPCC GL에 명시된 국가 온실가스 통계 보고 방법론에 따라, 표 1-8의 표기 기호(Notation Key)를 활용하여 해당 항목의 산정·보고 현황을 명확히 표시하고, 보고 누락 사유를 반드시 기술해야 한다.

이 기준에 따라, CRT 및 NID 상에서 ‘국내에서 발생하지 않는 배출·흡수원’으로 판단된 항목에는 ‘NO (Not Occurring)’ 기호를 적용하였다. 해당 사례로는 산업공정 및 제품 사용 분야에서 광물생산의 비야금 산화마그네슘 생산 부문(2.A.4.c.), 화학산업의 글리옥살 생산 부문(2.B.4.b.) 등이 있다.

또한, 특정 부문의 배출량이 타 부문에 포함되어 개별적으로 보고되지 않은 경우에는 ‘IE (Included Elsewhere)’ 기호를 사용하였다. 예를 들어, 에너지 분야의 도로수송 부문(1.A.3.)은 차종별(승용차(1.A.3.b.i.), 소형트럭(1.A.3.b.ii.), 대형트럭 및 버스(1.A.3.b.iii.), 오토바이(1.A.3.b.iv.))로 배출량을 구분하여 보고하는 것이 원칙이지만, 국내 기초통계(석유류수급통계)에서 연료 소비량이 차종별로 분리 제공되지 않음에 따라, 전체 배출량을 승용차(1.A.3.b.i.) 항목에 합산하여 보고하고, 나머지 차종에 대해서는 IE로 처리하였다.

표 1-8 | 완전성 적용 항목

표기 기호	정의	설명
NO	미발생 (Not Occurring)	특정 온실가스 배출원 및 흡수원의 활동이 국내에 존재하지 않는 경우
NE	미산정 (Not Estimated)	배출원 및 흡수원은 존재하나, 특정 사유로 인해 배출량 또는 흡수량이 산정되지 않는 경우
NA	적용 불가 (Not Applicable)	배출원 및 흡수원의 배출활동이 존재하나, 특정 가스의 배출 또는 흡수가 발생하지 않는 경우
IE	다른 부문에 포함 (Included Elsewhere)	배출원별 배출량 및 흡수원별 흡수량이 산정되었으나, 예상 배출원 또는 흡수원 대신 통계 내 타 배출원에 포함된 경우
C	기밀 (Confidential)	해당 항목의 배출·흡수량이 보안상 기밀 정보인 경우

1.7 통계 단위

온실가스는 배출되어 대기 중에 머무는 기간과 열 흡수량이 다르며, 이에 따라 온실가스별로 지구 온난화에 미치는 영향이 각기 다르다. 이러한 특성 차이로 인해 국제사회는 온실가스를 하나의 기준으로 비교·평가하기 위하여 CO₂ 환산량(carbon dioxide equivalent, 이하 CO₂-eq)을 활용한다. CO₂ 환산량은 GWP를 활용하여 산정하며²¹⁾, 여기에서 GWP 수치는 IPCC 평가보고서에 제시된 값을 기준으로 한다. 우리나라 온실가스 배출량 통계는 파리협정 MPG_s 제37항에 따라 제5차 IPCC 평가보고서에서 제시한 100년 기준 GWP를 바탕으로 작성되고 있다.

| 표 1-9 | 온실가스별 지구온난화지수(GWP)

온실가스	화학식	지구온난화지수(GWP-100)
이산화탄소	CO ₂	1
메탄	CH ₄	28
아산화질소	N ₂ O	265
수소불화탄소(HFCs)		
HFC-23	CHF ₃	12,400
HFC-32	CH ₂ F ₂	677
HFC-41	CH ₃ F	116
HFC-125	CHF ₂ CF ₃	3,170
HFC-134	CHF ₂ CHF ₂	1,120
HFC-134a	CH ₂ FCF ₃	1,300
HFC-143	CH ₂ FCHF ₂	328
HFC-143a	CH ₃ CF ₃	4,800
HFC-152	CH ₂ FCH ₂ F	16
HFC-152a	CH ₃ CHF ₂	138
HFC-161	CH ₃ CH ₂ F	4
HFC-227ea	CF ₃ CHFCF ₃	3,350
HFC-236cb	CH ₂ FCF ₂ CF ₃	1,210
HFC-236ea	CHF ₂ CHFCF ₃	1,330
HFC-236fa	CF ₃ CH ₂ CF ₃	8,060
HFC-245ca	CH ₂ FCF ₂ CHF ₂	716
HFC-245fa	CHF ₂ CH ₂ CF ₃	858
HFC-365mfc	CH ₃ CF ₂ CH ₂ CF ₃	804
HFC-43-10mee	CF ₃ CHFCHFCF ₂ CF ₃	1,650
과불화화합물(Perfluorinated Compounds)		
PFC-14	CF ₄	6,630
PFC-116	C ₂ F ₆	11,100
PFC-218	C ₃ F ₈	8,900
PFC-318	c-C ₄ F ₈	9,540
PFC-31-10	C ₄ F ₁₀	9,200
PFC-41-12	C ₅ F ₁₂	8,550
PFC-51-14	C ₆ F ₁₄	7,910
PCF-91-18	C ₁₀ F ₁₈	7,190
Trifluoromethyl sulfur pentafluoride	SF ₅ CF ₃	17,400
Perfluorocyclopropane	c-C ₃ F ₆	9,200
육불화황	SF ₆	23,500
삼불화질소	NF ₃	16,100

21) 예: 온실가스 배출량 = 활동자료 × 배출계수 × 온실가스별 GWP

PART

02

국가 온실가스 배출 및 흡수 추이

2.1 국가 온실가스 배출 및 흡수 추이 분석

2.2 온실가스별 배출 및 흡수 추이 분석

2.3 분야별 배출 및 흡수 추이 분석

2.1 국가 온실가스 배출 및 흡수 추이 분석

2.1.1 총론

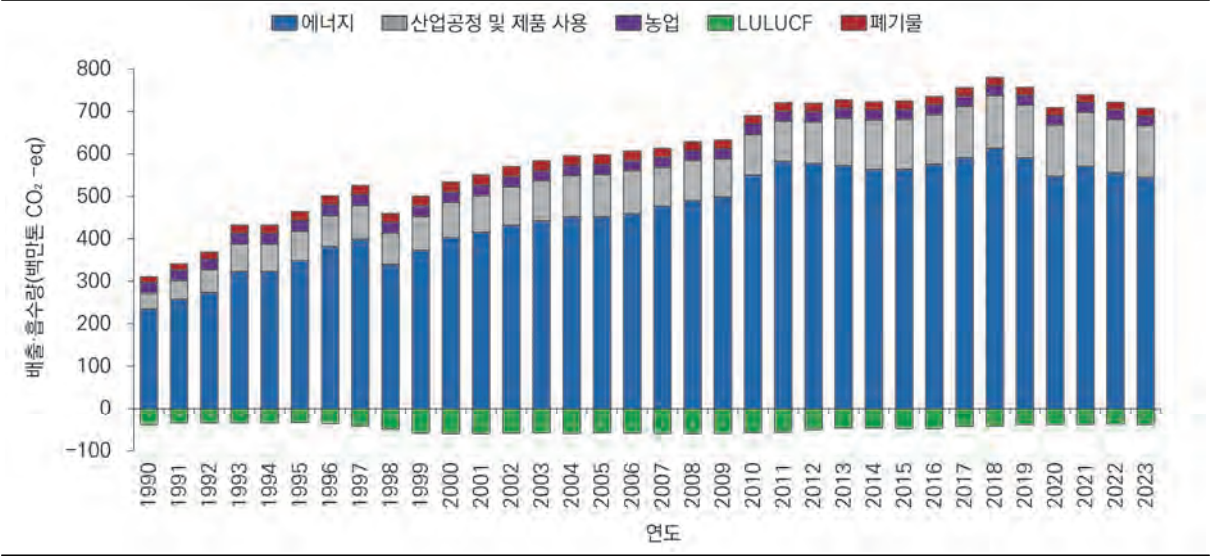
우리나라의 2023년 온실가스 총배출량(LULUCF 제외)¹⁾은 707.2 백만톤 CO₂-eq로 1990년도 총배출량 310.6 백만톤 CO₂-eq에 비해 127.7% 증가하였고 전년도(2022년) 총배출량인 722.0 백만톤 CO₂-eq보다 2.1% 감소, 2018년 배출 정점(780.1 백만톤 CO₂-eq)에 비해서는 9.3% 감소하였다. 2023년 온실가스 순배출량(LULUCF 포함)²⁾은 667.8 백만톤 CO₂-eq로 1990년도 순배출량 271.5 백만톤 CO₂-eq보다 146.0% 증가하였고, 전년도(2022년) 순배출량 684.1 백만톤 CO₂-eq 대비 2.4% 감소, 2018년도 순배출량 738.6 백만톤 CO₂-eq보다 9.6% 감소하였다(그림 2-1, 표 2-1).

우리나라의 배출량은 1990년대 경제성장에 따라 증가 추세를 보였으나, 2000년대 이후 증가율이 점차 둔화하는 경향이 나타났고 2018년 배출 정점 도달 이후에는 감소세로 전환되었다. 2020년 코로나19로 인해 단기적으로 배출량이 전년 대비 6.3% 감소한 후 기저효과로 2021년 배출량이 증가하였으나 2022년, 2023년 배출량은 다시 감소하며 감소 추세를 이어가고 있다. 그 외 단기적으로 배출량 추이 변화가 있었던 해는 1998년과 2009년이다. 1998년에는 외환위기의 영향으로 온실가스 배출량이 전년 대비 12.6% 감소하였고, 이후에는 증가하는 추세를 보이다가(1999-2008년 연평균 증가율 2.6%) 2009년 경기 침체의 영향으로 전년 대비 증가율이 0.6%에 그쳤다.

우리나라에서 온실가스 배출량이 가장 많이 발생하는 분야는 에너지 분야로 2023년 기준 총배출량의 77.1%를 차지한다. 그 외의 분야로는 산업공정 및 제품 사용 17.2%, 농업 3.2%, 폐기물 2.6% 순으로 큰 비중을 차지한다. 우리나라는 제조업 중심의 산업구조로 되어 있어 1990년부터 국가 총배출량의 74-81%가 에너지 분야 배출량에서 발생하고 있다.

1) 총배출량은 LULUCF 분야를 제외한 에너지, 산업공정 및 제품 사용, 농업, 폐기물 분야 배출량의 합계로 본 보고서의 국가 총배출량 비중, 증감률, 전 세계 배출량 순위 등의 분석에 활용한 값은 LULUCF 분야를 제외한 총배출량을 기준으로 함

2) 순배출량은 LULUCF 분야의 배출원 및 흡수원을 모두 포함한 전 분야(에너지, 산업공정 및 제품 사용, 농업, 폐기물, LULUCF) 배출량의 합계임



| 그림 2-1 | 분야별 온실가스 배출량 및 흡수량(1990-2023)

| 표 2-1 | 분야별 온실가스 배출량 및 증감률

(단위: 백만톤 CO₂-eq)

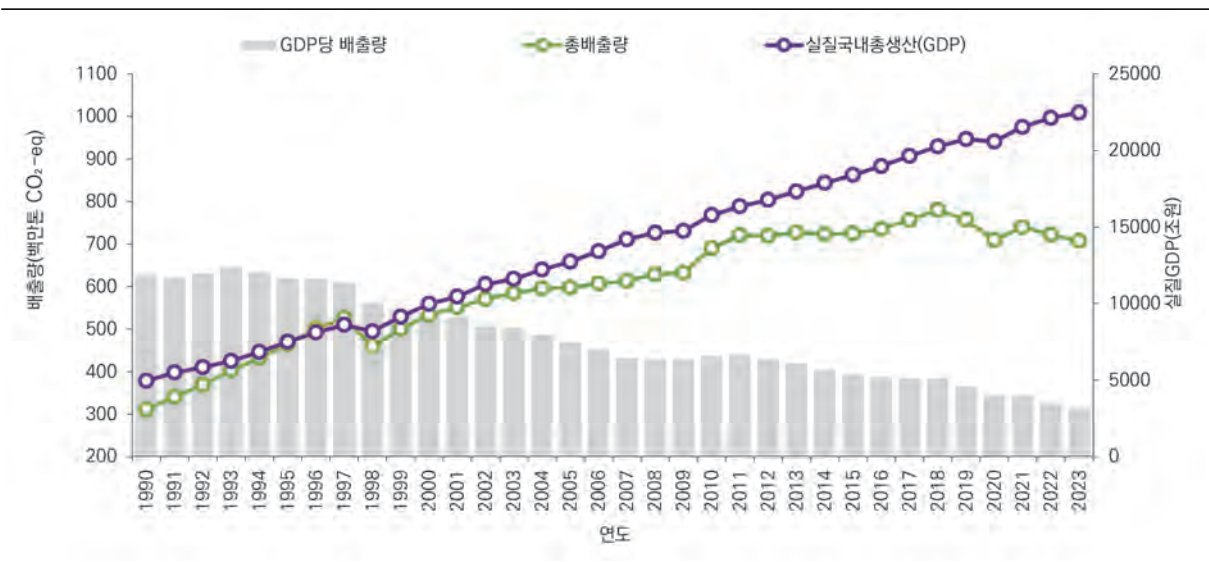
분야			1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023	증감률(%)	
										1990년 대비	전년 대비
에너지	배출량		234.5	402.5	549.7	613.7	570.5	555.6	545.0	132.4	-1.9
	비중(%)		75.5	75.4	79.7	78.7	77.1	77.0	77.1		
산업공정 및 제품 사용	배출량		37.8	83.1	96.0	123.8	127.8	125.5	121.5	221.4	-3.2
	비중(%)		12.2	15.6	13.9	15.9	17.3	17.4	17.2		
농업	배출량		24.8	24.6	24.5	23.3	22.9	22.8	22.5	-9.1	-1.1
	비중(%)		8.0	4.6	3.6	3.0	3.1	3.2	3.2		
LULUCF	배출량		-39.1	-60.4	-57.4	-41.6	-38.9	-37.9	-39.4	-*	-*
폐기물	배출량		13.4	23.4	19.7	19.3	18.3	18.1	18.2	35.2	0.3
	비중(%)		4.3	4.4	2.9	2.5	2.5	2.5	2.6		
총배출량 (LULUCF 제외)	배출량		310.6	533.6	690.0	780.1	739.5	722.0	707.2	127.7	-2.1
	비중(%)		100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0		
순배출량 (LULUCF 포함)	배출량		271.5	473.2	632.6	738.6	700.6	684.1	667.8	146.0	-2.4

주: LULUCF 분야는 배출량과 흡수량을 모두 합한 순흡수량이므로 증감률 별도 표기하지 않음

2.1.2 실질 국내총생산(GDP)³⁾ 대비 온실가스 총배출량

2023년도 GDP 당 온실가스 총배출량은 314.7 톤 CO₂-eq/10억원으로 1990년도 626.5 톤 CO₂-eq/10억원 대비 49.8%, 2022년도 326.4 톤 CO₂-eq/10억원 대비 3.6% 감소하였다.

우리나라 GDP 당 온실가스 총배출량은 점진적으로 감소하는 추이를 보이며, 2018년 배출정점 도달 이후에는 GDP는 증가하는 반면 배출량은 감소하는 현상이 나타났다. 1990년대에는 GDP 증가율과 온실가스 총배출량 증가율 모두 5-10%로 유사한 증가율을 보였고, 2000년대부터 온실가스 배출량 증가율(2000-2009년 연평균 증가율 1.9%)이 GDP 증가율(2000-2009년 연평균 증가율 4.4%)보다 낮아지기 시작하며 약세한 탈동조화(Weak Decoupling) 현상⁴⁾이 나타나기 시작했다. 2010년 이후(2010-2017년) 연평균 경제 성장률이 2-3%대로 진입함과 동시에 연평균 총배출량 증가율은 1.4%로 낮아졌고, 총배출량 증가율이 감소세(-3.1%)로 전환된 2018년 이후 탈동조화가 이루어졌다. 다만 1998년 외환위기 회복기(1998-1999년), 2008년 경기 침체 회복기(2010-2011년), 코로나19 회복기(2020-2021년)와 같이 경제가 반등하는 시기에는 일시적으로 GDP와 배출량 모두 전년 대비 급등하는 현상이 관찰되었다.



| 그림 2-2 | 실질 국내총생산(GDP) 당 온실가스 총배출량(1990-2023)

| 표 2-2 | 실질 국내총생산(GDP)당 온실가스 총배출량(1990-2023)

구분	1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023
총배출량 (백만톤 CO ₂ -eq)	310.6	533.6	690.0	780.1	739.5	722.0	707.2
GDP(천억원)	4,957.4	9,982.9	15,772.5	20,261.0	21,534.2	22,121.6	22,471.8
GDP 당 총배출량 (톤 CO ₂ -eq/10억원)	626.5	534.5	437.4	385.0	343.4	326.4	314.7

3) 출처: 국민계정, 경제활동별 GDP 및 GNI(원계열, 실질, 2020년 기준)(한국은행, 2025)(접속일: 2025.12.29.)

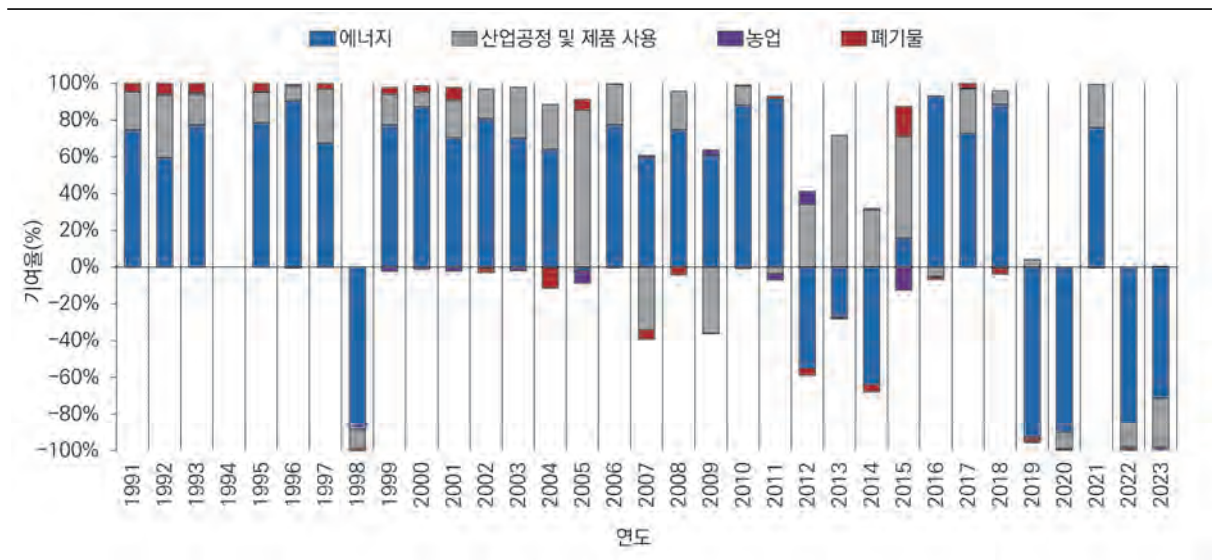
4) 온실가스 탈동조화는 온실가스 배출량과 경제성장의 경로가 분리되는 현상을 의미함

2.1.3 온실가스 증감

2023년 국가 총배출량의 감소(LULUCF 제외)(전년 대비 -2.1%)에 가장 크게 기여한 분야는 배출량에서 차지하는 비중이 가장 큰 에너지 분야이다. -2.1%의 국가 배출량 증감률 중 에너지 분야의 기여도는 -1.5%p로 나타났다. 에너지 분야의 배출량 감소에 가장 크게 영향을 미친 부문은 공공 전기 및 열 생산 부문(1.A.1.a.)으로 전년보다 10.9 백만톤 CO₂-eq, 4.6% 감소하였다. 이와 같은 배출량 감소는 산업 전력수요 감소 등으로 총발전량이 감소(전년 대비 -1.1%)함과 동시에 석탄 발전량은 감소(-4.3%), 재생 에너지 및 원자력 발전량이 증가(7.7%, 2.5%)하였기 때문이다.

2023년 국가 배출량의 증감률(-2.1%)에 대한 다른 분야의 증감률 기여도는 산업공정 및 제품 사용 -0.6%p, 농업 -0.03%p, 폐기물 0.01%p로 나타났다. 산업공정 및 제품 사용 분야에서는 전자산업의 온실가스 저감효율 개선 및 화학산업의 석유화학제품 원료소비량 감소로 인한 배출량 감소가 주요 요인이며, 농업 분야는 벼재배 면적(3년 평균값) 감소(0.8%)⁵⁾와 상시담수 비율 감소(2.1%p)⁶⁾, 폐기물 분야는 소각 배출량 증가(10.8%)가 주요 요인이다.

2023년 LULUCF 분야 순흡수량⁷⁾은 39.4 백만톤 CO₂-eq으로 전년 37.9 백만톤 CO₂-eq 대비 1.5 백만톤 CO₂-eq 증가하였으며, 산림지 바이오매스 연소(산불) 배출량 감소로 인한 순흡수량 증가가 주요 요인이다.



| 그림 2-3 | 온실가스 증감 기여율(1990-2023)

5) 출처: 농업면적조사(2021-2023)(국가데이터처, 2024)

6) 출처: 농림어업조사 마이크로데이터(2021-2023)(국가데이터처, 2024)

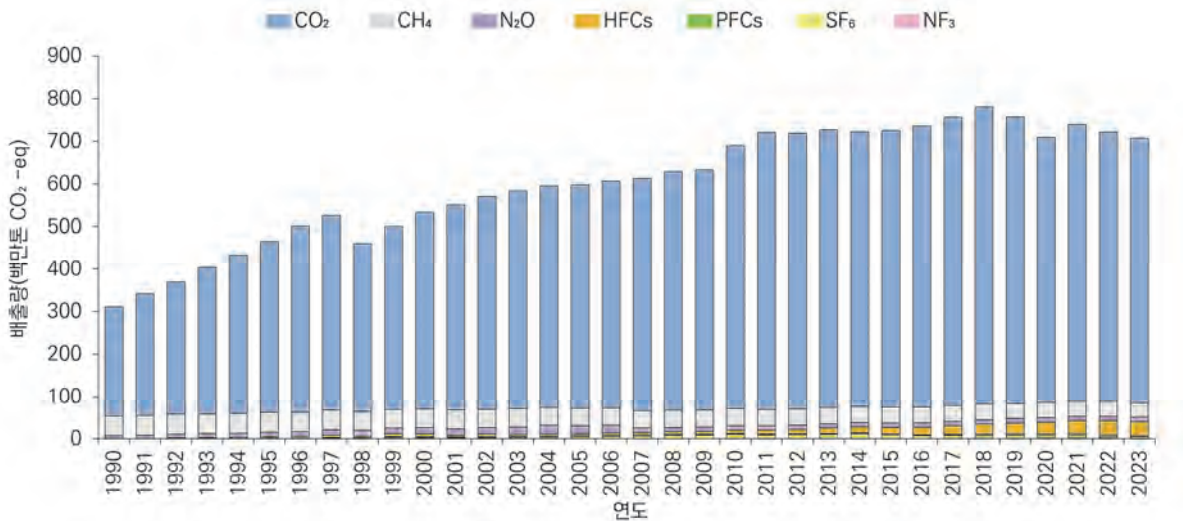
7) 순흡수량은 LULUCF 분야의 부문별 배출량과 흡수량을 모두 포함한 전 부문 합산한 값을 의미함

| 표 2-3 | 분야별 전년 대비 온실가스 총배출량 증감 기여도(1991-2023)

분야		1991	2000	2010	2018	2021	2022	2023
에너지	기여도(%p)	7.4	6.0	8.1	3.0	3.2	-2.0	-1.5
	기여율(%)	74.5	89.4	89.7	95.9	76.6	85.1	71.7
산업공정 및 제품 사용	기여도(%p)	2.1	0.6	1.0	0.3	1.0	-0.3	-0.6
	기여율(%)	20.8	8.3	10.6	8.2	23.9	13.1	26.9
농업	기여도(%p)	0.0	-0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	-0.03
	기여율(%)	0.1	-1.3	0.6	-0.8	0.0	0.7	1.7
폐기물	기여도(%p)	0.4	0.2	-0.1	-0.1	0.0	0.0	0.01
	기여율(%)	4.5	3.6	-0.9	-3.4	-0.5	1.1	-0.3
총배출량 (LULUCF 제외)	기여도(%p)	9.9	6.7	9.0	3.2	4.2	-2.4	-2.1
	기여율(%)	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

2.2 온실가스별 배출 및 흡수 추이 분석

온실가스 중에서는 CO₂가 2023년 기준 총배출량의 87.9%로 가장 큰 비중을 차지하고, 불소계 온실가스가 5.7%(HFCs 4.76%, SF₆ 0.57%, PFCs 0.25%, NF₃ 0.17%), CH₄ 4.8%, N₂O가 1.5% 순으로 나타났다. CO₂ 배출량은 2018년 배출 정점 도달 이후 감소세로 전환되었으며 CH₄ 배출량은 에너지 분야 석탄 생산량 감소, 농업 분야 벼재배 면적의 감소 등으로 인해 1990년 이후 지속적으로 감소하였다. N₂O 배출량의 경우 2000년대 중반 큰 폭으로 감소 후 소폭 증감하는 추이를 보이고 있다. 2023년 불소계 온실가스는 1990년 대비 큰 증가율을 보이는데, 이는 1990년 대비 냉장과 냉방장치의 냉매로 주로 사용되는 HFCs와 반도체, 디스플레이 제조 공정에 주로 사용되는 PFCs, SF₆, NF₃의 사용량이 늘었기 때문이다.



| 그림 2-4 | 온실가스별 배출량(1990-2023)

| 표 2-4 | 온실가스별 배출량 및 증감률(1990-2023)

(단위: 백만톤 CO₂-eq)

온실가스		1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023	증감률(%)	
									1990년 대비	전년 대비
CO ₂	배출량	256.3	462.9	618.4	697.6	651.0	633.8	621.7	142.6	-1.9
	비중(%)	82.5	86.7	89.6	89.4	88.0	87.8	87.9		
CH ₄	배출량	46.8	44.6	40.6	37.1	35.3	35.1	34.2	-26.8	-2.3
	비중(%)	15.1	8.4	5.9	4.8	4.8	4.9	4.8		
N ₂ O	배출량	6.3	14.8	10.5	10.7	10.7	10.6	10.6	68.6	0.3
	비중(%)	2.0	2.8	1.5	1.4	1.4	1.5	1.5		
HFCs	배출량	1.0	6.0	7.6	23.6	30.3	33.1	33.6	3,128.6	1.7
	비중(%)	0.3	1.1	1.1	3.0	4.1	4.6	4.8		
PFCs ¹⁾	배출량	IE, NE, NO	2.5	2.5	3.9	4.7	4.1	1.8	-4.2	-55.8
	비중(%)	-	0.5	0.4	0.5	0.6	0.6	0.3		

온실가스		1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023	증감률(%)	
									1990년 대비	전년 대비
SF ₆	배출량	0.2	2.8	10.0	6.2	5.8	4.0	4.0	2,279.5	1.6
	비중(%)	0.1	0.5	1.4	0.8	0.8	0.5	0.6		
NF ₃ ²⁾	배출량	IE,NO	IE,NO	0.4	1.0	1.7	1.5	1.2	262.1	-21.4
	비중(%)	-	-	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2		
총배출량 (LULUCF 제외)		310.6	533.6	690.0	780.1	739.5	722.0	707.2	127.7	-2.1
비중(%)		100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0		

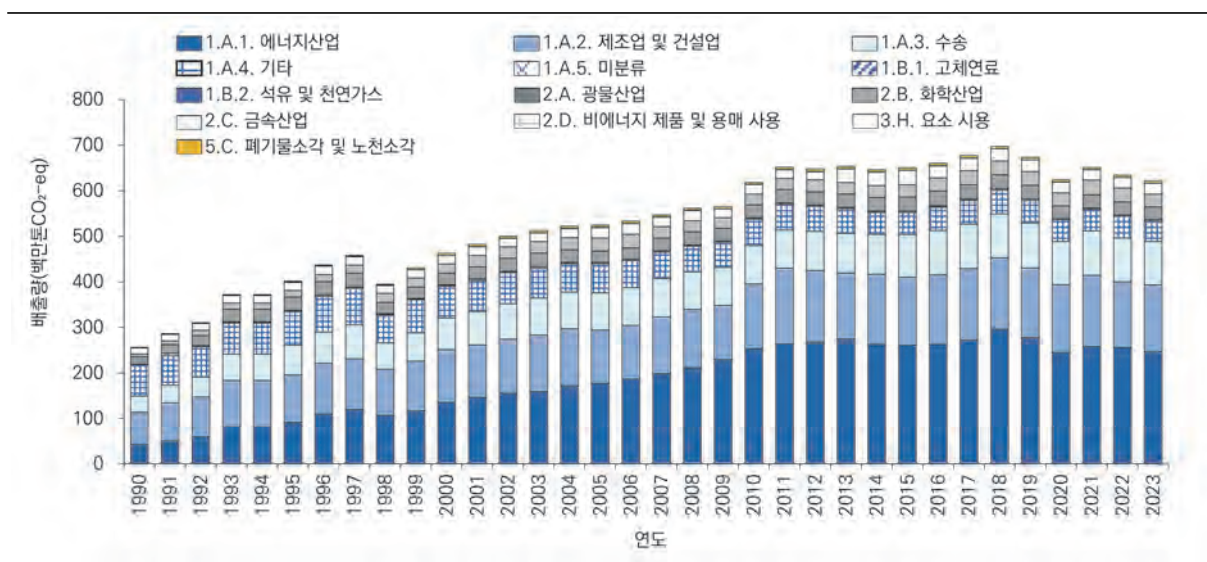
주: 1) PFCs는 최초 통계가 수집된 1997년도를 기준으로 증감을 산정

2) NF₃는 최초 통계가 수집된 2008년도를 기준으로 증감을 산정

2.2.1 이산화탄소(CO₂)

2023년 CO₂ 총배출량(LULUCF 제외)은 621.7 백만톤 CO₂-eq으로, 국가 온실가스 총배출량의 87.9%를 차지하였다. 1990년 256.3 백만톤 CO₂-eq 대비 142.6% 증가하였고, 2022년 633.8 백만톤 CO₂-eq 대비 1.9% 감소하였다. CO₂ 배출량은 경제성장과 함께 산업 및 수송에서의 배출량이 증가하며 증가 추세를 보이다가 2018년 정점 이후 2021년을 제외하고는 감소 추세를 보이고 있다.

2023년 분야별 CO₂ 배출 비중(LULUCF 제외)의 경우, 에너지 분야가 86.3%로 가장 큰 비중을 차지하였다. 그 다음으로 산업공정 및 제품 사용 분야가 12.9%, 폐기물 분야가 0.8%, 농업 분야가 0.02% 순으로 나타났다. CO₂ 배출량은 에너지 및 산업공정 및 제품 사용 분야의 배출량 증감 추세 영향이 가장 크게 작용하였다. 특히 전력 수요 증가, 제조업 생산 규모 확대, 물류와 교통량 증가 등 복합적 요인이 배출량 증가를 견인하였다.



| 그림 2-5 | 분야별 CO₂ 배출량(1990-2023)

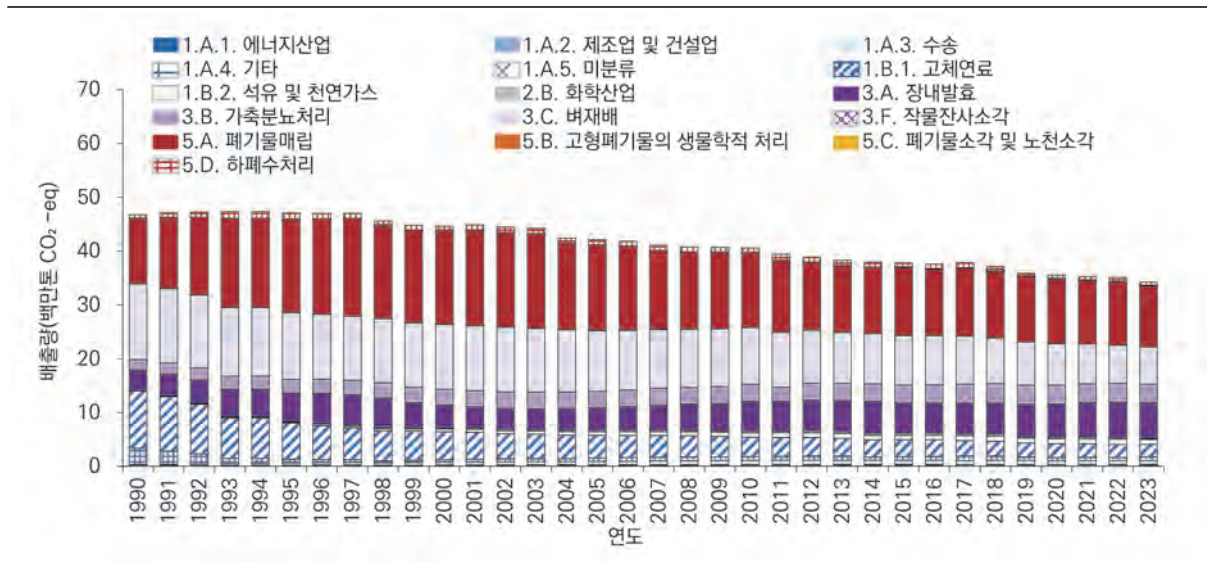
| 표 2-5 | 분야별 CO₂ 배출량 및 흡수량(1990-2023)(단위: 백만톤 CO₂-eq)

분야		1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023
1.에너지	1.A.1. 에너지산업	41.9	135.8	253.7	296.3	258.2	256.3	246.8
	1.A.2. 제조업 및 건설업	71.9	115.2	141.6	156.5	156.3	143.8	146.5
	1.A.3. 수송	35.7	70.1	84.6	96.5	97.2	96.2	95.4
	1.A.4. 기타	69.3	69.7	57.9	52.0	47.2	47.7	44.7
	1.A.5. 미분류	0.2	2.4	3.0	3.1	2.9	3.0	3.0
	1.B.1. 고체연료	0.2	0.05	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01
	1.B.2. 석유 및 천연가스	<0.0001	0.001	0.027	0.016	0.004	0.002	0.002
2.산업공정 및 제품 사용	2.A. 광물산업	16.4	26.1	28.3	30.5	29.0	28.4	28.0
	2.B. 화학산업	6.3	20.1	23.6	30.7	32.6	30.4	28.1
	2.C. 금속산업	13.1	18.5	21.2	26.4	22.3	22.8	23.6
	2.D. 비에너지 연료 및 용매 사용	0.36	0.51	0.55	0.60	0.57	0.61	0.64
3.농업	3.G. 석회사용	0.003	0.003	0.003	0.003	0.002	0.002	0.003
	3.H. 요소사용	0.43	0.28	0.12	0.12	0.11	0.09	0.09
5.폐기물	5.C 폐기물소각 및 노천소각	0.5	4.2	3.8	4.8	4.5	4.3	4.7
CO ₂ 총배출량(LULUCF 제외)		256.3	462.9	618.4	697.6	651.0	633.8	621.7

2.2.2 메탄(CH₄)

2023년 CH₄ 총배출량(LULUCF 제외)은 34.2 백만톤 CO₂-eq으로, 국가 온실가스 총배출량(LULUCF 제외)의 4.8%를 차지하였다. 이는 1990년 46.8 백만톤 CO₂-eq 대비 26.8%, 전년 35.1 백만톤 CO₂-eq 대비 2.3% 감소한 수치이다. CH₄ 배출량은 벼재배 면적 축소, 논벼 물관리 방법 개선 및 폐기물 매립 감소의 영향으로 꾸준히 줄어드는 경향을 보였다.

2023년 CH₄ 총배출량(LULUCF 제외)의 분야별 비중을 살펴보면 농업 분야가 50.0%로 가장 큰 비중을 차지하였다. 이어서 폐기물 분야가 35.1%, 에너지 분야가 14.3%, 산업공정 및 제품 사용 분야가 0.6% 순으로 나타났다.



| 그림 2-6 | 분야별 CH₄ 배출량(1990-2023)

| 표 2-6 | 분야별 CH₄ 배출량(1990-2023)

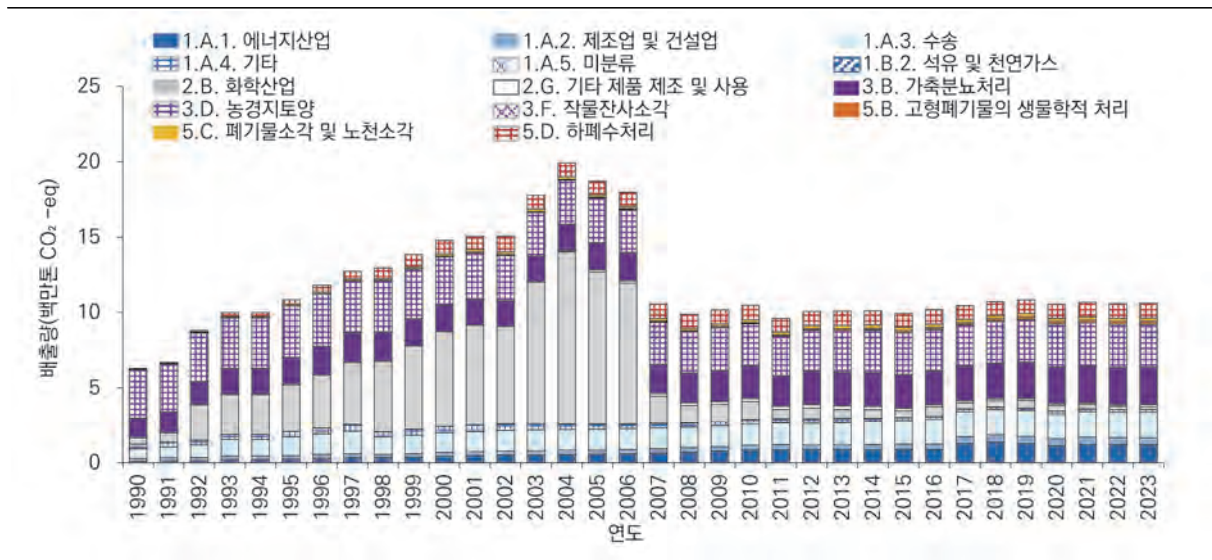
(단위: 백만톤 CO₂-eq)

분야		1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023
1.에너지	1.A.1. 에너지산업	0.03	0.06	0.10	0.07	0.07	0.09	0.12
	1.A.2. 제조업 및 건설업	0.08	0.15	0.20	0.23	0.24	0.24	0.23
	1.A.3. 수송	0.20	0.51	0.76	0.72	0.68	0.68	0.67
	1.A.4. 기타	2.98	0.43	0.73	0.84	0.59	0.58	0.64
	1.A.5. 미분류	0.001	0.009	0.011	0.012	0.011	0.011	0.011
	1.B.1. 고체연료	10.74	5.17	3.53	2.69	2.47	2.42	2.33
	1.B.2. 석유 및 천연가스	0.06	0.49	0.83	0.97	0.93	0.97	0.91
2.산업공정 및 제품 사용	2.B. 화학산업	0.05	0.28	0.31	0.35	0.32	0.25	0.19
3.농업	3.A. 장내발효	3.73	4.32	5.62	5.94	6.52	6.70	6.74
	3.B. 가축분뇨처리	1.97	2.94	3.21	3.54	3.51	3.49	3.48
	3.C. 벼재배	14.07	12.03	10.55	8.52	7.41	7.11	6.88
	3.E. 사바나소각	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
	3.F. 작물잔사소각	0.04	0.05	0.04	0.03	0.03	0.02	0.01
5.폐기물	5.A. 폐기물매립	12.15	17.26	13.77	12.33	11.77	11.60	11.31
	5.B. 고형폐기물의 생물학적 처리	NE	0.005	0.02	0.09	0.10	0.14	0.15
	5.C. 폐기물소각 및 노천소각	<0.001	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
	5.D. 하폐수처리	0.68	0.90	0.89	0.77	0.61	0.76	0.57
CH ₄ 총배출량(LULUCF 제외)		46.79	44.60	40.56	37.11	35.28	35.06	34.24

2.2.3 아산화질소(N₂O)

2023년 N₂O 총배출량(LULUCF 제외)은 10.6 백만톤 CO₂-eq으로, 국가 온실가스 총배출량(LULUCF 제외)의 1.5%를 차지하였다. 1990년의 N₂O 배출량 6.3 백만톤 CO₂-eq보다 68.6% 증가하였고, 2022년도 N₂O 배출량 10.6 백만톤 CO₂-eq보다는 0.3% 증가하였다. 산업공정 및 제품 사용 분야 화학산업 부문(2.B.)의 경우 1990년부터 N₂O 배출량이 증가하였으나 2006년 하반기부터 N₂O 분해설비 도입을 통한 감축사업이 추진되면서 배출량이 급감하였다.

2023년 N₂O 총배출량(LULUCF 제외)의 분야별 비중에서는 농업 분야가 50.3%로 가장 큰 비중을 차지하였다. 이어서 에너지 분야가 33.5%, 폐기물 분야가 13.2%, 산업공정 및 제품 사용 분야가 3.0% 순으로 나타났다.



| 그림 2-7 | 분야별 N₂O 배출량(1990-2023)

| 표 2-7 | 분야별 N₂O 배출량(1990-2023)

(단위: 백만톤 CO₂-eq)

분야		1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023
1. 에너지	1.A.1. 에너지산업	0.11	0.43	0.83	1.37	1.20	1.20	1.19
	1.A.2. 제조업 및 건설업	0.17	0.27	0.34	0.49	0.49	0.46	0.46
	1.A.3. 수송	0.65	1.28	1.42	1.68	1.74	1.73	1.74
	1.A.4. 기타	0.32	0.42	0.29	0.18	0.16	0.16	0.16
	1.A.5. 미분류	<0.001	0.005	0.006	0.007	0.006	0.006	0.006
	1.B.2. 석유 및 천연가스	NA,NO	NA,NO	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
2. 산업공정 및 제품 사용	2.B. 화학산업	0.42	6.32	1.22	0.42	0.31	0.20	0.17
	2.G. 기타 제품 제조 및 사용	NE,NO	NE,NO	0.20	0.13	0.10	0.10	0.15

분야		1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023
3. 농업	3.B. 가축분뇨처리	1.32	1.74	2.19	2.36	2.43	2.50	2.50
	3.D. 농경지토양	3.22	3.22	2.77	2.78	2.88	2.86	2.83
	3.E. 사바나소각	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
	3.F. 작물잔사소각	0.011	0.012	0.010	0.008	0.007	0.005	0.003
5. 폐기물	5.B. 고형폐기물의 생물학적 처리	NE,NO	0.03	0.07	0.17	0.17	0.17	0.20
	5.C. 폐기물소각 및 노천소각	0.03	0.16	0.19	0.22	0.22	0.22	0.22
	5.D. 하폐수처리	0.05	0.88	0.96	0.91	0.97	0.97	0.98
N₂O 총배출량(LULUCF 제외)		6.29	14.78	10.48	10.72	10.68	10.59	10.61

2.2.4 수소불화탄소(HFCs), 과불화탄소(PFCs), 육불화황(SF₆) 및 삼불화질소(NF₃)

불소계 온실가스인 HFCs, PFCs, SF₆, NF₃은 전량 산업공정 및 제품 사용 분야에서 배출된다. 2023년 불소계 온실가스 총배출량(LULUCF 제외)은 40.7 백만톤 CO₂-eq으로, 국가 온실가스 총배출량(LULUCF 제외)의 5.7%를 차지하였다. 1990년의 불소계 온실가스 배출량 1.2 백만톤 CO₂-eq과 비교하면 3,258.7%나 증가하였고, 2022년도 배출량 42.6 백만톤 CO₂-eq보다는 4.6% 감소하였다. 특히, 전자산업 부문의 경우 반도체 및 디스플레이 업체들의 저감장치 운영률, 저감효율 개선 등 온실가스 배출량 감축 노력의 결과로 배출량이 감소(3.2 백만톤 CO₂-eq)한 반면, 오존층파괴물질의 대체물질 사용 부문 배출량은 1.1 백만톤 CO₂-eq 증가하였다. 다만, 냉장 및 냉방 기기 등 오존층파괴물질의 대체물질 사용 부문에서도 2022년 HFCs를 특정물질로 지정하고 HFCs 생산·수입 통계를 구축하는 법제도를 마련하는 등 불소계 온실가스 관리를 위한 노력을 이행하고 있다.

산업공정 및 제품 사용 분야에서 불소계 온실가스의 비중은 1990년 3.2%에서 지속적으로 증가하여 2023년에는 33.5%로 증가하였다. 이에 따라 CO₂ 배출량 비중은 1990년 95.6%에서 2023년 66.1%로 감소하였다.



| 그림 2-8 | 분야별 불소계 온실가스 배출량(1990-2023)

| 표 2-8 | 분야별 불소계 온실가스 배출량(1990-2023)

(단위: 백만톤 CO₂-eq)

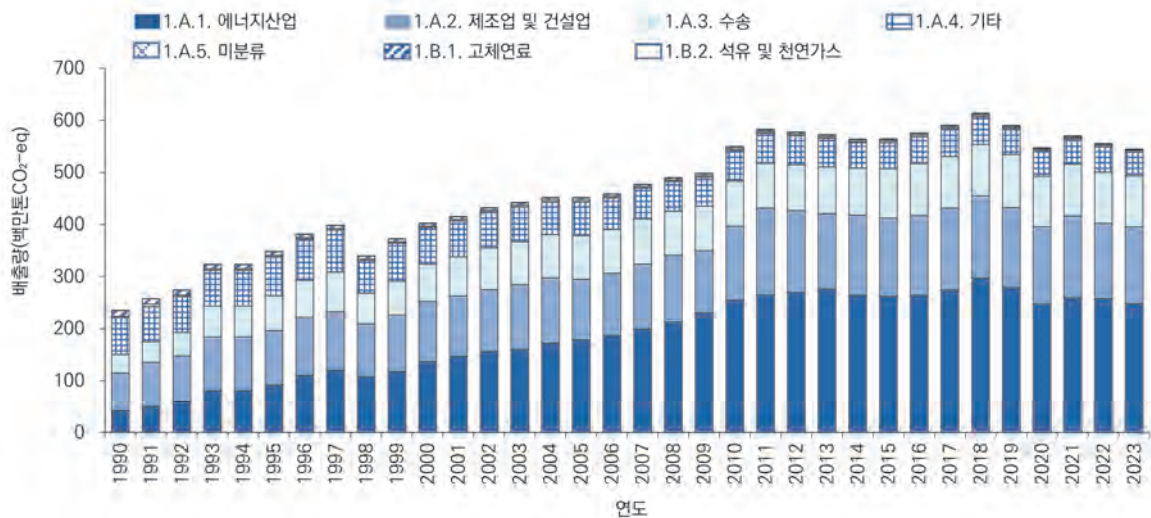
분야		1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023
2. 산업공정 및 제품 사용	2.B. 화학산업	1.0	3.4	0.03	0.09	0.10	0.09	0.06
	2.C. 금속산업	<0.001	0.02	0.15	0.15	0.15	0.20	0.18
	2.E. 전자산업	IE,NO	3.3	8.8	8.7	8.8	6.8	3.6
	2.F. 오존층파괴물질의 대체물질 사용	IE,NO	2.5	7.4	23.1	29.5	32.3	33.4
	2.G. 기타 제품 제조 및 사용	0.2	2.2	4.1	2.7	4.1	3.1	3.4
불소계 온실가스 총배출량		1.2	11.3	20.5	34.7	42.6	42.6	40.7

2.3 분야별 배출 및 흡수 추이 분석

2.3.1 에너지

2023년 에너지 분야의 온실가스 총배출량은 545.0 백만톤 CO₂-eq로, 국가 총배출량의 77.1%를 차지하였다. 1990년 234.5 백만톤 CO₂-eq보다 132.4% 증가하였고, 전년 555.6 백만톤 CO₂-eq 보다는 1.9% 감소하였다.

에너지 분야 배출량은 1990년부터 1997년까지 증가하다가 1998년 경제위기로 감소한 이후, 경기 회복 및 경제성장의 영향으로 2011년까지 다시 증가하였다. 이후 2014년까지 소폭의 감소세를 보이다가 다시 증가세로 전환되어 2018년 정점에 이르렀다. 2023년까지 에너지 분야는 코로나19의 영향에서 벗어나며 소폭 반등한 2021년을 제외하고는 장기적으로 감소추세를 보이고 있다.



| 그림 2-9 | 에너지 분야 온실가스 배출량(1990-2023)

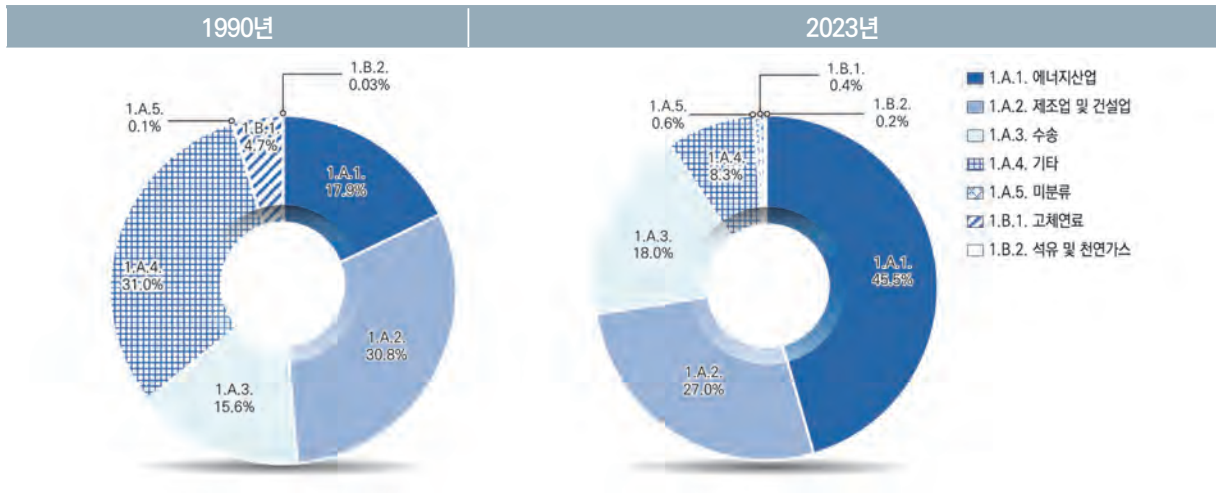
| 표 2-9 | 에너지 분야 온실가스 배출량(1990-2023)

(단위: 백만톤 CO₂-eq)

부문	1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023	증감률(%)	
								1990년 대비	전년 대비
1.A. 연료연소	223.5	396.8	545.3	610.0	567.1	552.2	541.7	142.4	-1.9
1.A.1. 에너지산업	42.0	136.3	254.6	297.7	259.5	257.6	248.2	490.8	-3.7
1.A.2. 제조업 및 건설업	72.2	115.6	142.1	157.2	157.0	144.5	147.2	104.0	1.9
1.A.3. 수송	36.5	71.9	86.7	98.9	99.6	98.6	97.8	168.0	-0.8
1.A.4. 기타	72.6	70.5	58.9	53.0	48.0	48.5	45.5	-37.4	-6.1
1.A.5. 미분류	0.2	2.4	3.0	3.1	2.9	3.0	3.0	1,547.8	-0.8
1.B. 탈부	11.0	5.7	4.4	3.7	3.4	3.4	3.2	-70.5	-4.7
1.B.1. 고체연료	10.9	5.2	3.6	2.7	2.5	2.4	2.3	-78.6	-3.8
1.B.2. 석유 및 천연가스	0.1	0.5	0.9	1.0	0.9	1.0	0.9	1,348.5	-6.9

부문	1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023	증감률(%)	
								1990년 대비	전년 대비
합계	234.5	402.5	549.7	613.7	570.5	555.6	545.0	132.4	-1.9

에너지 분야 배출량은 크게 연료연소와 탈루로 구분되며, 2023년 기준 연료연소 부문(1.A.)은 99.4% (541.7 백만톤 CO₂-eq)로 에너지 분야의 대부분을 차지하였고 탈루(1.B.)는 0.6%(3.2 백만톤 CO₂-eq)를 차지하였다. 세부 부문별 비중은 에너지산업(1.A.1.)이 45.5%로 가장 크고, 그 다음으로 제조업 및 건설업(1.A.2.)이 27.0%, 수송(1.A.3.)이 18.0%, 기타(1.A.4.)가 8.3%, 미분류(1.A.5.)가 0.6%, 고체연료(1.B.1.)가 0.4%, 석유 및 천연가스(1.B.2.)가 0.2% 순으로 비중이 큰 것으로 나타났다.



| 그림 2-10 | 에너지 분야 세부 부문별 배출 비중

2023년 연료연소 부문(1.A.)의 배출량은 1990년 대비 142.4% 증가하였고 전년 대비 1.9% 감소하였다. 2023년 세부 부문별 배출량은 제조업 및 건설업(1.A.2.)을 제외한 전 부문(에너지산업, 수송, 기타, 미분류)에서 전년 대비 감소하였다.

세부 부문별로 살펴보면, 에너지산업 부문(1.A.1.) 온실가스 배출량은 석탄 발전량 감소(-4.3%), 재생에너지 및 원자력 발전량 증가(7.7%, 2.5%)의 영향으로 전년 대비 9.5 백만톤 CO₂-eq, 3.7% 감소하였다. 기타 부문(1.A.4.)도 연평균 기온 상승으로 가정용 도시가스 사용량이 감소하며 전년 대비 3.0 백만톤 CO₂-eq, 6.1% 감소하였다. 수송 부문(1.A.3.)은 항공기 운항횟수(-7.3%⁸⁾) 및 자동차 주행거리(-0.1%⁹⁾)가 감소하면서 배출량이 0.8 백만톤 CO₂-eq, 0.8% 감소하였다. 반면, 제조업 및 건설업 부문(1.A.2.)은 철강 및 석유화학업 연료 소비가 증가하며 전년 대비 2.7 백만톤 CO₂-eq, 1.9% 증가하였다.

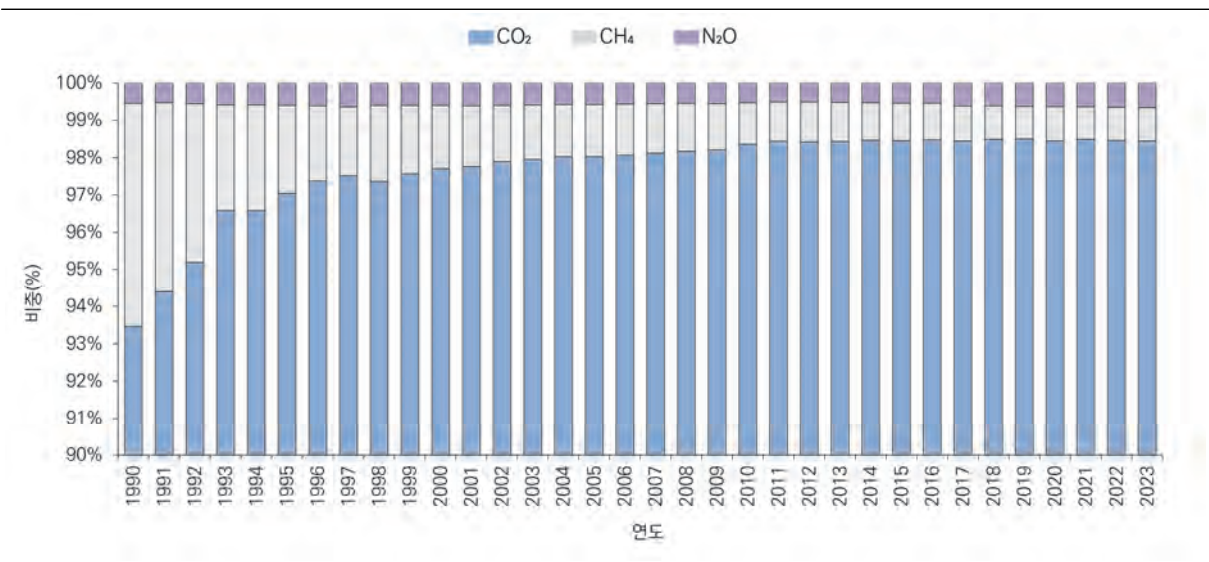
2023년 탈루 부문(1.B.)의 배출량은 1990년 대비 70.5% 감소하였고 전년 대비 4.7% 감소하였다.

8) 자료: 항공기 운항횟수 218,728회(2022년) → 202,774회(2023년)(항공운송업체 연료소비량 현황조사, 2024)

9) 자료: 자동차주행거리 335,630 백만km(2022년) → 335,460 백만km(2023년)(자동차 주행거리 통계, 2024)

세부 부문별로는 국내 석탄 생산량 감소에 따라 고체연료 부문(1.B.1.) 배출량이 전년 대비 3.8% 감소하였으며, 천연가스 및 도시가스 소비 감소의 영향으로 석유 및 천연가스 부문(1.B.2.) 역시 전년 대비 6.9% 감소하였다.

에너지 분야에서는 CO₂, CH₄, N₂O가 배출되며, 1990년 에너지 분야 배출 비중은 CO₂ 93.5%, CH₄ 6.0%, N₂O 0.5%, 2023년 배출 비중은 CO₂ 98.4%, CH₄ 0.9%, N₂O 0.7%의 순으로 나타났다. 전반적으로 CO₂ 배출 비중이 증가하고 CH₄ 배출 비중은 감소하였다. 이는 석탄 산업 합리화 정책에 따라 폐광이 늘어나며 석탄 생산이 감소함에 따라 탈루 분야의 CH₄가 감소했기 때문이다.



| 그림 2-11 | 에너지 분야 온실가스별 배출 비중(1990-2023)

| 표 2-10 | 에너지 분야 온실가스별 배출량(1990-2023)

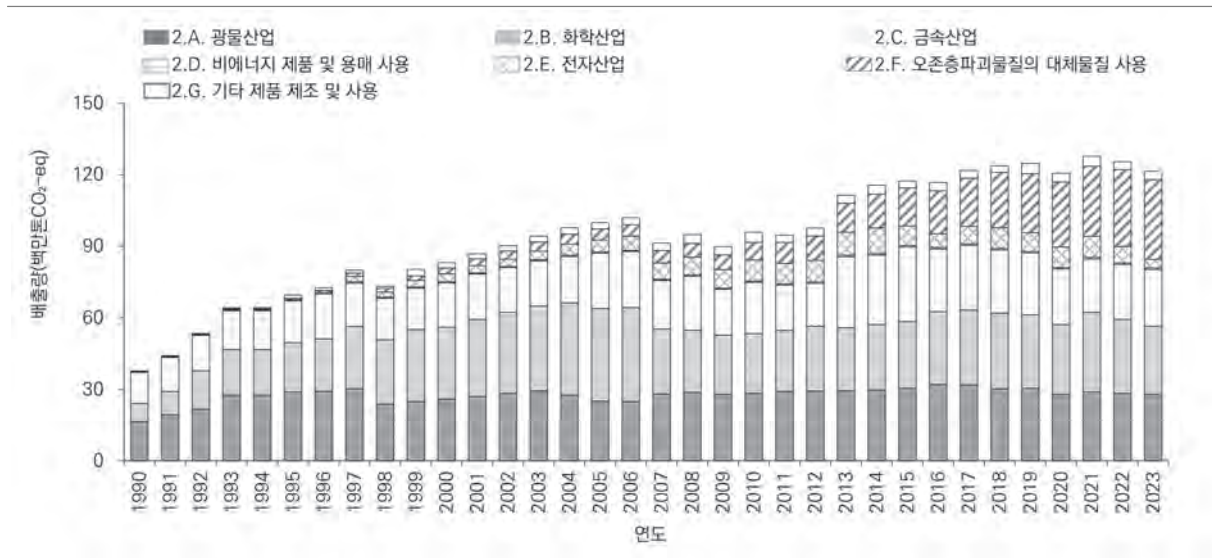
(단위: 백만톤 CO₂-eq)

온실가스	1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023	증감률(%)	
								1990년 대비	전년 대비
CO ₂	219.1	393.2	540.7	604.4	561.9	547.1	536.5	144.8	-1.9
CH ₄	14.1	6.8	6.2	5.5	5.0	5.0	4.9	-65.2	-1.5
N ₂ O	1.2	2.4	2.9	3.7	3.6	3.6	3.6	185.5	-0.05
합계	234.5	402.5	549.7	613.7	570.5	555.6	545.0	132.4	-1.9

2.3.2 산업공정 및 제품 사용

2023년 산업공정 및 제품 사용 분야의 온실가스 총배출량은 121.5 백만톤 CO₂-eq로, 국가 총 배출량의 17.2%를 차지하였다. 1990년 37.8 백만톤 CO₂-eq보다 221.4% 증가하였고, 전년 125.5 백만톤 CO₂-eq보다는 3.2% 감소한 수치이다.

2023년 기준, 금속산업(2.C.), 비에너지 제품 및 용매 사용(2.D.), 오존층파괴물질의 대체물질 사용(2.F.), 기타 제품 제조 및 사용(2.G.) 부문의 배출량은 전년 대비 증가한 반면 광물산업(2.A.), 화학산업(2.B.), 전자산업(2.E.) 부문의 배출량은 감소하였다. 특히, 전자산업의 온실가스 저감효율 개선으로 전자산업(2.E.) 배출량이 전년 대비 47.0%(3.2 백만톤 CO₂-eq) 감소하였고 나프타 분해시설(Naphtha Cracking Center, NCC) 공정의 원료투입량 감소로 화학산업 부문 배출량이 전년 대비 8.1%(2.5 백만톤 CO₂-eq) 줄어들었다.



| 그림 2-12 | 산업공정 및 제품 사용 분야 온실가스 배출량(1990-2023)

| 표 2-11 | 산업공정 및 제품 사용 분야 온실가스 배출량(1990-2023)

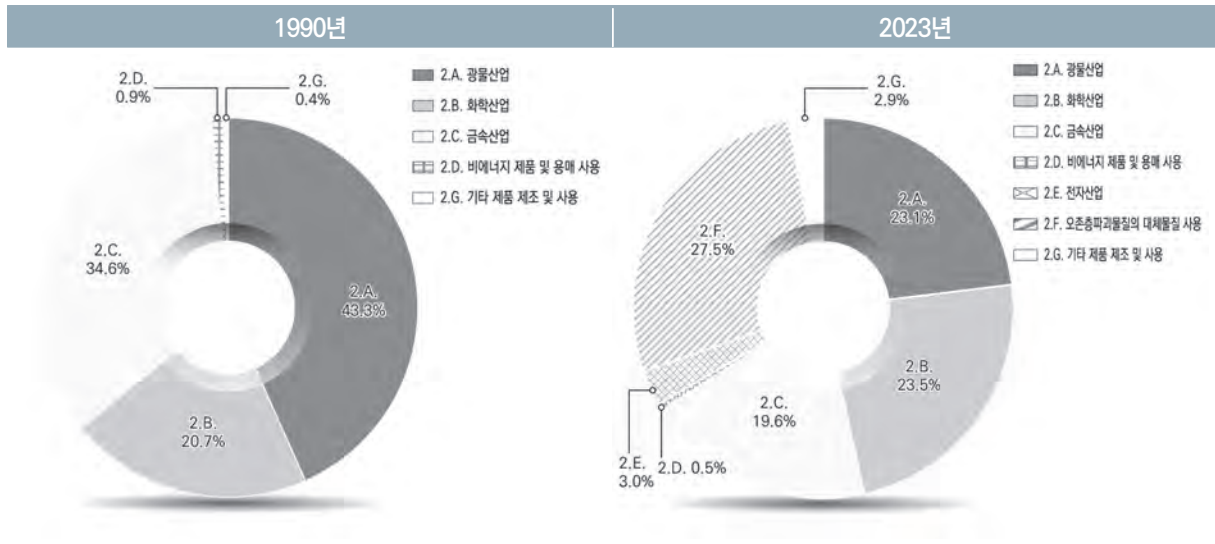
(단위: 백만톤 CO₂-eq)

부문	1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023	증감률(%)	
								1990년 대비	전년 대비
2.A. 광물산업	16.4	26.1	28.3	30.5	29.0	28.4	28.0	71.0	-1.4
2.B. 화학산업	7.8	30.1	25.2	31.6	33.4	31.0	28.5	263.9	-8.1
2.C. 금속산업	13.1	18.5	21.4	26.6	22.4	23.0	23.8	81.9	3.2
2.D. 비에너지 제품 및 용매 사용	0.4	0.5	0.5	0.6	0.6	0.6	0.6	79.3	4.3
2.E. 전자산업	IE,NA,NO	3.3	8.8	8.7	8.8	6.8	3.6	62.8	-47.0
2.F. 오존층파괴물질의 대체물질 사용	IE,NO	2.5	7.4	23.1	29.5	32.3	33.4	2,129,432.3	3.3
2.G. 기타 제품 제조 및 사용	0.2	2.2	4.3	2.8	4.2	3.3	3.5	2002.4	8.7
합계	37.8	83.1	96.0	123.8	127.8	125.5	121.5	221.4	-3.2

주: 1) 전자산업 부문은 최초 통계가 수집된 1997년도를 기준으로 증감률 산정

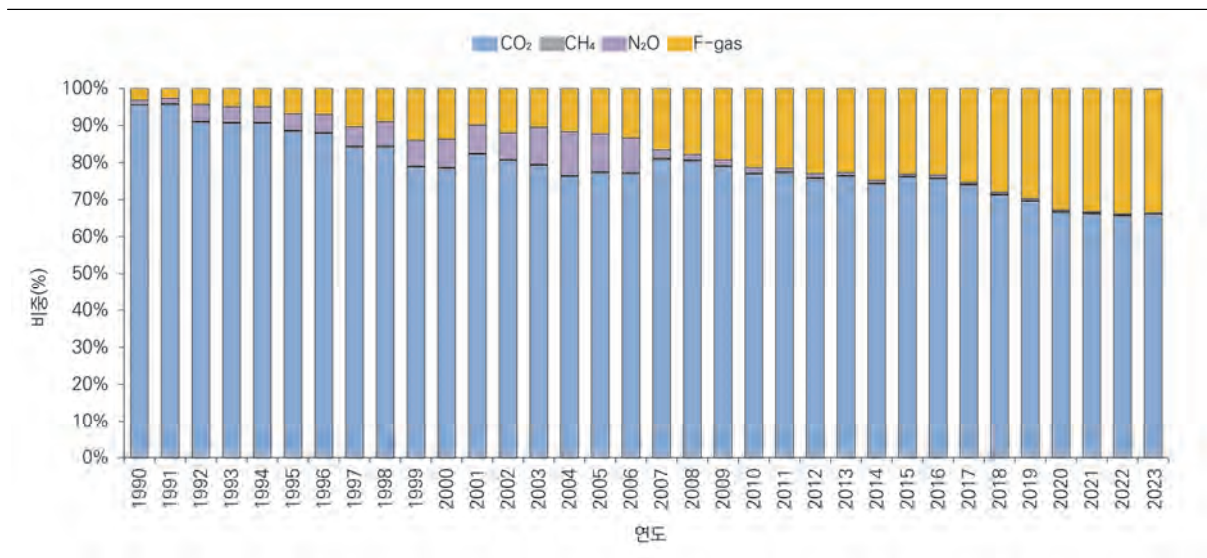
2) 오존층파괴물질의 대체물질 사용 부문은 최초 통계가 수집된 1992년도를 기준으로 증감률 계산

2023년 산업공정 및 제품 사용 분야에서의 부문별 배출 비중의 경우, 오존층파괴물질의 대체물질 사용 부문(2.F.)이 27.5%로 가장 큰 비중을 차지하였다. 그 다음으로 화학산업 부문(2.B.)이 23.5%, 광물산업 부문(2.A.)이 23.1%, 금속산업 부문(2.C.) 19.6%, 전자산업 부문(2.E.)이 3.0%, 기타 제품 제조 및 사용 부문(2.G.)이 2.9%, 비에너지 제품 및 용매 사용 부문(2.D.)이 0.5% 순으로 나타났다.



| 그림 2-13 | 산업공정 및 제품 사용 분야 세부 부문별 배출 비중

산업공정 및 제품 사용 분야에서 배출되는 온실가스는 CO₂, CH₄, N₂O, HFCs, PFCs, SF₆, NF₃이다. 1990년 가스별 배출 비중은 CO₂ 95.6%, HFCs 2.8%, N₂O 1.1%, SF₆ 0.4%, CH₄ 0.1% 순으로 나타났고, 2023년은 CO₂ 66.1%, HFCs 27.7%, SF₆ 3.3%, PFCs 1.5%, NF₃ 1.0%, N₂O 0.3%, CH₄ 0.2% 순이었다. 1990년 대비 2023년 온실가스별 비중을 비교하였을 때, CO₂ 배출 비중은 감소하고 HFCs를 비롯한 불소계 온실가스 배출 비중은 증가하였다. 이는 국제협약(몬트리올 의정서)에 따라 오존층파괴물질 사용이 규제되며 HFCs, PFCs 등의 대체물질 사용이 증가하였기 때문이다.



| 그림 2-14 | 산업공정 및 제품 사용 분야 온실가스별 배출 비중(1990-2023)

| 표 2-12 | 산업공정 및 제품 사용 분야 온실가스별 배출량(1990-2023)

(단위: 백만톤 CO₂-eq)

부문	1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023	증감률(%)	
								1990년 대비	전년 대비
CO ₂	36.1	65.2	73.8	88.2	84.5	82.3	80.3	122.3	-2.4
CH ₄	0.1	0.3	0.3	0.4	0.3	0.3	0.2	281.5	-24.5
N ₂ O	0.4	6.3	1.4	0.5	0.4	0.3	0.3	-22.6	6.4
HFCs	1.0	6.0	7.6	23.6	30.3	33.1	33.6	3,128.6	1.7
PFCs	IE,NE,NO	2.5	2.5	3.9	4.7	4.1	1.8	-4.2	-55.8
SF ₆	0.2	2.8	10.0	6.2	5.8	4.0	4.0	2,279.5	1.6
NF ₃	IE,NO	IE,NO	0.4	1.0	1.7	1.5	1.2	262.1	-21.4
합계	37.8	83.1	96.0	123.8	127.8	125.5	121.5	221.4	-3.2

주: 1) PFCs는 최초 통계가 수집된 1997년도를 기준으로 증감률 계산

2) NF₃는 최초 통계가 수집된 2008년도를 기준으로 증감률 산정

산업공정 및 제품 사용 분야는 활동자료로 국가승인통계, 조합·협회 자료, 사업장 조사자료, 사업장 명세서 등 다양한 출처의 자료를 사용한다. 특히 사업장 명세서는 제3자 검증이 완료된 자료로 관장 부처와 GIR이 ①국가통계로서의 완전성, ②시계열 일관성, ③산정방법론 및 계수의 적절성 등을 상세 검토 후 활용하게 된다. 사업장 명세서를 활용하는 하위 부문은 광물산업(2.A.), 화학산업(2.B.), 금속 산업(2.C.), 전자산업(2.E.), 기타 제품 제조 및 사용(2.G.) 부문이다. 사업장 명세서가 존재하지 않는 2006년 이전은 국내 산업과 관련한 조합·협회 자료와 국가승인통계, 사업장 조사자료 등을 활동자료로 사용하였다. 국가 온실가스 통계 기초자료로 사업장 명세서를 활용하는 것은 조합·협회 자료, 사업장 조사자료 등의 일부를 제3자 검증 완료한 사업장 보고 자료로 대체하였다는 데 의의가 있다.

2.3.3 농업

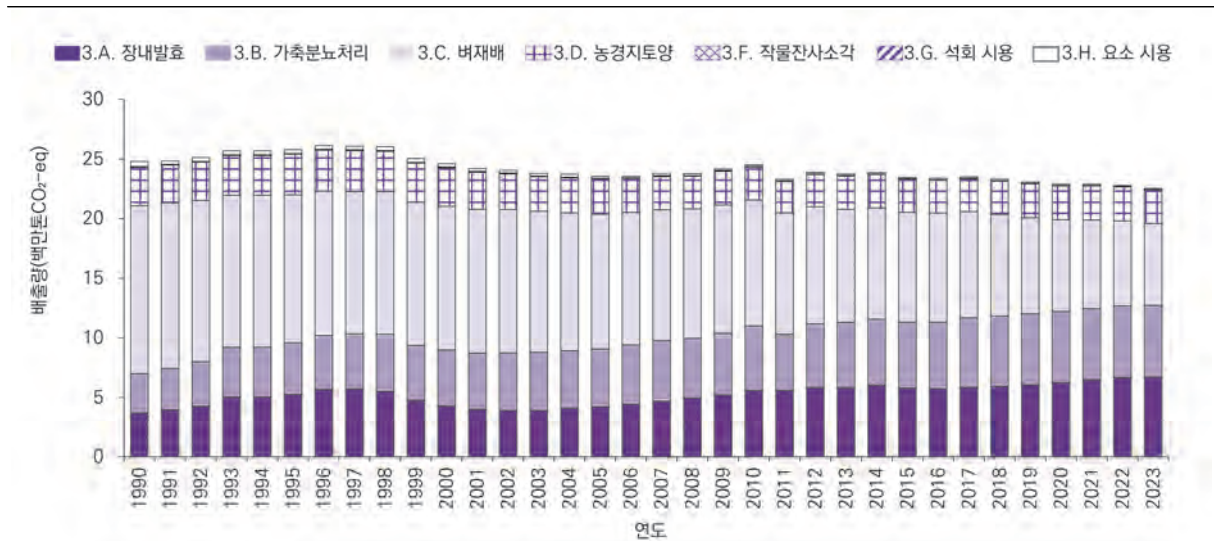
2023년도 농업 분야 온실가스 총배출량은 약 22.5 백만톤 CO₂-eq로 국가 총배출량의 약 3.2%를 차지하고 있으며, 2022년 농업 배출량은 1990년 대비 9.1%, 전년 대비 1.1% 감소하였다.

농업 분야의 세부 배출원별 배출량의 전년 대비 증감을 살펴보면, 2023년 벼재배 부문(3.C.)의 배출량은 벼재배 면적 감소와 물관리 방법 비율 영향으로 전년 대비 3.3%(0.2 백만톤 CO₂-eq) 줄어들었다. 벼재배 면적(3년 평균)은 0.8% 감소하였으며, 상시답수 비율은 2.1%p 감소하였다. 장내발효 부문(3.A.) 배출량은 주요 축종의 사육두수 증가 영향으로 전년 대비 0.6%(0.04 백만톤 CO₂-eq) 증가하였다. 축종별로는 한·육우 사육두수가 0.07%¹⁰⁾, 말 사육두수가 0.9%¹¹⁾ 증가하였다.

10) 자료: 한·육우 사육두수 3,693 천마리(2022년) → 3,695 천마리(2023년)(가축동향조사(국가데이터처, 2024))

11) 자료: 말 사육두수 27 천마리(2022년) → 27.3 천마리(2023년)(농림축산식품통계연보(농림축산식품부, 2024))

2023년 농업 분야의 부문별 배출량 비중은 벼재배(3.C.) 30.5%, 장내발효(3.A.) 29.9%, 가축분뇨처리(3.B.) 26.5%, 농경지토양(3.D.) 12.5%, 요소사용(3.H.) 0.4%, 작물잔사소각(3.F.) 0.1%, 석회사용(3.G.) 0.01%의 순으로 나타났다.



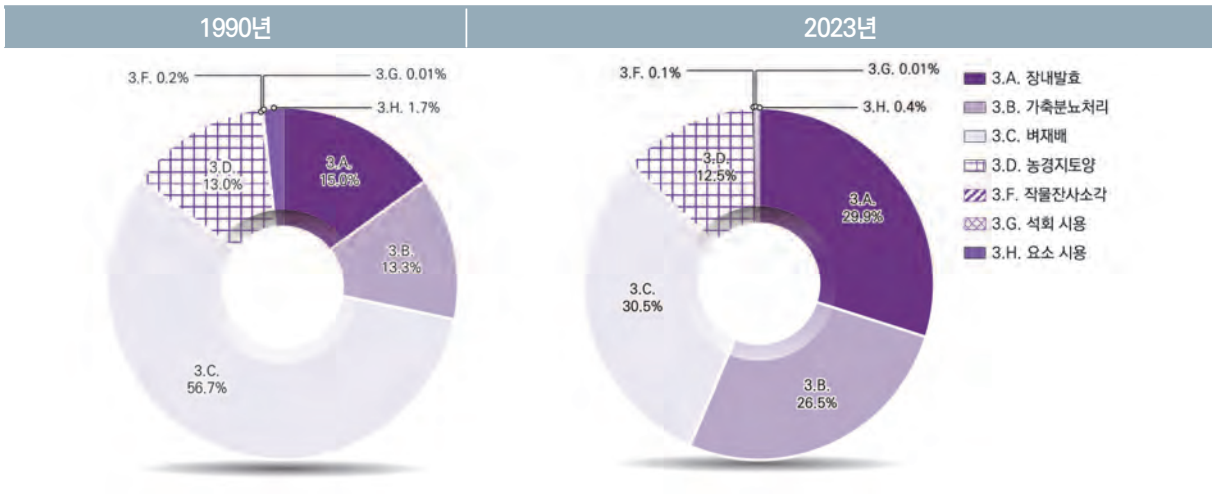
| 그림 2-15 | 농업 분야 온실가스 배출량(1990-2023)

| 표 2-13 | 농업 분야 온실가스 배출량(1990-2023)

(단위: 백만톤 CO₂-eq)

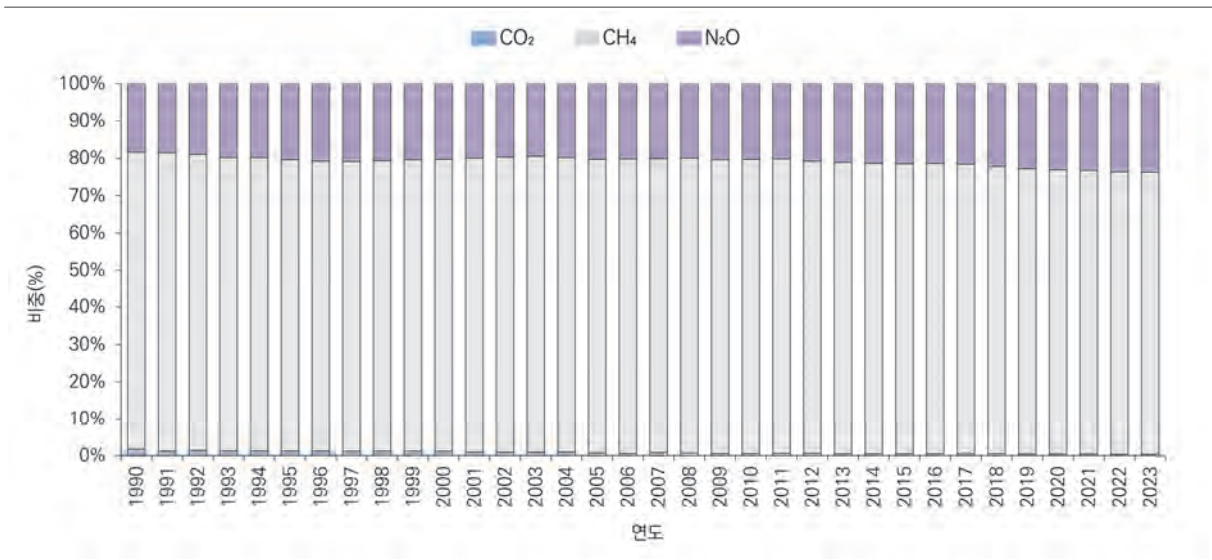
부문	1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023	증감률(%)	
								1990년 대비	전년 대비
3.A. 장내발효	3.7	4.3	5.6	5.9	6.5	6.7	6.7	80.8	0.6
3.B. 가축분뇨처리	3.3	4.7	5.4	5.9	5.9	6.0	6.0	81.8	-0.2
3.C. 벼재배	14.1	12.0	10.6	8.5	7.4	7.1	6.9	-51.1	-3.3
3.D. 농경지토양	3.2	3.2	2.8	2.8	2.9	2.9	2.8	-12.2	-1.0
3.F. 작물잔사소각	0.06	0.06	0.05	0.04	0.03	0.03	0.01	-73.3	-43.0
3.G. 석회사용	0.003	0.003	0.003	0.003	0.002	0.002	0.003	6.2	8.7
3.H. 요소사용	0.43	0.28	0.12	0.12	0.11	0.09	0.09	-78.7	0.5
합계	24.8	24.6	24.5	23.3	22.9	22.8	22.5	-9.1	-1.1

농업 분야에서 배출되는 온실가스는 CO₂와 CH₄, N₂O이다. 1990년 농업 분야의 배출비중은 CH₄ 79.9%, N₂O 18.4%, CO₂ 1.8%이며, 2023년 농업 분야의 배출비중은 CH₄ 75.9%, N₂O 23.7%, CO₂ 0.4%이다. 1990년 대비 2023년 온실가스별 비중을 비교하였을 때, CH₄ 배출 비중은 감소하고 N₂O 배출 비중은 증가하였다. 이는 벼 재배면적이 감소함에 따라 벼재배 부문의 CH₄ 배출량은 감소하고 가축 사육두수 증가로 인해 가축분뇨처리 부문의 N₂O 배출량이 증가하였기 때문이다.



| 그림 2-16 | 농업 분야 세부 부문별 배출 비중

농업 분야에서 가장 많은 비중을 차지하는 CH₄ 배출량은 1990년 이후 지속적으로 감소하는 추세를 보였으며, 벼재배 논 면적 감소가 주원인으로 작용하였다. 벼재배 부문(3.C.)의 CH₄ 배출량은 1990년 농업 분야 전체 CH₄ 배출량의 71.0%를 차지하였으나, 2023년에는 벼재배 면적 감소 및 논벼 물관리 방법 개선 등의 영향으로 40.2%로 감소하였다. 1990년에는 농업 분야 전체 N₂O 배출량에서 농경지 토양 부문(3.D.)이 70.7%, 가축분뇨처리 부문(3.B.)이 29.0%를 차지했으나, 2023년 농경지 토양 부문(3.D.)의 비중이 53.0%로 감소, 가축분뇨처리 부문(3.B.)이 46.9%로 증가하였다.



| 그림 2-17 | 농업 분야 온실가스별 배출 비중(1990-2023)

| 표 2-14 | 농업 분야 온실가스별 배출량(1990-2023)

(단위: 백만톤 CO₂-eq)

구분	1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023	증감률(%)	
								1990년 대비	전년 대비
CO ₂	0.4	0.3	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	-78.2	0.8
CH ₄	19.8	19.3	19.4	18.0	17.5	17.3	17.1	-13.7	-1.2
N ₂ O	4.5	5.0	5.0	5.2	5.3	5.4	5.3	17.2	-0.6
합계	24.8	24.6	24.5	23.3	22.9	22.8	22.5	-9.1	-1.1

2.3.4 토지이용, 토지이용 변화 및 임업

2023년 LULUCF 분야의 순흡수량은 39.4 백만톤 CO₂-eq로 1990년 대비 0.3 백만톤 CO₂-eq, 전년 대비 1.5 백만톤 CO₂-eq 증가하였다.

2023년 LULUCF 분야의 흡수원 중 산림지 부문(4.A.)의 순흡수량은 41.0 백만톤 CO₂-eq으로 LULUCF 분야의 대부분을 차지하였다. 그 다음으로 정주지 부문(4.E.)에서 1.2 백만톤 CO₂-eq, 수확된 목재제품 부문(4.G.)에서 0.4 백만톤 CO₂-eq를 흡수한 것으로 나타났다. 2022년 LULUCF 분야 배출원 중 농경지 부문(4.B.)의 배출량은 2.9 백만톤 CO₂-eq, 습지 부문(4.D.)은 0.4 백만톤 CO₂-eq, 초지 부문(4.C.)의 0.008 백만톤 CO₂-eq으로 나타났다.

LULUCF 분야에서 가장 많은 비중을 차지하는 산림지 부문(4.A.)은 지속적인 재조림 및 산림 경영의 결과로 1995년 이후 순흡수량이 증가하기 시작하여 2008년에 최대치인 61.5 백만톤 CO₂-eq을 기록하였다. 그러나 2010년대부터 최근까지 산림의 노령화로 인한 연간 순생장량 감소와 산림면적 감소에 의해 순흡수량이 감소 추세를 보인다. 2020-2023년은 입목 바이오매스에 의한 흡수량이 비슷한 수준을 유지하고 있으며, 2023년은 산불로 인한 배출량이 전년 대비 1.6 백만톤 CO₂-eq 감소하였다. 그 결과, 2023년의 산림지 부문(4.A.) 순흡수량은 전년 대비 1.7 백만톤 CO₂-eq 증가하였다.



| 그림 2-18 | 토지이용, 토지이용 변화 및 임업 분야 배출량 및 흡수량(1990-2023)

| 표 2-15 | 토지이용, 토지이용 변화 및 임업 분야 온실가스 배출량 및 흡수량(1990-2023)

(단위: 백만톤 CO₂-eq)

부문	1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023	증감량	
								1990년 대비	전년 대비
4.A. 산림지	-38.2	-60.5	-58.8	-42.6	-40.4	-39.3	-41.0	-2.8	-1.7
4.B. 농경지	-0.03	1.8	3.0	2.6	2.9	2.9	2.9	2.9	0.004
4.C. 초지	-0.67	-0.74	-0.21	-0.04	-0.01	0.001	0.008	0.7	0.007
4.D. 습지	0.34	0.39	0.37	0.39	0.40	0.38	0.39	0.04	0.01
4.E. 정주지	-0.7	-0.9	-1.1	-1.2	-1.2	-1.2	-1.2	-0.5	0.005
4.G. 수확된 목재제품	0.2	-0.5	-0.6	-0.7	-0.6	-0.6	-0.4	-0.7	0.1
합계(순흡수량)	-39.1	-60.4	-57.4	-41.6	-38.9	-37.9	-39.4	-0.3	-1.5

LULUCF 분야에서 산정하는 온실가스는 CO₂, CH₄, N₂O이며, CO₂ 흡수량의 비중이 절대적으로 높고 CH₄과 N₂O는 인공침수지와 산림지 바이오매스 연소에 의해 소량 배출된다. 1990년 대비 2023년 온실가스별 배출·흡수량 변화의 주요 요인은 산림지 임목축적변화량 증가에 따른 임목 바이오매스 흡수량 증가와 산불 피해 증가에 따른 바이오매스 연소 배출량 증가이다.

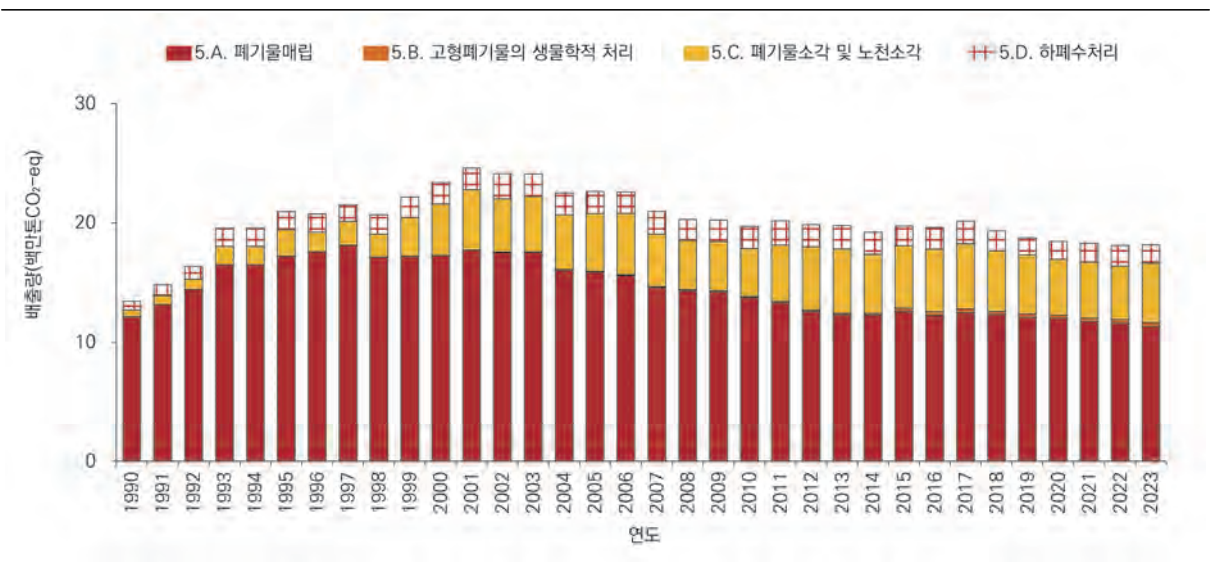
| 표 2-16 | 토지이용, 토지이용 변화 및 임업 분야 온실가스별 배출량 및 흡수량(1990-2023)

(단위: 백만톤 CO₂-eq)

구분	1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023	증감량	
								1990년 대비	전년 대비
CO ₂	-39.4	-60.9	-57.7	-42.0	-39.3	-38.5	-39.9	-0.5	-1.4
CH ₄	0.28	0.39	0.34	0.38	0.40	0.52	0.41	0.13	-0.10
N ₂ O	0.00001	0.03	0.0003	0.003	0.0001	0.07	0.01	0.01	-0.06
합계(순흡수량)	-39.1	-60.4	-57.4	-41.6	-38.9	-37.9	-39.4	-0.3	-1.5

2.3.5 폐기물

2023년 폐기물 분야의 온실가스 배출량은 18.2 백만톤 CO₂-eq으로, 국가 총배출량의 2.6%를 차지하였으며, 1990년 대비 35.2%, 전년 대비 0.3% 증가하였다. 폐기물 분야의 온실가스 배출량은 1990년부터 2001년 배출 정점에 이르기까지 전반적으로 증가하다가 이후 꾸준히 감소 추세를 보이고 있다. 이러한 추세는 가장 큰 배출량 비중을 차지하는 매립 부문(5.A.)의 배출량과 유사한 양상을 보인다. 매립 부문(5.A.)을 제외한 나머지 부문의 경우 1990년 이후 지속적으로 배출량이 증가하다가 2000년대 중반 이후부터는 일정한 수준을 유지하고 있는 것으로 나타났다.



| 그림 2-19 | 폐기물 분야 온실가스 배출량(1990-2023)

| 표 2-17 | 폐기물 분야 온실가스 배출량(1990-2023)

(단위: 백만톤 CO₂-eq)

부문	1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023	증감률(%)	
								1990년 대비	전년 대비
5.A. 폐기물매립	12.1	17.3	13.8	12.3	11.8	11.6	11.3	-6.9	-2.5
5.B. 고형폐기물의 생물학적 처리	NE	0.03	0.08	0.26	0.27	0.31	0.35	8,097.9 ¹⁾	11.9
5.C. 폐기물소각 및 노천소각	0.6	4.3	4.0	5.1	4.7	4.5	5.0	785.4	10.8
5.D. 하·폐수처리	0.7	1.8	1.9	1.7	1.6	1.7	1.5	111.8	-10.6
합계	13.4	23.4	19.7	19.3	18.3	18.1	18.2	35.2	0.3

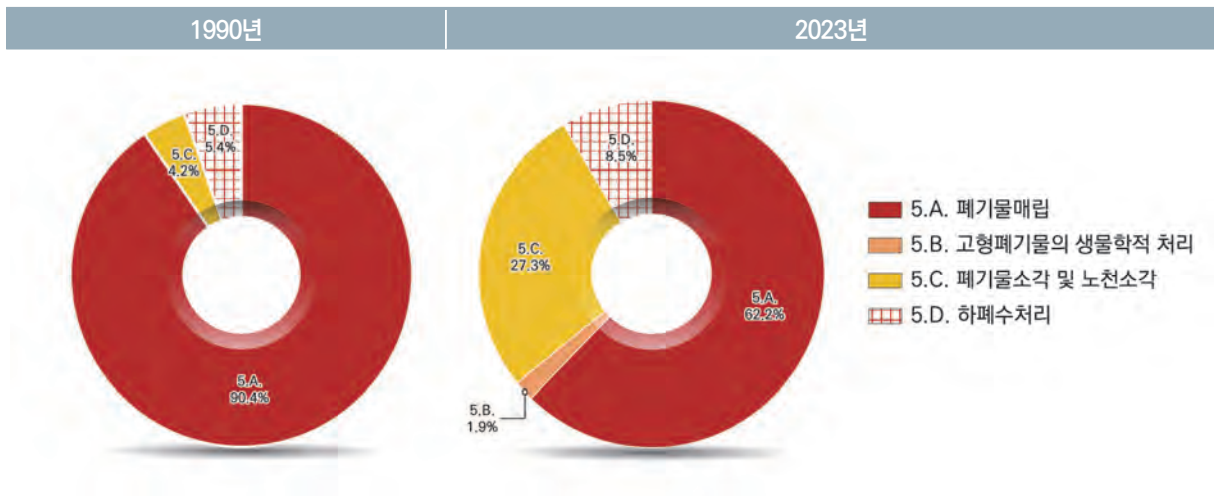
주: 1) 생물학적처리 부문은 최초 통계가 수집된 1994년도를 기준으로 증감률 산정

2023년 폐기물 분야의 부문별 배출량 비중은 폐기물매립(5.A.)이 62.2%, 폐기물소각 및 노천소각(5.C.)이 27.3%, 하·폐수처리(5.D.)가 8.5%, 고형폐기물의 생물학적처리(5.B.)가 1.9% 순으로 나타났다.

폐기물 분야 배출량 중 가장 큰 부문을 차지하는 폐기물매립 부문(5.A.)의 온실가스 배출량은 1997년에 최고치인 18.1 백만톤 CO₂-eq에 도달한 이후 점진적으로 감소하는 경향을 보였다. 2005년 이후 음식물류 폐기물 직매립 금지 제도가 시행됨에 따라 음식물류 폐기물이 별도로 재활용 처리(퇴비화,

에너지화)되면서 배출량이 지속적으로 감소하고 있다.

폐기물소각 및 노천소각 부문(5.C.)의 경우, 1990년 대비 785.4%(4.4 백만톤 CO₂-eq) 증가하며 가장 큰 배출량 증가세를 보였다. 이는 인구증가와 경제성장으로 인해 폐기물소각 처리량이 증가하였기 때문이다. 하지만 2018년에 「자원순환기본계획」¹²⁾이 수립되면서 폐기물 재활용이 늘어나고 생활 폐기물의 소각열 회수를 활용한 발전량 또한 꾸준히 증가하여 배출량이 감소추세를 보이고 있다.

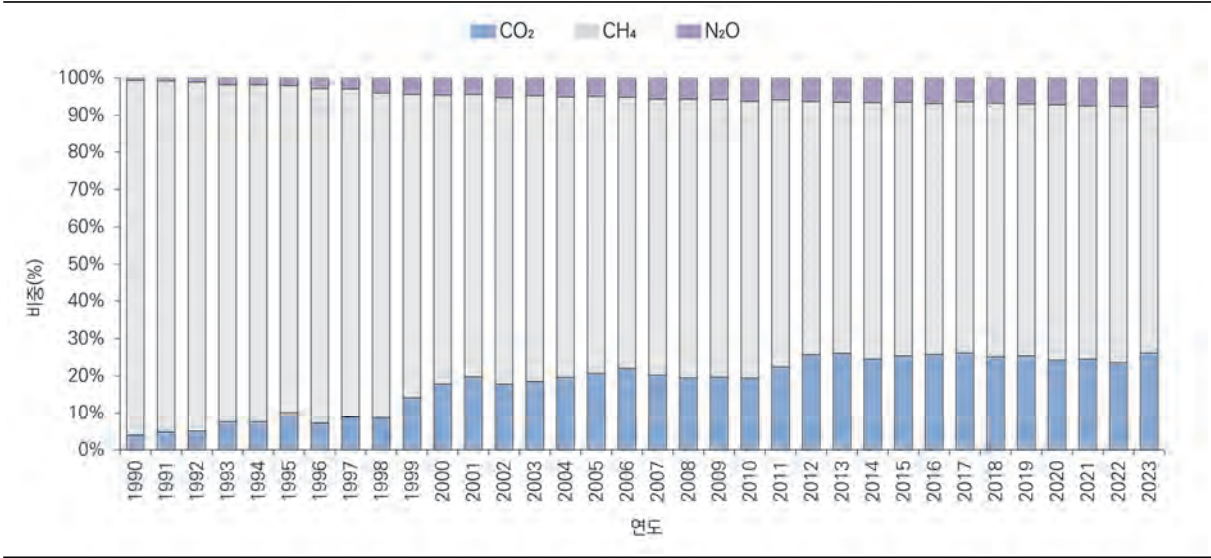


| 그림 2-20 | 폐기물 분야 세부 부문별 배출 비중

폐기물 분야의 부문별 배출량 비중 변화를 살펴보면, 폐기물매립(5.A.) 비중이 1990년 90.4%에서 2023년 62.2%로 감소한 반면, 폐기물소각 및 노천소각(5.C.) 비중이 4.2%에서 27.3%로 늘어났다. 폐기물소각 및 노천소각 부문(5.C.)의 배출량과 배출량 비중은 증가하였지만, 2005년 이후부터는 생활 폐기물 소각처리량의 80% 이상에서 소각열을 회수하고 있어 폐기물소각 및 노천소각 부문(5.C.)의 배출량 증가세를 둔화시키는 데 기여하였다.

폐기물 분야에서 배출되는 온실가스는 CO₂, CH₄, N₂O이다. 1990년 폐기물 분야 배출량은 CH₄ 95.5%, CO₂ 3.9%, N₂O 0.6%이며, 2023년에는 CH₄ 66.2%, CO₂ 26.1%, N₂O 7.7%를 차지한 것으로 나타났다. 1990년 대비 2022년의 변화는 2000년대 「폐기물관리법」 개정과 「자원순환기본법」 시행으로 직매립이 금지되어 소각(에너지 회수)이 늘어남에 따라 매립 부문 CH₄가 감소하고 소각 부문 CO₂가 증가했기 때문이다.

12) 1986년 「폐기물관리법」이 제정되어 기존의 「환경보전법(1977년)」과 「오물청소법(1961년)」으로 이원화되어있던 폐기물 관리체계가 일원화됨. 이후 1992년 「자원의 절약과 재활용 촉진에 관한 법률」이 제정되어 폐기물 처리 중심에서 감량화와 재활용에 역점을 두는 방향으로 폐기물 관리정책의 지향점이 전환됨. 2008년 동법이 개정되면서 폐기물관리정책의 방향이 단순 재활용 중심에서 발생억제와 자원화 확대로 전환되었음. 한편, 정부는 「자원순환기본법(2016년)」 등에 따라 자원순환목표를 설정하고 소요자원 조달 및 투자계획 수립 등을 주요 내용으로 하는 자원순환기본계획을 수립하고 시행계획을 마련함. 상기와 같은 법 및 계획을 기반으로 폐기물 발생을 억제하고 발생된 폐기물의 순환이용 및 적절한 처분을 촉진, 자원순환사회를 만들기 위한 노력을 이행하고 있음



| 그림 2-21 | 폐기물 분야 온실가스별 배출 비중(1990-2023)

| 표 2-18 | 폐기물 분야 온실가스별 배출량(1990-2023)

(단위: 백만톤 CO₂-eq)

구분	1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023	증감률(%)	
								1990년 대비	전년 대비
CO ₂	0.5	4.2	3.8	4.8	4.5	4.3	4.7	794.6	11.2
CH ₄	12.8	18.2	14.7	13.2	12.5	12.5	12.0	-6.2	-3.7
N ₂ O	0.1	1.1	1.2	1.3	1.4	1.4	1.4	1,660.2	2.9
합계	13.4	23.4	19.7	19.3	18.3	18.1	18.2	35.2	0.3

PART

03

에너지

3.1 개요

3.2 연료연소(1.A.)

3.3 탈루(1.B.)

3.4 CO₂ 이송 및 저장(1.C.)

제3장 에너지

3.1 개요

국가 온실가스 통계에서 에너지 분야는 2006 IPCC 지침에 따라 연료연소(1.A.), 탈루(1.B.), 이산화탄소(CO₂) 이송 및 저장(1.C.)¹⁾, 국제병커링 및 다국적 작전(1.D.)²⁾으로 분류된다.

에너지 분야의 세부 온실가스 배출원은 연료연소와 탈루 부문으로 나뉜다. 연료연소 부문은 에너지를 생산하는 과정에서 화석연료가 산소와 반응하여 배출되는 온실가스를 의미하며, 탈루 부문은 화석연료의 생산·처리·저장·이송 과정에서 누출되는 온실가스를 의미한다. 이와 별개로, 국제적으로 이동³⁾하는 운송수단에서 발생하는 국제병커링 배출량과 다국적 작전에 의한 배출량은 별도로 보고되며, 국가 총 배출량에는 포함되지 않는다.

2023년 기준 에너지 분야의 총 온실가스 배출량은 545.0 백만톤 CO₂-eq로, 이는 국가 전체 온실가스 배출량의 77.1%에 해당한다. 부문별로는 연료연소 부문의 배출량이 541.7 백만톤 CO₂-eq로 에너지 분야 전체 배출량의 99.4%를 차지하였고, 탈루 부문의 배출량은 3.2 백만톤 CO₂-eq로 0.6%를 차지하였다.



| 그림 3-1 | 에너지 분야 부문별 온실가스 배출량(1990-2023)

- 1) CO₂ 이송 및 저장(1.C.) 부문은 포집된 CO₂를 이송, 주입, 저장하는 과정에서의 배출량이나, 현재까지 관련 활동이 국내에서 발생하지 않아 산정하지 않음. (Not Occurring, NO)
- 2) 국제병커링 및 다국적 작전(1.D.) 부문 배출량은 2006 IPCC GL에 따라 국가 총배출량에는 포함하지 않고 별도 보고함. (CRT에서 메모항목으로 보고)
- 3) 출발과 도착 국가가 각기 다른 국제운송에 공급된 연료

에너지 분야의 2023년 온실가스 배출량은 1990년 대비 132.4% 증가하였다. 주요 원인은 전력 수요의 지속적인 증가에 따라 에너지산업의 배출량이 증가(490.8%)하였기 때문이다. 또한 수출 주도의 제조업 생산 확대, 물류와 교통량의 증가 역시 에너지 분야 배출 증가에 영향을 미친 것으로 분석된다.

23개 국가 주요 배출·흡수원⁴⁾ 중 에너지 분야에서는 10개 부문이 포함되었다. 에너지산업/고체연료, 제조업·건설업/고체연료, 수송/도로수송, 에너지산업/기체연료, 기타/기체연료, 제조업·건설업/기체연료, 에너지산업/액체연료, 제조업·건설업/액체연료, 기타/액체연료, 제조업·건설업/기타화석연료의 순이며, 모두 CO₂에 해당한다(1.4절 참고).

표 3-1 | 에너지 분야 부문별 온실가스 배출량(1990-2023)

(단위: 백만톤 CO₂-eq)

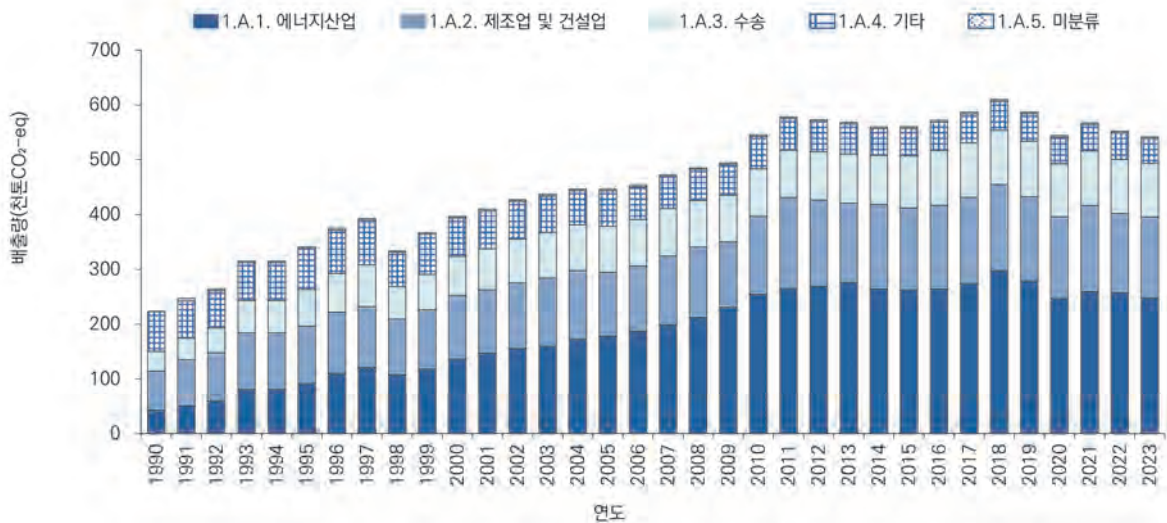
부문	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001
1. A. 연료 연소												
1.A.1. 에너지산업	42.0	49.9	59.0	67.2	81.3	92.0	110.1	120.6	108.0	117.7	136.3	147.1
1.A.2. 제조업·건설업	72.2	85.3	88.9	103.0	102.9	104.6	111.7	111.3	101.1	108.9	115.6	115.7
1.A.3. 수송	36.5	39.7	45.2	57.1	59.3	66.6	70.9	76.5	59.3	64.4	71.9	75.1
1.A.4. 기타	72.6	67.2	68.2	61.2	69.1	75.0	79.2	80.9	62.9	73.0	70.5	68.6
1.A.5. 미분류	0.2	4.7	3.0	3.2	2.9	2.8	3.1	3.0	2.7	2.8	2.4	3.1
소계	223.5	246.9	264.3	291.7	315.4	341.0	375.0	392.2	333.9	366.8	396.8	409.7
1. B. 탈루												
1.B.1. 고체연료	10.9	10.4	9.4	8.6	7.6	6.8	6.3	5.9	5.6	5.4	5.2	5.0
1.B.2. 석유·천연가스	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.3	0.3	0.4	0.4	0.5	0.5
소계	11.0	10.5	9.5	8.7	7.8	7.0	6.6	6.2	6.0	5.8	5.7	5.6
합계	234.5	257.4	273.8	300.4	323.2	348.0	381.6	398.4	339.9	372.6	402.5	415.3
부문	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
1. A. 연료 연소												
1.A.1. 에너지산업	155.9	159.9	172.5	178.4	187.1	199.5	212.4	230.7	254.6	265.0	269.4	276.1
1.A.2. 제조업·건설업	119.2	124.4	125.2	116.4	118.8	124.5	128.3	119.2	142.1	166.2	157.2	144.6
1.A.3. 수송	80.2	83.1	83.2	84.0	84.7	87.0	84.5	85.2	86.7	86.4	87.8	89.7
1.A.4. 기타	68.9	66.5	62.6	64.6	60.4	58.7	57.4	56.0	58.9	57.5	55.9	54.8
1.A.5. 미분류	2.9	3.3	3.2	3.3	2.9	2.9	2.6	2.9	3.0	2.9	3.0	3.0
소계	427.1	437.2	446.6	446.7	454.0	472.6	485.3	494.0	545.3	578.1	573.3	568.3
1. B. 탈루												
1.B.1. 고체연료	4.7	4.6	4.4	4.2	4.1	4.1	4.0	3.8	3.6	3.5	3.4	3.3
1.B.2. 석유·천연가스	0.6	0.6	0.6	0.7	0.7	0.7	0.7	0.8	0.9	0.9	1.0	0.9
소계	5.2	5.1	5.0	4.9	4.8	4.8	4.7	4.6	4.4	4.4	4.4	4.2
합계	432.3	442.3	451.7	451.6	458.8	477.4	490.0	498.5	549.7	582.4	577.7	572.5
부문	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023		
1. A. 연료 연소												
1.A.1. 에너지산업	263.9	262.3	263.9	274.0	297.7	279.0	246.8	259.5	257.6	248.2		
1.A.2. 제조업·건설업	154.2	149.8	153.2	157.4	157.2	153.2	149.1	157.0	144.5	147.2		
1.A.3. 수송	90.0	95.5	100.0	99.5	98.9	101.9	96.9	99.6	98.6	97.8		
1.A.4. 기타	48.8	49.8	51.7	53.0	53.0	49.9	48.3	48.0	48.5	45.5		
1.A.5. 미분류	2.9	3.1	3.1	3.2	3.1	3.0	2.9	2.9	3.0	3.0		
소계	559.9	560.5	571.8	587.0	610.0	586.9	544.0	567.1	552.2	541.7		
1. B. 탈루												
1.B.1. 고체연료	3.2	3.2	3.1	2.8	2.7	2.6	2.6	2.5	2.4	2.3		
1.B.2. 석유·천연가스	0.9	0.8	0.9	0.9	1.0	0.9	0.9	0.9	1.0	0.9		
소계	4.1	4.0	3.9	3.8	3.7	3.6	3.5	3.4	3.4	3.2		
합계	563.9	564.4	575.8	590.8	613.7	590.5	547.5	570.5	555.6	545.0		

4) 주요 카테고리 분석(수준 평가): 배출·흡수량 기준 상위 95%(LULUCF 포함)로 1.4절을 참조

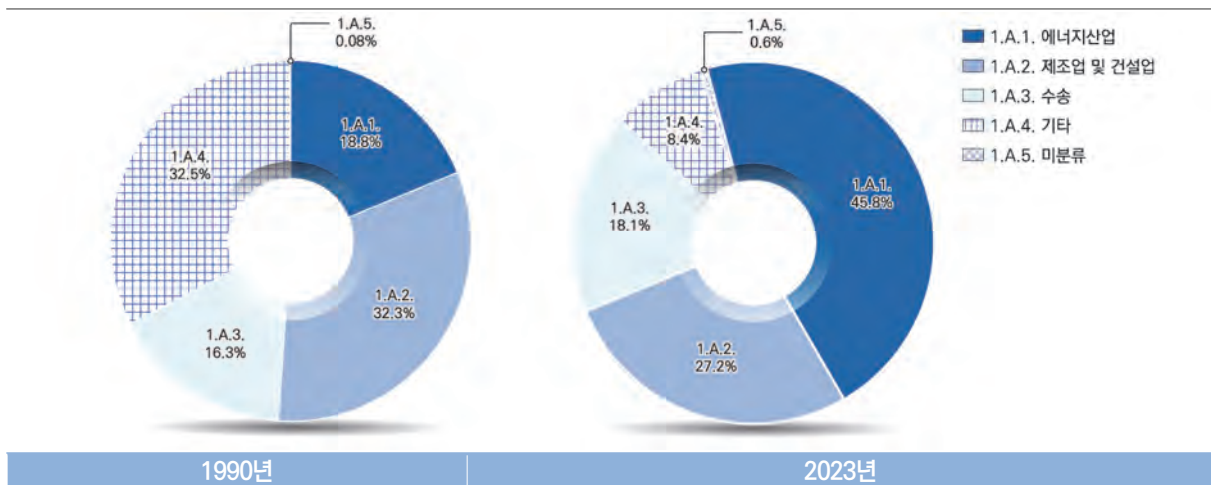
3.2 연료연소(1.A.)

연료연소 부문의 세부 배출원은 고정연소 배출원인 에너지산업(1.A.1.), 제조업 및 건설업(1.A.2.), 기타(1.A.4.), 미분류(1.A.5.) 부문과 이동연소 배출원인 수송(1.A.3.) 부문으로 분류된다.

2023년 연료연소 부문의 배출량은 541,746 천톤 CO₂-eq로 전년 대비 1.9% 감소하였으며, 국가 총배출량의 77.1%, 에너지 분야의 대부분인 99.4%를 차지한다. 하위 부문별 배출 비중은 에너지 산업 45.8%, 제조업 및 건설업 27.2%, 수송 18.1%, 기타 8.4%, 미분류 0.6%의 순으로 나타났다.



| 그림 3-2 | 연료연소 부문 온실가스 배출량(1990-2023)



| 그림 3-3 | 연료연소 부문별 배출 비중 (1990-2023)

| 표 3-2 | 에너지 분야 연료연소 부문별 온실가스 배출량(1990-2023)

(단위: 천톤 CO₂-eq)

구분	1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023
1.A.1. 에너지산업	42,004	136,316	254,619	297,733	259,489	257,607	248,155
1.A.2. 제조업 및 건설업	72,192	115,570	142,096	157,209	157,031	144,492	147,240
1.A.3. 수송	36,502	71,921	86,734	98,882	99,611	98,626	97,826
1.A.4. 기타	72,641	70,540	58,921	53,012	47,999	48,458	45,503
1.A.5. 미분류	183	2,427	2,970	3,148	2,950	3,046	3,022
합계	223,524	396,774	545,340	609,985	567,078	552,229	541,746

3.2.1 국제병커링⁵⁾

3.2.1.1 배출원 개요

2023년 기준	산정 온실가스	방법론	배출계수	활동자료
	CO ₂	Tier 1, 2	D, CS	연료 소비량
	CH ₄ , N ₂ O	Tier 1	D	

국제병커링은 항공기와 선박의 국적과 관계없이 국제 운항(출발과 도착이 다른 나라)에 공급된 연료에 의한 온실가스(CO₂, CH₄, N₂O) 배출량을 산정하며, 세부적으로는 국제항공(1.D.1.a.)과 국제해운(1.D.1.b.)이 있다. 파리협정 MPG⁶⁾에서는 국제항공·해운의 연료 배출량을 각각 보고하되, 국가 총 배출량에서 제외하고 별도 보고하도록 권고하고 있으며(non-mandatory⁷⁾), 우리나라는 이에 따라 보고하고 있다.

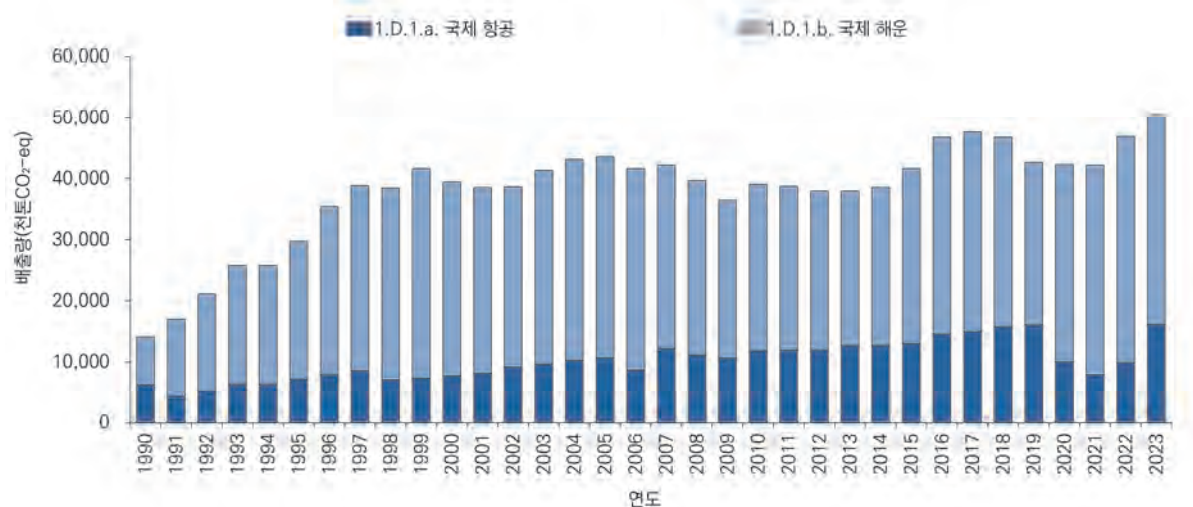
2023년도 국제병커링 부문의 온실가스 배출량은 전년 대비 7.7% 증가한 50,498 천톤 CO₂-eq로, 국제항공이 31.9%, 국제해운이 68.1%를 차지하였다. 국제항공은 코로나19 방역 규제 완화에 따른 수요 회복으로 전년 대비 62.0% 증가한 16,091 천톤 CO₂-eq를 배출하였다. 국제해운은 수출입 물동량은 증가했음에도 불구하고 운항 효율성 증대 등으로 화석연료 소비량이 감소하며 2023년 배출량이 전년 대비 6.9% 감소한 34,407 천톤 CO₂-eq로 나타났다.

한편, 다국적 작전(1.D.2.)은 UN 선언에 따른 다국적 작전에 소비된 연료에 의한 항공 및 해운의 온실가스 배출량(CO₂, CH₄, N₂O)을 의미한다. 국제병커링과 동일하게 총배출량 합산 시 제외되며, 별도 항목으로 보고된다. 다국적 작전 부문의 온실가스 배출량은 국가 기밀 사항에 해당한다(C).

5) 파리협정 MPG⁶⁾ 지침은 국제병커링, 연료의 원료 및 비에너지 소비, 그리고 연료연소로부터 배출된 CO₂의 국가 산정값(부문별 접근법, Sectoral approach)과 기준 접근법(Reference approach)에 따른 CO₂ 배출량을 비교하여 그 결과를 보고하도록 권고(non-mandatory)하고 있음. 이에, 본 보고서는 국제병커링(3.2.2.장)과 연료의 원료 및 비에너지 소비(3.2.3장)를 포함하고 있으며, 부문별 접근법과 기준 접근법에 대한 비교 결과는 추후 NID에 포함할 예정임

6) Decision 18/CMA.1 Modalities, procedures and guidelines for the transparency framework for action and support referred to in Article 13 of the Paris Agreement, Annex 제53조

7) Decision 5/CMA.3 Guidance for operationalizing the modalities, procedures and guidelines for the enhanced transparency framework referred to in Article 13 of the Paris Agreement, AnnexV



| 그림 3-4 | 국제항공 부문 온실가스 배출량(1990-2023)

| 표 3-3 | 국제항공 부문 온실가스 배출량(1990-2023)

(단위: 천톤 CO₂-eq)

구분	1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023
국제항공	6,296	7,753	11,822	15,767	7,880	9,930	16,091
국제해운	7,828	31,671	27,148	30,975	34,233	36,956	34,407
합계	14,123	39,424	38,970	46,742	42,113	46,887	50,498

3.2.1.2 방법론

3.2.1.2.1 산정방법

국제항공은 수송(1.A.3.) 부문의 3.2.6.2.2장(국내항공), 국제해운은 3.2.6.5.2장(국내해운)과 동일한 방법을 적용하여 산정하였다.

3.2.1.2.2 배출계수

국제항공은 수송(1.A.3.) 부문의 3.2.6.3.2장(국내항공), 국제해운은 3.2.6.5.2장(국내해운)과 동일한 계수를 적용하여 산정하였다.

3.2.1.2.3 활동자료

국제항공의 활동자료로는 「석유류수급통계(한국석유공사)」를 이용하였다. 국제항공은 내국적외항공 운수업과 국제항공(외국적항공의 항공유) 업종에 사용된 연료 소비량이며, 국제해운은 내국적외항공 수송업과 국제항공(외국적수상의 경유, B-A유, B-C유 등 항공유 이외 연료) 업종이다. 2023년 국제항공 부문의 연료 소비량은 5,597 천TOE로 전년 대비 62.0% 증가하였으며, 국제해운 부문은 11,239 천 TOE로 6.9% 감소하였다.

| 표 3-4 | 국제항공 부문 활동자료 수집방법(1990-2023)

기간	활동자료	통계명	관리기관	대상 가스
1990-2023	연료 소비량	석유류수급통계	한국석유공사	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O

| 표 3-5 | 국제항공 부문 연료 소비량(1990-2023)

(단위: 천 TOE)

구분		1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023
국제항공	항공유	2,227.2	2,742.8	4,161.0	5,507.2	2,752.4	3,454.1	5,597.0
국제해운	경유	440.1	1,196.6	708.8	1,029.2	1,831.7	2,202.6	2,024.7
	B-C유	2,037.3	8,927.8	8,110.7	8,702.9	9,043.0	9,854.4	9,199.9
	그 외 석유제품	82.1	197.4	136.4	65.8	13.0	15.4	14.2
	소계	2,559.5	10,321.8	8,955.9	9,797.9	10,887.7	12,072.3	11,238.8
합계		4,786.7	13,064.5	13,116.9	15,305.1	13,640.1	15,526.4	16,835.8

주: 그 외 석유제품에는 휘발유, 등유, B-A유, B-B유, 프로판, 천연가스가 포함됨

자료: 「2023 석유류수급통계(한국석유공사, 2024)」

3.2.1.3 시계열 일관성

수송(1.A.3.) 부문과 동일한 산정방법론, 배출계수를 이용하였고, 활동자료는 전 시계열 「석유류수급통계(한국석유공사)」를 이용하여 산정하였다.

3.2.1.4 재계산

재계산은 수행하지 않았다.

3.2.2 연료의 원료 및 비에너지 소비

3.2.2.1 개요

파리협정 MPG_s 지침⁸⁾은 연료를 원료 및 비에너지 용도로 소비하는 경우 해당 온실가스 배출량이 에너지 또는 산업공정 및 제품 사용 중 어떤 분야에서 보고되는지 밝히도록 권고하고 있다(non-mandatory⁹⁾). 국내에서 원료 및 비에너지 용도로 소비되는 연료에는 원료(feedstock), 환원제(reductant), 비에너지 제품(non-energy products)이 있다. 원료는 납사, LPG(프로판, 부탄) 등 화학 및 석유화학 업종의 원료를 의미하며, 환원제는 철강 업종에서 사용되는 코크스가 해당한다. 그리고 비에너지 제품에는 아스팔트, 윤활제, 파라핀 왁스, 용제 등이 있다.

8) Decision 18/CMA.1 Modalities, procedures and guidelines for the transparency framework for action and support referred to in Article 13 of the Paris Agreement, Annex 제54조

9) Decision 5/CMA.3 Guidance for operationalizing the modalities, procedures and guidelines for the enhanced transparency framework referred to in Article 13 of the Paris Agreement, AnnexV

국내에서 원료 및 비에너지 용도로 소비되는 연료 중 에너지 분야에서 보고되는 것은 철강 부문의 코크스, 원료탄/도로수송의 촉매변환장치 요소수가 있다. 산업공정 및 제품 사용 분야에 보고되는 것은 석유화학제품 및 카본블랙 생산 부문의 납사, 프로판, 부탄/철강 생산 부문의 코크스, 원료탄, 기타 유연탄/윤활제 사용 부문의 윤활유, 그리스와 파라핀 왁스 사용 부문의 파라핀 왁스가 있다.

표 3-6 | 연료의 원료 및 비에너지 소비에 따른 배출량 보고

분야	CRT 카테고리	원료 및 비에너지 소비
에너지	1.A.2.a. 철강	코크스, 원료탄
	1.A.3.b. 도로수송	요소수
산업공정 및 제품 사용	2.B.8. 석유화학제품 및 카본블랙 생산	납사, 프로판, 부탄
	2.C.1. 철강 생산	코크스, 원료탄, 기타유연탄
	2.D.1. 윤활제 사용	윤활유, 그리스
	2.D.2. 파라핀 왁스 사용	파라핀 왁스

3.2.3 에너지산업(1.A.1.)

3.2.3.1 배출원 개요

	부문	산정 온실가스	방법론	배출계수	활동자료
2023년 기준	공공 전기 및 열 생산	CO ₂	Tier 1, 2	D, CS	연료 소비량
		CH ₄ , N ₂ O	Tier 2	CS	
	석유정제	CO ₂	Tier 1, 2, OTH ¹⁰⁾	D, CS, PS	
		CH ₄ , N ₂ O	Tier 1	D	
	고체연료 제조 및 기타 에너지산업	CO ₂	Tier 1, 2	D, CS	
		CH ₄ , N ₂ O	Tier 1	D	

에너지산업(1.A.1.) 부문은 세부 배출원으로 공공 전기 및 열 생산(1.A.1.a.), 석유정제(1.A.1.b.), 고체연료 제조 및 기타 에너지산업(1.A.1.c.)을 포함한다.

공공 전기 및 열 생산 부문은 전기 또는 열의 공공 판매가 주 사업 목적인 시설에서 연료 연소로 발생하는 온실가스를 포함한다. 연료전지용 수소 생산을 위한 도시가스 개질 과정에서 발생하는 CO₂ 배출량도 공공 전기 및 열 생산 부문에 포함된다. 한편, 전기나 열의 공공 판매를 주요 사업으로 하지 않고 기업의 주 산업 활동을 지원하기 위해 전기나 열을 생산하거나 일부 판매하는 자가생산자(auto producer)의 배출량은 해당 자가생산자의 산업 활동이 속한 부문에 포함된다.

석유정제 부문은 원유를 정제하여 석유제품을 생산하는 시설에서 연소 과정에서 배출되는 온실gas와 촉매재생에 의한 온실가스를 산정한다.

10) 기타(Other, OTH): IPCC Tier 1~3 방법론 또는 배출-흡수계수에 해당하지 않는 기타 방법론 또는 배출-흡수계수

고체연료 제조 및 기타 에너지산업 부문은 고체연료(코크스, 고형연료¹¹⁾ 등)의 제조와 석탄광업, 원유·천연가스 추출 등에 사용된 연료에서 온실가스가 발생하는 배출원이다. 하위 항목인 고체연료 제조(1.A.1.c.i)에는 코크스로 공정의 배출량이 포함되나, CRT에서는 제조업 및 건설업의 철강(1.A.2.a.)에 포함하여 보고하였다(IE).

2023년 에너지산업 부문의 총배출량은 248,155 천톤 CO₂-eq로 전년 대비 3.7% 감소하였다. 에너지산업 부문 배출량을 세부 부문별로 살펴보면, 공공 전기 및 열 생산이 226,960 천톤 CO₂-eq로 전체의 91.5%를 차지하였다. 석유정제는 19,605 천톤 CO₂-eq로 7.9%, 고체연료 제조 및 기타 에너지산업이 1,590 천톤 CO₂-eq로 0.6%를 차지하였다.



그림 3-5 | 에너지산업 부문 온실가스 배출량(1990-2023)

표 3-7 | 에너지산업 부문 온실가스 배출량(1990-2023)

(단위: 천톤 CO₂-eq)

구분	1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023
공공 전기 및 열 생산	37,175	120,792	239,940	276,619	239,619	237,858	226,960
석유정제	4,194	13,704	14,001	20,289	18,895	18,424	19,605
고체연료 제조 및 기타 에너지산업	636	1,821	678	825	974	1,324	1,590
합계	42,004	136,316	254,619	297,733	259,489	257,607	248,155

2023년의 배출량은 1990년 대비 490.8% 증가했는데, 이러한 증가추세는 경제성장과 산업 발전에 따라 전력 소비가 증가하였기 때문이다. 실제로 총발전량은 1990년 107.7 TWh에서 2023년 588.0 TWh로 446.2% 증가¹²⁾하였다. 한편, 발전량이 꾸준히 증가하는 추세에도 불구하고, 노후 석탄 발전소의 단계적 폐지 및 온실가스 배출량이 적은 LNG로 대체, 그리고 원자력, 신재생에너지와 같은 무탄소

11) 에너지 분야의 주요 활동자료인 에너지수급통계에서 고형연료(patent fuels)는 원료탄을 이용하여 제조하는 연탄 등을 의미함. IEA (세계에너지기구)에서는 결합제를 첨가하여 미분탄을 성형하여 연탄 모양으로 만든 조성 연료를 의미

12) 출처: 1990-2023년 한국전력통계(한국전력공사). 한전 등 사업자 및 한전 구입분 기준

에너지원의 비중이 확대됨¹³⁾에 따라, 에너지산업 부문의 온실가스 배출량은 2018년 이후 감소세로 전환된 것으로 분석된다.

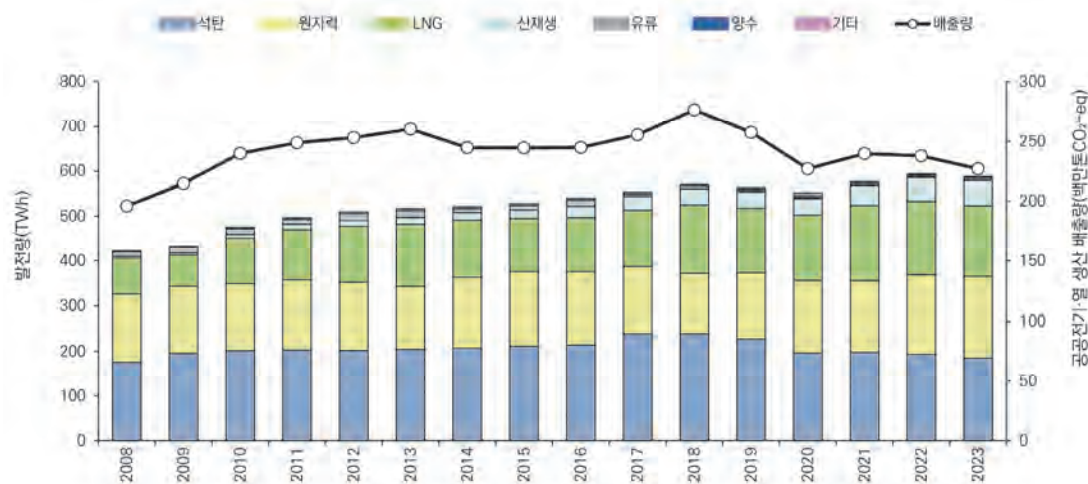


그림 3-6 | 발전원별 발전량 및 공공전기 및 열생산 부문 배출량 추이(2008-2023)

3.2.3.2 방법론

3.2.3.2.1 CO₂

1) 산정방법

○ CO₂ 배출량

에너지산업 부문의 CO₂ 배출량은 2006 IPCC GL의 Tier 2 방법론을 적용¹⁴⁾하며, 에너지 용도의 연료 소비량에 Joule-TOE 환산계수, 전환계수, 배출계수를 곱하여 산정한다(코크스 생산(1.A.1.c.1.) 및 촉매재생(1.A.1.b.)은 별도 산정식 적용).

〈에너지산업 부문 CO₂ 배출량 산정식(코크스 생산, 촉매재생 제외)〉

$$E = \sum_{ij} [FC_{ij} \times 41.868 \times CF_i \times EF_i \times 44/12 \times 10^{-3}]$$

E : CO₂ 배출량(천톤 CO₂)

FC : 연료 사용량(천 TOE)

41.868 : Joule-TOE 환산계수(TJ/천 TOE)

CF : 전환계수(순발열량/총발열량)

EF : 배출계수(t C/TJ)

44/12 : 탄소기준 배출량을 이산화탄소 기준으로 전환(kg CO₂/kg C)

i : 연료 유형

j : 부문

자료: 2006 IPCC GL, Vol.2, Ch.2.3.1.1, Equation 2.1

13) 제1차 격년투명성보고서(Biennial Transparency Report), 1.2.1 전환, 3.2.2 전환

14) 1990년부터 2006년까지는 Tier 1, 2007년부터 Tier 2 방법론 적용

○ 코크스 생산 CO₂ 배출량

코크스는 철강 업종에서 연료와 원료(환원제)로 사용되며, 코크스 사용에 따른 배출량은 각각 제조업 및 건설업(1.A.2.) 부문의 철강과 산업공정 및 제품 사용 분야의 철강 생산(2.C.1.)에서 산정한다. 에너지산업 부문에서는 코크스 생산에 따른 CO₂ 배출량을 산정한다. 다만 CRT의 에너지산업에서는 IE로 보고하고, 철강(1.A.2.a.) 부문 배출량에 포함하였다.

코크스로 공정에서는 원료탄이 투입되어 코크스, 코크스로가스가 주로 생산되고, 그 외 부산물로 콜타르가 생산된다. 또한 코크스로 운전을 위해 코크스로가스, 고로가스가 소비된다. 철강 업종의 전체 배출원은 표 3-8과 같다.

코크스는 제철소 내 생산시설(onsite) 또는 별도의 외부 생산시설(offsite)에서 생산된다. 2006 IPCC GL Tier 2 방법론에서는 내부-외부 시설의 코크스 생산을 구분하여 각각의 산정식을 제시하고 있다. 국내 철강 업종의 경우, 코크스 생산, 제선, 제강, 압연 등 모든 공정이 제철소 내에서 진행되는 일관제철 방식이기 때문에 onsite 방법론을 적용하여 산정하였다.

〈 코크스 생산 부문 CO₂ 배출량 산정식(onsite 기준) 〉

$$E = [CC \times C_{CC} + \sum_a (PM_a \times C_a) + BG \times C_{BG} - CO \times C_{CO} - COG \times C_{COG} - \sum_b (COB_b \times C_b)] \times 41.868 \times 44/12 \times 10^{-3}$$

E	: CO ₂ 배출량(천톤 CO ₂)
CC	: 원료탄 투입량(천 TOE)
PM	: 공정물질 투입량(천 TOE)
BG	: 고로가스(BFG) 투입량(천 TOE)
CO	: 코크스 생산량(천 TOE)
COG	: 코크스로 가스(COG) 생산량(천 TOE)
COB	: 코크스로 부산물 생산량(천 TOE)
C _x	: 투입물 및 산출물의 탄소함유량(t C/TJ)
a	: 공정물질 투입물
b	: 부산물
41.868	: Joule-TOE 환산계수(TJ/천 TOE)
44/12	: 탄소기준 배출량을 CO ₂ 기준으로 전환(kg CO ₂ /kg C)

자료: 2006 IPCC GL, Vol.3, Ch.4.2.2.1, Equation 4.2

| 표 3-8 | 철강 업종의 배출원 구분

배출원	연료·원료원	온실가스 산정 부문
코크스로 공정	원료탄, 코크스, 콜타르, COG, BFG, 기타석탄가스	에너지산업(1.A.1.) > 고체연료 제조 및 기타 에너지산업(1.A.1.c.)
고로 공정	원료탄, 코크스, 기타 유연탄, COG, BFG, 기타석탄가스	금속산업(2.C.) > 철강 생산(2.C.1.)
연주·압연 공정	코크스, COG, 기타석탄가스	제조업 및 건설업(1.A.2.) > 철강(1.A.2.a.)
전기로 공정	전극봉	금속산업(2.C.) > 철강 생산(2.C.1.)
탄산염 소비	석회석, 백운석, 마그네사이트	금속산업(2.C.) > 철강 생산(2.C.1.)

주: 1) COG(Coke Oven Gas) 코크스로가스, BFG(Blast Furnace Gas) 고로가스

2) 코크스로 공정의 배출량은 CRT에서 제조업 및 건설업 중 철강(1.A.2.a.)에 포함하고, 해당 항목에는 IE로 보고

○ 촉매재생에 따른 CO₂ 배출량

촉매재생 시설을 가지고 있는 석유정제 사업장은 모두 배출권거래제 대상 사업장으로, 매년 온실가스 배출권거래제 사업장 배출량 명세서(이하 “사업장 명세서”)를 통해 배출량을 보고하고 있다. 이에 따라, 사업장 명세서상에 보고된 촉매재생에 따른 CO₂ 배출량을 국가 온실가스 배출량으로 적용하고 있다. 촉매재생에 따른 CO₂ 배출량 산정방법은 「온실가스 배출권거래제의 배출량 보고 및 인증에 관한 지침(기후에너지환경부)¹⁵⁾」의 촉매재생 공정 산정식을 적용하고 있다. 사업장 명세서가 부재한 시계열(1990-2006년)에 대해서는 설비용량 등을 변수로 설정한 선형회귀모형을 통해 배출량을 추정한다.

〈 촉매재생에 따른 CO₂ 배출량 산정식 〉

배출권거래제 Tier1	배출권거래제 Tier3a	배출권거래제 Tier3b
$E_{CO_2} = AR \times CF \times 1.963$	$E_{CO_2} = CC \times EF$	$E_{CO_2} = AR \times CF \times 1.963$
E_{CO_2} : CO ₂ 배출량(천톤 CO ₂)	E_{CO_2} : CO ₂ 배출량(천톤 CO ₂)	E_{CO_2} : CO ₂ 배출량(천톤 CO ₂)
AR : 공기 투입량(천m ³)	CC : 연소된 코크스량(톤)	AR : 공기 투입량(천m ³)
CF 투입공기 중 산소함량비(=0.21)	EF : 연소된 코크스의 배출계수	CF : 배기가스 중 CO, CO ₂ 농도비의 합
1.963 : CO ₂ 분자량(44.010) / 표준상태 시 몰당 CO ₂ 부피(22.414)	(tCO ₂ / t-코크스)	1.963 : CO ₂ 분자량(44.010) / 표준상태 시 몰당 CO ₂ 부피(22.414)

자료: 「온실가스 배출권거래제의 배출량 보고 및 인증에 관한 지침(기후에너지환경부)」 별표 6, 14. 석유정제활동

2) 배출계수

○ 탄소배출계수

우리나라는 1980년부터 에너지열량 환산기준을 마련하여 국가 고유 발열량을 공표하였다. 2006년부터는 「에너지법」 시행규칙 제5조에 따라 총발열량 및 순발열량을 5년마다 갱신하여 공표하고 있다.

15) [별표 6] 배출활동별 온실가스 배출량 등의 세부산정방법 및 기준 - 14. 석유정제활동

이를 반영한 국가 고유 탄소배출계수를 개발하여 연료연소 부문의 2007년 이후 배출량 산정에 활용하고 있으며(코크스 생산 및 촉매재생은 제외), 발열량 갱신주기에 따라 탄소배출계수도 5년마다 갱신하고 있다. 국가 고유 배출계수가 개발되지 않은 연도는 전문가 판단을 통해 배출계수를 적용하였다(표 3-10).

○ 코크스 생산 탄소배출계수

코크스 생산은 국가 고유 배출계수를 전 시계열에 적용하였고(표 3-9), 국가 고유 배출계수가 부재한 콜타르는 2006 IPCC GL의 기본배출계수를 활용하였다. 다만 배출계수의 단위는 투입물과 산출물 톤당 CO₂ 함량(t CO₂/t)인 반면, 활동자료는 총발열량 기준의 열량(TOE)이다. 따라서 에너지원별 배출계수에 총발열량을 적용하여 투입물과 산출물의 열량 당 CO₂ 함량(t CO₂/TJ)으로 변환하여 활용하였다.

표 3-9 | 코크스 생산 관련 국가 고유 탄소배출계수

구분	계수	구분	계수
코크스 탄소함량	0.8651 t C/t	고로가스(BFG) 탄소함량	0.1873 t C/t
기타 유연탄 탄소함량	0.7929 t C/t	코크스로가스(COG) 탄소함량	0.4169 t C/t
원료탄 탄소함량	0.7707 t C/t	기타석탄가스 탄소함량	0.2735 t C/t

주: 국내 일관제철과정 3개 사업장에서 보고한 명세서(2017~2019)값을 기준으로 개발(2021년 승인)

○ 촉매재생 탄소배출계수

촉매재생에 따른 탄소배출계수는 「온실가스 배출권거래제의 배출량 보고 및 인증에 관한 지침(기후에너지환경부)16)」에 따른 사업장 배출계수를 활용하고 있다.

표 3-10 | 탄소배출계수

표 3-10-1 연료에너지계수

(단위: t C/TJ)

연료	'90-'06	'07-'11	'12-'16	'17-'21	'22-	연료	'90-'06	'07-'11	'12-'16	'17-'21	'22-		
석유	원유	20.0					석탄	아역청탄	26.2	29.3	26.2	26.468	26.868
	오리멸전	21.0						갈탄	27.6				
	액상천연가스(NGL)	17.5						Oil Shale	29.1				
	휘발유 ¹⁾	18.9	19.7	20.0	19.548	19.731		BKB & 고형연료	26.6				
	항공유 ²⁾	19.5	19.6	19.8	19.931	19.956		코크스	29.2				
	보일러 등유 ³⁾	19.6	19.5	19.6	19.969	19.926		코크스로가스	12.1				
	실내 등유 ³⁾	19.6	19.5	19.6	19.969	19.926		고로가스	70.8				
	Shale Oil	20.0						전로가스 ⁹⁾	49.6				
	경유	20.2	20.0	20.2	20.111	20.090		토탄	28.9				
	B-A	20.5 ⁴⁾	20.2	20.4	20.657	20.440		콜타르	22.0				
	B-B	20.8 ⁴⁾	20.6	20.5	21.384	20.900	가스	천연가스	15.3	15.4	15.3	15.312	15.281
	B-C	21.1	20.8	20.6	21.929	21.249		도시가스(LNG) ¹⁰⁾	15.3 ¹⁰⁾	15.4	15.3	15.272	15.236
	부생연료 1호 ⁵⁾	20.0	20.0	19.7	20.067	20.165		도시가스(LPG)	17.2	17.6	17.6	17.454	17.453
	부생연료 2호 ⁵⁾	20.0	20.0	21.0	21.729	21.877	기타	도시폐기물(비재생)	25.0				

16) [별표 6] 배출활동별 온실가스 배출량 등의 세부산정방법 및 기준 - 14. 석유정제활동

연료		'90-'06	'07-'11	'12-'16	'17-'21	'22-	연료		'90-'06	'07-'11	'12-'16	'17-'21	'22-
석탄	프로판	17.2	17.6	17.6	17.641	17.630	화석	산업폐기물	39.0				
	부탄	17.2	18.1	18.1	18.107	18.094	기타 비화석	도시폐기물(재생)	27.3				
	에탄올	16.8					바이오 매스	목재/목재 폐기물	30.5				
	납사	20.0	18.6	19.2	19.157	19.083		아황산염 찌꺼기	26.0				
	용제	20.0	19.4	19.3	19.172	19.128		기타 주요한 고체 바이오매스	27.3				
	아스팔트	22.0	21.5	21.6	21.544	21.473		목탄	30.5				
	윤활유	20.0	19.7	19.9	19.979	19.897		바이오휘발유	19.3				
	석유코크	26.6	27.2	27.2 ⁶⁾	26.086	26.192		바이오경유	19.3				
	정제가스	15.7						기타 액체 바이오연료	21.7				
	기타석유제품 ⁷⁾	20.0	20.0	19.7	20.067	20.165		매립지 가스	14.9				
국내무연탄	26.8	29.7	30.5	30.185	29.705	슬러지 가스		14.9					
연료용 수입무연탄 ⁸⁾	26.8	26.8	28.6	27.404	27.320	기타 바이오가스		14.9					
석탄	원료용 수입무연탄 ⁹⁾	26.8	26.8	29.2	29.909	28.990							
	원료용 유연탄 ⁸⁾	25.8	25.8	26.2	25.963	25.349							
	연료용 유연탄	25.8	25.9	26.0	25.951	26.105							

주: 국가 고유 배출계수, 2006 IPCC GL 기본 배출계수

국가 고유 배출계수는 2007년 이후 배출량부터 적용하며, 그 이전은 국내 전문가 판단에 따라 2006 IPCC GL 기본 배출계수를 적용. 단, 국가 고유 배출계수가 없는 연료는 해당 연료의 기본 배출계수를 전 시계열에 일괄 적용함.

- 1) 항공용 휘발유(AVI-G)는 휘발유의 값을 준용
- 2) 항공유는 등유형항공유(Jet A-1, JP-8)와 휘발유형항공유(JP-4) 등을 포함
- 3) 보일러 등유는 2011년 7월부터 판매가 폐지되어 2012년 이후는 실내 등유의 국가 고유 배출계수를 준용
- 4) 경질중유(B-A유)는 경유유분 70%, B-C유분 30%의 혼합유이고, 중유(B-B유)는 경유유분 30%, B-C유분 70%의 혼합유임. 1990년부터 2006년까지는 국가 고유 배출계수 미개발 및 2006 IPCC GL 기본 배출계수가 미제시되어, 경유와 B-C유의 2006 IPCC GL 기본 배출계수(경유 20.2 t C/TJ, B-C유 21.1 t C/TJ)를 각각의 혼합비율에 맞게 적용함.
- 5) 부생연료 1호, 2호는 1990년부터 2011년까지 기타 석유제품의 2006 IPCC GL 기본 배출계수를 준용
- 6) 석유코크는 2012-2016년 국가 고유 배출계수의 부재로 2007-2011년의 국가 고유 배출계수 준용
- 7) 기타 석유제품은 1990년부터 2011년까지 2006 IPCC GL 기본 배출계수를 준용하고, 2012년부터는 부생연료 1호의 국가 고유 배출계수를 준용함. 국가 고유 및 2006 IPCC GL 기본 배출계수가 제시되지 않은 석유류는 기타 석유제품을 준용
- 8) 수입무연탄, 유연탄(원료탄)은 2007년부터 2011년까지 각 연료의 2006 IPCC 기본 배출계수를 준용
- 9) 기타석탄가스는 전로가스(Oxygen Steel Furnace Gas)의 2006 IPCC GL 기본 배출계수를 적용
- 10) 도시가스(LNG)는 천연가스가 주원료이고 열량 조정을 위해 프로판을 보조 원료로 사용함. 따라서 도시가스 제조에 투입된 연도별 원료 비율로 배출계수를 산정하였으며, 2007년 이후에는 투입원료 비중을 고려한 국가 고유 배출계수가 개발되어 이를 사용함.

[도시가스(LNG) 탄소배출계수, 단위: t C/TJ]

1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
15.300	15.300	15.300	15.300	15.300	15.300	15.300	15.300	15.300	15.300	15.300	15.323	15.319	15.310	15.309	15.308	15.305

자료: 2006 IPCC GL, 국가 고유 배출계수(2012, 2013, 2018, 2021년 공표)(온실가스종합정보센터)

3) 활동자료

「에너지수급통계(에너지경제연구원)」의 연료 소비량을 활용하였다(촉매재생은 별도의 활동자료 적용). 다만, 연료 소비량은 총발열량, 탄소배출계수는 순발열량 기준이기 때문에 활동자료에 연료별 전환 계수를 적용하여 순발열량 기준의 소비량으로 전환한 후 배출량을 산정하였다.

2023년 에너지산업 부문의 총 연료 소비량은 81,768.6 천 TOE로 전년 대비 2.7% 감소하였다. 연료별로는 고체가 41,976.7 천 TOE, 기체 32,047.7 천 TOE를 사용하였으며, 액체, 바이오매스, 기타화석연료 순이었다. 1990년 대비 2023년 활동자료 증감률을 살펴보면, 기체, 고체는 각각 1,315.8%, 795.3% 증가하고, 액체는 26.8% 감소한 것으로 나타났다.

표 3-11 | 에너지산업 부문 활동자료 수집방법(1990-2023)

기간	활동자료	통계명	관리기관	대상가스
1990-2023	연료별 소비량	에너지수급통계	에너지경제연구원	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O

표 3-12 | 에너지산업 부문 연료별 소비량(1990-2023)

(단위: 천 TOE)

구분	1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023
고체연료	4,688.4	22,987.8	48,520.5	55,584.8	44,317.3	44,291.4	41,976.7
액체연료	6,420.6	10,840.6	7,334.7	5,526.2	87,378.0	4,615.8	4,701.6
기체연료	2,263.6	6,605.0	20,058.2	29,761.6	33,746.4	33,094.6	32,047.7
바이오매스	NO	NO	126.2	1,452.8	1,687.5	1,953.9	2,698.1
기타화석연료	NO	NO	NO	79.8	40.2	46.9	344.5
합계	13,372.5	40,433.4	76,039.5	92,405.2	84,094.4	84,002.6	81,768.6

주: 기타화석연료는 도시폐기물(비재생) 등을 포함

자료: 「에너지수급통계(에너지경제연구원, 2025)」, 사업장 명세서(기후에너지환경부, 2024)

에너지산업 부문의 세부 부문별 활동자료 출처 및 적용 기준은 아래와 같다.

○ 공공 전기 및 열 생산 부문

공공 전기 및 열 생산 부문의 활동자료는 「에너지수급통계(에너지경제연구원)」 중 발전전용, 열병합, 열전용 시설에서의 연료 소비량을 사용한다. 공공 전기 및 열 생산의 하위 항목인 연료전지 발전의 활동자료는 기타전환의 도시가스 소비량을 사용한다.

○ 석유정제 부문

석유정제 부문에서 사용하는 연료 소비량은 「에너지수급통계(에너지경제연구원)」를 활용하고 있다¹⁷⁾. 다만, 1990년부터 1996년까지의 정제가스 소비량이 제시되지 않았고, B-C유는 해당 기간과 1997년 이후 소비량이 9배 이상 차이를 보였다. 이에 따라 1990-1996년 동안의 정제가스와 B-C유 자체 소비량은 2006 IPCC GL의 대체 자료법(surrogate data)에 따라 다음과 같이 계산하여 활용하였다.

먼저, 석유정제 부문의 총 에너지 소비량을 계산하기 위하여 1997-2002년¹⁸⁾ 연도별 정제투입량(원유, 정제원료) 대비 석유정제 총 에너지 소비량 비율의 평균값을 도출하였다. 해당 평균값을 1990-1996년 연도별 정제투입량에 적용하여 석유정제 부문 총 에너지 소비량을 계산하였다. 두 번째 단계로

17) 파이프라인 수송업 소비량은 기타수송(1.A.3.e.) 부문에서 산정하므로 석유정제 소비량에서 제외

18) 총 에너지 소비량 대비 B-C유 소비량 비중이 2003년 이후 급격하게 감소하여 비교적 변동폭이 크지 않은 1997-2003년 평균값을 활용

1997-2002년 연도별 석유정제 총 에너지 소비량 대비 정제가스 및 B-C유 비율의 평균값을 앞서 계산한 1990-1996년의 총 에너지 소비량에 적용하여 정제가스 및 B-C유 소비량을 최종 산출하였다.

석유정제 중 촉매재생의 활동자료는 코크스 제거를 위해 투입된 공기량 또는 점착된 코크스의 연소량이다. 이는 배출권거래제의 사업장 명세서에 보고된 자료를 활용하였다.

| 표 3-13 | 1990-1996년 석유정제 부문 정제가스와 B-C유 소비량 추정

(단위: 천 TOE)

	구분	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002
정제 투입	원유	42,571	54,302	69,389	76,199	76,919	86,121	98,244	118,961	112,673	119,140	121,722	117,349	107,406
	정제원료	1,257	2,049	2,892	3,429	4,448	5,749	5,262	9,506	8,383	6,997	6,286	8,021	11,048
	합계	43,828	56,350	72,281	79,628	81,367	91,870	103,506	128,467	121,056	126,138	128,008	125,370	118,454
연료 소비	정제가스	387	497	637	702	718	810	913	1,009	1,009	1,086	1,209	1,240	1,042
	B-C	786	1,011	1,296	1,428	1,459	1,648	1,857	2,104	2,214	2,333	2,243	2,258	2,231
	합계	1,173	1,508	1,934	2,130	2,177	2,458	2,769	3,113	3,223	3,419	3,452	3,498	3,273

주: 음영 부분()은 추정치

○ 코크스 생산 부문

「에너지수급통계(에너지경제연구원)」에서 코크스로 공정에 투입된 원료와 제품 생산량, 코크스로 운전을 위한 에너지 용도의 연료 소비량을 활용하였다.

○ 기타(폐기물 에너지원)

2006 IPCC GL에 따라 폐기물 소각에서 에너지를 회수할 경우 해당 배출량(CO₂, CH₄, N₂O)을 에너지 분야에서 산정·보고하여야 한다. 국내 통계에서는 자원회수시설을 통한 에너지 생산 목적으로 소비된 도시폐기물 배출량과 산업폐기물(시멘트킬른보조연료) 배출량은 에너지 분야에서 산정·보고하였다. 그 외 산업폐기물을 활용한 자원회수시설 정보에 대해서는 국가 통계 공표를 위한 조사가 진행 중이다. 해당 통계가 공표되면 시계열 자료에 대한 전문가 검토를 거쳐 에너지 회수 소각 배출량은 에너지 분야에서 산정할 계획이며, 공표 이전까지는 폐기물 분야에서 에너지 회수/미회수 소각에 대한 배출량을 모두 산정한다. 이를 통하여 폐기물 소각으로 인한 배출량이 에너지-폐기물 분야 간 이중 산정되는 상황을 예방하고 산정 결과의 일관성을 확보하고 있다.

4) 발열량

에너지 분야의 주 활동자료인 「에너지수급통계(에너지경제연구원)」의 연료 소비량은 총발열량 기준이기 때문에 순발열량 기준으로 전환하였다. 전환계수는 「에너지법」시행규칙(산업통상자원부)¹⁹⁾에 총·순발열량이 있는 경우(표 3-14), 연료별로 순발열량과 총발열량의 비율로 산정하였다.

19) [별표] 에너지열량 환산기준

국가고시 총·순발열량이 없는 연료는 국제에너지기구(IEA)에서 제시한 전환계수를 직접 사용하거나 열량 환산계수를 사용하여 전환계수를 구하였다. 또한 일부 연료는 배출권거래제의 사업장 명세서로부터 구한 총·순발열량 열량 환산계수로부터 전환계수를 구하였다. 그 외 나머지 연료는 국내에서 성상이 유사한 다른 연료의 국가고시 발열량을 준용하여 전환계수를 구하였다.(표 3-15)

표 3-14 | 국가 고유 발열량

(발열량 단위: MJ)

구분	연 료 ¹⁾	단 위	'90-'06년	'07-'11년		'12-'16년		'17-'21년		'22년-	
			총발열량	총발열량	순발열량	총발열량	순발열량	총발열량	순발열량	총발열량	순발열량
석유	원유	kg	41.9	45.0	42.3	44.9	42.2	45	42.2	45.7	42.8
	휘발유 ²⁾	ℓ	34.8	33.5	31.0	32.6	30.3	32.7	30.4	32.4	30.1
	보일러 등유 ³⁾	ℓ	36.4	37.5	35.0	36.8	34.3	36.7	34.2	36.6	34.1
	실내 등유	ℓ	36.4	36.8	34.3						
	경유	ℓ	38.5	37.9	35.4	37.7	35.3	37.8	35.2	37.8	35.3
	바이오경유 ⁴⁾	ℓ	-	-	-	-	-	-	-	34.7	32.3
	경질중유(B-A유)	ℓ	39.4	38.9	36.6	38.9	36.4	39.0	36.4	39.0	36.5
	중유(B-B유)	ℓ	40.6	40.4	38.1	40.5	38.0	40.5	38.0	40.6	38.1
	중질중유(B-C유)	ℓ	41.4	41.4	39.1	41.6	39.2	41.7	39.2	41.8	39.3
	프로판	kg	50.2	50.4	46.3	50.4	46.3	50.4	46.3	50.2	46.2
	부탄	kg	49.4	49.6	45.7	49.6	45.6	49.5	45.7	49.3	45.5
	납사	ℓ	33.5	33.7	31.2	32.3	30.0	32.3	29.9	32.2	29.9
	용제	ℓ	34.3	33.3	30.8	33.3	31.0	32.8	30.3	32.8	30.4
	항공유	JET A-1 ⁵⁾	ℓ	36.4	36.6	34.3	36.5	34.1	36.5	33.9	36.5
		JP-4	ℓ	35.6							
	아스팔트	kg	41.9	41.4	39.1	41.5	39.2	41.4	39.2	41.4	39.0
	윤활유	ℓ	39.4	38.7	36.2	39.8	37.0	40.0	37.3	39.6	37.0
	석유코크	kg	45.2	33.9	32.9	33.5	31.6	35.0	34.2	34.9	34.2
	부생연료1호 ⁶⁾	ℓ	-	37.0	35.0	36.9	34.3	37.1	34.6	37.3	34.8
	부생연료2호	ℓ	-	40.6	38.5	40.0	37.9	39.9	37.7	39.9	37.7
가스	천연가스(LNG)	kg	54.4	54.5	49.2	54.6	49.3	54.7	49.4	54.7	49.4
	도시가스(LNG)	Nm³	44.0	44.2	40.0	43.6	39.4	43.1	38.9	42.7	38.5
	도시가스(LPG)	Nm³	62.8	62.8	57.8	62.8	57.7	63.6	58.4	63.4	58.3
석탄	국내무연탄 ⁷⁾	kg	18.8	19.5	19.3	18.9	18.6	19.8	19.4	19.7	19.4
	수입무연탄(연료용)	kg	25.1	27.4	26.8	21.0	20.6	21.2	20.5	23.0	22.3
						24.7	24.4	25.2	24.7	25.8	25.3
	유연탄(연료용)	kg	27.6	26.0	24.9	25.8	24.7	24.8	23.7	24.6	23.3
				29.3	28.3	29.3	28.2	29.2	28.0	29.4	28.3
	유연탄(원료용)	kg	27.6	29.3	28.3	29.3	28.2	29.2	28.0	29.4	28.3
	아역청탄 ⁸⁾										
	코크스	kg	27.2	29.5	29.3	29.1	28.9	29.0	28.9	28.6	28.5
기타	신탄 ⁹⁾	kg	18.8	18.8	-	18.8	-	18.8	-	18.8	-

자료: 「에너지법」시행규칙 별표

주: 1) 국가 고유 발열량이 제시되지 않은 연료원은 IEA 기본값 적용(콜타르, 토탄, 정제가스, 파라핀왁스) 또는 유사 연료의 값을 준용(갈탄, 고형 연료, 정제원료, 항공용휘발유, JP-8, 기타석유제품 등)

2) 항공용휘발유(AVI-G)는 휘발유의 값을 준용

3) 보일러 등유는 2011년 7월부터 판매가 폐지되어 2012년 이후는 실내 등유의 값을 준용

4) 바이오경유 발열량이 제시되지 않은 2021년 이전은 경유의 값을 준용

- 5) JP-8은 JET A-1의 값을 준용
- 6) 정제원료, 첨가물, 기타탄화수소, 기타석유제품, 바이오휘발유, 기타바이오연료의 발열량은 부생연료1호의 값을 준용. 1990-2006년은 고시 발열량 없으므로 2007-2011년 부생연료1호 발열량 값을 각각 준용
- 7) 고형연료의 전환계수는 국내무연탄 값을 준용
- 8) 갈탄의 전환계수는 아역청탄 값을 준용
- 9) 신탄의 전환계수는 '1'을 적용하며 산업폐기물, 도시폐기물, 고형바이오매스, 바이오가스, 매립지가스, 목탄의 전환계수는 신탄 값을 준용

표 3-15 | 그 외 연료의 발열량 및 전환계수

연료		총발열량(MJ/kg)	순발열량(MJ/kg)	전환계수(MJ/MJ)
석유류 ¹⁾	파라핀왁스	42.0	39.9	0.950
	정제가스	52.0	47.6	0.915
석탄류	코크스로가스 ²⁾	38.1	33.9	0.889
	고로가스 ²⁾	2.7	2.7	0.982
	기타석탄가스 ²⁾	4.3	4.0	0.942
	토탄, 콜타르 ³⁾	-	-	0.950

주: 전환계수 적용 시 소수점 절삭없이 원수치를 그대로 적용

파이넥스가스는 기타석탄가스를 준용, Tier 2 방법론 적용시(코크스로, 고로)는 총발열량을 직접 활용

자료: 1) Oil Information(IEA, 2019), 2) 온실가스 배출권거래제 사업장 명세서, 3) 에너지수급통계(에너지경제연구원) 콜타르 열량/물량 비중

3.2.3.2.2 Non-CO₂ (CH₄, N₂O)

1) 산정방법

에너지산업 부문의 Non-CO₂ 배출량은 2006 IPCC GL의 Tier 1과 Tier 2(공공 전기 및 열 생산)²⁰⁾ 방법론을 적용한다. 두 방법론은 에너지용도 연료 소비량에 Joule-TOE 환산계수, 전환계수, 배출계수를 곱하여 산정하는 방식은 동일하나 IPCC 기본 배출계수를 적용하면 Tier 1 방법이며 국가 고유 배출계수를 적용하면 Tier 2 방법이다(코크스 생산은 별도 산정식 적용). 한편, 연료전지 발전을 위해 도시가스를 개질하여 수소를 생산하는 과정에서 Non-CO₂ 배출은 발생하지 않는다.

20) 전문가 검토 결과에 따라 Non-CO₂ 배출계수는 국가 고유 배출계수가 개발되지 않은 1990년부터 2016년까지는 Tier 1 방법을 적용하고, 2017년부터는 Tier 2 방법을 적용

〈에너지산업 부문(연료전지 발전, 코크스 생산 제외) CH₄, N₂O 배출량 산정식〉

$$E_k = \sum_{ijk} [FC_{ijk} \times 41.868 \times CF_i \times EF_{i,k} \times 10^{-6}]$$

E	: 배출량(천톤 CH ₄ , 천톤 N ₂ O)
FC	: 총 연료 사용량(천 TOE)
41.868	: Joule-TOE 환산계수(TJ/천 TOE)
CF	: 전환계수(순발열량/총발열량)
EF	: 배출계수(kg CH ₄ /TJ, kg N ₂ O/TJ)
i	: 연료 유형
j	: 부문
k	: 온실가스 종류(CH ₄ , N ₂ O)

자료: 2006 IPCC GL, Vol.2, Ch.2.3.1.1, Equation 2.1

코크스 생산 부문의 CH₄ 배출량은 2006 IPCC GL의 Tier 1 방법론에 따라 국내 코크스 생산량에 기본 배출계수를 곱하여 산정하였다.

〈코크스 생산 CH₄ 배출량 산정식〉

$$E = \text{Coke} \times 41.868 \times 10^{-6} \times EF$$

E	: 배출량(천톤 CH ₄)
Coke	: 국내 코크스 생산량(천 TOE)
41.868	: Joule-TOE 환산계수(TJ/천 TOE)
EF	: 배출계수(kg CH ₄ /TJ)

자료: 2006 IPCC GL, Vol.3, Ch.4.2.2.1, Equation 4.1

2) 배출계수

에너지산업 부문에서 석유정제, 고체연료 제조 및 기타 에너지산업은 2006 IPCC GL의 기본 배출계수를 이용하였다. 코크스 생산은 생산량 단위(TOE)와 배출계수의 단위(gCH₄/t)가 달라 배출계수 단위를 변환하였다.²¹⁾ 공공 전기 및 열 생산 부문은 2006 IPCC GL 기본 배출계수와 국가 고유 배출계수를 적용하였다.

21) 2006 IPCC GL의 기본 배출계수(0.1 g CH₄/t)에 코크스의 국가고시 총발열량 기준 열량환산계수(TOE/t), Joule 전환계수(TJ/TOE)를 적용 후 kg CH₄/TJ로 변환

| 표 3-16 | 에너지산업 부문 CH₄ 및 N₂O 배출계수

(단위: kg/TJ)

연료		CH ₄	N ₂ O
석탄		1	1.5
석유		3	0.6
가스		1	0.1
폐기물	도시폐기물	30	4
	산업폐기물	30	4
바이오매스	기타 고체 바이오매스	30	4
	액체 바이오매스	3	0.6
	기체 바이오매스	1	0.1

주: 석유 기반 가스(정제가스, 프로판, 부탄 등)와 석탄 기반 가스(코크스가스, 고로가스 등)는 가스의 배출계수 적용
자료: 2006 IPCC GL

| 표 3-17 | 공공 전기 및 열 생산 부문 CH₄ 및 N₂O 배출계수

(단위: kg/TJ)

연료		CH ₄	N ₂ O
석탄		0.25	1.66
석유		0.15	1.75
가스		0.41	1.06

주: 1) 2017년 배출량부터 적용하며, 그 이전은 2006 IPCC GL의 기본 배출계수를 적용
2) 석유기반 가스(정제가스, 프로판, 부탄 등), 석탄기반 가스(코크스가스, 고로가스 등), 기체 바이오매스(바이오가스, 매립지가스)는 가스의 배출계수 적용
3) 고체 폐기물 및 바이오매스(도시폐기물, 고형바이오매스)는 전문가 검토 후 공공 전기 열 생산 부문 석탄의 배출계수 적용
자료: 국가 고유 배출계수(2017년 공표)(온실가스종합정보센터)

3) 활동자료

「에너지수급통계(에너지경제연구원)」의 연료 소비량을 활용하였다.

3.2.3.3 시계열 일관성

에너지산업 부문의 주요 활동자료로 전 시계열(1990-2023년)에 걸쳐 「에너지수급통계(에너지경제연구원)」의 연료 소비량을 일관되게 사용하였다. 다만, 석유정제 부문은 1990-1996년 기간 동안 일부 연료(정제가스, B-C유) 소비량에 단절이 있어 2006 IPCC GL의 대체 자료법을 적용하여 보정하였다. 석유정제 부문 중 촉매재생은 배출권거래제의 사업장 명세서를 활용하였으나 사업장 명세서가 부재한 2006년 이전은 선형회귀모형을 통해 활동자료를 추정함으로써 시계열 일관성을 확보하였다.

에너지산업 부문의 코크스 생산의 CO₂ 배출계수는 전 시계열에 대해 국가 고유 배출계수를 적용하였다. 그 외 CO₂ 배출계수는 국가 고유 배출계수가 개발된 2007년 이후부터 국가 고유 배출계수를 적용하고, 개발되지 않은 연도에는 전문가 판단에 따라 IPCC 기본 배출계수를 적용하였다. 도시가스, B-A유, B-B유의 경우, 1990년부터 2006년까지 원료의 투입 비율대로 기본 계수를 가중 평균하여 적용하였고 2007년부터는 국가 고유 배출계수를 적용하였다.

CH₄, N₂O 배출계수는 2006 IPCC GL의 기본 배출계수를 전 시계열에 적용하였다. 공공 전기 및 열 생산 부문의 경우, 국가 고유 배출계수가 개발된 2017년 이후부터 국가 고유 배출계수를 적용하고 개발되지 않은 연도에는 IPCC 기본 배출계수를 적용하였다.

3.2.3.4 QA/QC

QA/QC는 제1장 서론 1.5절 내용과 동일하다.

3.2.3.5 재계산

에너지산업 부문의 활동자료인 「에너지수급통계(에너지경제연구원)」의 개정(2025.10월)으로 인해 전 시계열의 배출량을 재계산하였다. 또한 연료전지용 수소 생산을 위한 도시가스 개질 과정에서 발생하는 CO₂ 배출량을 신규 산정하여 발전 전용 연료전지 배출량을 공공 전기 및 열 생산 부문(1.A.1.a.)에 포함하였고, 석탄가스화복합발전(Integrated Gasification Combined Cycle, 이하 IGCC) 배출량 산정방법을 개선하여 2015~2022년 배출량을 재계산하였다.

3.2.4 제조업 및 건설업(1.A.2.)

3.2.4.1 배출원 개요

2023년 기준	산정 온실가스	방법론	배출계수	활동자료
	CO ₂	Tier 1, 2	D, CS	연료 소비량
	CH ₄ , N ₂ O	Tier 1	D, OTH	

제조업 및 건설업(1.A.2.) 부문²²⁾은 철강(1.A.2.a.), 비철금속(1.A.2.b.), 화학(1.A.2.c.), 펄프, 제지 및 인쇄(1.A.2.d.), 식음료품 가공 및 담배 제조(1.A.2.e.), 비금속 광물(1.A.2.f.), 기타(1.A.2.g.) 업종으로 구분된다. 기타에는 기계류, 수송장비, 광업(석탄광업 제외), 목재 및 목제품, 건설업, 섬유 및 가죽, 비도로 차량 및 기타 기계, 기타 제조에서 발생하는 온실가스 배출량을 포함한다. 국내 통계에서는 비도로 차량 및 기타 기계의 연료 소비량이 분리되지 않아 모두 고정형에 포함하였다(IE).

2023년 제조업 및 건설업 배출량은 147,240 천톤 CO₂-eq로 전년 대비 1.9% 증가하였다. 업종별 배출량 비중은 철강이 74,997 천톤 CO₂-eq로 50.9%를 차지하였고 화학 16.9%(24,926 천톤 CO₂-eq), 기타 15.8%(23,294 천톤 CO₂-eq), 비금속광물 10.5%(15,433 천톤 CO₂-eq), 비철금속 2.6%(3,775 천톤 CO₂-eq), 펄프, 제지 및 인쇄 1.9%(2,750 천톤 CO₂-eq), 식음료품 가공 및 담배 제조 1.4%(2,065 천톤 CO₂-eq)의 순서이다.

22) 자가소비용 전기·열 생산을 위한 연료 연소에서 발생하는 배출량과 이동형 기계류, 운반용 설비, 수송 수단 등 비고정형 연료 연소에서 발생하는 배출량을 포함하고 있음.

1990년 대비 제조업 및 건설업 배출량은 104.0% 증가했는데 이는 에너지 다소비 업종의 확대와 산업 성장에 기인한다. 같은 기간 광공업의 GDP는 515.2%²³⁾ 증가하였으며, GDP 대비 수출 비중은 33.3%²⁴⁾이다. 철강, 석유화학, 시멘트 등 에너지 다소비 업종이 산업 전체에서 차지하는 비중이 높아 온실가스 배출량 증가에 큰 영향을 미쳤다.

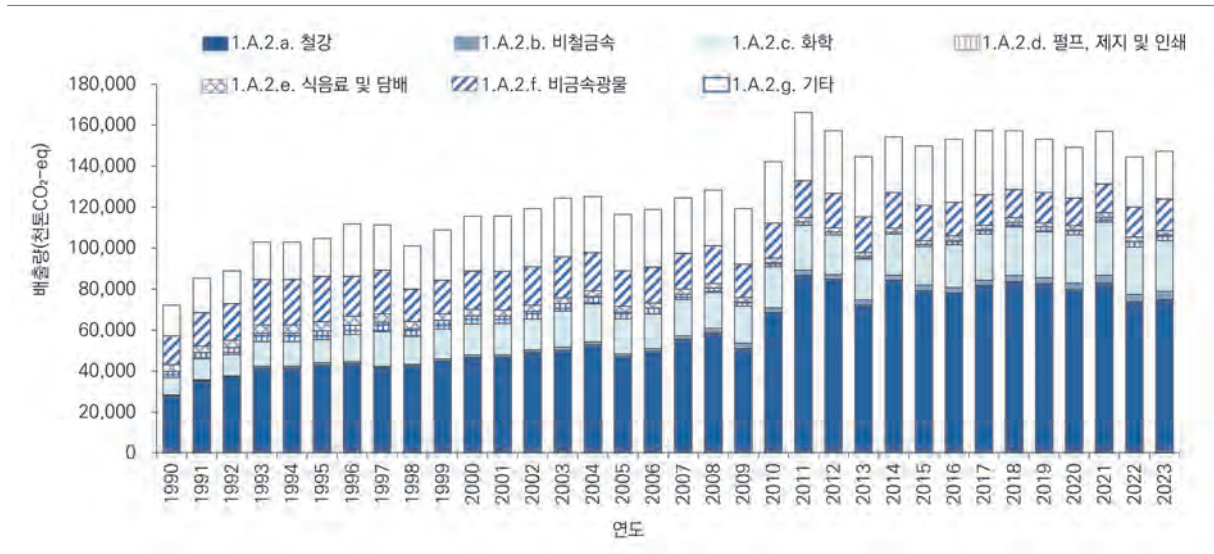


그림 3-7 | 제조업 및 건설업 부문 온실가스 배출량(1990-2023)

표 3-18 | 제조업 및 건설업 부문 온실가스 배출량(1990-2023)

(단위: 천톤 CO₂-eq)

구분	1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023
1.A.2.a. 철강	27,836	46,669	68,611	83,663	83,002	73,802	74,997
1.A.2.b. 비철금속	550	1,174	2,218	2,927	3,766	3,490	3,775
1.A.2.c. 화학	8,583	15,285	20,119	23,795	25,985	23,239	24,926
1.A.2.d. 펄프, 제지 및 인쇄	2,884	3,861	1,879	2,292	2,372	2,673	2,750
1.A.2.e. 식음료품 가공 및 담배 제조	3,314	3,150	2,320	2,170	2,112	2,219	2,065
1.A.2.f. 비금속광물	13,956	18,587	17,059	13,685	14,101	14,601	15,433
1.A.2.g. 기타	15,071	26,843	29,890	28,677	25,693	24,467	23,294
1.A2g.i. 기계 제조	2,009	3,229	2,462	3,491	4,093	4,236	4,801
1.A2g.ii. 수송장비 제조	758	2,938	2,077	2,447	2,255	2,240	2,362
1.A2g.iii. 광업	439	152	195	122	132	124	166
1.A2g.iv. 목재 및 목제품	221	262	221	164	132	140	94
1.A2g.v. 건설업	1,657	1,415	2,537	2,218	2,035	1,967	1,813
1.A2g.vi. 섬유 및 가죽	6,204	10,564	6,858	4,961	4,368	4,233	4,525
1.A2g.vii. 비도로 차량 및 기타 기계	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE
1.A2g.viii. 기타	3,782	8,285	15,540	15,274	12,677	11,527	9,533
합계	72,192	115,570	142,096	157,209	157,031	144,492	147,240

23) 1990년 95,502.5 십억 원 → 2022년 587,525.2 십억 원(출처: 국민계정, 경제활동별 GDP 및 GNI(원계열, 실질, 2020년 기준)(한국은행, 2024)(접속일: 2025.12.9.))

24) 출처 : 수출의 국민경제 기여 효과 분석(한국무역협회, 2024)(2020년 기준 GDP)

3.2.4.2 방법론

3.2.4.2.1 CO₂

1) 산정방법

에너지산업(1.A.1.) 부문의 산정 방법과 동일하다.

2) 배출계수

에너지산업(1.A.1.) 부문과 동일하다.

3) 활동자료

제조업 및 건설업 부문의 활동자료는 「에너지수급통계(에너지경제연구원)」의 연료 소비량을 활용하였다.

표 3-19 | 제조업 및 건설업 부문 활동자료 수집방법(1990-2023)

기간	활동자료	통계명	관리기관	대상가스
1990-2023	연료별 소비량	에너지수급통계	에너지경제연구원	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O

표 3-20 | 제조업 및 건설업 부문 연료별 소비량(1990-2023)

(단위: 천 TOE)

구분	1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023
고체연료	7,532.6	14,034.0	19,323.1	22,430.2	21,993.1	19,615.2	19,459.1
액체연료	11,214.8	12,395.2	7,574.5	4,509.2	4,511.5	4,748.4	5,370.0
기체연료	239.4	3,502.8	8,284.9	9,624.4	9,898.9	9,808.4	9,915.0
바이오매스	NO	186.1	455.4	1,781.9	2,091.6	1,919.1	1,775.6
기타화석연료	NO	269.7	507.4	1,049.3	1,165.2	1,313.8	1,394.7
합계	18,986.8	30,387.8	36,145.3	39,395.0	39,660.3	37,404.9	37,914.3

주: 기타화석연료는 도시폐기물(비재생) 등을 포함

자료: 「에너지수급통계(에너지경제연구원, 2025)」

○ 전기 및 열 자가생산자

공공 판매가 아닌 주요 산업 활동에 사용할 목적으로 전기·열을 생산하는 자가생산자의 배출량은 자가생산자의 주요 활동이 속한 부문에서 산정·보고하여야 한다. 제조업 및 건설업(1.A.2.) 부문에서 자가소비 목적의 연료 소비량을 포함하고 있다.

○ 기타(폐기물 에너지원)

2006 IPCC GL에 따라 폐기물 소각에서 에너지를 회수할 경우 해당 배출량(CO₂, CH₄, N₂O)을 에너지 분야에서 산정·보고하여야 한다. 국내 통계에서는 자원회수시설을 통한 에너지 생산 목적으로

소비된 도시폐기물 배출량과 산업폐기물(시멘트킬른보조연료) 배출량은 에너지 분야에서 산정·보고하였다. 그 외 산업폐기물을 활용한 자원회수시설 정보에 대해서는 국가 통계 공표를 위한 조사가 진행 중이다. 해당 통계가 공표되면 시계열 자료에 대한 전문가 검토를 거쳐 에너지 회수 소각 배출량은 에너지 분야에서 산정할 계획이며, 공표 이전까지는 폐기물 분야에서 에너지 회수/미회수 소각에 대한 배출량을 모두 산정한다. 이를 통하여 폐기물 소각으로 인한 배출량이 에너지-폐기물 분야 간 이중 산정되는 상황을 예방하고 산정 결과의 일관성을 확보하고 있다.

3.2.4.2.2 Non-CO₂ (CH₄, N₂O)

1) 산정방법

에너지산업(1.A.1.) 부문의 산정 방법과 동일하다.

2) 배출계수

제조업 및 건설업 부문의 CH₄, N₂O 배출계수는 2006 IPCC GL의 기본 배출계수를 이용하여 산정하였다(표 3-21). 다만, 「에너지총조사(산업통상자원부)²⁵⁾」에 따르면 업종별로 휘발유, 경유, 프로판, 부탄의 일부를 이동 목적으로 사용하는 것으로 나타나 이를 반영하여 기본 배출계수를 조정하였다.

표 3-21 | 제조업 및 건설업 부문 CH₄, N₂O 배출계수

(단위: kg/TJ)

연료		CH ₄ 배출계수	N ₂ O 배출계수
석탄		10	1.5
석유		3	0.6
가스		1	0.1
폐기물	도시폐기물	30	4
	산업폐기물	30	4
바이오매스	고체 바이오매스	30	4
	액체 바이오매스	3	0.6
	기체 바이오매스	1	0.1

주: 석유 기반 가스(정제가스, 프로판, 부탄 등)와 석탄 기반 가스(코크스가스, 고로가스 등)는 가스의 배출계수를 적용
자료: 2006 IPCC GL

○ 휘발유, 경유, 프로판, 부탄

「에너지총조사(산업통상자원부)」를 이용하여 업종별로 휘발유, 경유, 프로판, 부탄의 소비량에서 고정형/수송용²⁶⁾ 비중을 계산하였다. 이를 2006 IPCC GL의 고정연소와 도로수송²⁷⁾ 부문 기본 배출

25) 동력자원부(1990), 상공자원부(1993), 통상산업부(1996), 산업자원부(1999, 2002, 2005), 지식경제부(2008, 2011), 산업통상자원부(2014, 2017, 2020, 2023). 「에너지총조사」는 농림어업, 건설업, 운수업, 상업·공공, 건물 등을 대상으로 3년마다 에너지 소비 실태를 조사하고 있음. 「에너지수급통계(에너지경제연구원)」보다 세분화된 업종별, 용도별(수송용, 원료용, 설비용 등) 소비량을 발표하여 국가 온실가스 통계 산정시 보조자료로 활용하고 있음.

26) 업체의 운반용 설비, 제품 수송용 차량, 선박 등에 소비된 연료를 포함

27) 업종별 수송용 소비에는 운반용 설비, 제품 수송용 차량, 선박 등에서 소비된 연료를 모두 포함하지만, 상해 운송 방식을 구분할 수 없기에 도로수송 부문의 기본 배출계수를 일괄 적용함.

계수에 적용하여 업종·연료별로 배출계수를 구하였다. 해당 조사는 3년마다 실시되기 때문에 조사가 시행되지 않은 연도는 내삽법을 사용하여 계산하였다.

건설업의 건설기계용 경유 소비량의 경우, 주로 이동연소로 소비되기 때문에 수송용으로 포함하였다. 2011년도부터는 건설업의 용도별 소비량이 수송용으로 별도 구분되지 않고 건설기계용과 건물용으로만 구분되기 때문에 건설기계용 소비량을 전량 수송용으로 포함하였다.

최종적으로 2006 IPCC GL의 고정연소와 도로수송 기본 배출계수²⁸⁾를 업종별 고정형/수송용 소비 비중으로 가중 평균하여 업종별, 연료별 배출계수를 구하였다.

3) 활동자료

제조업 및 건설업 부문의 활동자료는 「에너지수급통계(에너지경제연구원)」의 연료 소비량을 활용하였다.

3.2.4.3 시계열 일관성

전 시계열에 걸쳐 「에너지수급통계(에너지경제연구원)」를 활동자료로 사용하였으며 에너지산업(1.A.1.) 부문과 동일한 배출계수 및 방법론을 적용하여 산정하였다.

3.2.4.4 QA/QC

QA/QC는 제1장 서론 1.5절 내용과 동일하다.

3.2.4.5 재계산

제조업 및 건설업 부문의 활동자료인 「에너지수급통계(에너지경제연구원)」의 개정(2025.10월)으로 인해 전 시계열의 배출량을 재계산하였다. 또한 연료전지용 수소 생산을 위한 도시가스 개질 과정에서 발생하는 CO₂ 배출량을 신규 산정하여 자가발전용 연료전지 배출량이 추가되었다.

3.2.4.6 개선계획

기타화석연료의 대부분은 비재생 도시폐기물이기 때문에 폐기물 관리 및 통계 작성, 국가 고유 배출계수 개발 담당 기관 등 여러 유관 기관과 협의하여 국가 고유 배출계수 개발 가능성에 대해 검토할 계획이다.

28) 휘발유 25 CH₄ kg/TJ, 8 N₂O kg/TJ, 경유 3.9 CH₄·N₂O kg/TJ, 프로판·부탄 62 CH₄ kg/TJ, 0.2 N₂O kg/TJ

3.2.5 수송(1.A.3.)

3.2.5.1 배출원 개요

수송 부문의 세부 배출원은 국내항공(1.A.3.a.), 도로수송(1.A.3.b.), 철도(1.A.3.c.), 국내해운(1.A.3.d.), 기타수송(1.A.3.e.)으로 구분된다. 국제 수송에 사용된 연료 연소에 의한 온실가스 배출량은 국가 배출량에 포함하지 않고 메모 항목으로 보고하였으며, 산정 방법론 등 세부 내용은 별도로 작성하였다(3.2.2 국제병커링 참고).

수송 부문의 2023년 배출량은 97,826 천톤 CO₂-eq로 전년 대비 0.8% 감소하였다. 부문별로는 도로수송이 94,414 천톤 CO₂-eq로 수송 부문의 대부분인 96.5%를 차지하였다. 국내항공은 1,772 천톤 CO₂-eq로 1.8%, 국내해운 1,383 천톤 CO₂-eq, 1.4%, 철도 183 천톤 CO₂-eq, 0.2%, 기타수송 74 천톤 CO₂-eq, 0.1%의 순이다.

2023년 배출량은 1990년 대비 168.0% 증가했는데 이는 경제 성장에 따른 자동차 보급 확대, 화물 수송량 증가, 항공 수요 증가로 도로수송과 국내항공의 배출량이 증가했기 때문이다.



| 그림 3-8 | 수송 부문 온실가스 배출량(1990-2023)

| 표 3-22 | 수송 부문 온실가스 배출량(1990-2023)

(단위: 천톤 CO₂-eq)

구분	1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023
1.A.3.a. 국내항공	866	1,479	1,210	1,713	1,970	1,868	1,772
1.A.3.b. 도로수송	31,718	66,270	82,207	95,307	96,011	95,093	94,414
1.A.3.c. 철도	974	1,077	618	320	238	200	183
1.A.3.d. 국내해운	2,481	2,795	2,305	1,038	1,299	1,395	1,383
1.A.3.e. 기타수송	464	300	393	505	93	70	74
합계	36,502	71,921	86,734	98,882	99,611	98,626	97,826

3.2.5.2 국내항공(1.A.3.a.)

3.2.5.2.1 배출원 개요

	산정 온실가스	방법론	배출계수	활동자료
2023년 기준	CO ₂	Tier 1(일반항공기)	CS	연료 소비량
		Tier 2(민간항공기)	CS(연료), D(이착륙)	연료 소비량, 이착륙 횟수
	CH ₄ , N ₂ O	Tier 1(일반항공기)	D	연료 소비량
		Tier 2(민간항공기)		연료 소비량, 이착륙 횟수

국내항공 부문은 출발지와 도착지가 모두 동일 국가의 영토(영해 포함) 내에 위치한 항공편의 연료 사용에 따른 온실가스 배출을 의미하며 한 국가에서 출발하여 다른 국가로 도착하는 항공 운항을 의미하는 국제항공과 구분된다(3.2.1장 참조). 국내항공 부문은 민간항공기(국내 항공운송 사업용 여객기, 화물 수송기)와 일반항공기(소형 항공운송 사업용, 항공기 사용 사업용, 국가기관 등의 항공기와 헬리콥터)로 분류된다.

2023년 국내항공 부문의 배출량은 전년 대비 5.1% 감소한 1,772 천톤 CO₂-eq로, 수송 부문 배출량의 1.8%를 차지하고 있다. 세부적으로는 민간항공기가 1,738 천톤 CO₂-eq로 대부분(98.1%)이며, 일반항공기는 33 천톤 CO₂-eq(1.9%)를 배출하였다. 1990년 배출량과 비교하여 104.7% 증가하였는데, 이는 경제 성장에 따라 국내 여행 및 항공 운송이 증가하였기 때문이다.

| 표 3-23 | 국내항공 부문 온실가스 배출량(1990-2023)

(단위: 천톤 CO₂-eq)

구분	1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023
일반항공기	13	16	32	38	43	59	33
민간항공기	852	1,464	1,179	1,675	1,927	1,809	1,738
합계	866	1,479	1,210	1,713	1,970	1,868	1,772

3.2.5.2.2 방법론

1) 산정방법

국내항공 부문의 온실가스 산정 방법은 Tier 1과 Tier 2로 구분된다. 일반항공 부문에서는 Tier 1 방법론에 따라 항공기의 총 연료 사용량에 기반하여 배출량을 산정한다. 민간항공 부문은 Tier 2 방법론에 따라 항공기의 이착륙(Landing and Take-off, LTO)²⁹⁾과 순항(cruise)³⁰⁾ 단계를 구분하여 배출량을 산정한다. 한편, 2006 IPCC GL에서는 순항 단계의 CH₄ 배출은 극소량으로 배출량이 없는 것으로 추정한다고 명시하고 있다.³¹⁾

29) 항공기의 이륙 이후 지상에서 3,000피트(914미터) 이상의 순항 고도까지의 비행

30) 3,000피트(914미터) 이상의 고도에서 발생하는 항공기의 활동

31) The CH₄ emissions are negligible and are assumed to be zero unless new information becomes available(출처: 2006 IPCC GL, Vol.2, 3.6.1.2)

〈일반항공기의 CO₂ 배출량 산정식〉

$$E = \sum_i [FC_i \times 41.868 \times CF_i \times EF_i \times 44/12 \times 10^{-3}]$$

- E : CO₂ 배출량(천톤 CO₂)
- FC : 연료 사용량(천 TOE)
= 일반항공기 연료 사용량(L) × 1bbl/158.984L × 단위환산계수(TOE/bbl) × 10⁻³
- 41.868 : Joule-TOE 환산계수(TJ/천 TOE)
- CF : 전환계수(순발열량/총발열량)
- EF : 배출계수(t C/TJ)
- 44/12 : 탄소기준 배출량을 이산화탄소 기준으로 전환(kg CO₂/kg C)
- i : 연료 유형

자료: 2006 IPCC GL, Vol.2, Ch.3.6.1.1, Equation 3.6.1

〈일반항공기의 CH₄, N₂O 배출량 산정식〉

$$E_j = \sum_i [FC_i \times 41.868 \times CF_i \times EF_{ij} \times 10^{-6}]$$

- E : 배출량 (천톤 CH₄, 천톤 N₂O)
- FC : 총 연료 사용량(천 TOE)
= 일반항공기 연료 사용량(L) × 1bbl/158.984L × 단위환산계수(TOE/bbl) × 10⁻³
- 41.868 : Joule-TOE 환산계수(TJ/천 TOE)
- CF : 전환계수(순발열량/총발열량)
- EF : 배출계수(kg CH₄/TJ, kg N₂O/TJ)
- i : 연료 유형
- j : 가스 종류 (CH₄, N₂O)

자료: 2006 IPCC GL, Vol.2, Ch.3.6.1.1, Equation 3.6.1

〈민간항공기의 CO₂, CH₄, N₂O 배출량 산정식〉

$$E_i = \sum_j [(LTO_j \times EF_{LTO_{ij}}) + (A_{cruise} \times EF_{cruise_i})], \quad A_{cruise} = \sum_j (A_{total} - A_{LTO})$$

E	: 배출량(kg CO ₂ , kg CH ₄ , kg N ₂ O)
LTO	: 이착륙 횟수(Landing & take-off)
EF _{LTO}	: LTO 배출계수(kg/LTO)
A _{cruise}	: 순항에 따른 연료 사용량(t)
EF _{cruise}	: 순항 배출계수(kg/t)
A _{total}	: 이착륙과 순항에 따른 총 연료 사용량(kL)
0.7950	제트용 등유 밀도(t/kL) (자동차안전연구원, 2012년 한국자동차공학회)
CF	전환계수(순발열량/총발열량)
A _{LTO}	LTO에 소비된 연료 사용량(t/LTO)
i	: 가스 종류(CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O)
j	: 기종

자료: 2006 IPCC GL, Vol.2, Ch.3.6.1.1, Equation 3.6.2, 3.6.3, 3.6.4, 3.6.5

2) 배출계수

일반항공기의 CO₂ 배출계수는 에너지산업(1.A.1.) 부문과 동일하다. CH₄와 N₂O 배출계수는 전 시계열에 2006 IPCC GL의 기본 배출계수를 적용하여 산정하였다(표 3-24).

민간항공기의 배출계수는 이착륙과 순항 단계로 구분된다. 이착륙 단계는 2006 IPCC GL의 기종별 기본 배출계수를 적용하였으며(표 3-26), 2006 IPCC GL에 제시되지 않는 기종은 전문가 판단에 따라 엔진 종류와 추력(thrust)이 유사한 기종의 배출계수를 적용하였다.

순항 단계의 CO₂ 배출계수는 국가 고유 배출계수를 kg/t 단위로 환산하여 적용하였으며 국가 고유 배출계수가 개발되지 않은 연도(1990-2006년)는 2006 IPCC GL 기본 배출계수를 적용하였다. N₂O는 전 시계열에 2006 IPCC GL의 기본 배출계수를 단위 환산하여 산정하였다.

표 3-24 | 일반항공기의 배출계수

연료	CO ₂ (t C/TJ)					CH ₄ (kg/TJ)	N ₂ O (kg/TJ)
	1990-2006	2007-2011	2012-2016	2017-2021	2022-		
항공용 휘발유	18.9	19.7	20.0	19.548	19.731	0.5	2.0
항공유(제트류)	19.5	19.6	19.8	19.931	19.956		

주: 국가 고유 배출계수

자료: 국가 고유 배출계수, 2006 IPCC GL

표 3-25 | 민간항공기의 순항 시 배출계수

구분	CO ₂ (kg/t)					CH ₄ (kg/t)	N ₂ O (kg/t)
	1990-2006	2007-2011	2012-2016	2017-2021	2022-		
순항	3,068.0	3,100.7	3,114.0	3,116.3	3,129.4	0	0.1

주: 는 국가 고유 배출계수(단위 tC/TJ)를 kg/t 단위로 환산한 값임.

자료: 국가 고유 배출계수, 2006 IPCC GL

표 3-26 | 민간항공기의 기종별 LTO당 배출계수와 연료 사용량

기종	배출계수(kg/LTO)			연료 사용량 (kg/LTO)
	CO ₂ ¹⁾	CH ₄ ²⁾	N ₂ O	
A300	5,450	0.12	0.20	1,720
A320	2,440	0.06	0.10	770
A321	3,020	0.14	0.10	960
A330-200/300	7,050	0.13	0.20	2,230
A340-500/600	10,600	0.01	0.30	3,370
727-200	4,610	0.81	0.10	1,460
737-300/400/500	2,480	0.08	0.10	780
737-600	2,280	0.10	0.10	720
737-700	2,460	0.09	0.10	780
737-800/900	2,780	0.07	0.10	880
747-200	11,370	1.82	0.40	3,600
747-300	11,080	0.27	0.40	3,510
747-400	10,240	0.22	0.30	3,240
747-100	10,140	4.84	0.30	3,210
767-300	5,610	0.12	0.20	1,780
777-200/300	8,100	0.07	0.30	2,560
DC-10	7,290	0.24	0.20	2,310
DHC8-100	640	0.00	0.02	200
Fokker100/70/28	2,390	0.14	0.10	760
Gulfstream IV	2,160	0.14	0.10	680
MD-11	7,290	0.24	0.20	2,310

주: 1) 연료 1kg 사용 시 3.16kg의 CO₂가 생성된다는 기준으로, 10kg에서 반올림

2) 이착륙 과정에서 CH₄ 배출량은 총 VOC 배출량의 10%로 가정

자료: 2006 IPCC GL

3) 활동자료

국내항공 부문에서는 항공유 소비량(일반·민간항공기)과 기종별 이착륙 횟수(민간항공기)를 활용하였다. 이는 국토교통부의 항공운송업체 등록 현황을 기반으로 한국교통안전공단에서 매년 조사하고 있다. 다만, 일반항공기 연료 사용량은 2009년부터 조사가 시작되어 자료가 부재한 연도(1990-2008년)에 대해 관계자 및 전문가 의견을 종합하여 활동자료를 추정하였다(표 3-27).

2023년 국내 항공의 연료 소비량은 703.8 백만 리터로 전년 대비 5.1% 감소하였다. 민간항공기의 이착륙 횟수 또한 203 천 회로 전년 대비 7.3% 감소하였다.

| 표 3-27 | 1990-2008년 일반항공기 연료 소비량 추정방법

$$\begin{aligned} \text{일반항공기 등록대수} &= \text{항공기 등록대수}^{1)} - \text{민간항공기(국적 항공사) 등록대수}^{2)} \\ \text{일반항공기 연료소비량} &= \text{연도별 원단위(kL/대)}^{3)} \times \text{연도별 일반항공기 등록대수} \\ \text{연료 종류별 일반항공기 연료소비량} &= \text{일반항공기 연료소비량(1990-2008)} \times \text{연료별 비중}^{4)} \end{aligned}$$

- 주: 1) 자료: 국토교통부 조사자료
 2) 자료: 한국항공진흥협회 및 한국교통안전공단 조사자료
 3) 원단위 연평균(2009-2013) 증감률(-2.5%)을 적용하여 1990년부터 2008년까지 원단위 추정
 4) 2009-2013년 일반항공기 연료별(JET A-1, JP-8, 항공용 휘발유) 소비량의 평균 비중 적용

| 표 3-28 | 국내항공 부문 활동자료 수집방법(1990-2023)

기간	활동자료	통계명	관리기관	대상 가스
1990-2023	일반항공기 연료 소비량	항공운송업체 연료소비량 현황조사	한국교통안전공단	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O
	민간항공기 연료 소비량			
	민간항공기 이착륙 횟수			

| 표 3-29 | 국내항공 부문 연료별 소비량과 이착륙 횟수(1990-2023)

(단위: 연료 소비량 백만 L, 이착륙 횟수 천 LTO)

구분		1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023
제트용 등유	민간	341.6	586.8	470.1	666.7	767.4	718.2	690.4
	일반	5.1	6.0	12.0	13.5	15.8	21.9	11.7
항공용 휘발유		0.4	0.5	0.7	1.8	1.6	1.8	1.8
연료 소비량 합계		347.1	593.2	482.8	682.0	784.8	741.9	703.8
이착륙 횟수		86.1	166.3	148.7	196.3	210.8	218.7	202.8

- 주: 음영 부분은 추정치임(1990-2008).
 자료: 「항공운송업체 연료소비량 현황조사(한국교통안전공단, 2025)」

3.2.5.2.3 시계열 일관성

국내항공 부문의 온실가스 배출량 산정 시, 활동자료는 전 시계열에 걸쳐 항공운송업체로부터 조사한 자료를 사용하고, 동일한 산정방법을 적용했다. 다만 일반항공기의 경우 1990-2008년의 활동자료가 부재하여 관계자·전문가 판단에 따라 추정한 값을 사용하였다. CO₂ 배출계수는 2007년부터 국가 고유 배출계수를 적용하였으며 국가 고유 배출계수가 개발되지 않은 기간에 대해서는 IPCC GL 기본 배출계수를 적용하였다. CO₂(이착륙), CH₄, N₂O는 전 시계열에 대해 IPCC GL 기본 배출계수를 적용하였다.

3.2.5.2.4 QA/QC

QA/QC는 제1장 서론 1.5절 내용과 동일하다.

3.2.5.2.5 재계산

민간항공기의 배출량 산정방법론 개선(열량 환산계수 제외)으로 전 시계열의 배출량을 재계산하였다. 또한, 민간항공기의 탄소배출계수 적용 기준을 변경(1996 → 2006 IPCC GL)하면서 1990-2006년 배출량을 재계산하였다.

3.2.5.3 도로수송(1.A.3.b.)

3.2.5.3.1 배출원 개요

2023년 기준	산정 온실가스	방법론	배출계수	활동자료
	CO ₂	Tier 2, OTH(요소수)	CS	연료 소비량
	CH ₄ , N ₂ O	Tier 1	D, OTH	

도로수송 부문은 승용차, 소형트럭, 중형트럭, 버스, 오토바이 등 도로 운송수단의 연료 연소 활동으로 발생하는 온실가스(CO₂, CH₄, N₂O) 배출량을 포함한다. 국내 활동자료인 「석유류수급통계(한국석유공사)」의 경우 차종별 구분없이 연료별 소비량으로 발표되고 있다. 따라서 국가 통계에서는 모든 차종을 ‘승용차’ 항목(1.A.3.b.i)에 일괄 산정·보고하고, 소형·중형트럭, 버스, 오토바이 항목에는 승용차에 포함(IE)으로 작성하였다.

도로수송의 2023년 배출량은 전년 대비 0.7% 감소한 94,414 천톤 CO₂-eq로 수송 부문 배출량의 대부분인 96.5%를 차지하고 있다. 1990년 배출량과 비교하면 197.7% 증가하였는데, 산업화 및 도시화로 인해 자동차 등록대수, 주행거리가 증가하고 화물 수송량이 증가하였기 때문이다.

표 3-30 | 도로수송 부문 온실가스 배출량(1990-2023)

(단위: 천톤 CO₂-eq)

구분	1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023
도로수송	31,718	66,270	82,207	95,307	96,011	95,093	94,414

3.2.5.3.2 방법론

1) 산정방법

에너지산업(1.A.1.) 부문의 산정 방법과 동일하다.³²⁾

32) [CO₂] 1990-2006년 Tier 1, 2007년부터 Tier 2 방법론으로 산정, [non-CO₂] Tier 1 방법론으로 산정

〈도로수송 부문 CO₂ 배출량 산정식〉

$$E = \sum_i [FC_i \times 41.868 \times CF_i \times EF_i \times 44/12 \times 10^{-3}]$$

- E : CO₂ 배출량(천톤 CO₂)
 FC : 연료 사용량(천 TOE)
 41.868 : Joule-TOE 환산계수(TJ/천 TOE)
 CF : 전환계수(순발열량/총발열량)
 EF : 배출계수(t C/TJ)
 44/12 : 탄소기준 배출량을 이산화탄소 기준으로 전환(kg CO₂/kg C)
 i : 연료 유형

자료: 2006 IPCC GL, Vol.2, Ch.3.2.1.1, Equation 3.2.1

〈도로수송 부문 CH₄, N₂O 배출량 산정식〉

$$E_j = \sum_i [FC_i \times 41.868 \times CF_i \times EF_{ij} \times 10^{-6}]$$

- E : 배출량(천톤 CH₄, 천톤 N₂O)
 FC : 총 연료 사용량(천 TOE)
 41.868 : Joule-TOE 환산계수(TJ/천 TOE)
 CF : 전환계수(순발열량/총발열량)
 EF : 배출계수(kg CH₄/TJ, kg N₂O/TJ)
 i : 연료 유형
 j : 온실가스 종류(CH₄, N₂O)

자료: 2006 IPCC GL, Vol.2, Ch.3.2.1.1, Equation 3.2.3

요소 촉매 변환기의 사용으로 인한 CO₂ 배출량에 대해서는 2006 IPCC GL에서 제시하는 방법론을 적용하였다.

〈요소 촉매 변환기의 CO₂ 배출량 산정식〉

$$E = AD \times 12/60 \times Purity \times 44/12$$

- E : CO₂ 배출량(kt CO₂)
 AD : 촉매 변환기에 사용한 요소첨가제의 양(kt)
 12/60 : 요소에서 탄소로의 화학양론적 변환 값
 Purity : 요소첨가제 내 요소의 질량비율(%), 32.5%
 44/12 : 탄소기준 배출량을 이산화탄소 기준으로 전환(kt CO₂/kt C)

자료: 2006 IPCC GL, Vol.2, Ch.3.2.1.1, Equation 3.2.2

2) 배출계수

도로수송 부문의 탄소배출계수는 에너지산업(1.A.1.) 부문과 동일하며, non-CO₂ 배출계수는 2006 IPCC GL 도로수송의 기본 배출계수를 적용하였다. 도시가스(LNG)는 2006 IPCC GL 도로수송의 기본 배출계수에 프로판(LPG), 천연가스(LNG)의 혼합률을 반영한 값을 사용하였다(표 3-32).

표 3-31 | 도로수송 부문 CH₄, N₂O 배출계수

(단위: kg/TJ)

연료	CH ₄	N ₂ O
천연가스(LNG)	92	3.0
휘발유	25	8.0
경유	3.9	3.9
LPG	62	0.2

주: 1) 경질중유(B-A), 중유(B-B), 중질중유(B-C), 등유, 그 외 석유제품(윤활유, 부생연료유, 기타석유제품 등)은 휘발유의 배출계수를 준용
2) 바이오경유는 경유의 배출계수를 준용

자료: 2006 IPCC GL

표 3-32 | 도시가스(LNG) 배출계수

(단위: t C/TJ, kg/TJ)

구분	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001
CO ₂	15.3	15.3	15.3	15.3	15.3	15.3	15.3	15.3	15.3	15.3	15.3	15.3
CH ₄	92	92	92	92	92	92	92	92	92	92	92	91.644
N ₂ O	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2.967
구분	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
CO ₂	15.3	15.3	15.3	15.3	15.3	15.4	15.4	15.4	15.4	15.4	15.3	15.3
CH ₄	91.694	91.848	91.852	91.866	91.923	91.919	91.609	91.729	91.446	91.269	91.255	91.875
N ₂ O	2.971	2.986	2.986	2.988	2.993	2.992	2.963	2.975	2.948	2.932	2.930	2.988
구분	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023		
CO ₂	15.3	15.3	15.3	15.272	15.272	15.272	15.272	15.272	15.236	15.236		
CH ₄	91.982	91.978	91.971	91.963	91.856	91.957	91.925	91.726	91.615	91.676		
N ₂ O	2.998	2.998	2.997	2.997	2.987	2.996	2.993	2.974	2.964	2.970		

주: 1) CO₂(t C/TJ)는 1990-2006년까지 기본 배출계수에 투입연료 혼합비율을 반영한 값, 2007년부터는 국가 고유 배출계수 적용

2) CH₄, N₂O(kg/TJ)는 기본 배출계수에 투입연료 혼합비율을 반영한 값으로, 실제 계산시 소수점 절사없이 원수치를 적용

자료: 「에너지수급통계(에너지경제연구원, 2025)」, 2006 IPCC GL, 국가 고유 배출계수(온실가스종합정보센터, 2012, 2013, 2018, 2021년 공표)

3) 활동자료

도로수송 부문의 활동자료는 석유류 연료, 도시가스, 바이오경유, 요소수, 윤활유 소비량이 있다. 석유류 연료 소비량은 「석유류수급통계(한국석유공사)」, 도시가스, 바이오경유 소비량은 「에너지수급통계(에너지경제연구원)」, 요소수, 윤활유 판매량은 조사자료를 사용하였다. 「석유류수급통계(한국석유공사)」에서는 도로여객운수업, 도로화물운수업, 기타여객육상운수업의 연료 소비량을 사용하였으며, 「에너지수급통계(에너지경제연구원)」에서는 도로 에너지 사용량 자료를 활용하였다. 2023년 총 연료 소비량은 33,457.8 천 TOE로 전년 대비 0.7% 감소하였다.³³⁾

표 3-33 | 도로수송 부문 활동자료 수집방법(1990-2023)

기간	활동자료	통계명	관리기관	대상가스
1990-2023	석유류 소비량	석유류수급통계	한국석유공사	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O
	도시가스, 바이오경유 소비량	에너지수급통계	에너지경제연구원	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O
	요소수 소비량	요소수 통계	기후에너지환경부 교통환경과	CO ₂
	윤활유(2 Cycle) 판매량	윤활유 산업자료	한국윤활유공업협회	CO ₂

33) 요소수의 활동자료는 물량 단위이며, TOE 단위로 환산할 열량 기준이 없어 소비량 합계에서 제외

| 표 3-34 | 도로수송 부문 연료별 소비량(1990-2023)

(단위: 천 TOE, 요소수 kt)

구분	1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023
휘발유	2,899.1	7,859.6	8,419.0	9,501.3	10,329.4	10,687.9	10,934.4
경유	6,958.3	12,122.8	14,133.2	18,908.0	19,030.1	18,320.7	17,993.8
프로판, 부탄(LPG)	1,215.9	3,437.0	5,297.3	3,674.6	3,041.6	2,987.8	2,843.4
그 외 연료	33.3	11.9	32.6	5.9	2.6	2.2	1.9
도시가스(LNG)	NO	NO	1,111.7	1,238.2	1,059.6	1,025.5	987.8
바이오경유	NO	NO	357.3	685.8	703.9	681.6	696.4
연료 소비량 합계	11,106.7	23,431.3	29,351.1	34,013.8	34,167.3	33,705.7	33,457.8
요소수	NO	NO	9.2	183.1	289.6	273.0	360.0

주: 1) 그 외 연료에는 등유, 경질중유(B-A), 중유(B-B), 중질중유(B-C), 부생연료유, 윤활유 등이 포함됨.
2) 요소수의 단위는 물량(kt)이며, 국가고시, IPCC GL 등에서 발열량을 미제공하여 열량 단위로 변환이 불가. 따라서 연료 소비량 합계(TOE 단위)에서 제외하였고, CRT의 활동자료(TJ 단위)에는 NA(Not Applicable)로 보고
자료: 「2023 석유류수급통계(한국석유공사, 2024)」, 「에너지수급통계(에너지경제연구원, 2025)」, 윤활유 산업자료(한국윤활유공업협회, 2024), 요소수 통계 조사자료(기후에너지환경부, 2024)

3.2.5.3.3 시계열 일관성

도로수송 부문은 에너지산업(1.A.1.)과 동일한 산정방법론 및 탄소배출계수를 적용하였다. Non-CO₂ 배출계수는 2006 IPCC GL 도로수송의 기본 배출계수를 적용하였다. 활동자료의 경우 석유류 제품은 「석유류수급통계(한국석유공사)」, 도시가스와 바이오경유는 「에너지수급통계(에너지경제연구원)」, 요소수와 윤활유는 조사자료를 전 시계열에 대해 일관되게 사용하였다.

3.2.5.3.4 QA/QC

QA/QC는 제1장 서론 1.5절 내용과 동일하다.

3.2.5.3.5 재계산

재계산은 수행하지 않았다.

3.2.5.4 철도(1.A.3.c.)

3.2.5.4.1 배출원 개요

2023년 기준	산정 온실가스	방법론	배출계수	활동자료
	CO ₂	Tier 2	CS	연료 소비량
	CH ₄ , N ₂ O	Tier 1	D	

철도 부문은 일반적으로 동력 형태에 따라 디젤, 전기, 증기로 구분되며, 화석연료의 직접 연소에 따른 온실가스(CO₂, CH₄, N₂O) 배출량을 산정한다. 디젤기관차와 디젤동차는 전동기에 필요한 전기를 생산하기 위하여 교류 또는 직류 발전기로 조합된 디젤엔진을 사용한다. 전기기관차와 전기동차는 발전소에서 생산된 전력을 공급받고 이에 따른 배출량은 에너지산업 부문에 포함된다. 증기 기관차는 현재 관광용 등 국한된 용도로만 사용되고 있다.

2023년 철도 부문의 배출량은 전년 대비 8.6% 감소한 183 천톤 CO₂-eq로 나타났다. 1990년 배출량과 비교하면 81.3% 감소하였는데, 전기기관차, 전기동차의 확산에 따라 디젤기관차와 디젤동차의 점유율이 낮아지면서 배출량이 지속적으로 감소하였기 때문이다.

표 3-35 | 철도 부문 온실가스 배출량(1990-2023)

(단위: 천톤 CO₂-eq)

구분	1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023
철도	974	1,077	618	320	238	200	183

3.2.5.4.2 방법론

1) 산정방법

에너지산업(1.A.1.) 부문의 산정 방법과 동일하다.

2) 배출계수

철도 부문에서는 에너지산업(1.A.1.) 부문과 동일한 탄소배출계수를 적용하여 산정하였다. Non-CO₂는 2006 IPCC GL 철도의 기본 배출계수를 적용하였다.

표 3-36 | 철도 부문 CH₄, N₂O 배출계수

(단위: kg/TJ)

연료	CH ₄	N ₂ O
경유	4.15	28.6

주: 휘발유, 중유(B-A, B-B, B-C), 등유, 프로판, 부탄, 기타석유제품은 경유의 배출계수를 준용
자료: 2006 IPCC GL

3) 활동자료

철도 부문의 활동자료는 「석유류수급통계(한국석유공사)」 중 철도운수업에 사용된 연료 소비량을 이용하였다. 2023년 연료 소비량은 57.4 천 TOE로 전년 대비 8.6% 감소하였다.

표 3-37 | 철도 부문 활동자료 수집방법(1990-2023)

기간	활동자료	통계명	관리기관	대상가스
1990-2023	석유류 소비량	석유류수급통계	한국석유공사	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O

표 3-38 | 철도 부문 연료별 소비량(1990-2023)

(단위: 천 TOE)

구분	1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023
경유	299.4	335.2	194.7	100.7	75.0	62.8	57.4
그 외 연료	4.8	1.6	0.4	0.01	0.04	0.01	0.01
합계	304.2	336.8	195.1	100.7	75.0	62.8	57.4

주 : 그 외 연료에는 휘발유, 등유, 중유(B-B), 중질중유(B-C), 프로판, 부탄 등이 포함

자료: 「2023 석유류수급통계(한국석유공사, 2024)」

3.2.5.4.3 시계열 일관성

철도 부문은 에너지산업(1.A.1.) 부문과 동일한 산정방법론 및 탄소배출계수를 적용하였고, non-CO₂ 배출계수는 2006 IPCC GL 철도의 기본 배출계수를 적용하여 산정하였다. 활동자료는 전 시계열 「석유류수급통계(한국석유공사)」를 적용하였다.

3.2.5.4.4 QA/QC

QA/QC는 제1장 서론 1.5절 내용과 동일하다.

3.2.5.4.5 재계산

재계산은 수행하지 않았다.

3.2.5.5 국내해운(1.A.3.d.)

3.2.5.5.1 배출원 개요

2023년 기준	산정 온실가스	방법론	배출계수	활동자료
	CO ₂	Tier 2	CS	연료 소비량
	CH ₄ , N ₂ O	Tier 1	D	

국내해운 부문은 출발지와 도착지가 모두 동일 국가의 영토(영해 포함) 내에 위치한 해운 수송의 연료 사용에 따른 온실가스 배출을 의미하며 한 국가에서 출발하여 다른 국가로 도착하는 해운 수송을 의미하는 국제수송과 구분된다(3.2.1장 참조). 국내해운 부문에서는 어선을 제외한 연안 여객선, 연안 화물선, 휴양용 선박, 호버크래프트, 수중익선 등 국내 해운 수송에 의한 온실가스 배출량(CO₂, CH₄, N₂O)을 포함한다.

2023년 배출량은 연안 운송 물동량 감소(-5.4%³⁴⁾) 등의 영향으로 전년 대비 0.9% 감소한 1,383 천톤 CO₂-eq로 나타났다. 1990년과 대비하면 44.2% 감소하였는데, 이는 선박의 대형화, 기술 발전에 따른 단위 화물당 운송 효율의 개선 등에 기인하였다.

| 표 3-39 | 국내해운 부문 온실가스 배출량(1990-2023) (단위: 천톤 CO₂-eq)

구분	1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023
국내해운	2,481	2,795	2,305	1,038	1,299	1,395	1,383

3.2.5.5.2 방법론

1) 산정방법

에너지산업(1.A.1.) 부문의 산정 방법과 동일하다.

2) 배출계수

국내해운 부문에서는 에너지산업(1.A.1.) 부문과 동일한 탄소배출계수를 적용하였고, non-CO₂는 2006 IPCC GL 해운의 기본 배출계수를 적용하여 산정하였다. 단, 기본 배출계수가 제시되지 않은 LPG(프로판, 부탄)와 LNG의 non-CO₂ 배출계수는 국내 전문가 자문 결과에 따라 연료의 특성을 반영하여 도로수송 부문의 2006 IPCC GL 기본 배출계수를 적용하였다.

| 표 3-40 | 국내해운 부문 CH₄, N₂O 배출계수 (단위: kg/TJ)

연료	CH ₄	N ₂ O
중유 ¹⁾	7	2.0
프로판, 부탄(LPG) ²⁾	62	0.2
천연가스(LNG) ²⁾	92	3.0

주: 1) 휘발유, 경유, 부생유 등은 중유 값을 준용
2) LPG(프로판, 부탄)와 LNG(천연가스) 배출계수는 도로수송 부문 기본 배출계수를 준용
자료: 2006 IPCC GL

34) 출처 : 2024 해양수산 통계연보(해양수산부, 2024)

3) 활동자료

국내해운 부문의 석유류의 활동자료는 「석유류수급통계(한국석유공사)」 중 내국적연안 및 내륙항로 수송업, 수상운수보조서비스업의 연료 소비량을 이용하였다. 수상운수보조서비스업은 해상터미널 시설운영업, 수로 안내업, 선박 청소업, 선박 구난업 등 항만 내 육상 활동이 주를 이루어 기타수송(1.A.3.e.)으로 분류해야 한다. 다만, 연료 소비량 분석 결과, 육상에서 거의 소비되지 않는 B-C유가 수상운수보조서비스업 전체 연료 소비량의 약 55.0%를 차지(2023년 기준)하고 있는 것으로 나타났다. 따라서 항만화물하역장비, 예인선 등과 같은 선박에 의한 운송 활동이 주를 이루는 것으로 판단하여 국내해운에 산정·보고하였다.

LNG 소비량은 국내 선박의 LNG 공급량에 대한 사업장 조사자료를 이용하였다. LNG는 연안선 운행 및 시운전 용도로 사용된다. 국내해운 부문에서는 연안선 운행 용도의 LNG 소비량을 산정하고, 시운전은 선박 건조 단계 중 일부로 제조업 및 건설업 부문의 기타(1.A.2.g.)에서 산정한다.

2023년 국내해운의 연료 소비량은 461.1 천 TOE로 전년 대비 1.0% 감소하였다.

표 3-41 | 국내해운 부문 활동자료 수집방법(1990-2023)

기간	활동자료	통계명	관리기관	대상가스
1990-2023	석유류 소비량	석유류수급통계	한국석유공사	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O
	연안선박 LNG 공급량	선박 LNG 공급량	LNG 공급사	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O

표 3-42 | 국내해운 부문 연료별 소비량(1990-2023)

(단위: 천 TOE)

구분	1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023
경유	222.1	360.2	209.7	151.1	183.2	195.3	184.4
B-A유	49.5	98.6	109.1	88.4	77.4	56.7	57.5
B-B유	27.1	29.9	24.5	27.5	2.3	3.2	2.6
B-C유	517.8	435.1	427.5	65.9	160.1	204.1	214.1
그 외 연료	0.3	3.8	0.4	14.1	6.4	6.6	2.6
합계	816.8	927.7	771.2	347.0	429.4	465.9	461.1

주: 그 외 연료에는 휘발유, 부생연료유, 프로판, 부탄, LNG(천연가스) 등이 포함됨.

자료: 「2023 석유류수급통계(한국석유공사, 2024)」, 선박 LNG 공급량(선박추진용 LNG 공급사, 2025)

3.2.5.5.3 시계열 일관성

국내해운 부문은 에너지산업(1.A.1.) 부문과 동일한 산정방법론과 탄소배출계수를 적용하여 산정하였다. Non-CO₂ 배출계수는 2006 IPCC GL 해운의 기본 배출계수를 적용하였으나, 기본 배출계수가 제시되지 않은 LPG, LNG는 도로수송 부문의 기본 배출계수를 준용하였다. 활동자료는 「석유류수급통계(한국석유공사)」를 사용하였으며 LNG는 사업장 조사자료를 사용하였다.

3.2.5.5.4 QA/QC

QA/QC는 제1장 서론 1.5절 내용과 동일하다.

3.2.5.5.5 재계산

재계산은 수행하지 않았다.

3.2.5.6 기타수송(1.A.3.e.)

3.2.5.6.1 배출원 개요

2023년 기준	산정 온실가스	방법론	배출계수	활동자료
	CO ₂	Tier 2	CS	연료 소비량
	CH ₄ , N ₂ O	Tier 1	D	

기타수송 부문은 파이프라인 수송, 공항 내 지상 운송수단, 터미널·유료도로·주차장 등의 운영을 위한 보조 운송수단과 같이 다른 배출원에 포함되지 않은 비도로 수송에 의한 온실가스 배출량(CO₂, CH₄, N₂O)을 포함한다.

2023년 기타수송 부문의 배출량은 전년 대비 6.5% 증가한 74 천톤 CO₂-eq이다. 1990년 배출량과 비교하면 84.0% 감소하였다.

| 표 3-43 | 기타수송 부문 온실가스 배출량(1990-2023)

(단위: 천톤 CO₂-eq)

구분	1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023
기타수송	464	300	393	505	93	70	74

3.2.5.6.2 방법론

1) 산정방법

에너지산업(1.A.1.) 부문의 산정 방법과 동일하다.

2) 배출계수

기타수송 부문의 배출계수는 에너지산업(1.A.1.) 부문과 동일하게 탄소배출계수를 적용하였다. Non-CO₂의 경우 도로수송의 2006 IPCC GL 기본 배출계수를 준용하였다.

| 표 3-44 | 기타수송 부문 CH₄, N₂O 배출계수

(단위: kg/TJ)

연료	CH ₄	N ₂ O
천연가스(LNG)	92	3.0
휘발유, 중유, 등유	25	8.0
경유	3.9	3.9
프로판, 부탄(LPG)	62	0.2

주 : 중유에는 경질중유(B-A), 중유(B-B), 중질중유(B-C)가 포함됨.

자료: 2006 IPCC GL

3) 활동자료

기타수송 부문의 활동자료는 「석유류수급통계(한국석유공사)」의 연료 소비량을 이용하였다. 단, 항공 관련 업종에서 소비된 항공유(제트용 등유, 항공용 휘발유)는 국내항공(1.A.3.a.) 및 국제항공(1.D.1.) 부문과의 중복 산정을 방지하고자 기타수송에서 제외하고 국내·국제항공에서 산정하였다.³⁵⁾ 2023년 기타수송의 연료 소비량은 25.4 천 TOE로 전년 대비 6.5% 증가하였다.

| 표 3-45 | 기타수송 부문 활동자료 수집방법(1990-2023)

기간	활동자료	통계명	관리기관	대상가스
1990-2023	석유류 소비량	석유류수급통계	한국석유공사	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O

| 표 3-46 | 기타수송 부문 연료별 소비량(1990-2023)

(단위: 천 TOE)

구분	1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023
휘발유	38.2	26.5	66.5	126.5	10.9	7.8	7.6
경유	66.7	67.6	46.4	44.0	18.8	14.2	16.7
그 외 연료	51.1	9.1	21.2	3.0	2.2	1.8	1.1
합계	156.1	103.2	134.1	173.5	31.8	23.8	25.4

주: 그 외 연료에는 등유, 중유, 부생연료유, 프로판, 부탄 등이 포함됨.

자료: 「2023 석유류수급통계(한국석유공사, 2024)」

3.2.5.6.3 시계열 일관성

기타수송 부문은 에너지산업(1.A.1.) 부문과 동일한 산정방법과 탄소배출계수를 적용하였고, non-CO₂는 도로수송의 2006 IPCC GL 기본 배출계수를 준용하였다. 활동자료는 전 시계열 「석유류 수급통계(한국석유공사)」를 활용하여 산정하였다.

3.2.5.6.4 QA/QC

QA/QC는 제1장 서론 1.5절 내용과 동일하다.

35) 기타수송 부문의 항공유 구분

석유류수급통계 항목	비항공유	항공유
파이프라인운송업, 육상운수보조서비스업	포함	포함
항공운수보조서비스업, 내국적내항공운수업		불포함(국내항공 부문에서 산정)
내국적외항공운수업, 외국적항공운수업		불포함(국제항공 부문에서 산정)

3.2.5.6.5 재계산

재계산은 수행하지 않았다.

3.2.6 기타(1.A.4.)

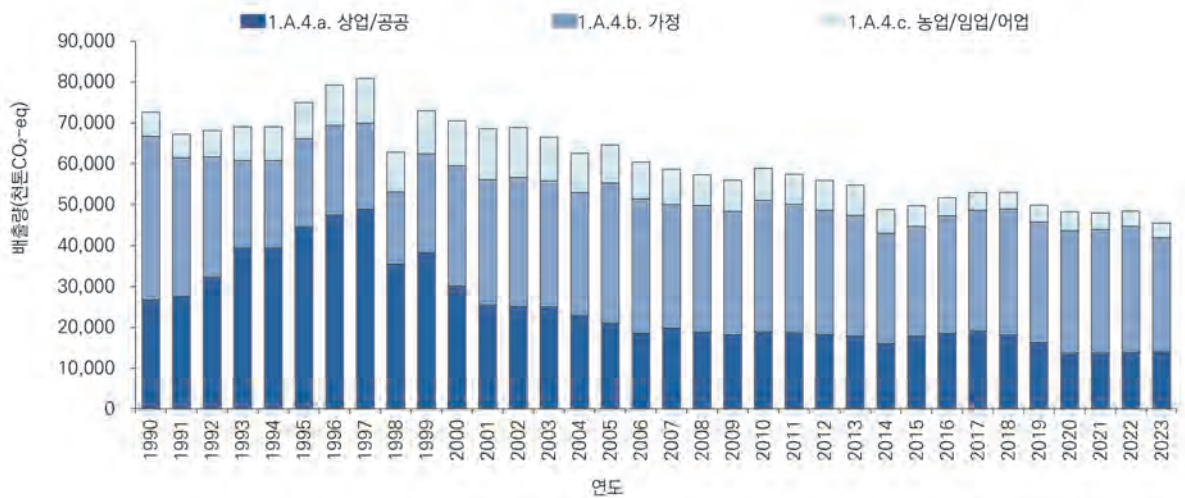
3.2.6.1 배출원 개요

2023년 기준	산정 온실가스	방법론	배출계수	활동자료
	CO ₂	Tier 1, 2	D, CS	연료 소비량
	CH ₄ , N ₂ O	Tier 1	D, OTH	

기타 부문은 상업/공공(1.A.4.a.), 가정(1.A.4.b.), 농업/임업/어업(1.A.4.c.)으로 구성된다. 상업/공공은 상업·공공 건물의 연료연소, 가정은 가사 활동의 연료연소, 농업/임업/어업은 농업, 임업, 원·근해 어업에서 연료 사용에 따른 온실가스 배출량(CO₂, CH₄, N₂O)이 포함된다. 상업/공공 부문과 가정 부문은 고정형, 비도로 차량 및 기타 기계로 구분되며, 농업/임업/어업 부문은 고정형, 비도로 차량 및 기타 기계, 어업으로 구분된다. 국내 통계에서는 비도로 차량 및 기타 기계의 연료 소비량이 분리되지 않아 모두 고정형에 포함하였다(IE).

2023년 기타 부문의 배출량은 45,503 천톤 CO₂-eq로 전년 대비 6.1% 감소하였다. 세부 부문별로 살펴보면 가정이 27,843 천톤 CO₂-eq로 전체 배출량의 61.2%를 차지하였다. 상업/공공은 13,988 천톤 CO₂-eq, 30.7%, 농업/임업/어업 3,761 천톤 CO₂-eq, 8.1%에 해당하였다.

2023년 배출량은 1990년 대비 37.4% 감소하였다, 1997년 최대인 80,863 천톤 CO₂-eq를 배출한 이후 감소세를 보이고 있는데, 특히 상업/공공의 등유, 경유, B-C유, 프로판 소비가 배출계수가 낮은 도시가스나 직접배출이 없는 전기, 열로 대체되면서 배출량이 감소한 영향이 크다. 가정에서는 1990년대 초반 연탄 등의 고형연료 소비가 도시가스로 대체되며 배출량이 감소하는 추세였으나, 2000년대 부터 도시가스 소비가 지속 증가하여 비슷한 수준에서 등락을 거듭하고 있다. 농업/임업/어업의 배출량은 2001년 최고치를 기록한 이후 꾸준히 감소하고 있다.



| 그림 3-9 | 기타 부문 온실가스 배출량(1990-2023)

| 표 3-47 | 기타 부문 온실가스 배출량(1990-2023)

(단위: 천톤 CO₂-eq)

구분	1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023
상업/공공	26,807	30,135	18,899	18,100	13,644	13,946	13,988
가정	39,883	29,358	32,161	30,804	30,245	30,746	27,843
농업/임업/어업	5,952	11,046	7,861	4,108	4,109	3,767	3,671
합계	72,641	70,540	58,921	53,012	47,999	48,458	45,503

3.2.6.2 방법론

3.2.6.2.1 산정방법

에너지산업(1.A.1.) 부문의 산정 방법과 동일하다.

3.2.6.2.2 배출계수

기타 부문의 탄소배출계수는 에너지산업(1.A.1.) 부문과 동일하며,³⁶⁾ CH₄, N₂O 배출계수는 2006 IPCC GL의 기본 배출계수를 적용하였다.

농림업에서 휘발유, 경유, 프로판 중 일부는 이동 목적으로 사용된다. 따라서 「에너지총조사(산업통상자원부)³⁷⁾의 고정형/수송/비도로 차량 및 기타 기계용 소비 비중을 각각 2006 IPCC GL의 고정연소(농림업), 도로수송, 비도로(농림업) 부문의 non-CO₂ 기본 배출계수에 적용하였다. 비도로 차량 및 기타 기계용 기본 배출계수가 없는 프로판은 「2019 EMEP/EEA 대기오염물질 인벤토리 가이드북³⁸⁾의 non-CO₂ 기본 배출계수를 적용하였다.

36) 1990년부터 2006년까지는 2006 IPCC GL의 기본 배출계수, 2007년 이후는 2006 IPCC GL 기본 배출계수 및 국가 고유 배출계수 사용

37) 동력자원부(1990), 상공자원부(1993), 통상산업부(1996), 산업자원부(1999, 2002, 2005), 지식경제부(2008, 2011), 산업통상자원부(2014, 2017, 2020, 2023)

38) EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2019(EMEP/EEA, 2019)

| 표 3-48 | 기타 부문 CH₄, N₂O 배출계수

(단위: kg/TJ)

구분	연료		CH ₄	N ₂ O	
상업/공공	석탄		10	1.5	
	석유		10	0.6	
	가스 ¹⁾		5	0.1	
	폐기물	도시폐기물	300	4	
		산업폐기물			
	바이오매스	고체 바이오매스	300	4	
		액체 바이오매스	10	0.6	
		기체 바이오매스	5	0.1	
가정/농업/임업/어업 (고정연소)	석탄		300	1.5	
	석유		10	0.6	
	가스		5	0.1	
	폐기물	도시폐기물	300	4	
		산업폐기물			
	바이오매스	고체 바이오매스	300	4	
		액체 바이오매스	10	0.6	
		기체 바이오매스	5	0.1	
농업/임업 (비도로 차량 및 기타기계)	석유	휘발유 ²⁾	4행정	80	2
			2행정	140	0.4
		경유		4.15	28.6
		프로판 ³⁾		7.6	3.5
	어업 (이동연소)	석유 일부 ⁴⁾ (휘발유, Jet A-1, 경유, B-A유, B-B유, B-C유)		7	2

주: 1) 석유 기반 가스(정제가스, 프로판, 부탄 등)와 석탄 기반 가스(코크스로그, 고로가스 등)는 가스의 배출계수를 적용

2) 휘발유의 4행정 기관 및 2행정 기관 기계의 비중을 알 수 없기에 두 기계의 평균값을 사용

3) EMEP/EEA 가이드북의 배출계수 단위는 g/tonnes fuel이기에 프로판 순발열량 기준 열량환산계수(46.3MJ/kg, 2017년 개정)를 적용해 단위 환산

4) 해당 유종을 제외한 석유(프로판, 부탄, 등유, 부생연료 1호, 부생연료 2호 등)는 고정연소 배출계수 적용

자료: 2006 IPCC GL, EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2019(EMEP/EEA, 2019)

1) 농업/임업의 휘발유, 경유, 프로판 CH₄ 및 N₂O 배출계수

농업/임업은 고정형, 비도로 차량 및 기타 기계, 어업(이동형)으로 구분된다. 하지만 농업/임업의 활동자료인 「에너지수급통계(에너지경제연구원)」의 농림업 연료 소비량에는 건물, 설비 등 고정형 연소 뿐만 아니라 비도로 차량·기타 기계와 같은 이동 목적의 소비량도 포함한다. 이를 구분하기 위해 연료·용도별 소비량을 파악할 수 있는 「에너지총조사(산업통상자원부)」³⁹⁾를 활용하였다.

농기계용 소비 비중이 높은 휘발유, 경유, 프로판을 비도로 차량 및 기타 기계에서 소비되는 연료로 판단하고, 해당 연료의 농림업 전체 소비량에서 수송 및 농기계용 비중을 구하였다. 「에너지총조사(산업통상자원부)」가 미시행된 연도에는 이 비중을 내삽하였고, 조사 실시 이전인 1990-1994년에는

39) 동력자원부(1990), 상공자원부(1993), 통상산업부(1996), 산업자원부(1999, 2002, 2005), 지식경제부(2008, 2011), 산업통상자원부(2014, 2017, 2020, 2023)

이후 4년 동안의 비중 평균을 적용하였다. 또한 최신 조사 연도인 2022년 이후에는 2022년의 비중을 일괄 적용하였다.

한편, 2011년부터는 경유의 용도별 소비량에서 수송용을 구분하지 않고, 농업기계용, 건물용, 장비·설비로만 발표하고 있다. 이에 따라 직전 3개 연도(2011년의 경우 2002년, 2005년, 2008년)의 수송용과 농기계용 소비 간 비중의 평균을 농기계용 소비량에 적용하여 수송용 소비량을 구분하였다.

그 외 프로판은 2002년에만 유일하게 수송용 소비량이 보고되어 시계열 일관성을 위하여 전 연도에 수송용 소비는 없는 것으로 간주하였다. 또한 2008년의 농기계용 소비량 비중이 이전 및 이후 연도와 큰 차이를 보여, 2005년과 2011년의 비중을 평균하여 2008년의 농기계용 소비 비중으로 적용하였다.

3.2.6.2.3 활동자료

기타 부문의 주요 활동자료는 상업/공공, 가정, 농림업은 「에너지수급통계(에너지경제연구원)」이고, 어업은 「석유류수급통계(한국석유공사)」이다. 공공과 어업의 경우, 두 통계를 함께 활용하여 배출량 산정의 정확성을 보완하였다. 2023년 기타 부문의 연료 소비량은 20,735.1 천 TOE로 전년 대비 5.3% 감소하였다.

표 3-49 기타 부문 활동자료 수집방법(1990-2023)

기간	활동자료	통계명	관리기관	대상가스
1990-2023	연료 소비량 (상업/공공, 가정, 농림어업)	에너지수급통계	에너지경제연구원	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O
	석유제품 소비량 (공공, 어업)	석유류수급통계	한국석유공사	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O

표 3-50 기타 부문 연료 소비량(1990-2023)

(단위: 천 TOE)

구분	1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023
상업/공공	9,467.9	11,498.7	8,447.6	8,246.2	6,597.1	6,660.8	6,773.0
가정	9,686.3	11,954.8	13,664.8	13,598.6	13,515.7	13,816.8	12,530.4
농업/임업/어업	1,890.9	3,676.3	2,563.9	1,944.2	1,487.1	1,419.4	1,431.8
합계	21,045.2	27,129.8	24,676.3	23,788.9	21,600.0	21,896.9	20,735.1

자료: 「에너지수급통계(에너지경제연구원, 2025)」, 「2023 석유류수급통계(한국석유공사, 2024)」

1) 공공 부문

공공 부문의 기본 활동자료는 「에너지수급통계(에너지경제연구원)」의 공공용 연료 소비량이다. 다만, 해당 통계의 석유류에는 군사용 소비량도 포함되어 있으며, 이는 미분류(1.A.5.) 부문에서 산정한다. 따라서 「에너지수급통계(에너지경제연구원)」에서 「석유류수급통계(한국석유공사)」의 군사용(국방사무, 주한미군 업종) 소비량을 차감하여 활동자료로 사용하였다.

2) 전기 및 열 자가생산자

공공 판매가 아닌 주요 산업활동에 사용할 목적으로 전기·열을 생산하는 자가생산자의 배출량은 자가생산자의 주요 활동이 속한 부문에서 산정·보고하여야 한다. 기타(1.A.4.) 부문에서 자가소비 목적의 연료 소비량을 포함하고 있다.

3) 기타(폐기물 에너지원)

2006 IPCC GL에 따라 폐기물 소각에서 에너지를 회수할 경우 해당 배출량(CO_2 , CH_4 , N_2O)을 에너지 분야에서 산정·보고하여야 한다. 국내 통계에서는 자원회수시설을 통한 에너지 생산 목적으로 소비된 도시폐기물 배출량과 산업폐기물(시멘트킬른보조연료) 배출량은 에너지 분야에서 산정·보고하였다. 그 외 산업폐기물을 활용한 자원회수시설 정보에 대해서는 국가 통계 공표를 위한 조사가 진행 중이다. 해당 통계가 공표되면 시계열 자료에 대한 전문가 검토를 거쳐 에너지 회수 소각 배출량은 에너지 분야에서 산정할 계획이며, 공표 이전까지는 폐기물 분야에서 에너지 회수/미회수 소각에 대한 배출량을 모두 산정한다. 이를 통하여 폐기물 소각으로 인한 배출량이 에너지-폐기물 분야 간 이중 산정되는 상황을 예방하고 산정 결과의 일관성을 확보하고 있다.

4) 어업 부문

어업 부문의 활동자료는 「석유류수급통계(한국석유공사)」 중 연근해어업, 원양어업, 달리 분류되지 않는 어업의 연료 소비량이다. 다만 1990-1993년의 경우, 통계의 정확성이 낮은 것으로 확인되어 다음과 같이 추정하였다. 먼저 통계의 신뢰성이 높고 추세변동의 폭이 작은 기간인 1994-1997년을 기준으로 「석유류수급통계(한국석유공사)」의 농림어업 대비 어업 소비량의 연료별 평균 비중을 산출하였다. 그리고 해당 값을 「에너지수급통계(에너지경제연구원)」의 1990-1993년 농림어업 연료별 소비량에 적용하여 어업의 연료별 소비량을 도출하였다.

3.2.6.3 시계열 일관성

기타 부문은 에너지산업(1.A.1.) 부문과 동일한 산정방법론과 탄소배출계수를 적용하였다. CH_4 및 N_2O 배출계수의 경우 일부 연료는 전 시계열에 대해 2006 IPCC GL의 기본 배출계수에 수송용 소비 비중을 반영하였다. 「에너지수급통계(에너지경제연구원)」를 주요 활동자료로 사용하였으며 어업 및 공공 부문은 「에너지수급통계(에너지경제연구원)」과 「석유류수급통계(한국석유공사)」자료를 함께 사용하였다.

3.2.6.4 QA/QC

QA/QC는 제1장 서론 1.5절 내용과 동일하다.

3.2.6.5 재계산

기타 부문의 주요 활동자료인 「에너지수급통계(에너지경제연구원)」의 개정(2025.10월)으로 인해 전 시계열의 배출량을 재계산하였다. 또한 연료전지용 수소 생산을 위한 도시가스 개질 과정에서 발생하는 CO₂ 배출량을 신규 산정하여 자가발전용 연료전지 배출량이 추가되었다.

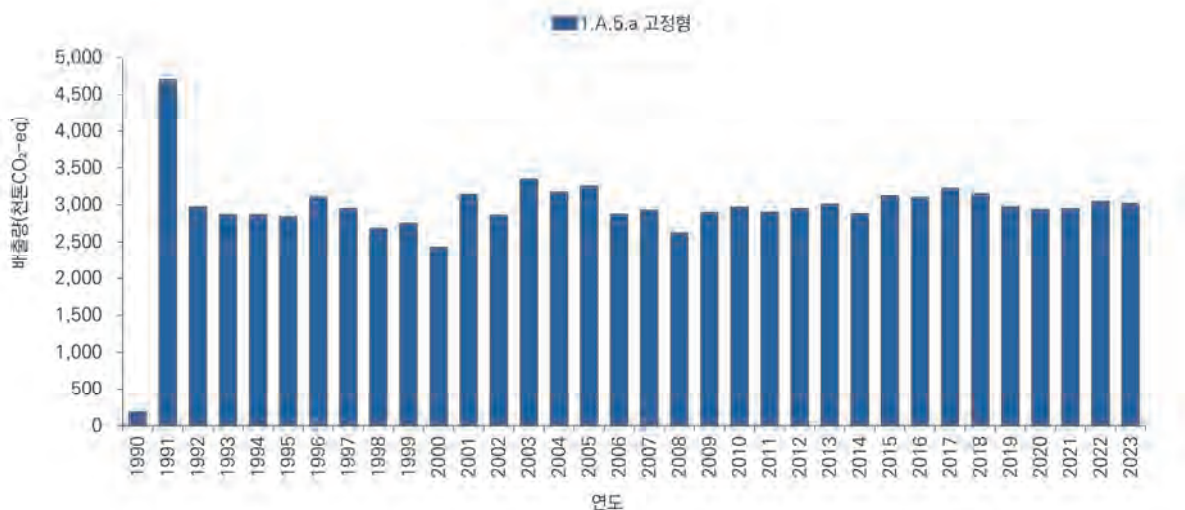
3.2.7 미분류 부문(1.A.5.)

3.2.7.1 배출원 개요

2023년 기준	산정 온실가스	방법론	배출계수	활동자료
	CO ₂	Tier 1, 2	D, CS	연료 소비량
	CH ₄ , N ₂ O	Tier 1	D	

미분류(1.A.5.) 부문은 특정 부문으로 분류가 어려운 연료연소 관련 배출원과 군사용 연료 소비의 온실가스 배출(CO₂, CH₄, N₂O)을 포함하며, 세부적으로는 고정형(1.A.5.a.)과 이동형(1.A.5.b.)으로 구분된다. 고정형은 다른 부문(1.A.1.-1.A.4.)에 명시되지 않은 고정 배출원에서의 연료 사용으로 인한 배출이고, 이동형은 다른 부문(1.A.1.-1.A.4.)에 명시되지 않은 도로·수상·항공 운송수단, 기타 기계류 등 이동 배출원에서 발생하는 배출이다. 국내 통계에서는 이동형의 연료 소비량이 분리되지 않아 고정형에 포함하였다(IE).

2023년 미분류 부문의 배출량은 3,022 천톤 CO₂-eq로 전년 대비 0.8% 감소하였다. 1992년부터 2023년까지 뚜렷한 추세를 보이지는 않고 약 2,427 천톤 - 3,347 천톤 CO₂-eq 사이에서 보합세를 보인다.



| 그림 3-10 | 미분류 부문 온실가스 배출량(1990-2023)

| 표 3-51 | 미분류 부문 온실가스 배출량(1990-2023)

(단위: 천톤 CO₂-eq)

구분	1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023
고정형	183	2,427	2,970	3,148	2,950	3,046	3,022

3.2.7.2 방법론

3.2.7.2.1 산정방법

에너지산업(1.A.1.) 부문의 산정 방법과 동일하다.

3.2.7.2.2 배출계수

미분류 부문의 CO₂ 배출계수는 에너지산업(1.A.1.) 부문과 동일한 기준을 적용하였다.⁴⁰⁾ Non-CO₂ 배출계수는 기타 부문 중 상업/공공(1.A.4.a.)의 2006 IPCC GL 기본 배출계수를 준용하였다.

3.2.7.2.3 활동자료

미분류 부문의 활동자료는 「석유류수급통계(한국석유공사)」 중 국방사무 및 주한미군 업종의 연료 소비량을 활용하였다. 2023년 미분류 부문의 연료 소비량은 1,049.5 천 TOE로 전년 대비 0.9% 감소하였다.

| 표 3-52 | 미분류 부문 연도별 활동자료 수집방법(1990-2023)

기간	활동자료	통계명	관리기관	대상가스
1990-2023	석유제품 소비량	석유류수급통계	한국석유공사	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O

| 표 3-53 | 미분류 부문 연료 소비량(1990-2023)

(단위: 천 TOE)

구분	1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023
액체연료	62.9	848.4	1,041.2	1,097.0	1,028.0	1,058.6	1,049.5
합계	62.9	848.4	1,041.2	1,097.0	1,028.0	1,058.6	1,049.5

자료: 「2023 석유류수급통계(한국석유공사, 2024)」

3.2.7.3 시계열 일관성

미분류 부문은 에너지산업(1.A.1.) 부문과 동일한 산정방법론과 탄소배출계수를 적용하였으며, Non-CO₂ 배출계수는 기타 부문 중 상업/공공(1.A.4.a.)의 2006 IPCC GL 기본 배출계수를 준용하였다. 활동자료는 전 시계열 「석유류수급통계(한국석유공사)」를 일관되게 사용하였다.

40) [1990-2006년] 2006 IPCC 지침 기본 배출계수, [2007년 이후] 2006 IPCC 지침 기본 배출계수 및 국가 고유 배출계수

3.2.7.4 QA/QC

QA/QC는 제1장 서론 1.5절 내용과 동일하다.

3.2.7.5 재계산

재계산은 수행하지 않았다.

3.3 탈루(1.B.)

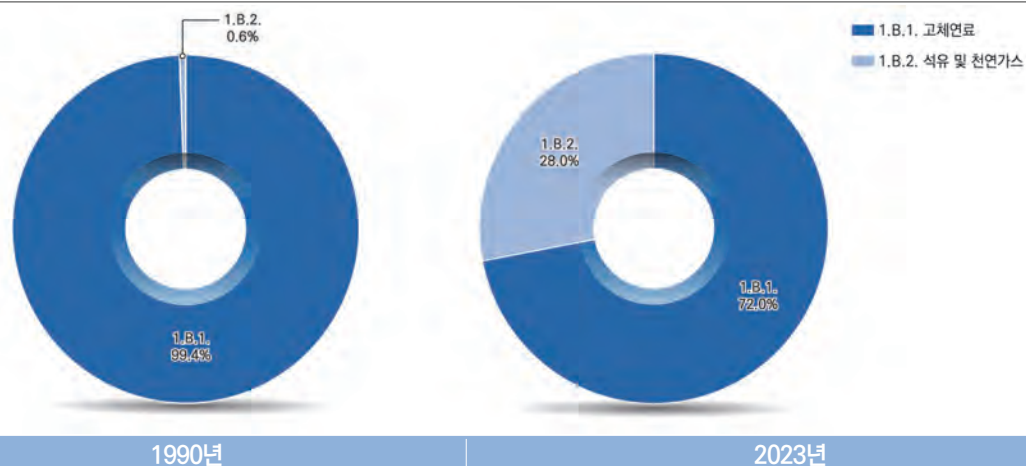
탈루 부문은 석탄, 석유, 천연가스 등의 화석연료를 채광·생산, 처리·정제, 저장, 최종 소비자에게 유통하는 과정에서 의도적 또는 비의도적으로 배출되는 온실가스(CO₂, CH₄, N₂O)를 포함하며 세부 배출원은 고체연료(1.B.1.)와 석유 및 천연가스(1.B.2.)이다.

2023년 탈루 부문의 배출량은 3,242 천톤 CO₂-eq로 전년 대비 4.7% 감소하였으며, 에너지 분야 배출량의 0.6%에 해당한다. 하위 부문의 비중은 고체연료 72.0%, 석유 및 천연가스 28.0% 순으로 나타났다.

1990년 배출량 대비 70.5% 감소하였으며, 이는 석탄 생산량 감소와 지하폐광 탈루 배출의 감소에 기인한다. 다만 천연가스와 도시가스 소비가 확대되면서 석유 및 천연가스 부문의 배출량은 2012년까지 꾸준히 증가하였고 이후 등락을 반복하고 있다.



| 그림 3-11 | 탈루 부문 온실가스 배출량(1990-2023)



| 그림 3-12 | 탈루 부문 세부 부문별 배출 비중 (1990-2023)

| 표 3-54 | 에너지 분야 탈루 부문 온실가스 배출량(1990-2023)

(단위: 천톤 CO₂-eq)

구분	1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023
1.B.1. 고체연료	10,931	5,215	3,552	2,704	2,484	2,426	2,334
1.B.2. 석유 및 천연가스	63	493	857	984	937	975	908
합계	10,994	5,708	4,409	3,688	3,420	3,402	3,242

3.3.1 고체연료(1.B.1.)

3.3.1.1 배출원 개요

2023년 기준	부문	산정 온실가스	방법론	배출계수	활동자료
	채광 활동/ 채광 후 활동	CO ₂ , CH ₄	Tier 1	D	연료 생산량
	폐광	CH ₄	Tier 1	D	폐광 개수

고체연료 부문은 석탄 채광 및 처리(1.B.1.a.)와 연료 전환(1.B.1.b.)으로 구분되며 국내에서는 석탄 채광 및 처리에 대해서만 배출량을 산정하였다. 연료전환은 2006 IPCC GL에서 산정방법론이 제공되지 않아 미산정하였다(Not Applicable, 이하 “NA”).

석탄 채광 및 처리(1.B.1.a.)는 석탄의 채광, 처리, 저장, 이송 과정에서 의도적 또는 비의도적으로 배출되는 CO₂, CH₄와 폐광에서 배출되는 CH₄를 포함한다. 이는 다시 지하탄광(1.B.1.a.i.)과 노천탄광(1.B.1.a.ii.)으로 세분화되지만, 국내에 노천탄광은 존재하지 않아(Not Occurring, 이하 “NO”) 지하탄광만 포함하였다.

석탄 채광 시 석탄과 주변 지층이 분쇄되면서 갇혀있던 지층가스가 배출되며, 탈기(ventilation) 및 가스 제거 시스템을 통해 이를 배출시킨다. 채광된 석탄이 지표로 보내져 처리·저장·운송되는 과정에서도 온실가스는 지속 배출된다. 탄광의 경우 폐쇄된 후에도 침수되어 CH₄ 배출이 완전히 차단되기 전까지는 CH₄를 지속 배출한다. 또한 폐광이 봉쇄되었더라도 자연적 또는 인위적인 통로를 통해 CH₄는 여전히 대기 중으로 배출될 수 있다.

2023년 고체연료 부문의 배출량은 2,334 천톤 CO₂-eq로 전년 대비 3.8% 감소하였으며, 탈루 배출량의 72.0%를 차지하고 있다. 1990년 배출량과 비교하면 78.6% 낮아졌는데, 이는 국내 석탄 생산량이 지속적으로 감소하고 있기 때문이다.



| 그림 3-13 | 고체연료 부문 온실가스 배출량(1990-2023)

| 표 3-55 | 고체연료 부문 온실가스 배출량(1990-2023)

(단위: 천톤 CO₂-eq)

구분	1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023
채광 활동	6,001	1,446	726	419	313	286	225
채광 후 활동	807	195	98	56	42	38	30
폐광	4,123	3,574	2,728	2,229	2,129	2,102	2,079
합계	10,931	5,215	3,552	2,704	2,484	2,426	2,334

3.3.1.2 방법론

3.3.1.2.1 산정방법

석탄 채광 활동으로 CO₂와 CH₄가 발생하며 채광 이후에는 CH₄가 발생한다. 2006 IPCC GL(CH₄) 및 2019 Refinement(CO₂)의 Tier 1 방법론에 따라 국내 석탄 생산량에 배출계수, 전환계수(밀도)를 곱하여 산정하였다.

〈채광 활동의 CO₂, CH₄ 및 채광 이후 활동의 CH₄ 배출량 산정식〉

$$E_{i,j} = A_{Coal} \times EF_{i,j} \times CF_j$$

$E_{i,j}$: 배출원 i 의 온실가스 j 배출량 (kt CO₂, kt CH₄)

A_{Coal} : 국내 석탄 생산량(Mt)

$EF_{i,j}$: 배출원 i 의 온실가스 j 배출계수 (m³ CO₂/t, m³ CH₄/t)

CF_j : 온실가스 j 밀도 (kt CO₂/10⁶m³ CO₂, kt CH₄/10⁶m³ CH₄)

i : 배출원(채광, 채광 이후)

j : 온실가스(채광-CO₂, CH₄; 채광 이후-CH₄)

자료 : [CH₄] 2006 IPCC GL, Vol.2, Ch.4.1.3, Equation 4.1.3 및 4.1.4, [CO₂] 2019 Refinement, Vol.2, Ch.4.1.3.2, Equation 4.1.3A

지하 폐광에서는 CH₄가 발생하며, 2006 IPCC GL의 Tier 1 방법론을 적용하여 산정하였다. 지하 폐광 부문의 배출계수는 각 탄광이 폐쇄된 시점부터 인벤토리 산정연도까지 경과한 시간에 따라 점차 감소한다. 따라서 탄광이 폐쇄된 기간별로 구분하고 각 기간별 폐광으로부터 각 인벤토리 산정연도에 배출된 온실가스를 산정한 후 이를 합산한다.

지하 폐광에서의 CH₄ 배출량을 산정하는데 필요한 활동자료 산정을 위해 침수되지 않은 폐광 개수에 가스 배출이 많았던(gassy) 탄광의 비중을 곱하여 유의미한 탈루 배출이 일어나는 지하 폐광의 개수를 구해야 한다. 하지만 폐광별 자료의 부재로 보수적 산정 측면에서 모든 폐광이 침수되지 않은 것으로 가정하였고, 2018년 기준의 가스 배출이 많은(gassy) 탄광의 비중(80.0%)⁴¹⁾을 전 시계열에 일괄 적용하였다.

〈지하 폐광 CH₄ 배출량 산정식〉

$$E_t = \sum_{i=1}^t \text{폐광 수}_i \times \text{가스가 많은 탄광 비중}_i \times EF_{i,t} \times CF$$

E_t	: t 연도 침수되지 않은 폐쇄된 지하탄광의 CH ₄ 배출량(kt CH ₄)
폐광 수	: i 기간 폐쇄된 침수되지 않은 지하탄광 수(개)
가스가 많은 탄광 비중 _{i}	: i 기간 폐쇄된 지하탄광 중 가스가 많은 탄광의 비중
$EF_{i,t}$	: i 기간 폐쇄된 지하탄광의 t 연도 배출계수(10 ⁶ m ³ CH ₄ /개)
CF	: CH ₄ 의 밀도(kt CH ₄ /10 ⁶ m ³ CH ₄)
i	: 지하탄광이 폐쇄된 연도

자료 : 2006 IPCC GL, Vol.2, Ch.4.1.5.1, Equation 4.1.10

3.3.1.2.2 배출계수

채광 및 채광 이후 활동 부문의 배출량 산정 시에는 2006 IPCC GL(CH₄) 및 2019 Refinement(CO₂)의 기본 배출계수를 적용하였다(표 3-56). 지하 폐광 부문의 경우, 탄광의 폐쇄 시기와 통계 산정연도에 따라 배출계수가 다르며 2019 Refinement에서 제시한 기본 배출계수를 활용하였다(표 3-57). IPCC GL에서 배출계수 단위는 부피(m³)로 제시되었기 때문에 전환계수(밀도)를 곱하여 조정하였다.

표 3-56 | 고체연료 부문 CO₂, CH₄ 배출계수 및 밀도

구분	배출원	배출계수(m ³ /t)		밀도(kt/10 ⁶ m ³)	
		CO ₂	CH ₄	CO ₂	CH ₄
고체연료 (석탄 채광 및 처리 - 지하 탄광)	채광	5.9	18.0	1.84	0.67
	채광 이후	-	2.5		
	지하 폐광	-	표 3-57		

자료: 2006 IPCC GL, 2019 Refinement

41) 2006 IPCC GL은 가스 배출이 많은 탄광 비중에 대한 최고·최저값만 제시하고 있고, 각국이 가용한 모든 정보를 고려해 범위 내에서 가스 배출이 많은 탄광 비중을 결정하도록 함(Vol.2 Ch.4 pp.4.23-4.24). 국내 광산안전법 시행령은 배기궤도, 작업장에서의 메탄가스 함유율이 높은 석탄 광산을 감중탄광으로 분류하고 있음. 2018년에 운영 및 폐쇄된 탄광 중 감중탄광 비중을 구하여 전 시계열에 적용함.

| 표 3-57 | 고체연료 부문의 지하 폐광 CH₄ 배출계수

(단위: CH₄ 백만 m³/광산)

폐쇄기간 보고연도	1951-1975	1976-2000	2001-2023	폐쇄기간 보고연도	1951-1975	1976-2000	2001-2023
1990	0.478	1.561	NA	2007	0.373	0.569	1.035
1991	0.469	1.334	NA	2008	0.369	0.555	0.959
1992	0.461	1.183	NA	2009	0.365	0.542	0.896
1993	0.453	1.072	NA	2010	0.361	0.529	0.845
1994	0.446	0.988	NA	2011	0.357	0.518	0.801
1995	0.439	0.921	NA	2012	0.353	0.507	0.763
1996	0.432	0.865	NA	2013	0.35	0.496	0.73
1997	0.425	0.818	NA	2014	0.346	0.487	0.701
1998	0.419	0.778	NA	2015	0.343	0.478	0.675
1999	0.413	0.743	NA	2016	0.34	0.469	0.652
2000	0.408	0.713	NA	2017	0.336	0.439	0.625
2001	0.402	0.686	5.735	2018	0.333	0.432	0.604
2002	0.397	0.661	2.397	2019	0.33	0.425	0.586
2003	0.392	0.639	1.762	2020	0.327	0.419	0.569
2004	0.387	0.62	1.454	2021	0.324	0.413	0.555
2005	0.382	0.601	1.265	2022	0.322	0.408	0.542
2006	0.378	0.585	1.133	2023	0.319	0.402	0.529

자료: 2019 Refinement

3.3.1.2.3 활동자료

채광과 채광 이후 활동 부문의 활동자료는 「에너지수급통계(에너지경제연구원)」의 국내 무연탄 생산량을 활용하였다. 연탄 수요의 감소로 인해 무연탄 생산량은 1990년부터 지속적인 감소세를 보이고 있으며, 2023년 생산량은 전년 대비 21.2% 감소한 645.9 천 톤이었다.

지하 폐광 부문의 활동자료는 한국광해광업공단의 조사자료를 통해 1989년부터 폐쇄된 지하 탄광 수를 수집하였다. 1989년부터 1996년까지 많은 탄광이 폐쇄되었고, 2001년부터 1-2개씩 간헐적으로 폐쇄된 후 가장 최근에는 2018년과 2023년에 각각 1개가 폐쇄되었다.

| 표 3-58 | 고체연료 부문 활동자료 수집방법(1990-2022)

기간	활동자료	통계명	관리기관	대상 가스
1990-2023	국내 석탄 생산량	에너지수급통계	에너지경제연구원	CO ₂ , CH ₄
	연도별 폐광 개수	폐광 개소 자료	한국광해광업공단	

| 표 3-59 | 고체연료 부문 활동자료(1990-2023)

(단위: 천톤)

구분	1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023
무연탄 생산량	17,217.0	4,150.0	2,084.0	1,202.0	898.0	820.0	645.9

3.3.1.3 시계열 일관성

고체연료 부문의 온실가스 배출량 산정 시 전 시계열 동일한 산정방법 및 출처의 활동자료를 활용하였다. 배출계수는 2006 IPCC GL 및 2019 Refinement의 기본 배출계수를 준용하였다.

3.3.1.4 QA/QC

QA/QC는 제1장 서론 1.5절 내용과 동일하다.

3.3.1.5 재계산

재계산은 수행하지 않았다.

3.3.2 석유 및 천연가스(1.B.2.)

3.3.2.1 배출원 개요

석유 및 천연가스 부문은 석유·천연가스의 공급망에서 탈루 배출되는 온실가스(CO_2 , CH_4 , N_2O)를 산정하며, 세부 배출원은 석유(1.B.2.a.), 천연가스(1.B.2.b.), venting 및 flaring(1.B.2.c.)이다. 이는 석유·천연가스 공급망의 활동 유형에 따라 다시 세분화되어 탐사, 생산, 이송, 정제, 분배 등으로 구성된다.

2023년 석유 및 천연가스 부문의 배출량은 전년 대비 6.9% 감소한 908 천톤 $\text{CO}_2\text{-eq}$ 로 탈루 배출량의 28.0%를 차지하고 있다. 1990년 배출량과 비교하면 1,348.5% 증가했는데 이는 천연가스, 도시가스의 소비 확대에 기인하였다.



| 그림 3-14 | 석유 및 천연가스 부문 온실가스 배출량(1990-2023)

| 표 3-60 | 석유 및 천연가스 부문 온실가스 배출량(1990-2023)

(단위: 천톤 CO₂-eq)

구분	1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023
석유	38	108	106	134	116	124	122
천연가스	23	372	697	799	779	813	749
탈기 및 소각	2	13	54	51	41	38	37
합계	63	493	857	984	937	975	908

3.3.2.2 석유(1.B.2.a.)

3.3.2.2.1 배출원 개요

2023년 기준	산정 온실가스	방법론	배출계수	활동자료
	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O	Tier 1	D	연료 생산·수입·투입량

석유 부문에서는 탐사(1.B.2.a.i.), 생산(1.B.2.a.ii.), 이송(1.B.2.a.iii.), 정제(1.B.2.a.iv.), 분배(1.B.2.a.v.) 및 기타(1.B.2.a.vi.)에서 온실가스(CO₂, CH₄, N₂O)가 배출된다. 국내에서는 원유 생산, 국내·수입 원유를 파이프라인, 탱크 트럭으로 정유회사까지 이송하는 과정, 원유 정제 과정의 탈루성 배출을 산정하였다. 탐사 및 정제된 석유제품의 분배에 따른 배출량은 2006 IPCC GL에 배출계수가 제시되지 않아 산정하지 않았으며(NA)⁴²⁾, 기타 배출량은 국내 배출원이 존재하지 않는다(NO).

2023년 석유 부문의 온실가스 배출량은 전년 대비 2.0% 감소한 122 천톤 CO₂-eq로, 탈루 부문의 3.8%를 차지한다.

| 표 3-61 | 석유 부문 온실가스 배출량(1990-2023)

(단위: 천톤 CO₂-eq)

구분	1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023
생산	NO	NO	0.001	0.0005	0.0001	0.00004	NO
이송	7	22	21	27	23	25	24
정제	30	87	85	107	93	100	98
합계	38	108	106	134	116	124	122

3.3.2.2.2 방법론

1) 산정방법

석유 부문은 2006 IPCC GL의 Tier 1 산정방법론에 따라 각 하위 항목별 활동자료에 기본 배출계수를 곱하여 배출량을 산정하였다.

42) 국내에서는 1979년부터 본격인 대륙붕 탐사가 이루어져, 2025년 11월 기준 49공의 탐사 시추를 실시하였음(한국석유공사 홈페이지, https://www.knoc.co.kr/sub03/sub03_1_2.jsp, 접속일: 2025. 12. 23).

〈석유 및 천연가스 부문 배출량 산정식〉

$$E_i = \sum_j [A_j \times EF_{ij}]$$

E_i : 석유·천연가스 부문 온실가스 i 배출량

A_j : 배출원 j 활동자료

EF_{ij} : 배출원 j 의 온실가스 i 배출계수

i : 온실가스 종류 (CO_2 , CH_4 , N_2O)

j : 하위 배출원

자료 : 2006 IPCC GL, Vol.2, Ch.4.2.2.2, Equation 4.2.1

2) 배출계수

석유 부문의 배출계수는 2006 IPCC GL의 기본 배출계수를 이용하였다. 다만, 배출계수의 단위는 부피(천 m^3)이고 활동자료는 질량(천 bbl)이기 때문에, 배출계수에 원유의 부피 환산계수($158.984\text{m}^3/\text{천 bbl}$)를 곱하여 활동자료 단위에 맞게 조정하였다.

| 표 3-62 | 석유 부문 배출계수

CRT 코드	구분	활동	배출가스	수치	단위
1.B.2.a.ii. 생산	일반원유	원유 생산량	CO_2	4.3×10^{-8}	kt $\text{CO}_2/10^3 \text{ m}^3$
			CH_4	5.9×10^{-7}	kt $\text{CH}_4/10^3 \text{ m}^3$
			N_2O	NA	NA
1.B.2.a.iii. 이송	파이프	이송량	CO_2	4.9×10^{-7}	kt $\text{CO}_2/10^3 \text{ m}^3$
			CH_4	5.4×10^{-6}	kt $\text{CH}_4/10^3 \text{ m}^3$
			N_2O	NA	NA
1.B.2.a.iv. 정제	공통	정제량	CO_2	ND	ND
			CH_4	21.8×10^{-6}	kt $\text{CH}_4/10^3 \text{ m}^3$
			N_2O	ND	ND

주: 1) 정제(1.B.2.a.iv.) 항목은 IPCC에 기본 배출계수가 범위로 제시되어 선진국 기준 중간값을 사용

2) ND: Not Determined

자료: 2006 IPCC GL

3) 활동자료

석유 부문에서의 활동자료는 「에너지수급통계(에너지경제연구원)」의 국내 원유 생산량, 원유 수입량, 석유정제 원유 투입량을 활용하였다. 2023년 원유 수입량 및 석유정제 원유 투입량은 전년 대비 각각 2.5%, 1.9% 감소한 1,005,770 천bbl, 1,006,626 천bbl이었다. 원유 생산의 경우 2005년 동해 가스전에서 시작되어 407 천bbl을 생산하였지만, 2022년 생산이 종료되어 2023년 관련 배출량은 발생하지 않았다(NO).

| 표 3-63 | 석유 부문 활동자료 수집방법(1990-2023)

기간	활동자료	통계명	관리기관	대상 가스
1990-2023	원유 생산량	에너지수급통계	에너지경제연구원	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O
	원유 수입량			
	석유정제 원유 투입량			

| 표 3-64 | 석유 부문 활동자료(1990-2023)

(단위: 천 bbl)

구분	1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023
원유 생산량	NO	NO	380	189	36	17	NO
원유 수입량	308,368	893,943	872,415	1,116,281	960,147	1,031,283	1,005,770
석유정제 원유 투입량	312,045	892,224	872,263	1,106,317	961,384	1,026,102	1,006,626

자료: 「에너지수급통계(에너지경제연구원, 2025)」

3.3.2.2.3 시계열 일관성

석유 부문의 온실가스 배출량 산정 시 전 시계열 동일한 산정방법, 배출계수, 통계 출처 자료를 활용하였다.

3.3.2.2.4 QA/QC

QA/QC는 제1장 서론 1.5절 내용과 동일하다.

3.3.2.2.5 재계산

석유 단위 환산계수(m^3/bbl)가 변경됨에 따라 전 시계열의 배출량을 재계산하였다.

3.3.2.3 천연가스(1.B.2.b.)

3.3.2.3.1 배출원 개요

2023년 기준	산정 온실가스	방법론	배출계수	활동자료
	CO ₂ , CH ₄	Tier 1	D	연료 생산·공급량
	CH ₄ (이송 및 저장)	Tier 2	CS	연료 공급량

천연가스 부문에는 천연가스의 탐사(1.B.2.b.i.), 생산(1.B.2.b.ii.), 처리(1.B.2.b.iii.), 이송 및 저장(1.B.2.b.iv.), 분배(1.B.2.b.v.), 기타(1.B.2.b.vi.) 활동에서의 누출로 인한 온실가스 배출량(CO₂, CH₄) 이 포함된다.

생산과 처리 부문은 국내 천연가스 생산 및 처리 과정에서 누출되는 온실가스 배출량을 산정한다. 이송 및 저장 부문은 생산 또는 수입된 천연가스를 소비자들에게 직접 전달하거나 도시가스 업체 등까지

공급하는 과정과 함께 저장 시설에서의 탈루 배출량을 포함한다. 분배 부문은 천연가스가 최종 소비자들에게 분배되는 과정에서의 탈루 배출량을 산정한다. 가스 탐사를 위한 시추 배출량은 2006 IPCC GL에 배출계수가 제시되지 않아 산정하지 않았고(NA)⁴³⁾, 기타 배출량은 국내 배출원이 존재하지 않는다(NO).

2023년 천연가스 부문의 온실가스 배출량은 전년 대비 7.8% 감소한 749 천톤 CO₂-eq로, 탈루 부문의 23.1%를 차지한다. 천연가스 및 도시가스 소비가 확대되면서 2012년까지 배출량이 꾸준히 증가하였으며 이후 등락을 거듭하고 있다.

| 표 3-65 | 천연가스 부문 온실가스 배출량(1990~2023)

(단위: 천톤 CO₂-eq.)

구분	1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023
생산	NO	NO	6	3	0.6	NO	NO
처리	NO	NO	2	1	0.2	NO	NO
이송 및 저장	1	8	17	23	25	24	24
분배	22	364	672	772	753	788	726
합계	23	372	697	799	779	813	749

3.3.2.3.2 방법론

1) 산정방법

천연가스의 이송 및 저장(CH₄) 부문만 2006 IPCC GL의 Tier 2를 적용하고 나머지는 2006 IPCC GL의 Tier 1 산정방법론을 적용하였다.

2) 배출계수

천연가스 이송 및 저장의 CH₄에 대해서만 국가 고유 배출계수를 적용하였고 나머지는 2006 IPCC GL의 기본 배출계수를 적용하였다. 다만 배출계수의 단위는 부피(천 m³)인 반면 활동자료는 질량(천 톤)이기 때문에 천연가스의 부피 환산계수를 적용하여 단위를 조정하였다. 1990년부터 2007년까지는 1,240 Nm³/톤, 2008년부터는 1,254 Nm³/톤이다.⁴⁴⁾

43) 국내에서는 1979년부터 본격인 대륙붕 탐사가 이루어져, 2025년 11월 기준 49공의 탐사 시추를 실시하였음(한국석유공사 홈페이지, https://www.knoc.co.kr/sub03/sub03_1_2.jsp, 접속일: 2025.12.23).

44) 자료: 한국가스공사 홈페이지(<https://www.kogas.or.kr>), 가스 정보>천연가스 정보>LNG 단위환산기, 접속일: 2025. 12. 23

표 3-66 | 천연가스 부문 배출계수

CRT 코드	구분	활동	온실가스	수치	단위
1.B.2.b.ii. 생산	공통	천연가스 생산량	CO ₂	1.4×10^{-5}	kt CO ₂ /10 ⁶ m ³
			CH ₄	3.8×10^{-4}	kt CH ₄ /10 ⁶ m ³
			N ₂ O	NA	NA
1.B.2.b.iii. 처리	기본 가중 합	천연가스 생산량	CO ₂	1.2×10^{-5}	kt CO ₂ /10 ⁶ m ³
			CH ₄	1.5×10^{-4}	kt CH ₄ /10 ⁶ m ³
			N ₂ O	NA	NA
1.B.2.b.iv. 이송 및 저장	이송	천연가스 공급량	CO ₂	8.8×10^{-7}	kt CO ₂ /10 ⁶ m ³
			CH ₄	8.567×10^{-6}	kt CH ₄ /10 ⁶ m ³
			N ₂ O	NA	NA
	저장	천연가스 공급량	CO ₂	1.1×10^{-7}	kt CO ₂ /10 ⁶ m ³
			CH ₄	6.835×10^{-6}	kt CH ₄ /10 ⁶ m ³
1.B.2.b.v. 분배	공통	도시가스 생산량	N ₂ O	ND	ND
			CO ₂	5.1×10^{-5}	kt CO ₂ /10 ⁶ m ³
			CH ₄	1.1×10^{-3}	kt CH ₄ /10 ⁶ m ³

주: 국가 고유 배출계수

- 1) 생산, 처리의 2006 IPCC GL 기본 배출계수는 선진국 기준 기본 배출계수의 하한값임.
- 2) 이송 및 저장의 CH₄ 배출계수는 국가 고유 배출계수임. 국내의 생산·공급기지의 탈루 농도 측정 등을 통해 총 탈루 배출량을 산정한 후, 천연가스 총공급량 등을 적용하여 국가 고유 배출계수로 개발(2017년)
- 3) ND: Not Determined

자료: 2006 IPCC GL, 국가 고유 배출계수(2017년 공표)(온실가스종합정보센터)

3) 활동자료

천연가스 부문의 활동자료는 「에너지수급통계(에너지경제연구원)」에서 천연가스 생산량(1.B.2.b.ii. 생산, 1.B.2.b.iii. 처리), 천연가스 공급량(1.B.2.b.iv. 이송 및 저장), 가스제조에 의한 도시가스 공급량(1.B.2.b.v. 분배)을 사용하였다.

국내에서는 2004년부터 동해 가스전에서 천연가스 생산이 시작되어 2010년 414.8 천 톤의 생산량을 기록하였지만, 이후 점차 감소하여 2021년 생산이 종료되었다. 천연가스 및 도시가스 공급량은 전년 대비 각각 4.0%, 7.9% 감소하였다.

표 3-67 | 천연가스 부문 활동자료 수집방법(1990-2023)

기간	활동자료	통계명	관리기관	대상 가스
1990-2023	천연가스 생산량	에너지수급통계	에너지경제연구원	CO ₂ , CH ₄
	천연가스 공급량			
	도시가스 공급량			

| 표 3-68 | 천연가스 부문 활동자료(1990-2023)

(단위: 천연가스 생산·공급량 천 톤, 도시가스 공급량 10⁶m³)

구분	1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023
천연가스 생산량	NO	NO	414.8	233.9	42.1	NO	NO
천연가스 공급량	2,275.4	15,186.9	32,062.6	42,182.6	45,630.8	45,180.2	43,362.1
도시가스 공급량	707.8	11,796.9	21,787.0	25,011.1	24,422.5	25,542.6	23,524.5

자료: 「에너지수급통계(에너지경제연구원, 2025)」

3.3.2.3.3 시계열 일관성

천연가스 부문의 온실가스 배출량 산정시 전 시계열 동일한 산정방법, 배출계수, 통계 출처자료를 활용하였다.

3.3.2.3.4 QA/QC

QA/QC는 제1장 서론 1.5절 내용과 동일하다.

3.3.2.3.5 재계산

천연가스 부문의 활동자료인 「에너지수급통계(에너지경제연구원)」의 개정(2025.10월)으로 인해 전 시계열의 배출량을 재계산하였다.

3.3.2.6 Venting 및 Flaring(1.B.2.c.)

3.3.2.6.1 배출원 개요

	산정 온실가스	방법론	배출계수	활동자료
2023년 기준	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O	Tier 1	D	연료 생산·공급량
	CH ₄ (천연가스 이송 및 저장)	Tier 2	CS	연료 공급량

탈기 및 소각 부문에는 석유·가스시설에서 생산을 위한 수반가스(associated gas), 폐가스, 천연가스의 venting과 천연가스, 폐가스 등의 flaring에 의해 탈루되는 온실가스(CO₂, CH₄, N₂O) 배출량을 산정한다. 이는 다시 공급망에서의 활동 유형별로 구분되는데, venting(1.B.2.c.i.)은 석유 생산과 천연가스의 처리·이송·저장을 포함하고, flaring(1.B.2.c.ii.)은 석유 생산과 천연가스의 생산·처리를 포함한다.

2023년 배출량은 37 천톤 CO₂-eq로 전년 대비 4.4% 감소하였으며 탈루 부문의 1.1%를 차지한다. 2023년부터 천연가스와 원유 생산이 종료되면서, venting 및 flaring 부문의 배출은 모두 venting에서만 발생하였다. 천연가스, 도시가스 소비 확대 등으로 2013년까지 배출량은 증가세였으며, 등락을 보인 이후 2018년부터는 감소세로 전환되었다.

| 표 3-69 | venting 및 flaring 부문 온실가스 배출량(1990-2023)

(단위: 천톤 CO₂-eq)

구분	1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023
venting	2	13	49	48	41	38	37
flaring	NO	NO	5	3	0.5	0.1	NO
합계	2	13	54	51	41	38	37

3.3.2.6.2 방법론

1) 산정방법

venting 및 flaring 부문은 석유(1.B.2.a.), 천연가스(1.B.2.b.) 부문과 동일한 산정방법론을 적용하였다.⁴⁵⁾

2) 배출계수

천연가스 이송 및 저장의 CH₄에 대해서만 국가 고유 배출계수를 적용하였고, 나머지는 2006 IPCC GL의 기본 배출계수를 적용하였다.

| 표 3-70 | venting 및 flaring 부문 배출계수

CRT 코드	구분	배출원	활동	배출가스	수치	단위
1.B.2.c.i. venting	원유	생산	국내 원유 생산량	CO ₂	9.5×10^{-5}	kt CO ₂ /10 ³ m ³
				CH ₄	7.2×10^{-4}	kt CH ₄ /10 ³ m ³
				N ₂ O	NA	NA
	천연가스	처리 ¹⁾	국내 천연가스 생산량	CO ₂	4.0×10^{-2}	kt CO ₂ /10 ⁶ m ³
				CH ₄	NA	NA
				N ₂ O	NA	NA
		이송	국내 천연가스 공급량	CO ₂	3.1×10^{-6}	kt CO ₂ /10 ⁶ m ³
				CH ₄	2.028×10^{-5}	kt CH ₄ /10 ⁶ m ³
				N ₂ O	NA	NA
		저장	국내 천연가스 공급량	CO ₂	NA	NA
				CH ₄	3.756×10^{-6}	kt CH ₄ /10 ⁶ m ³
				N ₂ O	NA	NA
1.B.2.c.ii. flaring	원유	생산	국내 원유 생산량	CO ₂	4.1×10^{-2}	kt CO ₂ /10 ³ m ³
				CH ₄	2.5×10^{-5}	kt CH ₄ /10 ³ m ³
				N ₂ O	6.4×10^{-7}	kt N ₂ O/10 ³ m ³
	천연가스	생산	국내 천연가스 생산량	CO ₂	1.2×10^{-3}	kt CO ₂ /10 ⁶ m ³
				CH ₄	7.6×10^{-7}	kt CH ₄ /10 ⁶ m ³
				N ₂ O	2.1×10^{-8}	kt N ₂ O/10 ⁶ m ³
		처리 ¹⁾	국내 천연가스 생산량	CO ₂	3.0×10^{-3}	kt CO ₂ /10 ⁶ m ³
				CH ₄	2.0×10^{-6}	kt CH ₄ /10 ⁶ m ³
				N ₂ O	3.3×10^{-8}	kt N ₂ O/10 ⁶ m ³

45) 천연가스 이송 및 저장(CH₄)만 Tier 2, 나머지는 2006 IPCC GL의 Tier 1 방법론을 적용함

주:  국가 고유 배출계수

1) 천연가스 처리의 하위 항목 중 기본 가중 합(Default weighted total)의 배출계수를 적용

자료: 2006 IPCC GL, 국가 고유 배출계수(2017년 공표)(온실가스종합정보센터)

3) 활동자료

Venting 및 flaring 부분의 활동자료는 석유(1.B.2.a.), 천연가스(1.B.2.b.) 부분과 동일하게 「에너지수급통계(에너지경제연구원)」를 사용하였다.

3.3.2.6.3 시계열 일관성

전 시계열에 걸쳐 「에너지수급통계(에너지경제연구원)」를 활동자료로 사용하였고, 2006 IPCC GL의 산정방법론과 동일한 배출계수를 적용하여 배출량을 산정하였다.

3.3.2.6.4 QA/QC

QA/QC는 제1장 서론 1.5절 내용과 동일하다.

3.3.2.6.5 재계산

Venting 및 flaring 부분의 활동자료인 「에너지수급통계(에너지경제연구원)」의 개정(2025.10월)으로 인해 전 시계열의 배출량을 재계산하였다.

3.4 CO₂ 이송 및 저장(1.C.)

3.4.1 배출원 개요

CO₂ 이송 및 저장(1.C.) 부문은 CO₂의 이송(1.C.1.), 주입 및 저장(1.C.2.) 과정에서의 탈루 배출량(CO₂)을 산정한다. 국내에서는 해당 활동이 발생하지 않아 배출량을 산정하지 않았다(NO).

PART



산업공정 및 제품 사용

- 4.1 개요
- 4.2 광물산업(2.A.)
- 4.3 화학산업(2.B.)
- 4.4 금속산업(2.C.)
- 4.5 비에너지 제품 및 용매 사용(2.D.)
- 4.6 전자산업(2.E.)
- 4.7 오존층파괴물질의 대체물질 사용(2.F.)
- 4.8 기타 제품제조 및 소비(2.G.)

제4장

산업공정 및 제품 사용

4.1 개요

산업공정 및 제품 사용 분야(IPPU¹⁾, 이하 산업공정)에서는 제품을 생산하거나 소비하는 과정에서 생성된 물질이 화학적 또는 물리적으로 변환되는 과정과 화석연료의 연소 외 사용 과정에서 배출되는 온실가스를 산정·보고한다²⁾. 산업공정 분야의 하위 배출 부문은 광물산업(2.A.), 화학산업(2.B.), 금속산업(2.C.), 비에너지 제품 및 용매 사용(2.D.), 전자산업(2.E.), 오존층파괴물질의 대체물질 사용(2.F.), 기타 제품 제조 및 사용(2.G.), 기타(2.H.)³⁾ 부문으로 구분된다.

광물산업(2.A.)에서는 광물이 생산 또는 소비되는 과정에서 탄산염의 탈탄산 반응으로 CO₂가 배출되며, 화학산업(2.B.)에서는 화학제품이 생산되는 과정에서 촉매반응이나 생산된 화학제품의 탈루 등으로 CO₂, CH₄, N₂O, HFCs, PFCs, SF₆, NF₃가 배출된다. 금속산업(2.C.)에서는 금속이 생산되는 과정에서 원료 및 환원제, 부식 방지제 등의 소비로 CO₂, CH₄, HFCs, PFCs, SF₆가 배출되며, 비에너지 제품 및 용매 사용(2.D.)에서는 화석연료가 연·원료용 사용이 아닌 하나의 제품으로 소비되는 과정에서 CO₂가 배출된다. 전자산업(2.E.)에서는 전자제품(반도체, 디스플레이, 광전지 등)을 생산하는 과정에서 소비되는 불소계 온실가스(HFCs, PFCs, SF₆, NF₃)(F-gases)가 배출되며, 오존층파괴물질의 대체물질 사용(2.F.)에서는 오존층파괴물질의 대체물질 중 온실가스(HFCs, PFCs)를 포함하는 기기나 제품이 제조 및 설치, 사용, 폐기되는 과정에서 HFCs, PFCs가 배출된다. 기타 제품 제조 및 사용(2.G.)에서는 전기 설비를 생산 및 사용하거나 기타 제품을 사용하는 과정에서 SF₆, PFCs, N₂O가 배출된다.

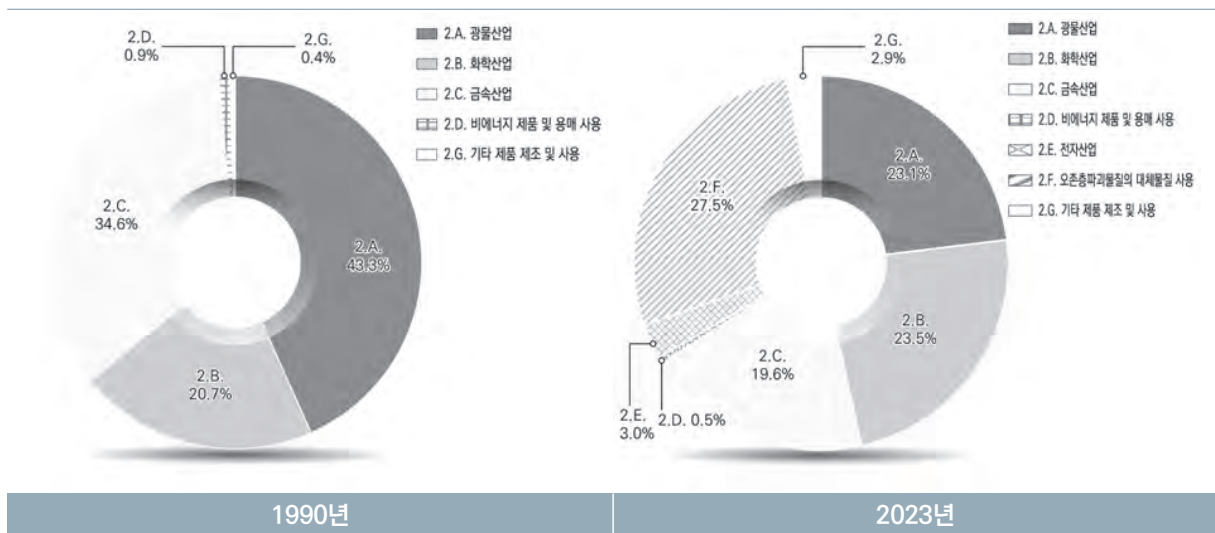
산업공정 분야는 활동자료로 국가승인통계, 조합·협회 자료, 사업장 조사자료, 사업장 명세서 등 다양한 출처의 자료를 사용한다. 특히 사업장 명세서는 제3자 검증이 완료된 자료로 관장부처와 GIR이 ①국가통계로서의 완전성, ②시계열 일관성, ③산정방법론 및 계수의 적절성 등을 상세 검토 후 활용하게 된다. 사업장 명세서를 활용하는 하위 부문은 광물산업(2.A.), 화학산업(2.B.), 금속산업(2.C.), 전자산업(2.E.), 기타 제품 제조 및 사용(2.G.) 부문이다. 사업장 명세서가 존재하지 않는 2006년 이전은 국내 산업과 관련한 조합·협회 자료와 국가 승인통계, 사업장 조사자료 등을 활동자료로 사용하였다. 국가 온실가스 통계 기초자료로 사업장 명세서를 활용하는 것은 조합·협회 자료, 사업장 조사자료 등의 일부를 제3자 검증 완료한 사업장 보고 자료로 대체하였다는 데 의의가 있다.

1) Industrial Processes and Product Use

2) 국가 온실가스 통계 산정기준 변경(1996 IPCC GL → 2006 IPCC GL)에 따라, 기존 에너지 분야에서 산정하던 화석연료 비에너지 사용 부문과 용제 및 기타 제품 사용 분야는 산업공정 및 제품 사용 분야로 통합

3) 기타(2.H.) 부문은 국내에 해당하는 배출활동이 없어 "NO"로 보고함

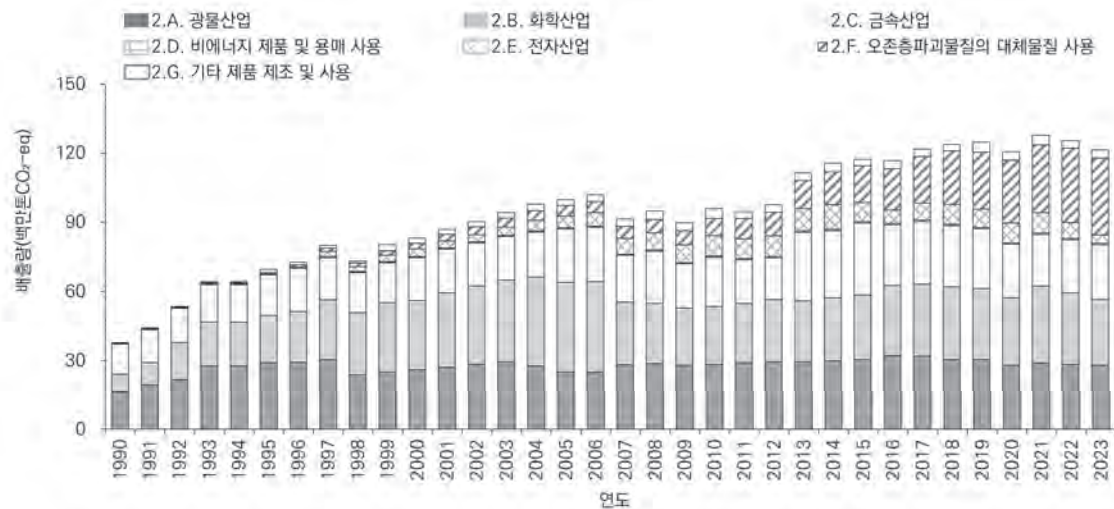
산업공정 분야 2023년 배출량은 121.5 백만톤 CO₂-eq로 국가 총배출량의 17.2%를 차지한다. 부문별 배출량과 배출 비중을 살펴보면, 오존층파괴물질의 대체물질 사용이 33.4 백만톤 CO₂-eq로 27.5%를 차지하였으며 다음으로는 화학산업 28.5 백만톤 CO₂-eq(23.5%), 광물산업 28.0 백만톤 CO₂-eq(23.1%), 금속산업 23.8 백만톤 CO₂-eq(19.6%), 전자산업 3.6백만톤 CO₂-eq(3.0%), 기타 제품 제조 및 사용 3.5 백만톤 CO₂-eq(2.9%), 비에너지 제품 및 용매 사용 0.6 백만톤 CO₂-eq(0.5%) 순이다. 또한, 국가 주요 배출·흡수원으로 선정된 23개 배출·흡수원⁴⁾ 중, 산업공정 분야는 시멘트 생산(CO₂), 석회 생산(CO₂), 석유화학제품 및 카본블랙 생산(CO₂), 철강 생산(CO₂), 전자산업(F-gases), 냉장 및 냉방(F-gases), 기타 제품 제조 및 사용(F-gases) 부문이 포함되었다(1.4절 참고).



| 그림 4-1 | 산업공정 분야 부문별 배출비중(1990·2023)

산업공정 분야의 2023년 온실가스 배출량은 1990년 대비 221.4% 증가한 것으로 나타났으며, 시멘트·철강·석유화학 등 제조업의 생산 확대와 오존층파괴물질 대체물질(HFCs 등) 사용 증가, 그리고 반도체·디스플레이 등 첨단산업의 성장이라는 복합적 요인이 배출량의 증가를 견인하였다. 세부 부문 별로 살펴보면, 오존층파괴물질 대체물질 사용 부문의 배출량이 가장 많이 증가하였는데, 이는 오존층 보호를 위한 CFCs, HCFCs 규제 이후 대체물질 사용이 증가했기 때문이다. 또한 기타 제품 제조에 따른 공정 배출량(증전기 등)도 타 부문과 비교하면 높은 증가 추세를 보였다.

4) 주요 배출원 분석: 배출·흡수량 기준 상위 95%(LULUCF 포함), 수준평가(1.4절 참조)



| 그림 4-2 | 산업공정 분야 부문별 온실가스 배출량(1990~2023)

| 표 4-1 | 산업공정 분야 부문별 온실가스 배출량(1990~2023)

(단위: 백만톤 CO₂-eq)

부문	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001
2.A. 광물산업	16.4	19.5	21.7	25.4	27.7	29.1	29.3	30.4	23.9	25.0	26.1	27.1
2.B. 화학산업	7.8	9.7	16.1	17.5	19.1	20.6	22.1	26.1	27.0	30.2	30.1	32.4
2.C. 금속산업	13.1	14.3	14.9	16.7	16.3	17.5	18.8	18.2	17.4	17.3	18.5	19.0
2.D. 비에너지 제품 및 용매 사용	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.5	0.5	0.4	0.5	0.5	0.5
2.E. 전자산업	IE,NANO	IE,NANO	IE,NANO	IE,NANO	IE,NANO	IE,NANO	IE,NANO	2.2	2.1	2.7	3.3	3.0
2.F. 오존층파괴물질의 대체물질 사용	IE,NANO	IE,NANO	0.002	0.004	0.2	0.6	0.9	1.4	1.6	2.0	2.5	2.9
2.G. 기타 제품 제조 및 사용	0.2	0.3	0.3	0.4	0.5	1.4	1.1	1.3	0.8	2.6	2.2	2.0
합계	37.8	44.2	53.5	60.4	64.3	69.7	72.7	80.0	73.2	80.4	83.1	86.9
부문	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
2.A. 광물산업	28.5	29.5	27.8	25.1	24.9	28.2	28.8	28.1	28.3	29.2	29.4	29.5
2.B. 화학산업	34.1	35.5	38.6	38.9	39.5	27.3	26.1	24.8	25.2	25.7	27.2	26.5
2.C. 금속산업	18.6	18.9	19.5	23.2	23.5	20.3	22.6	19.2	21.4	19.0	18.1	29.8
2.D. 비에너지 제품 및 용매 사용	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.6	0.6
2.E. 전자산업	3.1	3.6	4.6	5.1	5.9	6.9	7.4	7.8	8.8	8.6	9.0	9.7
2.F. 오존층파괴물질의 대체물질 사용	3.4	3.9	4.3	4.6	4.8	5.1	5.8	6.1	7.4	8.7	10.2	12.2
2.G. 기타 제품 제조 및 사용	2.2	2.3	2.6	2.6	2.9	3.2	3.7	3.5	4.3	3.0	3.2	3.3
합계	90.3	94.3	97.8	100.0	102.0	91.4	95.0	89.9	96.0	94.7	97.6	111.5
부문	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023		
2.A. 광물산업	29.9	30.6	32.2	32.0	30.5	30.5	28.0	29.0	28.4	28.0		
2.B. 화학산업	27.4	28.0	30.5	31.4	31.6	30.9	29.3	33.4	31.0	28.5		
2.C. 금속산업	29.2	31.2	26.2	27.1	26.6	25.8	23.3	22.4	23.0	23.8		
2.D. 비에너지 제품 및 용매 사용	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.5	0.6	0.6	0.6		
2.E. 전자산업	10.7	8.2	5.7	7.3	8.7	7.9	8.6	8.8	6.8	3.6		
2.F. 오존층파괴물질의 대체물질 사용	14.2	15.9	18.0	20.2	23.1	24.7	27.2	29.5	32.3	33.4		
2.G. 기타 제품 제조 및 사용	3.7	2.9	3.5	3.3	2.8	4.4	3.6	4.2	3.3	3.5		
합계	115.6	117.4	116.8	121.9	123.8	124.8	120.6	127.8	125.5	121.5		

4.2 광물산업(2.A.)

광물산업 부문은 광물을 생산 또는 소비하는 과정에서 석회석, 백운석, 마그네사이트, 소다회 등의 탄산염⁵⁾이 탈탄산 반응하여 발생하는 CO₂ 배출량을 산정한다. 하위 배출 부문으로는 시멘트 생산(2.A.1.), 석회 생산(2.A.2.), 유리 생산(2.A.3.), 탄산염의 기타 공정 사용(2.A.4.)이 포함된다⁶⁾

2023년 광물산업 부문 배출량은 전년 대비 1.4% 감소한 28,027 천톤 CO₂-eq로 산업공정 분야 전체 배출량의 23.1%를 차지하고 있다. 하위 부문별 배출 비중은 시멘트 생산이 81.1%로 가장 큰 비중으로 차지하고 있으며, 석회 생산 14.7%, 탄산염의 기타 공정 사용 3.3%, 유리 생산 0.9% 순이었다. 2023년 광물산업 부문 배출량은 전년 대비 394 천톤 CO₂-eq 감소하였는데, 시멘트 생산에서 490 천톤 CO₂-eq 감소하며 배출량 감소에 가장 크게 기여하였다.

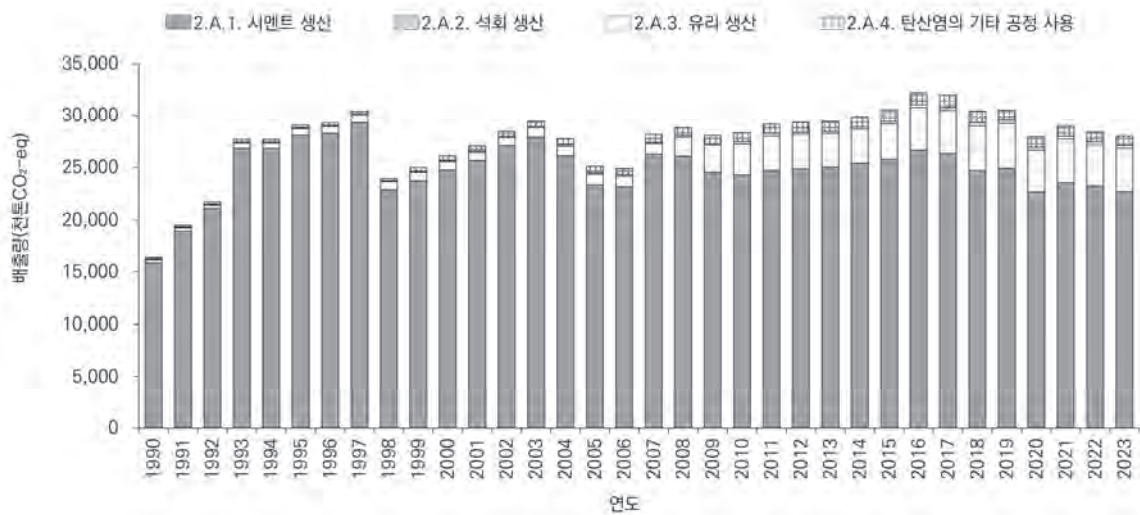


그림 4-3 | 광물산업 부문 온실가스 배출량(1990-2023)

표 4-2 | 광물산업 부문별 온실가스 배출량(1990-2023)

(단위: 천톤 CO₂-eq)

구분	1990	2000	2007	2010	2018	2021	2022	2023
2.A.1. 시멘트 생산	15,871	24,754	26,273	24,294	24,700	23,516	23,227	22,737
2.A.2. 석회 생산	257	804	1,020	2,971	4,303	4,216	3,962	4,110
2.A.3. 유리 생산	57	110	136	224	303	255	260	261
2.A.4. 탄산염의 기타 공정 사용	202	434	737	846	1,149	1,019	972	919

5) 산업공정에서 탄산염에 해당하는 원료는 CaCO₃(석회석), CaMg(CO₃)₂(백운석), 마그네사이트 (MgCO₃), Na₂CO₃(소다회) 등이 해당함

6) 1996 IPCC GL에서는 석회석 및 백운석의 소비(2.A.3.) 부문에서 석회석과 백운석의 소비에 의한 배출을 모두 보고하였으나 2006 IPCC GL에서는 탄산염 소비 부문의 배출이 소비되는 공정의 각 하위 부문(예: 금속산업 부문의 철강 생산, 합금철 생산 등)에서 각각 보고하는 것으로 변경되었고, 유리 생산(2.A.3.)과 탄산염의 기타 공정 사용(2.A.4.)이 신규로 추가됨

4.2.1 시멘트 생산(2.A.1.)

4.2.1.1 배출원 개요

2023년 기준	산정온실가스	방법론	배출계수	활동자료
	CO ₂	Tier 2	CS, D	클링커 생산량

시멘트는 건축 및 토목 재료로 사용되는 접합제로 석회석을 소성하여 중간 제품인 클링커를 생산하는 과정에서 CaCO₃(석회석)의 탈탄산 반응으로 CO₂가 배출된다. 시멘트 종류에는 보통시멘트로 분류되는 포틀랜드 시멘트와 특수 시멘트가 있고, 특수 시멘트에는 백색 포틀랜드 시멘트⁷⁾와 알루미나 시멘트⁸⁾ 등이 있다. 우리나라에서는 주로 포틀랜드 시멘트를 생산하고 있으며, 일부 백색 포틀랜드 시멘트도 생산하고 있다.

〈시멘트 생산의 CO₂ 발생 메커니즘 (탈탄산화 반응)〉



시멘트 생산 부문 2023년 배출량은 22,737 천톤 CO₂-eq로 클링커 생산량 감소의 영향으로 전년 대비 2.1% 감소하였다.

표 4-3 | 시멘트 생산 부문 온실가스 배출량(1990-2023)

(단위: 천톤 CO ₂ -eq)								
구분	1990	2000	2007	2010	2018	2021	2022	2023
시멘트 생산	15,871	24,754	26,273	24,294	24,700	23,516	23,227	22,737

4.2.1.2 방법론

4.2.1.2.1 산정방법

시멘트 생산 부문은 2006 IPCC GL의 Tier 2 방법에 따라 클링커 생산량과 배출계수, 소성되지 않고 분진 상태로 배출되는 시멘트 킬른 분진(Cement Kiln Dust, 이하 CKD) 보정계수를 곱하여 CO₂ 배출량을 산정하였다.

7) 착색성분을 제거하여 백색을 띄게 한 특수 시멘트로 보통 시멘트와 유사 (건물내장재 등 사용)

8) 산화알루미늄 함량을 높은 특수 시멘트 중 하나로 내열성과 초기강도가 우수 (케이블 제조, 유연탄 재비산 방지 등 사용)

〈시멘트 생산 부문 CO₂ 배출량 산정식(Tier 2)〉

$$\text{CO}_2 \text{ 배출량} = M_{\text{cl}} \times \text{EF}_{\text{cl}} \times \text{CF}_{\text{ckd}}$$

CO₂ 배출량 : 시멘트 생산에 따른 CO₂ 배출량(t CO₂)

M_{cl} : 클링커 생산량(t)

EF_{cl} : 클링커 생산 배출계수(t CO₂/t 클링커 생산량)

CF_{ckd} : 시멘트 킬른 분진(CKD, Cement Kiln Dust) 보정계수

자료: 2006 IPCC GL, Vol.3, Ch.2.2, Equation 2.2

4.2.1.2.2 배출계수

시멘트 생산 부문에서 포틀랜드 시멘트의 CO₂ 배출계수는 2018년 승인된 국가 고유 배출계수⁹⁾를 적용하였고, 그 외 시멘트(백색 포틀랜드 시멘트)의 CO₂ 배출계수 및 CKD 보정계수는 2006 IPCC GL 기본 배출계수를 적용하였다. 국내의 경우 포틀랜드 시멘트가 전체 클링커 생산량에서 차지하는 비중이 99.7%(2023년 기준)로 대부분의 시멘트 생산 배출량에 국가 고유 배출계수를 적용하고 있다.

표 4-4 | 시멘트 생산 부문 배출계수

구분	계수	출처
배출계수	포틀랜드 시멘트	0.5295 t CO ₂ / t 클링커 생산량
	포틀랜드 시멘트 외	0.51 t CO ₂ / t 클링커 생산량
보정계수	CKD	1.02
		2006 IPCC GL

4.2.1.2.3 활동자료

시멘트 생산 부문의 경우 2007년 이후는 「사업장 명세서」, 2006년 이전은 「시멘트통계연보(한국시멘트협회)」 및 한국에너지공단의 사업장 조사자료¹⁰⁾(협회 비회원사 대상)의 클링커 생산량 자료를 활용하였다¹¹⁾.

표 4-5 | 시멘트 생산 부문 활동자료 수집방법(1990-2023)

기간	활동자료	통계명	관리기관	대상가스
1990-2006	클링커 생산량	「시멘트통계연보」	한국시멘트협회	CO ₂
		사업장 조사자료	한국에너지공단	
2007-2023		「사업장 명세서」	기후에너지환경부	

9) 국내 클링커 생산업체 8개사에서 보고한 명세서 배출량(2013-2017)을 기준으로 배출계수 개발

10) 한국시멘트협회에 조함이 아닌 업체인 경우, 직접 사업장 조사를 통해 국내 모든 시멘트 업체의 클링커 생산량을 반영함

11) 「사업장 명세서」의 경우 국내 온실가스목표관리제 및 배출권거래제가 도입된 이후 작성되어 2006년 이전 시계열 자료가 부재함에 따라 협회 자료, 사업장 조사자료 등을 사용함. 이하 명세서 활용 부문 모두 공통으로 해당하는 사항임

| 표 4-6 | 시멘트 생산 부문 활동자료(1990-2023)

(단위: 천톤)

구분	1990	2000	2007	2010	2018	2021	2022	2023
클링커 생산량	29,390	45,837	48,650	44,988	45,737	43,546	43,011	42,103

4.2.1.3 시계열 일관성

시멘트 생산 부문은 전 시계열 동일한 방법론과 배출계수를 적용하였다. 활동자료의 경우 2007년 이후는 「사업장 명세서」, 2006년 이전은 「시멘트통계연보」와 한국에너지공단 사업장 조사자료를 사용하였다. 전 시계열에 걸쳐 국내 모든 시멘트 업체의 클링커 생산량을 반영하여 온실가스 배출량의 시계열 일관성을 확보하였다.

4.2.1.4 QA/QC

QA/QC는 제1장 서론 1.5절 내용과 동일하다.

4.2.1.5 재계산

재계산은 수행하지 않았다.

4.2.1.6 개선계획

시멘트 생산 부문은 2023년 기준 주요 배출원에 해당한다. 산정방법론은 Tier 2를 적용하고 있으나 배출계수는 국가 고유 배출계수와 2006 IPCC 기본 배출계수를 병용하고 있다. 다만, 대부분의 시멘트 생산 배출량(2023년 기준 약 99.7%)에 국가 고유 배출계수를 적용하고 있어 일부 기본 배출계수 적용에 대한 별도의 개선계획은 없다.

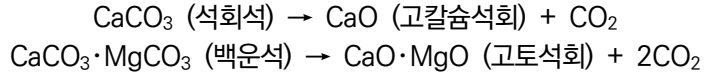
4.2.2 석회 생산(2.A.2.)

4.2.2.1 배출원 개요

2023년 기준	산정온실가스	방법론	배출계수	활동자료
	CO ₂	Tier 2	D	석회 생산량

석회는 합금, 펄프 및 종이, 폐수처리, 토양안정제, 비료 등 다양한 산업에서 활용되는 중요한 소재로 석회 생산과정에서 탄산염이 소성되어 CO₂가 배출된다. 석회 종류에는 CaO(고칼슘석회(생석회), high-calcium lime), CaO·MgO(고토석회(경소백운석), dolomitic lime) 등이 있으며, 우리나라에서는 고칼슘석회와 고토석회만 생산되고 있다.

〈석회 생산의 CO₂ 발생 메커니즘 (탈탄산화 반응)〉



석회 생산 부문의 2023년 배출량은 4,110 천톤 CO₂-eq으로 석회 생산량 증가로 전년 대비 3.7% 증가하였다.

표 4-7 | 석회 생산 부문 온실가스 배출량(1990-2023)

(단위: 천톤 CO ₂ -eq)								
구분	1990	2000	2007	2010	2018	2021	2022	2023
석회 생산	257	804	1,020	2,971	4,303	4,216	3,962	4,110

4.2.2.2 방법론

4.2.2.2.1 산정방법

석회 생산 부문은 2006 IPCC GL의 Tier 2 방법에 따라 석회 유형별 생산량과 배출계수, 석회 킬른 분진 보정계수, 수화석회 보정계수를 곱하여 CO₂ 배출량을 산정하였다.

〈석회 생산 부문 CO₂ 배출량 산정식(Tier 2)〉

$$\text{CO}_2 \text{ 배출량} = \sum_i (EF_{\text{lime},i} \times M_{1,i} \times CF_{\text{lkd},i} \times C_{h,i})$$

CO ₂ 배출량	: 석회 생산에 따른 CO ₂ 배출량(t CO ₂)
EF _{lime,i}	: 유형별(고칼슘석회, 고토석회) 배출계수(t CO ₂ /t 각(i) 석회 생산량)
M _{1,i}	: 유형별 석회 생산량(t)
CF _{lkd,i}	: 석회 킬른 분진(Lime Kiln Dust) 보정계수
C _{h,i}	: 유형별 수화석회 보정계수
i	: 유형별(고칼슘석회, 고토석회) 석회

자료: 2006 IPCC GL, Vol.3, Ch.2.3, Equation 2.6

4.2.2.2.2 배출계수

석회 생산 부문의 CO₂ 배출계수 및 보정계수는 2006 IPCC GL 기본 배출계수를 적용하였다.

표 4-8 | 석회 생산 부문 배출계수

구분	계수	출처
배출계수	고칼슘석회 0.746 t CO ₂ /t 석회 생산량	2006 IPCC GL
	고토석회 0.776 t CO ₂ /t 석회 생산량	
보정계수	LKD 1.02	2006 IPCC GL
	수화석회 0.97	

4.2.2.2.3 활동자료

석회 생산 부문의 경우 2007년 이후는 「사업장 명세서」, 2006년 이전은 한국석회석가공업협동조합 및 한국에너지공단의 사업장 조사자료(조합 비회원사 대상)의 고칼슘석회 및 고토석회 생산량 자료를 사용하였다.

| 표 4-9 | 석회 생산 부문 활동자료 수집방법(1990-2023)

기간	활동자료	통계명	관리기관	대상가스
1990-2006	고칼슘석회, 고토석회 생산량	조합 자료	한국석회석가공업협동조합	CO ₂
		사업장 조사자료	한국에너지공단	
2007-2023		「사업장 명세서」	기후에너지환경부	

| 표 4-10 | 석회 생산 부문 활동자료(1990-2023)

(단위: 천톤)

구분	1990	2000	2007	2010	2018	2021	2022	2023
고칼슘석회 생산량	348	922	1,327	3,814	5,066	4,888	4,560	4,751
고토석회 생산량	NO	160	53	204	736	793	778	788
합계	348	1,083	1,380	4,018	5,802	5,681	5,338	5,539

4.2.2.3 시계열 일관성

석회 생산 부문은 전 시계열 동일한 방법론과 배출계수를 적용하였다. 활동자료의 경우 2007년 이후는 「사업장 명세서」, 2006년 이전은 한국석회석가공업협동조합 자료와 한국에너지공단 사업장 조사자료를 사용하여 국내 모든 석회 생산업체의 생산량 자료를 반영함으로써, 온실가스 배출량의 시계열 일관성을 확보하였다.

4.2.2.4 QA/QC

QA/QC는 제1장 서론 1.5절 내용과 동일하다.

4.2.2.5 재계산

재계산은 수행하지 않았다.

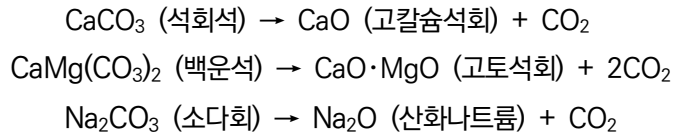
4.2.3 유리 생산(2.A.3.)

4.2.3.1 배출원 개요

2023년 기준	산정온실가스	방법론	배출계수	활동자료
	CO ₂	Tier 1	D	유리 생산량

유리 생산 부문은 유리의 주요 원료인 SiO_2 (규사)와 CaCO_3 (석회석), $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ (백운석), Na_2CO_3 (소다회) 등의 광물을 혼합한 후 용해하는 과정에서 탈탄산 반응으로 CO_2 가 배출된다.

〈유리 생산의 CO_2 발생 메커니즘 (탈탄산화 반응)〉



유리 생산 부문 2023년 배출량은 261 천톤 $\text{CO}_2\text{-eq}$ 이며 유리생산량이 소폭 증가한 영향으로 전년 대비 0.1% 증가하였다.

표 4-11 | 유리 생산 부문 온실가스 배출량(1990-2023)

(단위: 천톤 $\text{CO}_2\text{-eq}$)								
구분	1990	2000	2007	2010	2018	2021	2022	2023
유리 생산	57	110	136	224	303	255	260	261

4.2.3.2 방법론

4.2.3.2.1 산정방법

유리 생산 부문은 2006 IPCC GL의 Tier 1 방법에 따라 유리생산량과 배출계수, 컬릿¹²⁾비율을 곱하여 CO_2 배출량을 산정하였다.

〈유리 생산 부문 CO_2 배출량 산정식(Tier 1)〉

$$\text{CO}_2 \text{ 배출량} = M_g \times \text{EF} \times (1 - \text{CR})$$

CO_2 배출량	: 유리 생산에 따른 CO_2 배출량(t CO_2)
M_g	: 유리생산량(t)
EF	: 유리 생산 시 배출계수(t CO_2 /t 유리 생산량)
CR	: 유리 생산 공정에 대한 컬릿비율 (기본계수 : 0.5)

자료: 2006 IPCC GL, Vol.3, Ch.2.4, Equation 2.10

4.2.3.2.2 배출계수

유리 생산 부문의 CO_2 배출계수 및 컬릿 비율은 2006 IPCC GL 기본 배출계수를 적용하였다.

12) 재활용 유리

| 표 4-12 | 유리 생산 부문 배출계수

구분	계수	출처
배출계수	0.20 t CO ₂ /t 유리 생산량	2006 IPCC GL
컬릿 비율	0.50	

4.2.3.2.3 활동자료

유리 생산 부문의 경우 2018년 이후 활동자료는 한국유리산업협동조합의 병유리생산 통계와 「사업장 명세서」상의 병유리 외(유리기판, 판유리, 유리섬유 등) 유리생산량 자료를 사용하였다. 2017년 이전은 한국에너지공단에서 조사한 유리생산량 자료를 활용하였다¹³⁾.

| 표 4-13 | 유리 생산 부문 활동자료 수집방법(1990-2023)

기간	활동자료	통계명	관리기관	대상가스
1990-2017	유리생산량	유리생산량 통계	한국에너지공단	CO ₂
2018-2023		「사업장 명세서」	기후에너지환경부	
		병유리생산 통계	한국유리산업협동조합	

| 표 4-14 | 유리 생산 부문 활동자료(1990-2023)

(단위: 천톤)								
구분	1990	2000	2007	2010	2018	2021	2022	2023
유리생산량	574	1,097	1,365	2,236	3,026	2,555	2,605	2,607

4.2.3.3 시계열 일관성

유리 생산 부문은 전 시계열 동일한 방법론과 배출계수를 적용하였다. 활동자료의 경우 2017년 이전은 한국에너지공단에서 조사한 유리생산량 통계를 사용하였으나 2018년부터 조사가 중단되어 그 이후는 한국유리산업협동조합의 병유리생산 통계와 「사업장 명세서」에 보고된 병유리 외 유리생산량(유리기판, 판유리, 유리섬유 등) 자료를 사용하여 모든 유리 생산업체의 생산량 자료를 확보함으로써, 온실가스 배출량의 시계열 일관성을 확보하였다.

4.2.3.4 QA/QC

QA/QC는 제1장 서론 1.5절 내용과 동일하다.

4.2.3.5 재계산

재계산은 수행하지 않았다.

13) 한국에너지공단에서 국가데이터처에 협조받은 조사자료

4.2.4 탄산염의 기타 공정 사용(2.A.4.)

4.2.4.1 배출원 개요

CaCO_3 (석회석) 및 $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ (백운석), MgCO_3 (마그네사이트), Na_2CO_3 (소다회) 등의 탄산염은 금속산업 및 유리, 세라믹, 비야금 마그네시아 생산 등을 포함한 다양한 산업에서 사용된다. 하위 배출 부문으로는 세라믹 생산(2.A.4.a.), 소다회의 기타 사용(2.A.4.b.), 비야금 마그네시아 생산(2.A.4.c.), 탄산염의 기타 소비(2.A.4.d.)가 포함된다.

시멘트, 석회, 유리, 소다회의 기타 사용, 금속산업(2.A.1.-2.A.4., 2.C.) 등에 포함되지 않는 탄산염 소비와 세부 공정 구분이 어려운 세라믹 생산(2.A.4.a.)의 탄산염 소비는 탄산염의 기타 소비(2.A.4.d.) 부문에 포함하여 배출량을 산정하였다(IE). 비야금 마그네시아 생산(2.A.4.c.)은 국내에서 이루어지지 않는 것으로 확인되어 산정에서 제외하였다(NO). 따라서 탄산염의 기타 공정 사용(2.A.4.) 부문에서는 소다회의 기타 사용(2.A.4.b.)과 탄산염의 기타 소비(2.A.4.d.) 배출량만 보고하였다.

탄산염의 기타 공정 사용 부문 2023년 배출량은 919 천톤 $\text{CO}_2\text{-eq}$ 로 전년 대비 5.4% 감소하였다.

표 4-15 | 탄산염의 기타 공정 사용 부문 온실가스 배출량(1990-2023)

(단위: 천톤 $\text{CO}_2\text{-eq}$)

구분	1990	2000	2007	2010	2018	2021	2022	2023
2.A.4.a. 세라믹 생산	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE
2.A.4.b. 소다회의 기타 사용	202	231	170	107	79	62	56	63
2.A.4.c. 비야금 마그네시아 생산	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
2.A.4.d. 탄산염의 기타 소비	NE	203	567	739	1,069	956	916	856
합계	202	434	737	846	1,149	1,019	972	919

주: 세라믹 생산(2.A.4.a.)은 탄산염의 기타 소비(2.A.4.d.) 배출량에 포함되어 있음(IE)

4.2.4.2 소다회의 기타 사용(2.A.4.b.)

4.2.4.2.1 배출원 개요

2023년 기준	산정온실가스	방법론	배출계수	활동자료
	CO_2	Tier 1	D	소다회 생산, 수입, 수출량

소다회는 유리, 비누, 세제, 화학물질, 펄프, 종이 등의 생산에 사용되며, 소다회를 소성하는 과정에서 CO_2 가 배출된다. 유리 생산(2.A.3.) 부문에 포함된 소다회는 제외하고 산정하였다.

〈소다회의 기타 사용 CO_2 발생 메커니즘 (탈탄산화 반응)〉



소다회의 기타 사용 부문 2023년 배출량은 63 천톤 $\text{CO}_2\text{-eq}$ 로 전년 대비 12.5% 증가하였다.

| 표 4-16 | 소다회의 기타 사용 부문 온실가스 배출량(1990-2023)

(단위: 천톤 CO ₂ -eq)								
구분	1990	2000	2007	2010	2018	2021	2022	2023
소다회의 기타 사용	202	231	170	107	79	62	56	63

4.2.4.2.2 방법론

4.2.4.2.2.1 산정방법

소다회의 기타 사용 부문은 2006 IPCC GL의 Tier 1 방법에 따라 소다회 소비량과 배출계수를 곱하여 CO₂ 배출량을 산정하였다.

〈소다회의 기타 사용 부문 CO₂ 배출량 산정식(Tier 1)〉

$$\text{CO}_2 \text{ 배출량} = M \times EF$$

CO₂ 배출량 : 소다회의 기타 사용에 따른 CO₂ 배출량(t CO₂)

M : 소다회 소비량(t)

EF : 소다회 소비 배출계수(t CO₂/t 소다회 소비량)

자료: 2006 IPCC GL, Vol.3, Ch.2.5, Equation 2.14

4.2.4.2.2.2 배출계수

소다회의 기타 사용 부문의 CO₂ 배출계수는 2006 IPCC GL 기본 배출계수를 적용하였다.

| 표 4-17 | 소다회의 기타 사용 부문 배출계수

구분	계수	출처
배출계수	0.41492 t CO ₂ /t 소다회 소비량	2006 IPCC GL

4.2.4.2.2.3 활동자료

소다회의 기타 사용 부문 활동자료는 국내 생산량과 수입량, 수출량 자료 등을 활용하여 산정한 순소비량¹⁴⁾을 사용하였다. 2004년 이전에는 국내에서 소다회를 생산하였으나, 2005년 생산업체가 폐업하며 2005년 이후 국내 생산량은 없다. 국내 생산량 자료는 1990년부터 2004년까지 한국에너지공단¹⁵⁾이 소다회 생산업체를 대상으로 조사한 자료를 사용하였다. 전 시계열의 수입 및 수출량 자료는 관세청에서 제공하는 수출입 무역통계 자료를 활용하였다.

14) 순소비량 = 생산량 + 수입량 - 수출량 - 2.A.3. 유리생산 시 소비량

| 표 4-18 | soda회의 기타 사용 부문 활동자료 수집방법(1990-2023)

기간	활동자료	통계명	관리기관	대상가스
1990-2004	soda회 생산량	사업장 조사자료	한국에너지공단	CO ₂
1990-2023	soda회 수입량, 수출량	수출입 무역통계	관세청	

| 표 4-19 | soda회의 기타 사용 부문 활동자료(1990-2023)

(단위: 천톤)

구분	1990	2000	2007	2010	2018	2021	2022	2023
soda회 생산량 ¹⁵⁾ ㉠	335	341	NO	NO	NO	NO	NO	NO
soda회 수입량 ㉡	220	352	572	524	552	455	445	462
soda회 수출량 ㉢	0.2	4.9	0.7	0.07	0.06	0.3	0.5	0.5
유리생산 시 소비량 ㉣	68	131	162	266	360	304	310	310
순소비량 (㉠+㉡-㉢-㉣)	486	557	409	258	192	150	134	151

4.2.4.2.3 시계열 일관성

soda회의 기타 사용 부문은 전 시계열 동일한 방법론과 배출계수, 활동자료를 적용하였다. soda회 생산량 자료의 경우 soda회 국내 생산업체가 2005년 폐업함에 따라 2004년 이전 자료만 활용하였다.

4.2.4.2.4 QA/QC

QA/QC는 제1장 서론 1.5절 내용과 동일하다.

4.2.4.2.5 재계산

재계산은 수행하지 않았다.

4.2.4.3 탄산염의 기타 소비(2.A.4.d.)

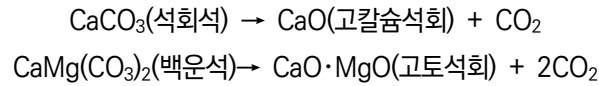
4.2.4.3.1 배출원 개요

2023년 기준	산정온실가스	방법론	배출계수	활동자료
	CO ₂	Tier 2	D	탄산염 소비량

탄산염의 기타 소비 부문에서는 시멘트, 석회, 유리, soda회의 기타 사용, 금속산업 등에 포함되지 않는 탄산염 소비와 세부 공정 구분이 어려운 세라믹 생산(2.A.4.a.)에서의 탄산염 소비에 따른 CO₂ 배출량을 산정한다.

15) 2004년 이전에는 soda회를 생산하였으나, 2005년 이후 생산이 중단되어 생산량 없음

〈탄산염 소비로 인한 CO₂ 발생 메커니즘 (탈탄산화 반응)〉



탄산염의 기타 소비 부문 2023년 배출량은 856 천톤 CO₂-eq로 전년 대비 6.5% 감소하였다.

표 4-20 | 탄산염의 기타 소비 부문 온실가스 배출량(1998-2023)

(단위: 천톤 CO₂-eq)

구분	1998 ¹⁶⁾	2000	2007	2010	2018	2021	2022	2023
탄산염의 기타 소비	11	203	567	739	1,069	956	916	856

4.2.4.3.2 방법론

4.2.4.3.2.1 산정방법

2006 IPCC GL의 Tier 2 방법에 따라 탄산염 소비량과 배출계수를 곱하여 CO₂ 배출량을 산정하였다.

〈탄산염의 기타 소비 부문 CO₂ 배출량 산정식(Tier 2)〉

$$\text{CO}_2 \text{ 배출량} = M \times EF$$

CO₂ 배출량 : 탄산염 기타 공정 사용에 따른 CO₂ 배출량(t CO₂)
M : 탄산염(석회석, 백운석, 마그네사이트) 소비량(t)
EF : 탄산염별 배출계수(t CO₂/t 탄산염 소비량)

자료: 2006 IPCC GL, Vol.3, Ch.2.5, Equation 2.15

4.2.4.3.2.2 배출계수

탄산염의 기타 소비 부문의 탄산염별 CO₂ 배출계수는 2006 IPCC GL 기본 배출계수를 적용하였다.

표 4-21 | 탄산염의 기타 소비 부문 배출계수

구분	계수	출처
석회석 소비 배출계수	0.43971 t CO ₂ /t 석회석 소비량	2006 IPCC GL
백운석 소비 배출계수	0.47732 t CO ₂ /t 백운석 소비량	
마그네사이트 소비 배출계수	0.52197 t CO ₂ /t 마그네사이트 소비량	

16) 1998년 최초 산정. 활동자료가 최초로 수집된 1998년 배출량이 매우 미미(MPG 지침 32조에 따른 국가 총배출량 중 0.05% 이하의 소규모 배출원)하고, 1997년 이전은 배출이 없거나 소규모 배출원으로 추정됨에 따라 "NE"로 보고함

4.2.4.3.2.3 활동자료

탄산염 소비량의 경우 2007년 이후는 「사업장 명세서」를, 1998-2006년은 한국에너지공단의 사업장 조사자료¹⁷⁾를 사용하였다.

| 표 4-22 | 탄산염의 기타 소비 부문 활동자료 수집방법(1998-2023)

기간	활동자료	통계명	관리기관	대상가스
1998-2006	석회석, 백운석, 마그네사이트 소비량	사업장 조사자료	한국에너지공단	CO ₂
2007-2023		「사업장 명세서」	기후에너지환경부	

| 표 4-23 | 탄산염의 기타 소비 부문 활동자료(1998-2023)

(단위: 천톤)								
구분	1998	2000	2007	2010	2018	2021	2022	2023
석회석 소비량	25	462	1,283	1,674	2,412	2,038	1,956	1,837
백운석 소비량	NO	NO	NO	NO	11	9	11	10
마그네사이트 소비량	NO	NO	6	6	7	107	97	83
합계	25	462	1,289	1,680	2,429	2,154	2,064	1,930

4.2.4.3.3 시계열 일관성

탄산염의 기타 소비 부문은 전 시계열 동일한 방법론과 배출계수를 적용하였다. 활동자료의 경우 2007년 이후는 「사업장 명세서」, 1998-2006년은 한국에너지공단 사업장 조사자료를 사용하여, 전 시계열에 걸쳐 모든 탄산염 사용 업체 자료를 온실가스 배출량에 적용함으로써 시계열 일관성을 확보하였다.

4.2.4.3.4 QA/QC

QA/QC는 제1장 서론 1.5절 내용과 동일하다.

4.2.4.3.5 재계산

재계산은 수행하지 않았다.

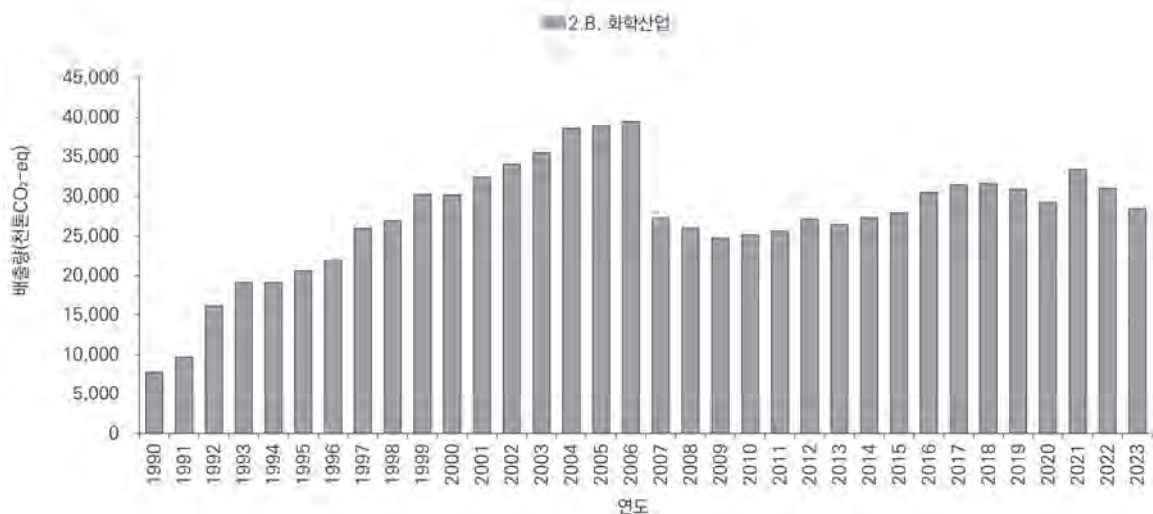
17) 탄산염을 소비하는 발전업, 집단에너지공급업 등을 대상으로 한국에너지공단이 조사한 자료

4.3 화학산업(2.B.)

화학산업 부문은 화학제품 제조 과정에서 발생하는 CO₂, CH₄, N₂O, HFCs, PFCs, SF₆, NF₃ 배출량을 산정하며, 하위 배출 부문은 암모니아 생산(2.B.1.), 질산 생산(2.B.2.), 아디프산 생산(2.B.3.), 카프로락탐, 글리옥살 및 글리옥실산 생산(2.B.4.), 카바이드 생산(2.B.5.), 이산화티타늄 생산(2.B.6.), 소다회 생산(2.B.7.), 석유화학제품 및 카본블랙 생산(2.B.8.), 불소화합물 생산(2.B.9.)이 포함된다.

하위 부문 중 이산화티타늄 생산 부문은 국내 생산업체가 존재하나 CO₂ 배출이 없는 황산법으로 제품을 생산하고 있어 배출량 산정에서 제외하였고(NO), 소다회 생산 부문 역시 1990-2004년까지 국내 생산업체가 존재하였으나 CO₂ 배출이 없는 솔베이공법으로 생산하여 배출량 산정에서 제외하였다(NO). 또한, 국내 화학산업 업체의 정보보호를 위하여 암모니아 생산, 아디프산 생산, 카프로락탐, 글리옥살 및 글리옥실산 생산, 카바이드 생산 부문의 배출량을 기타(2.B.10.) 부문에 통합 보고하였다(IE).

2023년 화학산업 부문 배출량은 전년 대비 8.1% 감소한 28,496 천톤 CO₂-eq로 산업공정 분야 배출량의 23.5%를 차지한다. 하위 부문별 배출 비중은 석유화학제품 및 카본블랙 생산이 99.2%로 대부분을 차지했으며, 질산 생산 0.4%, 불소화합물 생산 0.2% 등이다. 2023년 화학산업 부문 배출량은 전년 대비 2,501 천톤 CO₂-eq 감소하였는데 특히 석유화학제품 및 카본블랙 생산 부문의 에틸렌 생산 배출량이 2,765 천톤 CO₂-eq, 14.0% 감소하며 가장 크게 기여하였다. 그 외 화학산업 부문 하위 부문들도 대부분 전년 대비 배출량이 감소하였다.



| 그림 4-4 | 화학산업 부문 온실가스 배출량(1990-2023)

| 표 4-24 | 화학산업 부문별 온실가스 배출량(1990-2023)

(단위: 천톤 CO₂-eq)

구분	1990	2000	2007	2010	2018	2021	2022	2023
2.B.1. 암모니아 생산	IE,NA	IE,NA	IE,NA	IE,NA	IE,NA	IE,NA	IE,NA	IE,NA
2.B.2. 질산 생산	219	1,064	464	160	292	190	96	101
2.B.3. 아디프산 생산	IE,NO	IE,NO	IE,NO	IE,NO	IE,NO	IE,NO	IE,NO	IE,NO
2.B.4. 카프로락탐 생산	IE,NO	IE,NO	IE,NO	IE,NO	IE,NO	IE,NO	IE,NO	IE,NO
2.B.5. 카바이드 생산	IE,NO	IE,NO	IE,NO	IE,NO	IE,NO	IE,NO	IE,NO	IE,NO
2.B.6. 이산화티타늄 생산	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
2.B.7. 소다회 생산	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
2.B.8. 석유화학제품 및 카본블랙 생산	5,314	19,411	25,221	23,731	31,082	32,951	30,701	28,269
2.B.9. 불소화합물 생산	1,042	3,430	0.12	29	88	96	95	55
2.B.10. 기타*	1,256	6,234	1,590	1,264	126	124	105	71

* 암모니아 생산(2.B.1.), 아디프산 생산(2.B.3.), 카프로락탐, 글리옥살 및 글리옥살산 생산(2.B.4.), 카바이드 생산(2.B.5.) 부문의 배출량을 기타(2.B.10.) 부문에 통합 보고(IE)

4.3.1 암모니아 생산(2.B.1.)

4.3.1.1 배출원 개요

암모니아(NH₃)는 비료, 열처리, 종이 펄프, 질산과 질산염의 제조, 질산에스테르, 니트로 화합물, 폭발물 및 냉각제 등과 같이 다양한 질소화합물 제품생산에 원료로 사용된다. 천연가스, 코크스 또는 납사를 원료로 암모니아를 생산하는 과정에서 CO₂가 발생하며, 국내에서는 암모니아 생산 시 납사와 부탄을 원료로 사용한다. 암모니아 생산에서 발생하는 CH₄ 및 N₂O는 2006 IPCC GL 기본 배출계수가 없어 “NA”로 보고하였다.¹⁸⁾

4.3.1.2 방법론

4.3.1.2.1 산정방법

암모니아 생산 부문은 2006 IPCC GL의 Tier 1 방법에 따라 암모니아 생산량과 생산량 당 연료 필요량, 연료의 탄소함량, 탄소산화계수 등을 곱하여 CO₂ 배출량을 산정하였다.

18) 국내 암모니아 생산은 기업의 정보보호를 위해 활동자료 및 배출량을 기타(2.B.10.) 부문에 포함하여 보고함(IE)

〈암모니아 생산 부문 배출량 산정식(Tier 1)〉

$$\text{CO}_2 \text{ 배출량} = \text{AP} \times \text{FR} \times \text{CCF} \times \text{COF} \times 44/12 - R_{\text{CO}_2}$$

CO ₂ 배출량	: 암모니아 생산에 따른 CO ₂ 배출량(kg CO ₂)
AP	: 암모니아 생산량(t)
FR	: 생산량 당 연료 필요량(GJ/t 암모니아)
CCF	: 연료의 탄소함량(kg C/GJ)
COF	: 연료의 탄소산화계수
R _{CO₂}	: CO ₂ 재생량(kg)

자료: 2006 IPCC GL, Vol.3, Ch.3.2, Equation 3.1

4.3.1.2.2 배출계수

암모니아 생산 부문 배출량 산정에 필요한 생산량 당 연료 필요량(FR), 연료 탄소함량(CCF), 연료 탄소산화계수(COF)는 2006 IPCC GL 기본 배출계수를 적용하였다.

표 4-25 | 암모니아 생산 부문 배출계수

구분	계수	출처
생산량 당 연료 필요량(FR)	37.5 GJ/t 암모니아	2006 IPCC GL
연료 탄소함량(CCF)	15.3 kg C/GJ	
연료 탄소산화계수(COF)	1	

4.3.1.2.3 활동자료

암모니아 생산량은 한국에너지공단인 암모니아 생산업체를 대상으로 직접 조사한 자료를 사용하였다.

표 4-26 | 암모니아 생산 부문 활동자료 수집방법(1990-2011)

기간	활동자료	통계명	관리기관	대상가스
1990-2011	암모니아 생산량	사업장 조사자료	한국에너지공단	CO ₂

4.3.1.3 시계열 일관성

암모니아 생산 부문은 전 시계열 동일한 방법론과 배출계수, 활동자료를 적용하였다.

4.2.1.4 QA/QC

QA/QC는 제1장 서론 1.5절 내용과 동일하다.

4.3.1.5 재계산

재계산은 수행하지 않았다.

4.3.2 질산 생산(2.B.2.)

4.3.2.1 배출원 개요

2023년 기준	산정온실가스	방법론	배출계수	활동자료
	N ₂ O	Tier 2	PS	N ₂ O 배출량

질산(HNO₃)은 질소질비료의 원료와 나일론, 폭발물의 원료인 아디프산을 생산하는 데 주로 사용되며, 질산을 생산하기 위해 암모니아(NH₃)를 고온에서 촉매 산화하는 과정에서 부산물로 N₂O가 배출된다. 질산 생산과정 중 산화반응 압력에 따라 고압, 중압 공정으로 구분되며, 높은 압력 조건에서 N₂O가 쉽게 생성되기 때문에 고압 공정으로 제조 시 중압 공정보다 N₂O가 많이 발생한다. 국내에서는 주로 고압 공정을 사용하고, 일부 사업장은 중압 공정을 사용하여 질산을 생산하고 있다.

질산 생산 부문 2023년 배출량은 101 천톤 CO₂-eq로 전년 대비 4.8% 증가하였다. 2007년부터는 질산 생산업체들의 청정개발체제(Clean Development Mechanism, 이하 CDM) 사업 감축 실적이 반영되어 2006년 대비 배출량이 71.9% 감소하였다.

| 표 4-27 | 질산 생산 부문 온실가스 배출량(1990-2023)

(단위: 천톤 CO ₂ -eq)								
구분	1990	2000	2007	2010	2018	2021	2022	2023
질산 생산	219	1,064	464	160	292	190	96	101

4.3.2.2 방법론

4.3.2.2.1 산정방법

질산 생산 부문의 경우 2007년 이후는 업체별 「사업장 명세서」의 N₂O 배출량¹⁹⁾을 합산하여 국가 배출량으로 보고하였으며, 2006년 이전은 2006 IPCC GL의 Tier 1 방법에 따라 질산 생산량과 배출 계수를 곱하여 배출량을 산정하였다.

〈질산 생산 부문 N₂O 배출량 산정식(Tier 1)〉

$$\text{N}_2\text{O 배출량} = \text{EF} \times \text{NAP}$$

N₂O 배출량 : 질산 생산에 따른 N₂O 배출량(kg N₂O)

EF : 질산 생산 시 배출계수(kg N₂O/ t 질산 생산량)

NAP : 질산 생산량(t)

자료: 2006 IPCC GL, Vol.3, Ch.3.3, Equation 3.5

19) 「사업장 명세서」에 보고된 배출량은 2006 IPCC GL 기본 배출계수(Tier 1)를 활용하여 감축량을 고려한 Tier 2 방법론에 따라 산정됨

4.3.2.2.2 배출계수

질산 생산 부문의 고압 및 중압 공정별 배출계수는 2006 IPCC GL 기본 배출계수를 적용하였다.

표 4-28 | 질산 생산 부문 배출계수

구분	계수	출처
중압 공정 배출계수	7.0 kg N ₂ O/t 질산 생산량	2006 IPCC GL
고압 공정 배출계수	9.0 kg N ₂ O/t 질산 생산량	

4.3.2.2.3 활동자료

질산 생산 부문의 경우 2007년 이후는 「사업장 명세서」와 「CDM 모니터링 보고서」에 보고한 자료를 활용하였으며, 2006년 이전 활동자료는 한국에너지공단의 사업장 조사자료를 활용하였다.

표 4-29 | 질산 생산 부문 활동자료 수집방법(1990-2023)

기간	활동자료	통계명	관리기관	대상가스
1990-2006	질산 생산량	사업장 조사자료	한국에너지공단	N ₂ O
2007-2014	질산 생산 시 N ₂ O 배출량	「CDM모니터링보고서」	기후에너지환경부	
2007-2023		「사업장 명세서」	UNFCCC	

표 4-30 | 질산 생산 부문 활동자료(1990-2023)

(단위: 천톤)

구분	1990	2000	2007	2010	2018	2021	2022	2023
질산 생산량	92	446	774	826	1,171	1,305	1,283	1,342

4.3.2.3 시계열 일관성

2006년 이전의 질산 생산 부문의 배출량은 2006 IPCC GL에 따른 일관된 방법론과 배출계수, 활동자료를 적용하고, 2007년 이후는 질산 생산업체가 모두 배출권거래제 대상업체로 지정됨에 따라 「사업장 명세서」를 활용하여 배출량의 정확성과 일관성을 확보하였다.

4.3.2.4 QA/QC

QA/QC는 제1장 서론 1.5절 내용과 동일하다.

4.3.2.5 재계산

재계산은 수행하지 않았다.

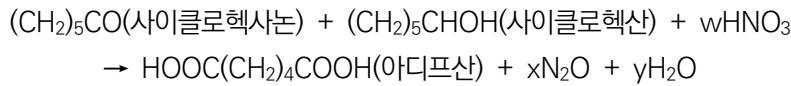
4.3.3 아디프산 생산(2.B.3.)

4.3.3.1 배출원 개요

2023년 기준	산정온실가스	방법론	배출계수	활동자료
	N ₂ O	Tier 2	PS	N ₂ O 배출량

아디프산(C₆H₁₀O₄)은 합성섬유, 코팅, 플라스틱, 우레탄폼, 합성고무, 합성윤활유 등 다양한 제품을 생산하기 위해 사용되는 원료로, 아디프산을 생산하기 위해 사이클로헥사논((CH₂)₅CO) 및 사이클로헥산((CH₂)₅CHOH)을 질산과 산화하는 과정에서 N₂O가 발생한다.²⁰⁾

〈아디프산 생산 시 N₂O 발생 메커니즘〉



4.3.3.2 방법론

4.3.3.2.1 산정방법

아디프산 생산 부문의 경우 2006년 이후는 「CDM 모니터링 보고서」와 「사업장 명세서」의 업체별 N₂O 배출량²¹⁾을 합산하여 국가 배출량으로 보고하였다. 2005년 이전은 2006 IPCC GL의 Tier 1 방법에 따라 아디프산 생산량과 배출계수를 곱하여 N₂O 배출량을 산정하였다.

〈아디프산 생산 부문 N₂O 배출량 산정식(Tier 1)〉

$$N_2O \text{ 배출량} = EF \times AAP$$

N ₂ O 배출량	: 아디프산 생산에 따른 N ₂ O 배출량 (kg N ₂ O)
EF	: 아디프산 생산 시 배출계수 (kg N ₂ O/ t 아디프산 생산량)
AAP	: 아디프산 생산량(t)

자료: 2006 IPCC GL, Vol.3, Ch.3.4, Equation 3.7

4.3.3.2.2 배출계수

아디프산 생산 부문의 N₂O 배출계수는 2006 IPCC GL 기본 배출계수를 적용하였다.

20) 아디프산은 단일업체에서 생산하고 있어 기업의 정보보호를 위해 활동자료 및 배출량을 기타(2.B.10.) 부문에 포함하여 보고함(E)

21) 「사업장 명세서」에 보고된 배출량은 2006 IPCC GL 기본 배출계수(Tier 1)와 사업장 배출계수(Tier 3)를 활용하여 감축량을 고려한 Tier 2 방법론에 따라 산정됨

| 표 4-31 | 아디프산 생산 부문 배출계수

구분	계수	출처
아디프산 생산 시 배출계수	300 kg N ₂ O/t 아디프산 생산량	2006 IPCC GL

4.3.3.2.3 활동자료

2006년 이후는 「CDM 모니터링 보고서」와 「사업장 명세서」의 업체별 N₂O 배출량 자료를 합산하여 국가 배출량으로 사용하였다. 2005년 이전은 한국에너지공단 아디프산 생산업체를 대상으로 직접 조사한 아디프산 생산량 자료를 활동자료로 사용하였다.

| 표 4-32 | 아디프산 생산 부문 활동자료 수집방법(1990-2023)

기간	활동자료	통계명	관리기관	대상가스
1990-2006	아디프산 생산량	사업장 조사자료	한국에너지공단	N ₂ O
2006	아디프산 생산 시 N ₂ O 배출량	「CDM 모니터링 보고서」	UNFCCC	
2007-2023		「사업장 명세서」	기후에너지환경부	

4.3.3.3 시계열 일관성

2005년 이전 아디프산 생산 부문의 배출량은 2006 IPCC GL에 따른 일관된 방법론과 배출계수, 활동자료를 적용하였다. 동일 사업장에서 2006년부터 CDM 사업이 추진됨에 따라 「CDM 모니터링 보고서」상의 N₂O 감축 후 배출량을 국가 배출량으로 활용하였으며, 2007년 이후는 동일 사업장이 배출권거래제 대상업체로 지정됨에 따라 「사업장 명세서」를 활용하여 배출량의 정확성과 일관성을 확보하였다.

4.3.3.4 QA/QC

QA/QC는 제1장 서론 1.5절 내용과 동일하다.

4.3.3.5 재계산

재계산은 수행하지 않았다.

4.3.4 카프로락탐, 글리옥살, 글리옥실산 생산(2.B.4.)

4.3.4.1 배출원 개요

2023년 기준	산정온실가스	방법론	배출계수	활동자료
	N ₂ O	Tier 3	PS	N ₂ O 배출량

카프로락탐($C_6H_{11}NO$)은 나일론-6 섬유와 플라스틱의 원료로 사용되며, 사이클로헥산($(CH_2)_5CHOH$)을 촉매 산화하여 카프로락탐을 생산하는 과정에서 N_2O 가 배출된다. 글리옥살($C_2H_2O_2$)은 주로 아크릴 수지, 살균제, 젤라틴 경화제 등의 가교제로 사용되며, 아세트알데하이드(CH_3CHO)를 산화하는 과정에서 N_2O 가 배출된다. 글리옥실산($C_2H_2O_3$)은 합성 향료, 농약 및 제약 중간체 등의 제조에 사용되며, 글리옥살을 산화하는 과정에서 N_2O 가 배출된다.

카프로락탐은 단일업체에서 생산하고 있어 기업의 정보보호를 위해 활동자료 및 배출량을 기타 (2.B.10.)에 포함하여 보고하였으며(IE), 글리옥살과 글리옥실산은 국내에 생산하는 업체가 없어 산정 제외하였다(NO).

4.3.4.2 방법론

4.3.4.2.1 산정방법

카프로락탐 생산 부문의 경우 2007년 이후는 업체별 「사업장 명세서」의 N_2O 배출량²²⁾을 합산하여 국가 배출량으로 보고하였으며, 2006년 이전은 2006 IPCC GL의 Tier 1 방법에 따라 카프로락탐 생산량과 배출계수를 곱하여 N_2O 배출량을 산정하였다.

〈카프로락탐 생산 부문 N_2O 배출량 산정식(Tier 1)〉

$$N_2O \text{ 배출량} = EF \times CP$$

N_2O 배출량	: 카프로락탐 생산에 따른 N_2O 배출량(kg N_2O)
EF	: 카프로락탐 생산 시 배출계수(kg N_2O / t 카프로락탐 생산량)
CP	: 카프로락탐 생산량(t)

자료: 2006 IPCC GL, Vol.3, Ch.3.5, Equation 3.9

4.3.4.2.2 배출계수

카프로락탐 생산 부문의 N_2O 배출계수는 2006 IPCC GL 기본 배출계수를 적용하였다.

표 4-33 | 카프로락탐 생산 부문 배출계수

구분	계수	출처
카프로락탐 생산 시 배출계수(라시히법)	9 kg N_2O /t 카프로락탐 생산량	2006 IPCC GL

4.3.4.2.3 활동자료

카프로락탐 생산 부문의 경우 2007년 이후는 「사업장 명세서」의 N_2O 배출량 자료를 직접 사용하

22) 「사업장 명세서」에 보고된 배출량은 사업장 배출계수(Tier 3)를 활용하여 감축량을 고려한 Tier 3 방법론에 따라 산정됨

였고, 2006년 이전은 「석유화학편람(한국석유화학협회)²³⁾」의 카프로락탐 생산량 자료를 활동자료로 사용하였다.

| 표 4-34 | 카프로락탐 생산 부문 연도별 활동자료 수집방법(1990-2023)

기간	활동자료	통계명	관리기관	대상가스
1990-2006	카프로락탐 생산량	「석유화학편람」	한국석유화학협회	N ₂ O
2007-2023	카프로락탐 생산 시 N ₂ O 배출량	「사업장 명세서」	기후에너지환경부	

4.3.4.3 시계열 일관성

2007년 이전 카프로락탐 생산 부문의 배출량은 2006 IPCC GL에 따른 일관된 방법론과 배출계수, 활동자료를 적용하였다. 2007년 이후는 동일 사업장이 배출권거래제 대상업체로 지정됨에 따라 「사업장 명세서」를 활용하여 배출량의 정확성과 일관성을 확보하였다.

4.3.4.4 QA/QC

QA/QC는 제1장 서론 1.5절 내용과 동일하다.

4.3.4.5 재계산

재계산은 수행하지 않았다.

4.3.5 카바이드 생산(2.B.5.)

4.3.5.1 배출원 개요

2023년 기준	산정온실가스	방법론	배출계수	활동자료
	CO ₂	Tier 2	D	칼슘카바이드 소비량

카바이드 종류는 실리콘카바이드(SiC)와 칼슘카바이드(CaC₂)가 있다. 실리콘카바이드(SiC)는 국내 일부 기업에서 생산한 이력이 있으나, 폴리실리콘(Si)을 원료로 실리콘카바이드(SiC)를 생산하여 온실 가스가 발생하지 않아 산정 제외하였다(NO).

칼슘카바이드는 석회와 석유코크스를 가열하여 칼슘카바이드를 생산하는 공정과 아세틸렌(C₂H₂)의 생산 원료로 칼슘카바이드가 소비되는 공정에서 CO₂가 배출된다. 기업의 정보보호를 위해 활동자료 및 배출량은 기타(2.B.10.) 부문에 포함하여 보고하였다(IE).

23) '한국석유화학협회'에서 '한국화학산업협회로 협회명 변경(2024.11)되었으나 국가 온실가스 통계 산정에 활용한 석유화학편람 발행 당시 기준인 과거 협회명으로 표기

4.3.5.2 방법론

4.3.5.2.1 산정방법

칼슘카바이드 생산에 따른 배출량은 2006 IPCC GL의 Tier 1 방법에 따라 카바이드 생산량에 배출계수를 곱하여 산정하고 칼슘카바이드 소비에 따른 배출량은 2006 IPCC GL의 Tier 2 방법에 따라 카바이드 소비량에 배출계수를 곱하여 CO₂ 배출량을 산정하였다.

〈칼슘카바이드 생산 부문 CO₂ 배출량 산정식(Tier 1)〉

$$\text{CO}_2 \text{ 배출량} = \text{AP} \times \text{EF}$$

CO₂ 배출량 : 칼슘카바이드 생산에 따른 CO₂ 배출량(t CO₂)
 AP : 칼슘카바이드 생산량(t)
 EF : 배출계수(t CO₂/t 칼슘카바이드 생산량)

자료: 2006 IPCC GL, Vol.3, Ch.3.6, Equation 3.11

〈칼슘카바이드 소비 부문 CO₂ 배출량 산정식(Tier 2)〉

$$\text{CO}_2 \text{ 배출량} = \text{AP} \times \text{EF}$$

CO₂ 배출량 : 칼슘카바이드 소비에 따른 CO₂ 배출량(t CO₂)
 AP : 칼슘카바이드 소비량(t)
 EF : 배출계수 (t CO₂/t 칼슘카바이드 소비량)

자료: 2006 IPCC GL, Vol.3, Ch.3.6, Equation 3.11

4.3.5.2.2 배출계수

카바이드 생산 부문의 CO₂ 배출계수는 2006 IPCC GL에서 제시한 기본 배출계수를 적용하였다.

| 표 4-35 | 카바이드 생산 부문 배출계수

구분	계수	출처
칼슘카바이드 생산 시 배출계수	1.090 t CO ₂ /t 칼슘카바이드 생산량	2006 IPCC GL
칼슘카바이드 소비 시 배출계수	1.100 t CO ₂ /t 칼슘카바이드 소비량	

4.3.5.2.3 활동자료

카바이드 생산량 및 소비량은 한국에너지공단인 칼슘카바이드 생산 및 소비 업체를 대상으로 직접 조사한 자료를 사용하였다.

| 표 4-36 | 카바이드 생산 부문 활동자료 수집방법(1990-2023)

기간	활동자료	통계명	관리기관	대상가스
1999-2005	칼슘카바이드 생산량	사업장 조사자료	한국에너지공단	CO ₂
1990-2023	칼슘카바이드 소비량			

4.3.5.3 시계열 일관성

카바이드 생산 부문은 전 시계열 동일한 방법론과 배출계수, 활동자료를 적용하였다.

4.3.5.4 QA/QC

QA/QC는 제1장 서론 1.5절 내용과 동일하다.

4.3.5.5 재계산

재계산은 수행하지 않았다.

4.3.6 석유화학제품 및 카본블랙 생산(2.B.8.)

4.3.6.1 배출원 개요

석유화학제품은 화석연료(천연가스 등)나 석유 정제품(납사 등)을 원료로 사용하여 생산되며, 우리나라에서는 주로 납사를 분해 설비(Naphtha Cracking Center, NCC)에 투입하여 에틸렌, 프로필렌 등 기초 유분이 생산되는 과정에서 CO₂ 및 CH₄가 배출된다. 석유화학 제품 및 카본블랙 생산 부문의 하위 배출 부문은 메탄올(2.B.8.a.), 에틸렌(2.B.8.b.), 이염화에틸렌 및 염화비닐 단량체(2.B.8.c.), 산화에틸렌(2.B.8.d.), 아크릴로니트릴(2.B.8.e.), 카본블랙(2.B.8.f.), 기타(2.B.8.g.) 부문이 있다. 메탄올은 국내 생산이 없어 산정 제외하였다(NO). 또한, 국내에서 생산 중이나 IPCC GL에 보고 배출원이 없는 BTX 생산은 기타(2.B.8.g.)에 하위 배출원으로 보고하였다.

석유화학제품 및 카본블랙 생산 부문 2023년 배출량은 28,269 천톤 CO₂-eq로 전년 대비 2,432 천톤 CO₂-eq (7.9%) 감소하였다. 에틸렌 생산 배출량이 2,765 천톤 CO₂-eq 감소하며 가장 크게 기여하였다. 그 외 이염화에틸렌 및 염화비닐 단량체 생산, 아크릴로니트릴 생산, 카본블랙 생산 배출량은 각각 97 천톤 CO₂-eq, 76 천톤 CO₂-eq, 14 천톤 CO₂-eq 감소하였고, 기타, 산화에틸렌은 각각 497 천톤 CO₂-eq, 24 천톤 CO₂-eq 증가하였다.

| 표 4-37 | 석유화학제품 및 카본블랙 생산 부문 온실가스 배출량(1990-2023)

(단위: 천톤 CO₂-eq)

구분	1990	2000	2007	2010	2018	2021	2022	2023
2.B.8.a. 메탄올	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
2.B.8.b. 에틸렌	4,082	15,695	20,337	15,655	20,004	22,187	19,704	16,938
2.B.8.c. 이염화에틸렌 및 염화비닐 단량체	135	270	244	442	959	1,267	1,289	1,192
2.B.8.d. 산화에틸렌	61	320	307	533	500	347	178	202
2.B.8.e. 아크릴로니트릴	25	170	225	257	269	685	440	364
2.B.8.f. 카본블랙	565	1,196	1,311	1,406	1,628	1,698	1,608	1,594
2.B.8.g. 기타	446	1,760	2,798	5,436	7,723	6,767	7,483	7,980
합계	5,314	19,411	25,221	23,731	31,082	32,951	30,701	28,269

4.3.6.2 에틸렌 생산(2.B.8.b.)

4.3.6.2.1 배출원 개요

2023년 기준	산정온실가스	방법론	배출계수	활동자료
	CO ₂	Tier 2	CS, D, OTH	원료(납사, 프로판, 부탄) 투입량, NCC 공정 제품 생산량

에틸렌(C₂H₄)은 주로 산화에틸렌, 에틸벤젠, 에탄올, 폴리에틸렌 등의 원료로 사용되며, 그 중 합성수지인 폴리에틸렌 제조의 원료로 많이 사용된다. 우리나라에서는 납사, 부탄, 프로판 등을 원료로 분해 설비(Naphtha Cracking Center, NCC)를 통해 열분해하여 에틸렌을 생산하고 있으며, 이 과정에서 CO₂ 및 CH₄가 배출된다. 에틸렌 생산 부문은 공정에 유입된 모든 탄소는 제품에 몰입된 양을 제외하고 전량 CO₂로 전환된다는 가정²⁴⁾을 기반으로 한 2006 IPCC GL의 Tier 2 방법론을 적용하였으므로 CH₄ 배출량은 산정 제외하였다(NO).

에틸렌 생산 부문 2023년 배출량은 16,938 천톤 CO₂-eq로 전년 대비 14.0% 감소하였다.

| 표 4-38 | 에틸렌 생산 부문 온실가스 배출량(1990-2023)

(단위: 천톤 CO₂-eq)

구분	1990	2000	2007	2010	2018	2021	2022	2023
에틸렌 생산	4,082	15,695	20,337	15,655	20,004	22,187	19,704	16,938

24) 2006 IPCC GL, Vol.3, Chapter 3, 3.67p 참고

4.3.6.2.2 방법론

4.3.6.2.2.1 산정방법

에틸렌 생산 부문은 2006 IPCC GL의 Tier 2 방법(탄소물질수지 방법)에 따라 에틸렌 생산 공정에 투입된 원료의 탄소량과 생산된 석유화학제품의 탄소량과의 차이를 CO₂로 환산하여 배출량을 산정하였다.

〈에틸렌 생산 부문 CO₂ 배출량 산정식(Tier 2)〉

$$\text{CO}_2 \text{ 배출량} = \sum_k (FA_{i,k} \times FC_k) - [PP_i \times PC_i + \sum_j (SP_{i,j} \times SC_j)] \times \frac{44}{12}$$

CO ₂ 배출량	: 에틸렌 생산에 따른 CO ₂ 배출량(t CO ₂)
FA _{i,k}	: 에틸렌(i)을 생산하기 위해 사용된 원료(k)의 연간 소비량(t)
FC _k	: 원료(k)의 탄소 함유량(t C/t 원료)
PP _i	: 에틸렌(i) 연간 생산량(t)
PC _i	: 에틸렌(i)의 탄소 함유량(t C/t 에틸렌)
SP _{i,j}	: 에틸렌(i) 생산공정에서 생산된 이차 제품(j) 연간 생산량(t)
SC _j	: 이차 제품(j)의 탄소 함유량(t C/t 이차제품)
44/12	: 이산화탄소 분자량 / 탄소 원자량

자료: 2006 IPCC GL, Vol.3, Ch.3.9, Equation 3.17

4.3.6.2.2.2 배출계수

에틸렌 생산 부문의 원료 및 생산 제품의 탄소 배출계수(탄소함량)는 2006 IPCC GL 기본 배출계수와 국가 고유 배출계수를 적용하였다. 다만, 분해가솔린(Raw Pyrolysis Gasoline, 이하 RPG)²⁵⁾의 경우 기본 배출계수와 국가 고유 배출계수가 부재하여 국내 연구보고서를 가공하여 배출계수를 적용하였다.

표 4-39 | 에틸렌 생산 부문 배출계수

구분		계수	출처
에틸렌 탄소함량		0.856 t C / t	2006 IPCC GL
프로필렌 탄소함량		0.8563 t C / t	
부타디엔 탄소함량		0.888 t C / t	
납사 탄소함량	1990-2006	20.0 t C / TJ	2006 IPCC GL
	2007-2011	18.6 t C / TJ	국가 고유 배출계수 ¹⁾
	2012-2016	19.2 t C / TJ	
	2017-2021	19.157 t C / TJ	
	2022-	19.083 t C / TJ	

25) 나프타 분해 공정에서 생산되는 탄화수소 혼합물로 주로 에틸렌, 프로필렌 등의 올레핀 생산과정의 부산물로 생성되며 방향족 화합물(벤젠, 톨루엔, 크실렌 등)의 원료로 사용됨

구분		계수	출처
부탄 탄소함량	1990-2006	17.2 t C / TJ	2006 IPCC GL
	2007-2011	18.1 t C / TJ	국가 고유 배출계수 ¹⁾
	2012-2016	18.1 t C / TJ	
	2017-2021	18.107 t C / TJ	
	2022-	18.094 t C / TJ	
프로판 탄소함량	1990-2006	17.2 t C / TJ	2006 IPCC GL
	2007-2011	17.6 t C / TJ	국가 고유 배출계수 ¹⁾
	2012-2016	17.6 t C / TJ	
	2017-2021	17.641 t C / TJ	
	2022-	17.630 t C / TJ	
RPG 탄소함량		0.8808 t C / t	국내 연구자료 가공 ²⁾

주: 1) 1980년부터 에너지열량 환산기준을 마련하여 발열량을 공표하고 있음. 2006년부터는 에너지법 시행규칙 제5조에 따라 총발열량 및 순발열량을 함께 공표하며, 5년마다 갱신함. 이를 반영한 국가 고유 탄소배출계수를 2007년 배출량부터 적용하고 있으며, 발열량 갱신에 따라 탄소 배출계수 역시 5년마다 갱신하고 있음

2) 「석유화학 산업의 납사 온실가스 배출량 산정 모델 개발 및 배출특성 연구(한국환경산업기술원, 2015)」

4.3.6.2.2.3 활동자료

에틸렌 생산 원료 중 부탄과 프로판의 투입량은 「에너지수급통계(에너지경제연구원)」 자료를 사용하였고, 그 외 원료인 납사 투입량과 NCC 공정 석유화학 제품별 생산량은 「석유화학편람(한국석유화학협회)」 자료를 사용하였다.

표 4-40 | 에틸렌 생산 부문 활동자료 수집방법(1990-2023)

기간	활동자료	통계명	관리기관	대상가스
1990-2023	원료(납사) 투입량, 에틸렌 등 NCC 공정 석유화학 제품생산량	「석유화학편람」	한국석유화학협회	CO ₂
	원료(부탄, 프로판) 투입량	「에너지수급통계」	에너지경제연구원	

표 4-41 | 에틸렌 생산 부문 활동자료(1990-2023)

(단위: 천톤)

구분	1990	2000	2007	2010	2018	2021	2022	2023
납사 소비량	4,371	16,345	26,920	20,110	26,153	28,537	25,321	21,756
부탄 소비량	NO	268	609	687	656	589	686	813
프로판 소비량	NO	574	664	1,011	2,362	3,301	3,973	3,192
에틸렌 생산량	1,399	5,500	9,022	6,979	9,335	10,377	9,594	8,243
프로필렌 생산량	699	2,750	4,511	3,489	4,667	5,188	4,797	4,122
C4 생산량	437	1,719	2,819	2,181	2,917	3,243	2,998	2,576
RPG 생산량	831	3,266	5,357	4,144	5,543	6,161	5,696	4,895
기타제품 생산량	1,005	3,953	6,484	5,016	6,709	7,458	6,895	5,925

4.3.6.2.3 시계열 일관성

에틸렌 생산 부문은 전 시계열 동일한 방법론과 배출계수, 활동자료를 적용하였다.

4.3.6.2.4 QA/QC

QA/QC는 제1장 서론 1.5절 내용과 동일하다.

4.3.6.2.5 재계산

에틸렌 생산 공정의 투입원료 중 하나인 프로판에 적용하는 국가 고유 탄소배출계수 기준이 변경(도시가스(LPG) → 프로판)되었고 생제품 중 RPG의 탄소함량이 수정되어²⁶⁾ 전 시계열 배출량을 재계산하였다. 또한, 「석유화학편람(한국석유화학협회)」의 2022년 납사 투입량이 개정되면서 배출량을 재계산하였다.

4.3.6.2.6 개선계획

에틸렌 생산 부문은 2023년 기준 주요 배출원에 해당하며 향후 기업별 에틸렌 생산공정의 물질수지 등을 분석하여 배출량 산정 방법을 고도화할 계획이다.

4.3.6.3 이염화에틸렌(EDC) 및 염화비닐 단량체(VCM) 생산(2.B.8.c.)

4.3.6.3.1 배출원 개요

	산정온실가스	방법론	배출계수	활동자료
2023년 기준	CO ₂	Tier 2	D	에틸렌 소비량, EDC 및 VCM 생산량

이염화에틸렌(EDC)은 염화비닐 단량체(VCM)의 원료 및 세척제, 용매, 살충제, 훈증제 등으로 사용되며, 에틸렌과 염소를 원료로 이염화에틸렌을 생산하는 직접 염소화(Direct Chlorination) 공정이나 에틸렌, 무수염산, 산소를 원료로 이염화에틸렌을 생산하는 순산소-염소화(Oxy-Chlorination) 공정에서 CO₂가 배출된다. 또한, 염화비닐 단량체는 폴리염화비닐(PVC)의 원료로 사용되며, 염화에틸렌을 열분해하여 염화비닐 단량체를 생산하는 과정에서 CO₂ 및 CH₄가 배출된다. 이염화에틸렌 및 염화비닐 단량체 생산 부문은 에틸렌 생산(2.B.8.b) 부문과 동일하게 탄소의 완전 산화를 가정하여²⁷⁾ CO₂ 배출량만 산정하였다.

이염화에틸렌(EDC) 및 염화비닐 단량체(VCM) 생산 부문 2023년 배출량은 1,192 천톤 CO₂-eq로 전년 대비 7.6% 감소하였다.

26) 사업장 조사자료(석유화학 산업의 납사 온실가스 배출량 산정 모델 개발 및 배출특성 연구(한국환경산업기술원, 2015))를 활용하여 재계산

27) 2006 IPCC GL, Vol.3, Chapter 3, 3.67p 참고

| 표 4-42 | EDC 및 VCM 생산 부문 온실가스 배출량(1990-2023)

(단위: 천톤 CO₂-eq)

구분	1990	2000	2007	2010	2018	2021	2022	2023
EDC 및 VCM 생산	135	270	244	442	959	1,267	1,289	1,192

4.3.6.3.2 방법론

4.3.6.3.2.1 산정방법

EDC 및 VCM 생산 부문은 2006 IPCC GL의 Tier 2 방법(탄소물질수지 방법)에 따라 EDC 및 VCM 생산 공정에 투입된 원료의 탄소량과 생산된 석유화학제품의 탄소량과의 차이를 CO₂로 환산하여 배출량을 산정하였다.

〈EDC 및 VCM 생산 부문 CO₂ 배출량 산정식(Tier 2)〉

$$\text{CO}_2 \text{ 배출량} = \sum_k (FA_{i,k} \times FC_k) - [PP_i \times PC_i + \sum_j (SP_{i,j} \times SC_j)] \times \frac{44}{12}$$

- CO₂ 배출량 : EDC 및 VCM 생산에 따른 CO₂ 배출량(t CO₂)
- FA_{i,k} : EDC 및 VCM(i)을 생산하기 위해 사용된 원료(k)의 연간 소비량(t)
- FC_k : 원료(k)의 탄소 함유량(t C/t 원료)
- PP_i : EDC 및 VCM(i) 연간 생산량(t)
- PC_i : EDC 및 VCM(i)의 탄소 함유량(t C/t EDC 또는 VCM)
- SP_{i,j} : EDC 및 VCM(i) 생산공정에서 생산된 이차 제품(j) 연간 생산량(t)
- SC_j : 이차 제품(j)의 탄소 함유량(t C/t 이차제품)
- 44/12 : 이산화탄소 분자량 / 탄소 원자량

자료: 2006 IPCC GL, Vol.3, Ch.3.9, Equation 3.17

4.3.6.3.2.2 배출계수

EDC 및 VCM 생산 부문의 원료 및 생산 제품의 탄소 배출계수(탄소함량)는 2006 IPCC GL 기본 배출계수를 적용하였다.

| 표 4-43 | EDC 및 VCM 생산 부문 배출계수

구분	계수	출처
에틸렌 탄소함량	0.856 t C / t 에틸렌	2006 IPCC GL
EDC 탄소함량	0.245 t C / t EDC	
VCM 탄소함량	0.384 t C / t VCM	

4.3.6.3.2.3 활동자료

EDC 및 VCM 생산 부문의 원료인 에틸렌의 소비량과 EDC 및 VCM 생산량은 「석유화학편람(한국석유화학협회)」 자료를 사용하였다.

| 표 4-44 | EDC 및 VCM 생산 부문 활동자료 수집방법(1990-2023)

기간	활동자료	통계명	관리기관	대상가스
1990-2023	에틸렌 소비량, EDC 및 VCM 생산량	「석유화학편람」	한국석유화학협회	CO ₂

| 표 4-45 | EDC 및 VCM 생산 부문 활동자료(1990-2023)

(단위: 천톤)

구분	1990	2000	2007	2010	2018	2021	2022	2023
에틸렌 소비량	318	906	1,001	1,126	1,443	1,642	1,614	1,620
EDC 생산량	352	781	804	985	1,423	1,634	1,632	1,710
VCM 생산량	388	1,329	1,545	1,567	1,628	1,717	1,640	1,675

4.3.6.3.3 시계열 일관성

EDC 및 VCM 생산 부문은 전 시계열 동일한 방법론과 배출계수, 활동자료를 적용하였다.

4.3.6.3.4 QA/QC

QA/QC는 제1장 서론 1.5절 내용과 동일하다.

4.3.6.3.5 재계산

「석유화학편람(한국석유화학협회)」의 2022년 에틸렌 소비량이 개정되면서 배출량을 재계산하였다.

4.3.6.4 산화에틸렌 생산(2.B.8.d.)

4.3.6.4.1 배출원 개요

2023년 기준	산정온실가스	방법론	배출계수	활동자료
	CO ₂	Tier 2	D	에틸렌 투입량, 산화에틸렌 생산량

산화에틸렌(C₂H₄O, EO)은 글리콜, 글리콜에테르, 알코올 및 아민 등의 원료로 사용되며, 에틸렌과 산소를 촉매와 반응시켜 산화에틸렌을 생산하는 과정에서 CO₂ 및 CH₄가 배출된다. 산화에틸렌 생산 부문은 에틸렌 생산(2.B.8.b) 부문과 동일한 방법을 사용하여 CO₂ 배출량만 산정하였다.

산화에틸렌 생산 부문 2023년 배출량은 202 천톤 CO₂-eq로 전년 대비 13.3% 증가하였다.

표 4-46 | 산화에틸렌 생산 부문 온실가스 배출량(1990-2023)

(단위: 천톤 CO₂-eq)

구분	1990	2000	2007	2010	2018	2021	2022	2023
산화에틸렌 생산	61	320	307	533	500	347	178	202

4.3.6.4.2 방법론

4.3.6.4.2.1 산정방법

산화에틸렌 생산 부문은 2006 IPCC GL의 Tier 2 방법(탄소물질수지 방법)에 따라 산화에틸렌 생산 공정에 투입된 원료의 탄소량과 생산된 석유화학제품의 탄소량과의 차이를 CO₂로 환산하여 배출량을 산정하였다.

〈산화에틸렌 생산 부문 CO₂ 배출량 산정식(Tier 2)〉

$$\text{CO}_2 \text{ 배출량} = \sum_k (FA_{i,k} \times FC_k) - [PP_i \times PC_i + \sum_j (SP_{i,j} \times SC_j)] \times \frac{44}{12}$$

- CO₂ 배출량 : 산화에틸렌 생산에 따른 CO₂ 배출량(t CO₂)
- FA_{i,k} : 산화에틸렌(i)을 생산하기 위해 사용된 원료(k)의 연간 소비량(t)
- FC_k : 원료(k)의 탄소 함유량(t C/t 원료)
- PP_i : 산화에틸렌(i) 연간 생산량(t)
- PC_i : 산화에틸렌(i)의 탄소 함유량(t C/t 산화에틸렌)
- SP_{i,j} : 산화에틸렌(i) 생산공정에서 생산된 이차 제품(j) 연간 생산량(t)
- SC_j : 이차 제품(j)의 탄소 함유량(t C/t 이차제품)
- 44/12 : 이산화탄소 분자량 / 탄소 원자량

자료: 2006 IPCC GL, Vol.3, Ch.3.9, Equation 3.17

4.3.6.4.2.2 배출계수

산화에틸렌 생산 부문의 원료 및 생산 제품의 탄소 배출계수(탄소함량)는 2006 IPCC GL 기본 배출계수를 적용하였다.

표 4-47 | 산화에틸렌 생산 부문 배출계수

구분	배출계수	출처
에틸렌 탄소함량	0.856 t C / t 에틸렌	2006 IPCC GL
산화에틸렌 탄소함량	0.545 t C / t 산화에틸렌	

4.3.6.4.2.3 활동자료

산화에틸렌 생산 부문의 원료인 에틸렌의 투입량과 산화에틸렌 생산량은 「석유화학편람(한국석유화학협회)」 자료를 사용하였다.

| 표 4-48 | 산화에틸렌 생산 부문 연도별 활동자료 수집방법(1990-2023)

기간	활동자료	통계명	관리기관	대상가스
1990-2023	에틸렌 투입량, 산화에틸렌 생산량	「석유화학편람」	한국석유화학협회	CO ₂

| 표 4-49 | 산화에틸렌 생산 부문 활동자료(1990-2023)

(단위: 천톤)

구분	1990	2000	2007	2010	2018	2021	2022	2023
에틸렌 투입량	140	728	763	1,041	1,158	938	726	577
산화에틸렌 생산량	189	983	1,045	1,368	1,568	1,300	1,052	805

4.3.6.4.3 시계열 일관성

산화에틸렌 생산 부문은 전 시계열 동일한 방법론과 배출계수, 활동자료를 적용하였다.

4.3.6.4.4 QA/QC

QA/QC는 제1장 서론 1.5절 내용과 동일하다.

4.3.6.4.5 재계산

「석유화학편람(한국석유화학협회)」의 2022년 에틸렌 소비량이 개정되면서 배출량을 재계산하였다.

4.3.6.5 아크릴로니트릴 생산(2.B.8.e.)

4.3.6.5.1 배출원 개요

2023년 기준	산정온실가스	방법론	배출계수	활동자료
	CO ₂	Tier 2	D	프로필렌 소비량, 아크릴로니트릴 생산량

아크릴로니트릴(C₃H₃N, AN)은 아크릴 섬유 또는 합성수지의 원료로 사용되며, 주로 금속 촉매를 통해 프로필렌(C₃H₆)을 암모니아와 산소로 산화하여 1차 제품인 아크릴로니트릴과 2차 제품인 아세토니트릴, 시안화수소를 생산하는 과정에서 CO₂ 및 CH₄가 배출된다. 아크릴로니트릴 생산 부문은 에틸렌 생산(2.B.8.b.) 부문과 동일한 방법을 사용하여 CO₂ 배출량만 산정하였다.

아크릴로니트릴 생산 부문 2023년 배출량은 364 천톤 CO₂-eq로 전년 대비 17.3% 감소하였다.

표 4-50 | 아크릴로니트릴 생산 부문 온실가스 배출량(1990-2023)

(단위: 천톤 CO₂-eq)

구분	1990	2000	2007	2010	2018	2021	2022	2023
아크릴로니트릴 생산	25	170	225	257	269	685	440	364

4.3.6.5.2 방법론

4.3.6.5.2.1 산정방법

아크릴로니트릴 생산 부문은 2006 IPCC GL의 Tier 2 방법(탄소물질수지 방법)에 따라 아크릴로니트릴 생산 공정에 투입된 원료의 탄소량과 생산된 석유화학제품의 탄소량과의 차이를 CO₂로 환산하여 배출량을 산정하였다.

〈아크릴로니트릴 생산 부문 CO₂ 배출량 산정식(Tier 2)〉

$$\text{CO}_2 \text{ 배출량} = \sum_k (FA_{i,k} \times FC_k) - [PP_i \times PC_i + \sum_j (SP_{i,j} \times SC_j)] \times \frac{44}{12}$$

CO₂ 배출량 : 아크릴로니트릴 생산에 따른 CO₂ 배출량(t CO₂)

FA_{i,k} : 아크릴로니트릴(i)을 생산하기 위해 사용된 원료(k)의 연간 소비량(t)

FC_k : 원료(k)의 탄소 함유량(t C/t 원료)

PP_i : 아크릴로니트릴(i) 연간 생산량(t)

PC_i : 아크릴로니트릴(i)의 탄소 함유량(t C/t 아크릴로니트릴)

SP_{i,j} : 아크릴로니트릴(i) 생산공정에서 생산된 이차 제품(j) 연간 생산량(t)

SC_j : 이차 제품(j)의 탄소 함유량(t C/t 이차제품)

44/12 : 이산화탄소 분자량 / 탄소 원자량

자료: 2006 IPCC GL, Vol.3, Ch.3.9, Equation 3.17

4.3.6.5.2.2 배출계수

아크릴로니트릴 생산 부문의 원료 및 생산 제품의 탄소 배출계수(탄소함량)은 2006 IPCC GL 기본 배출계수를 적용하였다.

표 4-51 | 아크릴로니트릴 생산 부문 배출계수

구분	배출계수	출처
프로필렌 탄소함량	0.8563 t C / t 프로필렌	2006 IPCC GL
아크릴로니트릴 탄소함량	0.6664 t C / t 아크릴로니트릴	
아세트오니트릴 탄소함량	0.5852 t C / t 아세트오니트릴	
시안화수소 탄소함량	0.4444 t C / t 시안화수소	

4.3.6.5.2.3 활동자료

아크릴로니트릴 생산 부문의 원료인 프로필렌의 소비량과 아크릴로니트릴 생산량은 「석유화학편람 (한국석유화학협회)」을 사용하였다. 아크릴로니트릴 생산 중 2차 제품으로 생산되는 아세토니트릴과 시안화수소의 생산량은 2006 IPCC GL 산정식에 따라 산정하였다.

〈아크릴로니트릴 생산 시 이차제품 생산량 산정식〉

$$SP_{acrylonitrile, j} = \sum (FP_{acrylonitrile} \times SSP_j)$$

$SP_{acrylonitrile, j}$: 아크릴로니트릴 생산에 의한 이차제품(j) 연간 생산량(t)

SSP_j : 아크릴로니트릴 1톤당 이차제품(j) 생산계수

자료: 2006 IPCC GL, Vol.3, Ch.3.9, Equation 3.19

표 4-52 | 아크릴로니트릴 생산 시 이차제품 생산계수

구분	계수	출처
아세토니트릴 생산계수	18.5 kg 아세토니트릴/t 아크릴로니트릴	2006 IPCC GL
시안화수소 생산계수	105 kg 시안화수소/t 아크릴로니트릴	

표 4-53 | 아크릴로니트릴 생산 부문 활동자료 수집방법(1990-2023)

기간	활동자료	통계명	관리기관	대상가스
1990-2023	프로필렌 소비량, 아크릴로니트릴 생산량	「석유화학편람」	한국석유화학협회	CO ₂

표 4-54 | 아크릴로니트릴 생산 부문 활동자료(1990-2023)

(단위: 천톤)

구분	1990	2000	2007	2010	2018	2021	2022	2023
프로필렌 소비량	52	355	520	593	724	883	720	636
아크릴로니트릴 생산량	52	356	530	604	755	786	686	615
아세토니트릴 생산량	1	7	10	11	14	15	13	11
시안화수소 생산량	6	37	56	63	79	83	72	65

4.3.6.5.3 시계열 일관성

아크릴로니트릴 생산 부문은 전 시계열 동일한 방법론과 배출계수, 활동자료를 적용하였다.

4.3.6.5.4 QA/QC

QA/QC는 제1장 서론 1.5절 내용과 동일하다.

4.3.6.5.5 재계산

「석유화학편람(한국석유화학협회)」의 2021-2022년 프로필렌 소비량이 개정되면서 배출량을 재계산하였다.

4.3.6.6 카본블랙 생산(2.B.8.f.)

4.3.6.6.1 배출원 개요

2023년 기준	산정온실가스	방법론	배출계수	활동자료
	CO ₂ , CH ₄	Tier 1	D	카본블랙 생산량

카본블랙은 타이어, 고무, 잉크, 도료 등의 원료로 사용되며, 석탄계의 크레오소트유(creosote) 또는 석유계의 증질유(FCC-oil) 등이 불완전 연소하여 카본블랙이 생산되는 과정에서 CO₂ 및 CH₄가 배출된다.

카본블랙 생산 부문 2023년 배출량은 1,594 천톤 CO₂-eq로 카본블랙 생산량 감소의 영향으로 전년 대비 0.8% 감소하였다.

| 표 4-55 | 카본블랙 생산 부문 온실가스 배출량(1990-2023)

(단위: 천톤 CO₂-eq)

구분	1990	2000	2007	2010	2018	2021	2022	2023
카본블랙 생산	565	1,196	1,311	1,406	1,628	1,698	1,608	1,594

4.3.6.6.2 방법론

4.3.6.6.2.1 산정방법

카본블랙 생산 부문은 2006 IPCC GL의 Tier 1 방법에 따라 카본블랙 생산량에 배출계수를 곱하여 CO₂ 및 CH₄ 배출량을 산정하였다.

〈카본블랙 생산 부문 CO₂ 배출량 산정식(Tier 1)〉

$$\text{CO}_2 \text{ 배출량} = \text{PP}_i \times \text{EF}_i$$

CO₂ 배출량 : 카본블랙 생산에 따른 CO₂ 배출량(t CO₂)

PP_i : 카본블랙 생산량(t)

EF_i : 카본블랙 CO₂ 배출계수(t CO₂/t 카본블랙)

자료: 2006 IPCC GL, Vol.3, Ch.3.9, Equation 3.15

〈카본블랙 생산 부문 CH₄ 배출량 산정식(Tier 1)〉

$$\text{CH}_4 \text{ 배출량} = \text{PP}_i \times \text{EF}_{\text{Pi}}$$

CH₄ 배출량 : 카본블랙 생산에 따른 CH₄ 배출량(kg CH₄)

PP_i : 카본블랙 생산량(t)

EF_{Pi} : 카본블랙 CH₄ 배출계수(kg CH₄/t 카본블랙)

자료: 2006 IPCC GL, Vol.3, Ch.3.9, Equation 3.24

4.3.6.6.2 배출계수

카본블랙 생산 부문의 공정별 CO₂ 및 CH₄ 배출계수는 2006 IPCC GL 기본 배출계수를 적용하였다.

표 4-56 | 카본블랙 생산 부문 배출계수

구분	계수	출처
Furnace Black Process(전체 원료)	2.62 t CO ₂ / t	2006 IPCC GL
Thermal Treatment	0.06 kg CH ₄ / t	

4.3.6.6.2.3 활동자료

「석유화학편람(한국석유화학협회)」의 카본블랙 생산량을 사용하였다.

표 4-57 | 카본블랙 생산 부문 활동자료 수집방법(1990-2023)

기간	활동자료	통계명	관리기관	대상가스
1990-2023	카본블랙 생산량	「석유화학편람」	한국석유화학협회	CO ₂ , CH ₄

표 4-58 | 카본블랙 생산 부문 활동자료(1990-2023)

(단위: 천톤)

구분	1990	2000	2007	2010	2018	2021	2022	2023
카본블랙 생산	215	456	500	536	621	648	613	608

4.3.6.6.3 시계열 일관성

카본블랙 생산 부문은 전 시계열 동일한 방법론과 배출계수, 활동자료를 적용하였다.

4.3.6.6.4 QA/QC

QA/QC는 제1장 서론 1.5절 내용과 동일하다.

4.3.6.6.5 재계산

재계산은 수행하지 않았다.

4.3.6.7 기타(2.B.8.g.)

4.3.6.7.1 배출원 개요

	산정온실가스	방법론	배출계수	활동자료
2023년 기준	CO ₂ , CH ₄	Tier 1,2	D, CS	스티렌 생산량, BTX 공정 납사 소비량

기타 부문에서는 스티렌과 BTX 생산을 하위 배출원으로 보고하였다.

스티렌은 폴리스티렌(polystyrene, PS)과 도료 등의 원료로 사용되며, 에틸렌(C₂H₄)과 벤젠(C₆H₆) 등이 촉매반응하여 생성된 에틸벤젠(C₈H₁₀)이 탈수소화되어 스티렌(C₈H₈)이 제조되는 과정에서 CH₄가 배출된다. BTX는 의약품, 농약, 향료, 화약 등의 원료로 사용되는 벤젠, 톨루엔, 자일렌 등의 기초유분을 통칭하며, 납사분해유 또는 납사개질유로부터 BTX를 추출하는 과정에서 CO₂가 배출된다.

기타 부문 2023년 배출량은 7,980 천톤 CO₂-eq로 전년 대비 6.6% 증가하였다. 스티렌의 경우 작년 대비 생산량이 감소하며 배출량 역시 감소하였고 BTX는 원료인 납사 소비량이 작년 대비 증가하며 배출량이 증가하였다.

| 표 4-59 | 기타 부문 온실가스 배출량(1990-2023)

(단위: 천톤 CO₂-eq)

구분	1990	2000	2007	2010	2018	2021	2022	2023
스티렌 생산	50	276	333	307	349	322	252	190
BTX 생산	397	1,483	2,465	5,130	7,373	6,445	7,231	7,790
합계	446	1,760	2,798	5,436	7,723	6,767	7,483	7,980

4.3.6.7.2 방법론

4.3.6.7.2.1 산정방법

스티렌 생산은 2006 IPCC GL의 Tier 1 방법에 따라 스티렌 생산량에 배출계수를 곱하여 CH₄ 배출량을 산정하였다.

〈스티렌 생산 부문 CH₄ 배출량 산정식(Tier 1)〉

$$\text{CH}_4 \text{ 배출량} = \text{활동자료} \times \text{배출계수}$$

CH₄ 배출량 : 스티렌 생산에 따른 CH₄ 배출량(kg CH₄)

활동자료 : 스티렌 생산량(t)

배출계수 : 스티렌 생산량의 배출계수(kg CH₄/t 스티렌 생산량)

자료: 2006 IPCC GL, Vol.3, Ch.3.9, Equation 3.24

BTX 생산은 2006 IPCC GL의 Tier 2 방법(탄소물질수지 방법)에 따라 BTX 생산 공정에 투입된 원료의 탄소량과 생산된 석유화학제품의 탄소량과의 차이를 CO₂로 환산하여 배출량을 산정하였다. 다만, BTX 생산 공정에서 생산된 석유화학제품의 생산량 관련 통계가 없어 BTX 생산 공정에 투입된 원료의 90%가 제품으로 몰입된다는 전문가 의견을 반영하여 배출량을 산정하였다.

〈BTX 생산 부문 CO₂ 배출량 산정식(Tier 2)〉

$$\text{CO}_2 \text{ 배출량} = \sum_k (FA_{i,k} \times FC_k) - [PP_i \times PC_i + \sum_j (SP_{i,j} \times SC_j)] \times \frac{44}{12}$$

CO₂ 배출량 : BTX 생산에 따른 CO₂ 배출량(t CO₂)

FA_{i,k} : BTX(i)을 생산하기 위해 사용된 원료(k)의 연간 소비량(t)

FC_k : 원료(k)의 탄소 함유량(t C/t 원료)

PP_i : BTX(i) 연간 생산량(t)

PC_i : BTX(i)의 탄소 함유량(t C/t BTX)

SP_{i,j} : BTX(i) 생산공정에서 생산된 이차 제품(j) 연간 생산량(t)

SC_j : BTX(j)의 탄소 함유량(t C/t 이차제품)

44/12 : 이산화탄소 분자량 / 탄소 원자량

자료: 2006 IPCC GL, Vol.3, Ch.3.9, Equation 3.17

4.3.6.7.2.2 배출계수

스티렌 생산의 경우, 2006 IPCC GL 산정방법 및 기본 배출계수 정보를 제공하고 있지 않기 때문에 1996 IPCC GL 기본 CH₄ 배출계수를 적용하였다. BTX 생산의 경우, 원료인 납사의 2006 IPCC GL 기본 배출계수(2006년 이전)와 국가 고유 배출계수(2007년 이후)를 적용하였다.

표 4-60 | 스티렌 생산 부문 배출계수

구분	계수	출처
스티렌 생산 배출계수	4 kg CH ₄ /t 스티렌 생산량	1996 IPCC GL

| 표 4-61 | BTX 생산 부문 배출계수

구분	계수	출처
납사 탄소함량	1990-2006	20.0 t C / TJ
	2007-2011	18.6 t C / TJ
	2012-2016	19.2 t C / TJ
	2017-2021	19.157 t C / TJ
	2022~	19.083 t C / TJ
		2006 IPCC GL
		국가 고유 배출계수 ¹⁾

주: 1) 1980년부터 에너지열량 환산기준을 마련하여 발열량을 공표하고 있음. 2006년부터는 에너지법 시행규칙 제5조에 따라 총발열량 및 순발열량을 함께 공표하며, 5년마다 갱신함. 이를 반영한 국가 고유 탄소배출계수를 2007년 배출량부터 적용하고 있으며, 발열량 갱신에 따라 탄소 배출계수 역시 5년마다 갱신하고 있음

4.3.6.7.2.3 활동자료

스티렌 생산량과 BTX 생산 공정에 투입된 납사 소비량은 「석유화학편람(한국석유화학협회)」 자료를 사용하였다.

| 표 4-62 | 기타 부문 연도별 활동자료 수집방법(1990-2023)

기간	활동자료	통계명	관리기관	대상가스
1990-2023	스티렌 생산량, BTX 공정 납사 소비량	「석유화학편람」	한국석유화학협회	CO ₂ , CH ₄

| 표 4-63 | 기타 부문 활동자료(1990-2023)

(단위: 천톤)

구분	1990	2000	2007	2010	2018	2021	2022	2023
스티렌 생산량	443	2,467	2,970	2,738	3,117	2,874	2,246	1,695
납사 소비량	1,196	4,470	7,925	16,492	23,955	20,939	23,703	25,535

4.3.6.7.3 시계열 일관성

기타 부문은 전 시계열 동일한 방법론과 배출계수, 활동자료를 적용하였다.

4.3.6.7.4 QA/QC

QA/QC는 제1장 서론 1.5절 내용과 동일하다.

4.3.6.7.5 재계산

「석유화학편람(한국석유화학협회)」의 2022년 납사 투입량이 개정되어 이를 반영하여 재계산하였다.

4.3.6.7.6 개선계획

향후 기업별 물질수지 등을 분석하여 스티렌 생산 및 BTX 생산 공정 배출량 산정방법을 고도화할 계획이다.

4.3.7 불소화합물 생산(2.B.9.)

4.3.7.1 배출원 개요

불소화합물 생산 부문은 HCFC-22 및 HFC-134a, SF₆, NF₃ 등의 불소화합물을 생산하는 과정에서 대기 중으로 방출되는 불소계 온실가스(F-gases)를 산정하며, 하위 배출 부문으로는 HCFC-22 생산과정에서 발생하는 부산물 배출(2.B.9.a.)과 HFC-134a 및 SF₆, NF₃ 등 불소화합물을 생산하는 과정에서 발생하는 탈루 배출(2.B.9.b.) 부문이 있다.

하위 부문 중 부산물 배출(2.B.9.a.) 부문은 HCFC-22 생산과정에서 발생하는 HFC-23 배출량을 보고하며, 탈루 배출(2.B.9.b.) 부문은 NF₃ 생산과정에서 탈루되는 NF₃ 배출량을 보고한다. HFC-134a는 국내에서 생산하지 않아 “NO”로 보고하였고, SF₆ 배출량의 경우 현재 활용 가능한 활동자료가 부재하여 “NE”²⁸⁾로 보고하고 있으나 향후 기초통계 확보 등 개선 조치를 통하여 통계 완전성을 보완할 계획이다.

불소화합물 생산 부문 2023년 배출량은 55 천톤 CO₂-eq으로 전년 대비 41.8% 감소하였다.

표 4-64 | 불소화합물 생산 부문 온실가스 배출량(1990-2023)

(단위: 천톤 CO₂-eq)

구분	1990	2000	2007	2010	2018	2021	2022	2023
부산물 배출	1,042	3,430	0.12	0.13	NO	NO	NO	NO
탈루 배출	NO	NO	NO	29	88	96	95	55
합계	1,042	3,430	0.12	29	88	96	95	55

4.3.7.2 부산물 배출(2.B.9.a.)

4.3.7.2.1 배출원 개요

부산물 배출 부문에서는 HCFC-22 생산과정에서 발생하는 부산물(HFC-23)이 대기 중으로 방출되는 배출량을 보고하였다. 2003년부터 2013년 4월까지 CDM 감축사업이 실시되어 「CDM 모니터링 보고서」와 온실가스목표관리제 및 배출권거래제 「사업장 명세서」 자료를 참고하여 온실가스 감축 실적을 배출량 산정에 반영하였다. 2013년 5월부터는 HCFC-22 생산 중에 발생하는 HFC-23을 전량

28) 국내에 활용 가능한 활동자료가 없고 배출량이 미미(MPG 지침 32조에 따른 국가 총배출량 중 0.05% 이하의 소규모 배출원)할 것으로 추정되어 “NE”로 보고함

포집하여 제품으로 판매하고 있으므로²⁹⁾ 2014년부터 부산물 배출량 산정에서 제외하였다(NO).

| 표 4-65 | 부산물 배출 부문 온실가스 배출량(1990~2023)

(단위: 천톤 CO₂-eq)

구분	1990	2000	2007	2010	2018	2021	2022	2023
부산물 배출	1,042	3,430	0.12	0.13	NO	NO	NO	NO

4.2.7.2.2 방법론

4.3.7.2.2.1 산정방법

부산물 배출 부문의 경우 2002년 이전에는 2006 IPCC GL의 Tier 1 방법에 따라 HCFC-22 생산량과 배출계수를 곱하여 배출량을 산정하였다. 2003년부터는 HCFC-22 생산업체가 부산물인 HFC-23을 감축하기 위한 저감 기술을 도입하였으므로 HCFC-22 생산량과 배출계수, 저감기술 도입 후 배출비율이 고려된 2006 IPCC GL의 Tier 2 방법에 따라 HFC-23 배출량을 산정하였다.

〈HCFC-22 생산 시 부산물 배출량 산정식(Tier 1)〉

$$\text{HFC-23 배출량} = \text{EF} \times \text{P}$$

HFC-23 배출량 : HCFC-22생산에 의한 HFC-23 부산물의 배출량(kg HFC-23)

EF : HFC-23 기본배출계수(kg HFC-23/kg HCFC-22)

P : HCFC-22 생산량(kg)

자료: 2006 IPCC GL, Vol.3, Ch.3.10, Equation 3.30

〈HCFC-22 생산 시 부산물 배출량 산정식(Tier 2)〉

$$\text{HFC-23 배출량} = \text{EF} \times \text{P} \times \text{F}$$

HFC-23 배출량 : HCFC-22생산에 의한 HFC-23 부산물의 배출 (kg HFC-23)

EF : HFC-23 기본배출계수(kg HFC-23/kg HCFC-22)

P : HCFC-22 생산량(kg)

F : 저감기술 도입 후 배출 비율

자료: 2006 IPCC GL, Vol.3, Ch.3.10, Equation 3.31

4.3.7.2.2.2 배출계수

부산물 배출 부문은 2002년 이전에는 2006 IPCC GL 기본 배출계수를 사용하였고, 2003년부터 2013년까지는 HCFC-22 생산업체가 「CDM 모니터링 보고서」에 보고한 사업장 배출계수를 적용하였다.

29) 냉매 가스 등의 목적으로 판매·사용되는 양은 오존층파괴물질 대체물질 사용 부문(2.F.)의 배출량에 포함되어 보고됨

| 표 4-66 | 불소화합물 생산 중 부산물 배출 부문 기본 배출계수

구분	계수	출처
HFC-23 배출계수	0.04 kg HFC-23/kg HCFC-22	2006 IPCC GL

4.3.7.2.2.3 활동자료

부산물 배출 부문의 활동자료는 HCFC-22 생산량이며 2007-2013년은 「CDM 모니터링 보고서」 및 「사업장 명세서」 자료, 1990-2006년은 한국정밀화학산업진흥회이 생산업체를 대상으로 직접 조사한 자료를 사용하였다.

| 표 4-67 | 불소화합물 생산 중 부산물 배출 부문 활동자료 수집방법(1990-2023)

기간	활동자료	통계명	관리기관	대상가스
1990-2006	HCFC-22 생산량	불소화합물 통계자료	한국정밀화학산업진흥회	HFC-23
2003-2012		「CDM모니터링보고서」	UNFCCC	
2007-2023		「사업장 명세서」	기후에너지환경부	

| 표 4-68 | 불소화합물 생산 중 부산물 배출 부문 활동자료(1990-2023)

(단위: 천톤)

구분	1990	2000	2007	2010	2018	2021	2022	2023
HCFC-22 생산량	2.1	6.9	6.9	7.6	7.8	7.3	7.4	6.7

4.3.7.2.3 시계열 일관성

부산물 배출 부문은 2003년부터 감축 사업이 시작됨에 따라 2002년 이전에는 2006 IPCC GL의 Tier 1 방법에 따라 2006 IPCC GL에서 제시한 공정 유형별 배출계수를 사용하여 배출량을 산정하였으며, 동일 사업장에서 2003년부터 2013년까지는 CDM 사업을 추진함에 따라 「CDM 모니터링 보고서」에 보고한 2006 IPCC GL의 Tier 2 방법과 사업장 고유 배출계수를 사용하여 부산물 배출의 HFC-23 배출량을 산정하였다.

2007년 이후는 동일 사업장이 온실가스목표관리제 및 배출권거래제 대상업체로 지정됨에 따라 「사업장 명세서」를 활용하여 배출량의 정확성과 일관성을 확보하였다. 2006년 이전은 한국정밀화학산업진흥회의 불소화합물 통계자료를 사용하였다. 국내에서는 단일업체에서 HCFC-22를 생산하므로 2007년 전후 통계자료의 시계열 일관성을 확보할 수 있다.

4.3.7.2.4 QA/QC

QA/QC는 제1장 서론 1.5절 내용과 동일하다.

4.3.7.2.5 재계산

재계산은 수행되지 않았다.

4.3.7.3 탈루 배출(2.B.9.b.)

4.3.7.3.1 배출원 개요

2023년 기준	산정온실가스	방법론	배출계수	활동자료
	NF ₃	Tier 1	D	NF ₃ 생산량

탈루 배출 부문에서는 직접 불소화 공법으로 NF₃를 생산하는 과정에서 생산된 NF₃ 중 일부가 탈루되어 대기 중으로 방출되는 배출량을 보고하였다.

탈루 배출 부문 2023년 배출량은 55 천톤 CO₂-eq로 NF₃ 생산량이 감소하며 전년 대비 41.8% 감소하였다.

| 표 4-69 | 불소화합물 생산 중 탈루 배출 부문 온실가스 배출량(1990-2023)

(단위: 천톤 CO₂-eq)

구분	1990	2000	2007	2010	2018	2021	2022	2023
탈루 배출	NO,NE	NO,NE	NO,NE	29	88	96	95	55

4.3.7.3.2 방법론

4.3.7.3.2.1 산정방법

탈루 배출 부문은 2006 IPCC GL의 Tier 1 방법에 따라 NF₃ 생산량과 배출계수를 곱하여 NF₃ 배출량을 산정하였다.

〈NF₃ 생산 시 탈루 배출량 산정식(Tier 1)〉

$$\text{NF}_3 \text{ 배출량} = \text{EF} \times \text{P}$$

NF₃ 배출량 : NF₃ 생산 시 NF₃ 배출량(kg NF₃)

EF : NF₃ 배출계수(kg NF₃ 탈루/kg NF₃ 생산)

P : NF₃ 생산량(kg)

자료: 2006 IPCC GL, Vol.3, Ch.3.10.2, Equation 3.41

4.3.7.3.2.2 배출계수

탈루 배출 부문의 NF₃ 생산 시 탈루 배출계수는 2006 IPCC GL 기본 배출계수를 적용하였다.

| 표 4-70 | 불소화합물 생산 중 탈루 배출 부문 배출계수

구분	계수	출처
NF ₃ 생산 시 탈루 배출계수	0.005 kg NF ₃ / kg NF ₃	2006 IPCC GL

4.3.7.3.2.3 활동자료

한국에너지공단이 사업장을 대상으로 직접 조사한 NF₃ 자료를 사용하였다.

| 표 4-71 | 불소화합물 생산 중 탈루 배출 부문 활동자료 수집방법(1990-2023)

기간	활동자료	통계명	관리기관	대상가스
1990-2023	NF ₃ 생산량	사업장 조사자료	한국에너지공단	NF ₃

| 표 4-72 | 불소화합물 생산 중 탈루 배출 부문 활동자료(1990-2023)

(단위: 천톤)

구분	1990	2000	2007	2010	2018	2021	2022	2023
NF ₃ 생산량	NO	NO	NO	0.4	1.1	1.19	1.17	0.68

4.3.7.3.3 시계열 일관성

탈루 배출 부문은 전 시계열 동일한 방법론과 배출계수, 활동자료를 적용하였다.

4.3.7.3.4 QA/QC

QA/QC는 제1장 서론 1.5절 내용과 동일하다.

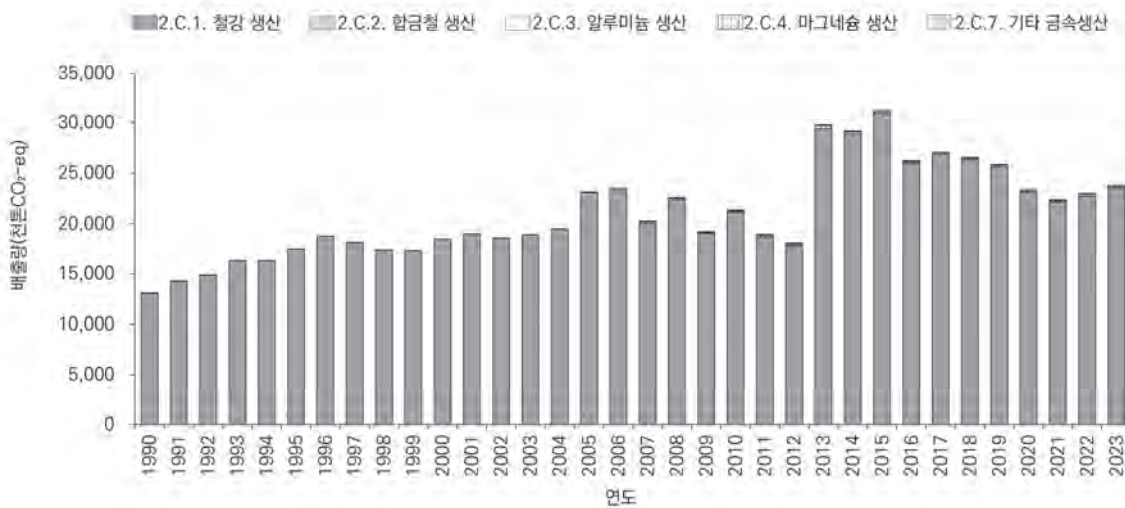
4.3.7.3.5 재계산

재계산은 수행하지 않았다.

4.4 금속산업(2.C.)

금속산업 부문은 광석에서 금속을 추출하는 야금 공정에서 발생하는 CO₂, CH₄, HFCs, PFCs, SF₆ 배출량을 산정하며, 하위 배출 부문은 철강 생산(2.C.1.), 합금철 생산(2.C.2.), 알루미늄 생산(2.C.3.), 마그네슘 생산(2.C.4.), 납 생산(2.C.5.), 아연 생산(2.C.6.), 기타 금속 생산(2.C.7.)이 포함된다. 국내 금속산업 업체의 정보보호를 위하여 납 생산, 아연 생산 부문의 배출량은 기타 금속 생산(2.C.7.) 부문에 포함하여 보고하였다(IE).

2023년 금속산업 부문 배출량은 23,765 천톤 CO₂-eq로 산업공정 분야 배출량의 19.6%를 차지한다. 하위 부문별 배출 비중은 철강 생산이 99.0%로 대부분을 차지하고 있으며, 철강 생산 외 금속산업의 공정배출은 1.0% 이하 수준으로 나타났다. 2023년 금속산업 부문 배출량은 전년 대비 726 천톤 CO₂-eq (3.2%) 증가하였는데 특히 철강 생산 배출량이 745 천톤 CO₂-eq 증가하며 가장 크게 기여하였다. 마그네슘 생산 배출량은 20 천톤 CO₂-eq 감소하였다.



| 그림 4-5 | 금속산업 부문 온실가스 배출량(1990-2023)

| 표 4-73 | 금속산업 부문별 온실가스 배출량(1990-2023)

구분	(단위: 천톤 CO ₂ -eq)							
	1990	2000	2007	2010	2018	2021	2022	2023
2.C.1. 철강 생산	13,041	18,481	20,056	21,157	26,328	22,202	22,774	23,519
2.C.2. 합금철 생산	IE, NO	IE, NO	11	16	1	2	2	0.5
2.C.3. 알루미늄 생산	23	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
2.C.4. 마그네슘 생산	1	17	173	148	151	146	205	185
2.C.5. 납 생산	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE
2.C.6. 아연 생산	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE
2.C.7. 기타 금속 생산*	NE, NO	NE, NO	57	72	84	75	59	61

* 납 생산(2.C.5.), 아연 생산(2.C.6.) 부문의 배출량을 기타 금속 생산(2.C.7.) 부문에 통합 보고(IE)

4.4.1 철강 생산(2.C.1.)

4.4.1.1 배출원 개요

	산정온실가스	방법론	배출계수	활동자료
2023년 기준	CO ₂	Tier 2	CS, D	고로공정 생산·투입량, 전극봉 수입,수출량, 탄산염 소비량

철강 생산 부문에서는 철강을 생산하는 과정에서 발생하는 CO₂ 및 CH₄를 산정하며, 세부 배출원으로는 강철, 선철, 직접환원철, 소결물, 펠릿 생산 공정이 포함된다. 국내 철강제품 생산 공정은 크게 일관제철 공정과 전기로 공정으로 나뉜다. 일관제철 공정은 코크스 공정에서 생산된 코크스와 소결물에서 생산된 소결물 등을 고로(blast furnace)에 투입하여 선철(pig iron)을 생산하고 이를 전로(basic oxygen furnace)에 투입하여 강(steel)을 만드는 공정으로, 공정에서 소비되는 환원제에 의해 CO₂ 및 CH₄가 배출된다. 다만, 공정에 유입된 모든 탄소는 전량 CO₂로 전환된다는 가정³⁰⁾을 기반으로 한 2006 IPCC GL의 Tier 2 방법론을 적용하였으므로 CH₄ 배출량은 산정 제외하였다(NO).

전기로(electric arc furnace) 공정은 고철 등의 철 스크랩을 전기로에 투입하여 고온의 아크열로 철스크랩을 녹여 강(steel)을 생산하는 공정으로, 탄소전극이 소비되는 과정에서 CO₂가 발생한다. 또한, 철 및 강을 생산하는 과정에서 불순물을 제거하기 위해 사용하는 탄산염의 소비로 CO₂가 발생한다.

하위 부문 중 직접환원철(2.C.1.c.) 생산과 펠릿(2.C.1.e.) 생산은 국내에 생산 공정이 없어 배출량 산정에서 제외하였다(NO). 또한, 강철, 선철, 소결물 생산 공정별로 구분되는 활동자료가 존재하지 않아 강철(2.C.1.a.) 생산 부문에 통합 보고하였다(IE).

2023년 철강 생산 부문 배출량은 23,519 천톤 CO₂-eq로 철강 생산 시 원료 순 소비량이 전년 대비 증가하며 3.3% 증가하였다.

| 표 4-74 | 철강 생산 부문 온실가스 배출량(1990-2023)

(단위: 천톤 CO₂-eq)

구분	1990	2000	2007	2010	2018	2021	2022	2023
고로	10,525	14,755	15,520	17,811	21,828	17,674	18,896	19,658
전기로	59	123	150	148	133	127	107	91
탄산염 소비	2,457	3,603	4,385	3,198	4,368	4,401	3,771	3,770
합계	13,041	18,481	20,056	21,157	26,328	22,202	22,774	23,519

30) 2006 IPCC GL 3.67p 참고

4.4.1.2 방법론

4.4.1.2.1 산정방법

철강 생산 부문은 2006 IPCC GL의 Tier 2 방법(탄소물질수지 방법)에 따라 철 및 강 생산 공정에 투입된 원료의 전체 탄소량과 생산된 제품의 전체 탄소량과의 차이를 CO₂로 환산하여 배출량을 산정하였다.

〈철강 생산 부문 CO₂ 배출량 산정식(Tier 2)〉

CO₂ 배출량

$$= [PC \times C_{pc} + \sum_a (COB_a \times C_a) + CI \times C_{CI} + CE \times C_{CE} + \sum_b (O_b \times C_b) + COG \times C_{COG} - S \times C_S - IP \times C_{IP} - BG \times C_{BG}] \times \frac{44}{12} + L \times E_L + D \times E_D + M \times E_M$$

CO ₂ 배출량	: 고로 부문의 CO ₂ 배출량(t CO ₂)
PC	: 강 생산시 소모된 코크스량(t)
COB _a	: 고로에서 소모된 코크스 오븐 부산물(a)의 양(t)
CI	: 고로에 투입된 석탄량(t)
L	: 강 생산시 소모된 석회석의 양(t)
D	: 강 생산시 소모된 백운석의 양(t)
M	: 강 생산시 소모된 마그네사이트의 양(t)
CE	: 전기로에서 소모된 탄소 전극봉의 양(t)
O _b	: 강 생산시 소모된 기타 탄소성분과 공정 물질(b)의 양(t)
COG	: 고로에서 소모된 코크스로가스(COG) 량(m ³)
S	: 생산된 철강량(t)
IP	: 강으로 환원되지 않은 철의 양(t)
BG	: 외부로 옮겨진 고로가스량(m ³)
C _x	: x 물질의 탄소 함량(t C/t 또는 m ³)
E _i	: 탄산염별(석회석, 백운석, 마그네사이트) 배출계수(t CO ₂ /t)

자료: 2006 IPCC GL, Vol.3, Ch.4.2, Equation 4.9

4.4.1.2.2 배출계수

철강 생산 부문의 전극봉 및 탄산염은 2006 IPCC GL에서 제시한 기본 배출계수를 적용하였고, 고로 공정의 투입 원료 및 생산 제품에 대한 탄소 배출계수(탄소함량)는 국가 고유 배출계수³¹⁾를 적용하였다.

31) 국내 일관제철공정 3개 사업장에서 보고한 사업장 명세서(2017-2019)값을 기준으로 개발(2021년 승인)

| 표 4-75 | 철강 생산 부문 배출계수

구분	계수	출처
코크스 탄소함량	0.8651 t C/t	국가 고유 배출계수
기타유연탄 탄소함량	0.7929 t C/t	
원료탄 탄소함량	0.7707 t C/t	
고로가스(BFG) 탄소함량	0.1873 t C/t	
코크스로가스(COG) 탄소함량	0.4169 t C/t	
기타석탄가스(FOG) 탄소함량	0.2735 t C/t	
전극봉 배출계수	0.82 t C/t	2006 IPCC GL
석회석 배출계수	0.43971 t CO ₂ /t	
백운석 배출계수	0.47732 t CO ₂ /t	
마그네사이트 배출계수	0.52197 t CO ₂ /t	

4.4.1.2.3 활동자료

철강 생산 부문의 고로 및 전기로 공정의 활동자료로 「에너지수급통계(에너지경제연구원)」와 수출입 무역통계(관세청) 자료를 사용하였다. 탄산염 소비량의 경우 2007년 이후는 「사업장 명세서」, 2006년 이전은 「철강통계연보(철강협회)」자료를 사용하였다.

| 표 4-76 | 철강 생산 부문 활동자료 수집방법(1990-2023)

기간	활동자료	통계명	관리기관	대상가스
1990-2023	코크스·원료탄·기타유연탄·COG·BFG·FOG 투입량, BFG·FOG 생산량	「에너지수급통계」	에너지경제연구원	CO ₂
	전극봉 수입량, 수출량	수출입 무역통계	관세청	
1990-2006	탄산염 소비량	「철강통계연보」	한국철강협회	
2007-2023		「사업장 명세서」	기후에너지환경부	

| 표 4-77 | 철강 생산 부문 고로 공정 원료 투입량 및 제품 생산량(1990-2023)

(단위: 천TOE)

구분	1990	2000	2007	2010	2018	2021	2022	2023
원료탄(+)	365	2,635	1,488	1,504	839	998	900	909
기타유연탄(+)	NO	NO	2,578	3,439	4,849	4,791	4,134	4,362
코크스(+)	5,194	6,584	6,929	8,355	11,098	10,278	9,829	10,086
COG(+)	208	258	249	282	579	622	594	604
BFG(-)	1,331	2,114	2,473	3,319	4,196	4,200	3,778	3,858
FOG(-)	264	677	802	727	1,277	1,358	1,186	1,264

주: (+) 원료탄, 기타유연탄, 코크스, COG의 경우 고로 공정에 투입되는 양

(-) BFG, FOG의 경우 고로 공정에서 발생하는 부생가스의 양에서 고로 공정으로 재투입되는 양을 차감한 양

| 표 4-78 | 철강 생산 부문 전기로 공정 전극봉 순수입량(1990-2023)

(단위: 천톤)

구분	1990	2000	2007	2010	2018	2021	2022	2023
전극봉 순수입량	20	41	50	49	44	42	36	30

| 표 4-79 | 철강 생산 부문탄산염 소비량(1990-2023)

(단위: 천톤)

구분	1990	2000	2007	2010	2018	2021	2022	2023
석회석 소비량	4,998	7,498	9,020	6,526	9,437	9,324	7,977	7,953
백운석 소비량	544	640	878	688	457	632	552	572
마그네사이트 소비량	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO

4.4.1.3 시계열 일관성

철강 생산 부문 중 고로 및 전기로 공정은 전 시계열 동일한 방법론과 배출계수, 활동자료를 적용하였다. 탄산염 소비 공정은 전 시계열 일관된 방법론과 배출계수를 적용하고 있으며 활동자료의 경우 2006년 이전은 「철강통계연보(한국철강협회)」 자료를 활용하고, 2007년 이후는 모든 사업장이 배출권거래제 대상업체로 지정됨에 따라 「사업장 명세서」를 활용하여 배출량의 정확성과 일관성을 확보하였다.

4.4.1.4 QA/QC

QA/QC는 제1장 서론 1.5절 내용과 동일하다.

4.4.1.5 재계산

철강 생산 부문은 기초통계인 「에너지수급통계(에너지경제연구원)」의 고로공정 부생가스(고로가스, 기타석탄가스) 생산량이 2025년 개정되면서 1996-1997, 2008-2022년 고로 배출량을 재계산하였다.

4.4.2 합금철 생산(2.C.2.)

4.4.2.1 배출원 개요

2023년 기준	산정온실가스	방법론	배출계수	활동자료
	CO ₂	Tier 2	D	탄산염 소비량

합금철은 실리콘, 망간, 크롬 등과 같은 금속과 철을 녹여 생산된 제품으로 합금철 생산 공정에서 탄소전극, 환원제, 탄산염 소비에 따라 CO₂가 배출된다. 탄소전극 소비에 따른 배출량은 철강 생산(2.C.1.)에 합산하여 보고하였고(IE), 환원제 소비에 따른 배출량은 기초통계에서 활동자료가 구분되지 않아 에너지 분야 철강(1.A.2.a.)에 합산하여 보고하였다(IE). 따라서, 합금철 생산 부문(2.C.2.)에서는 합금철 생산 공정에서 석회석 및 백운석 소비에 따른 CO₂ 배출량만 보고한다³²⁾.

32) 활동자료가 최초로 수집된 2007년 배출량이 매우 미미(MPG 지침 32조에 따른 국가 총배출량 중 0.05% 이하의 소규모 배출원)하고, 2006년 이전은 배출이 없거나 소규모 배출원으로 추정됨에 따라 “NE”로 보고함

합금철 생산 부문 2023년 배출량은 0.5 천톤 CO₂-eq로 석회석 소비가 전년 대비 74.9%로 큰 폭으로 감소하였다. 석회석 소비량은 전년 대비 3.4 천톤(79.3%) 감소하였으며 이는 일부 사업장에서 기존 석회석 원료를 생석회로 변경함에 따라 감소하였다.

| 표 4-80 | 합금철 생산 부문 온실가스 배출량(1990-2023)

(단위: 천톤 CO₂-eq)

구분	1990	2000	2007	2010	2018	2021	2022	2023
합금철 생산	IE*,NO	IE*,NO	11	16	0.91	1.92	1.91	0.48

* 주: 탄소전극 소비에 따른 배출량은 철강 생산(2.C.1.)에 합산 보고(IE), 환원제 소비에 따른 배출량은 기초통계에서 활동자료가 구분되지 않아 에너지 분야 철강(1.A.2.a.)에 합산 보고(IE)

4.4.2.2 방법론

4.4.2.2.1 산정방법

합금철 생산 부문은 2006 IPCC GL의 Tier 2 방법에 따라 합금철 생산 공정에서의 탄산염 소비량과 배출계수를 곱하여 CO₂ 배출량을 산정하였다.

〈합금철 생산 시 탄산염 소비에 따른 CO₂ 배출량 산정식(Tier 2)〉

$$\text{CO}_2 \text{ 배출량} = M \times EF$$

CO ₂ 배출량	:	합금철 생산시 탄산염 사용에 따른 CO ₂ 배출량(t CO ₂)
M	:	탄산염(석회석, 백운석, 마그네사이트) 소비량(t)
EF	:	탄산염별 배출계수(t CO ₂ /t 탄산염 소비량)

자료: 2006 IPCC GL, Vol.3, Ch.4.3, Equation 4.16

4.4.2.2.2 배출계수

합금철 생산 부문의 석회석 및 백운석 소비에 따른 CO₂ 배출계수는 2006 IPCC GL 기본 배출계수를 적용하였다.

| 표 4-81 | 합금철 생산 부문 배출계수

구분	계수	출처
석회석 소비 시 배출계수	0.43971 t CO ₂ /t 석회석 소비량	2006 IPCC GL
백운석 소비 시 배출계수	0.47732 t CO ₂ /t 백운석 소비량	

4.4.2.2.3 활동자료

합금철 생산 부문은 2007년부터 합금철 생산업체에서 보고한 「사업장 명세서」의 탄산염 소비량 자료를 활용하였다³³⁾.

33) 활동자료가 최초로 수집된 2007년 배출량이 매우 미미(MPG 지침 32조에 따른 국가 총배출량 중 0.05% 이하의 소규모 배출원)하고, 2006년

| 표 4-82 | 합금철 생산 부문 활동자료 수집방법(2007-2023)

기간	활동자료	통계명	관리기관	대상가스
2007-2023	석회석, 백운석 소비량	「사업장 명세서」	기후에너지환경부	CO ₂

| 표 4-83 | 합금철 생산 부문 활동자료(1990-2023)

(단위: 톤)

구분	1990	2000	2007	2010	2018	2021	2022	2023
석회석 소비량	NE	NE	NE	NE	2,048	3,954	4,347	900
백운석 소비량	NE	NE	23,485	32,842	25	378	NO	176

4.4.2.3 시계열 일관성

합금철 생산 부문은 전 시계열 동일한 방법론과 배출계수, 활동자료를 적용하였다.

4.4.2.4 QA/QC

QA/QC는 제1장 서론 1.5절 내용과 동일하다.

4.4.2.5 재계산

재계산은 수행하지 않았다.

4.4.3 알루미늄 생산(2.C.3.)

4.4.3.1 배출원 개요

알루미늄 생산 부문에서는 일차 알루미늄(Al_2O_3)이 탄소전극에 의해 환원되어 알루미늄을 생산하는 과정에서 발생하는 CO₂ 및 PFCs 배출량을 산정한다. 우리나라에서는 알루미늄 생산이 1990년도에 중단되어 1991년 이후는 배출량이 발생하지 않았다. 또한, PFCs는 배출량 산정을 위해 요구되는 알루미늄 생산 공정에 대한 정보가 없어 산정 제외하였다(NE).

| 표 4-84 | 알루미늄 생산 분야 온실가스 배출량(1990-2023)

(단위: 천톤 CO₂-eq)

구분	1990	2000	2007	2010	2018	2021	2022	2023
알루미늄 생산	23	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO

이전은 배출이 없거나 소규모 배출원으로 추정됨에 따라 "NE"로 보고함

4.4.3.2 방법론

4.4.3.2.1 산정방법

알루미늄 생산 부문은 2006 IPCC GL의 Tier 1 방법에 따라 알루미늄 생산량에 배출계수를 곱하여 CO₂ 배출량을 산정하였다.

〈알루미늄 생산 부문 CO₂ 배출량 산정식(Tier 1)〉

$$\text{CO}_2 \text{ 배출량} = \text{EFs} \times \text{MPs}$$

CO₂ 배출량 : 알루미늄 생산에 따른 CO₂ 배출량(t CO₂)

EFs : 배출계수(t CO₂/t 알루미늄 생산량)

MPs : 알루미늄 생산량(t)

자료: 2006 IPCC GL, Vol.3, Ch.4.3, Equation 4.20

4.4.3.2.2 배출계수

알루미늄 생산 부문의 CO₂ 배출계수는 2006 IPCC GL 기본 배출계수를 적용하였다.

| 표 4-85 | 알루미늄 생산 부문 배출계수

구분	계수	출처
Soderberg 공정 배출계수	1.7 t CO ₂ /t	2006 IPCC GL

4.4.3.2.3 활동자료

알루미늄 생산 부문은 한국비철금속협회의 알루미늄 생산량 자료를 사용하였다.

| 표 4-86 | 알루미늄 생산 부문 활동자료 수집방법(2007-2023)

기간	활동자료	통계명	관리기관	대상가스
1990	알루미늄 생산량	협회 자료	한국비철금속협회	CO ₂

| 표 4-87 | 알루미늄 생산 부문 활동자료(1990-2023)

(단위: 톤)									
구분	1990	2000	2007	2010	2018	2021	2022	2023	
알루미늄 생산량	13,684	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	

4.4.3.3 시계열 일관성

알루미늄 생산 부문은 1990년 이후부터 국내 알루미늄 생산이 중단되었으며, 1990년 배출량만 존재하여 시계열 일관성은 고려하지 않는다.

4.4.3.4 QA/QC

QA/QC는 제1장 서론 1.5절 내용과 동일하다.

4.4.3.5 재계산

재계산은 수행하지 않았다.

4.4.4 마그네슘 생산(2.C.4.)

4.4.4.1 배출원 개요

2023년 기준	산정온실가스	방법론	배출계수	활동자료
	SF ₆	Tier 1	D	마그네슘 주조시 원료 수입량, 탄산염 소비량

마그네슘 생산 방식은 원료 광석인 백운석(CaMg(CO₃)₂), 마그네사이트(MgCO₃) 등을 이용하여 마그네슘을 생산하는 1차 생산 공정과 스크랩, 폐기물 등을 재활용하여 마그네슘을 생산하는 2차 생산 공정으로 구분된다. 이 중 1차 생산 공정에서는 원료인 탄산염 광석을 고온에서 열분해하며 CO₂가 배출되고 1, 2차 생산 모두 주조 공정(casting process)에서 용해된 마그네슘의 산화 방지를 위하여 표면 가스(cover gas)인 SF₆가 소비되고 일부 공기 중으로 배출된다.

우리나라는 단일업체가 2012년 마그네슘 주괴 및 판재를 생산 시작한 후 2014년 가동 중단함에 따라 1차 생산 방식의 탄산염 소비 배출량은 2013-2014년만 대상으로 한다. 현재는 소규모 업체들에서 2차 생산 방식인 마그네슘 스크랩을 원료로 마그네슘 제품을 생산하고 있다.

마그네슘 생산 부문 2023년 배출량은 185 천톤 CO₂-eq로 마그네슘 주조량이 감소하며 전년 대비 9.9% 감소하였다.

| 표 4-88 | 마그네슘 생산 부문 온실가스 배출량(1990-2023)

(단위: 천톤 CO₂-eq)

구분	1990	2000	2007	2010	2018	2021	2022	2023
마그네슘 생산	1	17	173	148	151	146	205	185

4.4.4.2 방법론

4.4.4.2.1 산정방법

마그네슘 생산 부문은 2006 IPCC GL의 Tier 1 방법에 따라 마그네슘 주조량에 SF₆ 배출계수를 곱하여 SF₆ 배출량을 산정하였고, 2006 IPCC GL의 Tier 2 방법에 따라 탄산염 소비량에 CO₂ 배출계수를 곱하여 CO₂ 배출량을 산정하였다.

〈마그네슘 주조 시 SF₆ 소비에 의한 SF₆ 배출량 산정식(Tier 1)〉

$$\text{SF}_6 \text{ 배출량} = \text{MGc} \times \text{EF} \times 10^{-3}$$

SF₆ 배출량 : 마그네슘 주조시 SF₆ 배출량(t SF₆)
 MGc : 마그네슘 주조 또는 처리량(t)
 EF : 마그네슘 주조 배출계수(kg SF₆ / t 마그네슘 주조 또는 처리량)

자료: 2006 IPCC GL, Vol.3, Ch.4.5, Equation 4.30

〈마그네슘 생산 시 탄산염 사용에 의한 CO₂ 배출량 산정식(Tier 2)〉

$$\text{CO}_2 \text{ 배출량} = \text{M} \times \text{EF}$$

CO₂ 배출량 : 마그네슘 생산시 탄산염 사용에 따른 CO₂ 배출량(t CO₂)
 M : 탄산염(석회석, 백운석, 마그네사이트) 소비량(t)
 EF : 탄산염별 배출계수(t CO₂/t 탄산염 소비량)

자료: 2006 IPCC GL, Vol.3, Ch.2.5, Equation 2.15

4.4.4.2.2 배출계수

마그네슘 생산 부문의 SF₆ 및 CO₂ 배출계수는 2006 IPCC GL 기본 배출계수를 적용하였다.

표 4-89 | 마그네슘 생산 부문 배출계수

구분	계수	출처
마그네슘 주조 시 배출계수	1.0 kg SF ₆ /t Mg 마그네슘 주조량	2006 IPCC GL
백운석 소비 시 배출계수	0.47732 t CO ₂ /t 백운석 소비량	

4.4.4.2.3 활동자료

마그네슘 주조량은 사업장별 통계가 부재하여 전 시계열 수출입 무역통계(관세청)의 마그네슘 주조 원료 수입량 자료를 사용하였고³⁴⁾, 2013-2014년 탄산염 소비량은 「사업장 명세서」 자료를 사용하였다.

34) 마그네슘 2차 생산 시 수입된 마그네슘괴를 원료로 사용하며 전량 국내 소비됨에 따라 수입량 자료만 활동자료로 활용

| 표 4-90 | 마그네슘 생산 부문 활동자료 수집방법(1990-2023)

기간	활동자료	통계명	관리기관	대상가스
1990-2023	마그네슘 주조시 원료 수입량	수출입 무역통계	관세청	SF ₆
2013-2014	탄산염 소비량	「사업장 명세서」	기후에너지환경부	CO ₂

| 표 4-91 | 마그네슘 생산 부문 활동자료(1990-2023)

(단위: 톤)

구분	1990	2000	2007	2010	2018	2021	2022	2023
마그네슘 주조량	34	739	7,371	6,306	6,411	6,194	8,723	7,859

4.4.4.3 시계열 일관성

마그네슘 생산 부문은 일관된 방법론과 배출계수, 활동자료를 적용하여 배출량을 산정하였다.

4.4.4.4 QA/QC

QA/QC는 제1장 서론 1.5절 내용과 동일하다.

4.4.4.5 재계산

재계산은 수행하지 않았다.

4.4.5 납 생산(2.C.5.)

4.4.5.1 배출원 개요

2023년 기준	산정온실가스	방법론	배출계수	활동자료
	CO ₂	Tier 2	D	탄산염 소비량

납 생산 부문에서는 납 정광으로부터 납을 생산하는 1차 생산 공정과 산화된 납을 재생시키기 위해 2차 생산 공정에서 환원제로 사용되는 코크스 소비와 탄산염 소비로 CO₂가 발생한다. 국내에서는 습식 제련 방식으로 납을 생산하여 온실가스 배출이 없고, 환원제 사용에 의한 배출량은 에너지 분야 철강(1.A.2.a.)에 합산하여 보고된다. 따라서, 납 생산 부문에서는 탄산염 소비로 배출된 CO₂만 보고하였다³⁵⁾.

납 생산 공정 중 탄산염을 소비하는 업체는 1개로, 기업의 정보보호를 위해 활동자료 및 배출량은 기타 금속생산(2.C.7.) 부문에 포함하여 보고하였다(IE).

35) 활동자료가 최초로 수집된 2007년 배출량이 매우 미미(MPG 지침 32조에 따른 국가 총배출량 중 0.05% 이하의 소규모 배출원)하고, 2006년 이전은 배출이 없거나 소규모 배출원으로 추정됨에 따라 “NE”로 보고함

4.4.5.2 방법론

4.4.5.2.1 산정방법

납 생산 부문은 2006 IPCC GL의 Tier 2 방법에 따라 납 생산 공정에서의 탄산염 소비량과 배출 계수를 곱하여 CO₂ 배출량을 산정하였다.

〈납 생산 시 탄산염 소비에 따른 CO₂ 배출량 산정식(Tier 2)〉

$$\text{CO}_2 \text{ 배출량} = M \times EF$$

CO₂ 배출량 : 납생산 시 탄산염 사용에 따른 CO₂ 배출량(t CO₂)

M : 탄산염 소비량(t)

EF : 탄산염별 배출계수(t CO₂/t 탄산염 소비량)

자료: IPCC GL, Vol.3, Ch.2.5, Equation 2.15

4.4.5.2.2 배출계수

납 생산 부문의 탄산염 소비에 따른 CO₂ 배출계수는 2006 IPCC GL 기본 배출계수를 적용하였다.

표 4-92 | 납 생산 부문 배출계수

구분	계수	출처
석회석 소비 시 배출계수	0.43971 t CO ₂ /t 석회석 소비량	2006 IPCC GL

4.4.5.2.3 활동자료

납 생산 부문은 2007년부터 납 생산업체에서 보고한 「사업장 명세서」의 탄산염 소비량 자료를 활용하였다³⁶⁾.

표 4-93 | 납 생산 부문 연도별 활동자료 수집방법(1990-2023)

기간	활동자료	통계명	관리기관	대상가스
2007-2023	석회석 소비량	「사업장 명세서」	기후에너지환경부	CO ₂

4.4.5.3 시계열 일관성

납 생산 부문은 전 시계열 동일한 방법론과 배출계수, 활동자료를 적용하였다.

36) 활동자료가 최초로 수집된 2007년 배출량이 매우 미미(MPG 지침 32조에 따른 국가 총배출량 중 0.05% 이하의 소규모 배출원)하고, 2006년 이전은 배출이 없거나 소규모 배출원으로 추정됨에 따라 “NE”로 보고함

4.4.5.4 QA/QC

QA/QC는 제1장 서론 1.5절 내용과 동일하다.

4.4.5.5 재계산

재계산은 수행하지 않았다.

4.4.6 아연 생산(2.C.6.)

4.4.6.1 배출원 개요

2023년 기준	산정온실가스	방법론	배출계수	활동자료
	CO ₂	Tier 2	D	탄산염 소비량

아연 생산 부문에서는 아연 농축물로부터 아연을 생산하는 과정에서 환원제로 사용된 코크스와 탄산염 소비로 CO₂가 발생한다. 국내에서는 습식제련 방식으로 아연을 생산하여 온실가스 배출이 없고 환원제 사용에 의한 배출량은 에너지 분야 철강(1.A.2.a.)에 합산하여 보고된다. 따라서 아연 생산 부문에서는 탄산염 소비로 배출된 CO₂만 보고하였다³⁷⁾.

아연 생산 공정 중 탄산염을 소비하는 업체는 1개로, 기업의 정보보호를 위해 활동자료 및 배출량은 기타 금속생산(2.C.7.) 부문에 포함하여 보고하였다(IE).

4.4.6.2 방법론

4.4.6.2.1 산정방법

아연 생산 부문은 2006 IPCC GL의 Tier 2 방법에 따라 아연 생산 공정에서의 탄산염 소비량과 배출계수를 곱하여 CO₂ 배출량을 산정하였다.

〈아연 생산 시 탄산염 소비에 따른 CO₂ 배출량 산정식(Tier 2)〉

$$\text{CO}_2 \text{ 배출량} = M \times EF$$

CO₂ 배출량 : 아연 생산시 탄산염 사용에 따른 CO₂ 배출량(t CO₂)

M : 탄산염 소비량(t)

EF : 탄산염별 배출계수(t CO₂/t 탄산염 소비량)

자료: IPCC GL, Vol.3, Ch.2.5, Equation 2.15

37) 활동자료가 최초로 수집된 2007년 배출량이 매우 미미(MPG 지침 32조에 따른 국가 총배출량 중 0.05% 이하의 소규모 배출원)하고, 2006년 이전은 배출이 없거나 소규모 배출원으로 추정됨에 따라 “NE”로 보고함

4.4.6.2.2 배출계수

아연 생산 부문의 탄산염 소비에 따른 CO₂ 배출계수는 2006 IPCC GL 기본 배출계수를 적용하였다.

| 표 4-94 | 아연 생산 부문 배출계수

구분	계수	출처
석회석 소비 시 배출계수	0.43971 t CO ₂ /t 석회석 소비량	2006 IPCC GL

4.4.6.2.3 활동자료

아연 생산 부문은 2007년부터 아연 생산업체에서 보고한 「사업장 명세서」의 탄산염 소비량 자료를 활용하였다³⁸⁾.

| 표 4-95 | 아연 생산 부문 활동자료 수집방법(1990-2023)

기간	활동자료	통계명	관리기관	대상가스
2007-2023	석회석 소비량	「사업장 명세서」	기후에너지환경부	CO ₂

4.4.6.3 시계열 일관성

아연 생산 부문은 전 시계열 동일한 방법론과 배출계수, 활동자료를 적용하였다.

4.4.6.4 QA/QC

QA/QC는 제1장 서론 1.5절 내용과 동일하다.

4.4.6.5 재계산

재계산은 수행하지 않았다.

4.4.7 기타 금속 생산(2.C.7.)

4.4.7.1 배출원 개요

2023년 기준	산정온실가스	방법론	배출계수	활동자료
	CO ₂	Tier 2	D	탄산염 소비량

기타 금속 생산 부문에서는 철강, 합금철, 알루미늄, 마그네슘, 납, 아연 부문 외의 금속산업(구리 생산)에서 탄산염 소비로 배출되는 CO₂와 납과 아연 생산 부문에서의 CO₂ 배출량을 통합하여 보고하였다³⁹⁾.

38) 활동자료가 최초로 수집된 2007년 배출량이 매우 미미(MPG 지침 32조에 따른 국가 총배출량 중 0.05% 이하의 소규모 배출원)하고, 2006년 이전은 배출이 없거나 소규모 배출원으로 추정됨에 따라 “NE”로 보고함

기타 금속 생산 부문 2023년 배출량은 61 천톤 CO₂-eq로 납, 아연, 구리 생산 공정의 탄산염(석회석) 소비량이 증가하며 전년 대비 3.8% 증가하였다.

| 표 4-96 | 기타 금속 및 납, 아연 생산 부문 온실가스 배출량(1990-2023)

(단위: 천톤 CO₂-eq)

구분	1990	2000	2007	2010	2018	2021	2022	2023
기타 금속 생산	NE,NO	NE,NO	57	72	84	75	59	61

4.4.7.2 방법론

4.4.7.2.1 산정방법

기타 금속 생산 부문은 2006 IPCC GL의 Tier 2 방법에 따라 탄산염 소비량과 배출계수를 곱하여 CO₂ 배출량을 산정하였다.

〈기타 금속 생산 시 탄산염 소비에 따른 CO₂ 배출량 산정식(Tier 2)〉

$$\text{CO}_2 \text{ 배출량} = M \times EF$$

CO₂ 배출량 : 기타 금속 생산 시 탄산염 사용에 따른 CO₂ 배출량(t CO₂)

M : 탄산염(석회석, 백운석) 소비량(t)

EF : 탄산염별 배출계수(t CO₂/t 탄산염 소비량)

자료: 2006 IPCC GL, Vol.3, Ch.2.5, Equation 2.15

4.4.7.2.2 배출계수

기타 금속 생산 부문의 탄산염 소비에 따른 CO₂ 배출계수는 2006 IPCC GL 기본 배출계수를 적용하였다.

| 표 4-97 | 기타 금속 생산 부문 배출계수

구분	계수	출처
석회석 소비 시 배출계수	0.43971 t CO ₂ /t 석회석 소비량	2006 IPCC GL

4.4.7.2.3 활동자료

기타 금속 생산 부문은 2007년부터 구리 생산업체에서 보고한 「사업장 명세서」의 탄산염 소비량 자료를 활용하였다⁴⁰⁾.

39) 활동자료가 최초로 수집된 2006년 배출량이 매우 미미(MPG 지침 32조에 따른 국가 총배출량 중 0.05% 이하의 소규모 배출원)하고, 2006년 이전은 배출이 없거나 소규모 배출원으로 추정됨에 따라 "NE"로 보고함

40) 활동자료가 최초로 수집된 2007년 배출량이 매우 미미(MPG 지침 32조에 따른 국가 총배출량 중 0.05% 이하의 소규모 배출원)하고, 2006년

| 표 4-98 | 기타 금속 생산 부문 활동자료 수집방법(1990-2023)

기간	활동자료	통계명	관리기관	대상가스
2007-2023	석회석 소비량	「사업장 명세서」	기후에너지환경부	CO ₂

| 표 4-99 | 기타 금속 및 납, 아연 생산 부문 활동자료(1990-2023)

(단위: 천톤)

구분	1990	2000	2007	2010	2018	2021	2022	2023
석회석 소비량	NE	NE	130	163	192	171	134	139

4.4.7.3 시계열 일관성

기타 금속 생산 부문은 전 시계열 동일한 방법론과 배출계수, 활동자료를 적용하였다.

4.4.7.4 QA/QC

QA/QC는 제1장 서론 1.5절 내용과 동일하다.

4.4.7.5 재계산

재계산은 수행하지 않았다.

이전은 배출이 없거나 소규모 배출원으로 추정됨에 따라 "NE"로 보고함

4.5 비에너지 제품 및 용매 사용(2.D.)

비에너지 제품 및 용매 사용 부문은 에너지 사용을 목적으로 하는 연소나 원료 또는 환원제로써의 사용을 제외하고 화석연료가 하나의 제품으로 소비되는 과정에서 발생하는 CO₂ 배출량을 산정한다. 하위 배출 부문은 윤활제 사용(2.D.1.), 파라핀 왁스 사용(2.D.2.), 기타 비에너지 제품 사용(2.D.3.)이 포함된다. 기타 비에너지 제품 사용은 다시 용매 사용(2.D.3.a.), 도로포장(2.D.3.b.), 아스팔트 루핑(2.D.3.c.) 부문으로 구분되며 2006 IPCC GL에 산정방법론이 제공되지 않아 미산정하였다(NA). 향후 간접 온실가스 배출량 검토 시 기타 비에너지 제품 사용 부문 배출량도 함께 검토하여 개선할 예정이다.

비에너지 제품 및 용매 사용 부문의 2023년 배출량은 640 천톤 CO₂-eq로 산업공정 분야 배출량의 0.5%를 차지한다. 하위 부문별 배출 비중은 윤활제 사용이 97.7%로 대부분을 차지했으며, 파라핀 왁스 사용은 2.3%이다. 비에너지 제품 및 용매 사용 부문의 2023년 배출량은 전년 대비 26 천톤 CO₂-eq (4.3%) 증가하였는데 윤활제 사용 배출량이 26 천톤 CO₂-eq 증가하며 가장 크게 기여하였다.

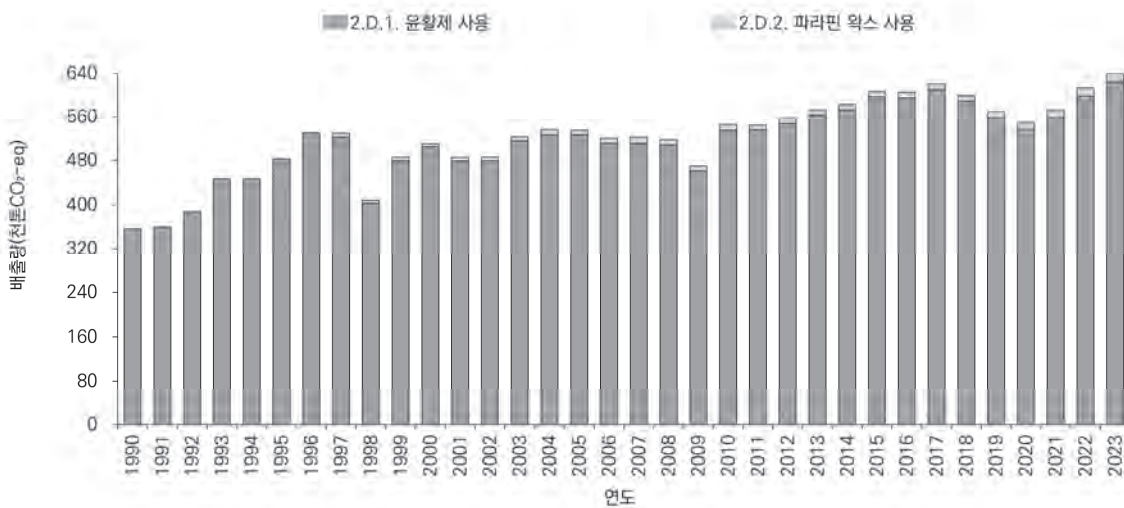


그림 4-6 | 비에너지 제품 및 용매 사용 부문 온실가스 배출량(1990-2023)

표 4-100 | 비에너지 제품 및 용매 사용 부문별 온실가스 배출량(1990-2023)

구분	(단위: 천톤 CO ₂ -eq)							
	1990	2000	2007	2010	2018	2021	2022	2023
2.D.1. 윤활제 사용	357	505	511	535	590	558	599	625
2.D.2. 파라핀왁스 사용	NO	6	12	11	9	15	15	15
2.D.3. 기타 비에너지 제품 사용	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA

4.5.1 윤활제 사용(2.D.1.)

4.5.1.1 배출원 개요

2023년 기준	산정온실가스	방법론	배출계수	활동자료
	CO ₂	Tier 2	D, CS	윤활유, 그리스 소비량

윤활제는 산업 시설과 운송 수단에서 움직이는 부품의 마찰과 마모를 줄이기 위한 용도로 사용되며, 기계, 엔진 등이 작동하는 과정에서 윤활유와 그리스가 산화하여 CO₂가 배출된다. 다만, 다른 연료와 혼합하여 상호 연소를 목적으로 윤활유를 소비하는 2행정 엔진의 경우 2006 IPCC 지침에 따라 에너지 분야 도로 수송(1.A.3.b.) 부문에서 배출량을 보고한다.

윤활제 사용 부문 2023년 배출량은 625 천톤 CO₂-eq로 윤활유 소비량이 증가하며 전년 대비 4.3% 증가하였다. 세부적으로는 2023년 윤활유 소비량은 전년 대비 48,519 kL, 4.4% 증가하고, 그리스 소비량은 2,725 kL, 17.5% 감소하며 윤활유 소비량 증가 영향이 더 컸다.

| 표 4-101 | 윤활제 사용 부문 온실가스 배출량(1990-2023)

(단위: 천톤 CO₂-eq)

구분	1990	2000	2007	2010	2018	2021	2022	2023
윤활유 소비	354	502	508	532	587	556	597	623
그리스 소비	2.9	3.2	2.7	2.5	2.3	2.2	2.1	1.7
합계	357	505	511	535	590	558	599	625

4.5.1.2 방법론

4.5.1.2.1 산정방법

윤활제 사용 부문은 2006 IPCC GL의 Tier 2 방법에 따라 윤활유 및 그리스 소비량에 탄소 함량 및 제품 사용 중 산화율을 곱하여 CO₂ 배출량을 산정하였다.

〈윤활제 사용 부문 CO₂ 배출량 산정식(Tier 2)〉

$$\text{CO}_2 \text{ 배출량} = \sum_i (LC_i \times CC_i \times ODU_i) \times \frac{44}{12}$$

CO₂ 배출량 : 윤활제 사용에 따른 CO₂ 배출량(t CO₂)

LC_i : 윤활제 유형(i) 소비량(TJ)

CC_i : 윤활제 유형(i) 탄소 함량(kg C/ GJ 윤활제)

ODU_i : 윤활제 유형(i) 제품 사용 중 산화율(산화계수)

자료: 2006 IPCC GL, Vol.3, Ch.5.2, Equation 5.3

4.5.1.2.2 배출계수

윤활제 사용 부문의 탄소 배출계수는 2007년 이후는 국가 고유 배출계수, 2006년 이전은 2006 IPCC GL의 기본 배출계수를 적용하였다. 산화계수는 2006 IPCC GL에서 제시한 기본값을 적용하였다.

| 표 4-102 | 윤활제 사용 부문 배출계수

구분	계수	출처
탄소 함량	1990-2006	20.000 kg C / GJ
	2007-2011	19.700 kg C / GJ
	2012-2016	19.900 kg C / GJ
	2017-2021	19.979 kg C / GJ
	2022-	19.897 kg C / GJ
산화계수	윤활유	0.2
	그리스	0.05
		2006 IPCC GL

주: 1) 1980년부터 에너지열량 환산기준을 마련하여 발열량을 공표하고 있음. 2006년부터는 에너지법 시행규칙 제5조에 따라 총발열량 및 순발열량을 함께 공표하며, 5년마다 갱신함. 이를 반영한 국가 고유 탄소 배출계수를 2007년 배출량부터 적용하고 있으며, 발열량 갱신에 따라 탄소 배출계수 역시 5년마다 갱신하고 있음

4.5.1.2.3 활동자료

윤활제 사용 부문의 활동자료는 한국윤활유공업협회에서 제공하는 윤활유(2행정 엔진용 제외) 및 그리스 소비량 자료를 사용하였다.

| 표 4-103 | 윤활제 사용 부문 활동자료 수집방법(1990-2023)

기간	활동자료	통계명	관리기관	대상가스
1990-2023	윤활유, 그리스 소비량	협회 자료	한국윤활유공업협회	CO ₂

| 표 4-104 | 윤활제 사용 부문 활동자료 (1990-2023)

(단위: kL)

구분	1990	2000	2007	2010	2018	2021	2022	2023
윤활유 소비량	654,612	928,261	971,575	1,018,102	1,074,608	1,017,571	1,105,227	1,153,746
그리스 소비량	21,329	23,729	20,598	19,322	17,008	16,309	15,552	12,827

4.5.1.3 시계열 일관성

윤활제 사용 부문은 전 시계열 동일한 방법론과 배출계수, 활동자료를 적용하였다.

4.5.1.4 QA/QC

QA/QC는 제1장 서론 1.5절 내용과 동일하다.

4.5.1.5 재계산

재계산은 수행하지 않았다.

4.5.2 파라핀 왁스 사용(2.D.2.)

4.5.2.1 배출원 개요

2023년 기준	산정온실가스	방법론	배출계수	활동자료
	CO ₂	Tier 1	D	파라핀 왁스 소비량

파라핀 왁스는 양초, 종이 코팅제, 접착제, 광택제 등의 용도로 사용되며, 파라핀 왁스가 연소되는 과정에서 CO₂가 배출된다. 국내의 경우 1990-1996년까지는 파라핀 왁스 소비량이 없으므로 배출량 산정에서 제외하였다(NO).

파라핀 왁스 사용 부문 2023년 배출량은 15 천톤 CO₂-eq로 파라핀 왁스 소비량 소폭 증가하여 전년 대비 2.1% 증가하였다.

| 표 4-105 | 파라핀 왁스 사용 부문 온실가스 배출량(1990-2023)

(단위: 천톤 CO₂-eq)

구분	1990	2000	2007	2010	2018	2021	2022	2023
파라핀 왁스 사용	NO	6	12	11	9	15	15	15

4.5.2.2 방법론

4.5.2.2.1 산정방법

파라핀 왁스 사용 부문은 2006 IPCC GL의 Tier 1 방법에 따라 파라핀 왁스 소비량에 탄소함량 및 제품 사용 중 산화율을 곱하여 CO₂ 배출량을 산정하였다.

〈파라핀 왁스 사용 부문 CO₂ 배출량 산정식(Tier 1)〉

$$\text{CO}_2 \text{ 배출량} = PW \times CC_{Wax} \times ODU_{Wax} \times \frac{44}{12}$$

CO₂ 배출량 : 파라핀 왁스 사용에 따른 CO₂ 배출량(t CO₂)

PW : 파라핀 왁스 소비량(TJ)

CC_{Wax} : 파라핀 왁스 탄소함량(t C/TJ 파라핀왁스)

ODU_{Wax} : 파라핀 왁스 제품사용 중 산화율(산화계수)

자료: 2006 IPCC GL, Vol.3, Ch.5.3, Equation 5.4

4.5.2.2.2 배출계수

파라핀 왁스 사용 부문의 탄소 배출계수(탄소함량) 및 산화계수는 2006 IPCC GL 기본 배출계수를 적용하였다.

| 표 4-106 | 파라핀 왁스 사용 부문 배출계수

구분	계수	출처
파라핀 왁스 탄소함량	20 kg C/GJ	2006 IPCC GL
파라핀 왁스 산화계수	0.2	

4.5.2.2.3 활동자료

파라핀 왁스 사용 부문 활동자료는 「에너지수급통계(에너지경제연구원)」의 파라핀 왁스 소비량을 사용하였다.

| 표 4-107 | 파라핀 왁스 사용 부문 활동자료 수집방법(1990-2023)

기간	활동자료	통계명	관리기관	대상가스
1990-2023	파라핀 왁스 소비량	「에너지수급통계」	에너지경제연구원	CO ₂

| 표 4-108 | 파라핀 왁스 사용 부문 활동자료(1990-2023)

(단위: 천TOE)

구분	1990	2000	2007	2010	2018	2021	2022	2023
파라핀 왁스 소비량	NO	9.1	19.0	17.2	15.4	24.5	23.9	24.4

4.5.2.3 시계열 일관성

파라핀 왁스 사용 부문은 전 시계열 동일한 방법론과 배출계수, 활동자료를 적용하였다.

4.5.2.4 QA/QC

QA/QC는 제1장 서론 1.5절 내용과 동일하다.

4.5.2.5 재계산

파라핀 왁스 소비 부문은 기초통계인 「에너지수급통계(에너지경제연구원)」의 파라핀 왁스 비에너지 소비량이 개정(2025.10월)되면서 2005년 배출량을 재계산하였다.

4.6 전자산업(2.E.)

전자산업 부문은 반도체, 디스플레이 등과 같은 전자제품을 제조하는 과정에서 발생하는 불소계 온실가스(HFCs, PFCs, SF₆, NF₃) 배출량을 산정하며, 하위 배출 부문은 반도체(2.E.1.), 디스플레이(2.E.2.), 광전지(2.E.3.), 열전달유체(2.E.4.), 기타(2.E.5.) 부문이 포함된다. 이 중 열전달유체(2.E.4.) 부문은 국내에 배출원이 없어 배출량 산정에서 제외하였다(NO). 우리나라 주요 산업인 전자산업의 산업계 정보 보호를 위해 하위 부문별 활동자료는 “C”로 보고하고, 하위 부문별 배출량 역시 기타(2.E.5.) 부문에 일괄 포함하여 보고하였다(IE).

우리나라는 2010년부터 온실가스 목표관리제 및 배출권거래제가 시행되어 전자산업 업체들이 「사업장 명세서」에 2007년 이후 불소계 온실가스 배출량(NF₃ 제외)을 보고하고 있다. 따라서, 전자산업 부문의 NF₃를 제외한 불소계 온실가스 국가 배출량은 반도체 및 디스플레이 업체의 「사업장 명세서」 배출량⁴¹⁾을 합산하여 사용하였다. 「사업장 명세서」에 보고하고 있지 않는 NF₃는 한국반도체·디스플레이산업협회의 소비량 자료와 기본 배출계수를 활용하여 2006 IPCC GL 방법론에 따라 배출량을 산정하였다.

전자산업 부문 2023년 배출량은 3,624 천톤 CO₂-eq로 산업공정 분야 배출량의 3.0%를 차지한다. 국내 반도체 및 디스플레이 업체들의 저감장치 운영률, 저감효율 개선 등 온실가스 배출량 감축 노력의 결과로 2023년 배출량은 전년 대비 3,219 천톤 CO₂-eq, 47.0%로 크게 감소하였다. 국내 반도체 및 디스플레이 산업계는 GWP가 높은 불소계 온실가스의 분해 설비⁴²⁾를 설치·운영하고 있으며, GWP가 낮은 대체 가스를 사용·개발하는 등의 감축 노력을 이행하고 있다.

표 4-109 | 전자산업 부문 온실가스 배출량(1990-2023)

(단위: 천톤 CO₂-eq)

구분	1990	2000	2007	2010	2018	2021	2022	2023
전자산업	IE,NA,NO	3,257	6,868	8,842	8,673	8,805	6,843	3,624

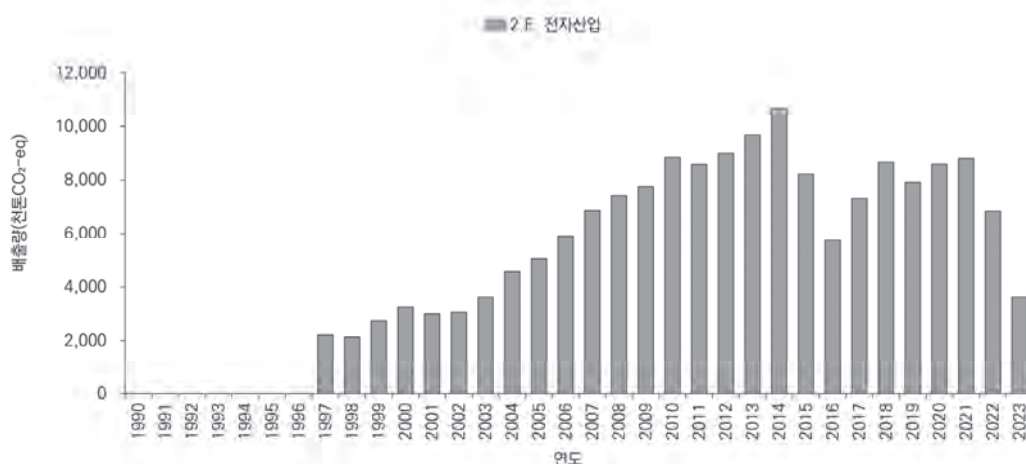


그림 4-7 | 전자산업 부문 온실가스 배출량(1990-2023)

41) 「사업장 명세서」에 보고된 배출량은 2006 IPCC GL 기본 배출계수(Tier1)와 사업장 배출계수(Tier3)를 활용하여 산정됨

42) 반도체 및 디스플레이 생산 공정에서 발생하는 부생가스를 저감하기 위한 설비(스크러버)로 열에너지 공급 방식에 따라 Heat, Burn, Plasma 등으로 구분

4.6.1 반도체(2.E.1.)

4.6.1.1 배출원 개요

2023년 기준	산정온실가스	방법론	배출계수	활동자료
	HFCs, PFCs, SF ₆ , NF ₃	Tier 2a	PS, D	HFCs, PFCs, SF ₆ 배출량, NF ₃ 소비량

반도체는 전기전도도가 조건에 따라 달라지는 물질로, 정보처리와 저장 기능을 수행하는 전자기기의 핵심 소재이다. 반도체는 식각(Etching)과 증착(Chemical Vapour Deposition, CVD) 등의 공정을 거쳐 생산되며, 이 중 식각과 증착 공정에서 불소계 온실가스(HFCs, PFCs, SF₆, NF₃)가 소비된다. 식각 공정에서는 압축 현상된 회로 패턴 중 불필요한 부분을 화학적 또는 물리적인 방법으로 제거하는 과정에서, 증착 공정에서는 웨이퍼 위에 원하는 분자 또는 원자 단위의 물질을 박막의 두께로 증착시키는 공정 후 챔버를 세척하는 과정 등에서 불소계 온실가스가 사용된다. 반도체 부문에서는 국내 반도체 산업의 식각(Etching)과 증착(CVD) 공정에서 소비된 불소계 온실가스(HFCs, PFCs, SF₆, NF₃)에 따른 배출량을 산정하고 있다.

4.6.1.2 방법론

4.6.1.2.1 산정방법

반도체 부문은 2006 IPCC GL의 Tier 2a 방법에 따라 불소계 온실가스 배출량을 산정하였다⁴³⁾.

〈반도체 부문 배출량 산정식(Tier 2a)〉

$$\text{FC가스(i) 배출량} = (1 - h) \times FC_i \times (1 - U_i) \times (1 - a_i \times d_i)$$

$$\text{부생가스(j) 배출량} = (1 - h) \times B_{j,i} \times FC_i \times (1 - a_i \times d_i)$$

온실가스(i,j) 배출량 : 온실가스(i,j) 배출량(kg)

h : 가스 잔류비율

FC : 온실가스 소비량(kg)

B : 부산물 발생률(부생가스 발생량/가스 사용량)

U : 온실가스 사용률(공정 중 파기되거나 변환된 비율)

a : 배출제어 기술이 있는 공정의 온실가스 부피분율

d : 배출제어 기술에 의한 온실가스의 저감효율

i : 반도체 부문에서 소비되는 불소계 온실가스(CF₄, C₂F₆ 등)

j : 가스별 부생가스(CF₄, C₂F₆, C₃F₈)

자료: 2006 IPCC GL, Vol.3, Ch.6, Equation 6.2-6.6

43) 「사업장 명세서」에 보고된 배출량도 2006 IPCC GL Tier 2a 방법에 따라 산정됨

4.6.1.2.2 배출계수

2006년 이전의 경우 반도체 부문의 가스 잔류비율(h), 부산물 발생률(B), 가스사용률(U) 등은 2006 IPCC GL 기본값을 사용하였다. 2007년부터는 「사업장 명세서」에 보고된 2006 IPCC GL 기본 배출계수 및 사업장 배출계수가 활용되었다. 다만, NF₃의 배출제어 기술이 있는 공정의 온실가스 부피분율(a)은 「사업장 명세서」 F-gas 부피분율 기준으로 한국에너지공단에서 가공한 자료를 활용하였다.

표 4-110 | 반도체 부문 배출계수

공정가스(i)	CF ₄	C ₂ F ₆	C ₃ F ₈	C ₄ F ₆	c-C ₄ F ₈	C ₅ F ₈	CHF ₃	CH ₂ F ₂	SF ₆	NF ₃	NF ₃ remote
산정방법	Tier 2a										
h	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
1-U _i	0.9	0.6	0.4	0.1	0.1	0.1	0.4	0.1	0.2	0.2	0.02
B _{CF4,i}	NA	0.2	0.1	0.3	0.1	0.1	0.07	0.08	NA	0.09	0.02
B _{C2F6,i}	NA	NA	NA	0.2	0.1	0.04	NA	NA	NA	NA	NA
B _{C3F8,i}	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA

4.6.1.2.3 활동자료

NF₃를 제외한 불소계 온실가스(HFCs, PFCs, SF₆)의 경우 2007년 이후는 「사업장 명세서」의 업체별 배출량을 합산하여 국가 배출량을 산정하였고 1997-2006년은 한국반도체산업협회에서 제공한 불소계 온실가스 소비량 자료를 사용하였다. NF₃의 경우 한국반도체산업협회에서 제공한 NF₃ 소비량 자료를 사용하였다.

표 4-111 | 반도체 부문 활동자료 수집방법(1997-2023)

기간	활동자료	통계명	관리기관	대상 가스
1997-2006	HFCs, PFCs, SF ₆ 소비량	협회 자료	한국반도체산업협회	HFCs, PFCs, SF ₆
2007-2023	HFCs, PFCs, SF ₆ 배출량	「사업장 명세서」	기후에너지환경부	
2008-2023	NF ₃ 소비량	협회 자료	한국반도체산업협회	NF ₃

4.6.1.3 시계열 일관성

HFCs, PFCs, SF₆의 경우, 2006 IPCC GL에 따른 일관된 방법론과 배출계수, 활동자료를 적용하였다. 2007년 이후는 동일 사업장이 배출권거래제 대상업체로 지정됨에 따라 「사업장 명세서」를 활용하여 배출량의 정확성과 일관성을 확보하였다. NF₃는 일관된 방법론과 배출계수, 활동자료를 적용하여 배출량을 산정하였다.

4.6.1.4 QA/QC

QA/QC는 제1장 서론 1.5절 내용과 동일하다.

4.6.1.5 재계산

반도체 부문은 NF_3 의 배출제어 기술이 있는 공정의 온실가스 부피분율(a)이 변경되어 2008-2022년 배출량을 재계산하였다.

4.6.1.6 개선계획

현재 국내 NF_3 배출 저감 시설의 효율 특성을 측정 및 연구 중이며, 향후 국가 고유 배출계수 개발 등을 통해 배출량 산정 방법을 고도화할 계획이다.

4.6.2 디스플레이(2.E.2.)

4.6.2.1 배출원 개요

	산정온실가스	방법론	배출계수	활동자료
2023년 기준	HFCs, PFCs, SF_6 , NF_3	Tier 2a, 2b	PS, D	HFCs, PFCs, SF_6 배출량, NF_3 소비량

디스플레이는 전자기기로부터 출력되는 전기신호를 화상 정보로 나타내는 화면 표시장치로, 액정 디스플레이(Liquid Crystal Display, LCD)와 유기발광다이오드(Organic Light-Emitting Diode, OLED) 등이 있다. 디스플레이는 식각(Etching)과 증착(CVD) 등의 공정을 거쳐 생산되며, 이 중 식각과 증착 공정에서 불소계 온실가스(HFCs, PFCs, SF_6 , NF_3)가 소비된다. 식각 공정에서는 박막트랜지스터(TFT)의 회로 패턴 중 불필요한 부분을 깎아내는 과정에서, 증착 공정에서는 다양한 반응 기체와 에너지를 활용하여 기판 표면에 화학적 반응을 통해 기판 표면에 얇은 막을 형성하는 과정에서 불소계 온실가스가 사용된다. 국내에서는 HFCs, PFCs, SF_6 를 식각공정에서만 소비하고, NF_3 는 증착과 식각 공정에서 소비하고 있어 HFCs, PFCs, SF_6 는 2006 IPCC 지침 Tier2b 방법에 따라, NF_3 는 2006 IPCC 지침 Tier2a 방법에 따라 배출량을 산정하였다.

4.6.2.2 방법론

4.6.2.2.1 산정방법

디스플레이 부문은 2006 IPCC GL의 Tier 2b 방법에 따라 HFCs 및 PFCs, SF_6 배출량을 산정하였으며⁴⁴⁾, 2006 IPCC GL의 Tier 2a 방법에 따라 NF_3 배출량을 산정하였다.

44) 「사업장 명세서」에 보고된 배출량도 2006 IPCC GL Tier 2b 방법에 따라 산정됨

〈디스플레이 부문 HFCs, PFCs, SF₆ 배출량 산정식(Tier 2b)〉

$$\text{FC가스(i) 배출량} = (1-h) \times \sum_p (FC_{i,p} \times (1-U_{i,p}) \times (1-a_{i,p} \times d_{i,p}))$$

$$\text{부생가스(j) 배출량} = (1-h) \times \sum_p (B_{j,i,p} \times FC_{i,p} \times (1-a_{i,p} \times d_{j,p}))$$

온실가스(i,j) 배출량	: 온실가스(i,j) 배출량(kg)
h	: 온실가스 잔류비율(기본계수 0.1)
FC	: 온실가스 소비량(kg)
U	: 온실가스 사용률(공정 중 파기되거나 변환된 비율)
B	: 부산물 발생률(부생가스 발생량/가스 사용량)
a	: 배출제어 기술이 있는 공정의 온실가스 부피분율
d	: 배출제어 기술에 의한 온실가스의 저감효율
p	: 공정 종류(식각 또는 CVD 챔버 세정)
i	: 디스플레이 부문에서 소비되는 불소계 온실가스(CF ₄ , C ₄ F ₈ 등)
j	: 온실가스별 부생가스(CF ₄ , C ₂ F ₆ , CHF ₃)

자료: 2006 IPCC GL, Vol.3, Ch.6, Equation 6.7-6.11

〈디스플레이 부문 NF₃ 배출량 산정식(Tier 2a)〉

$$\text{FC가스(i) 배출량} = (1-h) \times FC_i \times (1-U_i) \times (1-a_i \times d_i)$$

$$\text{부생가스(j) 배출량} = (1-h) \times B_{j,i} \times FC_i \times (1-a_i \times d_j)$$

온실가스(i,j) 배출량	: 온실가스(i,j) 배출량(kg)
h	: 가스 잔류비율(기본계수 0.1)
FC	: 온실가스 소비량(kg)
U	: 온실가스 사용률(공정 중 파기되거나 변환된 비율)
B	: 부산물 발생률(부생가스 발생량/가스 사용량)
a	: 배출제어 기술이 있는 공정의 온실가스 부피분율
d	: 배출제어 기술에 의한 온실가스의 저감효율
i	: 디스플레이 부문에서 소비되는 불소계 온실가스(NF ₃ 등)
j	: 가스별 부생가스(CF ₄ , C ₂ F ₆ , C ₃ F ₈)

자료: 2006 IPCC GL, Vol.3, Ch.6, Equation 6.2-6.6

4.6.2.2.2 배출계수

2006년 이전의 경우 디스플레이 부문의 가스 잔여율(h), 부산물 발생률(B), 가스사용율(U) 등은 2006 IPCC GL 기본값을 사용하였으며, 2007년부터는 「사업장 명세서」에 보고된 2006 IPCC GL 기본 배출계수 및 사업장 배출계수가 활용되었다. 다만, NF₃의 배출제어 기술이 있는 공정의 온실가스 부피분율(a)은 「사업장 명세서」 F-gas 부피분율 기준으로 한국에너지공단에서 가공한 자료를 활용하였다.

| 표 4-112 | 디스플레이 부문 배출계수

공정가스(i)	CF ₄	C ₂ F ₆	C ₃ F ₈	c-C ₄ F ₈	CHF ₃	CH ₂ F ₂	SF ₆	NF ₃	NF ₃ remote
산정방법	Tier 2b; 식각							Tier 2a	
h	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
1-U _i	0.6	NA	NA	0.1	0.2	NA	0.3	0.3	0.03
B _{CF₄,i}	NA	NA	NA	0.009	0.07	NA	NA	NA	NA
B _{CHF₃,i}	NA	NA	NA	0.02	NA	NA	NA	NA	NA
B _{C₂F₆,i}	NA	NA	NA	NA	0.05	NA	NA	NA	NA

4.6.2.2.3 활동자료

NF₃를 제외한 불소계 온실가스(HFCs, PFCs, SF₆)의 경우 2007년 이후는 「사업장 명세서」의 업체별 배출량을 합산하여 국가 배출량을 산정하였고 1999-2006년은 한국디스플레이산업협회에서 제공한 불소계 온실가스 소비량 자료를 사용하였다. NF₃의 경우 한국디스플레이산업협회에서 제공한 2008년 이후 NF₃ 소비량 자료를 사용하였다.

| 표 4-113 | 디스플레이 부문 활동자료 수집방법(1999-2023)

기간	활동자료	통계명	관리기관	대상 가스
1999-2006	HFCs, PFCs, SF ₆ 소비량	협회 자료	한국디스플레이산업협회	HFCs, PFCs, SF ₆
2007-2023	HFCs, PFCs, SF ₆ 배출량	「사업장 명세서」	기후에너지환경부	
2008-2023	NF ₃ 소비량	협회 자료	한국디스플레이산업협회	NF ₃

4.6.2.3 시계열 일관성

HFCs, PFCs, SF₆의 경우, 2006 IPCC GL에 따른 일관된 방법론과 배출계수, 활동자료를 적용하였다. 2007년 이후는 동일 사업장이 배출권거래제 대상업체로 지정됨에 따라 「사업장 명세서」를 활용하여 배출량의 정확성과 일관성을 확보하였다. NF₃는 일관된 방법론과 배출계수, 활동자료를 적용하여 배출량을 산정하였다.

4.6.2.4 QA/QC

QA/QC는 제1장 서론 1.5절 내용과 동일하다.

4.6.2.5 재계산

디스플레이 부문은 NF₃의 배출제어 기술이 있는 공정의 온실가스 부피분율(a)이 변경되어 2008-2022년 배출량을 재계산하였다.

4.6.2.6 개선계획

현재 국내 NF_3 배출 저감 시설의 효율 특성을 측정 및 연구 중이며, 향후 국가 고유 배출계수 개발 등을 통해 배출량 산정 방법을 고도화할 계획이다.

4.6.3 광전지(2.E.3.)

4.6.3.1 배출원 개요

광전지는 빛을 전기 에너지로 변환시켜 주는 반도체 소자로서, 주로 태양광 발전에 사용된다. 광전지는 폴리실리콘 제조 또는 웨이퍼 가공 등의 공정을 거쳐 생산되며, 이 중 식각(etching)과 증착(CVD) 공정에서 불소계 온실가스(HFCs , PFCs , SF_6)가 소비된다. 광전지 부문에서는 국내 광전지 생산 중 식각과 증착공정에서 소비된 불소계 온실가스(PFCs , SF_6)에 따른 배출량을 산정하였다. 우리나라에서는 불소계 온실가스를 소비하는 광전지 생산이 2022년도에 중단되어 2023년 배출량은 발생하지 않았다.

4.6.3.2 방법론

4.6.3.2.1 산정방법

광전지 부문은 2006 IPCC GL의 Tier 2a 방법에 따라 산정된 「사업장 명세서」의 불소계 온실가스 배출량 자료를 사용하였다.

〈광전지 부문 배출량 산정식(Tier 2a)〉

$$\text{FC가스}(i) \text{ 배출량} = (1 - h) \times FC_i \times (1 - U_i) \times (1 - a_i \times d_i)$$

$$\text{부생가스}(j) \text{ 배출량} = (1 - h) \times B_{j,i} \times FC_i \times (1 - a_i \times d_j)$$

온실가스(i,j) 배출량	: 온실가스(i,j) 배출량(kg)
h	: 가스 잔여율
FC	: 온실가스 소비량(kg)
U	: 온실가스 사용율(공정 중 파기되거나 변환된 비율)
B	: 부산물 발생률(부생가스 발생량/가스 사용량)
a	: 배출제어 기술을 통과하는 온실가스의 부피분율
d	: 배출제어 기술에 의한 온실가스의 저감효율
i	: 광전지 부문에서 소비되는 불소계 온실가스(CF_4 , SF_6 등)
j	: 가스별 부생가스(CF_4 , C_2F_6 , C_3F_8)

자료: 2006 IPCC GL, Vol.3, Ch.6, Equation 6.2-6.6

4.6.3.2.2 배출계수

광전지 부문은 생산업체가 「사업장 명세서」에 보고한 배출계수가 적용되었다.

4.6.3.2.3 활동자료

2011년 이후부터 2022년까지「사업장 명세서」의 불소계 온실가스 배출량 자료를 사용하였다.

표 4-114 | 광전지 부문 활동자료 수집방법(2011-2022)

기간	활동자료	통계명	관리기관	대상가스
2011-2022	불소계 온실가스 배출량	「사업장 명세서」	기후에너지환경부	PFCs, SF ₆

4.6.3.3 시계열 일관성

광전지 부문은 전 시계열 동일한 방법론과 배출계수, 활동자료를 적용하였다.

4.6.3.4 QA/QC

QA/QC는 제1장 서론 1.5절 내용과 동일하다.

4.6.3.5 재계산

재계산은 수행하지 않았다.

4.7 오존층파괴물질의 대체물질 사용(2.F.)

오존층파괴물질(Ozone Depleting Substances, 이하 ODS)의 대체물질은 HFCs와 PFCs, HFO(수소 불화올레핀), 자연 냉매 등이 있으며, 냉매, 발포제, 소화약제, 에어로졸, 금속 세정용 용매 등으로 사용 하던 ODS를 대체하기 위해 사용된다. ODS의 대체물질 사용 부문에서는 ODS 대체물질 중 온실가스인 HFCs 및 PFCs를 포함하는 기기나 제품이 제조 및 설치, 사용, 폐기되는 과정에서 대기 중으로 방출되는 배출량을 산정한다. 하위 배출 부문은 냉장 및 냉방(2.F.1.), 수지발포제(2.F.2.), 화재방재(2.F.3.), 에어로졸(2.F.4.), 용매(2.F.5.)가 포함된다.

2016년 10월 르완다 키갈리에서 열린 몬트리올 의정서 당사국 회의에서 선진국은 2019년부터, 우리나라를 포함한 개발도상국들은 2024년부터 HFCs 소비량을 단계적으로 감축하기로 합의하였다. 이에, 우리나라는 2022년 『오존층 보호 등을 위한 특정물질의 관리에 관한 법률』(이하 『오존층보호법』)에서 HFCs를 특정물질로 지정하고 HFCs 생산·수입량을 허가·관리(관련 통계 포함)하는 법·제도를 마련하였다.

우리나라에서는 ODS 대체물질 소비량을 확인할 수 있는 기초통계가 냉장 및 냉방, 수지발포제, 화재방재, 에어로졸, 용매 용도 수준(2.F.1.-2.F.5.)으로만 수집되고 있어 2006 IPCC GL의 Tier 1a 방법론에 따라 배출량을 산정하였다.

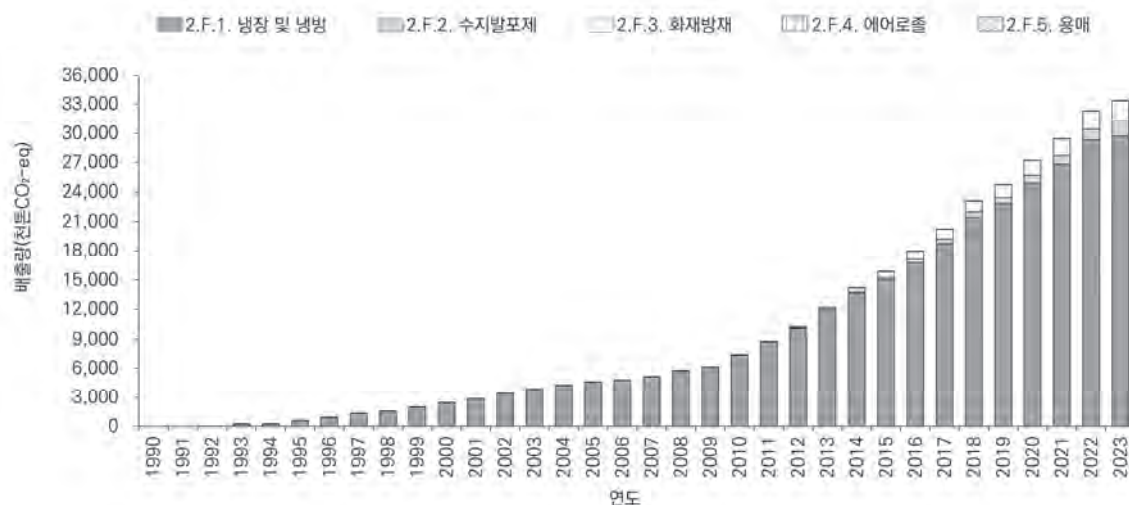


그림 4-8 | 오존층파괴물질의 대체물질 사용 부문 온실가스 배출량(1990-2023)

ODS의 대체물질 사용 부문 2023년 배출량은 33,413 천톤 CO₂-eq로 산업공정 분야 배출량의 27.5%를 차지한다. 하위 부문별 배출 비중은 냉장 및 냉방 부문이 88.9%로 대부분을 차지했으며, 화재방재 6.4%, 수지발포제 4.6%, 용매 0.04%, 에어로졸 0.02% 순이다. ODS의 대체물질 사용 부문 2023년 배출량은 전년 대비 1,081 천톤 CO₂-eq, 3.3% 증가하였는데 수지발포제 부문이 439 천톤 CO₂-eq 증가하며 배출량 증가에 가장 크게 기여하였고 그 외 냉장 및 냉방, 화재방재 부문에서 각각 371 천톤 CO₂-eq, 279 천톤 CO₂-eq 증가하였다.

| 표 4-115 | 오존층파괴물질의 대체물질 사용 부문별 온실가스 배출량(1990-2023)

(단위: 천톤 CO₂-eq)

구분	1990	2000	2007	2010	2018	2021	2022	2023
2F.1. 냉장 및 냉방	IE,NO	2,458	5,121	7,354	21,399	26,825	29,343	29,714
2F.2. 수지발포제	IE,NO	0.5	1	1	622	889	1,113	1,552
2F.3. 화재방재	NO	NO	NO	26	1,104	1,709	1,847	2,126
2F.4. 에어로졸	IE,NO	6	11	4	1	17	17	8
2F.5. 용매	NO	NO	NO	NO	6	11	11	13

주: 하위용도별 배출량이 구분되지 않음에 따라 2.F.1.b~2.F.1.f., 2.F.2.b., 2.F.4.a. 부문 배출량은 2.F.1.a., 2.F.2.a., 2.F.4.b.부문에 포함하여 보고(IE)

4.7.1 냉장 및 냉방(2.F.1.)

4.7.1.1 배출원 개요

2023년 기준	산정온실가스	방법론	배출계수	활동자료
	HFCs, PFCs	Tier 1a	D	용도별·가스별 생산, 수입, 수출량

냉장 및 냉방 부문에서는 장치 내 온도를 낮게 유지하는 냉장 장치와 실내의 온습도를 조절하기 위한 냉방장치에 주입된 냉매(HFCs, PFCs)가 냉장 및 냉방장치를 사용하는 과정에서 방출되는 배출량을 산정한다. 과거에는 냉매로 오존층파괴물질인 CFCs나 HCFC를 사용하였으나, 몬트리올 의정서에 따라 CFCs와 HCFC의 생산 및 사용이 규제된 이후에는 주로 HFCs가 사용되고 있다.

냉장 및 냉방 부문 2023년 배출량은 29,714 천톤 CO₂-eq로, 전년 대비 371 천톤 CO₂-eq, 1.3% 증가하였는데 이는 과거부터 HFCs 및 PFCs 소비 축척(bank)량이 증가한 영향으로 분석된다.

| 표 4-116 | 냉장 및 냉방 부문 온실가스 배출량(1990-2023)

(단위: 천톤 CO₂-eq)

구분	1990	2000	2007	2010	2018	2021	2022	2023
냉장 및 냉방	IE,NO	2,458	5,121	7,354	21,399	26,825	29,343	29,714

주: 하위용도별 배출량이 구분되지 않음에 따라 2.F.1.b~2.F.1.f. 부문 배출량은 2.F.1.a. 부문에 포함하여 보고(IE)

4.7.1.2 방법론

4.7.1.2.1 산정방법

냉장 및 냉방 부문은 2006 IPCC GL의 Tier 1a 방법에 따라 가스별 당해연도 순소비량과 장치 보유량(bank)에 연간 누출률을 곱하여 가스별 연간 배출량을 산정하였다⁴⁵⁾.

45) 냉장 및 냉방 부문에서의 가스별 소비량 통계는 있으나 하위용도별(2.F.1.a.-2.F.1.f.) 통계 부재로 2006 IPCC GL의 Tier 1a 방법 적용함

〈냉장 및 냉방 부문 배출량 산정식(Tier 1a)〉

$$\text{연간 배출량} = \text{순소비량} \times \text{EF}_{\text{FY}} + \text{총 축적된 물질량} \times \text{EF}_{\text{B}}$$

연간 배출량	: 냉장 및 냉방부문 연간 배출량(t)
순소비량	: 냉장 및 냉방부문 가스별 당해연도 순소비량(t)
EF _{FY}	: 당해연도 합성 배출계수(%)
총 축적된 물질량	: 냉장 및 냉방부문 가스별 축적(bank)량(t)
EF _B	: 냉장 및 냉방 부문 축적된 양의 합성 배출계수(%)

자료: 2006 IPCC GL, Vol.3, Ch.7. Equation 7.2B

4.7.1.2.2 배출계수

냉장 및 냉방 부문의 배출계수(연간 누출율) 및 평균수명은 2006 IPCC GL Tier 1 기본 계수를 적용하였다.

표 4-117 | 냉장 및 냉방 부문 배출계수

구분	계수	출처
배출계수(연간 누출율)(EF _{FY} , EF _B)	15%	2006 IPCC GL
평균수명(기기 가동기간)	15년	

4.7.1.2.3 활동자료

2008년 이후 냉매 가스 소비량은 한국에너지공단이 ODS 대체물질 제조 및 수입업체를 대상으로 조사한 가스별 생산·수입·수출량 자료를 활용하였다⁴⁶⁾⁴⁷⁾. 업체 조사자료가 존재하지 않은 과거 시계열의 경우 관세청의 수출입 무역통계를 보완적으로 활용하였다. 수출입 무역통계를 활용할 수 있는 대상 가스는 수출입코드(HS CODE)가 단일가스별로 분류되어 있고 ODS 대체물질의 사용 부문에서만 소비되는 HFC-134a와 152a에 한정된다. HFC-134a와 152a는 한국에너지공단의 업체 조사에 따른 가스별, 용도별 소비량 정보가 2011년 이후 존재하므로 활용하고 1990-2010년은 수출입 무역통계 자료로 냉장 및 냉방 부문의 순소비량을 계산하여 사용하였다⁴⁸⁾.

표 4-118 | 냉장 및 냉방 부문 활동자료 수집방법(1992-2023)

기간	활동자료	통계명	관리기관	대상가스
1992-2010	가스별 수입량, 수출량	수출입 무역통계	관세청	HFC-134a, HFC-152a
2008-2023	용도별·가스별 생산량, 수입량, 수출량	사업장 조사자료	한국에너지공단	HFCs, PFCs

46) 업체의 설문 응답에 따라 세부 가스별로 활동자료 최초 보고연도가 상이함

47) 산업통상자원부는 2022년 「오존층보호법」을 개정하고 HFCs 생산, 수입, 수출량 통계 수집 절차를 법제화함

48) 수출입 무역통계는 용도 구분이 되지 않아 2010년 이전 국내 총 순소비량(수입-수출량)에 2011-2013년 가스별·용도별 소비 비중 평균값(업체 조사자료)을 적용하여 냉장 및 냉방 부문의 가스별 순소비량을 추정함

| 표 4-119 | 냉장 및 냉방 부문 활동자료(1990-2023)

(단위: 톤)

구분	1990	2000	2007	2010	2018	2021	2022	2023
HFCs, PFCs 소비량	IE,NO	4,028	5,592	8,733	19,815	18,934	20,336	16,476

4.7.1.3 시계열 일관성

냉장 및 냉방 부문은 일관된 방법론과 배출계수를 적용하여 배출량을 산정하였다. 활동자료의 경우, 2010년 이전은 냉장 및 냉방 부문의 HFCs, PFCs에 대한 국내 순소비량 파악을 위해 수출입 무역통계를 활용하였으며, 2008년 이후는 한국에너지공단에서 실시한 국내 업체 조사결과를 활용함으로써 활동자료의 정확성과 일관성을 확보하였다.

4.7.1.4 QA/QC

QA/QC는 제1장 서론 1.5절 내용과 동일하다.

4.7.1.5 재계산

냉장 및 냉방 부문은 활동자료의 2020-2022년 HFCs 순 소비량이 수정되어 배출량을 재계산하였다.

4.7.1.6 개선계획

냉장 및 냉방 부문은 2023년 기준 주요 배출원이나 Tier 1 산정방법론 및 배출계수를 적용하고 있다. 우리나라의 하위 용도별 통계, 사용 냉매 종류, 냉매 충전량 등을 조사검토 중이며 향후 배출량 산정 방법을 Tier 2로 고도화할 계획이다.

4.7.2 수지발포제(2.F.2.)

4.7.2.1 배출원 개요

2023년 기준	산정온실가스	방법론	배출계수	활동자료
	HFCs	Tier 1a	D	용도별·가스별 생산, 수입, 수출량

수지발포제는 크게 연질 발포제(open cell foam)와 경질 발포제(closed-cell foam)로 구분된다. 연질 발포제는 가구 쿠션, 매트리스, 자동차 시트 등으로 사용되며, 제조 과정이나 제조 직후에 온실 가스가 배출된다. 경질 발포제는 단열재 등으로 사용되며, 전 생애주기(제조, 사용, 폐기) 동안 온실 가스가 배출된다. 과거에는 수지발포제로 오존층파괴물질인 HCFCs를 주로 사용하였으나, 몬트리올 의정서 발효 이후 그 중 일부는 HFCs로 대체 사용되고 있다.

수지발포제 부문 2023년 배출량은 전년 대비 39.5% 증가한 1,552 천톤 CO₂-eq이다. 이는 2023년 수지발포용 HFCs 순수입량이 증가한 영향으로 분석된다.

| 표 4-120 | 수지발포제 부문 배출량(1990-2023)

(단위: 천톤 CO₂-eq)

구분	1990	2000	2007	2010	2018	2021	2022	2023
수지발포제	IE,NO	0.5	1.4	1.3	622	889	1,113	1,552

주: 하위용도별 배출량이 구분되지 않음에 따라 2.F.2.b. 부문 배출량은 2.F.2.a. 부문에 포함하여 보고(IE)

4.7.2.2 방법론

4.7.2.2.1 산정방법

수지발포제 부문은 2006 IPCC GL의 Tier 1a 방법에 따라 가스별 당해연도 순소비량과 장치 보유량(bank)에 연간 누출률을 곱하여 가스별 연간 배출량을 산정하였다⁴⁹⁾.

〈수지발포제 부문 배출량 산정식(Tier 1a)〉

$$\text{연간 배출량} = M_t \times EF_{FYL} + Bank_t \times EF_{AL} + DL_t - RD_t$$

연간 배출량	: 수지발포제 부문 연간 배출량(t)
M_t	: 수지발포제 부문 가스별 당해연도 순소비량(t)
EF_{FYL}	: 당해연도 순소비량에 대한 배출계수(%)
$Bank_t$	: 수지발포제 부문 가스별 축적(bank)량(t)
EF_{AL}	: 수지발포제 부문 축적된 양의 연간 손실에 대한 배출계수(%)
DL_t	: 폐기제품 내 가스 잔여량(t)
RD_t	: 회수 및 파괴된 양(t)

자료: 2006 IPCC GL, Vol.3, Ch.7, Equation 7.7

4.7.2.2.2 배출계수

수지발포제 부문의 배출계수(당해 누출율, 축적량 누출율) 및 평균수명은 2006 IPCC GL Tier 1 기본 계수를 적용하였다.

| 표 4-121 | 수지발포제 부문 배출계수

구분	계수	출처
순소비량 배출계수(EF_{FYL})	10%	2006 IPCC GL
Bank(축적량) 배출계수(EF_{AL})	4.5%	
평균수명	20년	

49) 수지발포제 부문에서의 가스별 소비량 통계는 있으나 하위용도별(연질, 경질) 통계 부재로 2006 IPCC GL의 Tier 1a 방법 적용함

4.7.2.2.3 활동자료

2011년부터는 한국에너지공단이 ODS 대체물질 제조 및 수입업체를 대상으로 조사한 가스별 생산·수입·수출량 자료를 활용하여 순소비량을 산정하였다.

2010년 이전에는 관세청의 수출입코드(HS CODE)가 단일가스별로 분류되어 있고, ODS 대체물질의 사용 부문에서만 소비되고 있는 HFC-134a와 152a의 경우, 관세청의 수출입 무역통계 자료를 활용하였다. 다만, 용도 구분이 없어 2010년 이전 국내 수입·수출량에 2011-2013년 가스별·용도별 소비 비중 평균값(업체 조사자료)을 활용하여 수지발포제 부문의 가스별 순소비량을 추정하였다.

| 표 4-122 | 수지발포제 부문 활동자료 수집방법(1992-2023)

기간	활동자료	통계명	관리기관	대상가스
1992-2010	가스별 수입량, 수출량	수출입 무역통계	관세청	HFC-134a, 152a
2011-2023	용도별 가스별 생산량, 수입량, 수출량	사업장 조사 자료	한국에너지공단	HFCs

| 표 4-123 | 수지발포제 부문 활동자료(1990-2023)

(단위: 톤)

구분	1990	2000	2007	2010	2018	2021	2022	2023
HFCs 소비량	IE,NO	20	22	6	4,049	5,113	5,691	7,699

4.7.2.3 시계열 일관성

수지발포제 부문은 일관된 방법론과 배출계수를 적용하여 배출량을 산정하였다. 활동자료의 경우 2010년 이전은 수지발포제 부문의 HFCs에 대한 국내 순소비량 파악을 위해 수출입 무역통계(관세청)를 활용하였으며, 2011년 이후는 한국에너지공단에서 실시한 국내 업체 조사 결과를 활용함으로써 활동자료의 정확성과 일관성을 확보하였다.

4.7.2.4 QA/QC

QA/QC는 제1장 서론 1.5절 내용과 동일하다.

4.7.2.5 재계산

수지발포제 부문은 활동자료의 2020-2022년 HFCs 순 소비량이 수정되어 배출량을 재계산하였다.

4.7.3 화재방재(2.F.3.)

4.7.3.1 배출원 개요

2023년 기준	산정온실가스	방법론	배출계수	활동자료
	HFCs	Tier 1a	D	용도별·가스별 생산, 수입, 수출량

화재방재 부문에서는 소화약제를 사용하는 과정에서 방출되는 HFCs의 배출량을 산정한다. 과거에는 소화약제로 오존층파괴물질인 할론(Halons)이 주로 사용되었으나, 몬트리올 의정서에 따라 할론의 생산 및 사용, 수출이 규제된 이후에는 주로 HFCs가 사용되고 있다. 우리나라에서는 2010년 1월부터 할론의 생산 및 수입이 금지됨에 따라 HFC-23, 125, 227ea, 236fa 등 할로젠화합물 소화약제와, FK-5-1-12, IG-100 등 불활성가스 청정소화약제 등을 소화약제로 사용하고 있다.

화재방재 부문 2023년 배출량은 전년 대비 15.1% 증가한 2,126 천톤 CO₂-eq이다. 이는 2023년 화재방재용 HFCs 순수입량이 증가한 영향으로 분석된다.

| 표 4-124 | 화재방재 부문 배출량(1990-2023)

(단위: 천톤 CO ₂ -eq)								
구분	1990	2000	2007	2010	2018	2021	2022	2023
화재방재	NO	NO	NO	26	1,104	1,709	1,847	2,126

4.7.3.2 방법론

4.7.3.2.1 산정방법

화재방재 부문은 2006 IPCC GL의 Tier 1a 방법에 따라 소화약제 보유량에 연간 누출률을 곱하여 가스별 연간 배출량을 산정하였다.

〈화재방재 부문 배출량 산정식(Tier 1a)〉

$$\text{연간 배출량} = \text{Bank}_t \times \text{EF}_{\text{AL}} + \text{RLL}_t$$

연간 배출량 : 화재방재 부문 연간 배출량(t)

Bank_t : 화재방재 설비 내 소화약제 보유(bank)량(t)

EF_{AL} : 화재방재 부문 배출계수(연간 누출률)(%)

RLL_t : 회수 및 손실된 양(t)

자료: 2006 IPCC GL, Vol.3, Ch.7 Equation 7.17

4.7.3.2.2 배출계수

화재방재 부문의 배출계수(연간 누출율) 및 평균수명은 2006 IPCC GL Tier 1 기본 계수를 적용하였다.

| 표 4-125 | 화재방재 부문 배출계수

구분	계수	출처
배출계수(연간 누출율)(EF _{AL})	2%(대량시스템 기준)	2006 IPCC GL
평균수명	20년(대량시스템 기준)	

4.7.3.2.3 활동자료

2008년부터 한국에너지공단에서 ODS 대체물질 제조 및 수입업체를 대상으로 조사한 가스별 생산·수입·수출량 자료를 활용하여 순소비량을 산정하였다.

| 표 4-126 | 화재방재 부문 활동자료 수집방법(2008-2023)

기간	활동자료	통계명	관리기관	대상가스
2008-2023	용도별 가스별 생산량, 수입량, 수출량	사업장 조사자료	한국에너지공단	HFCs

| 표 4-127 | 화재방재 부문 활동자료(1990-2023)

(단위: 톤)

구분	1990	2000	2007	2010	2018	2021	2022	2023
HFCs 소비량	NO	NO	NO	171	1,418	2,218	1,553	3,066

4.7.3.3 시계열 일관성

화재방재 부문은 2008년 이후 전 시계열에 일관된 방법론과 배출계수, 활동자료를 적용하여 배출량을 산정하였다.

4.7.3.4 QA/QC

QA/QC는 제1장 서론 1.5절 내용과 동일하다.

4.7.3.5 재계산

화재방재 부문은 활동자료의 2020-2022년 HFCs 순 소비량이 수정되어 배출량을 재계산하였다.

4.7.4 에어로졸(2.F.4.)

4.7.4.1 배출원 개요

2023년 기준	산정온실가스	방법론	배출계수	활동자료
	HFCs	Tier 1a	D	용도별 · 가스별 생산, 수입, 수출량

에어로졸 부문에서는 에어로졸을 사용하는 과정에서 방출되는 HFCs의 배출량을 산정한다. 과거에는 에어로졸로 오존층파괴물질인 CFCs, HCFC 등이 주로 사용되었으나, 몬트리올 의정서에 따라 CFCs, HCFC의 생산 및 사용, 수출이 규제된 이후에는 현재는 액화석유가스나 HFCs가 주로 사용되고 있다. 에어로졸 부문에서는 의약품 계량 흡입기(Metered Dose Inhalers, MDIs), 비의약품 스프레이 등의 제품에 추진제와 용매로 사용된 HFCs 배출량을 산정하였다.

에어로졸 부문 2023년 배출량은 전년 대비 54.4% 감소한 8 천톤CO₂-eq이다. 이는, 전년도에 소비된 HFCs로부터 발생하는 배출량은 있으나, 2023년도에 에어로졸 용도로 소비된 HFCs가 없어서 배출량이 감소한 것으로 분석된다.

| 표 4-128 | 에어로졸 부문 온실가스 배출량(1990-2023)

(단위: 천톤 CO₂-eq)

구분	1990	2000	2007	2010	2018	2021	2022	2023
HFCs	IE,NO	6	11	4	1	17	17	8

주: 하위용도별 배출량이 구분되지 않음에 따라 2.F.4.a. 부문 배출량은 2.F.4.b. 부문에 포함하여 보고(IE)

4.7.4.2 방법론

4.7.4.2.1 산정방법

에어로졸 부문은 2006 IPCC GL의 Tier 1a 방법에 따라 가스별 당해연도 순소비량과 장치 보유량(bank)에 연간 누출률을 곱하여 가스별 연간 배출량을 산정하였다.

〈에어로졸 부문 배출량 산정식(Tier 1a)〉

$$\text{연간 배출량} = S_t \times EF + S_{t-1} \times (1-EF)$$

연간 배출량 : 에어로졸 부문 연간 배출량(t)

S_t : 에어로졸 부문 가스별 당해연도 순소비량(t)

EF : 에어로졸 부문 연간 배출계수(%)

S_{t-1} : 에어로졸 부문 가스별 전년도 순소비량(t)

자료: 2006 IPCC GL, Vol.3, Ch.7, Equation 7.6

4.7.4.2.2 배출계수

에어로졸 부문의 배출계수(연간 누출율) 및 평균수명은 2006 IPCC GL Tier 1 기본 계수를 적용하였다.

| 표 4-129 | 에어로졸 부문 배출계수

구분	계수	출처
배출계수	50%	2006 IPCC GL
평균수명	2년	

4.7.4.2.3 활동자료

2011년부터는 한국에너지공단이 ODS 대체물질 제조 및 수입업체를 대상으로 조사한 가스별 생산·수입·수출량 자료를 활용하여 순소비량을 산정하였다. 2010년 이전에는 관세청의 수출입 무역통계 자료를 활용하였으나, 용도 구분이 없어 2010년 이전 국내 수입·수출량에 2011-2013년 가스별·용도별 소비 비중 평균값(업체 조사자료)을 활용하여 에어로졸 부문의 가스별 순소비량을 추정하였다.

| 표 4-130 | 에어로졸 부문 활동자료 수집방법(1992-2023)

기간	활동자료	통계명	관리기관	대상가스
1992-2010	가스별 수입량, 수출량	수출입 무역통계	관세청	HFC-134a, 152a
2011-2023	용도별 가스별 생산량, 수입량, 수출량	사업장 조사자료	한국에너지공단	

| 표 4-131 | 에어로졸 부문 활동자료(1990-2023)

(단위: 톤)								
구분	1990	2000	2007	2010	2018	2021	2022	2023
HFCs 소비량	IE,NO	68	75	22	8	124	89	-

4.7.4.3 시계열 일관성

에어로졸 부문은 일관된 방법론과 배출계수를 적용하여 배출량을 산정하였다. 활동자료의 경우 2010년 이전은 에어로졸 부문의 HFCs에 대한 국내 순소비량 파악을 위해 수출입 무역통계를 활용하였으며, 2011년 이후는 한국에너지공단에서 실시한 국내 업체 조사결과를 활용함으로써 활동자료의 정확성과 일관성을 확보하였다.

4.7.4.4 QA/QC

QA/QC는 제1장 서론 1.5절 내용과 동일하다.

4.7.4.5 재계산

재계산은 수행하지 않았다.

4.7.5 용매(2.F.5.)

4.7.5.1 배출원 개요

2023년 기준	산정온실가스	방법론	배출계수	활동자료
	HFCs	Tier 1a	D	용도별 · 가스별 생산, 수입, 수출량

용매 부문에서는 용매를 사용하는 과정에서 방출되는 HFCs 배출량을 산정한다. 용매는 제품의 품질, 성능, 기능 등을 향상하기 위한 세정제로 활용된다. 과거에는 용매로 오존층파괴물질인 CFC-113가 주로 사용되었으나, 몬트리올 의정서에 따라 CFCs의 생산 및 사용, 수출이 규제된 이후에는 주로 HFCs가 사용되고 있다.

용매 부문 2023년 배출량은 전년 대비 16.7% 증가한 13 천톤 CO₂-eq이다.

| 표 4-132 | 용매 부문 온실가스 배출량(1990-2023)

(단위: 천톤 CO ₂ -eq)								
구분	1990	2000	2007	2010	2018	2021	2022	2023
용매	NO	NO	NO	NO	6	11	11	13

4.7.5.2 방법론

4.7.5.2.1 산정방법

용매 부문은 2006 IPCC GL의 Tier 1a 방법에 따라 가스별 당해연도 순소비량과 전년도 순소비량에 연간 누출률을 곱하여 가스별 연간 배출량을 산정하였다.

〈용매 부문 배출량 산정식(Tier 1a)〉

$$\text{연간 배출량} = S_t \times EF + S_{t-1} \times (1-EF) - D_{t-1}$$

연간 배출량	: 용매 부문 연간 배출량(t)
S_t	: 용매 부문 가스별 당해연도 순소비량(t)
EF	: 용매 부문 연간 배출계수(%)
S_{t-1}	: 용매 부문 가스별 전년도 순소비량(t)
D_{t-1}	: 전년도에 파괴된 용매량(t)

자료: 2006 IPCC GL, Vol.3, Ch.7, Equation 7.5

4.7.5.2.2 배출계수

용매 부문의 배출계수(연간 누출율) 및 평균수명은 2006 IPCC GL Tier 1 기본 계수를 적용하였다.

| 표 4-133 | 용매 부문 배출계수

구분	계수	출처
배출계수	50%	2006 IPCC GL
평균수명	2년	

4.7.5.2.3 활동자료

2011년부터 한국에너지공단이 ODS 대체물질 제조 및 수입업체를 대상으로 조사한 가스별 생산·수입·수출량 자료를 활용하여 순소비량을 산정하였다.

| 표 4-134 | 용매 부문 활동자료 수집방법(2011-2023)

기간	활동자료	통계명	관리기관	대상가스
2011-2023	용도별 가스별 생산량, 수입량, 수출량	사업장 조사자료	한국에너지공단	HFCs

| 표 4-135 | 용매 부문 활동자료(1990-2023)

(단위: 톤)								
구분	1990	2000	2007	2010	2018	2021	2022	2023
HFCs 소비량	NO	NO	NO	NO	NO	6	8	8

4.7.5.3 시계열 일관성

용매 부문은 2011년 이후 전 시계열에 일관된 방법론과 배출계수, 활동자료를 적용하여 배출량을 산정하였다.

4.7.5.4 QA/QC

QA/QC는 제1장 서론 1.5절 내용과 동일하다.

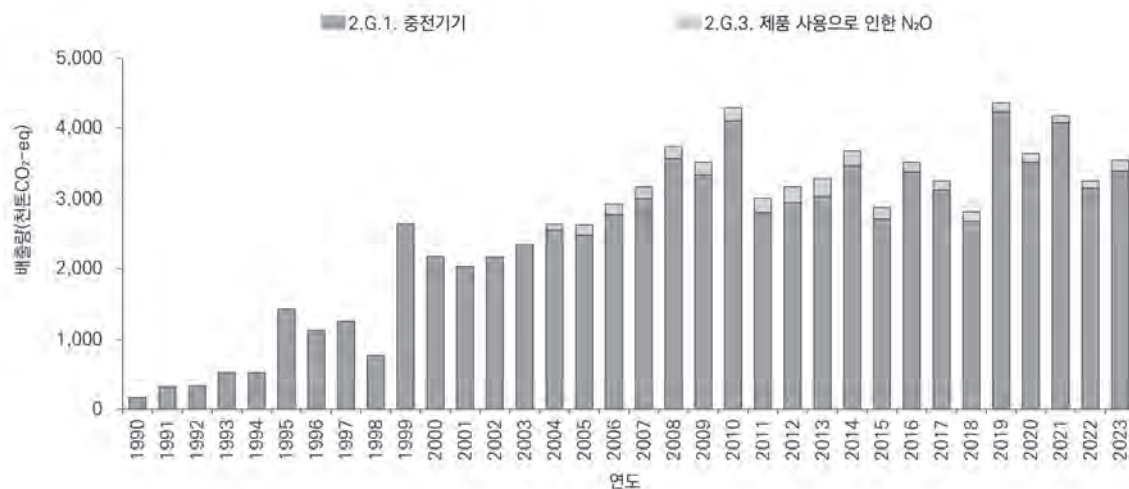
4.7.5.5 재계산

재계산은 수행하지 않았다.

4.8 기타 제품 제조 및 사용(2.G.)

기타 제품 제조 및 사용 부문은 전기 설비(이하 중전기기)를 생산 및 사용하거나 기타 제품을 사용하는 과정에서 발생하는 SF₆ 및 PFCs, N₂O 배출량을 산정하며, 하위 배출 부문으로는 중전기기(2.G.1.), 기타 제품 사용으로 인한 SF₆ 및 PFCs(2.G.2.), 제품 사용으로 인한 N₂O(2.G.3.) 부문이 포함된다. 기타 제품 사용으로 인한 SF₆ 및 PFCs 부문은 국내에 배출원이 없는 것으로 확인되어 산정 대상에서 제외하였다(NO).

기타 제품 제조 및 사용 부문 2023년 배출량은 3,538 천톤 CO₂-eq로 산업공정 분야 배출량의 2.9%를 차지한다. 하위 부문별 배출 비중은 중전기기 부문 배출량이 95.7%로 대부분을 차지하고 있으며, 제품 사용으로 인한 N₂O 부문이 4.3%이다. 기타 제품 제조 및 사용 부문 2023년 배출량은 전년 대비 285 천톤 CO₂-eq, 8.7% 증가하였는데 중전기기 부문 배출량이 236 천톤 CO₂-eq 증가하며 배출량 증가에 가장 크게 기여하였다. 제품 사용으로 인한 N₂O 사용(의료용 N₂O 사용)에 의한 2023년 배출량은 전년 대비 49 천톤 CO₂-eq 증가하였다.



| 그림 4-9 | 기타 제품 제조 및 사용 부문 온실가스 배출량(1990-2023)

| 표 4-136 | 기타 제품 제조 및 사용 부문별 온실가스 배출량(1990-2023)

(단위: 천톤 CO₂-eq)

구분	1990	2000	2007	2010	2018	2021	2022	2023
2.G.1. 중전기기	168	2,177	3,000	4,095	2,680	4,075	3,150	3,386
2.G.2. 제품 사용으로 인한 SF ₆ , PFCs	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
2.G.3. 제품 사용으로 인한 N ₂ O	NE,NO	NE,NO	169	199	132	96	104	152

4.8.1 중전기(2.G.1.)

4.8.1.1 배출원 개요

2023년 기준	산정온실가스	방법론	배출계수	활동자료
	SF ₆	Tier 1	D	단계별(생산, 사용, 폐기) 정격용량

중전기는 사용자에게 전기를 수송하고, 사용자가 안전하게 전기를 사용할 수 있도록 하는 제반 장비와 부속기기 등을 총칭하며, 스파크 등에 의한 손상 방지, 전기 설비의 소형화 및 고성능화 등을 위해 절연내력이 우수한 SF₆를 사용한다. 중전기 부문에서는 전기 설비의 생산, 설치, 사용, 폐기 등 전 과정(life cycle)에서 전기 절연체와 전류 차단제로 사용된 SF₆가 방출되는 배출량을 산정하였다.

중전기 부문 2023년 배출량은 전년 대비 7.5% 증가한 3,386 천톤 CO₂-eq이다. 중전기 부문의 활동자료인 설치-사용-폐기 단계별 SF₆ 정격용량⁵⁰⁾의 총합이 전년 대비 19.6% 증가하여 배출량이 증가한 것으로 분석된다.

| 표 4-137 | 중전기 부문 단계별 배출량(1990-2023)

(단위: 천톤 CO₂-eq)

구분	1990	2000	2007	2010	2018	2021	2022	2023
설치	154	1,923	1,843	2,652	944	1,806	1,673	1,697
사용	14	253	605	766	917	1,211	1,205	1,456
폐기	NE	NE	552	677	820	1,058	272	233
합계	168	2,177	3,000	4,095	2,680	4,075	3,150	3,386

4.8.1.2 방법론

4.8.1.2.1 산정방법

중전기 부문은 2006 IPCC GL의 Tier 1 방법에 따라 단계별(생산(설치), 사용, 폐기) 정격용량에 배출계수를 곱하여 SF₆ 배출량을 산정하였다.

〈중전기 부문 SF₆ 배출량 산정식(Tier 1)〉

$$\text{배출량} = \text{생산(설치)단계 배출량} + \text{사용단계 배출량} + \text{폐기단계 배출량}$$

배출량 : 전기 설비 사용에 따른 SF₆ 배출량(t SF₆)

생산(설치)단계 배출량 : 생산(설치)단계 배출계수 × 당해연도 생산(설치) 설비의 SF₆ 정격용량(t)

사용단계 배출량 : 사용단계 배출계수 × 설치된 사용 설비의 SF₆ 총 정격용량(t)

폐기단계 배출량 : 폐기 설비의 총 정격용량(t) × 폐기 설비의 SF₆ 잔존 비율

자료: 2006 IPCC GL, Vol.3, Ch.8.2, Equation 8.1

50) SF₆ 정격용량(Rated capacity)은 중전기가 정상적인 조건에서 작동하는데 필요한 최대 SF₆ 용량을 의미함

4.8.1.2.2 배출계수

중전기 부문 배출계수는 2006 IPCC GL 기본 배출계수를 적용하였다. 단, 폐기 단계에서 회수 실적을 보유하고 있는 사업장의 경우 회수율을 적용하였다.

| 표 4-138 | 중전기 부문 배출계수

구분	계수	출처
생산단계(일본 기준) 배출계수	0.29	2006 IPCC GL
사용단계(일본 기준) 배출계수	0.007	
폐기단계(일본 기준) 배출계수	0.95	
폐기단계 회수율(1990-2010)	0.8	사업장 조사자료
폐기단계 회수율(2011-)	0.97	

4.8.1.2.3 활동자료

한국전력공사의 변전 및 배전설비, 6대 발전사 및 민간 발전사, 한국전기안전공사를 대상으로 조사한 단계별(설치, 사용, 폐기) SF₆ 정격용량 자료를 활용하였다.

| 표 4-139 | 중전기 부문 활동자료 수집방법(1990-2023)

기간	활동자료	통계명	관리기관	대상가스
1990-2023	단계별(생산, 사용, 폐기) 정격용량	내부자료	한국전력공사	SF ₆
		사업장 조사자료	6대 발전사	
		「사업장 명세서」	기후에너지환경부	
		사용전검사 통계	한국전기안전공사	

| 표 4-140 | 중전기 부문 활동자료(1990-2023)

(단위: 톤)

구분	1990	2000	2007	2010	2018	2021	2022	2023
설치	23	282	270	389	138	265	245	249
사용	84	1,541	3,680	4,658	5,572	7,361	7,323	8,850
폐기	NE	NE	123	111	39	217	236	235

4.8.1.3 시계열 일관성

중전기 부문은 일관된 방법론과 배출계수, 활동자료를 적용하여 배출량을 산정하였다.

4.8.1.4 QA/QC

QA/QC는 제1장 서론 1.5절 내용과 동일하다.

4.8.1.5 재계산

중전기기 부문은 폐기 단계 배출계수 변경 및 민간발전사 대상 사업장 추가 등으로 1995-2022년 배출량을 재계산하였다.

4.8.1.6 개선계획

중전기기 부문을 포함한 기타 제품 제조 및 소비 부문은 향후 소비처(사업장)별 「사업장 명세서」 등을 분석하여 중전기기 부문 산정방법을 고도화할 계획이다.

4.8.2 제품 사용으로 인한 N₂O (2.G.3.a.)

4.8.2.1 배출원 개요

2023년 기준	산정온실가스	방법론	배출계수	활동자료
	N ₂ O	Tier 1	D	의료용 N ₂ O 생산량

제품 사용으로 인한 N₂O 부문(2.G.3)에서는 다양한 제품 사용에 따른 N₂O의 증발성(evaporative) 배출량을 다룬다. 일반적으로 제품으로의 N₂O는 마취제, 진통제 등의 의료용, 에어로졸 제품의 추진제(propellant in aerosol products) 등으로 사용된다. 우리나라에서는 N₂O를 의료용 제품으로만 사용하는 것으로 확인되어 의료용 N₂O 사용 배출량을 산정하였다.

제품 사용으로 인한 N₂O 부문 2023년 배출량은 152 천톤 CO₂-eq로 전년 대비 46.9%가 증가하였다.

| 표 4-141 | 제품(의료용) 사용으로 인한 N₂O 부문 온실가스 배출량(1990-2023)

(단위: 천톤 CO ₂ -eq)								
구분	1990	2000	2007	2010	2018	2021	2022	2023
제품(의료용) 사용으로 인한 N ₂ O	NE,NO	NE,NO	169	199	132	96	104	152

4.8.2.2 방법론

4.8.2.2.1 산정방법

제품 사용으로 인한 N₂O 부문은 2006 IPCC GL의 Tier 1 방법에 따라 당해연도 N₂O 제품 공급량과 전년도 N₂O 제품 공급량에 배출계수를 곱하여 N₂O 배출량을 산정하였다.

〈제품(의료용) 사용으로 인한 N₂O 부문 N₂O 배출량 산정식(Tier 1)〉

$$\text{N}_2\text{O 배출량} = [(0.5 \times A(t)) + (0.5 \times A(t-1))] \times \text{EF}$$

N₂O 배출량 : 의료용 N₂O 사용에 따른 N₂O 배출량 (t N₂O)
A : 당해연도 N₂O 제품 공급량(t)
A(t-1) : 전년도 N₂O 제품 공급량(t)
EF : 의료용 N₂O 사용 부문에서의 배출계수

자료: 2006 IPCC GL, Vol.3, Ch.8, Equation 8.24

4.8.2.2.2 배출계수

제품 사용으로 인한 N₂O 부문은 2006 IPCC GL 기본 배출계수를 적용하였다.

표 4-142 | 제품 사용으로 인한 N₂O 부문 배출계수

구분	계수	출처
배출계수	1 t N ₂ O/t N ₂ O 사용량	2006 IPCC GL

4.8.2.2.3 활동자료

2004년 이후 전 시계열에 대하여 식품의약품안전처에서 제공하는 의료용 N₂O 생산실적 통계 자료를 사용하였다⁵¹⁾.

표 4-143 | 제품 사용으로 인한 N₂O 부문 활동자료 수집방법(2004-2023)

기간	활동자료	통계명	관리기관	대상가스
2004-2023	의료용 N ₂ O 생산량	의료용 N ₂ O 생산실적	식품의약품안전처	N ₂ O

표 4-144 | 제품 사용으로 인한 N₂O 부문 활동자료(1990-2023)

(단위: 톤)

구분	1990	2000	2007	2010	2018	2021	2022	2023
의료용 N ₂ O 생산량	NE	NE	639	783	522	270	513	637

4.8.2.3 시계열 일관성

제품 사용으로 인한 N₂O 부문은 일관된 방법론과 배출계수, 활동자료를 적용하여 배출량을 산정하였다.

51) 활동자료가 최초로 수집된 2004년 배출량이 매우 미미(MPG 지침 32조에 따른 국가 총배출량 중 0.05% 이하의 소규모 배출원)하고, 2003년 이전은 배출이 없거나 소규모 배출원으로 추정됨에 따라 “NE”로 보고함

4.8.2.4 QA/QC

QA/QC는 제1장 서론 1.5절 내용과 동일하다.

4.8.2.5 재계산

재계산은 수행하지 않았다.

PART

05

농업

- 5.1 개요
- 5.2 장내발효(3.A.)
- 5.3 가축분뇨처리(3.B.)
- 5.4 벼재배(3.C.)
- 5.5 농경지토양(3.D.)
- 5.6 작물잔사소각(3.F.)
- 5.7 석회시용(3.G.)
- 5.8 요소시용(3.H.)

제5장 농업

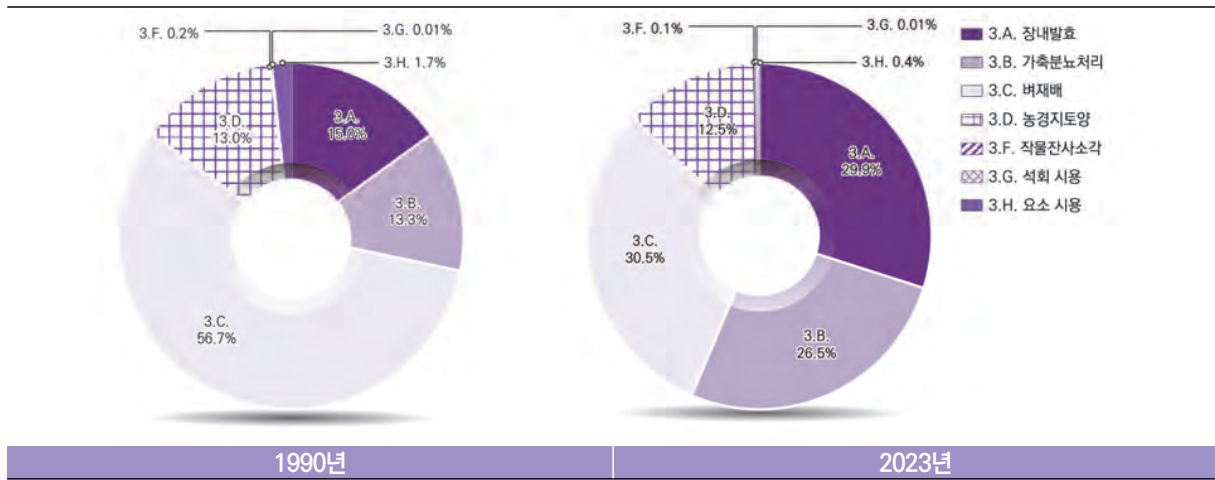
5.1 개요

국가 온실가스 통계에서 농업 분야는 장내발효(3.A.), 가축분뇨처리(3.B.), 벼재배(3.C.), 농경지토양(3.D.), 작물잔사소각(3.F.), 석회사용¹⁾(3.G.)과 요소사용(3.H.) 부문으로 구분²⁾된다.

농업 분야의 온실가스 배출원은 가축을 기르는 축산과 식물을 기르는 재배(경종(耕種)³⁾)으로 구분한다. 축산에서의 온실가스 산정 부문은 가축이 섭취한 사료가 장(腸)내 소화과정에서 미생물에 의해 발효되면서 생성된 메탄(CH_4)이 가축의 체내에서 배출(트림, 방귀)되며 발생하는 배출량을 보고하는 장내발효 부문(3.A.)과 가축분뇨의 처리과정 중 혐기적(anaerobic) 환경에서 배출되는 CH_4 와 무산소(anoxic) 환경에서 배출되는 아산화질소(N_2O)를 보고하는 가축분뇨처리 부문(3.B.)으로 구분된다. 재배(경종)에서의 온실가스 산정부문은 논의 담수(환원) 상태에서 유기물이 혐기성 분해 작용으로 배출되는 CH_4 를 보고하는 벼재배 부문(3.C.)과 농경지에 사용되는 화학비료(질소질비료), 가축분뇨 및 작물잔사로 인해 N_2O 가 배출되는 농경지토양 부문(3.D.)이 있고, 농업생산 과정에서 발생한 볏짚, 보릿짚 등 작물의 잔사를 소각하면서 배출되는 CH_4 와 N_2O 배출량을 보고하는 작물잔사소각 부문(3.F.), 그리고 CO_2 배출량을 보고하는 석회사용 부문(3.G.)과 요소사용 부문(3.H.)이 있다.

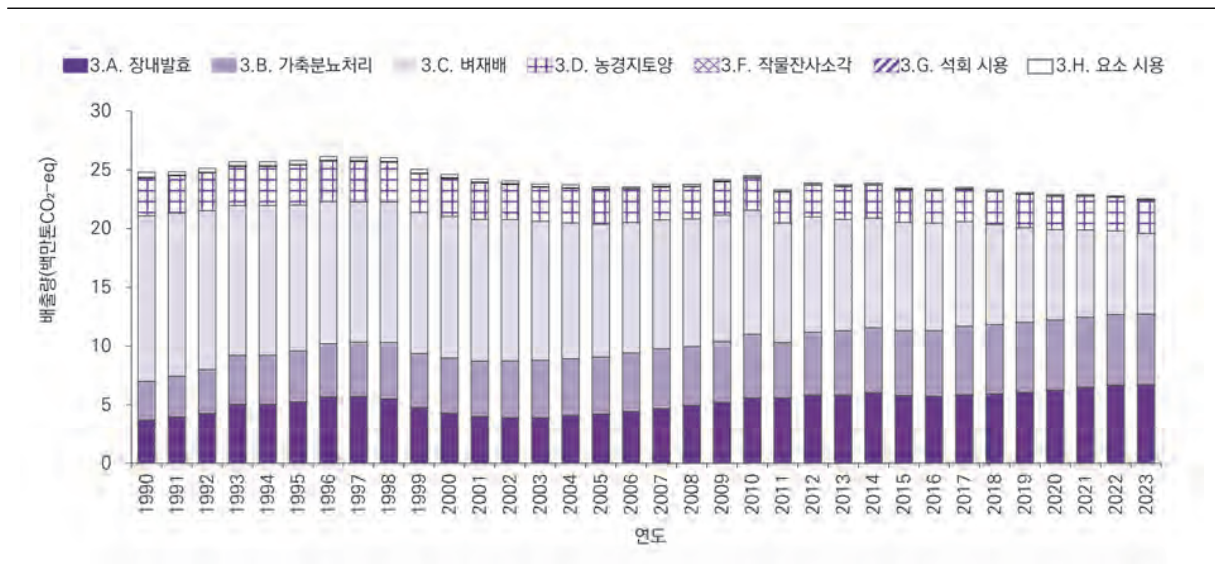
2023년을 기준으로 농업 분야에서 22.5 백만톤 $\text{CO}_2\text{-eq}$ 이 배출되었으며, 가장 큰 배출원은 6.9 백만톤 $\text{CO}_2\text{-eq}$ 을 배출한 벼재배 부문으로 농업 분야 총배출량의 30.5%를 차지했다. 그 다음으로 배출량을 많이 배출한 부문은 장내발효로 6.7 백만톤 $\text{CO}_2\text{-eq}$, 가축분뇨처리 부문은 6.0 백만톤 $\text{CO}_2\text{-eq}$, 농경지토양 부문에서는 2.8 백만톤 $\text{CO}_2\text{-eq}$ 을 배출했으며, 부문별 배출량 비중은 29.9%, 26.5%, 12.5% 순이었다. 또한, 국가 주요 배출·흡수원으로 선정된 23개 배출·흡수원 중⁴⁾, 농업 분야는 벼재배(CH_4), 장내발효(CH_4), 가축분뇨처리(CH_4)가 배출원으로 포함된 것으로 분석되었다(1.4절 참고).

- 1) 작물의 성장을 돕기 위해 비료를 뿌리거나 주는 것
- 2) 사바나소각(3.E.) 부문은 국내 해당하는 배출활동이 없기에 “NO”로 보고함
- 3) 논밭을 갈아 농사를 짓는 것을 의미함
- 4) 주요 카테고리 분석: 배출·흡수량 기준 상위 95%(LULUCF 포함), 수준평가(1.4절 참조)



| 그림 5-1 | 농업 분야 부문별 배출비중(1990-2023)

농업 분야의 2023년 온실가스 배출량은 1990년 대비 9.1% 감소했는데, 이는 벼 재배면적이 1990년 대비 43.0%⁵⁾ 감소함에 따라, 벼재배 부문의 온실가스 배출량이 51.1% 감소했기 때문이다. 반면 장내발효와 가축분뇨처리 부문은 소와 돼지의 가축사육두수가 1990년 대비 2023년에 134.0%, 153.3%⁶⁾ 증가함에 따라, 이로 인한 배출량은 각각 80.8%, 81.9% 증가한 것으로 나타났다. 다만 농업 부문에서 벼재배 부문의 배출량이 차지하는 비중이 가장 크고, 감소폭도 크기 때문에 농업 부문의 총배출량은 감소한 것으로 분석된다.



| 그림 5-2 | 농업 분야 부문별 온실가스 배출량(1990-2023)

5) 「농업면적조사(국가데이터처)」: 벼 재배면적(1990년: 1,242 천ha → 2023년: 708 천ha)

6) 「가축동향조사(국가데이터처)」: 한·육우 사육두수(1990년: 1,579 천두 → 2023년: 3,695 천두), 돼지 사육두수(1990년: 4,412 천두 → 2023년: 11,177 천두)

| 표 5-1 | 농업 분야 부문별 온실가스 배출량(1990-2023)

(단위: 백만톤 CO₂-eq)

부문	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001
3.A. 장내발효	3.7	4.0	4.3	4.8	5.0	5.3	5.7	5.7	5.5	4.8	4.3	4.0
3.B. 가축분뇨처리	3.3	3.5	3.7	4.0	4.2	4.3	4.5	4.6	4.8	4.6	4.7	4.7
3.C. 벼재배	14.1	13.9	13.5	13.1	12.7	12.4	12.1	11.9	11.9	12.0	12.0	12.1
3.D. 농경지토양	3.2	3.2	3.2	3.2	3.3	3.4	3.4	3.4	3.4	3.3	3.2	3.1
3.E. 사바나소각	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
3.F. 작물잔사소각	0.055	0.050	0.049	0.049	0.051	0.053	0.056	0.058	0.055	0.058	0.060	0.064
3.G. 석회사용	0.003	0.002	0.002	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.004	0.003	0.003	0.004
3.H. 요소사용	0.43	0.29	0.34	0.35	0.33	0.32	0.32	0.30	0.32	0.31	0.28	0.24
합계	24.8	24.8	25.1	25.5	25.7	25.8	26.1	26.1	26.0	25.0	24.6	24.2
부문	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
3.A. 장내발효	3.9	3.9	4.1	4.2	4.5	4.7	5.0	5.2	5.6	5.6	5.8	5.8
3.B. 가축분뇨처리	4.8	4.9	4.8	4.8	5.0	5.1	5.0	5.2	5.4	4.7	5.3	5.5
3.C. 벼재배	12.0	11.8	11.6	11.3	11.1	11.0	10.8	10.7	10.6	10.2	9.8	9.5
3.D. 농경지토양	3.0	2.9	2.9	3.0	2.8	2.8	2.7	2.8	2.8	2.6	2.7	2.8
3.E. 사바나소각	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
3.F. 작물잔사소각	0.062	0.059	0.057	0.058	0.059	0.058	0.057	0.057	0.053	0.047	0.045	0.045
3.G. 석회사용	0.005	0.004	0.004	0.004	0.004	0.003	0.003	0.003	0.003	0.004	0.004	0.003
3.H. 요소사용	0.23	0.22	0.24	0.16	0.13	0.19	0.15	0.13	0.12	0.14	0.14	0.13
합계	24.1	23.8	23.7	23.6	23.6	23.8	23.8	24.2	24.5	23.3	23.9	23.8
부문	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023		
3.A. 장내발효	6.1	5.8	5.8	5.9	5.9	6.1	6.3	6.5	6.7	6.7		
3.B. 가축분뇨처리	5.5	5.5	5.6	5.8	5.9	6.0	5.9	5.9	6.0	6.0		
3.C. 벼재배	9.3	9.2	9.2	8.9	8.5	8.0	7.7	7.4	7.1	6.9		
3.D. 농경지토양	2.8	2.8	2.7	2.7	2.8	2.8	2.8	2.9	2.9	2.8		
3.E. 사바나소각	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO		
3.F. 작물잔사소각	0.046	0.044	0.042	0.040	0.041	0.044	0.038	0.033	0.026	0.015		
3.G. 석회사용	0.004	0.003	0.004	0.004	0.003	0.002	0.003	0.002	0.002	0.003		
3.H. 요소사용	0.13	0.12	0.12	0.11	0.12	0.11	0.11	0.11	0.09	0.09		
합계	23.9	23.5	23.4	23.5	23.3	23.1	22.9	22.9	22.8	22.5		

5.2 장내발효(3.A.)

장내발효 부문에서는 가축이 섭취한 사료가 장(腸)내 소화과정에서 미생물에 의해 발효되면서 생성된 CH₄가 몸 밖으로 배출되면서 발생하는 CH₄ 배출량을 보고한다. 이와 같이 장내발효로 생성된 CH₄를 배출하는 가축은 소화기관의 형태에 따라 반추가축(反芻, ruminant : 소, 염소, 양, 사슴)과 유사 반추가축(pseudo-ruminant), 비반추초식동물(non-ruminant herbivores : 말, 노새 및 당나귀 등), 그리고 단위가축(monogastric : 돼지)으로 구분된다⁷⁾. 반추가축이 섭취한 사료는 반추위 내의 미생물 발효로 휘발성지방산(VFA)과 암모니아(NH₃), 이산화탄소(CO₂)와 수소(H₂) 등으로 분해되며, 이때 생성된 소화산물(H₂, CO₂ 등)이 메타노젠 혹은 메탄생성균(methanogen)에 의해 CH₄를 생성·배출하게 된다. 단위가축은 후장발효⁸⁾로 소량의 CH₄를 생성·배출한다.

2023년 장내발효 부문의 배출량은 6,739 천톤 CO₂-eq로, 전년 대비 0.6% 증가하였으며 농업 분야 배출량의 29.9%를 차지하였다. 가축별 장내발효에 의한 배출량을 살펴보면 소가 6,346 천톤 CO₂-eq를 배출하여, 전체의 94.2%를 차지하였고, 돼지는 306 천톤 CO₂-eq로 4.5%에 해당했다. 즉, 소와 돼지로부터 98.7%가 배출되고 있으며, 양과 기타 가축(염소, 말, 노새 및 당나귀, 사슴)으로부터 1.3%가 배출되었다.



| 그림 5-3 | 장내발효 부문 온실가스 배출량(1990-2023)

7) 반추가축 : 풀 사료를 먹고 소화할 수 있는 소화기관(반추위)이 있는 동물

유사반추가축 : 반추가축과 유사하게 풀 사료를 먹고 소화시킬 수 있는 동물(낙타, 라마, 알파카 등)

단위가축 : 위가 하나만 있는 동물

8) 후장발효 : 위에서 소화되지 않은 섬유소 등을 대장이나 맹장에서 미생물을 이용해 분해하는 소화하는 방식

| 표 5-2 | 장내발효 부문 온실가스 배출량(1990-2023)

(단위: 천톤 CO₂-eq)

구분	1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023
소	3,539	3,924	5,245	5,530	6,109	6,302	6,346
양	0.5	0.1	0.6	0.3	0.3	0.3	0.3
돼지	137	241	282	317	310	308	306
기타 가축	51	154	91	90	98	91	86
합계	3,728	4,318	5,618	5,938	6,517	6,701	6,739

5.2.1 소(3.A.1.)

5.2.1.1 배출원 개요

2023년 기준	산정온실가스	방법론	배출계수	활동자료
	CH ₄	Tier 1, 2	CS, D	가축사육두수

소는 반추가축으로 반추위 내 미생물 발효 과정에서 CH₄가 생성되며, 주로 반추(되새김질) 과정에서 배출된다. 소의 개체 특성에 따른 하위 부문으로는 젖소(3.A.1.a. Dairy cattle)와 한·육우(3.A.1.b. Non-dairy cattle)⁹⁾가 있다.

소(3.A.1.)의 장내발효로 인한 2023년 배출량은 6,346 천톤 CO₂-eq로 전년 대비 0.7% 증가하였으며, 한·육우는 5,173 천톤 CO₂-eq, 젖소는 1,173 천톤 CO₂-eq이 배출되어, 각각 81.5%, 18.5%의 비중을 보였다.

부문별 2023년 배출량을 1990년 대비 배출량과 비교하면 한·육우로 인한 장내발효 배출량은 큰 폭(148.5%)으로 증가한 반면, 젖소는 19.5% 감소한 것으로 나타났다.

| 표 5-3 | 장내발효 부문 소에 의한 온실가스 배출량(1990-2023)

(단위: 천톤 CO₂-eq)

구분	1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023
젖소	1,457	1,589	1,283	1,242	1,208	1,178	1,173
한·육우	2,081	2,334	3,962	4,288	4,900	5,124	5,173
합계	3,539	3,924	5,245	5,530	6,109	6,302	6,346

9) 젖소 : 송아지를 낳은 경험이 있는 젖소로 우유 생산을 주된 목적으로 사육되는 소

한우 : 우리나라 고유의 소품종으로 갈색 소

육우 : 육용종, 교잡종, 젖소 수소 및 송아지를 낳은 경험이 없는 젖소로 고기 생산을 주된 목적으로 사육된 소

5.2.1.2 방법론

5.2.1.2.1 산정방법

소의 CH₄ 배출량은 2006 IPCC GL의 산정방법을 적용하며, 육우, 젖소(1세 미만, 1-2세, 2세 이상) 및 한우(수컷 1세 미만, 수컷 1세 이상, 암컷 1세 미만, 암컷 1세 이상)로 구분하여 산정하였다.

장내발효 부문 CH₄ 배출량 산정식

$$Emissions = EF_{(T)} \times \left(\frac{N_{(T)}}{10^6} \right)$$

Emissions	: 장내발효에 의한 CH ₄ 배출량[kt CH ₄ /yr]
EF _(T)	: 가축종별 배출계수[kg CH ₄ /head/yr]
N _(T)	: 가축종별 사육두수[head]
T	: 가축종

자료: 2006 IPCC GL, Vol.4, Ch.10, Equation 10.19

5.2.1.2.2 배출계수

젖소¹⁰⁾(1세 미만, 1-2세, 2세 이상)와 한우(수컷 1세 미만, 수컷 1-2세, 수컷 2세 이상, 암컷 1세 미만, 암컷 1-2세, 암컷 2세 이상)¹¹⁾¹²⁾의 장내발효에 의한 CH₄ 배출계수는 국가 고유 배출계수를 적용하였고, 육우는 2006 IPCC GL에서 제시한 기본 배출계수를 적용하였다.

표 5-4 | 장내발효 부문 소 CH₄ 배출계수

축종		CH ₄ 배출계수 (kg CH ₄ /head/yr)	출처
젖소	1세 미만	33	국가 고유 배출계수(2020년 승인)
	1-2세	83	
	2세 이상	139	
한·육우	한우	수컷, 1세 미만	국가고유계수('23년 승인)
		수컷, 1-2세	국가고유계수('24년 승인)
		수컷, 2세 이상	국가고유계수('24년 승인)
		암컷, 1세 미만	국가고유계수('23년 승인)
		암컷, 1-2세	국가고유계수('24년 승인)
		암컷, 2세 이상	국가고유계수('24년 승인)
	육우	53	2006 IPCC GL(북미) ¹⁾

주: 1) 우리나라의 소 사육 방식이 북미 기준(고품질의 사료와 곡물 급여, 사육장 사육)과 유사함

자료: 2006 IPCC GL, Vol.4, Ch.10, Table 10.11

10) 국가 고유 배출계수(2020) → 2006 IPCC GL에서 제안된 Tier 2의 메탄 배출계수 산정방식에 따라, 젖소의 연령별 CH₄ 배출계수 값을 도출하여 국가 고유 배출계수 개발

11) 국가 고유 배출계수(2023) → 2006 IPCC GL에서 메탄 배출량 평가 방법으로 제시된 '호흡대사챔버'를 활용하여 한우 1세 미만의 성별·연령별 CH₄ 배출량을 직접 측정하여 국가 고유 배출계수 개발

12) 국가 고유 배출계수(2024) → 2006 IPCC GL에서 메탄 배출량 평가 방법으로 제시된 '호흡대사챔버'를 활용하여 한우 1-2세 및 2세 이상의 성별·연령별 CH₄ 배출량을 직접 측정하여 국가 고유 배출계수 개발

5.2.1.2.3 활동자료

젖소와 한·육우 사육두수는 「가축동향조사(국가데이터처)」를 사용하고 있다. 국가데이터처는 「가축 및 축산물 이력관리에 관한 법률」에 따라 사육-도축-포장-판매 등 전(全) 과정에 대한 이력관리자료를 활용(2014년~)하여 가축동향조사의 정확도를 향상시켰다.¹³⁾

| 표 5-5 | 소 활동자료 수집방법(1990-2023)

기간	활동자료	통계명	관리기관
1990-2023	사육두수 ¹⁾	가축동향조사	국가데이터처

주: 1) 「가축동향조사(국가데이터처)」의 분기별 사육두수의 평균값을 적용함

| 표 5-6 | 장내발효 부문 소 활동자료(1990-2023)

(단위: 천마리)

구분	1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023
젖소 합계	499.7	541.2	435.0	406.9	401.6	391.1	385.2
1세 미만	116.5	111.4	84.0	76.7	79.6	77.3	72.0
1-2세	90.6	119.0	102.7	72.4	75.3	73.2	71.7
2세 이상	292.7	310.8	248.3	257.8	246.7	240.6	241.6
한·육우 합계	1,579.0	1,730.7	2,866.6	3,086.4	3,538.4	3,692.7	3,695.3
한우 합계	1,410.8	1,530.5	2,709.2	2,939.4	3,367.4	3,523.4	3,542.0
수컷, 1세 미만	277.7	270.5	420.3	432.0	509.5	527.6	498.8
수컷, 1-2세	73.6	158.2	349.2	419.8	476.5	502.1	520.4
수컷, 2세 이상	8.5	19.0	200.7	215.7	234.3	255.7	292.8
암컷, 1세 미만	261.1	246.3	394.5	412.8	482.0	496.9	464.3
암컷, 1-2세	121.9	197.2	336.4	401.1	453.7	477.0	492.6
암컷, 2세 이상	667.9	639.3	1,008.0	1,058.0	1,211.5	1,264.1	1,273.1
육우	168.2	200.1	157.4	147.0	171.0	169.3	153.3
소 합계	2,078.7	2,271.9	3,301.6	3,493.2	3,939.9	4,083.8	4,080.6

5.2.1.3 시계열 일관성

1990년부터 2023년까지 「가축동향조사(국가데이터처)」의 젖소와 한·육우 사육두수를 사용하고, 동일한 방법론과 배출계수를 사용하여 시계열 일관성을 유지하였다.

5.2.1.4 QA/QC

QA/QC는 제1장 서론 1.5절 내용과 동일하다.

5.2.1.5 재계산

한우 암컷 1-2세 및 2세 이상의 배출량 산정 시, 2006 IPCC GL 기본 배출계수를 활용하였으나,

13) 축산물이력제 시행 이전에는 「농림어업총조사(국가데이터처)」의 농가 대상으로 한 전수조사 자료를 이용하여 통계를 구축함

2024년 승인된 배출계수를 활용하여 전(全) 시계열에 대해 재계산하였다. 한우 수컷 1-2세 및 2세 이상의 배출량 산정 시, 기존에는 2018년에 승인된 국가계수를 활용하였으나, 2024년 승인된 배출계수를 갱신·적용하여 전(全) 시계열에 대해 재계산하였다.

5.2.2 양(3.A.2.), 돼지(3.A.3.), 기타 가축(3.A.4.)

5.2.2.1 배출원 개요

2023년 기준	산정온실가스	방법론	배출계수	활동자료
	CH ₄	Tier 1, 2	CS, D	가축사육두수

장내발효 부문의 소 이외 CH₄ 배출원은 양(3.A.2.), 돼지(3.A.3.), 기타 가축(3.A.4.)으로 구분되며, 기타 가축에는 사슴, 염소, 말, 노새 및 당나귀가 포함된다.

2023년 축종별 배출량은 돼지가 306 천톤 CO₂-eq, 염소가 61 천톤 CO₂-eq을 배출하였으며, 그 다음으로는 말, 사슴, 양, 노새 및 당나귀 순이었다.

1990년 대비 2023년 배출량 증감률을 살펴보면, 말, 염소, 돼지는 각각 530.3%, 156.0%, 122.8% 증가하고, 사슴과 양은 각각 53.8%, 39.3% 감소한 것으로 나타났다.

| 표 5-7 | 장내발효 양, 돼지, 기타 가축에 의한 온실가스 배출량(1990-2023)

(단위: 천톤 CO₂-eq)

구분	1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023
양	0.5	0.1	0.6	0.3	0.3	0.3	0.3
돼지	137	241	282	317	310	308	306
기타 가축	사슴	25	80	16	14	13	12
	염소	24	70	35	60	71	61
	말	2	5	14	14	14	14
	노새 및 당나귀	0.01	0.02	0.1	0.2	0.2	0.2
합계	189	395	373	408	409	400	393

5.2.2.2 방법론

5.2.2.2.1 산정방법

장내발효로 인한 온실가스 배출량은 2006 IPCC GL의 방법에 따라 양(3.A.2.), 돼지(3.A.3.), 사슴(3.A.4.c.), 염소(3.A.4.d.), 말(3.A.4.e.), 노새 및 당나귀(3.A.4.f.) 사육두수에 CH₄ 배출계수를 곱하여 산정하였으며, CH₄ 배출량 산정식은 5.2.1.2.1장 소(3.A.1.)와 동일하다. 돼지의 경우, 성별·연령별 사육두수와 배출계수를 구분하여 산정하고, 기타 가축은 사육두수에 가축별 배출계수를 적용하였다.

5.2.2.2.2 배출계수

돼지의 장내발효에 의한 CH₄ 배출계수는 국가 고유 배출계수¹⁴⁾를 적용하였고, 양, 염소, 말, 노새 및 당나귀, 사슴은 2006 IPCC GL에서 제시한 기본 배출계수를 적용하였다.

표 5-8 | 장내발효 부문 양, 돼지, 기타 가축 CH₄ 배출계수

(단위 : kg CH₄/head/yr)

축종	계수	출처
양	5	2006 IPCC GL(개발도상국 ¹⁾)
돼지	2개월 미만	국가 고유 배출계수(2022년 승인)
	2-4개월	
	4-6개월	
	수컷, 6-8개월	
	암컷, 6-8개월	
	수컷, 8개월 이상	
	암컷, 8개월 이상	
기타 가축	염소	2006 IPCC GL ²⁾
	말	
	노새 및 당나귀	
	사슴	

주: 1) 우리나라에서 사육하는 양의 평균 체중(45kg)이 2006 IPCC GL에서 제시한 개발도상국 양의 평균 체중에 해당하여 해당 계수를 적용함

2) 2006 IPCC GL에서 염소, 말, 노새 및 당나귀, 사슴의 장내발효 CH₄ 배출계수는 개발도상국과 선진국이 동일함

자료: 2006 IPCC GL, Vol.4, Ch.10, Table 10.10

5.2.2.2.3 활동자료

돼지 사육두수는 「가축동향조사(국가데이터처)」를 적용하고 있으며, 소 사육두수와 동일하게 「가축 및 축산물 이력관리에 관한 법률」에 따라 구축된 축산물이력제 자료(2017년-)를 활용하여 통계 정확도가 향상되었다.

양, 사슴, 염소, 말의 사육두수는 「농림축산식품통계연보(농림축산식품부)¹⁵⁾」를 사용하였다.

14) 국가 고유 배출계수(2022) → 2006 IPCC GL에서 메탄 배출량 평가 방법으로 제시된 '호흡대사첨배'를 활용하여 돼지 성별·월령별 CH₄ 배출량을 직접 측정하여 국가 고유 배출계수 개발

15) 「농림축산식품통계연보*」는 연도별로 통계발간명이 변경되었으나, 조사 내용은 동일함

* 「농림수산물통계연보(농림수산부, 1989-1996)」, 「농림통계연보(농림부, 1997-2007)」, 「농림수산물통계연보(농림수산물부, 2008-2013)」, 「농림축산식품통계연보(농림축산식품부, 2014-2024)」

표 5-9 양, 돼지, 기타 가축 활동자료 수집방법(1990-2023)

기간	활동자료	통계명	관리기관	대상 가스
1990-2023	돼지 사육두수 ¹⁾	가축동향조사	국가데이터처	CH ₄
1988-2023	양, 사슴, 염소, 말, 노새 및 당나귀 사육두수 ²⁾	농림축산식품통계연보	농림축산식품부	

주: 1) 「가축동향조사(국가데이터처)」에서 공표하는 분기별 사육두수의 평균값을 적용함

2) 「농림축산식품통계연보(농림축산식품부)」에서 공표하는 연간 사육두수의 3년간(T, T-1, T-2년) 평균값을 적용함

표 5-10 장내발효 부문 양, 돼지 기타 가축 활동자료(1990-2023)

(단위: 천 마리)

구분		1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023
양 ¹⁾		3.3	1.1	4.4	2.3	2.2	2.2	2.0
돼지	2개월 미만	1,315.2	2,433.8	2,996.9	3,539.9	3,542.0	3,517.3	3,534.2
	2-4개월	1,558.3	2,710.2	3,020.4	3,440.3	3,423.0	3,406.9	3,411.7
	4-6개월	883.6	2,029.8	2,780.3	3,278.9	3,212.0	3,221.6	3,188.8
	6-8개월, 암	63.2	72.7	96.5	114.2	112.6	108.6	111.6
	6-8개월, 수	7.3	5.2	8.5	10.8	11.0	11.0	11.0
	8개월 이상, 암	545.2	855.2	897.0	956.0	926.2	913.8	903.1
	8개월 이상, 수	39.6	42.9	19.7	18.4	17.9	17.2	16.3
	합계 ²⁾	4,412.2	8,149.8	9,819.3	11,358.4	11,244.6	11,196.3	11,176.6
기타 가축 ¹⁾	사슴	45.4	142.8	73.0	29.0	24.3	22.4	21.0
	염소	169.1	497.7	253.2	428.3	507.5	461.0	433.1
	말	4.3	9.0	28.7	27.2	26.9	27.0	27.3
	노새 및 당나귀	0.03	0.07	0.3	0.6	0.6	0.6	0.6

주: 1) 양과 기타가축은 「농림축산식품통계연보(농림축산식품부)」에서 공표하는 연간 사육두수의 3년간(T, T-1, T-2년) 평균값을 적용함

2) 「가축동향조사(국가데이터처)」에서 공표하는 분기별 사육두수의 평균값을 적용함

5.2.2.3 시계열 일관성

양, 돼지, 기타 가축의 장내발효에 의한 배출량 산정 시, 동일한 방법론과 배출계수, 그리고 동일한 출처의 활동자료를 적용하여 시계열 일관성을 유지하였다.

5.2.2.4 QA/QC

QA/QC는 제1장 서론 1.5절 내용과 동일하다.

5.2.2.5 재계산

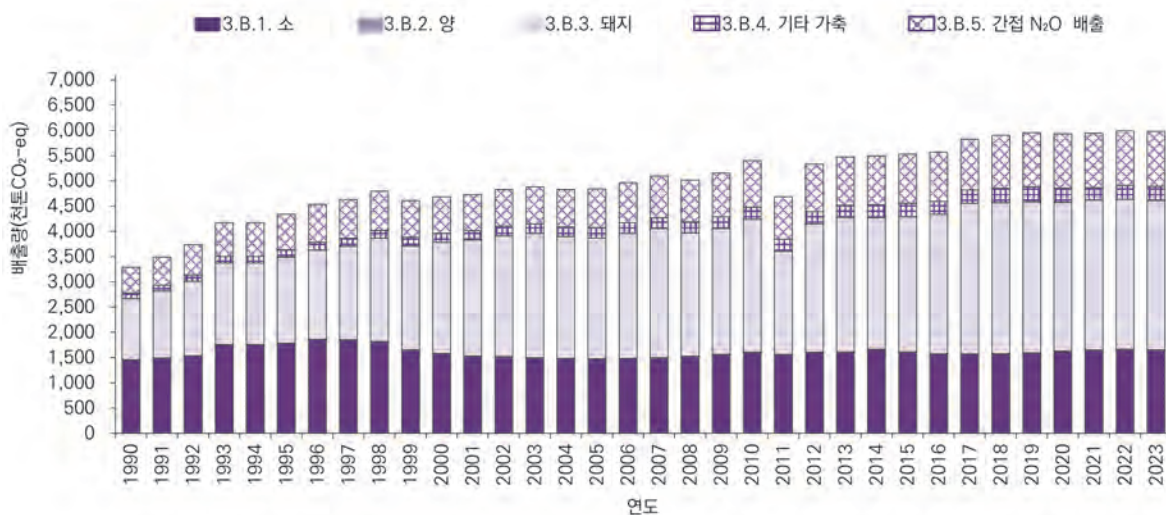
「농림축산식품통계연보(농림축산식품부)」의 말과 노새 및 당나귀 사육두수 활동자료가 세분화됨에 따라 이를 반영하여 말 사육두수와 노새 및 당나귀 사육두수를 분리하여 전(全) 시계열에 대해 재계산하였다.

가축분뇨처리 부문에서는 CH_4 와 N_2O 배출량을 산정·보고하고 있다. CH_4 는 유기물로 구성된 가축 분뇨가 혐기성 환경에서 미생물에 의해 분해될 때 발생하며¹⁶⁾, N_2O 는 가축분뇨 구성 성분 중 질소 성분이 가축 분뇨 처리 과정에서 산소 공급 상태에 따라 질산화·탈질화 과정을 거치면서 발생한다¹⁷⁾.

또한 가축분뇨처리에 따른 온실가스 배출량은 CH_4 와 N_2O 직접배출량 및 N_2O 간접배출량으로 구분하는데, 3.B.1.~3.B.4. 부문은 가축분뇨처리시설에서 배출되는 CH_4 와 N_2O 직접배출량의 양을 모두 산정하며, 간접 N_2O 배출(3.B.5.)은 가축분뇨 처리 시 암모니아(NH_3)와 질소산화물(NO_x)로 휘산되는 질소가 대기 중에 침적(deposition)하거나 수계로 유출(leaching and runoff)되어 배출되는 N_2O 간접배출량을 산정한다. 다만, 수계유출에 의한 간접 N_2O 배출은 「가축분뇨의 관리 및 이용에 관한 법률」¹⁸⁾에 따라 국내 발생량이 없어 산정하지 않고, 대기침적에 의한 N_2O 간접배출량만 산정한다.

가축분뇨처리 부문 2023년 배출량은 전년 대비 0.2% 감소한 5,982 천톤 $\text{CO}_2\text{-eq}$ 으로 농업 분야 배출량의 26.5%를 차지한다.

가축분뇨처리 부문의 CH_4 와 N_2O 직접배출량(3.B.1.~3.B.4., 소, 양, 돼지, 기타 가축)은 4,895 천톤 $\text{CO}_2\text{-eq}$, 간접 N_2O 배출(3.B.5.)은 1,087 천톤 $\text{CO}_2\text{-eq}$ 으로 81.8%, 18.2%의 비중을 보였다.



| 그림 5-4 | 가축분뇨처리 부문 온실가스 배출량(1990-2023)

16) 가축분뇨의 CH_4 배출량의 경우, 공기(산소)의 공급 없이 분뇨를 저장 또는 처리 시 혐기적으로 분해되기 쉽기 때문에 많은 양의 CH_4 가 배출되며, 분뇨가 고체 형태(퇴비화 등)로 관리되거나 초원과 목장 등 방목지에서 배설되는 경우에는 호기적으로 분해되는 경향이 있기 때문에, 이때는 혐기성 분해보다 적은 CH_4 가 발생됨

17) 가축분뇨의 질산화는 산소의 공급이 원활한 경우 일어나는 현상이며 탈질화는 산소의 공급이 원활하지 않아 산소가 부족한 환경에서 일어나는 현상으로 이러한 과정을 통해 배출되는 N_2O 의 양은 분뇨처리 방식과 기간에 따라 달라짐

18) 「가축분뇨의 관리 및 이용에 관한 법률」: 가축분뇨처리시설의 설치기준 구조물의 천장·바닥 및 벽은 누수 되거나 빗물·지표수 등이 유입되지 아니하도록 방수재료로 만들거나 방수재를 사용하여야 함

| 표 5-11 | 가축분뇨처리 부문 온실가스 배출량 (1990-2023)

(단위: 천톤 CO₂-eq)

구분	1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023
소	1,457	1,583	1,610	1,575	1,651	1,664	1,657
양	0.06	0.02	0.08	0.04	0.04	0.04	0.04
돼지	1,212	2,203	2,631	2,994	2,967	2,972	2,959
기타 가축	108	177	242	285	250	277	279
간접 N ₂ O 배출	513	721	921	1,049	1,075	1,080	1,087
합계	3,290	4,684	5,403	5,903	5,943	5,993	5,982

5.3.1 소(3.B.1.), 양(3.B.2.), 돼지(3.B.3.), 기타 가축(3.B.4.)

5.3.1.1 배출원 개요

2023년 기준	산정온실가스	방법론	배출계수	활동자료
	CH ₄	Tier 1	D	가축사육두수
	N ₂ O	Tier 2	CS, D	

가축분뇨의 처리과정에서 발생하는 CH₄와 N₂O¹⁹⁾ 배출은 축종별로 구분하여 산정하고 있다(소(3.B.1.), 양(3.B.2.), 돼지(3.B.3.), 기타 가축(3.B.4.)).

가축분뇨의 N₂O 배출량은 축종별 분뇨처리시설에 따른 N₂O 배출특성을 반영하여 산정하는 Tier 2 방법을 적용하고 있으나, 가축분뇨처리에 따른 CH₄ 배출량은 축종별 사육두수에 IPCC에서 제시하는 축종별 CH₄ 기본 배출계수를 적용하는 Tier 1 산정방법을 사용하고 있다²⁰⁾.

가축분뇨처리에 따른 2023년 CH₄와 N₂O 직접배출량은 4,895 천톤 CO₂-eq로 전년 대비 0.4% 감소하였으며, 가축분뇨처리 부문 총배출량의 81.8%를 차지한다. 축종별로 살펴보면, 돼지 2,959 천톤 CO₂-eq, 소 1,657 천톤 CO₂-eq, 가금류에서 264 천톤 CO₂-eq 배출되어 각각 60.4%, 33.8%, 5.4%를 차지하는 것으로 나타났다. 양, 사슴, 염소, 말은 전체 합의 1% 이하 수준이었다.

| 표 5-12 | 가축분뇨처리 부문 소, 양, 기타 가축에 의한 온실가스 배출량 (1990-2023)

(단위: 천톤 CO₂-eq)

구분	1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023
소 소계	1,457	1,583	1,610	1,575	1,651	1,664	1,657
젖소	1,093	1,184	952	886	859	842	837
한·육우 소계	363	398	658	689	792	822	820
한우	323	351	621	652	747	780	782
육우	40	48	37	37	45	42	38

19) 가축분뇨처리에서 N₂O는 직접배출량과 간접배출량으로 구분되며, N₂O 직접배출량은 3.B.1.~3.B.4. 부문에서 산정하며, N₂O 간접배출량은 3.B.5. 부문에서 산정

20) Tier 2 방법론을 적용하려면 축종별 휘발성 고정물의 양이 필요하나, 국내 가용한 활동자료가 없어 Tier 1 방법론을 적용

구분	1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023
양	0.06	0.02	0.08	0.04	0.04	0.04	0.04
돼지 소계	1,212	2,203	2,631	2,994	2,967	2,972	2,959
돼지(비육)	947	1,809	2,218	2,558	2,542	2,550	2,542
돼지(번식)	264	394	412	436	425	422	417
사슴	6	18	9	4	3	3	3
염소	3	8	4	7	8	7	7
말	1	2	6	5	5	5	5
노새 및 당나귀	0.003	0.01	0.04	0.06	0.06	0.06	0.06
가금류 소계	99	149	223	269	234	261	264
닭(산란계)	66	83	105	140	123	154	121
닭(육계)	31	57	93	116	100	97	128
오리	1	9	25	12	11	11	16
합계	2,777	3,963	4,483	4,854	4,868	4,912	4,895

5.3.1.2 방법론

5.3.1.2.1 산정방법

○ CH₄

가축분뇨처리시설에서의 CH₄ 배출량은 2006 IPCC GL의 Tier 1 방법에 따라 축종별 사육두수에 CH₄ 배출계수를 곱하여 산정하였다.

가축분뇨처리 부문 CH₄ 배출량 산정식

$$CH_{4\text{ Manure}} = \sum_T \left(\frac{EF_{(T)} \times N_{(T)}}{10^6} \right)$$

CH₄ Manure : 가축종별 분뇨처리 시 CH₄ 배출량[kt CH₄/yr]

EF_(T) : 가축종별 배출계수[kg CH₄/head/yr]

N_(T) : 가축종별 사육두수[head]

T : 가축종

자료: 2006 IPCC GL, Vol.4, Ch.10, Equation 10.22

○ N₂O

가축분뇨처리시설에서의 N₂O 직접배출량은 2019 Refinement의 Tier 2 방법을 이용하여 산정하였다.

가축분뇨처리 부문 N₂O 직접배출량 산정식

$$N_2O_{D(mm)} = \left[\sum_S \left\{ \sum_{T,P} (N_{(T,P)} \times Nex_{(T,P)} \times AWMS_{(T,S,P)}) + N_{cdg(S)} \right\} \times EF_{3(S)} \right] \times \frac{44}{28}$$

N ₂ O _{D(mm)}	: 국내 가축분뇨처리시설의 N ₂ O 배출량[kg N ₂ O/yr]
N _(T,P)	: 국내 가축종의 수[head]
Nex _(T,P)	: 국내 가축종의 연간 N 배출량[kg N/head/yr]
AWMS _(T,S,P)	: 국내 가축종의 가축분뇨처리시설의 이용비율
N _{cdg(S)}	: 바이오가스 플랜트 혐기 소화물에서 나오는 질소의 양 ²¹⁾
EF _{3(S)}	: 가축분뇨처리시설의 N ₂ O 배출계수[kg N ₂ O-N/kg N]
S	: 가축분뇨처리시설
P	: 가축의 생산성
T	: 가축종
44/28	: N ₂ O 환산계수

자료: 2019 Refinement, Vol.4, Ch.10, Equation 10.25

5.3.1.2.2 배출계수

○ CH₄

가축분뇨처리 부문의 CH₄ 배출계수는 2006 IPCC GL에서 제시하고 있는 한대기후²²⁾(Cool region, 연평균 기온 15℃ 미만)의 기본 배출계수를 적용하고 있다.

| 표 5-13 | 가축분뇨처리 부문 축종별 CH₄ 배출계수

(단위: kg CH₄/head/yr)

축종			계수	출처	
소	젖소		58	2006 IPCC GL	북미 ¹⁾
	한·육우		1		북미 ²⁾
양		0.10	개발도상국 ³⁾		
돼지	비육용		8		서유럽 ⁴⁾
	번식용		12		
사슴		0.22	모든 지역		
염소		0.11			
말		1.09			
노새 및 당나귀		0.60	개발도상국 ⁵⁾		
가금류	닭	산란계	0.03		선진국 ⁶⁾
		육계	0.02		
	오리		0.02		

주: 1) 우리나라 젖소의 평균 우유 생산량(9,000 kg/두/년)은 타 국가들과 비교하여 북미의 평균 우유 생산량(8,400 kg/두/년)과 가까우므로 2006 IPCC GL의 북미 기본 계수를 적용함

2) 우리나라의 소 사육 방식이 북미 기준(고품질의 사료와 곡물 급여, 사육장 사육)과 유사함

21) 바이오가스 플랜트 혐기 소화물에서 나오는 질소의 양(N_{cdg(S)})에 대한 국내 활동자료 부재

22) 2023년 우리나라의 연평균 기온은 13.7℃이며, 1990년부터 연평균 기온이 15℃ 미만에 해당(「기상연보(기상청)」)

- 3) 우리나라에서 사육 중인 양의 평균 체중이 개발도상국 기준(45kg)과 유사함
- 4) 우리나라에서 사육하는 돼지의 품종은 3원 교잡종(LYD)으로 서유럽 등 축산 선진국과 유사함
- 5) 우리나라에서 사육 중인 염소와 말의 평균 체중이 개발도상국 기준(30kg, 238kg)과 유사함
- 6) 우리나라에서 사육하는 닭의 품종이나 사육방식이 서유럽 등 축산 선진국과 유사함

자료: 2006 IPCC GL, Vol.4, Ch.10, Table 10.14, 10.15, 10.16

○ N₂O

가축분뇨처리 부문의 N₂O 배출계수는 가축종별 연평균 질소 배출량(N_{ex})과 가축분뇨처리시설의 N₂O 배출계수(EF_{3(s)})가 있다. 연평균 질소 배출량은 한우, 돼지(비육용), 닭(육계)의 경우, 국가 고유 계수²³⁾를 개발하여 적용하고 있으며, 이외 축종은 2019 Refinement에서 제시한 산정방법을 통해 계산한 수치를 적용하고 있다. 가축분뇨처리시설별 배출계수는 2019 Refinement의 기본 계수를 적용하고 있다.

가축분뇨처리 부문 연평균 질소 배출량 산정식

$$N_{ex(T,P)} = N_{rate(T,P)} \times \frac{TAM_{(T,P)}}{1000} \times 365$$

- N_{ex(T,P)} : 국내 가축종의 연간 N 배출량[kg N/animal/yr]
 N_{rate(T,P)} : 국내 가축종의 가축단위(Animal Unit)별 N 배출률[kg N/1,000 kg/day]
 TAM_(T,P) : 국내 가축종의 평균체중[kg/animal]
 P : 가축의 생산성
 T : 가축종

자료: 2019 Refinement, Vol.4. Chapter 10. Equation 10.30

가축종별 연평균 질소 배출량 산정 결과 및 가축분뇨처리시설의 N₂O 배출계수는 다음 표와 같다.

| 표 5-14 | 가축분뇨처리 부문 축종별 연평균 질소 배출량

(단위: kg N/head/year)

축종	연평균 질소 배출량(N _{ex})	비고
젖소	142.35	연평균 질소 배출량 산정결과
한·육우	50.13²⁾	-
한우	49.68	국가 고유 배출계수(2022년 승인) ¹⁾
육우	59.42	연평균 질소 배출량 산정결과
양	3.62	-
돼지	12.41²⁾	-
돼지(비육용)	10.97	국가 고유 배출계수(2022년 승인) ¹⁾
돼지(번식용)	26.35	연평균 질소 배출량 산정결과
사슴	29.35	-
염소	2.98	연평균 질소 배출량 산정결과
말	39.96	-
노새 및 당나귀	21.83	-
가금류	0.55²⁾	-

23) 분뇨 내 '질소 성분 분석법'을 활용하여 한우와 돼지(비육), 닭(육계)의 국가 고유 배출계수 개발(2022, 2024)

	닭(육계)	0.31	국가 고유 배출계수(2024년 승인) ¹⁾
	닭(산란계)	0.60	
	오리	0.82	

주: 1) 분뇨 내 질소 성분 분석 방법론을 활용하여 연평균 질소 배출량 산정
2) 해당 연도의 세부 축종 사육두수에 따라 연평균 질소 배출량을 가중 평균하여 산정

| 표 5-15 | 가축분뇨처리시설별 N₂O 배출계수

(단위 : kg N₂O-N/kg N)

축종		N ₂ O 배출계수(EF _{3(S)}) ¹⁾					
		퇴비화	액비화	퇴·액비화	정화	기타	위탁
소	젖소	0.01	0.005	0.01	0.005	0.01	0.006
	한우	0.01	0.005	0.01	0.005	0.01	0.006
	육우	0.01	0.005	0.01	0.005	0.01	0.006
돼지	돼지(비육)	0.01	0.005	0.005	0.005	0.01	0.005
	돼지(번식)	0.01	0.005	0.005	0.005	0.01	0.005
가금류	닭(산란계)	0.001	0.005	0.001	0.005	0.001	0.006
	닭(육계)	0.001	0.005	0.001	0.005	0.001	0.006
	오리	0.001	0.005	0.001	0.005	0.001	0.006
양, 염소, 말, 사슴, 노새 및 당나귀		0.01	- ²⁾				

주: 1) CRT 기준 가축분뇨처리시설(AWMS, Animal Waste Management System) :

: Solid storage,
 : Composting-in-vessel,
 : Poultry manure with/without litter,
 : Aerobic treatment_forced aeration system

2) 양, 염소, 말, 사슴, 노새 및 당나귀의 분뇨는 수거 및 처리하는 시설이 없어 전량퇴비(퇴비화)로 간주
자료: 2019 Refinement, Vol.4, Ch.10, Table 10.21

위의 가축종별 연평균 질소 배출량을 계산하는 데 적용한 매개변수인 가축분뇨처리 부문 가축종의 가축단위별 N 배출률(N_{rate(T)})과 축종별 평균 체중(TAM) 기준은 아래에 설명하였다.

○ 가축분뇨처리 부문 가축종의 가축단위별 N 배출률(N_{rate(T)})

가축분뇨처리 부문 가축종의 가축단위별 N 배출률(N_{rate(T)})은 2019 Refinement의 기본 계수를 적용하였다.

| 표 5-16 | 가축분뇨처리 부문 가축종의 가축단위별 N 배출률(N_{rate(T)})

(단위: kg N/1,000kg/day)

축종			분뇨 내 질소 배출률	출처	
소	젖소		0.60	2019 Refinement	북미 ¹⁾
	육우		0.40		
양		0.32	아시아		
돼지	번식용		0.38		서유럽 ²⁾
	사슴		0.67		모든 지역
염소		0.34	아시아		
말, 노새 및 당나귀		0.46	서유럽 ³⁾		
가금류	닭	산란계	0.87		모든 지역
	오리		0.83		

주: 1) 우리나라 젖소의 평균 우유 생산량(9,000 kg/두/년)은 타 국가들과 비교하여 북미의 평균 우유 생산량(8,400 kg/두/년)과 유사함
 2) 우리나라에서 사육하는 돼지의 품종은 3원 교잡종(LYD)으로 서유럽 등 축산 선진국과 유사함
 3) 우리나라에서 사육하는 닭의 품종이나 사육방식이 서유럽 등 축산 선진국과 유사함
 자료: 2019 Refinement, Vol.4, Ch.10, Table 10.19

가축분뇨처리 부문 축종별 평균 체중(TAM)

가축분뇨처리 부문 축종별 평균 체중(TAM)은 2019 Refinement의 기본계수를 적용하였다.

표 5-17 가축분뇨처리 부문 축종별 평균 체중(TAM)

(단위: kg/animal)

축종			평균 체중	2019 Refinement	출처
소	젖소		650		북미 ¹⁾
	육우		407		
양			31		아시아
돼지	번식용		190		서유럽 ²⁾
사슴			120		모든 지역
염소			24		아시아
말			238		
노새 및 당나귀			130		모든 지역
가금류	닭	산란계	1.9		서유럽 ³⁾
	오리		2.7	모든 지역	

주: 1) 우리나라 젖소의 평균 우유 생산량(9,000 kg/두/년)은 타 국가들과 비교하여 북미의 평균 우유 생산량(8,400 kg/두/년)과 유사함
 2) 우리나라에서 사육하는 돼지의 품종은 3원 교잡종(LYD)으로 서유럽 등 축산 선진국과 유사함
 3) 우리나라에서 사육하는 닭의 품종이나 사육방식이 서유럽 등 축산 선진국과 유사함
 자료: 2019 Refinement, Vol.4, Ch.10, Table 10A.5

5.3.1.2.3 활동자료

CH₄

소, 양, 돼지, 염소, 사슴, 말, 노새 및 당나귀 활동자료는 5.2.1.2.3절, 5.2.2.2.3절 장내발효 부문 (3.A.1.~4.)과 동일하다. 닭과 오리 활동자료는 「가축동향조사(국가데이터처)」 사육두수를 적용하였다. 다만, 「가축동향조사(국가데이터처)」의 오리 사육두수가 2011년부터 조사되었기 때문에, 1990년부터 2010년까지의 오리 활동자료는 「농림축산식품통계연보(농림축산식품부)」의 사육두수를 사용하였다.

표 5-18 가금류(닭, 오리) 활동자료 수집방법(1990-2023)

기간	활동자료	통계명		관리기관	대상 가스
1990-2023	사육두수	닭	가축동향조사 ¹⁾	국가데이터처	CH ₄ , N ₂ O
1988-2010		오리	농림축산식품통계연보 ²⁾	농림축산식품부	
2011-2023			가축동향조사 ¹⁾	국가데이터처	

주: 1) 「가축동향조사(국가데이터처)」에서 공표하는 분기별 사육두수의 평균값을 적용함
 2) 「농림축산식품통계연보(농림축산식품부)」에서 공표하는 연간 사육두수의 3년간(T, T-1, T-2년) 평균값을 적용함

| 표 5-19 | 가축분뇨처리 부문 활동자료(1990-2023)

(단위: 천마리)

구분	1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023
소 합계	2,078.7	2,271.9	3,301.6	3,493.2	3,939.9	4,083.8	4,080.6
젖소	499.7	541.2	435.0	406.9	401.6	391.1	385.2
한·육우 합계	1,579.0	1,730.7	2,866.6	3,086.4	3,538.4	3,692.7	3,695.3
한우	1,410.8	1,530.5	2,709.2	2,939.4	3,367.4	3,523.4	3,542.0
육우	168.2	200.1	157.4	147.0	171.0	169.3	153.3
양	3.3	1.1	4.4	2.3	2.2	2.1	2.0
돼지 합계	4,412.2	8,149.8	9,819.3	11,358.4	11,244.6	11,196.3	1,1176.6
돼지(비육) ¹⁾	3,757.0	7,173.8	8,797.6	10,259.0	10,177.0	10,145.8	10,134.6
돼지(번식) ¹⁾	655.3	976.0	1,021.7	1,099.3	1,067.6	1,050.5	1,042.0
사슴	45.4	142.8	73.0	29.0	24.3	22.4	21.0
염소	169.1	497.7	253.2	428.3	507.5	461.0	433.1
말	4.3	9.0	28.7	27.2	26.9	27.0	27.3
노새 및 당나귀	0.03	0.07	0.3	0.6	0.6	0.6	0.6
가금류 합계	69,794.9	108,615.0	164,208.9	184,721.6	180,930.1	185,398.1	189,393.0
닭							
닭(산란계) ¹⁾	38,690.5	48,761.7	61,217.6	69,890.2	66,735.3	70,551.1	72,818.5
닭(육계) ¹⁾	30,499.2	55,490.7	90,713.8	106,071.4	107,762.6	107,181.7	109,328.6
오리	605.2	4,363.6	12,277.6	8,760.0	6,432.1	7,665.3	7,246.0

주: 1) 돼지(비육)은 6개월 미만, 돼지(번식)은 6개월 이상의 사육두수를 사용하고 닭(산란계)는 3개월 이상, 닭(육계)는 3개월 미만의 사육두수를 포함

○ N₂O

가축분뇨처리에 따른 N₂O 배출량 산정에 필요한 활동자료는 축종별 사육두수와 축종별·가축분뇨처리시설별 이용비율이 필요하다. 가축사육두수는 상기 CH₄의 적용기준과 동일하며, 축종별·가축분뇨처리시설별(퇴비화, 액비화, 퇴·액비화, 정화처리, 위탁처리, 기타처리) 이용비율은 「농림어업조사(국가데이터처)」 마이크로데이터(MDIS)²⁴⁾의 가축사육두수 자료(2011년-)를 활용하여 산정하였다. 다만, 해당 통계가 2011년부터 조사가 시작되었기 때문에 1990년부터 2010년까지는 가장 근접한 연도(2011년)의 값을 적용하였다. 또한 「농림어업조사(국가데이터처)」가 발표되지 않은 2015년과 2020년에는 각각 2014년, 2016년 그리고 2019년, 2021년 「농림어업조사(국가데이터처)」를 활용하여 내삽하였다.²⁵⁾ 상기 방법으로 산정한 축종별 가축분뇨처리시설 이용비율은 아래 표와 같다.

24) MDIS(Micro Data Integrated Service) : 국가데이터처에서 자체 작성하는 마이크로데이터뿐만 아니라 정부 각 부처, 지자체, 연구기관 등 타 통계작성기관의 마이크로데이터를 한곳에 모아, 다양한 통계 원자료를 편리하게 이용할 수 있도록 제공하는 서비스(국가데이터처)
※ 제공 원칙 : 심층적인 경제, 사회현상 분석을 원하는 다양한 계층의 이용자를 위해 제한 없이 제공. 단, 통계조사 응답자의 비밀보호를 위해 최대한 보호되는 범위 내에서 제공하고 있음

25) 2015년 「농림어업조사(국가데이터처)」의 가축분뇨처리시설 이용비율은 2014년과 2016년 수치를 활용하여 내삽하고, 2020년은 2019년과 2021년 수치를 활용하여 내삽

| 표 5-20 | 축종별 가축분뇨처리시설 이용비율(AWMS_(T))

(단위: %)

구분 ¹⁾		1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023
퇴비화	젖소	86.84	86.84	86.84	78.35	59.48	69.76	75.90
	한우	88.53	88.53	88.53	81.66	81.61	80.12	80.28
	육우	57.42	57.42	57.42	76.64	76.58	69.74	69.00
	돼지(비육, 번식)	22.60	22.60	22.60	10.93	12.56	18.90	16.22
	닭(산란계)	46.77	46.77	46.77	26.45	38.80	10.52	47.82
	닭(육계)	37.98	37.98	37.98	33.43	59.64	64.04	22.73
	오리	32.90	32.90	32.90	57.31	54.84	69.33	25.13
	양, 염소, 말, 사슴, 노새 및 당나귀	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
액비화	젖소	0.08	0.08	0.08	-	5.14	1.53	0.99
	한우	0.32	0.32	0.32	0.22	0.80	1.14	1.24
	육우	9.16	9.16	9.16	-	2.68	0.54	2.12
	돼지(비육, 번식)	28.16	28.16	28.16	11.43	6.69	5.80	3.65
	닭(산란계)	0.47	0.47	0.47	-	-	-	-
	닭(육계)	0.77	0.77	0.77	-	-	-	0.06
	오리	0.04	0.04	0.04	-	-	-	-
	양, 염소, 말, 사슴, 노새 및 당나귀 ²⁾	-	-	-	-	-	-	-
퇴액비화	젖소	-	-	-	4.93	8.49	3.46	4.14
	한우	-	-	-	1.67	2.41	3.18	1.83
	육우	-	-	-	1.39	8.30	3.09	0.41
	돼지(비육, 번식)	-	-	-	11.14	4.41	6.39	3.14
	닭(산란계)	-	-	-	0.46	0.87	0.07	6.69
	닭(육계)	-	-	-	2.15	1.65	1.87	-
	오리	-	-	-	-	0.03	-	-
	양, 염소, 말, 사슴, 노새 및 당나귀 ²⁾	-	-	-	-	-	-	-
정화	젖소	2.77	2.77	2.77	-	0.32	3.37	0.61
	한우	0.20	0.20	0.20	0.27	0.23	0.15	0.25
	육우	0.60	0.60	0.60	-	-	6.29	-
	돼지(비육, 번식)	5.19	5.19	5.19	11.91	22.19	13.72	17.55
	닭(산란계)	2.39	2.39	2.39	0.02	0.03	0.02	-
	닭(육계)	0.06	0.06	0.06	4.80	0.19	0.18	0.29
	오리	-	-	-	-	-	-	0.06
	양, 염소, 말, 사슴, 노새 및 당나귀 ²⁾	-	-	-	-	-	-	-
기타	젖소	1.85	1.85	1.85	0.15	0.24	0.60	1.93
	한우	4.64	4.64	4.64	0.97	0.58	0.77	1.19
	육우	7.87	7.87	7.87	0.01	2.68	0.56	0.26
	돼지(비육, 번식)	0.69	0.69	0.69	0.03	0.28	0.76	1.01
	닭(산란계)	3.55	3.55	3.55	0.14	0.19	3.04	0.37
	닭(육계)	9.73	9.73	9.73	0.31	1.88	0.77	2.71
	오리	0.80	0.80	0.80	13.87	-	-	-
	양, 염소, 말, 사슴, 노새 및 당나귀 ²⁾	-	-	-	-	-	-	-
위탁	젖소	8.46	8.46	8.46	16.56	26.34	21.28	16.42
	한우	6.31	6.31	6.31	15.21	14.36	14.64	15.22
	육우	24.95	24.95	24.95	21.96	9.76	19.79	28.21
	돼지(비육, 번식)	43.36	43.36	43.36	54.56	53.88	54.42	58.44
	닭(산란계)	46.83	46.83	46.83	72.93	60.11	86.33	45.11

구분 ¹⁾	1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023
닭(산육계)	51.47	51.47	51.47	59.32	36.64	33.14	74.21
오리	66.25	66.25	66.25	28.82	45.13	30.67	74.80
양, 염소, 말, 사슴, 노새 및 당나귀 ²⁾	-	-	-	-	-	-	-

주: 1) CRT 기준 가축분뇨처리시설(AWMS, Animal Waste Management System) :

: Solid storage,
 : Composting-in-vessel,
 : Poultry manure with/without litter,
 : Aerobic treatment_forced aeration system

2) 염소, 양, 말, 사슴, 노새 및 당나귀의 분뇨는 수거 및 처리하는 시설이 없어 전량퇴비(퇴비화)로 간주

3) 2011-2023년 농림어업조사(국가데이터처, 2012-2024) (MDIS)(1990년부터 2010년까지는 가장 근접한 연도(2011년)의 값을 적용)

5.3.1.3 시계열 일관성

가축분뇨처리 부문의 배출량 산정방법과 배출계수는 동일한 기준을 적용하여 시계열 일관성을 유지하였다. 활동자료의 경우, 소, 돼지, 닭 사육두수에 대해 1990년부터 「가축동향조사(국가데이터처)」 자료를 사용하였다. 오리의 경우, 1990-2010년까지는 「농림축산식품통계연보(농림축산식품부)」, 2011년부터는 「가축동향조사(국가데이터처)」를 적용하였다. 이외 기타 가축은 1990년부터 「농림축산식품통계연보(농림축산식품부)」를 적용하였다. 가축분뇨처리시설별 이용비율은 「농림어업조사(국가데이터처)」의 마이크로데이터를 사용하고 있으나, 1990년부터 2010년까지는 자료가 없어 2011년의 값을 적용하고, 2015년과 2020년은 내삽을 통해 시계열 일관성을 유지하였다.

5.3.1.4 QA/QC

QA/QC는 제1장 서론 1.5절 내용과 동일하다.

5.3.1.5 재계산

기타 가축 중 말과 노새 및 당나귀 배출량 산정 시, 「농림축산식품통계연보(농림축산식품부)」의 수치를 적용하여 전(全) 시계열에 대해 재계산하였다.

기타 가축 중 가금류의 닭(육계) 배출량 산정 시, 기존에는 2006 IPCC GL에서 제시하는 연평균 질소량을 활용하였으나, 2024년에 승인된 연평균 질소량을 활용하여 전(全) 시계열에 대해 재계산하였다.

5.3.1.6 개선계획

가축분뇨처리시설이 세분화 됨에 따라 활동자료 구축을 통해 가축분뇨 처리부분 배출량 산정에 정확성을 높일 계획이다. 가축분뇨 처리부분의 불확실성을 개선하기 위해 축종별 분뇨 휘발성고형물 함량, 분뇨 내 연평균 질소 배출량 등을 추가 개발 중에 있으며, 향후 연구 결과를 국가 고유 계수로 반영하여 산정체계의 고도화를 추진할 계획이다.

5.3.2 간접 N₂O 배출(3.B.5.)

5.3.2.1 배출원 개요

2023년 기준	산정온실가스	방법론	배출계수	활동자료
	N ₂ O	Tier 1, 2	CS, D	가축사육두수

간접 N₂O 배출은 가축분뇨 처리 시 NH₃와 NO_x로 휘산되는 질소 성분이 대기 중에 침적(deposition) 되거나 수계로 유출되며 발생한다. 수계 유출에 의한 간접 N₂O 배출은 「가축분뇨의 관리 및 이용에 관한 법률」²⁶⁾에 따라 국내 발생량이 없어 산정하지 않았다(NO).

2023년 간접 N₂O 배출(3.B.5.) 부문 배출량은 1,087 천톤 CO₂-eq로 전년 대비 0.6% 증가하였으며, 가축분뇨처리 부문 배출량의 18.2%를 차지한다.

| 표 5-21 | 가축분뇨처리 부문 간접 N₂O 배출 온실가스 배출량(1990-2023)

(단위: 천톤 CO₂-eq)

구분	1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023
간접 N ₂ O 배출	513	721	921	1,049	1,075	1,080	1,087

5.3.2.2 방법론

5.3.2.2.1 산정방법

가축분뇨처리 시 대기침적에 의한 간접 N₂O 배출량은 2019 Refinement 지침에 따라 축종별·가축분뇨처리시설별 N 배출량에 가축분뇨처리시설별 휘산으로 인한 N 손실률을 적용하여 계산하였다.

가축분뇨처리 부문 N 휘산에 의해 발생하는 N₂O 간접배출량 산정식

$$N_2O_{G(mm)} = (N_{volatilization - MMS} \times EF_4) \times \frac{44}{28}$$

N ₂ O _{G(mm)}	: 가축분뇨처리 시 N 휘산에 의한 N ₂ O 간접배출량[kg N ₂ O/yr]
N _{volatilization-MMS}	: NH ₃ 와 NO _x 휘산에 의해 발생하는 가축분뇨 N 손실량[kg N/yr]
EF ₄	: 토양 및 수계면에서 대기침적에 의한 N ₂ O 배출계수 [kg N ₂ O-N/(kg NH ₃ -N+NO _x -N volatilised)]
44/28	: N ₂ O 환산계수

자료: 2019 Refinement, Vol.4, Ch.10, Equation 10.28

26) 「가축분뇨의 관리 및 이용에 관한 법률」: 가축분뇨처리시설의 설치기준 구조물의 천장·바닥 및 벽은 누수 되거나 빗물·지표수 등이 유입되지 아니하도록 방수재료로 만들거나 방수재를 사용하여야 함

가축분뇨처리 부문 N 회산에 의해 발생하는 N 손실량 산정식

$$N_{volatilization-MMS} = \sum_S \left[\sum_{T,P} \left((N_{(T,P)} \times Nex_{(T,P)}) \times AWMS_{(T,S,P)} + N_{cdg(s)} \right) \times Frac_{GasMS(T,S)} \right]$$

- $N_{Volatilization-MMS}$: 가축분뇨처리 시 회산에 의해 발생하는 N 손실량[kg N/yr]
 $N_{(T,P)}$: 국내 가축종의 수[head]
 $Nex_{(T,P)}$: 국내 가축종의 연간 N 배출량[kg N/head/yr]
 $AWMS_{(T,S,P)}$: 국내 가축종의 가축분뇨처리시설의 이용비율
 $N_{cdg(s)}$: 바이오가스 플랜트 혐기 소화물에서 나오는 N의 양[kg N/yr]²⁷⁾
 $Frac_{GasMS(T,S)}$: 가축의 분뇨를 가축분뇨처리시설로 처리 시 NH₃와 NO_x로 회산되는 연간 N 배출률[%]
 S : 가축분뇨처리시설
 P : 가축 생산성
 T : 가축종

자료: 2019 Refinement, Vol.4. Ch.10, Equation 10.26

5.3.2.2.2 배출계수

가축분뇨처리 시 회산에 의한 N₂O 간접 배출계수(EF₄)와 축종별 가축분뇨처리시설별 처리 시 NH₃와 NO_x로 회산되는 연간 질소 배출률(Frac_{GasMS})은 2019 Refinement의 기본 계수를 적용하였으며, 연평균 질소량(Nex_(T,P))은 5.3.1.2.2절과 동일하다.

| 표 5-22 | 가축분뇨처리시설별 N₂O 간접 배출계수

(단위 : kg N₂O-N/kg NH₃-N+NO_x-N volatilised)

구분	계수(EF ₄)	출처
가축분뇨처리 시 회산에 의한 N ₂ O 간접 배출계수	0.01	2019 Refinement

27) 바이오가스 플랜트 혐기 소화물에서 나오는 N의 양(N_{cdg(S)})에 대한 국내 활동자료 부재

| 표 5-23 | 가축분뇨처리시설별 처리 시 NH₃와 NO_x로 휘산되는 연간 질소 배출률(Frac_{GasMS})

축종		질소배출률(Frac _{GasMS}) ¹⁾					
		퇴비화	액비화	퇴·액비화	정화	기타	위탁
소	젖소	0.30	0.85	0.30	0.85	0.30	0.45
	한우	0.45	0.85	0.45	0.85	0.45	0.60
	육우	0.45	0.85	0.45	0.85	0.45	0.60
돼지	돼지(비육)	0.45	0.85	0.85	0.85	0.45	0.85
	돼지(번식)	0.45	0.85	0.85	0.85	0.45	0.85
가금류	닭(산란계)	0.48	0.85	0.48	0.85	0.48	0.60
	닭(육계)	0.40	0.85	0.40	0.85	0.40	0.60
	오리	0.40	0.85	0.40	0.85	0.40	0.60
양, 염소, 말, 사슴, 노새 및 당나귀		0.12	- ²⁾				

주: 1) CRT 기준 가축분뇨처리시설(AWMS, Animal Waste Management System) :

: Solid storage,
 : Composting-in-vessel,
 : Poultry manure with/without litter,
 : Aerobic treatment_forced aeration system

2) 염소, 양, 말, 노새 및 당나귀, 사슴의 분뇨는 수거 및 처리하는 시설이 없어 전량퇴비(퇴비화)로 간주

자료: 2019 Refinement, Vol.4, Ch.10, Table 10.22

5.3.2.2.3 활동자료

활동자료(축종별 사육두수, 가축분뇨처리시설별 이용비율)는 5.3.1.2.3절과 동일하다.

5.3.2.3 시계열 일관성

시계열 일관성은 5.3.1.3절과 동일하다.

5.3.2.4 QA/QC

QA/QC는 제1장 서론 1.5절 내용과 동일하다.

5.3.2.5 재계산

재계산은 5.3.1.5절과 동일하다.

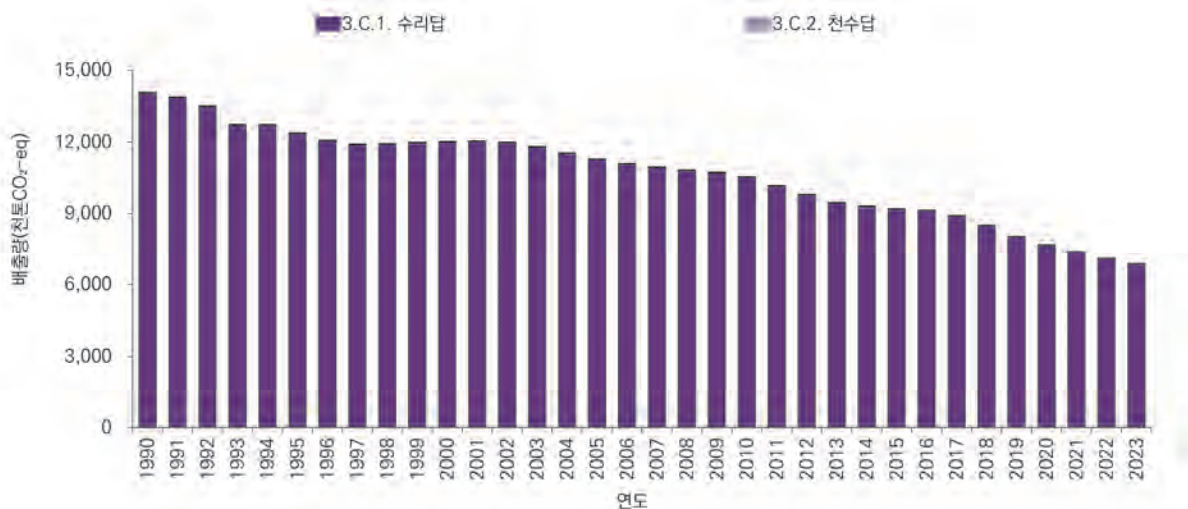
5.4 벼재배(3.C.)

벼재배 시 담수(환원) 상태에서, 유기물이 혐기적으로 분해되는 과정에서 CH_4 가 식물체 통기조직을 통해서 대기 중으로 배출된다. 벼재배 부문의 세부 배출원을 살펴보면 수리답(3.C.1.)과 천수답(3.C.2.)으로 구분된다²⁸⁾. 수리답은 벼재배를 위해 인위적으로 물을 공급하는 형태의 논을 의미하며, 천수답은 관개시설 없이 오로지 빗물로만 경작하는 형태의 논을 의미한다.

벼재배 시 발생하는 CH_4 배출량은 벼 품종과 지역의 기후 특성(강수량, 온도, 일사량 등), 토양 특성(토성, 유기물, 용적밀도 등), 시비 및 물관리 방법 등 재배 조건에 따라 차이가 있다. 기본 CH_4 배출계수는 상시담수와 표준시비($\text{N}=90 \text{ kg/ha}$, $\text{P}_2\text{O}_5=45$, $\text{K}_2\text{O}=57$) 조건에서 벼 재배기간 중 1일 평균 CH_4 배출량을 의미한다. 우리나라는 고유의 토양과 기후특성, 그리고 벼 재배환경에 맞는 기본 CH_4 배출계수를 산정에 적용하기 위해 대표 품종 중심으로 전국의 4개 지역에서 CH_4 배출량을 3년간 조사하였다. 또한, 다양한 재배관리 방식에 따른 CH_4 배출량을 고려하여 물관리 방법과 유기물 시용에 따른 보정계수를 개발하여 산정에 적용하고 있다.

2023년 벼재배 부문의 배출량은 6,879 천톤 $\text{CO}_2\text{-eq}$ 으로, 1990년 14,073 천톤 $\text{CO}_2\text{-eq}$ 과 비교하면 51.1% 감소했다. 이와 같은 벼재배 부문 배출량 감소는 1990년 이후 매년 벼 재배면적이 감소한 점과 물관리 방법이 개선되는 등 복합적인 원인이 작용한 것으로 분석된다.

세부 배출원별 배출량은 2023년에 수리답(3.C.1.)에서 6,869 천톤 $\text{CO}_2\text{-eq}$, 천수답(3.C.2.)에서 10 천톤 $\text{CO}_2\text{-eq}$ 이 배출되어 벼재배 부문 배출량의 99.9%가 수리답에서 배출된 것으로 나타났다.



| 그림 5-5 | 벼재배 부문 온실가스 배출량(1990-2023)

28) 2006 IPCC GL의 하위 부문 중 3.C.3. 심수답(Deep water)은 국내 배출원이 없어 “NO”로 보고

| 표 5-24 | 벼재배 부문 온실가스 배출량 (1990-2023)

(단위: 천톤 CO₂-eq)

구분	1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023
수리답	14,030	11,998	10,519	8,499	7,397	7,098	6,869
천수답	43	37	32	25	16	14	10
합계	14,073	12,035	10,551	8,524	7,413	7,112	6,879

5.4.1 수리답(3.C.1.)

5.4.1.1 배출원 개요

2023년 기준	산정온실가스	방법론	배출계수	활동자료
	CH ₄	Tier 2	CS	논벼, 맥류 재배면적

수리답 부문에서의 온실가스 배출량 산정기준은 벼재배 중 물을 관리하는 방법에 따라 상시담수(3.C.1.a. Continuously flooded)와 중간물떼기(3.C.1.b. Intermittently flooded)로 구분한다. 상시담수란 벼 수확기 이전의 물떼기 시기를 제외하고 물이 항상 차 있는 논을 의미하고, 중간물떼기는 벼재배 기간에 적어도 한 번(3일 이상) 이상 물을 빼고 건조하는 물떼기(aeration)²⁹⁾를 하는 논으로, 중간물떼기 기간에 따라 1회 중간물떼기(1주 미만, 1-2주)와 2회 이상 중간물떼기(2주 이상)으로 구분한다.

2023년 수리답에서 온실가스 배출량은 6,869 천톤 CO₂-eq로 전년 대비 3.2% 감소하였다. 물관리 방법별로는 중간물떼기 방식으로 5,702 천톤 CO₂-eq, 상시담수로 1,167 천톤 CO₂-eq이 배출되며 각각 83.0%, 17.0%를 차지하는 것으로 나타났다.

| 표 5-25 | 벼재배 부문 수리답에서의 온실가스 배출량(1990-2023)

(단위: 천톤 CO₂-eq)

구분	1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023
상시담수	2,614	2,273	2,002	1,705	1,387	1,294	1,167
중간물떼기							
소계	11,416	9,725	8,517	6,794	6,010	5,805	5,702
1회 중간물떼기	9,189	7,828	6,855	4,697	3,681	3,472	3,261
2회 이상 중간물떼기	2,227	1,897	1,661	2,097	2,329	2,332	2,441
합계	14,030	11,998	10,519	8,499	7,397	7,098	6,869

5.4.1.2 방법론

5.4.1.2.1 산정방법

벼재배 부문의 CH₄ 배출은 수리답(3.C.1.)·천수답(3.C.2.) 모두 2006 IPCC GL 방법론에 따라, 벼 재배면적에 CH₄ 배출계수와 벼재배 기간(day)을 곱하여 산정한다. 재배 전 및 재배 중의 물관리

29) 물떼기(落水, aeration): 논에 댔던 물을 빼는 일

방법과 유기물 사용 여부에 따라 CH₄ 배출 특성이 달라지므로 물관리 방법별 면적과 배출계수(기본 배출계수×물관리 보정계수)를 구분하여 적용한다.

벼재배 부문 CH₄ 배출량 산정식

$$CH_{4\text{ Rice}} = \sum_{i,j,k} (EF_{i,j,k} \times t_{i,j,k} \times A_{i,j,k} \times 10^{-6})$$

CH₄ Rice : 벼재배 연간 CH₄ 배출량[Gg CH₄/yr]

EF_{i,j,k} : 일일 배출계수[kg CH₄/ha/day]

t_{i,j,k} : 벼재배 기간[day]

A_{i,j,k} : 연간 벼 재배면적[ha/yr]

i, j, k : 벼재배 CH₄ 배출량을 결정짓는 재배지 생태환경, 물관리 체계, 유기물 사용량 및 종류 등

자료: 2006 IPCC GL, Vol.4, Ch.5, Equation 5.1

5.4.1.2.2 배출계수

벼재배 부문의 CH₄ 배출계수는 수리답과 천수답 모두 물관리 방법과 유기물 사용 여부를 고려하여 산정하며, 산정방법은 2006 IPCC GL 적용하고 있다. 벼재배 부문 수리답의 CH₄ 배출계수를 도출하기 위해 적용한 매개변수는 모두 국가 고유 배출계수를 사용하였다.

벼재배 부문 CH₄ 배출계수 산정식

$$EF_i = EF_c \times SF_w \times SF_p \times SF_o \times SF_{s,r}$$

EF_i : 특정 재배면적에 대한 일일 배출계수[kg CH₄/ha/day]

EF_c : 유기물 무사용 상시답수 논의 기본 배출계수[kg CH₄/ha/day]

SF_w : 작물 재배기간 중 물관리 방법별 보정계수

SF_p : 작물 재배기간 전 물관리 방법별 보정계수

SF_o : 유기물 사용 보정계수

SF_{s,r} : 토양 특성이나 벼 품종별 보정계수³⁰⁾

자료: 2006 IPCC GL, Vol.4, Ch.5, Equation 5.2

수리답3에서의 물관리 방법과 유기물 사용 여부를 고려하여 산정한 CH₄ 배출계수는 아래 표와 같다.

30) 토양 특성이나 벼 품종별 보정계수(SF_{s,r})은 자료부재로 미적용

| 표 5-26 | 벼재배 부문 수리답에서의 일일 CH₄ 배출계수(EF_i)

구 분					유기물 무시용 배출계수(EF _i) (산정식 = EF _c × SF _w × SF _p)	유기물 사용 배출계수(EF _i) (산정식 = EF _c × SF _w × SF _p × SF _o)							
					배출계수 도출에 사용된 매개변수		벼짚·보릿 짚 사용 (SF _o)	녹비 사용 (SF _o)					
재배 중			재배 전	재배중 물관리방법 (SF _w)	재배전 물관리방법 (SF _p)	유기물 무시용 (EF _c)	2.32	2.5	1.045				
						상시답수	비답수 180일 미만	비답수 180일 이상	답수 30일 이상	1	0.8	1.09	2.32 ¹⁾
중간 물떼기	1회 중간물떼기	중간물떼기 1주 미만	비답수 180일 미만	0.83	1	1.93	4.81	2.01					
									비답수 180일 이상	0.8	1.54	3.85	1.61
		중간물떼기 1~2주	비답수 180일 미만	0.66	1	1.53	3.83	1.60					
									비답수 180일 이상	0.8	1.22	3.06	1.28
	2회 이상 중간물떼기	중간물떼기 2주 이상	비답수 180일 미만	0.49	1	1.14	2.84	1.19					
									비답수 180일 이상	0.8	0.91	2.27	0.95

주: 1) (산정 예) 상시답수 비답수 180일 미만 유기물 무시용 배출계수(EF_i) 2.32 = 2.32 (EF_c) × 1 (SF_w) × 1 (SF_p)

2) (산정 예) 상시답수 비답수 180일 미만 유기물(벼짚·보릿짚) 사용 배출계수(EF_i) 5.80 = 2.32 (EF_c) × 1 (SF_w) × 1 (SF_p) × 2.5 (SF_o)

수리답에서의 물관리 방법과 유기물 사용 여부를 고려하여 산정한 CH₄ 배출계수를 도출하기 위해 적용된 매개변수는 아래와 같다.

- 유기물 무시용 상시답수 논외 기본 CH₄ 배출계수

CH₄ 기본 배출계수는 벼 재배기간 중 상시답수를 하고 유기물을 사용하지 않은 논에서의 계수를 의미한다. CH₄ 기본 배출계수는 국가 고유 배출계수를 적용하였다.

| 표 5-27 | 유기물 무시용 상시답수 논외 기본 배출계수

구 분	배출계수	출처
CH ₄ 기본 배출계수	2.32 kg CH ₄ /ha/day	국가 고유 배출계수 ¹⁾ (2014년 승인)

주: 1) 3년 동안 4개 지역(대구광역시, 광주광역시, 화성시, 진주시)에서 논 상시답수와 표준 재배조건 하에서 재배 중 CH₄ 배출량 변화를 측정 분석한 결과임(국립농업과학원, 2013).

- 재배 전 및 재배 중 물관리 방법별 보정계수

재배 전 및 재배 중 물관리 방법별로 CH₄ 배출량이 달라지기 때문에 이를 반영하기 위해 국가 고유 보정계수(SF_p, SF_w)를 개발하여 적용한다. 재배 전 물관리 방법별 보정계수(SF_p)는 세부적으로는 비담수 180일 미만·이상, 담수일 30일 이상으로 구분하여 적용하고, 재배 중 물관리 방법별 보정계수(SF_w)는 상시담수와 1회, 2회 이상 중간물떼기로 구분하며, 1회 중간물떼기는 물떼기 기간을 세분화(1주, 2주)하여 물관리 방법별 배출 특성을 반영하였다.

표 5-28 | 재배 전 및 재배 중 물관리 방법별 보정계수(SF_p, SF_w)

구 분			물관리 방법별 보정계수	출처
재배 전 (SF _p)	비담수 180일 미만		1.00	국가 고유 보정계수 ¹⁾ (2014년 승인)
	비담수 180일 이상		0.80	
	재배 전 담수일 30일 이상		1.09	
재배 중 (SF _w)	상시담수		1.00	국가 고유 보정계수 ²⁾ (2014년 승인)
	중간물떼기	1회 중간물떼기	0.83 (중간물떼기 1주 미만)	
			0.66 (중간물떼기 1-2주)	
		2회 이상 중간물떼기	0.49 (중간물떼기 2주 이상)	

주: 1) 3년(2010-2012) 동안 상시담수 및 중간물떼기 처리에 따른 CH₄ 배출량 변화로부터 회귀식을 산출하여 비담수 180일 미만의 CH₄ 배출량 대비 180일 이상과 담수 30일 이상의 비율을 환산한 결과를 보정계수로 산정(농촌진흥청, 2013)

2) 3년(2010-2012) 동안 상시담수 및 중간물떼기 처리기간의 변화에 따른 CH₄ 배출량 변화로부터 회귀식을 산출하여 상시담수 CH₄ 배출량 대비 중간물떼기 처리기간의 비율을 환산한 결과를 보정계수로 산정(농촌진흥청, 2013)

- 유기물 시용 보정계수

벼재배에서 유기물은 볏짚 및 보릿짚, 녹비작물, 퇴비 등 유기비료로 투입되며, 우리나라에서는 볏짚 및 보릿짚 그리고 녹비에 대한 국가 고유 배출계수를 개발하여 유기물 시용에 따른 보정계수(SF_o)로 적용하고 있다. 기타 유기비료에 대한 보정계수는 활동자료 미비로 산정하고 있지 않다. 우리나라의 유기물 시용에는 볏짚·보릿짚 그리고 녹비가 사용되며, 유기물 시용에 따른 보정계수(SF_o)는 국가 고유 보정계수를 적용하였다.

표 5-29 | 유기물 시용 보정계수(SF_o)

구 분	유기물 시용 보정계수				출처
	볏짚·보릿짚 시용 보정계수		녹비시용 보정계수		
시용량별 보정계수	6 Mg/ha	2.5	0.0685 Mg/ha	1.045	국가 고유 보정계수 ¹⁾ (2014년 승인)

주: 1) 우리나라 벼재배 논에서의 볏짚·보릿짚 시용량은 6 Mg/ha, 녹비 시용량은 0.0685 Mg/ha를 활용하여 계수를 적용함

5.4.1.2.3 활동자료

수리답 면적을 도출하기 위해 먼저 벼 재배면적(논벼, 맥류)을 물관리 방법별 면적(재배 전, 재배 중)으로 구분하고, 이를 유기물 시용면적(볍짚·보릿짚, 녹비)으로 세분화한다. 벼재배 부문에서 맥류 재배

면적을 고려하는 이유는 우리나라에서 벼와 보리를 이모작하기 때문이다³¹⁾.

| 표 5-30 | 벼재배 물관리 방법 및 유기물 사용에 따른 수리답 면적(1990~2023)

(단위: 천 ha)

구분			1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023
유기물 사용 ¹⁾	상시담수	비담수 180일 미만	74.6	66.2	59.6	47.3	34.8	29.3	24.8
		비담수 180일 이상	2.9	2.6	2.3	0.1	0.2	0.2	0.2
		담수 30일 이 상	8.0	7.1	6.4	11.0	8.5	8.7	8.6
	1회 중간물떼 기	비담수 180일 미만	375.7	324.1	289.3	188.6	135.8	115.4	101.9
		비담수 180일 이상	14.6	12.6	11.2	0.5	0.8	0.6	0.8
		담수 30일 이 상	40.5	35.0	31.2	43.4	33.1	34.4	35.3
	2회 이상 중간물떼 기	비담수 180일 미만	132.5	114.3	102.1	121.1	121.2	109.3	107.7
		비담수 180일 이상	5.1	4.4	4.0	0.3	0.7	0.6	0.9
		담수 30일 이 상	14.3	12.3	11.0	26.9	29.6	33.0	37.9
유기물 무사용	상시담수	비담수 180일 미만	71.7	58.8	48.5	36.3	37.4	37.4	34.1
		비담수 180일 이상	2.8	2.3	1.9	0.1	0.2	0.2	0.3
		담수 30일 이 상	7.7	6.3	5.2	8.5	9.2	11.5	12.0
	1회 중간물떼 기	비담수 180일 미만	331.3	271.9	224.2	138.3	137.5	138.3	130.9
		비담수 180일 이상	12.8	10.5	8.7	0.4	0.8	0.8	1.0
		담수 30일 이 상	35.7	29.3	24.2	31.8	34.0	42.5	46.0
	2회 이상 중간물떼 기	비담수 180일 미만	116.9	95.9	79.1	88.7	122.9	132.7	139.0
		비담수 180일 이상	4.5	3.7	3.1	0.2	0.7	0.7	1.1
		담수 30일 이 상	12.6	10.4	8.5	19.7	30.5	41.4	49.4
합계			1,264.3	1,067.9	920.5	763.3	737.7	737.1	731.8

주: 재배면적을 해당연도(T년) 및 직전 2개년(T-1, T-2년) 3년 치 자료를 평균하여 활동자료로 사용

31) 벼재배 부문 인벤토리 산정 시 사용하는 맥류 재배면적은 호밀 재배면적을 제외한 나머지 겉보리, 쌀보리, 맥주보리, 밀 재배면적을 합산하여 적용한다. 국내 호밀 재배면적은 전체 맥류 재배면적에서 차지하는 비중이 평균 0.04%(1988~2003년)로 소량을 차지하며 2004년부터 생산이 중단되어 인벤토리 산정 범위에서 제외함

2023년 수리답 총면적은 731.8 천 ha로, 상기 방법으로 수리답을 세분화한 결과 물관리 방법 기준으로는 1회 중간물떼기 면적이 315.8 천 ha(43.2%)로 가장 큰 비중을 보였으며, 2회 이상 중간물떼기는 336.1 천 ha(45.9%), 상시답수는 79.9천 ha(10.9%)에 해당하는 것으로 나타났다.

또한, 수리답 총면적을 유기물 사용·무사용으로 세분화하면, 유기물 무사용이 413.7 천 ha, 사용은 318.2 천 ha로 각각 56.5%, 43.5%의 비중을 보였다.

표 5-31 | 벼재배 물관리 방법 및 유기물 사용에 따른 수리답 재배면적(2023)

(단위: 천 ha)

구 분			유기물 무사용 (SF _p)	유기물 사용(SF _o)		합계		
				벼짚·보릿짚 사용	녹비 사용			
재배 중			재배 전					
상시답수			비답수 180일 미만	34.1	23.8	1.0	58.9	79.9
			비답수 180일 이상	0.3	0.2	0.01	0.4	
			답수 30일 이상	12.0	8.2	0.4	20.6	
중간 물떼기	1회 중간 물떼기	중간물떼 기 1주 미만	비답수 180일 미만	27.9	20.6	0.8	49.4	315.8
			비답수 180일 이상	0.2	0.2	0.006	0.4	
			답수 30일 이상	9.8	7.2	0.3	17.3	
		중간물떼 기 1~2주	비답수 180일 미만	103.0	77.3	3.1	183.4	
			비답수 180일 이상	0.8	0.6	0.02	1.4	
			답수 30일 이상	36.1	26.8	1.0	64.0	
	2회 이상 중간물떼 기	중간물떼 기 2주 이상	비답수 180일 미만	139.0	103.6	3.1	246.7	336.1
			비답수 180일 이상	1.1	0.8	0.02	2.0	
			답수 30일 이상	49.4	36.5	1.1	87.4	
	합계				413.7	318.2		731.8

주: 재배면적을 해당연도(T년) 및 직전 2개년(T-1, T-2년) 3년 치 자료를 평균하여 활동자료로 사용

수리답 면적을 상세화하는데 사용한 통계와 산정방법은 아래와 같다.

- 재배면적

재배면적은 「농업면적조사(국가데이터처)」의 벼 재배면적(논벼, 맥류) 자료를 사용하였다.

- 재배 전 및 재배 중 물관리 방법별 면적 비율

벼재배 전 물관리 방법에 따른 벼 재배면적 비율의 출처는 벼재배 중과 동일하며, 맥류를 이모작하는 논에서는 상시답수를 제외하고 물관리 방법에 대한 면적비율을 적용하고 있다.

벼재배 중 물관리 방법별 면적 비율은 기본적으로 「농림어업조사(국가데이터처)」 마이크로데이터(MDIS)의 물관리 방법별 재배면적 자료(2011년-)와 「농림어업조사(국가데이터처)」 마이크로데이터의 물관리 방법별 재배면적 자료(2010년)를 활용하여 산정하였다. 다만, 해당 통계가 2010년부터 조사가 시작되었기 때문에 1990년부터 2009년까지는 가장 근접한 연도(2010년)의 값을 적용하였다.

2015년과 2020년에는 「농림어업조사(국가데이터처)」를 활용하여 내삽하였다.³²⁾

| 표 5-32 | 재배 전 및 재배 중 물관리 방법별 벼 재배면적 비율(1990-2023)

(단위: %)

구분		1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023
재배 전	재배 전 비담수 180일 미만	87.22	87.22	87.22	84.18	77.21	71.76	71.67
	재배 전 비담수 180일 이상	3.38	3.38	3.38	0.13	0.47	0.35	0.91
	재배 전 담수일 30일 이상	9.41	9.41	9.41	15.69	22.32	27.89	27.42
재배 중	상시담수	13.67	13.67	13.67	12.66	12.06	11.71	9.60
	중간 물때 기	중간물때기 1주(1회)	19.80	19.80	19.80	9.48	10.48	7.30
		중간물때기 2주(1회)	43.38	43.38	43.38	36.21	31.92	33.14
		중간물때기 3주(2회)	22.29	22.29	22.29	41.72	45.49	49.78
	상습가뭄 ¹⁾		0.85	0.85	0.85	0.73	0.53	0.17

주: 1) 천수답(3.C.2.)의 재배면적 비율을 의미함

- 유기물 시용 면적 비율

유기물 시용 면적 비율은 「농림어업조사(국가데이터처)」 잔사처리방법별 재배면적 자료(2017년-) 마이크로데이터를 활용하여 산정하였다. 다만, 해당 통계가 2017년부터 조사되었기 때문에 이에 따라, 1991년부터 2016년까지는 1990년과 2017년의 값을 활용하여 선형내삽법으로 계산하였다. 2020년 자료는 2019년과 2021년 값을 내삽하여 산출하였다.

| 표 5-33 | 볏짚 유기물 시용·무시용 면적 비율(1990-2023)

(단위: %)

구분	1990 ¹⁾	2000	2010	2018	2021	2022	2023
시용	50.00	52.23	54.47	55.62	43.95	36.78	42.63
무시용	50.00	47.77	45.53	44.38	56.05	63.22	57.37

주: 1) 1990년의 유기물 시용 면적은 전문가 판단에 의해 50%로 적용

- 유기물 환원 면적비율

보릿짚 유기물 환원 면적 비율은 「농림어업조사(국가데이터처)」 자료(2017년-) 마이크로데이터를 활용하여 산정하였다. 다만, 해당 통계가 2017년부터 조사되었기 때문에 이에 따라 1990년부터 2016년까지는 가장 근접한 연도(2017년)의 값을 적용하였다. 2020년 자료는 2019년과 2021년 값을 내삽하여 산출하였다.

| 표 5-34 | 보릿짚 유기물 환원 면적 비율(1990-2023)

(단위: %)

구분	1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023
보릿짚 유기물 환원 면적 비율	47.19	47.19	47.19	46.03	64.02	68.63	57.17

32) 2015년 「농림어업조사(국가데이터처)」의 물관리방법별 면적비율은 2014년과 2016년 수치를 활용하여 내삽하고, 2020년은 2019년과 2021년 수치를 활용하여 내삽

- 녹비 시용 유기물 환원 면적비율

녹비 시용 유기물 환원 면적 비율은 「농림어업총조사(국가데이터처)」의 녹비 수확면적 자료를 활용하여 산정하였다. 다만, 해당 통계가 2010년부터 5년마다 조사되었기 때문에 1990년부터 2009년까지는 가장 근접한 연도(2010년)의 값을 적용하였다. 2011년부터 2014년 자료는 2010년과 2015년, 2016년부터 2015년과 2020년 값을 내삽하여 산출하였다. 2021년부터 2023년 자료는 가장 근접한 연도(2020년)의 값을 적용하였다.

| 표 5-35 | 녹비 시용 유기물 환원 면적 비율(1990-2023)

(단위: %)

구분	1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023
녹비 시용 유기물 환원 면적 비율	1.93	1.93	1.93	1.70	1.71	1.71	1.71

5.4.1.3 시계열 일관성

벼재배 부문의 수리답으로 인한 CH₄ 배출량을 산정하기 위해 1990년부터 동일한 방법론과 배출 계수, 활동자료를 사용하여 시계열 일관성을 유지하였다. 활동자료의 경우, 벼 재배면적은 1990년부터 「농업면적조사(국가데이터처)」 자료를 사용하였다. 다만, 유기물 시용에 따른 면적을 세분화하기 위해 「농림어업조사(국가데이터처)」와 「농림어업총조사(국가데이터처)」의 마이크로데이터를 활용하였다.

5.4.1.4 QA/QC

QA/QC는 제1장 서론 1.5절 내용과 동일하다.

5.4.1.5 재계산

수리답의 녹비 시용 유기물 환원 면적 비율 적용 시 기존에 국가데이터처 조사자료가 부재하여 2015년의 수치를 적용하였던 2017-2019년에 대해 「농림어업조사(국가데이터처)」의 2015년과 2020년 수치를 사용하여 내삽한 값으로 재계산하였다.

5.4.1.6 개선계획

벼재배 부문 배출계수의 불확실성을 개선하기 위해 ‘재배 중 물관리 보정계수’ 및 ‘유기물 시용에 따른 보정계수’를 추가 개발 중에 있으며, 향후 연구 결과를 국가 고유 계수로 반영하여 산정 체계의 고도화를 추진할 계획이다.

5.4.2 천수답(3.C.2.)

5.4.2.1 배출원 개요

2023년 기준	산정온실가스	방법론	배출계수	활동자료
	CH ₄	Tier 1, Tier 2	CS, D	논벼, 맥류 재배면적

천수답은 관개시설 없이 오로지 빗물로만 경작하는 형태의 논을 의미한다. 2006 IPCC GL에서 천수답 부문 CH₄ 배출량 산정기준은 상습범람(3.C.2.a. Flood-prone)와 상습가뭄(3.C.2.b. Drought-prone)로 구분되며, 우리나라 천수답은 상습가뭄에 해당된다³³⁾.

2023년 천수답(3.C.2.)에서 10 천톤 CO₂-eq 배출되었으며, 전년 대비 27.6%, 1990년 대비 76.8% 감소한 것으로 나타났다.

| 표 5-36 | 벼재배 부문 천수답 CH₄ 배출량(1990-2023)

(단위: 천톤 CO₂-eq)

구분	1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023
천수답	43	37	32	25	16	14	10

5.4.2.2 방법론

5.4.2.2.1 산정방법

천수답의 CH₄ 배출량은 2006 IPCC GL Tier 1 방법을 적용하여 산정하며, CH₄ 배출량 산정식은 5.4.1.2.1장 수리답(3.C.1.)와 동일하다.

5.4.2.2.2 배출계수

벼재배 부문의 CH₄ 배출계수는 수리답(3.C.1.)과 동일하게 물관리 방법과 유기물 사용 여부를 고려하여 산정하며, 산정방법은 2006 IPCC GL 적용하고 있다. 벼재배 부문 천수답의 CH₄ 배출계수를 도출하기 위해 재배 전 물관리 방법별, 유기물 사용 보정계수는 국가 고유 배출계수를 적용하였고, 재배 중 물관리 방법은 2006 IPCC GL 기본계수를 적용하였다.

33) 상습범람(3.C.2.a. Flood-prone)는 “NO”로 보고

표 5-37 | 벼재배 부문 천수답에서의 일일 CH₄ 배출계수(EF_i)

구 분			유기물 무시용 배출계수(EF _i) (산정식 = EF _c × SF _w × SF _p)	유기물 사용 배출계수(EF _i) (산정식 = EF _c × SF _w × SF _p × SF _o)		
재배 중	재배 전	배출계수 도출에 사용된 매개변수				
		재배중 물관리방 법(SF _w)	재배전 물관리방 법 (SF _p)	유기물 무시용(EF _c)	벼짚·보릿짚 시 용 (SF _o)	녹비 사용 (SF _o)
				2.32	2.5	1.045
상습가뭄	비답수 180일 미만	0.25 ³⁾	1	0.58 ¹⁾	1.45 ²⁾	0.61
	비답수 180일 이상		0.8	0.46	1.16	0.48
	답수 30일 이상		1.09	0.63	1.58	0.66

주: 1) (산정 예) 상습가뭄 비답수 180일 미만 유기물 무시용 배출계수(EF_i) 0.58 = 2.32 (EF_c) × 0.25 (SF_w) × 1 (SF_p)
 2) (산정 예) 상습가뭄 비답수 180일 미만 유기물(벼짚·보릿짚) 사용 배출계수(EF_i) 1.45 = 2.32 (EF_c) × 0.25 (SF_w) × 1 (SF_p) × 2.5 (SF_o)
 3) 2006 IPCC GL, Vol.4, Ch.5, Table 5.12

5.4.2.2.3 활동자료

활동자료를 도출하는 방법은 5.4.1.2.3절 수리답(3.C.1.)과 동일하다. 동일한 방법을 통해 도출한 천수답 면적을 세부적으로 살펴보면, 재배 전 물관리는 비답수 180일 미만인 경우가 대부분이었으며, 유기물사용 면적은 43.7%, 무시용 면적 56.3%였다.

표 5-38 | 벼재배 물관리 방법 및 유기물 사용에 따른 천수답 면적(1990~2023)

(단위: 천 ha)

구분		1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023
유기물 사용 (SF _o)	비답수 180일 미만	5.1	4.4	3.9	2.8	1.7	1.3	0.9
	비답수 180일 이상	0.2	0.2	0.2	0.01	0.01	0.01	0.01
	답수 30일 이상	0.5	0.5	0.4	0.7	0.4	0.4	0.3
유기물 무사용 (SF _p)	비답수 180일 미만	4.5	3.7	3.0	2.1	1.7	1.5	1.1
	비답수 180일 이상	0.2	0.1	0.1	0.01	0.01	0.01	0.01
	답수 30일 이상	0.5	0.4	0.3	0.5	0.4	0.5	0.4
합계		10.9	9.2	7.9	6.1	4.2	3.7	2.7

주: 재배면적을 해당연도(T년) 및 직전 2개년(T-1, T-2년) 3년 치 자료를 평균하여 활동자료로 사용

| 표 5-39 | 벼재배 물관리 방법에 따른 천수답 재배면적(2023)

(단위: 천 ha)

구 분	재배 전 물관리 방법	유기물 무시용	유기물 사용		합계
			벼짚·보릿짚 사용	녹비 사용	
천수답	비담수 180일 미만	1.1	0.9	0.03	2.0
	비담수 180일 이상	0.01	0.01	0.0002	0.01
	담수 30일 이상	0.4	0.3	0.01	0.7
합계		1.5	1.1	0.1	2.7

주: 재배면적을 해당연도(T년) 및 직전 2개년(T-1, T-2년) 3년 치 자료를 평균하여 활동자료로 사용

5.4.2.3 시계열 일관성

시계열 일관성은 5.4.1.3절 수리답(3.C.1.)과 동일하다.

5.4.2.4 QA/QC

QA/QC는 제1장 서론 1.5절 내용과 동일하다.

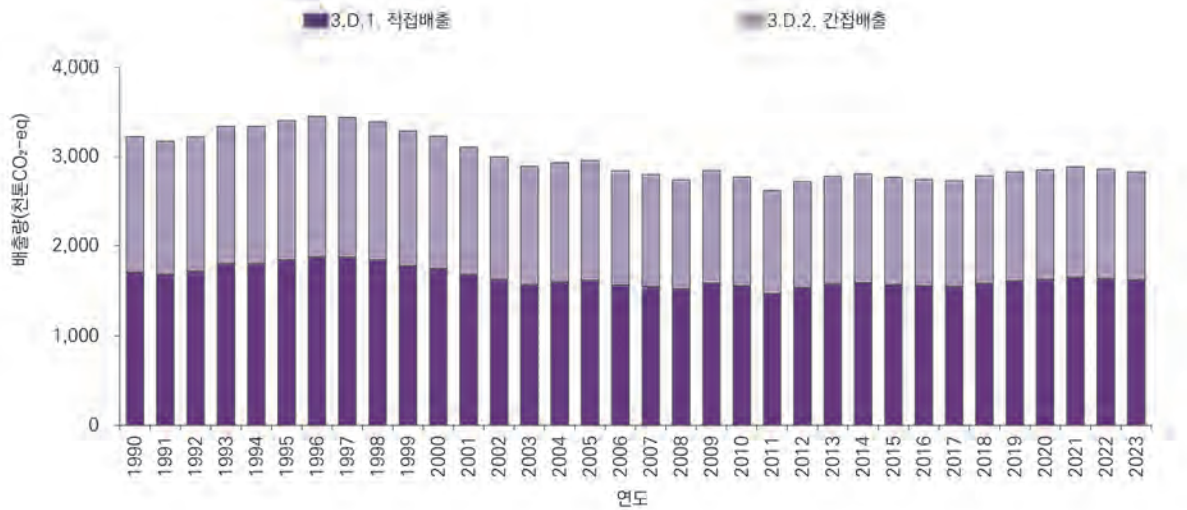
5.4.2.5 재계산

재계산은 5.4.1.5절 수리답(3.C.1.)과 동일하다.

5.5 농경지토양(3.D.)

농경지토양 부문의 N_2O 배출량은 토양에 투입된 질소가 다른 곳으로 이동하지 않고 동일 장소에서 직접 배출되는 직접배출(3.D.1.)과 투입된 질소가 대기침적(Atmospheric deposition)과 수계유출(Leaching and run-off)에 의해 간접적으로 배출되는 간접배출(3.D.2.)로 구분된다.

농경지토양 부문에서 2023년 N_2O 배출량은 2,827 천톤 CO_2 -eq으로, 직접배출(3.C.1.)은 1,621 톤 CO_2 -eq, 간접배출(3.C.2.)은 1,206 톤 CO_2 -eq이 배출되어 각각 57.3%, 42.7%의 비중을 보였다.



| 그림 5-6 | 농경지토양 부문 온실가스 배출량(1990-2023)

| 표 5-40 | 농경지토양 부문 온실가스 배출량(1990-2023)

(단위: 천톤 CO_2 -eq)

구분	1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023
직접배출	1,706	1,745	1,552	1,579	1,647	1,634	1,621
간접배출	1,513	1,480	1,217	1,202	1,237	1,222	1,206
합계	3,219	3,225	2,769	2,781	2,884	2,856	2,827

5.5.1 직접배출(3.D.1.)

5.5.1.1 배출원 개요

	산정 온실가스	방법론	배출계수	활동자료
2023년 기준	N_2O	Tier 2	CS, D	질소 투입량 (무기질 비료, 유기질 비료, 작물잔사환원)

직접배출의 질소 투입원으로는 화학비료 등 무기질 비료(3.D.1.a.)와 가축분뇨를 처리 후 비료로 사용하는 유기질 비료(3.D.1.b.)가 있고³⁴⁾, 작물 수확 후 식용부위를 제거한 잔사가 농경지로 환원(토양과 혼합)되면서 온실가스가 배출되는 농경지 환원(3.D.1.d.)이 있다³⁵⁾. 작물잔사는 농경지로 환원되는 것 외에 사료로 판매되거나 소각처리 되고 있으며, 소각에 따른 온실가스 배출량은 작물 잔사소각 부문(3.F.)에서 산정하였다.

직접배출로 인한 2023년 N₂O 배출량은 1,621 천톤 CO₂-eq로 전년 대비 0.8% 감소하였으며, 세부 부문별로는 유기질 비료(3.D.1.b.)에서 997 천톤 CO₂-eq, 무기질 비료(3.D.1.a.)에서 494 천톤 CO₂-eq, 작물잔사환원(3.D.1.d.)에서 130 천톤 CO₂-eq이 배출되어 각각 61.5%, 30.5%, 8.0%의 비중을 보였다.

표 5-41 | 농경지토양 부문 직접배출 N₂O 배출량(1990~2023)

(단위: 천톤 CO₂-eq)

구분	1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023
무기질 비료	1,035	891	532	504	527	510	494
유기질 비료	542	719	882	946	981	996	997
작물잔사환원	130	134	138	129	138	128	130
합계	1,707	1,745	1,552	1,579	1,647	1,634	1,621

5.5.1.2 방법론

5.5.1.2.1 산정방법

농경지토양 부문의 N₂O 직접배출은 2006 IPCC GL Tier 2 방법론에 따라 농경지에 투입된 질소량에 배출계수와 N₂O-N의 N₂O 변환계수인 44/28을 곱하여 산정한다. 농경지토양의 질소 투입량은 2006 IPCC GL에 따라 무기질 비료, 유기질 비료와 작물잔사환원으로 구분하여 산정한다.

농경지토양 부문 N₂O 직접배출량 산정식

$$N_2O_{Direct} - N = \sum_i (F_{SN} + F_{ON})_i \times EF_{1i} + (F_{CR} + F_{SOM}) \times EF_1 + N_2O - N_{OS} + N_2O - N_{PRP}$$

N ₂ O _{Direct} -N	: 농경지토양 N ₂ O-N 직접배출량[kg N ₂ O-N/yr]
N ₂ O-N _{OS}	: 연간 관리되는 유기토양의 N ₂ O-N 직접배출량[kg N ₂ O-N/yr] ³⁶⁾
N ₂ O-N _{PRP}	: 연간 방목지에 가축분뇨로 투입되는 N ₂ O-N 직접배출량[kg N ₂ O-N/yr] ³⁷⁾
F _{SN}	: 연간 화학비료로 투입되는 질소량[kg N/yr]
F _{ON}	: 연간 유기질 비료로 투입되는 질소량[kg N/yr]
F _{CR}	: 연간 작물 잔사로서 농경지에 재투입되는 질소량[kg N/yr]
F _{SOM}	: 연간 농경지토양 토지이용 및 관리 변화에 따른 토양탄소 손실로 인해 무기화된 질소량[kg N/yr] ³⁸⁾
EF _{1i}	: 유기질 비료 및 무기질 비료 N ₂ O 직접 배출계수[kg N ₂ O-N/kg N 투입량]

34) 가축분뇨에 의한 유기질 비료만을 의미하며, 기타 유기질 비료는 통계자료 미비로 미산정

35) 토양 유기물의 손실·증가와 관련된 무기화 및 고정화(3.D.1.e.)는 국내에 활용가능한 활동자료가 부재하고, 유기토양 경적(3.D.1.f.)은 국내 유기토양 환경이 거의 없어 미산정(NE)으로 보고함

36) 연간 관리되는 유기토양의 N₂O-N 직접배출량(N₂O-N_{OS})은 국내 유기토양 환경이 거의 없어 산정하지 않음(NE)

EF_1 : 작물잔사환원 및 토양탄소 손실로 인해 무기화된 질소 N_2O 직접 배출계수
[kg N_2O-N/kg N 투입량]
자료: 2006 IPCC GL, Vol.4, Ch.11, Equation 11.2

5.5.1.2.2 배출계수

1) 무기질 비료(3.D.1.a.)

무기질 비료에 따른 N_2O 배출계수는 무기질소를 사용하는 작물별 배출 특성을 고려하여 세분화하고 있다. 논벼의 경우 2006 IPCC GL에서 제시한 기본 배출계수를 적용하였으며, 밭작물종별로는 국가 고유 배출계수를 적용하였다.

표 5-42 | 농경지토양 부문 작물종별 N_2O 배출계수(EF_{1i})

(단위: kg N_2O-N/kg N)

작물 종류(i)		N_2O 배출계수	출처
논벼(EF_{1FR})		0.0030	2006 IPCC GL
밭작물	고추	0.0086	국가 고유 배출계수 (2014년 승인)
	콩	0.0119	
	감자	0.0049	
	봄배추	0.0056	
	가을배추	0.0058	
	그 외의 밭작물(통합계수)	0.00596	

2) 유기질 비료(3.D.1.b.)

유기질 비료와 토양탄소 손실로 인해 무기화된 질소에 따른 N_2O 배출계수는 2006 IPCC GL에서 제시한 기본 배출계수를 적용하였다.

표 5-43 | 농경지토양 부문 질소 투입원별 N_2O 직접배출계수

(단위: kg N_2O-N/kg N)

질소 투입원 종류	N_2O 직접배출계수	출처
유기물 사용에 따른 질소(EF_{1i})	0.01	2006 IPCC GL
토양탄소 손실로 인해 무기화된 질소(EF_1)		

3) 작물잔사환원(3.D.1.d.)

작물별 작물잔사환원에 의한 N_2O 배출계수는 무기질 비료(3.D.1.a.)와 동일하다.

37) 연간 방목지에 가축분뇨로 투입되는 N_2O-N 직접배출량(N_2O-N_{PRP})은 3.D.1.b.i에 포함되어 계산(IE)

38) 연간 농경지토양 토지이용 및 관리 변화에 따른 토양탄소 손실로 인해 무기화된 질소량(F_{SOM})은 자료부재로 산정하지 않음(NE)

5.5.1.2.3 활동자료

1) 무기질 비료(3.D.1.a.)

무기질 비료(3.D.1.a.) 부문의 활동자료는 작물별 무기질 비료 사용량이 필요하다. 국내 통계는 농경지 전체에 사용되는 비료(질소질비료) 총량, 비료(질소질 비료와 복합비료)의 질소함유율 자료, 작물별 단위면적 당 비료 투입량 자료가 발표되고 있어, 작물별 무기질 비료 사용량을 산정할 수 있다.

다만, 일부 작물 재배 비중이 낮은 기타 작물³⁹⁾은 작물별 단위면적 당 비료 투입량자료 부재로 작물별 재배면적을 기준으로 추정하고 있다. 일부 밭작물은 재배면적과 「작물별 비료사용 처방 기준(농촌진흥청)」에서 제시하는 단위면적당 표준 시비량을 곱하여 밭작물별 무기질 비료 사용량을 산정하고, 그 외 밭작물의 비료 사용량을 산정하였다. 각 작물별 무기질 비료(3.D.1.a.) 질소량을 산정하는 방법과 산정결과는 아래 표와 같다.

표 5-44 | 무기질 비료로 투입되는 작물별 연간 질소 투입량 산정방법(2023)

구분		단위	논	밭					그 외 ¹⁾
				고추	콩	감자	봄배추	가을배추	
재배면적(A)		천 ha	707.9	30.9	77.5	20.3	10.0	13.2	-
질소질비료	단위면적당 질소질비료 투입량(B)	kg/ha	29.8	190	31	137	320	320	
	질소질비료의 질소함유율(C)	-	0.47	-					
복합비료	단위면적당 복합비료 투입량(D)	kg/ha	473.2	-					
	복합비료의 질소함유율(E)	-	0.20	-					
연간 무기질 비료로 투입되는 질소 투입량 ²⁾ 논 : (A×B×C)+(A×D×E) 밭 : (A×B) 그 외 : (총합-논-밭 5종)		천 t N	76.8	5.9	2.4	2.8	3.2	4.2	124.8 ¹⁾
총합		천 t N	220.1						

주: 1) 작물종별 N₂O 배출계수를 적용하는 작물 이외의 밭작물은 '그 외'로 구분하고, 총합 질소 투입량에서 논과 일부 밭작물의 질소 투입량을 제외한 양으로 추정함

2) 해당연도 및 직전 2개년 자료(T, T-1, T-2년)를 3년 평균하여 활동자료로 사용

39) 밭작물종별 무기질 비료 사용량 구분은 「제5차 작물별 비료사용 처방 기준 (농촌진흥청, 2022)」에서 고추, 콩, 감자, 봄배추, 가을배추의 단위면적당 화학비료 표준 시비량(고추 : 190 kg/ha, 콩 : 31, 감자 : 137, 봄배추 : 320, 가을배추 : 320)을 적용하여 세분화하였고, 그 외 작물종의 무기질 비료 투입량은 나머지 사용량으로 산정

| 표 5-45 | 무기질 비료로 투입되는 작물별 질소 투입량(1990-2023)

(단위: 천톤 N)

구분		1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023
논	벼	200.3	176.4	116.7	93.4	86.9	85.8	82.9
	고추	15.1	14.6	9.8	6.5	6.9	6.8	6.5
밭	콩	6.1	3.5	2.6	1.9	2.1	2.1	2.3
	감자	3.2	3.5	2.8	2.8	3.0	2.7	2.7
	봄배추	6.4	8.7	5.1	3.4	3.3	3.3	3.2
	가을배추	6.4	4.7	4.6	4.1	4.1	4.4	4.3
	그 외	267.3	226.7	124.7	133.5	144.9	138.5	134.0
	소계	304.5	261.7	149.6	152.2	164.4	157.9	152.9
	합계	504.8	438.1	264.4	245.6	251.2	243.6	235.9

주: 해당연도 및 직전 2개년 자료(T, T-1, T-2년)를 3년 평균하여 활동자료로 사용

| 표 5-46 | 농경지토양 N₂O 직접배출 무기질 부문 활동자료 수집방법(1990-2023)

기간	활동자료	통계명	관리기관
1988-2023	작물종별 재배면적	농업면적조사	국가데이터처
1988-2023	단위면적당 비료 ¹⁾ 투입량	농축산물생산비조사	국가데이터처
	질소질비료 소비량	농림축산식품통계연보	농림축산식품부
	비료 ¹⁾ 질소함유율	비료연감	한국비료협회

주: 1) 질소질 및 복합비료

2) 유기질 비료(3.D.1.b.)

유기질 비료에 의한 질소 투입량(F_{ON})은 가축분뇨로 공급되는 질소 투입량(F_{AM})을 산정한다⁴⁰⁾. 가축분뇨로 농경지에 투입되는 질소량은 연간 사육되는 가축의 분뇨에 포함된 질소량(축종별 사육 두수×축종별 분뇨 질소 배출량)에서 가축분뇨처리시설에 의한 질소 손실 비율($Frac_{LossMS}$)을 제외하고 남은 가축분뇨는 전량이 농경지에 투입되는 것으로 계산하였다.

농경지토양 부문 유기질 비료 질소 투입량(F_{ON}) 산정식

$$F_{ON} = F_{AM} + F_{SEW} + F_{COMP} + F_{OOA}$$

$$F_{AM} = N_{MMS\_Avb} \times [1 - (Frac_{FEED} + Frac_{FUEL} + Frac_{CNST})]$$

$$N_{MMS\_Avb} = \sum_s \left\{ \sum_{(T)} \left[(N_{(T)} \times Nex_{(T)} \times MS_{(T,S)}) \times \left(1 - \frac{Frac_{LossMS}}{100} \right) \right] + \left[N_{(T)} \times MS_{(T,S)} \times N_{beddingMS} \right] \right\}$$

- F_{ON} : 연간 방목 가축에 의해 투입되는 질소를 제외한, 농경지토양에 투입되는 유기질 비료량[kg N/yr]
 F_{AM} : 연간 가축분뇨 질소의 농경지 투입량[kg N/yr]
 F_{SEW} : 연간 하수 질소의 농경지 투입량[kg N/yr]
 (폐기물 부문의 하수 질소량과 중복 산정되지 않도록 주의)

40) 배출량을 산정하고 있는 가축분뇨 외, 하수(3.D.1.b.ii.), 기타 유기질 비료(3.D.1.b.iii.) 등에 의한 배출량은 국내에 활용가능한 활동자료가 부재하여 미산정(NE)으로 보고함

- F_{COMP} : 연간 녹비 질소의 농경지 투입량[kg N/yr]
 (퇴비화한 분뇨의 질소량과 중복 산정되지 않도록 주의)
 F_{OOA} : 연간 기타 유기질 비료(축산처리 폐기물, 해조분, 양조장 폐기물 등)의 농경지 투입량[kg N/yr]
 N_{MMS_Avb} : 연간 토양에 사용, 사료, 연료 또는 건축에 사용되는 가축 분뇨 유래 N 총량[kg N/yr]
 $Frac_{FEED}$: 가축분뇨 중 사료로 사용되는 비율
 $Frac_{FUEL}$: 가축분뇨 중 연료로 소각되는 비율
 $Frac_{CNST}$: 가축분뇨 중 건축에 사용되는 비율
 $N_{(T)}$: 국내 가축종의 수[head]
 $N_{ex(T)}$: 국내 가축종의 연간 N 배출량[kg N/animal/yr]
 $MS_{(T,S)}$: 국내 분뇨처리 체계에서 관리되는 가축종의 연간 질소 총배출량의 비율[%]
 $Frac_{LossMS}$: 가축분뇨처리시설에서 손실되는 가축종의 분뇨 질소 비율[%]
 $N_{beddingMS}$: 깔짚으로부터의 질소량[kg N/animal/yr]
 S : 가축분뇨처리시설
 T : 가축종

자료: 2006 IPCC GL, Vol.4, Ch.11, Equation 11.3, Equation 11.4

* N_{MMS_Avb} : 2006 IPCC GL, Vol.4, Ch.10, Equation 10.34 참고

| 표 5-47 | 가축분뇨로 투입되는 질소 투입량(1990-2023)

(단위: 천톤)

구분	1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023
소 소계	82.7	90.2	109.1	112.1	123.0	126.0	125.4
젖소	42.7	46.2	37.2	34.7	34.3	33.4	32.9
한·육우 합계	40.0	44.0	72.0	77.4	88.7	92.6	92.5
한우	35.0	38.0	67.3	73.0	83.6	87.5	88.0
육우	5.0	5.9	4.7	4.4	5.1	5.0	4.6
돼지 소계	30.1	53.8	63.6	73.3	72.3	71.7	71.6
돼지(비육)	21.2	40.6	49.7	58.3	57.8	57.4	57.5
돼지(번식)	8.9	13.3	13.9	15.0	14.6	14.3	14.2
가금류 소계	15.2	21.8	30.7	35.4	47.7	49.0	36.7
닭(산란계)	10.5	13.2	16.6	19.0	18.1	19.2	19.8
닭(육계)	4.7	8.6	14.1	16.4	16.7	16.6	16.9
오리	0.2	1.8	5.0	3.6	2.6	3.1	3.0
양	0.010	0.003	0.013	0.007	0.007	0.007	0.006
염소	0.4	1.3	0.6	1.1	1.3	1.2	1.1
말	0.1	0.3	1.0	0.9	0.9	0.9	0.9
노새 및 당나귀	0.0005	0.0014	0.0064	0.0109	0.0108	0.0109	0.0109
사슴	1.1	3.6	1.8	0.7	0.6	0.6	0.5
합계	130.1	172.8	211.9	227.2	235.6	239.3	239.3

주: 해당연도 및 직전 2개년 자료(T, T-1, T-2년)를 3년 평균하여 활동자료로 사용

| 표 5-48 | 축종별 가축분뇨처리시설별 처리 시 질소 손실률(Frac_{LossMS})

(단위 : %)

축종		질소 손실률(Frac _{LossMS}) ¹⁾					
		퇴비화	액비화	퇴·액비화	정화	기타	위탁
소	젖소	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0
	한우	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0
	육우	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0
돼지	돼지(비육)	50.0	48.0	48.0	48.0	48.0	48.0
	돼지(번식)	50.0	48.0	48.0	48.0	48.0	48.0
가금류	닭(산란계)	55.0	55.0	55.0	55.0	55.0	55.0
	닭(육계)	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0
	오리	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0
양, 염소, 말, 사슴, 노새 및 당나귀		15.0	-2)				

주: 1) CRT 기준 가축분뇨처리시설(AWMS, Animal Waste Management System) :

: Solid storage,
 : Composting-in-vessel,
 : Poultry manure with/without litter,
 : Aerobic treatment_forced aeration system

2) 염소, 양, 말, 사슴, 노새 및 당나귀의 분뇨는 수거 및 처리하는 시설이 없어 전량퇴비(퇴비화)로 간주

3) 작물잔사환원(3.D.1.d.)

작물잔사가 농경지로 환원되어 투입되는 질소량(F_{CR})은 작물잔사가 소각되는 면적을 제외한 작물 재배면적을 기준으로, 작물종별 지상부·지하부 잔사로 인한 질소(N)량을 구분하여 산정한다. 작물잔사가 농경지로 환원되어 투입되는 질소량(F_{CR})의 산정방법은 2006 IPCC GL을 적용하였으며, 산정결과는 아래 표와 같다.

농경지토양 부문 작물잔사환원 질소 투입량(F_{CR}) 산정식

$$F_{CR} = \sum_T \left\{ AG_{DM(T)} \times (Area_{(T)} - Area_{burnt(T)} \times CF) \times Frac_{Renew(T)} \times \left[N_{AG(T)} \times (1 - Frac_{Remove(T)}) + R_{BG-BIO(T)} \times N_{BG(T)} \right] \right\}$$

F_{CR}	:	토양에 환원되는 작물 잔사 유래 N 총량[kg N/yr]
$AG_{DM(T)}$	:	작물별 지상 잔여물의 건조중량[Mg/ha]
$Area_{(T)}$	:	연간 작물별 재배 면적[ha]
$Area_{burnt(T)}$	:	연간 작물별 잔사 소각 면적[ha]
CF	:	연소계수
$Frac_{Renew(T)}$	:	작물별 연간 새롭게 재배되는 면적 비율 ⁴¹⁾
N_{AG}	:	작물별 지상부 잔사 N 함량[kg N/kg d.m.]
$Frac_{Remove}$	:	작물별 사료, 깔개, 건설의 목적으로 제거되는 작물 지상부 잔사 비율 ⁴²⁾
R_{BG-BIO}	:	작물별 지상부 생체량에 대한 지하부 생체량 비율
$N_{BG(T)}$	:	작물별 지하부 잔사 N 함량[kg N/kg d.m.]
T	:	농작물 또는 목초의 유형

자료: 2006 IPCC GL, Vol.4, Ch.11, Equation 11.7A

41) 작물별 연간 새롭게 재배되는 면적 비율($Frac_{Renew(T)}$)에 대한 국내 활동자료 부재

42) 작물별 사료, 깔개, 건설의 목적으로 제거되는 작물 지상부 잔사 비율($Frac_{Remove}$)에 대한 국내 활동자료 부재

| 표 5-49 | 작물잔사환원에 따른 질소 투입량(1990-2023)

(단위: 천톤)

구분	1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023
논벼	47.1	42.1	38.4	33.2	28.1	26.6	26.3
보리	4.5	1.8	1.2	0.8	1.1	0.9	0.8
밀	0.0	0.0	0.2	0.2	0.1	0.2	0.3
감자	0.9	1.1	0.9	0.9	1.0	1.0	1.0
고구마	0.9	0.6	0.6	0.7	0.8	0.8	0.8
옥수수	1.0	0.7	0.7	0.7	0.8	0.8	0.8
고추	0.9	1.6	1.4	1.0	1.1	1.2	1.3
마늘	6.5	7.9	5.8	5.3	6.3	5.6	5.5
양파	8.8	15.9	22.5	23.6	28.0	25.2	25.4
참깨	0.3	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
콩	2.3	1.2	1.1	0.8	1.0	1.2	1.5
합계	73.3	73.1	73.0	67.4	68.5	63.4	63.7

주: 해당연도 및 직전 2개년 자료(T, T-1, T-2년)를 3년 평균하여 활동자료로 사용

작물잔사가 농경지로 환원되어 투입되는 질소량(F_{CR})의 산정에 적용한 배출계수는 아래와 같다.

- 농경지토양 부문 작물잔사환원 질소 투입량에 적용한 매개변수

작물잔사가 농경지로 환원되어 투입되는 질소량(F_{CR})의 산정에 적용된 작물별 건물 비율과 질소 함유율은 2006 IPCC GL의 기본계수를 적용하였다. 또한, 농경지 중 토양에 환원된 비율은 「농림 어업조사(국가데이터처)」 마이크로데이터를 이용하여 산출하였다. 다만, 해당 자료가 2017년부터 수집된 바, 1990년부터 2016년까지는 가장 근접한 연도(2017년)의 값을 적용하였다.

| 표 5-50 | 잔사건물 중 토양환원을 및 소각률

(단위: %)

구분	작물종	1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023
잔사건물 중 소각률	논벼	0.03	0.03	0.03	0.07	0.02	NO ¹⁾	NO
	보리	17.68	17.68	17.68	13.90	8.15	8.88	5.35
	밀 ²⁾	43.90	43.90	43.90	43.90	43.90	43.90	43.90
	감자	7.56	7.56	7.56	4.94	2.74	1.42	2.47
	고구마	8.45	8.45	8.45	4.70	4.07	5.80	2.70
	옥수수 ³⁾	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE
	고추	52.20	52.20	52.20	53.46	42.37	35.39	16.81
	마늘	14.96	14.96	14.96	15.25	16.00	10.17	5.86
	양파	9.99	9.99	9.99	10.90	7.39	5.36	2.24
	참깨	50.79	50.79	50.79	50.03	44.20	40.81	30.53
	두류(콩)	40.16	40.16	40.16	42.69	29.61	20.99	16.64

잔사건물 중 토양환원율	논벼	50.00	52.23	54.47	55.62	43.95	36.78	42.63
	보리	47.19	47.19	47.19	46.03	64.02	68.63	57.17
	밀 ²⁾	39.04	39.04	39.04	39.04	39.04	39.04	39.04
	감자	78.59	78.59	78.59	79.72	84.53	93.11	93.83
	고구마	68.94	68.94	68.94	87.12	90.14	89.98	80.22
	옥수수 ³⁾	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
	고추	41.09	41.09	41.09	40.09	52.86	60.03	78.42
	마늘	74.03	74.03	74.03	77.88	74.98	74.47	82.88
	양파	81.10	81.10	81.10	84.61	88.00	87.85	88.87
	참깨	40.61	40.61	40.61	45.04	51.81	55.09	63.67
	두류(콩)	49.38	49.38	49.38	49.67	64.00	72.69	76.13

주: 1) 2022-2033년 논벼 소각률은 0.01% 미만으로 소각 활동이 없는 것으로 간주(NO)

2) 밀은 농림어업조사 항목에 포함되지 않아 「2010년 농림어업총조사(국가데이터처)」의 소각률을 사용하고, 「2010년 농림어업총조사(국가데이터처)」의 밀짚 유기물 사용 환원 비율을 토양환원율로 사용

3) 옥수수는 작물 특성에 대한 전문가 판단에 따라 전량 농경지로 환원되고, 소각되는 잔사는 없는 것으로 적용

표 5-51 | 농경지토양 부문 작물잔사 유래 N 산정을 위한 매개변수

작물종	건물비율 (DRY)	지상 잔여물의 건조중량($AG_{DM(T)}$) 산정*을 위한 매개변수 * $AG_{DM(T)} = Crop(T)(\text{작물 생산량}) \times$ $Slope + intercept$		지상부 잔사 N 함량 비중 (N_{AG})	지상부/지하부 생체량 비율 (R_{BG-BIO})	지하부 잔사 N 함량 비중 (N_{BG})
		Slope	Intercept			
논벼	0.89	0.95	2.46	0.007	0.16	0.009
보리	0.89	0.98	0.59	0.007	0.22	0.014
밀	0.89	1.51	0.52	0.006	0.24	0.009
감자	0.22	0.1	1.06	0.019	0.2	0.014
고구마	0.22	0.1	1.06	0.019	0.2	0.014
옥수수	0.87	1.03	0.61	0.006	0.22	0.007
고추 ¹⁾	0.87	1.03	0.61	0.006	0.22	0.007
마늘	0.94	1.07	1.54	0.016	0.2	0.014
참깨	0.9	0.36	0.68	0.010	0.19	0.01
양파	0.94	1.07	1.54	0.016	0.2	0.014
콩	0.91	1.13	0.85	0.008	0.19	0.008

주: 1) 고추의 경우 2006 IPCC GL에서 제시하는 기본계수가 없어 전문가 판단에 근거하여 옥수수(Maize) 값 준용

자료: 2006 IPCC GL, Vol.4, Ch.11, Table 11.2

5.5.1.3 시계열 일관성

1990년부터 일관된 방법론과 배출계수를 사용하여 시계열 일관성을 유지하였다. 배출량 산정에 적용되는 작물종별 재배면적 및 작물종별 생산량, 가축사육두수는 국가데이터처의 조사 자료를 활용하였으며, 가축분뇨처리시설 이용비율, 잔사건물 중 토양환원율 및 소각률은 「농림어업조사(국가데이터처)」의 마이크로데이터를 활용하였다.

5.5.1.4 QA/QC

QA/QC는 제1장 서론 1.5절 내용과 동일하다.

5.5.1.5 재계산

유기질 비료에 의한 배출량 산정 시, 말과 노새 및 당나귀의 사육두수가 재계산되어 연간 가축 분뇨로 투입되는 질소 투입량 및 배출량을 전(全) 시계열에 대해 재계산하였다.

유기질 비료에 의한 배출량 산정 시, 닭(육계)의 연평균 질소량이 2024년에 승인된 계수로 변경되어 연간 가축분뇨로 투입되는 질소 투입량 및 배출량을 전(全) 시계열에 대해 재계산하였다.

5.5.2 간접배출(3.D.2.)

5.5.2.1 배출원 개요

	산정온실가스	방법론	배출계수	활동자료
2023년 기준	N ₂ O	Tier 1, Tier 2	CS, D	질소 투입량 (무기질 비료, 유기질 비료, 작물잔사환원)

농경지토양에서의 N₂O 간접배출은 2006 IPCC GL에 따라 대기침적(atmospheric deposition)에 의한 배출(3.D.2.a.), 수계유출(leaching and run-off)에 의한 배출(3.D.2.b.)로 구분하여 산정한다. 대기침적에 의한 배출은 농경지토양에 유입된 질소가 NH₃나 NO_x의 형태로 대기 중으로 휘산되어 다른 곳으로 이동·침적되는 것을 말하며 수계유출에 의한 배출은 농경지로 투입된 질소가 수계로 유출되어 다른 곳으로 이동·배출되는 것을 말한다.

간접배출의 2023년 배출량은 1,206 천톤 CO₂-eq으로 1990년 대비 20.2% 감소했다. 세부 부문별로 살펴보면 2023년 수계유출이 909 천톤 CO₂-eq, 대기침적이 298 천톤 CO₂-eq 배출되어 각각 75.3%, 24.7%의 비중을 보였다.

| 표 5-52 | 농경지토양 부문 N₂O 간접배출 부문 온실가스 배출량(1990-2023)

(단위: 천톤 CO₂-eq)

구분	1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023
대기침적	319	326	287	291	301	301	298
수계유출	1,194	1,154	930	911	937	921	909
합계	1,513	1,480	1,217	1,202	1,237	1,222	1,206

5.5.2.2 방법론

5.5.2.2.1 산정방법

1) 대기침적(3.D.2.a.)

대기침적에 따른 간접배출량은 2006 IPCC GL 방법론에 따라 농경지 무기·유기질 비료 투입량에 대기로 휘산되는 비율(무기질 비료는 $Frac_{GASF}$: 10%, 유기질 비료는 $Frac_{GASM}$: 20%)과 N_2O 배출 계수를 곱하여 산정하였다.

대기침적 N_2O 간접배출량 산정식

$$N_2O_{(ATD)} = [(F_{SN} \times Frac_{GASF}) + ((F_{ON} + F_{PRP}) \times Frac_{GASM})] \times EF_4 \times 44/28$$

$N_2O_{(ATD)}$: 대기침적에 의한 N_2O 발생량[kg N_2O /yr]

F_{SN} : 연간 화학비료 농경지 사용량[kg N/yr]

$Frac_{GASF}$: 화학비료 내의 질소 중 농경지 사용시 대기로 휘산되는 NH_3 , NO_x 비율
[kg N 휘산량/kg N 사용량]

F_{ON} : 연간 방목 가축에 의해 투입되는 질소를 제외한, 농경지토양에 투입되는 유기질 비료량[kg N/yr]

F_{PRP} : 연간 방목 가축의 분뇨로 목초지, 방목지, 들판에 투입되는 질소량[kg N/yr]⁴³⁾

$Frac_{GASM}$: 농경지토양에 투입되는 유기질 비료 질소량(F_{ON})과 방목 가축의 분뇨 질소량(F_{PRP}) 중 농경지 사용 시 대기로 휘산되는 NH_3 , NO_x 비율 [kg N 휘산량/(kg N 사용량 혹은 방치량)]

EF_4 : 토양 및 수계면에서 대기침적에 의한 N_2O 배출계수
[kg N- N_2O /(kg NH_3 -N + NO_x -N 휘산량)]

44/28 : N_2O 환산계수

자료: 2006 IPCC GL, Vol.4, Ch.11, Equation 11.9

2) 수계유출(3.D.2.b.)

수계유출에 의한 간접배출량은 2006 IPCC GL 방법론에 따라 무기질 및 유기질 비료와 작물잔사 환원의 질소 투입량 중 농경지토양에 투입된 질소가 수계로 유출되는 비율($Frac_{LEACH-(H)}$, 30%)과 N_2O 배출계수를 곱하여 산정하였다.

수계유출 N_2O 간접배출량 산정식

$$N_2O_{(L)} = [(F_{SN} + F_{ON} + F_{PRP} + F_{CR} + F_{SOM}) \times Frac_{LEACH-(H)}] \times EF_5 \times 44/28$$

$N_2O_{(L)}$: 수계유출에 의한 N_2O 발생량[kg N_2O /yr]

F_{SN} : 관개수 지하침투나 지표수 유출이 발생하는 지역의 연간 화학비료 농경지 사용량
[kg N/yr]

43) 연간 방목 가축의 분뇨로 목초지, 방목지, 들판에 투입되는 질소량(F_{PRP})은 농경지토양에 투입되는 유기질 비료량(F_{ON})에 포함하여 계산

F _{ON}	:	관개수 지하침투나 지표수 유출이 발생하는 지역의 농경지에 투입되는 관리되는 가축 퇴비, 하수 슬러지 및 기타 유기질 비료량[kg N/yr]
F _{PRP}	:	관개수 지하침투나 지표수 유출이 발생하는 지역의 연간 방목 가축의 분뇨로 투입되는 질소량 [kg N/yr] ⁴⁴⁾
F _{CR}	:	관개수 지하침투나 지표수 유출이 발생하는 지역의 연간 작물 잔사(지상부 및 지하부)로 농경지에 재투입되는 질소량[kg N/yr]
F _{SOM}	:	관개수 지하침투나 지표수 유출이 발생하는 지역의 연간 농경지토양 토지이용 및 관리변화에 따른 토양탄소 손실로 인해 무기화된 질소량[kg N/yr] ⁴⁵⁾
Frac _{LEACH-(H)}	:	관개수 지하침투나 지표수 유출이 발생하는 지역의 질소 투입 총량 중 수계로 유출되는 질소비율[kg N/kg N 투입량]
EF ₅	:	수계유출에 의한 N ₂ O 배출계수[kg N ₂ O-N/kg N 수계유출량]
44/28	:	N ₂ O 환산계수

자료: 2006 IPCC GL, Vol.4, Ch.11, Equation 11.10

5.5.2.2.2 배출계수

대기침적에 의한 N₂O 배출계수(EF₄)는 2006 IPCC GL에서 제시한 기본 배출계수 적용하였고, 수계 유출에 의한 N₂O 배출계수(EF₅)는 국가 고유 배출계수를 적용하였다. 매개변수(Frac_{GASF}, Frac_{GASM}, Frac_{LEACH-(H)})는 2006 IPCC GL에서 제시한 기본계수를 적용하였다.

표 5-53 | 농경지토양 부문 간접배출의 N₂O 배출계수

구분	배출계수	출처
대기침적(EF ₄)	0.010 kg N ₂ O-N/kg NH ₃ -N and NO _x -N ¹⁾	2006 IPCC GL
수계유출(EF ₅)	0.0135 kg N ₂ O-N/kg N ²⁾	국가 고유 배출계수(2015년 승인)

주: 1) 대기 중으로 휘산된 NH₃와 NO_x가 N₂O로 전환되는 비율
2) 수계로 유출된 NH₃나 NO_x가 N₂O로 전환되는 비율

표 5-54 | 농경지토양 부문 간접배출의 매개변수

구분	매개변수	출처
무기질 비료 사용(Frac _{GASF})	0.10 kg NH ₃ -N + NO _x -N/kg N	2006 IPCC GL
유기질 비료 사용(Frac _{GASM})	0.20 kg NH ₃ -N + NO _x -N/kg N	
지표나 지하수로 유출(Frac _{LEACH-(H)})	0.30 kg N/kg N	

5.5.2.2.3 활동자료

활동자료는 5.5.1.2.3절 직접배출(3.D.1.)과 동일하다.

44) 연간 방목 가축의 분뇨로 목초지, 방목지, 들판에 투입되는 질소량(F_{PRP})은 농경지토양에 투입되는 유기질 비료량(F_{ON})에 포함하여 계산
45) 연간 토지이용 및 관리변화에 따른 토양탄소 손실로 인해 무기화된 질소량 (F_{SOM})은 국내 활동자료 부재

5.5.2.3 시계열 일관성

시계열 일관성은 5.5.1.3절 직접배출(3.D.1.)과 동일하다.

5.5.2.4 QA/QC

QA/QC는 제1장 서론 1.5절 내용과 동일하다.

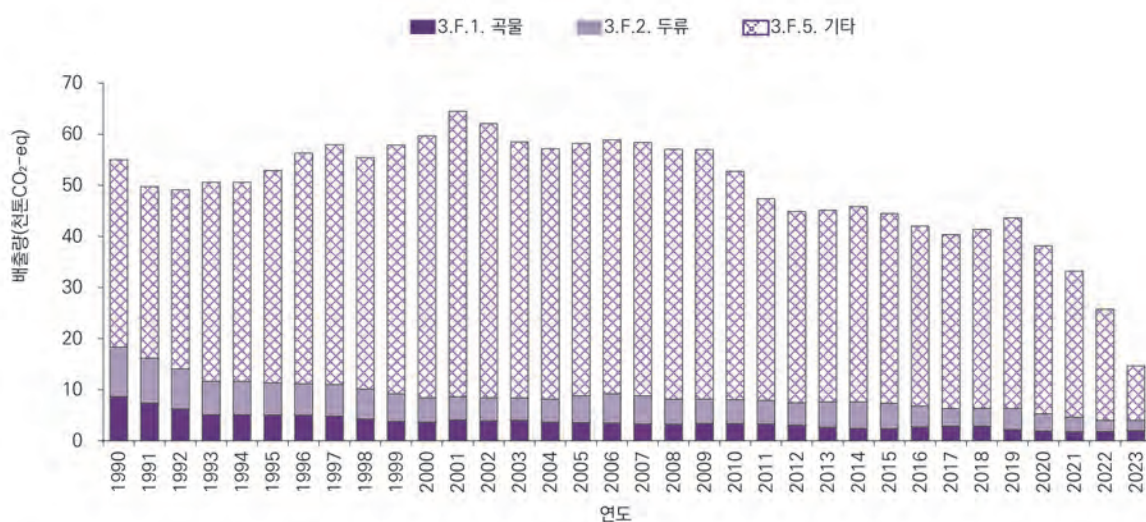
5.5.2.5 재계산

재계산은 5.5.1.5절 직접배출(3.D.1.)과 동일하다.

5.6 작물잔사소각(3.F.)

작물잔사소각 부문에서 배출되는 온실가스⁴⁶⁾는 CH₄와 N₂O이며, 우리나라에서 생산되는 주요 작물을 대상으로 잔사 소각 과정에서 발생하는 온실가스 배출량을 산정하였다. 세부 배출원으로는 곡류(밀, 보리, 논벼)(3.F.1.), 두류(3.F.2.), 기타(고추, 마늘, 참깨, 양파)(3.F.5.)⁴⁷⁾가 있다.

작물잔사소각 부문 2023년 배출량은 15 천톤 CO₂-eq으로, 곡물별로는 곡류에서 2.0 천톤 CO₂-eq, 두류 2 천톤 CO₂-eq, 기타 11 천톤 CO₂-eq을 배출하였으며, 각각 13.6%, 13.6%, 72.8% (고추 51.3%, 마늘 8.8%, 참깨 10.7%, 양파 2.1%)의 비중을 보였다.



| 그림 5-7 | 작물잔사소각 부문 온실가스 배출량(1990-2023)

| 표 5-55 | 작물잔사소각 부문 온실가스 배출량(1990-2023)

(단위: 천톤 CO₂-eq)

구분	1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023
곡류	9	4	3	3	2	2	2
두류	10	5	5	4	3	2	2
기타	37	51	45	35	29	22	11
합계	55	60	53	41	33	26	15

46) 작물잔사소각에 의해 주로 발생하는 온실가스인 CO₂는 다시 작물로 흡수되기 때문에 2006 IPCC GL에서는 이를 탄소중립(carbon neutral)으로 간주하여 온실가스 배출량으로 산정하지 않으므로 CH₄, N₂O 배출량만 보고함

47) 당근 등의 근채류(3.F.3.) 및 배추, 시금치, 상추, 양배추, 파 등의 엽채류와 감자, 고구마 등은 식물체의 지상부가 식용부위로 활용되어 소각할 잔사가 남지 않아 배출량이 없으며(NO). 사탕수수(3.F.4)는 국내 배출원이 없어 "NO"로 보고함

5.6.1 곡류(3.F.1.)

5.6.1.1 배출원 개요

2023년 기준	산정온실가스	방법론	배출계수	활동자료
	CH ₄ , N ₂ O	Tier 1	D	밀, 보리, 논벼 생산량

곡류(밀, 보리, 논벼) 부문 2023년 배출량은 2.0 천톤 CO₂-eq로 전년 대비 8.5% 증가하였으며, 작물잔사소각 배출량의 13.6%를 차지한다.

곡류별로는 2023년에 밀이 1.6 천톤 CO₂-eq로 81.0%, 보리가 0.4 천톤 CO₂-eq, 19.0%를 차지한다. 논벼의 경우, 2023년 활동자료가 매우 미미하여 미산정(NO)으로 보고하였다⁴⁸⁾.

| 표 5-56 | 작물잔사소각 부문 곡류 온실가스 배출량(1990-2023)

(단위: 천톤 CO₂-eq)

구분	1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023
밀	0.1	0.2	1.0	1.5	0.8	1.1	1.6
보리	8.4	3.3	2.3	1.1	0.8	0.7	0.4
논벼	0.2	0.2	0.1	0.3	0.1	NO	NO
합계	8.7	3.6	3.4	2.9	1.8	1.8	2.0

5.6.1.2 방법론

5.6.1.2.1 산정방법

작물잔사소각의 CH₄와 N₂O 배출량은 2006 IPCC GL의 산정식을 적용하며, 연간 작물생산량에 잔사/곡실 비율, 건물 비율 잔사건물 중 소각률, 산화율, CH₄와 N₂O의 배출계수를 곱하여 산정하였다. 연소된 면적×연소 가능한 연료의 질량(A×M_B)은 작물생산량×잔사/곡실 비율×건물비율×잔사건물 중 소각률로 산정한다.

작물잔사소각 부문 배출량 산정식

$$L_{fire} = A \times M_B \times CF \times G_{EF} \times 10^{-6}$$

L _{fire}	:	화재로 인한 온실가스 배출량[kt CH ₄ or kt N ₂ O]
A	:	연소된 면적[ha]
M _B	:	연소 가능한 연료의 질량[t/ha]
C _f	:	산화율
G _{ef}	:	CH ₄ , N ₂ O 배출계수[g/kg d.m. burnt]

자료: 2006 IPCC GL, Vol.4, Ch.2, Equation 2.27

48) 2022-2023년 논벼 활동자료는 5.6.1.2.3절에 따라 산정하며, 2022-2023년 잔사건물 중 소각률이 0.01% 미만으로 소각 활동이 없는 것으로 간주하여 미산정(NO)으로 보고함

5.6.1.2.2 배출계수

CH₄와 N₂O 배출계수는 2006 IPCC GL에서 제공하는 기본 배출계수를 적용하였다.

| 표 5-57 | 작물잔사소각 부문 CH₄, N₂O 배출계수

(단위: g/kg d.m. burnt)

구분	계수	출처
CH ₄ 배출계수	2.7	2006 IPCC GL
N ₂ O 배출계수	0.07	

5.6.1.2.3 활동자료

활동자료는 작물의 연소된 면적과 연소 가능한 연료(잔사)의 양이 필요하다. 국내에는 연소된 면적과 연소 가능한 연료에 대한 통계가 없어 작물생산량, 잔사/곡실 비율, 건물비율과 잔사건물 중 소각률을 활용하여 계산한다.

작물잔사소각 부문 활동자료 산정식

$$A \times M_B = \text{작물 생산량} \times \text{잔사/곡실 비율} \times \text{건물비율} \times \text{잔사건물 중 소각률}$$

A : 연소된 면적[ha]
M_B : 연소 가능한 연료의 질량[t/ha]

활동자료 산정에 사용된 자료는 「농작물생산조사(국가데이터처)」의 논벼, 밀, 보리 생산량과 작물별 잔사/곡실 비율은 국내 연구결과⁴⁹⁾를 적용하였으며, 작물별 건물비율과 논벼와 밀의 산화율은 2006 IPCC GL, 보리의 산화율은 1996 IPCC GL 기본계수를 적용하였다.

| 표 5-58 | 곡류 부문 활동자료(1990-2023)

(단위: 천톤)

구분	1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023
논벼	5,846.8	5,188.6	4,668.5	4,011.2	3,710.1	3,716	3,782
보리	497.8	193.4	133.3	83.8	107.9	85.0	74.2
밀	1.5	4.2	22.8	34.0	19.4	26.0	37.6

주: 「농작물생산조사(국가데이터처)」에서 공표하는 연간 작물생산량의 3년간(T, T-1, T-2년) 평균값을 적용함

49) 「기후변화협약 관련 농업부문 탄소 흡수원에 관한 연구(국립농업과학원, 2008)」

| 표 5-59 | 곡류 부문 매개변수

작물종	잔사/곡실 비율 ¹⁾	건물 비율 ²⁾	잔사건물 중 소각률(%) ^{3),4)}						산화율 ^{5), 6)}
			1990-2017	2018	2020	2021	2022	2023	
논벼	1.56	0.89	0.03	0.07	0.02	0.02	NO ⁷⁾	NO	0.8
보리	1.27	0.89	17.68	13.90	8.98	8.15	8.88	5.35	0.9
밀	1.30	0.89	43.90						0.9

주: 1) (잔사/곡실 비율) 기후변화협약 관련 농업부문 탄소 흡수원에 관한 연구(국립농업과학원, 2008)
 2) (건물 비율) 2006 IPCC GL, Vol.4, Ch.11, Table 11.2,
 3) (잔사건물 중 소각률 - 밀) 2010년 농림어업총조사(국가데이터처)
 4) (잔사건물 중 소각률 - 보리) 2017-2023년 농림어업조사(국가데이터처)
 5) (산화율 - 논벼·밀) 2006 IPCC GL, Vol.4, Ch.2, Table 2.6
 6) (산화율 - 보리) 1996 IPCC GL, Vol 4, Step 1, 4.83
 7) 2022-2023년 논벼 소각률은 0.01% 미만으로 소각활동이 없는 것으로 간주하여 NO로 보고함

5.6.1.3 시계열 일관성

1990년부터 동일한 방법론과 배출계수, 활동자료를 사용하여 시계열 일관성을 유지하였다.

5.6.1.4 QA/QC

QA/QC는 제1장 서론 1.5절 내용과 동일하다.

5.6.1.5 재계산

재계산은 수행하지 않았다.

5.6.2 두류(3.F.2.)

5.6.2.1 배출원 개요

2023년 기준	산정온실가스	방법론	배출계수	활동자료
	CH ₄ , N ₂ O	Tier 1	D	두류 생산량

두류 부문 2023년 배출량은 2.0 천톤 CO₂-eq로 전년 대비 8.3% 감소하였으며, 작물잔사소각 배출량의 13.6%를 차지한다.

| 표 5-60 | 작물잔사소각 부문 두류 온실가스 배출량(1990-2023)

(단위: 천톤 CO₂-eq)

구분	1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023
두류	9.7	4.8	4.7	3.5	2.9	2.2	2.0

5.6.2.2 방법론

5.6.2.2.1 산정방법

산정식은 5.6.1.2.1절 곡류(3.F.1.)와 동일하다.

5.6.2.2.2 배출계수

배출계수는 5.6.1.2.2절과 곡류(3.F.1.)와 동일하다.

5.6.2.2.3 활동자료

활동자료 산정에 사용된 자료는 「농작물생산조사(국가데이터처)」의 두류 생산량과 작물별 잔사/곡실 비율은 국내 연구결과⁵⁰⁾를 적용하였으며, 작물별 건물비율은 2006 IPCC GL, 산화율은 1996 IPCC GL 기본계수를 적용하였다.

| 표 5-61 | 두류 생산량(1990-2023)

(단위: 천톤)

구분	1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023
두류	292.1	145.9	140.4	99.3	117.3	125.5	145.1

주: 「농작물생산조사(국가데이터처)」에서 공표하는 연간 작물생산량의 3년간(T, T-1, T-2년) 평균값을 적용함

| 표 5-62 | 두류 부문 매개변수

작물종	잔사/곡실 비율 ¹⁾	건물 비율 ²⁾	잔사건물 중 소각률(% ³⁾						산화율 ⁴⁾
			1990-2017	2018	2020	2021	2022	2023	
두류	1.07	0.91	40.16	42.69	37.23	29.61	20.99	16.64	0.9

주: 1) (잔사/곡실 비율) 기후변화협약 관련 농업부문 탄소 흡수원에 관한 연구(국립농업과학원, 2008)

2) (건물 비율) 2006 IPCC GL, Vol.4, Ch.11, Table 11.2,

3) (잔사건물 중 소각률) 2017-2023년 농림어업조사(국가데이터처)

4) (산화율) 1996 IPCC GL, Vol 4, Step 1, 4.83

5.6.2.3 시계열 일관성

1990년부터 동일한 방법론과 배출계수, 활동자료를 사용하여 시계열 일관성을 유지하였다.

5.6.2.4 QA/QC

QA/QC는 제1장 서론 1.5절 내용과 동일하다.

5.6.2.5 재계산

재계산은 수행하지 않았다.

50) 「기후변화협약 관련 농업부문 탄소 흡수원에 관한 연구(국립농업과학원, 2008)」

5.6.3 기타(3.F.5.)

5.6.3.1 배출원 개요

2023년 기준	산정온실가스	방법론	배출계수	활동자료
	CH ₄ , N ₂ O	Tier 1	D	고추, 마늘, 참깨, 양파 생산량

기타(고추, 마늘, 참깨, 양파) 부문 2023년 배출량은 10.7 천톤 CO₂-eq로 전년 대비 50.8% 감소하였으며, 작물잔사소각 배출량의 72.8%를 차지한다.

작물별로는 2023년에 고추는 7.5 천톤 CO₂-eq으로 70.4%를 차지하고, 참깨, 마늘, 양파 순으로 1.6 천톤, 1.3 천톤, 0.3 천톤 CO₂-eq로 각각 14.7%, 12.0%, 2.9%를 차지하였다.

| 표 5-63 | 작물잔사소각 부문 기타 온실가스 배출량(1990-2023)

(단위: 천톤 CO₂-eq)

구분	1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023
고추	21.1	38.2	35.8	26.7	21.1	16.7	7.5
마늘	3.9	4.9	3.7	3.4	4.1	2.3	1.3
참깨	11.1	7.1	3.8	3.4	2.2	2.0	1.6
양파	0.5	0.9	1.3	1.5	1.1	0.7	0.3
합계	36.7	51.2	44.7	35.0	28.6	21.7	10.7

5.6.3.2 방법론

5.6.3.2.1 산정방법

산정식은 5.6.1.2.1절 곡류(3.F.1.)와 동일하다.

5.6.3.2.2 배출계수

배출계수는 5.6.1.2.2절 곡류(3.F.1.)와 동일하다.

5.6.3.2.3 활동자료

활동자료 산정에 사용된 자료는 「농작물생산조사(국가데이터처)」의 고추, 마늘, 참깨, 양파 생산량과 작물별 잔사/곡실 비율은 국내 연구결과⁵¹⁾를 적용하였으며, 작물별 건물비율은 2006 IPCC GL, 산화율은 1996 IPCC GL 기본계수를 적용하였다.

51) 「기후변화협약 관련 농업부문 탄소 흡수원에 관한 연구(국립농업과학원, 2008)」

| 표 5-64 | 기타 부문 작물별 생산량 활동자료(1990-2023)

(단위: 천톤)

구분	1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023
고추	205.6	372.0	348.9	254.0	252.9	239.9	227.5
마늘	359.0	450.7	334.8	303.6	353.2	314.9	229.8
참깨	43.4	27.8	15.0	13.5	10.0	9.5	10.2
양파	497.3	895.2	1,273.0	1,321.4	1,446.5	1,313.5	1,315.1

주: 「농작물생산조사(국가데이터처)」에서 공표하는 연간 작물생산량의 3년간(T, T-1, T-2년) 평균값을 적용함

| 표 5-65 | 기타 부문 매개변수

작물종	잔사/곡실 비율 ¹⁾	건물 비율 ²⁾	잔사건물 중 소각률(% ³⁾						산화율 ⁴⁾
			1990-2017	2018	2020	2021	2022	2023	
고추	2.67	0.87	52.20	53.46	49.99	42.37	35.39	16.81	0.9
마늘	0.92	0.94	14.96	15.25	15.20	16.00	10.17	5.86	0.9
참깨	6.60	0.9	50.79	50.03	52.08	44.20	40.81	30.53	0.9
양파	0.13	0.94	9.99	10.90	6.76	7.39	5.36	2.24	0.9

주: 1) (잔사/곡실 비율) 기후변화협약 관련 농업부문 탄소 흡수원에 관한 연구(국립농업과학원, 2008)

2) (건물 비율) 2006 IPCC GL, Vol.4, Ch.11, Table 11.2,

3) (잔사건물 중 소각률) 2017-2023년 농림어업조사(국가데이터처)

4) (산화율) 1996 IPCC GL, Vol 4, Step 1, 4.83

5.6.3.3 시계열 일관성

1990년부터 동일한 방법론과 배출계수, 활동자료를 사용하여 시계열 일관성을 유지하였다.

5.6.3.4 QA/QC

QA/QC는 제1장 서론 1.5절 내용과 동일하다.

5.6.3.5 재계산

재계산은 수행하지 않았다.

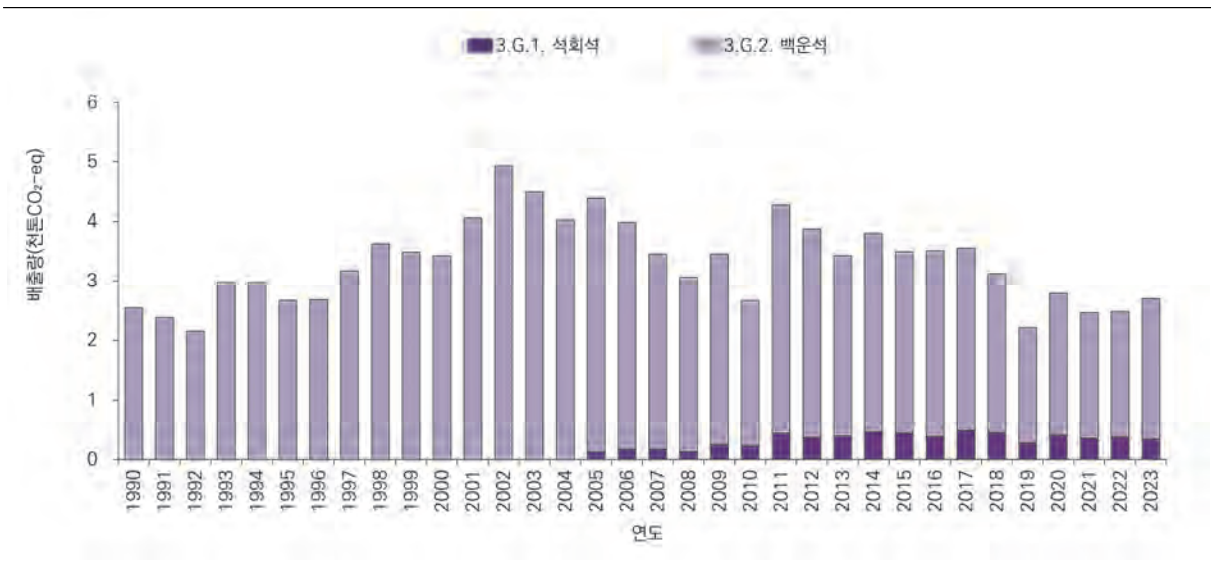
5.7 석회시용(3.G.)

5.7.1 배출원 개요

2023년 기준	산정온실가스	방법론	배출계수	활동자료
	CO ₂	Tier 2	CS	석회 공급량

석회시용(3.G.)은 탄산염(석회석·백운석)을 포함하고 있는 농업용 석회비료 시용에 따른 CO₂ 배출량을 보고한다. 석회비료는 농경지의 토양 비옥도를 높이기 위하여 사용하며, 세부 배출원은 석회비료의 원료인 석회석(3.G.1.), 백운석(3.G.2.)으로 구분된다.

석회시용 부문의 2023년 배출량은 2.7 천톤 CO₂-eq로 전년 대비 8.7% 증가하였으며, 농업 분야 배출량의 0.01%를 차지한다. 세부 배출원별로 보면 백운석이 2.4 천톤 CO₂-eq, 석회석이 0.3 천톤 CO₂-eq 배출하여 각각 87.2%, 12.8%의 비중을 보였다.



| 그림 5-8 | 석회시용 부문 온실가스 배출량(1990-2023)

| 표 5-66 | 석회시용 부문 온실가스 배출량(1990-2023)

(단위: 천톤 CO₂-eq)

구분	1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023
석회석	NE	NE	0.2	0.5	0.4	0.4	0.3
백운석	2.5	3.4	2.4	2.7	2.1	2.1	2.4
합계	2.5	3.4	2.7	3.1	2.5	2.5	2.7

5.7.2 방법론

5.7.2.1 산정방법

석회시용 부문의 온실가스 배출량은 2006 IPCC GL Tier 2 방법론에 따라 석회석과 백운석 시용량에 배출계수와 CO₂-C의 CO₂ 변환계수인 44/12를 곱하여 산정하였다.

농업용 석회시용으로 인한 CO₂ 배출량 산정식

$$E_{CO_2-C} = (M_{Limestone} \times EF_{Limestone}) + (M_{Dolomite} \times EF_{Dolomite})$$

E_{CO_2-C} : 연간 석회비료 시용에 따른 탄소 배출량[t C/yr]

M : 연간 석회질 석회석과 백운석 시용량[t/yr]

EF : 석회비료(석회석, 백운석) 배출계수[kg CO₂/kg 석회석, 백운석]

자료: 2006 IPCC GL, Vol.4, Ch.11, Equation 11.12

5.7.2.2 배출계수

석회석 및 백운석의 CO₂ 배출계수는 국가 고유 배출계수를 적용하였다.

| 표 5-67 | 석회시용 부문 CO₂ 배출계수

(단위: kg CO₂/kg 석회석, 백운석)

배출원	배출계수	배출계수 출처
석회석	0.0086	국가 고유 배출계수(2018년 승인) ¹⁾
백운석	0.0157	

주: 1) 3년 동안 고추밭과 표준 시비하에서 고추 재배기간 중 이산화탄소 배출량 변화를 측정 분석한 결과임(국립농업과학원, 2018)

5.7.2.3 활동자료

1990년부터 2023년까지 석회비료 생산을 위해 소비된 석회석과 백운석의 연간 공급량은 「비료 사업통계요람(농협경제지주)」 자료를 사용하였다. 석회비료 내 탄산염 물질(석회석·백운석) 공급량이 전량 토양에 공급된다고 가정하고, 석회석·백운석 공급량 전량을 활동자료로 사용하였다.⁵²⁾

| 표 5-68 | 석회시용 부문 석회 공급량(1990-2023)

(단위: 천톤)

구분	1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023
석회석 ¹⁾	NE	NE	27.0	53.0	42.0	44.1	40.1
백운석	162.0	218.0	155.0	170.0	134.0	134.0	150.0
합계	162.0	218.0	182.0	223.0	176.0	178.1	190.1

주: 1) 석회석 원료에 대한 통계는 2005년부터 구축되었음(2005년 이전에는 석회석을 원료하는 석회시용량은 미미하였음)

52) 「비료사업통계요람(농협경제지주)」에서는 석회석을 폐회석으로, 백운석은 석회고토로 구분하고 있음

5.7.3 시계열 일관성

1990년부터 동일한 방법론과 배출계수, 활동자료를 사용하여 시계열 일관성을 유지하였다.

5.7.4 QA/QC

QA/QC는 제1장 서론 1.5절 내용과 동일하다.

5.7.5 재계산

재계산은 수행하지 않았다.

5.8 요소시용(3.H.)

5.8.1 배출원 개요

2023년 기준	산정온실가스	방법론	배출계수	활동자료
	CO ₂	Tier 1	D	요소 공급량

요소⁵³⁾는 농경지에 투입되어 요소 분해효소에 의해서 암모늄 이온(NH₄⁺)과 중탄산염 및 수산기로 분해되는데, 이때 중탄산염과 용해된 수소이온의 화학적 반응에 의해 탄산이 만들어지고, 생성된 탄산은 토양수에 용해되어 CO₂로 전환되어 대기 중으로 방출된다.

요소시용(3.H.) 부문 2023년 배출량은 92 천톤 CO₂-eq로 전년 대비 0.5% 증가하였으며, 1990년 대비 78.7% 감소하였으며, 농업 분야 배출량의 0.4%를 차지한다.



| 그림 5-9 | 요소시용 부문 온실가스 배출량(1990-2023)

| 표 5-69 | 요소시용 부문 온실가스 배출량(1990-2023)

(단위: 천톤 CO₂-eq)

구분	1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023
요소시용	432	285	122	117	110	92	92

53) 농업에 사용되는 질소질비료 유형 중 하나로, NH₃와 CO₂가 고압에서 합성되어 생성됨

5.8.2 방법론

5.8.2.1 산정방법

요소비료 사용으로 인한 온실가스 배출량은 2006 IPCC GL의 Tier 1 방법에 따라 요소 공급량에 배출계수와 CO₂-C의 CO₂ 변환계수인 44/12를 곱하여 산정하였다.

요소사용으로 인한 CO₂ 배출량 산정식

$$E_{CO_2-C} = M \times EF$$

E_{CO_2-C} : 연간 요소비료 사용에 따른 탄소 배출량[t C/yr]

M : 연간 요소비료 사용량[t/yr]

EF : 요소비료 배출계수[t C/ton of Urea]

자료: 2006 IPCC GL, Vol.4, Ch.11, Equation 11.13

5.8.2.2 배출계수

요소의 CO₂ 배출계수는 2006 IPCC GL에서 제시한 기본 배출계수를 적용하였다.

| 표 5-70 | 요소사용 부문 CO₂ 배출계수

(단위: t C/ton of Urea)

배출원	배출계수	배출계수 출처
요소	0.2	2006 IPCC GL

5.8.2.3 활동자료

요소 공급량 자료는 「비료사업통계요람(농협경제지주)」의 농경지와 초지 각각에 사용되는 연간 요소 공급량 자료(2021년-)를 사용하였다. 1990년부터 2020년까지는 「비료연감(한국비료협회)」 자료를 사용하였다.

| 표 5-71 | 요소사용 부문 요소 공급량(1990-2023)

(단위: 천톤)

구분	1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023
요소 공급량	589.8	388.4	165.8	159.6	150.4	125.2	125.9

5.8.3 시계열 일관성

1990년부터 동일한 방법론과 배출계수를 사용하여 시계열 일관성을 유지하였다. 활동자료는 1990년부터 2020년까지 「비료연감(한국비료협회)」의 연간 요소 공급량 자료를 적용하였으나, 2021년부터 통계 발표를 중단하였다. 이에 2021년부터는 「비료사업통계요람(농협경제지주)」의 연간 요소 공급량 자료를 사용하였다.

5.8.4 QA/QC

QA/QC는 제1장 서론 1.5절 내용과 동일하다.

5.8.5 재계산

기존에 활용하던 연간 요소 공급량 자료(천톤 단위)에서 세분화된 월간 요소 공급량 자료(톤 단위)로 변경·적용함에 따라 2021-2022년 배출량을 재계산하였다.

PART

06

토지이용, 토지이용 변화 및 임업

- 6.1 개요
- 6.2 산림지(4.A.)
- 6.3 농경지(4.B.)
- 6.4 초지(4.C.)
- 6.5 습지(4.D.)
- 6.6 정주지(4.E.)
- 6.7 기타토지(4.F.)
- 6.8 수확된 목재제품(4.G.)

제6장

토지이용, 토지이용 변화 및 임업

6.1 개요

6.1.1 배출·흡수원 개요

국가 온실가스 통계의 토지이용, 토지이용 변화 및 임업(Land Use, Land-Use Change and Forestry, 이하 LULUCF) 분야에서는 전 국토¹⁾를 토지이용 목적에 따라 산림지(4.A.), 농경지(4.B.), 초지(4.C.), 습지(4.D.), 정주지(4.E.), 기타토지(4.F.)로 구분하고, 각 토지별 탄소저장고(carbon pool : 바이오매스²⁾, 토양, 고사유기물³⁾)에서의 인위적 관리로 인하여 발생하는 온실가스 배출·흡수량을 산정한다. 또한 국내에서 수확된 원목을 목재제품으로 가공하여 탄소를 일정 기간 저장함으로써 온실가스 배출·흡수량을 산정하는 수확된 목재제품(이하 HWP)(4.G.) 부문을 포함한다.

2023년 LULUCF 분야 순흡수량⁴⁾은 39.4 백만톤 CO₂-eq로, 1990년 39.1 백만톤 CO₂-eq 대비 0.3 백만톤 CO₂-eq 증가하였다. 세부 토지별로 살펴보면, 산림지 부문에서 41.0 백만톤 CO₂-eq, 정주지 부문에서 1.2 백만톤 CO₂-eq, 수확된 목재제품 부문에서 0.4 백만톤 CO₂-eq를 흡수하였으며, 농경지 부문에서 2.9 백만톤 CO₂-eq, 습지 부문에서 0.4 백만톤 CO₂-eq, 초지 부문에서 0.008 백만톤 CO₂-eq를 배출한 것으로 나타났다.



| 그림 6-1 | LULUCF 분야 온실가스 배출량 및 흡수량(1990-2023)

- 1) 2006 IPCC GL은 '관리대상 토지(Managed Land)'에서의 온실가스 배출·흡수량을 산정하도록 정의하고 있으며, 우리나라는 전 국토에 대해 정책·감시·관리를 수행하고 있기 때문에 전 국토를 '관리 대상 토지'로 규정함
- 2) LULUCF 분야에서 바이오매스는 식물의 줄기, 가지, 잎, 뿌리 등 유기물 질량을 의미
- 3) 식물체가 죽은 뒤 남은 유기물로, 고사목(서 있거나 쓰러진 상태의 죽은 나무), 낙엽층(떨어진 잎, 줄기, 가지) 등이 있음
- 4) 순흡수량(net removals)은 LULUCF 분야의 탄소저장고에서의 흡수량과 배출량의 합을 의미하며, 순배출량(net emissions) 국가 총배출량에 LULUCF 분야의 순흡수량을 합한 값을 의미함

| 표 6-1 | LULUCF 분야 부문별 온실가스 배출량 및 흡수량(1990-2023)

(단위: 백만톤 CO₂-eq)

부문	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001
4.A. 산림지	-38.2	-34.2	-33.5	-32.0	-34.4	-33.1	-36.8	-41.9	-50.6	-58.3	-60.5	-60.9
4.B. 농경지	-0.03	0.1	0.3	0.5	0.8	1.3	1.7	1.8	1.9	1.9	1.8	1.9
4.C. 초지	-0.7	-0.7	-0.7	-0.7	-0.7	-0.7	-0.7	-0.7	-0.7	-0.7	-0.7	-0.7
4.D. 습지	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
4.E. 정주지	-0.7	-0.8	-0.8	-0.8	-0.8	-0.8	-0.9	-0.9	-0.9	-0.9	-0.9	-0.9
4.G. 수확된 목재제품	0.2	0.04	0.03	-0.1	-0.3	-0.3	-0.4	-0.4	-0.1	-0.5	-0.5	-0.5
합계	-39.1	-35.1	-34.3	-32.7	-35.1	-33.3	-36.7	-41.7	-50.1	-58.3	-60.4	-60.8
구분	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
4.A. 산림지	-58.6	-58.4	-59.6	-57.6	-59.2	-60.3	-61.5	-61.2	-58.8	-57.7	-51.6	-47.0
4.B. 농경지	1.9	2.0	2.1	2.2	2.4	2.6	2.8	2.9	3.0	3.0	2.7	2.7
4.C. 초지	-0.7	-0.7	-0.6	-0.5	-0.4	-0.3	-0.3	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2
4.D. 습지	0.4	0.4	0.4	0.3	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
4.E. 정주지	-0.9	-0.9	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.1	-1.1	-1.1	-1.1	-1.1
4.G. 수확된 목재제품	-0.5	-0.6	-0.8	-0.9	-0.9	-0.8	-0.7	-0.9	-0.6	-1.0	-0.8	-1.1
합계	-58.4	-58.1	-59.5	-57.5	-58.7	-59.4	-60.3	-60.1	-57.4	-56.6	-50.6	-46.3
구분	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023		
4.A. 산림지	-47.9	-48.5	-48.7	-43.7	-42.6	-39.9	-40.2	-40.4	-39.3	-41.0		
4.B. 농경지	2.8	2.5	2.4	2.4	2.6	2.6	2.7	2.9	2.9	2.9		
4.C. 초지	-0.2	-0.1	-0.1	-0.1	-0.04	-0.02	-0.02	-0.01	0.001	0.008		
4.D. 습지	0.4	0.5	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4		
4.E. 정주지	-1.1	-1.2	-1.2	-1.2	-1.2	-1.2	-1.2	-1.2	-1.2	-1.2		
4.G. 수확된 목재제품	-1.2	-1.0	-1.0	-0.8	-0.7	-0.5	-0.5	-0.6	-0.6	-0.4		
합계	-47.2	-47.8	-48.2	-42.9	-41.6	-38.7	-38.8	-38.9	-37.9	-39.4		

주: 배출량은 양수(+), 흡수량은 음수(-)로 표기

6.1.2 토지이용(Land-use) 정의 및 개요

6.1.2.1 우리나라의 토지이용 정의

LULUCF 분야는 2006 IPCC GL에 따라 국토 전체 토지를 산림지, 농경지, 초지, 습지, 정주지, 기타 토지로 구분하며, 각 토지별 정의는 다음과 같다.

국내 산림지(Forest land)의 정의는 국가산림자원조사(National Forest Inventory, 이하 NFI)에 따른 산림(forest)의 정의를 준용하며, NFI의 산림 정의는 유엔식량기구(Food and Agriculture Organization of the United Nations, 이하 FAO)에서 제시한 산림의 임계기준을 만족하고 있다. 산림지는 임목지와 무림목지로 구분되며, 임목지는 침엽수림, 활엽수림, 혼효림, 죽림으로 구성되어 있고 무림목지는 임목지 이외의 모든 임지로 조림예정지와 임도를 포함한다.

표 6-2 | 국내외 산림지 정의

구분	최소 면적(ha)	최소 수고 ¹⁾ (m)	최소 수관 울폐도 ²⁾ (%)	최소 폭(m)	자료 출처
우리나라	0.5	5	10	30 이상	산림청, 2022 ³⁾
UNFCCC	0.05-1	2-5	10-30	-	UNFCCC, 2002
FAO	0.5	5	10	20 이상	FAO, 2012

주: 1) 수고(樹高): 나무높이

2) 수관 울폐도(鬱閉度): 숲이 우거진 정도. 이웃하는 나무줄기의 윗부분이 접촉해서 임관(林冠)나무 갯(canopy)을 이루고 있는 상태의 폐쇄도

3) 제8차 국가산림자원조사 및 산림의 건강·활력도 현지조사 지침서

표 6-3 | 입목지와 무림목지의 정의

구분	정의
입목지	• 입목지: 산림으로서 최소한 5m까지 자랄 수 있는 입목의 수관밀도가 10% 이상인 토지 • 침엽수림: 침엽수의 수관점유면적 또는 입목본수 비율이 75%인 임지 • 활엽수림: 활엽수의 수관점유면적 또는 입목본수 비율이 75%인 임지 • 혼효림: 침엽수와 활엽수의 수관점유면적 또는 입목본수의 비율이 각각 25% 이상 75% 미만인 임지 • 죽림: 대나무의 본수비율이 75% 이상인 임지
무림목지	• 입목지 이외의 모든 임지로, 미림목지(조림예정지)와 제지(임도 등)로 세분됨 - 미림목지: 인위적 또는 자연적 요인에 의해 일시적으로 나무가 제거되었지만 산림으로 회복될 것으로 예상되는 토지로, 수관밀도 10% 미만인 덩굴지, 관목지, 벌채지를 의미 - 제지: 산림으로서 입목의 수관밀도가 10% 미만, 임목 육성에 쓰이지 않는 토지

농경지(Cropland)는 2006 IPCC GL에서 일년생 혹은 다년생 작물 생산에 이용되는 토지로 정의되며, 「농업면적조사(국가데이터처)」의 논, 밭, 과수원에 해당한다.

초지(Grassland)는 2006 IPCC GL에서 방목장 또는 목초지로 정의하고 있으며, 「지적통계(국토교통부)」의 목장용지에 해당된다.

습지(Wetlands)는 내륙습지와 연안습지로 나뉜다. 내륙습지는 2006 IPCC GL에서 담수 또는 기수가 영구적 또는 일시적으로 그 표면을 덮고 있는 지역으로 정의되며, 「지적통계(국토교통부)」의 구거, 유지, 양어장에 해당된다. 연안습지는 2013 Supplement(습지)⁵⁾에 따라 일년내내 또는 일정 기간 해안담수, 기수 또는 염수로 덮여있고, 포화된 유기 및 무기 토양으로 구성되어 있으며, 유관속 식물이 자라는 토지로 정의된다. 공간적 경계는 육지방향으로는 만조 때 조수가 육지와 만나는 지점까지이고, 바다방향으로는 유관속 식물이 자라는 깊이까지이다. 국내 연안습지는 「국가 블루카본 정보시스템(해양수산부)」의 염습지(조간대 내 염생식물 서식지)와 해초대(연안습지 내 해초류 서식지)에 해당한다.

정주지(Settlements)는 2006 IPCC GL에서 인간의 거주와 사회·경제적 활동을 목적으로 이용되는 모든 토지로 정의되며, 「지적통계(국토교통부)」의 주거·상업·산업시설, 도로·철도 등 교통 기반 시설, 공원·녹지·체육시설 등 공공시설과 이밖에 다양한 목적을 위해 개발되거나 사회·문화적 목적으로

5) 2013 Supplement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Wetlands

이용되는 토지에 해당한다.

2006 IPCC GL은 상기 5개의 토지영역(산림지, 농경지, 초지, 습지, 정주지) 이외에 암석, 빙하를 포함하는 지역을 기타토지(Other land)로 분류하고 있으며, 우리나라는 현재 기타토지 관련 통계가 미비하여 미산정으로 보고한다(NE).

표 6-4 | 토지이용 구분과 토지이용 세부 기준(2023)

IPCC 토지구분	국내 토지이용 기준	국내 토지이용 세부 기준	통계자료
전국토	-	• 전체국토 면적(전국토를 대상으로 하며, 비관리 토지는 존재하지 않음)	지적통계
산림지	침엽수림	• 침엽수림 면적	산림임업 통계연보
	활엽수림	• 활엽수림 면적	
	혼효림	• 혼효림 면적	
	죽림	• 죽림 면적	
	무림목지	• 무림목지(미림목지, 제지) 면적	
농경지	논	• ‘논’면적 - 노지과수/병발/기타수원지의 ‘논’ 면적 - 시설작물의 과수의 ‘논’ 면적	농업면적조사
	밭	• ‘밭’면적 - 노지과수/병발/기타수원지의 ‘밭’ 면적 - 시설작물의 과수의 ‘밭’ 면적	
	과수원	• 노지과수/병발/기타수원지의 ‘논’과 ‘밭’ 면적 + 시설작물 과수의 ‘논’과 ‘밭’ 면적	
초지	목장용지	• 목장용지 면적	지적통계
습지	침수지	• 구거/유지/양어장 면적	국가 블루카본 정보시스템
	식생 연안습지 ¹⁾	• 국가 블루카본 정보시스템의 연습지, 해초대 면적	
정주지	지적통계 19개 지목	• 공장용지, 학교용지, 도로, 유원지, 종교용지 등 19개 지목 면적	지적통계
기타 토지	-	• 전국토 면적에서 산림지/농경지/초지/습지/정주지 면적 합산을 제외한 나머지 토지 면적	

주: 1) 연안습지 면적은 전국토 면적에 포함되지 않음

6.1.2.2 토지이용 전환 매트릭스

우리나라 LULUCF 분야는 2006 IPCC GL의 Approach 1을 적용하여 온실가스 배출 및 흡수량을 보고하고 있다. 현재 2006 IPCC GL에 따른 Approach 2~3 수준의 배출·흡수량 산정방법 고도화와 토지이용 전환 매트릭스를 개발하기 위한 연구가 진행 중이며, 추후 국내 전문가와 이해관계자와의 협의를 거쳐 국가 온실가스 통계에 적용할 계획이다.

6.1.3 토지이용 데이터베이스에 대한 정보

우리나라의 토지이용 구분과 토지별 면적을 구분하는 데이터베이스는 「산림임업통계연보(산림청)」, 「산림기본통계(산림청)」, 「농업면적조사(국가데이터처)」, 「지적통계(국토교통부)」, 「국가 블루카본 정보 시스템(해양수산부)」을 사용하며, 각 통계자료의 특징은 아래와 같다.

산림지 부문은 「산림기본통계(산림청)」, 「국가산림자원조사(산림청)」, 「산림임업통계연보(산림청)」를 기초자료로 활용하고 있다. 「산림기본통계(산림청)」와 「국가산림자원조사(산림청)」는 국가 승인 통계로 산림면적, 임목축적 등의 통계 자료가 5년 주기로 공표된다. 「산림임업통계연보(산림청)」는 산림과 임업 관련 통계로 매년 발표된다.

표 6-5 | 산림지 관련 통계 비교

구분	내용		
통계명	산림기본통계	산림임업통계연보	국가산림자원조사
목적	산림자원 현황 파악 및 정책 지원	산림·임업 전반 종합 통계 제공	산림자원 현황 현장조사 및 변화 파악
조사주기	5년	매년	5년
조사방법	행정자료, 공간정보, 현장조사결과	행정자료·실적자료 종합	표본점 현장조사
주요항목	산림면적, 임목축적 등	산림기본통계 포함, 임업경제 등	임목축적, 바이오매스, 토양 등

○ 산림임업통계연보

「산림임업통계연보(산림청)」는 산림청에서 매년 발표하는 기초 산림면적과 임목축적 자료 및 임업 관련 자료를 매년 종합해서 발표하며, 5년 주기로 공표되는 「산림기본통계(산림청)」의 조사항목과 산림 서비스, 산림건강 등 다양한 조사 결과를 제공한다.

○ 산림기본통계

「산림기본통계(산림청)」는 우리나라 산림자원의 현황에 관한 기초통계로, 국가산림자원조사의 조사 주기에 맞추어 모든 시·군·구의 총 산림면적, 임상·영급·소유 구분에 따른 산림면적과 임목축적에 관한 조사 결과를 5년마다 공표하고 있다.

임상 및 영급별 산림면적은 시·군·구 단위 총 산림면적과 임상도의 임상·영급별 면적비율을 적용하여 산출하며, 임상 및 영급별 임목축적은 국가산림자원조사에서 수집된 자료를 활용하여 산출된 임상 및 영급별 산림면적(ha)당 임목축적을 적용하여 산출한다.

「산림기본통계(산림청)」에 사용되는 임상도(Forest Cover Map)는 과거에 국립산림과학원에서 직접 항공사진을 촬영하고 판독하였으나, 2006년부터는 국토교통부에서 제공하는 항공사진을 취득하여 임상도를 제작하였으며, 2012년부터는 1:5,000 축척의 임상도를 제작하여 제공하고 있다. 임상도는 산림과 비산림의 경계구분, 임상(침엽수림, 활엽수림, 혼효림), 산림의 나이구분(영급), 경급, 소밀도, 수종, 상층부 수고(임분고) 등에 관한 정보를 제공한다.

○ 국가산림자원조사(National Forest Inventory)

국가산림자원조사는 산림의 정의에 부합하는 토지에 대한 현지조사로 5년 주기로 공표하고 있다. 전 국토를 대상으로 중부 원점을 중심으로 일정 간격(4km×4km)으로 표본을 배치하는 계통추출법(Systematic Sampling)을 적용하였으며, 산림에 포함되는 약 4,000개 지점을 대상으로 임목축적뿐만 아니라 탄소축적량 산출을 위하여 탄소저장고인 고사목, 낙엽층과 토양의 탄소 함량을 분석하기 위한 시료채취 등을 수행한다. 5년 동안 수집된 자료를 취합하여 분석하는 가중 이동평균법(Weighted moving average)을 적용하여 산림면적(ha)당 임목축적뿐만 아니라 바이오매스, 고사량, 탄소축적량 등의 70개의 항목을 조사하여 통계를 산출하고 있다. 이러한 조사를 바탕으로 임목축적 등 산림자원량 파악을 통해 「산림기본통계(산림청)」를 생산한다.

○ 농업면적조사

농경지 부문은 「농업면적조사(국가데이터처)」를 기초자료로 활용하고 있다. 「농업면적조사(국가데이터처)」는 ‘경지면적조사’와 ‘작물재배면적조사’로 구성되며, 농업생산의 기반인 토지자원의 확보와 이용, 농산물수급안정 계획 수립 및 농업정책 수행에 필요한 기초 자료를 수요자에게 제공하기 위한 목적으로 발간된다. 공표 주기는 1년으로 국가데이터처에서 조사를 관장하고 있다.

○ 지적통계

초지, 내륙습지, 정주지 부문은 「지적통계(국토교통부)」를 기초자료로 활용하고 있다. 「지적통계(국토교통부)」는 지적공부⁶⁾에 등록된 국가의 모든 면적 필지수를 행정구역별(시·도, 시·군·구), 소유 구분별(민유지, 국유지, 도유지, 군유지, 법인, 비법인, 기타), 지목별(28개 지목별 분류)로 분류·집계하여 생성한 통계이다. 공표 주기는 1년이며, 국토교통부에서 관장하고 있다.

○ 국가 블루카본 정보시스템

연안습지 부문은 국가 블루카본 정보시스템을 기초자료로 활용하고 있다. 국가 블루카본 정보시스템(bluecarbon.kr)은 2017년부터 5년간 연구개발을 통해 개발되었으며, 2022년부터 국내 연안습지 정보를 공개하고 있다. 해양수산부는 매년 국가 블루카본 모니터링 사업을 통해 국내 염습지와 해초대 면적을 산출하며, 정보시스템을 통해 지역별 분포면적과 현황 지도를 제공하고 있다. 염습지 면적은 미국항공우주국(NASA: National Aeronautics and Space Administration)과 미국지질조사국(USGS: United States Geological Survey)에 의해 개발된 Landsat 위성영상 분석을 통해 1990년부터의 자료를 제공하고 있으며, 해초대 면적은 유럽 우주국(ESA: European Space Agency)에서 운영하는 지구관측위성 Sentinel-2 위성영상 분석을 통해 2016년부터의 자료를 제공하고 있다. 염습지와 해초대의 연도별 분포면적은 국가 온실가스 통계 LULUCF 분야 연안습지 부문의 활동자료로 활용된다.

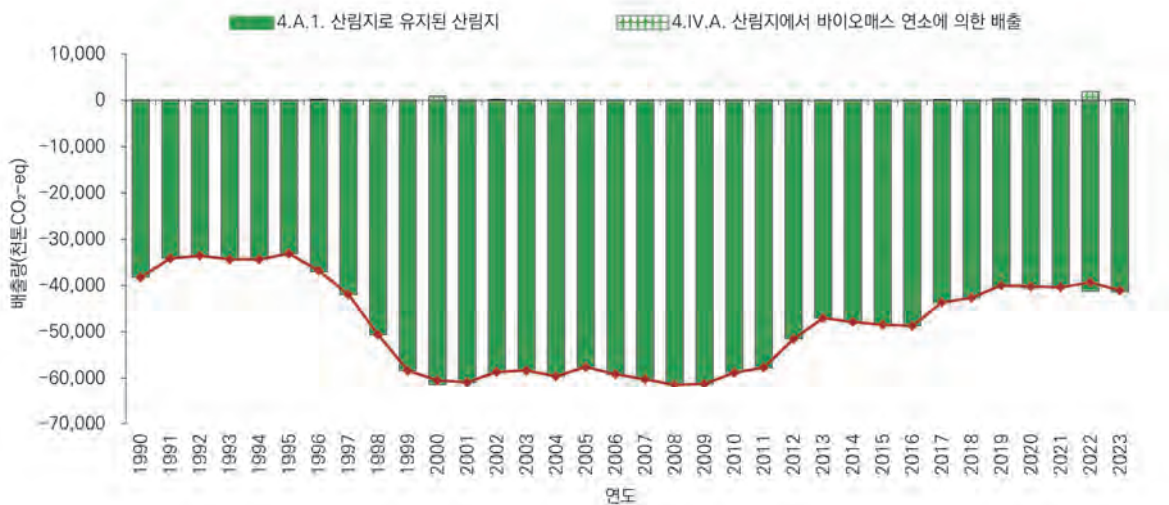
6) 국가가 법적으로 인정하는 토지 관련 정보 기준으로, 토지 소유, 면적, 위치 등 토지의 기본정보를 국가가 공식적으로 기록 관리하기 위하여 작성하는 공적 장부를 의미

6.2 산림지(4.A.)

산림지 부문(4.A.)은 산림지 내에서 나무가 대기 중의 CO₂를 흡수하여 바이오매스에 저장하는 과정을 통해 발생하는 온실가스 흡수량과 인위적, 자연적 원인(낙뢰 등)이나 인간의 직접적 통제를 벗어난 상황에서 발생하는 산불(wildfire)로 인한 온실가스 배출량을 산정한다.

정부는 지속적으로 산불 및 병해충 방제체계를 가동하고 산림을 보전하기 위한 노력의 일환으로 1961년도에 「산림법(현행 산림자원 조성 및 관리에 관한 법률)」을 제정하여 집단적으로 입목과 대나무가 생육하는 토지 및 일시적으로 입목과 대나무가 상실된 토지 등을 산림으로 정의(제2조)하고 모든 산림을 대상으로 영림계획(산림경영계획)을 수립하도록 규정하였다. 또한 「산림법」에 목재수확에 관한 허가제도(제9조), 남벌에 대한 예방(제49조), 산화예방(제50조), 해충의 구제예방(제51조) 등 산림관리를 위한 규정을 명문화하고 민관 협력을 통한 사방사업, 치산녹화사업, 산림보호사업 등을 수행하였다⁷⁾.

2023년 우리나라 산림의 연간 순흡수량은 41,033 천톤 CO₂-eq로, 1990년 대비 2,806 천톤 CO₂-eq 증가하였다. 산림지 부문의 온실가스 순흡수량은 1995년 이후 증가하여 2000년대에 최대 흡수량을 보였으며, 2010년 이후 점차 감소하는 추세를 보인다.



| 그림 6-2 | 산림지 부문 온실가스 배출량 및 흡수량(1990-2023)

7) 제8차 국가산림자원조사 기본계획(산림청, 2021)

표 6-6 산림지 부문 온실가스 배출량 및 흡수량(1990-2023)

(단위: 천톤 CO₂-eq)

구분	1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023
4.A. 산림지	-38,226	-60,489	-58,836	-42,626	-40,385	-39,327	-41,033
4.A.1. 산림지로 유지된 산림지	-38,227	-61,380	-58,843	-42,691	-40,389	-41,207	-41,331
4.A.2. 타토지에서 전용된 산림지	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE
4.IV.A. 산림지에서 바이오매스 연소에 의한 배출	0.2	891	7	65	4	1,880	298

주: 2006 IPCC GL에 따라 타토지에서 전용된 산림지 면적에 관한 활동자료가 없는 경우 '산림지로 유지된 산림지'에 '타토지에서 전용된 산림지'를 포함하여 인벤토리를 산정(IE)

※ 4.A.1. 산림지로 유지된 산림지 내에서 나무가 광합성을 통해 대기 중의 CO₂를 흡수하여 바이오매스에 저장하는 과정을 통해 발생하는 온실가스 흡수량을 의미하며, 4.IV.A. 산림지에서 바이오매스 연소에 의한 배출은 산불로 인한 배출량을 의미함

2008년 이후 산림지 부문의 온실가스 순흡수량의 감소 원인은 산림의 연간 순생장량과 산림면적 감소에 있다. 산림의 연간 순생장량⁸⁾이란 한 해 동안 산림 내 임목 축적이 증가하는 양으로, 연간 순생장량에 따라 CO₂ 흡수량을 산정한다(6.2.1.2.1 산정방법 참고). 즉, 매년 순생장량이 전년보다 많을수록 순흡수량은 증가하게 된다. 그러나 산림의 노령화로 나무의 성장 속도가 느려짐에 따라 연간 순생장량이 점차 감소하여⁹⁾ 순흡수량도 감소하고 있다. 실제로 성장 속도가 빠른 30년생 이하의 어린 숲 면적은 1990년에 약 5,676 천 ha로 전체 산림면적의 88%를 차지하였으나, 2020년 말 기준 19%로 감소하였다.

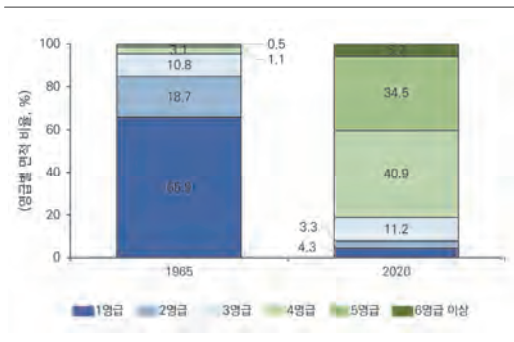


그림 6-3 산림지 연령별 면적비율 변화(1965, 2020)(국립산림과학원, 2021)

표 6-7 산림지 연령별 면적비율 변화(국립산림과학원, 2021)

(단위: 천 ha, %)

구분	NFI 조사연도	1965	1974	1992	2010	2020
영급별 비율	전체 산림면적	6,614	6,641	6,464	6,369	6,298
	1영급	65.9	53.3	16.6	2.6	4.3
	2영급	18.7	32.2	40.6	7.6	3.3
	3영급	10.8	8.9	32.4	22.7	11.2
	4영급	3.1	3.6	7.5	36.7	40.9
	5영급	1.1	1.1	2.2	22.5	34.5
	6영급 이상	0.5	0.9	0.7	8.0	5.7

산림지 순흡수량 감소의 다른 원인인 산림면적의 경우, 2023년 기준 6,287 천 ha로 1990년 대비 189 천 ha이 감소함에 따라 순생장량 감소와 더불어 산림지의 순흡수량 감소 추세에 영향을 미쳤을 것으로 보인다.

8) (N 연도 임목축적량) - (N-1 연도 임목축적량)

9) 산림의 바이오매스량을 의미하는 임목축적량은 나무의 생장에 의해 증가 추세를 보이거나, 순생장량을 의미하는 임목축적변화량이 2008년 이후 감소 추세를 가짐

6.2.1 산림지로 유지된 산림지(4.A.1.)

6.2.1.1 배출·흡수원 개요

	산정온실가스	방법론	배출계수	활동자료	탄소저장고
2023년 기준	CO ₂	Tier 2	CS	임상별 산림면적 및 임목축적	임목 바이오매스 (지상부, 지하부)

산림지로 유지된 산림지(4.A.1.) 부문은 임목(Standing tree, 立木) 바이오매스가 매년 순생장하면서 증가하는 탄소축적량에 따른 CO₂ 흡수량을 산정한다. 임목 바이오매스의 탄소 축적량은 임목지를 대상으로 임상(林相)¹⁰⁾에 따라 침엽수림, 활엽수림, 혼효림을 구분하여 산정하며, 죽림의 경우 국내에 활용가능한 활동자료가 없고, 배출·흡수량이 미미할 것으로 추정되어 미산정으로 보고하였다(NE).

산림지로 유지된 산림지에서의 순흡수량은 41,331 천톤 CO₂-eq로 1990년 대비 3,105 천톤 CO₂-eq 증가했다. 흡수량은 2008년 이후 연간 순생장량과 산림면적 감소로 인해 감소 추세를 보이고 있으나, 최근 3년간에는 비슷한 수준을 유지하고 있는 것으로 나타났다.

표 6-8 | 산림지로 유지된 산림지 부문 온실가스 배출량 및 흡수량(1990-2023)

(단위: 천톤 CO₂-eq)

구분 ¹⁾	1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023
침엽수림	-17,610	-25,906	-30,746	-25,952	-24,701	-24,669	-22,470
활엽수림	-20,616	-35,475	-28,097	-16,738	-15,688	-16,538	-18,861
혼효림	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE
기타 ²⁾	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE
합계	-38,227	-61,380	-58,843	-42,691	-40,389	-41,207	-41,331

주: 1) 우리나라 산림환경을 반영하여 산림지 흡수량은 침엽수림과 활엽수림으로 구분하여 보고 하였으며, 임상별 임목축적량 활동자료에서 혼효림은 침엽수와 활엽수가 1대1 비율로 분포한다고 가정하여 침엽수림과 활엽수림의 흡수량에 포함하여 보고

2) 기타는 무림목지와 죽림을 의미. 무림목지는 정의에 따라 흡수량 산정 대상이 부재하므로 NA로 보고. 죽림으로 인한 흡수량은 국내에 활용가능한 활동자료가 없고, 임목지 면적의 0.34%를 차지하여 흡수량이 미미할 것으로 추정되므로 미산정(NE)으로 보고

6.2.1.2 방법론

6.2.1.2.1 산정방법

산림지로 유지된 산림지 부문에서 임목 바이오매스에 따른 온실가스 흡수량 산정방법은 Tier 2 수준의 축적차이법(Stock-Difference Method)¹¹⁾을 적용한다. 축적차이법은 보고연도의 임상별 임목축적량에 목재기본밀도(D), 바이오매스확장계수(BEF), 뿌리-지상부 비율(R), 탄소전환계수(CF) 등을 곱하여 탄소저장량을 산정하고, 전년도 탄소저장량과의 차이를 통해 배출·흡수량을 산정한다.

10) 숲을 구성하는 수종, 임관의 조성, 연령, 생육상태 등으로써 나타나는 숲의 겉모양

11) 2006 IPCC GL에 따르면 축적차이법(Stock-Difference Method)은 두 시점(예: 조사 시작과 종료)의 탄소저장고 내 탄소축적량을 각각 측정 후 그 차이로 해당 기간의 탄소축적변화량을 산정하는 방법으로, 상세 활동자료가 요구되어 Tier 2 이상의 산정방법 적용 필요

〈입목 바이오매스 연간 탄소 축적량 변화 산정식〉

$$\Delta C_B = \frac{C_{t2} - C_{t1}}{t_2 - t_1}$$

ΔC_B : 산림지로 유지된 산림지의 현존 바이오매스(지상부 및 지하부) 탄소축적량의 연간 변화[t C/yr]

C_{t2} : t2 연도의 총 바이오매스 탄소축적량[t C]

C_{t1} : t1 연도의 총 바이오매스 탄소축적량[t C]

$$C = \sum_{i,j} [A_{i,j} \times V_{i,j} \times BCEFs_{i,j}] \times (1 + R_{i,j}) \times CF_{i,j}$$

C : 현존 바이오매스 탄소축적량[t C]

$A \times V$: 임목축적량[m³] = 산림면적(A) [ha] × 단위면적당 재적(V) [m³/ha]

$BCEFs$: 바이오매스 전환·확장계수 = 목재기본밀도(D)[t d.m./m³] X 바이오매스 확장계수(BEFs)

R : 뿌리-지상부 비율

CF : 탄소전환계수[t C/t d.m.]

i : 임상 유형

j : 기후

자료: 2006 IPCC GL, Vol.4, Ch.2, Equation 2.8

6.2.1.2.2 배출·흡수계수

산림지로 유지된 산림지 부문의 목재기본밀도, 바이오매스 확장계수, 뿌리-지상부 비율은 임상별 국가 고유 흡수계수를 개발·적용하였다. 국가 고유 흡수계수는 전국 산림에서 침엽수림과 활엽수림에 해당하는 주요 수종의 개별 흡수계수에 각 수종의 임목축적 비율에 따라 가중치를 적용한 임상별 계수이며, 적용된 흡수계수는 표 6-9와 같다.

탄소전환계수(CF)는 2006 IPCC GL의 기본 흡수계수를 적용하였으며, 2006 IPCC GL에 제시된 기후대별 계수 중, 우리나라의 기후대인 온대의 침엽수(0.51)와 활엽수(0.48)를 적용하였다.

표 6-9 | 산림지 부문 주요 수종의 입목 바이오매스 흡수계수

배출·흡수계수	적용값		적용 근거
목재기본밀도(D)	침엽수	0.46	국가 고유 흡수계수
	활엽수	0.68	
바이오매스 확장계수(BEF)	침엽수	1.43	
	활엽수	1.51	
바이오매스 전환 및 확장계수(BCEF)	= 목재기본밀도(D) × 바이오매스 확장계수(BEF)		
뿌리-지상부 비율(R)	침엽수	0.27	
	활엽수	0.36	
탄소전환계수(CF)	침엽수	0.51	2006 IPCC GL의 기본계수
	활엽수	0.48	

자료: 2006 IPCC GL

BOX 1. 산림지 부문 = 국가 고유 흡수계수

산림청과 국립산림과학원은 국가 온실가스 통계 산정을 위해 2014년, 2017년, 2018년 국가 고유 흡수계수를 개발하였다. 우리나라 산림에서 분포하고 있는 주요 수종별 임목 축적 가중치를 적용한 2개 임상을 기준으로 목재기본밀도, 바이오매스확장계수, 뿌리-지상부 비율을 개발하였고, 국가 고유 흡수계수 검증·등록 절차를 통해 승인된 값을 국가 온실가스 통계에 적용하고 있다.

산림지 부문 주요 수종의 국가 고유 흡수계수와 불확도

구분	수종	목재기본밀도(D)		바이오매스확장계수(BEF)		뿌리-지상부 비율(R)		비고 (탄소전환 계수(CF) : 2006 IPCC GL의 기본계수)
		국가 고유 흡수계수	불확도	국가 고유 흡수계수	불확도	국가 고유 흡수계수	불확도	
침엽수림	침엽수	0.46		1.43	-	0.27	-	0.51
	강원지방소나무 충북지방소나무 낙엽송 리기다소나무 곰솔 잣나무 삼나무 편백	0.35 ~ 0.50	3.50 ~ 11.90	1.31 ~ 1.74	5.97 ~ 11.62	0.20 ~ 0.36	8.16 ~ 32.69	
활엽수림	활엽수	0.68	-	1.51	-	0.36	-	0.48
	굴참나무 신갈나무 상수리나무 졸참나무 붉가시나무 아까시나무 자작나무 백합나무 현사시나무 밤나무 상록활엽수종	0.36 ~ 0.83	1.66 ~ 17.30	1.17 ~ 2.63	2.20 ~ 16.03	0.19 ~ 0.50	11.80 ~ 27.43	
죽림	대나무	0.24	12.55	1.26	2.63	0.06	48.97	0.48

주: 침엽수, 활엽수 계수는 수종별로 개발한 국가 고유 흡수계수를 활용하여 임상별 계수로 도출한 값임

6.2.1.2.3 활동자료

산림지로 유지된 산림지 부문의 활동자료는 전체 산림을 대상으로 임상(침엽수림, 활엽수림, 혼효림) 및 산림의 나이(영급)에 관한 산림면적과 임목축적량 수치를 제공하는 「산림기본통계(산림청)」, 「산림임업통계연보(산림청)」를 사용한다. 임상별 임목축적량의 경우, 침엽수림, 활엽수림은 상기 통계에서 제공하는 임목축적량 통계자료를 사용하나, 혼효림의 경우 침엽수림과 활엽수림에 50%씩 임목축적량을 배분하여 흡수량 산정의 기초자료로 활용한다.

2023년 총 임목축적(3년 평균 기준)은 1,084,280 천 m^3 으로 전년대비 2.1% 증가한 것으로 나타났다

으며, 임상별로는 전년 대비 침엽수 2.7%, 활엽수 2.2%, 혼효림 0.9% 각각 증가한 것으로 나타났다.

표 6-10 산림지로 유지된 산림지 부문 연도별 활동자료 수집방법(1990-2023)

기간	수집기관	통계명	수집 대상 활동자료
1990-2023	산림청	국가산림자원조사(NFI)	임상별 산림면적 및 임목축적
		산림기본통계	
		산림임업통계연보	

표 6-11 산림지로 유지된 산림지 부문 임상별 임목축적량(1990-2023)

(단위: 천 m³)

구분	1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023
침엽수림	122,009	202,924	330,561	431,432	470,452	483,288	496,279
활엽수림	61,923	130,339	223,830	271,375	281,837	285,611	291,893
혼효림	69,828	130,491	213,752	270,247	287,414	293,324	296,108
기타	-	-	-	-	-	-	-
합계	253,760	463,755	768,143	973,055	1,039,702	1,062,222	1,084,280

주: 활동자료는 국가 온실가스 인벤토리 통계 산정·보고·검증 지침(온실가스종합정보센터, 2021)에 의해 산정년도 기준 3년 평균(N, N-1, N-2년) 자료: 1990-2014년 자료는 시계열 일관성 확보를 위한 임목축적 재계산 자료 (국립산림과학원, 2019), 「산림기본통계(산림청, 2020)」

표 6-12 산림지로 유지된 산림지 부문 임상별 산림면적(1990-2023)

(단위: kha)

구분	1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023
침엽수림	3,079	2,711	2,581	2,321	2,321	2,308	2,302
활엽수림	1,389	1,666	1,719	2,018	2,015	2,000	2,037
혼효림	1,810	1,885	1,865	1,693	1,643	1,658	1,614
기타	죽림	8	6	7	20	20	21
	무림목지 ¹⁾	190	154	197	254	295	314
합계	6,476	6,422	6,369	6,306	6,294	6,291	6,287

주: 1) FAO의 산림지 정의에 따라 임목이 제거되었으나 산림지로 회복될 것으로 예상되는 무림목지도 산림지로 분류

6.2.1.3 시계열 일관성

1990년부터 2023년까지 산림청의 「산림임업통계연보」 자료를 활용하였으며, 해당 활동자료에 일관된 방법론과 배출계수를 적용하여 CO₂ 흡수량을 산정하였다.

6.2.1.4 재계산

재계산은 수행하지 않았다.

6.2.2 타토지에서 전용된 산림지(4.A.2.)

2006 IPCC GL에서 제시된 접근법 1(Approach 1)의 개념에 따라 타토지에서 전용된 산림지(4.A.2.) 관련 통계는 산림지로 유지된 산림지(4.A.1.)에 포함하여 작성하였다(IE).

6.2.3 산림지에서 바이오매스 연소에 의한 배출(4.IV.A.)

6.2.3.1 배출·흡수원 개요

2023년 기준	산정온실가스	방법론	배출계수	활동자료	탄소저장고
	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O	Tier 1	D	산불 피해재적	입목 바이오매스 (지상부)

우리나라는 산불방제를 위한 국가 위기관리 기본지침과 산림자원의 조성 및 관리에 관한 법률 등의 관련 법규 하에서 국가차원의 체계적이며 지속적인 관리를 실시하고 있으므로 산불 등 바이오매스 연소에 의한 배출을 온실가스 배출량으로 산정하였다. 세부적으로는 처방화입(Controlled burning)과 산불(Wildfires)에 의한 배출로 구분되며, 우리나라 산림에서는 처방화입이 발생하지 않으므로 미산정으로 보고하였다(NO). 따라서 바이오매스 연소에 의한 배출(4.IV.A.) 부문은 산불로 인해 직접 배출되는 CO₂¹²⁾, CH₄, N₂O를 산정한다. 바이오매스 연소에 의한 배출량은 산림지로 유지된 산림지(4.A.1.)와 동일하게 입목지를 대상으로 침엽수림과 활엽수림에 대해 산정하였으며, 혼효림은 침엽수림과 활엽수림에 50%씩 배분하여 산정하였다.

2023년 산림지에서 바이오매스 연소에 의한 배출량은 298 천톤 CO₂-eq이다. 우리나라 산림에서의 산불은 최근까지 98%가 인위적인 산불로 최근 10년(2014-2023년) 간 연평균 567건(평균 4,004 ha)의 산림 피해를 야기하였다. 최근 3년 간의 산불 추이는 2021년 349건(766 ha), 2022년 756건(24,797ha), 2023년 596건(4,992ha)으로 연도별 피해 규모의 변화가 컸다.

| 표 6-13 | 산림지에서 바이오매스 연소에 의한 배출 온실가스 배출량 및 흡수량(1990-2023)

(단위: 천톤 CO₂-eq)

구분	1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023
산림지에서 바이오매스 연소에 의한 배출	0.2	891	7	65	4	1,880	298

6.2.3.2 방법론

6.2.3.2.1. 산정방법

산림지에서 바이오매스 연소로 인한 CO₂, CH₄, N₂O 배출량 산정은 2006 IPCC GL의 Tier 1 방법론을 적용한다.

12) 2006 IPCC GL에 따르면, 산림지로 유지된 산림지의 바이오매스 연소는 바이오매스 내 장기간 축적된 탄소가 산불로 인해 단기간에 방출된 뒤 재흡수되기까지 오랜 시차가 발생하므로 산불 발생 시점에 CO₂ 배출량을 보고

〈 산불로 인한 온실가스 배출량 산정식 〉

$$L_{fire} = A \times M_B \times C_f \times G_{ef} \times 10^{-3}$$

- L_{fire} : 산불로 인한 온실가스 배출량[t GHG]
 A : 산불 피해면적[ha]
 M_B : 연소 가능한 연료량[t d.m./ha]
 $A \times M_B$: 산불 피해재적(V)[m³] × 목재기본밀도(D)[t d.m./m³] × 바이오매스 확장계수(BEFs)
 C_f : 연소효율(또는 연소된 바이오매스 비율)
 G_{ef} : 배출계수[g/kg d.m.]

자료: 2006 IPCC GL, Vol.4, Ch.2, Equation 2.27

6.2.3.2.2 배출·흡수계수

산림지 부문에서 바이오매스 연소로 인한 CO₂, CH₄, N₂O 배출량 산정을 위한 배출계수는 2006 IPCC GL의 기본 배출계수를 적용하였다.

표 6-14 | 산림지에서의 바이오매스 연소에 의한 배출 부문 연소효율 및 배출계수

배출·흡수계수	적용값		적용 근거
연소효율(C _f)	0.45 (전체 온대림)		2006 IPCC GL의 기본계수
배출계수(G _{ef})	CO ₂	1,569	
	CH ₄	4.7	
	N ₂ O	0.26	

자료: 2006 IPCC GL

6.2.3.2.3 활동자료

산림지에서 바이오매스 연소로 인한 활동자료인 연소 가능한 연료량(M_B)은 「산림임업통계연보(산림청)」에서 보고된 산불 피해재적에 임상별 임목축적 비율과 표 6-9의 임상별 목재기본밀도 및 바이오매스 확장계수를 적용하여 산출하였다.

표 6-15 | 산림지에서 바이오매스 연소에 의한 배출 부문 활동자료 수집방법(1990-2023)

기간	수집기관	통계명	수집 대상 활동자료
1990-2023	산림청	산림임업통계연보	산불 피해재적

표 6-16 | 산림지에서 바이오매스 연소에 의한 배출 부문 활동자료(1990-2023)

(단위: m ³)							
구분	1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023
산불 피해재적	323	1,373,302	11,168	100,710	5,641	2,925,560	464,130

6.2.3.3 시계열 일관성

1990년부터 2023년까지 동일한 방법론, 배출계수, 활동자료 출처를 적용하였다.

6.2.3.4 재계산

재계산은 수행하지 않았다.

6.3 농경지(4.B.)

농경지는 일년생 또는 다년생 작물을 재배하는 논, 밭, 과수를 의미한다. 농경지 부문(4.B.)은 탄소저장고 중 토양에서의 온실가스 배출·흡수량을 산정하며¹³⁾, 농경지 토양에서의 온실가스 배출·흡수량은 토지의 전용 및 토지이용과 관리조건(유기물 사용, 경운)의 변화에 따라 결정된다. 토양탄소량이 많은 토지에서 농경지로 전용된 경우에는 토양 내 축적된 탄소가 대기로 배출되고, 식생이 적거나 토양 갈아엎기가 빈번한 토지가 농경지로 전용된 경우에는 토양 내 축적탄소가 증가하여 탄소 흡수원으로 산정된다.

2023년 농경지 부문 배출량은 2,863 천톤 CO₂-eq로 1990년 대비 2,893 천톤 CO₂-eq 증가하였다.

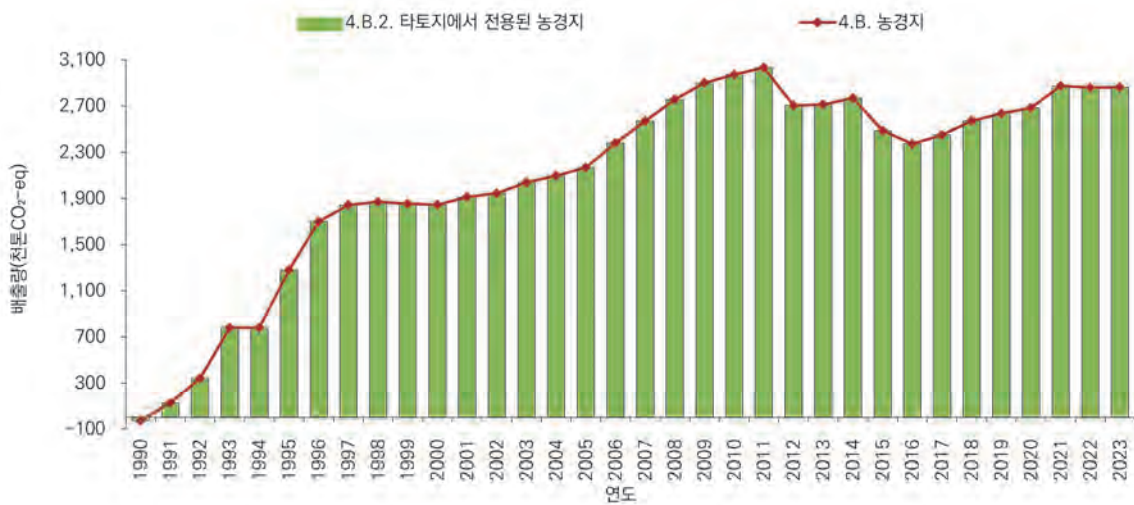


그림 6-4 | 농경지 부문 온실가스 배출량 및 흡수량(1990-2023)

표 6-17 | 농경지 부문 온실가스 배출량 및 흡수량(1990-2023)

(단위: 천톤 CO₂-eq)

구분	1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023
4.B. 농경지¹⁾	-30	1,843	2,972	2,570	2,874	2,859	2,863
4.B.1. 농경지로 유지된 농경지 ²⁾	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE
4.B.2. 타토지에서 전용된 농경지 ³⁾	-30	1,843	2,972	2,570	2,874	2,859	2,863

주: 1) 기존에는 농경지로의 전용에 따른 N₂O 배출량을 농경지 부문에서 함께 보고하였으나, 2006 IPCC GL에 따라 해당 배출량을 농업 분야로 이관

2) 농경지로 유지된 농경지에서 토양탄소 변화에 의한 배출·흡수량은 활동자료 부재로 "NE"로 보고

3) Approach 1에 따라 토양탄소량은 농경지 순면적을 기준으로 '타토지로 전용된 농경지' 면적을 포함하여 인벤토리 산정

6.3.1 농경지로 유지된 농경지(4.B.1.)

농경지로 유지된 농경지 토양에서의 온실가스는 2006 IPCC GL의 Tier 1 적용을 위한 관련 통계와 연구 자료가 미비한 상황으로 미산정으로 보고한다(NE).

13) 바이오매스와 고사유기물은 활동자료 부재로 미산정(NE)으로 보고

6.3.2 타토지에서 전용된 농경지(4.B.2.)

6.3.2.1 배출·흡수원 개요

2023년 기준	산정온실가스	방법론	배출계수	활동자료	탄소저장고
	CO ₂	Tier 1	D, CS	농경지 면적	토양탄소

타토지에서 전용된 농경지(4.B.2.) 부문은 농경지 토양에서의 온실가스 배출·흡수량을 산정하기 위해 20년간 농경지 토지면적이 변화한 경우, 변화된 증감 면적에 대해 타토지에서 전용된 농경지(4.B.2.)로 구분하고, 해당 토양을 유형(무기질 토양, 유기질 토양¹⁴⁾) 및 관리기준(유기물 사용 여부, 경운 여부)으로 세분화하여 토양탄소로 인한 CO₂ 배출·흡수량을 산정하였다.

타토지에서 전용된 농경지에서의 배출량은 2,863 천톤 CO₂-eq이다. 1990년은 흡수량이 30 천톤 CO₂-eq으로 산정되었으나 1991년부터 배출량으로 전환되었다.

표 6-18 | 타토지에서 전용된 농경지 부문 온실가스 배출량 및 흡수량(1990-2023)

(단위: 천톤 CO₂-eq)

구분	1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023
타토지에서 전용된 농경지	-30	1,843	2,972	2,570	2,874	2,859	2,863

6.3.2.2 방법론

6.3.2.2.1 산정방법

타토지에서 전용된 농경지 부문의 토양탄소 축적량 산정식은 2006 IPCC GL의 Tier 1 방법론을 적용하고 있다.

〈타토지에서 전용된 농경지 토양탄소 축적변화량 산정식〉

$$\Delta C_{Soils} = \Delta C_{Mineral} - L_{Organic} + \Delta C_{Inorganic}$$

ΔC_{Soils} : 타토지에서 전용된 농경지의 연간 토양탄소 축적변화[t C/yr]

$\Delta C_{Mineral}$: 타토지에서 전용된 농경지의 무기질 토양의 연간 탄소 축적변화[t C/yr]

$L_{Organic}$: 유기토양에서 연간 손실되는 탄소[t C/yr]

$\Delta C_{Inorganic}$: 토양의 연간 무기탄소 축적량의 변화[t C/yr], Tier 3 미 적용 시 0

자료: 2006 IPCC GL, Vol.4, Ch.2, Equation 2.24

14) 우리나라 유기토양 면적은 409 ha로 국토의 0.004%를 차지하며, 농경지 유기토양 면적 관련 통계자료 미비로 미산정(NE)으로 보고

〈농경지의 무기질 토양 탄소 축적변화량 산정식〉

$$\Delta C_{Mineral} = \frac{(SOC_0 - SOC_{(0-T)})}{D}$$

$$SOC = \sum_{c,s,i} (SOC_{REF_{c,s,i}} \cdot F_{LU_{c,s,i}} \cdot F_{MG_{c,s,i}} \cdot F_{I_{c,s,i}} \cdot A_{c,s,i})$$

T가 ≥ 20년이면, 이 식에서 D를 대신하여 T를 사용

$\Delta C_{Mineral}$	: 무기질 토양에서의 연간 탄소 축적 변화[t C/yr]
SOC_0	: 인벤토리 대상연도의 토양 유기탄소 축적[t C]
$SOC_{(0-T)}$	: 인벤토리 대상기간의 토양 유기탄소 축적[t C]
T	: 인벤토리 대상기간 20년[yr]
D	: 해당 인벤토리 기간의 연수[yr]
c	: c 는 기후형, s 는 토양형, i 는 주요 농경지 체계
SOC_{REF}	: 기본 토양유기탄소 축적계수[t C/ha]
F_{LU}	: 토지이용 또는 토지이용 변화 형태에 따른 축적변화계수
F_{MG}	: 관리 체계에 따른 축적변화계수
F_I	: 유기물 사용에 따른 축적변화계수
A	: 토지이용 범주별 면적[ha]

자료: 2006 IPCC GL, Vol.4, Ch.2, Equation 2.25 Formulation A

6.3.2.2.2 배출·흡수계수

타토지에서 전용된 농경지 부문의 기본 토양 유기탄소 축적계수인 SOC_{REF} 는 국가 고유 배출·흡수 계수를 적용하였으며, SOC_{REF} 값은 산정기간(1990-2023년) 내 변화 없이 동일하다는 가정하에 일괄 적용하였다.

기상청 연평균 기후자료에 따라 우리나라 기후체계는 난온대 습윤(Warm Temperate, moist)에 해당하며, 국내 토양형에는 HAC(High Activity Clay), LAC(Low Activity Clay), 사질(Sandy), 화산회토(Volcanic)가 존재한다. 이에 따라 전국의 농경지 토양을 HAC 토양, LAC 토양, 사질토양, 화산회토로 분류¹⁵⁾하였으며, 각 토양형별 농경지 면적에 토양형별 기본 토양 유기탄소 축적계수(SOC_{REF})와 축적변화계수(F_{LU} , F_{MG} , F_I)를 적용하여 토양 유기탄소 축적량(SOC)을 산정하였다.

표 6-19 | 농경지 토양형별 면적 비율

(단위: %)

구분	HAC 토양	LAC 토양	사질토양	화산회토
논	89.55	3.92	2.33	4.21
밭	89.41	4.89	2.33	3.37
과수원	81.89	4.82	3.17	10.12

자료: 한국의 토양분류 및 해설(농촌진흥청, 2011)

15) 한국의 토양분류 및 해설(농촌진흥청, 2011)

표 6-20 기본 토양유기탄소 축적계수(SOC_{REF}) 및 토양유기탄소 축적량(SOC)

(단위: t C/ha, 토양 깊이 0-30cm)

구분		HAC 토양	LAC 토양	사질토양	화산회토	근 거
SOC _{REF}		39	34	24	127	국가 고유 배출·흡수 계수 ¹⁾
농경지 종류별 SOC	논	42.90	37.40	26.40	139.70	
	밭	26.91	23.46	16.56	87.63	
	과수원	44.85	39.10	27.60	146.05	

주: 1) 국내 대표 토양종(미국 농무부에서 개발한 토양의 분류 방법(soil taxonomy)에 따라 분류된 토양 특성을 표현하는 대표 단위)을 선정하여, 국립농업과학원의 토양유기탄소 함량 산정을 위한 시료 분석 채취 방법을 적용하여 산정

축적변화계수(F_{LU} , F_{MG} , F_I)는 2006 IPCC GL의 기본계수 중 우리나라 농경지 토양 환경을 대표하는 것으로 판단되는 기본값을 적용하였다. 토지이용 또는 토지이용 변화 형태에 따른 축적변화계수인 F_{LU} 는 온대습윤 기후 체계에서 논벼 경작, 밭 장기경작, 과수 장기경작으로 구분하여 적용하였으며, 농경지 관리체계에 따른 축적변화계수인 F_{MG} 는 논과 밭은 대부분 기계영농을 하고 있는 국내 현황을 고려하여 Full 1.0을 적용하고 경운이 이루어지지 않고 있는 과수원은 No-till 1.15를 적용하였다. 유기물 사용에 따른 축적변화계수인 F_I 는 작물 잔사를 제거하고 유기물을 투입하는 현 상황을 고려하여 Medium 1.0을 적용하였다.

표 6-21 농경지 관리활동 종류별 축적변화계수

구분	수준	기후형	습도형	계수	근거
토지이용(F_{LU})	장기경작(밭)	온대	습윤	0.69	2006 IPCC GL의 기본계수
	장기경작(과수원)	온대	습윤	1.0	
	논벼경작(논)	온/열대	건/습윤	1.1	
경운(F_{MG})	Full(논, 밭)	온대	건/습윤	1.0	
	No-till(과수원)	온대	습윤	1.15	
유기물사용(F_I)	Medium(논, 밭, 과수)	온대	건/습윤	1.0	

6.3.2.2.3 활동자료

타토지에서 전용된 농경지 부문의 활동자료는 토양형별 농경지 면적이 필요하다. 이를 도출하기 위해 우선 「농업면적조사(국가데이터처)」에서 제공하는 논밭별 경지면적, 노지 과수, 시설작물 과수 재배 면적과 병발, 기타수원지, 기타작물 재배 면적 자료를 활용하였다. 단, 시설작물 과수 재배면적은 2000년부터 조사되어 「농공기술 2권(농어촌연구원, 1992)」의 연도별 시설작물 과수 재배면적(1987-1992)을 활용하여 내삽을 거쳐 1993-1999년 활동자료의 시계열 완전성을 보완하였다.

이어서, 농경지 면적을 토양형별로 구분하기 위해 「한국의 토양 분류 및 해설(농촌진흥청, 2011)」을 활용하여 HAC 토양, LAC 토양, 사질토양, 화산회토 면적 비율을 산출하였다. 이 비율을 「농업면적조사(국가데이터처)」의 농경지 면적 통계에 적용하여 토양형별 농경지 면적을 구분하였다. 이를 바탕으로, 해당 연도의 농경지 면적과 해당 연도로부터 20년 전 농경지 면적을 비교하여 면적 차이 값이 해당연도가 더 큰 경우는 타토지에서 전용된 농경지(4.B.2.)로, 더 적은 경우에는 타토지로 전용된 농경지로 구분하였다.

| 표 6-22 | 타토지에서 전용된 농경지 부문 활동자료 수집방법(1990-2023)

기간	수집기관	통계명	수집 대상 활동자료
1970-2023	국가데이터처	농업면적조사	농경지 면적
1987-1992	농어촌연구원	농공기술 2권	시설과물 과수 재배면적
1970-2023	농촌진흥청	한국의 토양 분류 및 해설	토양형별 비율

| 표 6-23 | 농경지 부문 활동자료(1990-2023)

(단위: kha)

구분	1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023
타토지에서 전용된 농경지 면적(A)	213	62	60	20	38	28	28
타토지로 전용된 농경지 면적(B)	354	369	453	334	368	362	361
농경지 순면적 변화(A-B)	-142	-307	-394	-314	-329	-334	-333

6.3.2.3 시계열 일관성

타토지에서 전용된 농경지 부문은 1990년부터 2023년까지 국가데이터처의 「농업면적조사」 자료를 활용하여 해당 활동자료에 일관된 방법론과 배출계수를 적용하였다.

6.3.2.4 재계산

재계산은 수행하지 않았다.

6.3.2.5 개선계획

현재 농경지 부문은 Approach 2~3 수준에서 토지전환에 대한 활동자료 부재와 농경지로 유지된 농경지에서 영농관리 이력에 관한 자료가 구축되지 않아 토지이용, 유기물 투입, 경운 등 연도에 따라 변화가 없다고 가정하고 축적변화계수를 동일하게 적용하고 있다. 향후 Approach 2~3 수준의 방법론 개발과 활동자료 구축을 통해 농경지 토양탄소 산정 정확도를 높이고, 미산정 배출원(바이오매스)에 대한 배출·흡수량 산정 보고 체계를 만들 계획이다.

6.4 초지(4.C.)

초지는 다년생 목초의 식생으로 덮여있는 방목장 또는 목초지를 의미한다. 초지 부문(4.C.)은 토양에서의 온실가스 배출·흡수량을 산정하며¹⁶⁾, 초지 토양에서의 온실가스 배출·흡수량은 토지의 전용 및 토지이용과 관리조건(유기물 사용, 관개 등)의 변화에 따라 결정된다. 토양탄소량이 많은 토지에서 초지로 전용된 경우에는 토양 내 축적된 탄소가 대기로 배출되고, 식생이 적거나 토양 갈아엎기가 빈번한 토지가 초지로 전용된 경우에는 토양 내 축적탄소가 증가하여 탄소 흡수원으로 산정된다.

2023년 초지 부문의 배출량은 8 천톤 CO₂-eq로, 흡수량이 2000년 이후 매년 감소하여 2022년에 배출량으로 전환되었다. 초지 부문의 배출·흡수량 산정의 기초자료인 초지 면적은 2023년 기준 55,776 ha이며, 1970년부터 2013년까지 꾸준히 증가하다가 이후부터 감소 추세에 있다.

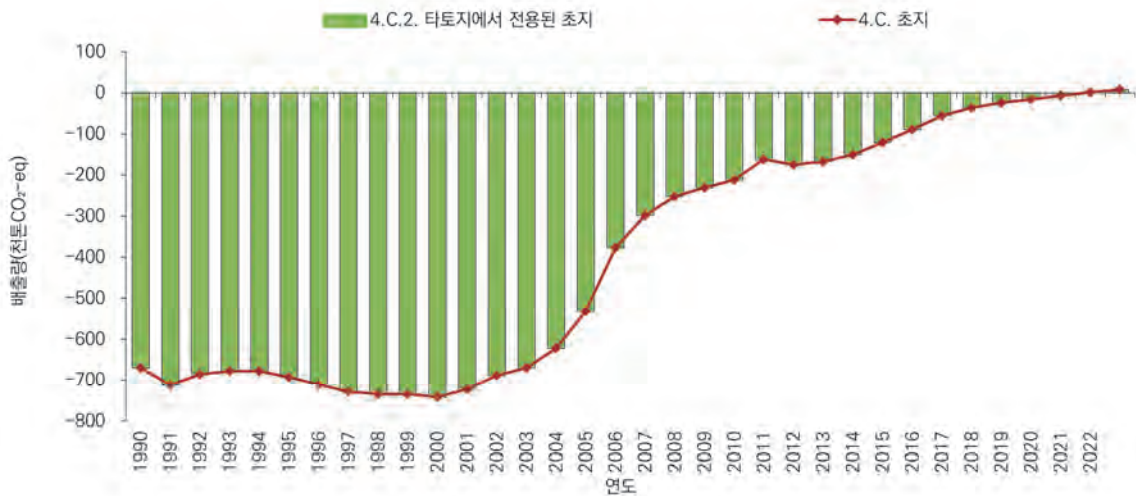


그림 6-5 | 초지 부문 온실가스 배출량 및 흡수량(1990-2023)

표 6-24 | 초지 부문 온실가스 배출량 및 흡수량(1990-2023)

(단위: 천톤 CO₂-eq)

구분	1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023
4.C. 초지	-670	-742	-212	-36	-7	1	8
4.C.1. 초지로 유지된 초지 ¹⁾	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE
4.C.2. 타토지에서 전용된 초지 ²⁾	-670	-742	-212	-36	-7	1	8

주: 1) 초지로 유지된 초지에서 토양탄소 변화에 의한 배출·흡수량은 활동자료 부재로 “NE”로 보고

2) Approach 1에 따라 토양 탄소량은 초지 순면적을 기준으로 ‘타토지로 전용된 초지’ 면적을 포함하여 인벤토리 산정

16) 바이오매스와 고사유기물은 활동자료 부재로 미산정(NE)으로 보고

6.4.1 초지로 유지된 초지(4.C.1.)

초지로 유지된 초지 부문은 2006 IPCC GL의 Tier 1 방법론 적용을 위한 관련 통계와 연구 자료가 미비한 상황으로, 초지로 유지된 초지 토양에서의 온실가스는 미산정으로 보고한다(NE).

6.4.2 타토지에서 전용된 초지(4.C.2.)

6.4.2.1 배출·흡수원 개요

2023년 기준	산정온실가스	방법론	배출계수	활동자료	탄소저장고
	CO ₂	Tier 1	D, CS	초지 면적	토양탄소

타토지에서 전용된 초지(4.C.2.) 부문은 초지 토양에서의 온실가스 배출·흡수량을 산정하기 위해 20년간 초지 토지면적이 변화한 경우, 변화된 증감 면적에 대해 타토지에서 전용된 초지로 구분하고, 해당 토양을 유형별(무기질 토양, 유기질 토양), 관리기준별(유기물 시용 여부, 경운 여부)로 세분화하여 토양 탄소로 인한 CO₂ 배출·흡수량을 산정하였다. 다만, 우리나라 초지에는 유기토양이 존재하지 않아 미산정으로 보고한다(NO)¹⁷⁾.

타토지에서 전용된 초지에서의 토양탄소로 인한 배출량은 8 천톤 CO₂-eq이다. 1990년은 흡수량이 670 천톤 CO₂-eq으로 산정되었으나 흡수량이 점차 감소하여 2022년에 배출량으로 전환되었다.

| 표 6-25 | 타토지에서 전용된 초지 부문 배출량 및 흡수량(1990-2023)

(단위: 천톤 CO₂-eq)

구분	1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023
타토지에서 전용된 초지	-670	-742	-212	-36	-7	1	8

6.4.2.2 방법론

6.4.2.2.1 산정방법

타토지에서 전용된 초지 부문의 토양탄소 축적변화량 산정식은 2006 IPCC GL의 Tier 1 방법을 적용한다.

17) 한국의 토양분류 및 해설(농촌진흥청, 2011)

〈타토지에서 전용된 초지 토양탄소 축적변화량 산정식〉

$$\Delta C_{Soils} = \Delta C_{Mineral} - L_{Organic} + \Delta C_{Inorganic}$$

ΔC_{Soils}	: 타토지에서 전용된 초지에서 연간의 토양 탄소 축적 변화[t C/yr]
$\Delta C_{Mineral}$	: 타토지에서 전용된 초지에서 무기질 토양에서의 연간의 탄소 축적 변화[t C/yr]
$L_{Organic}$	: 유기토양에서 연간 손실되는 탄소[t C/yr]
$\Delta C_{Inorganic}$	: 토양의 연간 무기탄소 축적량의 변화[t C/yr], Tier 3 미 적용 시 0

자료: 2006 IPCC GL, Vol.4, Ch.2, Equation 2.24

〈초지의 무기질 토양 탄소 축적변화량 산정식〉

$$\Delta C_{Mineral} = \frac{(SOC_0 - SOC_{(0-T)})}{D}$$

$$SOC = \sum_{c,s,i} (SOC_{REF_{c,s,i}} \cdot F_{LU_{c,s,i}} \cdot F_{MG_{c,s,i}} \cdot F_{I_{c,s,i}} \cdot A_{c,s,i})$$

T가 ≥ 20년이면, 이 식에서 D를 대신하여 T를 사용

$\Delta C_{Mineral}$	: 무기질 토양에서의 연간의 탄소 축적 변화[t C/yr]
SOC_0	: 인벤토리 대상연도의 토양 유기탄소 축적[t C/ha]
$SOC_{(0-T)}$	: 인벤토리 대상기간의 토양 유기탄소 축적[t C/ha]
T	: 인벤토리 대상기간 20년[yr]
D	: 해당 인벤토리 기간의 연수[yr]
c	: c 는 기후형, s 는 토양형, i 는 주요 농경지 체계
SOC_{REF}	: 기본 토양유기탄소 축적계수[t C/ha]
F_{LU}	: 토지이용 또는 토지이용 변화 형태에 따른 축적변화계수
F_{MG}	: 관리 체계에 따른 축적변화계수
F_I	: 유기물 사용에 따른 축적변화계수
A	: 토지이용 범주별 면적[ha]

자료: 2006 IPCC GL, Vol.4, Ch.2, Equation 2.25 Formulation A

6.4.2.2.2 배출·흡수계수

타토지에서 전용된 초지 부문의 토양 유기탄소 축적량(SOC)을 산정하기 위해 우리나라 기후대를 고려하여 2006 IPCC GL의 기본 토양 유기탄소 축적계수(SOC_{REF}) 및 국가 고유 배출·흡수계수를 적용하였다.

우리나라의 기후대는 난온대 습윤(Warm Temperate, moist)에 해당되며, 국내 토양형은 HAC(High Activity Clay) 토양, LAC(Low Activity Clay) 토양, 사질토양(Sandy), 화산회토(Volcanic Clay)가 존재한다. 토양형별 초지 면적은 「한국의 토양분류 및 해설(농촌진흥청, 2011)」을 참고하여 도출하였으며, 각 면적에 토양형별 기본 토양 유기탄소 축적계수(SOC_{REF})와 2006 IPCC GL의 축적변화계수(F_{LU} , F_{MG} , F_I) 기본값 1.0을 적용하여 토양 유기탄소 축적량(SOC)을 산정하였다.

| 표 6-26 | 초지 토양형별 면적 비율

(단위: %)

구분	HAC 토양	LAC 토양	사질토양	화산회토
초지	71.96	4.14	5.45	18.45

자료: 한국의 토양분류 및 해설(농촌진흥청, 2011)

| 표 6-27 | 기본 토양 유기탄소 축적계수(SOC_{REF})

(단위: t C /ha, 토양 깊이 0~30cm)

구분	계수	기후	근거
HAC 토양 ¹⁾	88	난온대 습윤	2006 IPCC GL
LAC 토양 ²⁾	63	난온대 습윤	
사질토양	34	난온대 습윤	
화산회토	95	-	국가 고유 배출·흡수계수

주: 1) High activity clay; 2) Low activity clay; CEC/Clay함량 기준 0.3 미만이면 LAC, 이상이면 HAC로 구분

* 기상청 연평균 기후자료(1990~2010), IPCC GL에 따른 우리나라 기후 · 습도 체계는 전국 연평균 13℃, 연평균 강수량/증발량(MAP/PET) 비율 1.19인 난온대 습윤(Warm Temperate, Wet)으로 분류됨

축적변화계수(F_{LU} , F_{MG} , F_I)는 토지이용과 경운방법, 유기물 투입 정도에 따라 구분되는 2006 IPCC GL의 기본계수를 적용하였다. 토지이용 또는 토지이용 변화 형태에 따른 축적변화계수인 F_{LU} 는 전체 초지와 전체 기후체계에 대한 2006 IPCC GL의 기본계수인 1.0을 적용하였다. 초지 관리 체계에 따른 축적변화계수인 F_{MG} 는 국내 초지의 관리상태를 지속적으로 관리되는 손상이 없는 초지로 보고 1.0을 적용하였다. 유기물 시용에 따른 축적변화계수인 F_I 는 국내 초지의 기본적 시용량을 가정하여 1.0을 적용하였다.

| 표 6-28 | 초지 관리활동 종류별 축적변화계수

구분	수준	기후형	기본계수
토지이용(F_{LU})	전체 초지	전체	1.0
초지관리 상태(F_{MG})	지속적으로 관리되는 손상없는 초지 (Nominally managed; non-degraded)	전체	1.0
	손상된 비관리 초지 (Moderately degraded)	온/한대	0.95
	장기적으로 손상된 초지 (Severely degraded)	전체	0.7
	정기적으로 관리되는 초지 (시비, 종자개량, 관개 등 포함)(Improved)	온/한대	1.14
유기물 시용(F_I) (초지 개선을 위한 시비에 한함)	기본적 시용(Nominal)	전체	1.0
	초지개선을 위한 추가 시용(High)	온/한대	1.11

자료: 2006 IPCC GL Vol. 4 Table 6.2

6.4.2.2.3 활동자료

타토지에서 전용된 초지 부문에서 활동자료로 활용한 통계는 「지적통계(국토교통부)」의 목장용지 면적(1987~2023년)이며, 타토지에서 전용된 초지 면적은 인벤토리 해당연도로부터 20년 이전의 초지 면적에서 변화된 면적분을 적용하였다. 2006 IPCC GL의 기본 인벤토리 대상 기간 20년에 따라, 국내에 존재

하지 않는 1970년부터 1977년의 초지 면적 자료는 외삽을 거쳐 활동자료 시계열 완전성을 보완하였다.

| 표 6-29 | 타토지에서 전용된 초지 부문 활동자료 수집방법(1990-2023)

기간	작성기관	문서명	수집 대상 활동자료
1970-2023	국토교통부	지적통계	목장용지 면적
1970-2023	농촌진흥청	한국의 토양분류 및 해설	토양형별 비율

| 표 6-30 | 초지 부문 활동자료(1990-2023)

(단위: kha)

구분	1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023
타토지에서 전용된 초지 면적(A)	43	47	14	2	0.4	0	0
타토지로 전용된 초지 면적(B)	0	0	0	0	0	0.08	0.5
초지 순면적 변화(A-B)	43	47	14	2	0.4	-0.08	-0.5

6.4.2.3 시계열 일관성

타토지에서 전용된 초지 부문 온실가스 배출량은 1978년부터 2023년까지 국토교통부의 「지적통계」 자료를 활용하여 해당 활동자료에 일관된 방법론과 배출계수를 적용하여 CO₂를 산정하였다.

6.4.2.4 재계산

재계산은 수행하지 않았다.

6.5 습지(4.D.)

습지(4.D.)는 2006 IPCC GL, 2013 Supplement(습지)의 일반적인 정의에 따라 영구적 또는 일시적으로 담수, 기수, 염수가 지표면을 덮고 있는 지역을 의미하며 우리나라에서는 내륙습지와 연안습지로 구분된다. 내륙습지와 연안습지는 관련 법(습지보전법, 갯벌법, 공유수면관리법) 하에서 국가 차원의 체계적이며 지속적인 관리를 실시하고 있다. 습지 부문은 토양에서의 온실가스 배출·흡수량을 산정하며, 세부 부문별로 살펴보면 내륙습지는 인위적 침수 및 배수가 일어나는 침수지에서의 배출·흡수량을 산정하고, 연안습지는 염습지와 해초대의 회복(Rewetting)¹⁸⁾, 재녹화(Revegetation)¹⁹⁾ 및 조성(Creation)²⁰⁾에 따른 온실가스 배출·흡수량을 산정한다.

2023년 습지 부문 배출량은 388 천톤 CO₂-eq로 1990년 대비 44 천톤 CO₂-eq 증가하였다. 그 중 내륙습지 부문 배출량은 411 천톤 CO₂-eq로 1990년 대비 46.2 천톤 CO₂-eq 증가하였으며, 연안습지 부문 흡수량은 23 천톤 CO₂-eq로 1990년 대비 2 천톤 CO₂-eq 증가하였다.

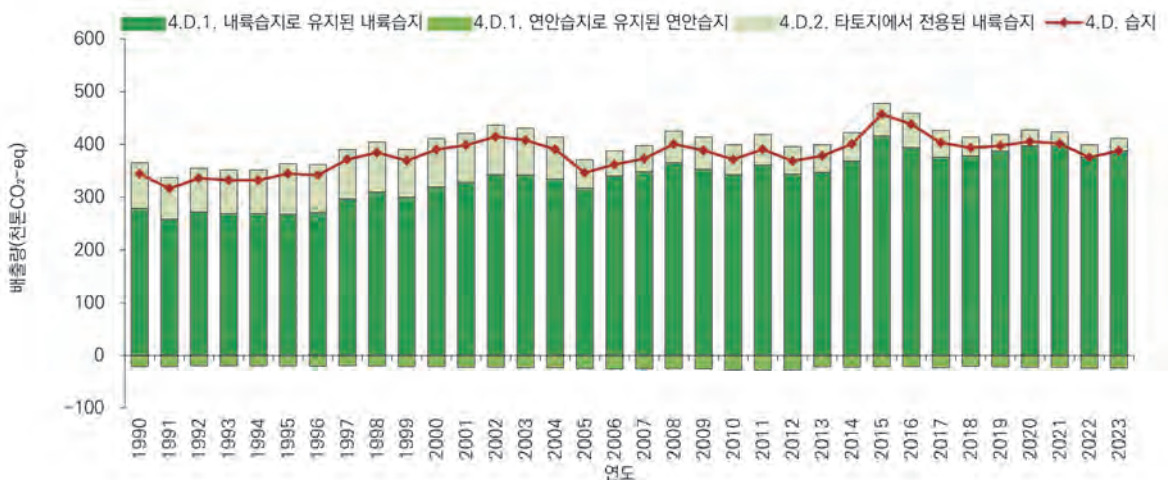


그림 6-6 | 습지 부문 온실가스 배출량 및 흡수량(1990-2023)

표 6-31 | 습지 부문 온실가스 배출량 및 흡수량(1990-2023)

(단위: 천톤 CO₂-eq)

구분	1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023
4.D. 습지	344	390	372	394	402	376	388
4.D.1. 습지로 유지된 습지	258	298	315	358	375	352	365
4.D.1. (내륙)	279	319	342	378	397	376	388
4.D.1. (연안)	-21	-21	-28	-20	-22	-24	-23
4.D.2. 타토지에서 전용된 습지	86	92	57	36	27	24	23
4.D.2. (내륙)	86	92	57	36	27	24	23

18) 배수되거나 건조된 연안습지에 수위를 다시 높여 습지의 수문환경을 복원하는 활동

19) 훼손된 연안습지에 식생을 다시 심거나 자연적으로 식생이 복귀하도록 유도하여 생태적 기능을 회복하는 활동

20) 기존에는 습지가 아니었던 곳에 연안습지의 지형과 수문, 식생을 인위적으로 조성하는 활동

6.5.1 습지로 유지된 습지(4.D.1.)

	산정온실가스	방법론	배출계수	활동자료	탄소저장고
2023년 기준	(내륙) CH ₄	Tier 1	D	내륙습지 면적	토양탄소
	(연안) CO ₂	Tier 1, 2	D, CS	연안습지 면적	토양탄소

6.5.1.1 내륙습지로 유지된 내륙습지

6.5.1.1.1 배출·흡수원 개요

내륙습지로 유지된 내륙습지(4.D.1.)는 침수지와 이탄지로 구분되며, 침수지의 경우, 하천과 댐, 호수, 연못 등 대부분의 습지에 수위 조절, 식생 관리 등 인위적인 관리가 이루어지고 있다. 따라서 「지적통계(국토교통부)」 지목 중 침수지에 해당하는 구거, 유지, 양어장 면적을 모두 관리되는 내륙습지로 구분하여 온실가스 배출량을 산정한다. 다만, 침수지에서의 CO₂, N₂O 배출량 산정은 2006 IPCC GL에서 제시되지 않았기 때문에 산정하지 않았고, CH₄는 2006 IPCC GL 부록에 제시된 방법론을 기준으로 산정하였다.

이탄지의 경우, 2006 IPCC GL에서 이탄 채취에 따른 CO₂, CH₄, N₂O 배출과 침수지(flooded land)에서의 공기계면(air-water interface) 분자확산 및 기포발생에 의한 CO₂, CH₄, N₂O 배출량을 보고하도록 하고 있다. 우리나라에는 이탄지가 극히 적은 면적을 차지하는 것으로 알려져 있으며²¹⁾, 이탄 추출 또는 추출 준비 단계에 있는 지역은 없어서 미산정으로 보고하였다(NO).

내륙습지로 유지된 내륙습지에서의 배출량은 388 천톤 CO₂-eq로 1990년 대비 110 천톤 CO₂-eq 증가하였다.

표 6-32 | 내륙습지로 유지된 내륙습지 부문 온실가스 배출량 및 흡수량(1990-2023)

(단위: 천톤 CO₂-eq)

구분	1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023
내륙습지로 유지된 내륙습지	279	319	342	378	397	376	388

6.5.1.1.2 방법론

1) 산정방법

내륙습지로 유지된 내륙습지 부문은 침수지에서 토양탄소의 분해에 따른 기체확산에 의한 CH₄ 배출량은 2006 IPCC GL의 Vol.4 Appendix 3에 따라 산정하였다. 침수지의 CH₄ 배출량은 연중 비결빙일수(P)에 일일 평균 확산 배출량 및 침수지 면적을 곱하여 산정하였다.

21) Lee et al.(2022)에 따르면 현재 알려진 이탄습지의 면적은 약 276.2ha(국토면적의 0.0027%)임

〈내륙습지(침수지)의 CH₄ 배출량 산정식〉

$$CH_4 emissions_{WW flood} = P \times E(CH_4)_{diff} \times A_{flood, total surface} \times 10^{-6}$$

$CH_4 emissions_{WW flood}$: 습지에서 발생하는 CH₄ 총배출량[Gg CH₄/yr]

P : 비결빙 기간[일, day]

$A_{flood, total surface}$: 전체 침수지 면적, 호수 · 강 포함[ha]

$E(CH_4)_{diff}$: 일일 평균 확산 CH₄ 배출량[kg CH₄/ha/day]

자료: 2006 IPCC GL, Vol.4, Appendix 3, Equation 3A.1

연도별 비결빙일수(P)는 기상청의 기상관측지점에서 발표하는 연도별 결빙일수(1990-2023)를 기초 자료로 활용하였으며, 권역별 습지면적 비율을 고려하여 가중평균값을 적용하였다.

표 6-33 | 연도별 비결빙일수(1990-2023)

(단위: 일)

구분	1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023
연도별 비결빙일수(P)	275	268	263	283	295	279	287

주: 권역구분(6): 경기, 강원, 경상, 제주, 충청, 전라

자료: 기상청에서 수집·제공하고 있는 연도별 기상관측소의 결빙일수(1990-2023) 자료를 활용하여 권역별 습지면적 비율을 고려하여 가중평균 값에 의해 계산된 값임

2) 배출·흡수계수

내륙습지로 유지된 내륙습지 부문의 일일 평균 확산 CH₄ 배출계수는 2006 IPCC GL Vol.4 Appendix 3, Table 3A.2에서 제시된 난온대 습윤지역(Warm Temperate, moist)에 해당하는 0.15 kg CH₄/ha/day를 적용하였다.

3) 활동자료

내륙습지로 유지된 내륙습지 부문에서 침수지의 CH₄ 배출량 산정을 위한 활동자료는 「지적통계(국토교통부)」에서 구거, 유지, 양어장의 지목으로 수집된 면적을 기초자료로 하였다.

2023년 내륙습지로 유지된 내륙습지 면적은 312 천 ha으로 전년 대비 2.5 천 ha가 증가하였다.

표 6-34 | 내륙습지로 유지된 내륙습지 부문 활동자료 수집방법(1990-2023)

기간	작성기관	통계명	수집 대상 활동자료
1980-2023	국토교통부	지적통계	구거, 유지, 양어장 면적

| 표 6-35 | 내륙습지로 유지된 내륙습지 부문 면적 활동자료(1990-2023)

(단위: kha)

구분	1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023
전용 후 10년 초과 침수지	203	241	283	303	309	310	312

6.5.1.1.3 시계열 일관성

내륙습지로 유지된 내륙습지 부문은 1980년부터 2023년까지 「지적통계(국토교통부)」의 지목별 면적 통계 중 구거, 유지, 양어장의 자료와 「기상연보(기상청)」에서 제공하는 결빙일수를 적용하고, 동일한 산정방법과 배출계수를 적용하여 시계열의 일관성을 확보하고 있다.

6.5.1.1.4 재계산

재계산은 수행하지 않았다.

6.5.1.1.5 개선계획

현재 내륙습지 부문은 「지적통계(국토교통부)」의 구거, 유지, 양어장을 내륙습지로 구분하여 온실가스 통계를 산정하고 있다. 향후 정밀한 활동자료 확보를 통해 침수지역(공기계면의 분자확산에 의한 CH₄ 산정)과 비침수지역(식생, 토양, 고사·유기물 등 산정)을 구분하여 배출·흡수량 산정에 정확성을 높일 계획이다. 또한, 2019 IPCC Refinement 방법론의 CH₄ 배출 산정체계를 도입하여, 침수지역에서는 수면을 통한 분자확산(diffusion)과 기포 이탈(ebullition)을 구분하여 반영하는 등 배출 특성을 차등화하여 산정할 계획이다.

6.5.1.2 연안습지로 유지된 연안습지

6.5.1.2.1 배출·흡수원 개요

연안습지로 유지된 연안습지(4.D.1.)는 2013 Supplement(습지)에 따라 조석 영향을 받는 담수습지(tidal freshwater), 염분이 낮은 습지인 기수(brackish), 염분 농도가 높은 염수(saline water), 관다발 식물이 서식하는 습지 등 관리된 식생 연안습지에서의 유기·무기토양으로 구분하여 산정한다. 식생 연안습지는 맹그로브숲, 염습지, 해초대 등으로 구분되며, 우리나라에는 맹그로브의 서식이 보고된 바가 없으므로 염습지와 해초대 토양에서의 온실가스 흡수량을 산정한다.

우리나라는 연안습지의 생태계 보호와 지속 가능한 이용을 위해 갯벌관리구역, 해양보호구역, 습지보호지역 등 보호구역을 지정하고 관리한다.²²⁾ 또한, 「갯벌법」, 「해양생태계법」, 「습지보전법」 등을 통해 오염물질 관리, 유해 생물 제거, 서식지 복원 등 생물다양성 보전 조치 및 훼손 행위를 제한한다. 이처럼 관리 및 보호가 이루어진 연안습지는 식생의 광합성, 포화토양 내 혐기성 조건, 외부에서 유입된

22) 「갯벌법」 제10조, 「습지보전법」 제8조, 「해양생태계법」 제25조, 「공유수면관리법」 제4조

유기탄소 포집 등의 작용으로 토양으로 유입된 유기탄소를 장기적으로 저장하므로, 이에 따른 CO₂ 흡수량을 산정하였다.

또한, 연안습지는 복원이나 조성을 통해 해수가 유입되어 배수된 토양이 회복된 경우 미생물 분해가 호기성에서 혐기성 조건으로 바뀌어 CH₄이 배출될 수 있다. 2013 Supplement(습지)의 산정방법론에 따르면 토양염도가 18 ppt 이상일 경우 CH₄는 미배출로 산정되며, 현재 우리나라 연안습지는 해안선 바깥의 갯벌 환경으로 토양염도가 18 ppt 이상인 것으로 간주하여 CH₄ 미배출로 산정하였다(NA).

연안습지로 유지된 연안습지에서의 흡수량은 23 천톤 CO₂-eq로 1990년 대비 2 천톤 CO₂-eq 증가하였다.

표 6-36 | 연안습지로 유지된 연안습지 부문 온실가스 배출량 및 흡수량(1990-2023)

(단위: 천톤 CO₂-eq)

구분	1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023
염습지	-11	-11	-18	-10	-11	-12	-12
해초대	-10	-10	-10	-10	-11	-11	-11
합계	-21	-21	-28	-20	-22	-24	-23

6.5.1.2.2 방법론

1) 산정방법

○ 토양탄소

연안습지로 유지된 연안습지 부문의 산정방법은 2013 Supplement(습지)에 제시된 연안습지의 회복, 재녹화 및 조성에 따른 토양탄소 축적변화량 산정을 위한 Tier 1 방법론을 적용하였으며, 관리활동에 영향을 받은 연안습지 면적에 CO₂ 배출계수를 곱하여 산정하였다.

〈연안습지 회복, 재녹화 및 조성에 따른 CO₂ 배출량 산정식〉

$$CO_{2\ SO-RE} = \sum_{V,S,C} (A_{RE} \times EF_{RE})_{V,S,C}$$

$CO_{2\ SO-RE}$: 회복, 재녹화 및 조성 활동으로 인한 식생 유형(v), 토양 유형(s) 및 기후(c)별 CO₂ 배출량[t C/yr]

A_{RE} : 식생 유형(v), 토양 유형(s) 및 기후(c)별 회복, 재녹화 및 조성 활동의 영향을 받은 토양 면적[ha]

EF_{RE} : 식생 유형(v), 토양 유형(s) 및 기후(c)별 회복, 재녹화 및 조성 활동의 영향을 받은 무기 및 유기 토양의 CO₂ 배출계수[t C/ha·yr]

자료: 2013 Supplement(습지), Vol.4, Ch.4, Equation 4.7

○ non-CO₂ 배출

회복 및 인위적으로 조성된 염습지에서의 CH₄ 배출량은 2013 Supplement(습지)에 제시된 방법론을

기준으로 하였다. 회복 및 인위적으로 조성된 염습지의 CH₄ 배출량은 다음의 식을 적용하였으며, 활동자료는 조간대 식생 연안습지인 염습지 면적을 적용하였다.

〈회복 및 조성된 염습지 및 맹그로브의 CH₄ 배출량 산정식〉

$$CH_4\text{-SO-REWET} = \sum_V (A_{\text{REWET}} \cdot EF_{\text{REWET}}) V$$

CH₄-SO-REWET : 회복된 습지 및 인위적으로 조성된 연안습지와 관련된 식생 유형별(v) CH₄ 배출량[kg CH₄ /yr]

A_{REWET} : 식생 유형별(v) 회복된 습지 면적(염습지 조성 포함)[ha]

EF_{REWET} : 회복된 무기 및 유기 토양의 식생 유형(v)별 CH₄ 배출계수[kg CH₄ /ha·yr]

자료: 2013 Supplement(습지), Vol.4, Ch.4, Equation 4.9

2) 배출·흡수계수

○ 토양탄소

연안습지 부문의 토양탄소 배출계수(EF_{RE})는 염습지의 경우 2013 Supplement(습지) 4장 표 4.12에서 제시하는 식생재건 시작 시 연간 토양탄소 배출계수 기본값을 적용하였으며, 해초대의 경우 2022년 국가 고유 배출계수로 등록된 토양탄소 축적계수를 적용하였다.²³⁾

표 6-37 | 식생 재건시 연간 토양탄소 배출계수(EF_{RE})

식생 유형	토양탄소 기본 배출계수(tC/ha·yr)	근거
염습지	-0.91	2013 Supplement(습지)
해초대	-0.45	국가 고유 흡수계수

주: 음수는 탄소의 흡수(축적)을 의미함

○ non-CO₂ 배출

국내 염습지는 정의에 따라 조간대 내에 분포하므로 해수포화토(토양염도 18ppt 이상)로 구분된다. 따라서 2013 Supplement(습지)에 제시된 식생 연안습지 회복에 따른 CH₄ 배출계수 기본값인 0을 적용하였다(NA).

표 6-38 | 식생 연안습지 회복에 따른 CH₄ 배출계수(EF_{RE}) 기본값

식생 유형	염도(ppt)	CH ₄ 기본 배출계수 (kg CH ₄ /ha·yr)	근거
조간대 담수 및 기수습지, 맹그로브	<18	193.7	2013 Supplement(습지)
조간대 염수습지, 맹그로브	>18	0	

23) 국가고유 배출·흡수계수(2022) 전국 해초대 중 대표지 5개 지역(거제, 남해, 장흥, 삼척, 군산)을 선정하고, 코어링을 통해 획득한 토양 샘플을 바탕으로 건조밀도, 총유기탄소함량, 퇴적률을 측정하여 연간 단위면적당 토양탄소 축적량을 산정함. 이는 2013 Supplement(습지)에 제시된 회복, 재녹화 및 조성 관리 활동의 해초대 토양탄소 기본축적계수의 범위(0.09-1.12 tC/ha·yr)에 포함됨

3) 활동자료

연안습지로 유지된 연안습지 부문에서 염습지와 해초대의 흡수량 산정을 위한 활동자료는 해양수산부에서 매년 실시하는 국내 블루카본 모니터링 및 국가 블루카본 정보시스템 자료를 활용하였다. 2023년 염습지 분포면적은 4 천 ha로 전년 대비 0.4% 증가하였으며, 2023년 해초대 분포면적은 7 천 ha로 전년 대비 4.7% 감소하였다.

표 6-39 | 연안습지로 유지된 연안습지 부문 활동자료 수집방법(1990-2023)

기간	작성기관	통계명	수집 대상 활동자료
1990-2023년	해양수산부	국가 블루카본 정보시스템 (bluecarbon.kr)	전국 연안습지 연도별 염습지 분포면적
2016-2023년	해양수산부	국가 블루카본 정보시스템 (bluecarbon.kr)	전국 연안습지 연도별 해초대 분포면적

주: 해초대 분포면적은 Sentinel-2 위성영상을 활용하였기 때문에 2016년부터 자료가 존재하며, 그 이전 1990-2015년 기간의 면적은 2016년 면적과 동일하게 적용함

표 6-40 | 연안습지로 유지된 연안습지 부문 면적 활동자료(1990-2023)

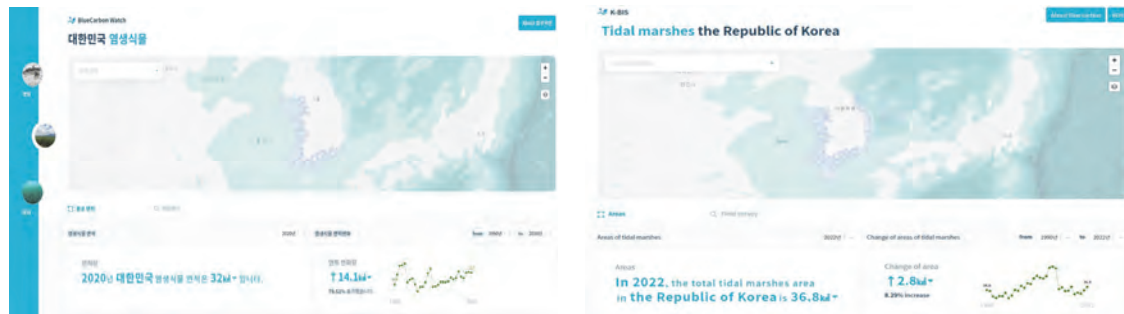
(단위: kha)

구분	1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023
염습지	3	3	5	3	3	4	4
해초대	6	6	6	6	7	7	7
합계	9	9	11	9	10	11	11

BOX 2. 국가 블루카본 정보시스템(Korea Blue Carbon Information System, K-BIS)

1. 개요

- 연안습지 부문 국가 온실가스 인벤토리 산정을 위한 기초자료와 생산방법을 투명하게 공개하기 위해 해양수산부로부터 위탁받아 해양환경공단이 운영하는 시스템 (bluecarbon.kr)
- 전국 연도별 염습지 및 해초대 분포면적을 공간정보 형태로 제공하고, 해당 자료 출처는 해양수산부의 '국가 블루카본 온실가스 인벤토리 구축' 사업임. 또한, 해양수산부가 5년 주기로 시행하는 갯벌면적조사의 결과도 함께 제공
- 자료 투명성 및 신뢰성 확보를 위해 '원격탐사 기반 연안습지 인벤토리 활동자료 생산방법 (SOP)'도 제공하며, 별도 영문페이지 서비스도 제공



2. 염습지 및 해초대 분포면적 생산방법

- 염습지 분포면적 생산 시 Landsat 위성영상 활용. 다양한 분광지수 산출을 통해 식생과 수역을 식별하고 빈도수 분석을 실시한 후 후처리를 통해 갯벌면적 내 1990년 이후의 연도별 염습지 분포면적 생산
- 해초대 분포면적 생산 시 Sentinel-2 위성영상 활용. 최대한 낮은 조위의 영상을 수집하고 SVM(Support Vector Machine) 기법을 적용해 식생을 식별한 후 후처리를 통해 2016년 이후의 연도별 해초대 분포면적 생산

6.5.1.2.3 시계열 일관성

연안습지로 유지된 연안습지 부문은 시계열에 대해 동일한 산정방법, 배출계수, 활동자료 출처를 사용하였다. 1990년부터 2023년까지의 매년 활동자료는 국가 블루카본 정보시스템에서 수집하는 위성영상 기반 면적 통계 중 염습지와 해초대를 대상으로 적용하여 시계열의 일관성을 확보하고 있다. 다만, 해초대의 경우 활용한 Sentinel-2 위성이 2015년부터 운용되어 2016년부터의 면적만 산출 가능했으며, 그 이전 연도별 면적은 모두 2016년 면적과 동일하다고 가정하였다.

6.5.1.2.4 재계산

재계산은 수행하지 않았다.

6.5.1.2.5 개선계획

연안습지로 유지된 연안습지 부문은 해초대 활동자료 중 자료의 부재로 2016년 면적과 동일한 값으로 가정한 1990-2015년 면적에 대한 시계열 일관성을 보완할 계획이며, 활동자료의 부재로 산정하지 못한 수산양식에 따른 N_2O 배출량도 2013 Supplement(습지)의 산정방법론에 따라 적합한 활동자료를 구축하여 산정할 계획이다.

6.5.2 타토지에서 전용된 습지(4.D.2.)

6.5.2.1 배출·흡수원 개요

2023년 기준	산정온실가스	방법론	배출계수	활동자료	탄소저장고
	CO ₂	Tier 1	D	내륙습지 면적	토양탄소

타토지에서 전용된 습지(4.D.2.) 부문은 10년 전 대비 변화한 내륙습지 증감 면적에 대해 CO₂ 배출량을 산정하며²⁴⁾, 내륙습지의 정의와 구분은 습지로 유지된 습지(4.D.1.)와 같다. N₂O 배출량은 2006 IPCC GL에 산정방법이 제시되어 있지 않기 때문에 산정하지 않았고, CH₄ 배출량은 습지로 유지된 습지(4.D.1.)에 포함된다는 가정(IE)하에 산정하지 않았다.

타토지에서 전용된 내륙습지에서의 배출량은 23 천톤 CO₂-eq로 1990년 대비 63 천톤 CO₂-eq 감소하였다.

표 6-41 | 타토지에서 전용된 습지 부문 온실가스 배출량 및 흡수량(1990-2023)

(단위: 천톤 CO₂-eq)

구분	1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023
타토지에서 전용된 습지	86	92	57	36	27	24	23

6.5.2.2 방법론

6.5.2.2.1 산정방법

타토지에서 전용된 습지 부문의 CO₂ 배출량은 2006 IPCC GL Vol.4 Appendix 2에 따라 산정하였으며, 비결빙일수(P)에 일일 평균 확산 배출량(E(CO₂)_{diff}), 전체 침수지 면적(A), 전체 침수지 면적 대비 최근 10년 내 침수지로 전용된 면적비율(f_A) 등을 곱하여 산정하였다.

연도별 비결빙일수(P)는 기상청의 기상관측지점에서 발표하는 연도별 결빙일수(1990-2023)를 기초 자료로 활용하여 권역별 습지면적 비율을 고려하여 가중평균값을 적용하였으며, 습지로 유지된 습지(4.D.1.)에서 적용한 비결빙일수(P)와 동일하다.

24) 우리나라는 이탄지가 극히 적은 면적을 차지하고 있어 산정대상에서 제외하였음. 타토지에서 전용된 습지에서의 N₂O 배출량 산정은 2006 IPCC GL에 산정방법이 제시되어 있지 않기 때문에 산정하지 않음.

〈 타토지에서 전용된 습지(침수지) 부문 CO₂ 배출량 산정식 〉

$$CO_2 emissions_{LW flood} = P \times E(CO_2)_{diff} \times A_{flood, total surface} \times f_A \times 10^{-6}$$

- $CO_2 emissions_{LW flood}$: 침수지로 전용된 토지에서 발생하는 CO₂ 총배출량[Gg CO₂/yr]
 P : 비결빙 기간[일, day]
 A_{flood} : 전체 침수지 면적, 호수·강 포함[ha]
 $E(CO_2)_{diff}$: 일일 평균 확산 CO₂ 배출량[kg CO₂/ha/day]
 f_A : 전체 침수지 면적 대비 최근 10년 내 침수지로 전용된 면적 비율

자료: 2006 IPCC GL, Vol.4, Appendix 2, Equation 2A.1

6.5.2.2.2 배출·흡수계수

타토지에서 전용된 습지 부문의 배출계수는 2006 IPCC GL에서 제시된 난온대 습윤지역(warm temperate, moist)에 해당하는 비결빙기의 CO₂ 확산 배출계수 기본값(8.1 kg CO₂/ha/day)을 적용하였다.

6.5.2.2.3 활동자료

타토지에서 전용된 습지 부문의 활동자료는 「지적통계(국토교통부)」에서 침수지에 해당하는 구거, 유지, 양어장의 지목으로 수집된 면적을 기초자료로 하였다. CO₂ 배출량 산정을 위한 활동자료는 해당연도(t)를 기준으로 과거 10년 동안의 연간 면적 증가량을 활용하였다.

2023년 타토지에서 전용된 습지 면적은 10 천 ha로 나타났으며, 전년 대비 0.7 천 ha 감소하였다.

표 6-42 | 타토지에서 전용된 습지 부문 활동자료 수집방법(1990-2023)

기간	작성기관	통계명	수집 대상 활동자료
1980-2023	국토교통부	지적통계	구거, 유지, 양어장 면적

표 6-43 | 타토지에서 전용된 내륙습지 부문 면적 활동자료(1990-2023)

(단위: kha)							
구분	1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023
전용 후 10년 이하 침수지	39	42	27	16	11	11	10

6.5.2.3 시계열 일관성

타토지에서 전용된 습지 부문은 동일한 산정방법, 배출계수, 활동자료 출처를 활용하여 시계열의 일관성을 확보하고 있다.

6.5.2.4 재계산

재계산은 수행하지 않았다.

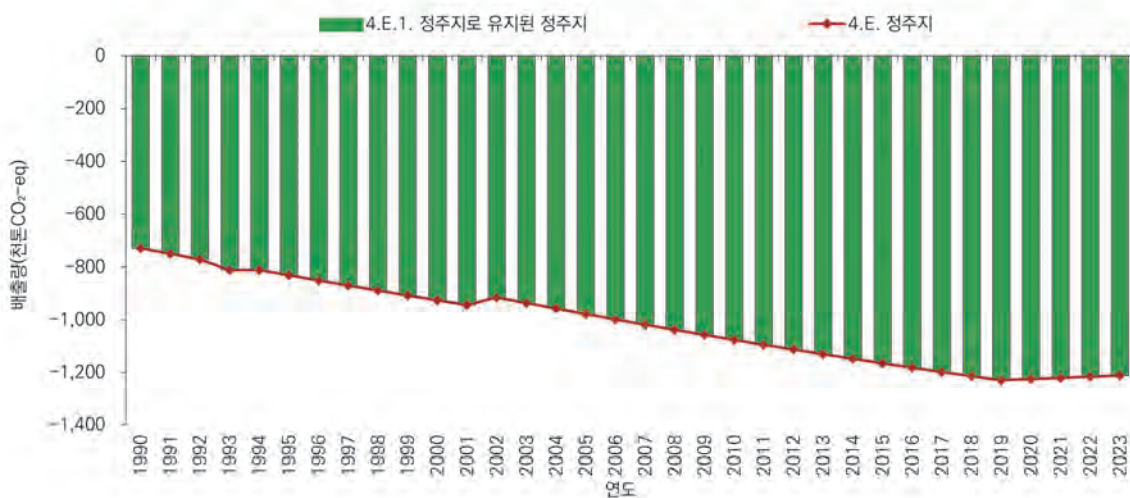
6.5.2.5 개선계획

현재 내륙습지 부문은 별도의 활동자료가 구축되지 않아 「지적통계(국토교통부)」의 구거, 유지, 양어장을 내륙습지로 간주하여 온실가스 통계를 산정하고 있다. 향후 정밀한 활동자료 확보를 통해 침수지역(공기계면의 분자확산에 의한 CH₄ 산정)과 비침수지역(식생, 토양, 고사·유기물 등 산정)을 구분하여 배출·흡수량 산정에 정확성을 높일 계획이다.

6.6 정주지(4.E.)

정주지(4.E.)는 인간의 거주와 사회·경제적 활동을 목적으로 이용되는 모든 토지를 의미하며, 정주지 부문에서는 탄소저장고 중 바이오매스로 인한 흡수량을 산정한다. 2006 IPCC GL에 따르면 정주지 바이오매스는 교목, 관목, 초본식생을 대상으로 하나, 관련 통계가 불충분하므로 정주지 내 바이오매스 중 교목(Trees)만을 대상으로 하였다. 교목의 흡수량 산정에는 수관면적²⁵⁾을 활용하는 방법(Crown cover area method)과 개별 입목의 생장률을 활용하는 방법(Individual plant growth method)이 있다. 현재 정주지 부문은 항공정사영상 등의 자료를 활용하여 정주지에 해당하는 토지에서의 교목 수관면적을 산출하였으며, 이를 바탕으로 CO₂ 흡수량을 산정하였다.

2023년 정주지 부문 흡수량은 1,211 천톤 CO₂-eq로 1990년 대비 482 천톤 CO₂-eq 증가하였다. 정주지 부문의 연간 흡수량은 1990년 이후 증가추세가 이어져 2019년에 최대 흡수량을 기록한 후 2023년 까지 다소 감소하는 것으로 보인다. 이러한 추세는 정주지 부문 교목 바이오매스의 수관면적 변화에 기인하며, 이는 도시 조경 및 녹지 공간 변화 등과 같은 인간 활동과 밀접한 관련이 있을 것으로 보인다.



| 그림 6-7 | 정주지 부문 온실가스 배출량 및 흡수량(1990-2023)

| 표 6-44 | 정주지 부문 온실가스 배출량 및 흡수량(1990-2023)

(단위: 천톤 CO₂-eq)

구분	1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023
4.E. 정주지	-729	-926	-1,076	-1,214	-1,220	-1,216	-1,211
4.E.1. 정주지로 유지된 정주지	-729	-926	-1,076	-1,214	-1,220	-1,216	-1,211
4.E.2. 타토지에서 전용된 정주지	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE

주: 2006 IPCC GL에 따라 타토지에서 전용된 정주지 면적에 관한 활동자료가 없는 경우 '정주지로 유지된 정주지'에 '타토지에서 전용된 정주지'를 포함하여 인벤토리를 산정(IE)

25) 정주지 내 교목(키가 2m 이상 자란 나무)이 실제로 덮고 있는 지표면의 면적

6.6.1 정주지로 유지된 정주지(4.E.1.)

6.6.1.1 배출·흡수원 개요

2023년 기준	산정온실가스	방법론	배출계수	활동자료	탄소저장고
	CO ₂	Tier 2a	D	정주지 내 교목 수관면적	입목 바이오매스

정주지로 유지된 정주지(4.E.1.) 부문은 정주지 내 교목의 수관면적을 활용하여 바이오매스 내의 탄소축적 변화에 의한 온실가스 흡수량을 산정한다.

정주지로 유지된 정주지에서의 흡수량은 1,211 천톤 CO₂-eq로 1990년 대비 482 천톤 CO₂-eq 증가하였다.

표 6-45 | 정주지로 유지된 정주지 부문 온실가스 배출량 및 흡수량(1990-2023)

(단위: 천톤 CO₂-eq)

구분	1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023
정주지로 유지된 정주지	-729	-926	-1,076	-1,214	-1,220	-1,216	-1,211

6.6.1.2 방법론

6.6.1.2.1. 산정방법

정주지로 유지된 정주지 부문은 2006 IPCC GL에서 제시된 바이오매스의 탄소축적변화량 산정을 위한 Tier 2a 방법론(수관면적 방법)을 적용하며, 정주지 범위 내 입목 바이오매스 축적 변화는 2006 IPCC GL에서 제시한 획득-손실 방법론을 적용한다.

〈 정주지의 입목 바이오매스 탄소축적변화량 산정식 〉

$$\Delta C_{LB} = \Delta C_G - \Delta C_L$$

ΔC_{LB} : 정주지에서의 바이오매스 축적량 연간 변화[t C/yr]

ΔC_G : 입목 바이오매스 생장으로 인한 연간 탄소 축적량 증가[t C/yr]

ΔC_L : 입목 바이오매스 손실로 인한 탄소 축적량 감소[t C/yr]

자료: 2006 IPCC GL, Vol.4, Ch.2, Equation 2.7

〈 정주지의 수관면적에 따른 탄소축적변화량 산정식 〉

$$\Delta C_G = AT \times CRW$$

ΔC_G : 정주지로 유지된 정주지 내 연간 탄소변화량[t C/yr]

AT : 입목 바이오매스의 총 수관피복면적[ha]

CRW : 입목 바이오매스 수관 면적당 연간탄소흡수량[t C/ha·yr]

자료: 2006 IPCC GL, Vol.4, Ch.8, Equation 8.2

6.6.1.2.2 배출·흡수계수

정주지로 유지된 정주지 부문은 2006 IPCC GL의 기본 흡수계수인 2.9 t C/ha·yr 을 적용하였다.

표 6-46 | 입목 바이오매스 수관면적당 연간 탄소흡수량

지역	연간 탄소 축적량(tC/ha·yr)	근거
미국(포괄적 기준)	2.9 ¹⁾	2006 IPCC GL의 기본계수
호주	3.6 ²⁾	

주: 1) Nowak and Crane 2002; 미국 10개 도시의 평균

2) Brack 2002; 캔버라에서의 모델링 분석

6.6.1.2.3 활동자료

정주지로 유지된 정주지 부문의 활동자료는 국토교통부에서 매년 공표하는 국가통계인 지적통계의 19개 지목 면적과 연속지적도 및 항공정사영상을 활용하였다. 정주지 내 교목의 수관면적을 추정하기 위해, 우선 500m×500m 크기의 격자를 단위로 하여 정주지 내에서 약 10%에 해당하는 표본구를 계통 추출 방식으로 선정하였다. 선정된 표본구에 대해서는 항공사진을 활용한 육안 판독을 통해 수관면적을 구축하였다. 이후 표본구에서 계산된 수관면적에 전체 정주지 면적과 표본구 면적 간의 비율을 적용하여 정주지 전체의 수관면적을 추정하였다.

표 6-47 | 정주지로 유지된 정주지 부문 활동자료 수집방법(1990-2023)

기간	수집기관	통계명	수집 대상 활동자료
1990-2023	국토교통부	지적통계	정주지(19개 지목) 면적
2002, 2019, 2022	국토교통부	연속지적도	정주지(19개 지목) 면적
1996-2005	산림청	제4차 산림항공사진	정주지 바이오매스 면적
2002, 2019, 2022	국토정보지리원	항공정사영상	정주지 바이오매스 면적

주: 2006 IPCC GL에 따라 타토지에서 전용된 정주지 면적에 관한 활동자료가 없는 경우 '정주지로 유지된 정주지'에 '타토지에서 전용된 정주지'를 포함하여 인벤토리를 산정(IE)

표 6-48 | 정주지로 유지된 정주지 부문 면적 활동자료(1990-2023)

(단위: kha)							
구분	1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023
정주지 면적	541	693	885	1,062	1,114	1,129	1,141
정주지 전체 수관면적	69	87	101	114	115	114	114

6.6.1.3 시계열 일관성

정주지로 유지된 정주지 부문은 동일한 산정방법, 흡수계수, 활동자료 출처를 사용하고 있다. 활동 자료의 경우, 국토교통부의 지적통계와 연속지적도를 적용하나, 정주지로 분류된 표본구의 수관면적은 2002, 2019, 2022년에 한해 구축되어 그 외의 연도별 면적은 모두 2006 IPCC GL에 따라 내·외 삼법으로 산출하여, 시계열 일관성을 확보하였다.

6.6.1.4 재계산

재계산은 수행하지 않았다.

6.6.2 타토지에서 전용된 정주지(4.E.2.)

2006 IPCC GL에서 제시된 접근법 1(Approach 1)의 개념에 따라 타토지에서 전용된 정주지(4.E.2.) 관련 통계는 정주지로 유지된 정주지(4.E.1.)에 포함하여 작성하였다(IE).

6.7 기타토지(4.F.)

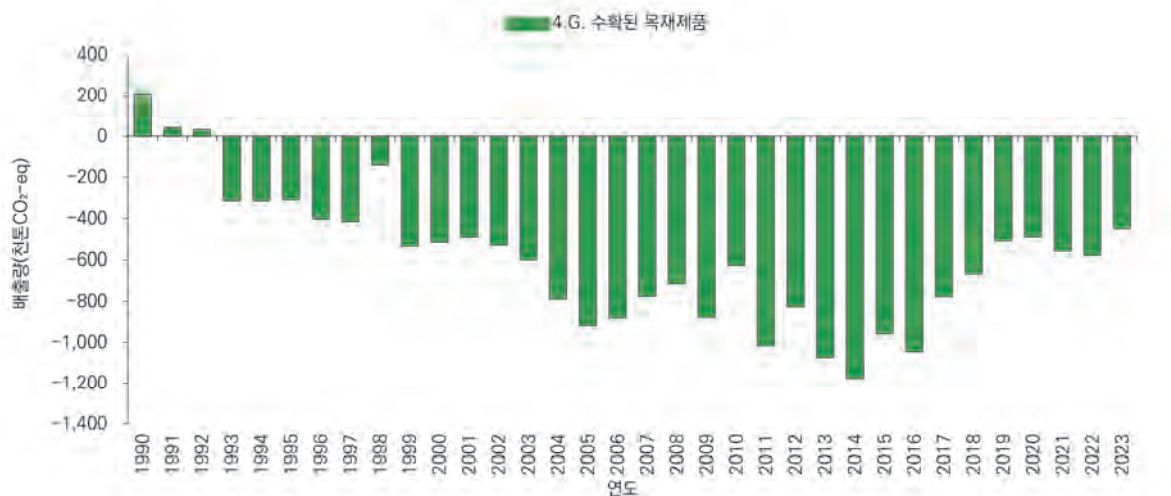
기타토지 부문(4.F.)은 2006 IPCC GL에 따라 나지와 암석, 빙하 등으로 5개의 토지영역(산림지, 농경지, 초지, 습지, 정주지)에 속하지 않은 지역을 대상으로 한다. 우리나라는 현재 기타토지 관련 통계가 미비한 상황으로 미산정으로 보고한다(NE).

6.8 수확된 목재제품(4.G.)

수확된 목재제품(Harvested Wood Products, 이하 HWP)²⁶⁾은 나무가 생장 과정에서 흡수한 CO₂가 벌채된 후 목재에 탄소 형태로 저장된 것으로, LULUCF 분야의 탄소저장고 중 하나로 간주된다. 목재제품에 저장된 탄소는 시간이 지남에 따라 산화·분해되어 대기 중에 CO₂로 배출되며, 배출 속도는 목재제품별 반감기에 따라 달라진다. 따라서 수확된 목재제품(4.G.) 부문에서의 배출·흡수량은 목재제품별 생산량 자료를 기반으로 당해 연도에 새롭게 수확된 목재제품의 탄소저장량과 과거에 축적된 목재제품에서 발생하는 탄소배출량을 함께 고려하여 산정한다. 다만, 2006 IPCC GL에 따르면 수확된 목재제품을 폐기하여 매립할 경우 일부는 CH₄로 전환되어 배출되며 이는 폐기물 분야에서 보고한다. 또한, 목재제품을 연소하여 에너지로 활용할 때 발생하는 CH₄와 N₂O 등 non-CO₂ 배출량은 에너지 분야에서 보고한다.

2023년 수확된 목재제품 부문의 흡수량은 449 천톤 CO₂-eq로 1990년은 206 천톤 CO₂-eq의 배출량으로 산정되었으나 1993년부터 흡수량으로 전환되었다. 이는 목재제품의 생산량 증감에 따라 추이가 변화하는 것으로 1990년은 목재제품 생산량 600 천 m³이었으나 2023년 생산량이 1,941 천 m³으로 증가하였다.

26) 산림지의 탄소저장고 중 하나인 수확된 목재제품(HWP)에서의 저장량을 증대시키기 위해 건축자재로 사용되는 목재에 대해 제품수명이 긴 용도재료를 이용할 계획이며 이를 통해 탄소가 저장되는 기간을 증가시켜 탄소저장고를 확대하고 있음. 또한 목재친화도시 조성, 목조건축 확대를 위한 기술 고도화, 플라스틱을 대체하는 목재제품 개발 및 상용화 등의 노력이 이루어지고 있음



| 그림 6-8 | 수확된 목재제품 부문 온실가스 배출량 및 흡수량(1990-2023)

| 표 6-49 | 수확된 목재제품 부문 온실가스 배출량 및 흡수량(1990-2023)

(단위: 천톤 CO₂-eq)

구분	1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023
4.G. 수확된 목재제품	206	-515	-625	-667	-558	-579	-449

6.8.1 배출원 개요

2023년 기준	산정온실가스	방법론	배출계수	활동자료	탄소저장고
	CO ₂	Tier 2	D	제재목, 섬유판, 종이 생산량	수확된 목재제품

수확된 목재제품 부문(4.G.)은 국내에서 수확된 원목(이하 국산 원목)으로 생산된 목재제품을 대상으로 하며, 2006 IPCC GL에 따라 제재목, 목질판상재(섬유판, 합판, 파티클보드), 종이 및 판지로 구분된다. 우리나라의 경우, 합판과 파티클보드는 국산 원목을 이용한 생산이 드물고, 판지는 국산 펄프보다는 재활용된 폐종이가 주로 사용되므로, 제재목, 섬유판, 종이를 대상으로 CO₂ 배출·흡수량을 산정한다.

수확된 목재제품(4.G.) 부문의 흡수량은 449 천톤 CO₂-eq이다. 1990년, 1991년, 1992년의 경우는 각 206, 43, 34 천톤 CO₂-eq의 배출량으로 나타났으며, 이후 1993년부터 모두 흡수량으로 산정되었다.

| 표 6-50 | 수확된 목재제품 부문 온실가스 배출량 및 흡수량(1990-2023)

(단위: 천톤 CO₂-eq)

구분	1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023
제재목	4	-35	-101	-139	-118	-174	-118
섬유판	105	-369	-653	-599	-503	-472	-359
종이	97	-111	129	71	63	67	28
합계	206	-515	-625	-667	-558	-579	-449

6.8.2 방법론

6.8.2.1 산정방법

수확된 목재제품의 탄소축적 변화량은 2006 IPCC GL에 제시된 Tier 2 수준의 축적차이법(Stock-Difference Method)에 따라 산정하였으며, 국산 원목을 사용한 목재제품을 산정대상으로 하였다.

수확된 목재제품은 목재가 벌채된 이후 제품으로 전환되어 사용되는 동안 탄소가 유지되는 것을 반영한다. 즉, 목재제품으로 전환된 당해 연도에 목재제품의 탄소저장량은 새롭게 유입되는 탄소 흡수량(Inflow)으로 산정되고, 차년도부터 목재제품별 탄소 반감기(HL=ln(2)/k)에 따라 점진적으로 탄소가 대기 중으로 방출되어 이를 함께 고려하여 산정한다.

〈산림에서 목재제품으로 유입된 탄소축적량 변화량 산정식(축적차이법)〉

$$Inflow_i(i) = HWP_i(i) \cdot CF_i \cdot 10^{-6}$$

$$C_i(i+1) = e^{-k} \cdot C_i(i) + \left[\frac{(1-e^{-k})}{k} \right] \cdot Inflow_i(i)$$

$$\Delta C_i(i) = C_i(i+1) - C_i(i)$$

i	: 연도[년]
$Inflow_i(i)$	: i년도에 새롭게 유입(이용)되는 목재제품별(i) 탄소저장량[Mt C]
$HWP_i(i)$	: i년도의 목재제품별(i) 생산량(m ³ 또는 Mg)
CF_i	: 목재제품별(i) 탄소전환계수(Mg C/m ³ 또는 Mg C/Mg)
$C_i(i)$	: i년도 초에 이용 중인 목재제품별(i) 탄소저장량[Mt C]
k	: 분해상수($k=\ln(2)/HL$, HL은 목재제품의 반감기)
$\Delta C_i(i)$	: i년도에 축적된 목재제품별(i) 탄소저장량[Mt C]

자료: 2006 IPCC GL, Vol.4, Ch.12, Equation 12.1, 2019 Refinement Vol.4, Ch.12, Equation 12.6

〈(목재제품 탄소축적량의) 이산화탄소 축적량으로의 전환〉

$$\Delta CO_2(i) = -44/12 \cdot \sum_{l=1}^n \Delta C_l(i)$$

$\Delta CO_2(i)$	: i년도에 축적된 이산화탄소축적량[Mt CO ₂]

자료: 2019 Refinement, Vol.4, Ch.12, Equation 12.1

산정식에 따르면 연도 초에 이용 중인 탄소저장량($C_l(i)$)은 전년도 탄소저장량을 기반으로 산정된다. 산정 시작년도인 1990년의 경우, 2019 Refinement에 따라 시작년도를 포함한 5년간(1990-1994년)의 제품별 생산량 자료를 평균하고 이를 탄소 분해상수로 나눈 값을 초기 탄소저장량으로 적용하였다.

〈 초기 수확된 목재제품 탄소저장량의 추정방법 〉

$$C_l(t_0) = \frac{Inflow_{l_{average}}}{k}$$

$$With: Inflow_{l_{average}} = \left[\sum_{i=t_0}^{t_4} Inflow_l(i) \right] / 5$$

자료: 2019 Refinement, Vol.4, Ch.12, Equation 12.4

6.8.2.2 배출·흡수계수

수확된 목재제품 부문의 연간 탄소 흡수량 산정에 필요한 배출·흡수계수인 기본밀도(D)와 탄소분율(FR)을 곱한 탄소전환계수(CF)와 배출·흡수계수인 반감기(H_L)는 2019 Refinement에서 제시한 기본값을 적용하였다.

표 6-51 | 수확된 목재제품의 탄소전환계수 및 반감기 기본값

구분	기본밀도 (Mg/m³)	탄소분율 (Mg C/Mg)	탄소전환계수 (Mg C/m³)	반감기 (years)	근거
제재목	0.458	0.5	0.229	35	2019 Refinement
침엽수	0.45	0.5	0.225		
활엽수	0.56	0.5	0.28		
목질판상재	0.595	0.454	0.269	25	2019 Refinement
섬유판	0.691	0.427	0.295		
파티클보드	0.596	0.451	0.269		
OSB	0.573	0.463	0.265		
합판	0.542	0.493	0.267		
종이 및 판지	0.9	-	0.386	2	2019 Refinement

주: 종이 및 판지의 기본밀도(Mg/Mg), 탄소전환계수(MgC/Mg)는 무게 단위로 적용함

6.8.2.3 활동자료

2006 IPCC GL에서는 수확된 목재제품을 제재목, 목질판상재(합판, 파티클보드, 섬유판), 종이 및 판지로 구분한다. 우리나라는 국산 원목을 사용한 목재제품을 산정대상으로 하며, 합판, 파티클보드는 국산원목으로 생산된 제품이 드물고, 판지 역시 원목에서 생산된 펄프보다는 재생종이(폐지)가 많이 이용되므로 산정대상에서 제외하였다. 따라서, 대상 목재제품은 제재목, 섬유판, 종이로 구분하여 산정하였다.

제재목의 활동자료는 「목재이용실태조사(산림청)」의 국산원목을 이용한 제재목 생산량(2008-2023년)을 적용하였다. 통계자료가 없는 과거 연도는 「산림임업통계연보(산림청)」에 수록된 용도별 국내재 공급 실적(1990-2007년)에 「목재이용실태조사(산림청)」에서 발표된 5년(2008-2012년) 평균 제재목 이용 비율(전체 국내재 중 제재용으로 사용된 비율)과 제재수율(제재용 원목을 사용해 실제 생산된 제재목의 비율)을 적용하여 국산 제재목의 생산량을 추정하여 적용하였다.

섬유판의 활동자료는 「목재이용실태조사(산림청)」의 섬유판 생산량(2008-2023년)에 국산원목이 차지하는 비율을 적용하여 국산원목을 이용한 섬유판 생산량을 적용하였다. 통계자료가 없는 과거 연도는 「산림임업통계연보(산림청)」의 중밀도섬유판 생산량(1990-2007년)에 「목재이용실태조사(산림청)」의 섬유판 원자재 중 국산원목이 차지하는 비율(2008-2012년)을 적용하여 국산 섬유판 생산량을 추정하여 적용하였다.

종이의 활동자료는 「산림임업통계연보(산림청)」의 지류 생산실적에 「산림임업통계연보(산림청)」에 제시된 펄프 생산 실적의 연도별 펄프자급률을 이용하여 국산원목에 의한 종이 생산량을 추정하여 적용하였다.

표 6-52 | 수확된 목재제품 부문 활동자료 수집방법(1990-2023)

기간	작성기관	통계명	수집 대상 활동자료
1990-2007	산림청	산림임업통계연보	제재목 생산량
2008-2023		목재이용실태조사	
1990-2007		산림임업통계연보	섬유판 생산량
2008-2023		목재이용실태조사	
1990-2023		산림임업통계연보	종이 생산량

표 6-53 | 수확된 목재제품 부문 제품별 생산량 활동자료(1990-2023)

(단위: 천 m³; 천 톤(종이))

구분	1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023
제재목	120	167	268	345	328	399	335
섬유판	66	541	963	1,065	1,015	998	904
종이 ¹⁾	307 (414)	650 (878)	471 (636)	571 (771)	522 (705)	503 (679)	520 (702)
합계	600	1,586	1,867	2,182	2,048	2,077	1,941

주: 1) 종이부문 괄호 안 값은 겉보기 시트 비용적 1.35을 적용하여 무게단위를 부피단위로 환산한 생산량 수치

6.8.3 시계열 일관성

수확된 목재제품 부문은 동일한 산정방법, 배출·흡수계수, 활동자료 출처를 사용하고 있다. 다만, 제재목과 종이 생산량은 2008년부터 「목재이용실태조사(산림청)」에서 조사됨에 따라, 1990년부터 2007년까지의 제재목, 섬유판 생산량은 1968년부터 산림청에서 공표하고 있는 「산림임업통계연보(산림청)」를 추가적인 기초자료로 활용하여 생산량을 추정하여 시계열 일관성을 확보하였다.

6.8.4 재계산

「산림임업통계연보(산림청)」에서 2021년 펄프 자급률을 수정함에 따라 2021년 활동자료 중 종이 및 판지 생산량이 수정되었으며, 그 결과 2021년과 2022년의 순흡수량이 재계산되었다.

6.8.5 개선계획

산림청(국립산림과학원)은 목재제품별 국산목재에 대한 밀도, 탄소분율 등 기초물성값을 축적하여 탄소흡수계수를 개발할 계획이 있으며, IPCC에서 제시한 방법론(ISO 15686)에 따라 국가 고유의 목재이용 실태를 반영한 탄소배출계수인 반감기 값을 개발할 계획이다.

또한, 기초자료의 통합을 통한 시계열 일관성 확보 연구를 수행할 예정이며, 보다 적합한 활동자료 추정 방법론이 개발된다면 재계산을 수행하고자 한다.

PART



폐기물

7.1 개요

7.2 폐기물매립(5.A.)

7.3 고형폐기물의 생물학적 처리 (5.B.)

7.4 폐기물소각 및 노천소각(5.C.)

7.5 하·폐수처리(5.D.)

제 7 장

폐기물

7.1 개요

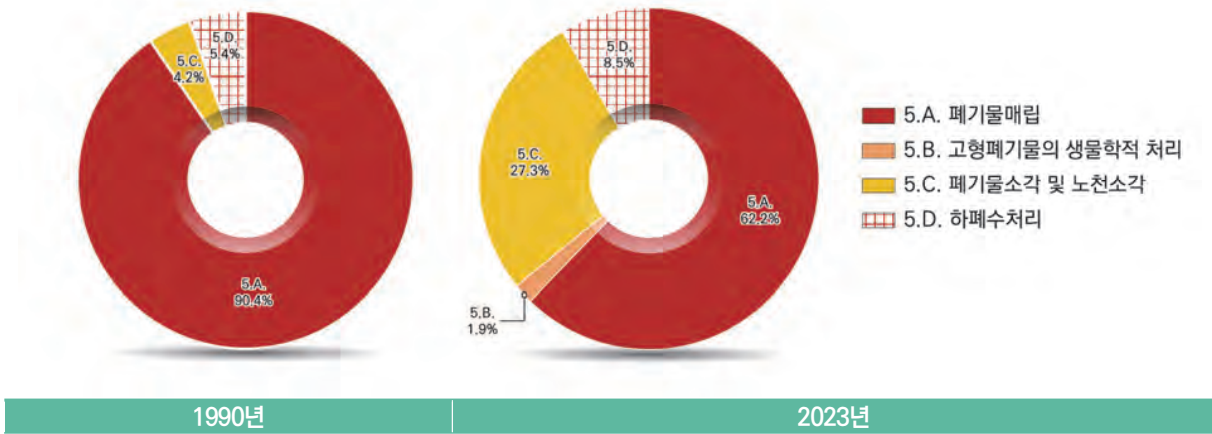
국가 온실가스 통계에서 폐기물 분야는 폐기물 처리 과정에서 발생하는 온실가스 배출을 의미하며, 폐기물매립(5.A.), 고형폐기물의 생물학적 처리(5.B.), 폐기물소각 및 노천소각(5.C.), 하·폐수처리(5.D.) 부문으로 구분하여 산정한다.

폐기물 분야의 세부 배출원별 배출 특성을 살펴보면, 폐기물매립 부문은 매립된 폐기물의 유기물질이 혐기적 환경에서 분해되면서 발생하는 CH_4 배출량을 산정하며, 고형폐기물의 생물학적 처리 부문은 미생물에 의해 유기성 폐기물이 생물학적으로 분해 처리(퇴비화, 혐기성 소화 등)되는 과정에서 배출되는 CH_4 , N_2O 배출량을 산정한다. 폐기물소각 및 노천소각 부문은 화석연료 기반 폐기물의 소각에 의해 배출되는 CO_2 , CH_4 , N_2O 배출량을 산정하며, 하·폐수처리 부문은 하·폐수가 혐기적으로 처리되는 과정에서의 배출되는 CH_4 , N_2O 배출량을 산정하고 있다¹⁾.

폐기물 분야 2023년 배출량은 18.2 백만톤 $\text{CO}_2\text{-eq}$ 로 전년 대비 0.3% 증가하였으며, 국가 총배출량의 2.6%를 차지한다. 폐기물 분야의 가장 큰 배출원은 11.3 백만톤 $\text{CO}_2\text{-eq}$ 을 배출한 폐기물매립 부문으로 폐기물 분야 총배출량의 62.2%를 차지했다. 그 다음으로 폐기물소각이 5.0 백만톤 $\text{CO}_2\text{-eq}$, 하·폐수처리 부문은 1.5 백만톤 $\text{CO}_2\text{-eq}$, 고형폐기물의 생물학적 처리 부문에서는 0.35 백만톤 $\text{CO}_2\text{-eq}$ 을 배출했으며, 각 부문별 배출량 비중은 27.3%, 8.5%, 1.9% 순이었다. 또한, 국가 주요 배출·흡수원으로 선정된 23개 배출·흡수원 중²⁾, 폐기물 분야는 폐기물매립(CH_4), 폐기물소각 및 노천소각(CO_2)이 배출원으로 포함된 것으로 분석되었다(1.4절 참고).

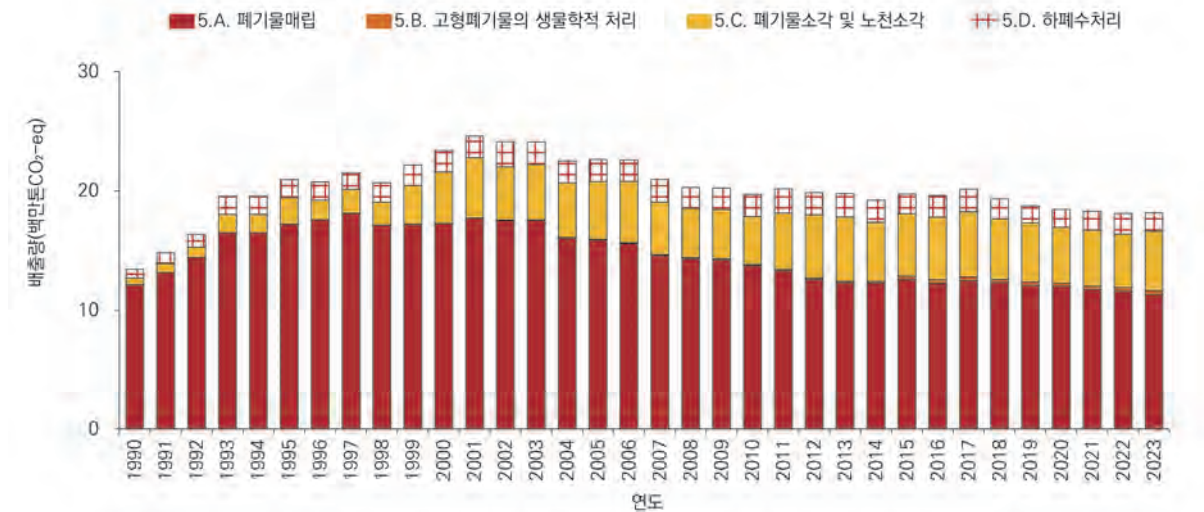
1) 2006 IPCC GL에 따라 폐기물 분야의 온실가스 배출량 산정 대상 폐기물 중 생물기원에 의한 CO_2 배출량은 온실가스 배출량 산정범위에서 제외함

2) 주요 카테고리 분석: 배출·흡수량 기준 상위 95%(LULUCF 포함), 수준평가(1.4절 참조)



| 그림 7-1 | 폐기물 분야 부문별 배출 비중(1990-2023)

폐기물 분야의 부문별 배출량 비중 변화를 살펴보면, 매립 비중이 1990년 90.4%에서 2023년 62.2%로 감소한 반면, 소각 비중이 4.2%에서 27.3%로 늘어났다. 소각 부문의 배출량과 배출량 비중은 증가하였지만, 생활폐기물 소각시설에서의 에너지회수가 증가하여 소각 부문의 배출량 증가세를 둔화시키는 데 기여³⁾하였다. 1990년부터 소각열 회수가 지속적으로 증가하여 2005년 이후부터는 생활폐기물 소각 처리량의 80% 이상에서 소각열을 회수하여 활용하고 있다.



| 그림 7-2 | 폐기물 분야 부문별 온실가스 배출량(1990-2023)

3) 소각장에 에너지 회수시설이 설치되어 소각열을 회수하는 경우 에너지 분야에서 별도로 산정된다.

| 표 7-1 | 폐기물 분야 부문별 온실가스 배출량(1990-2023)

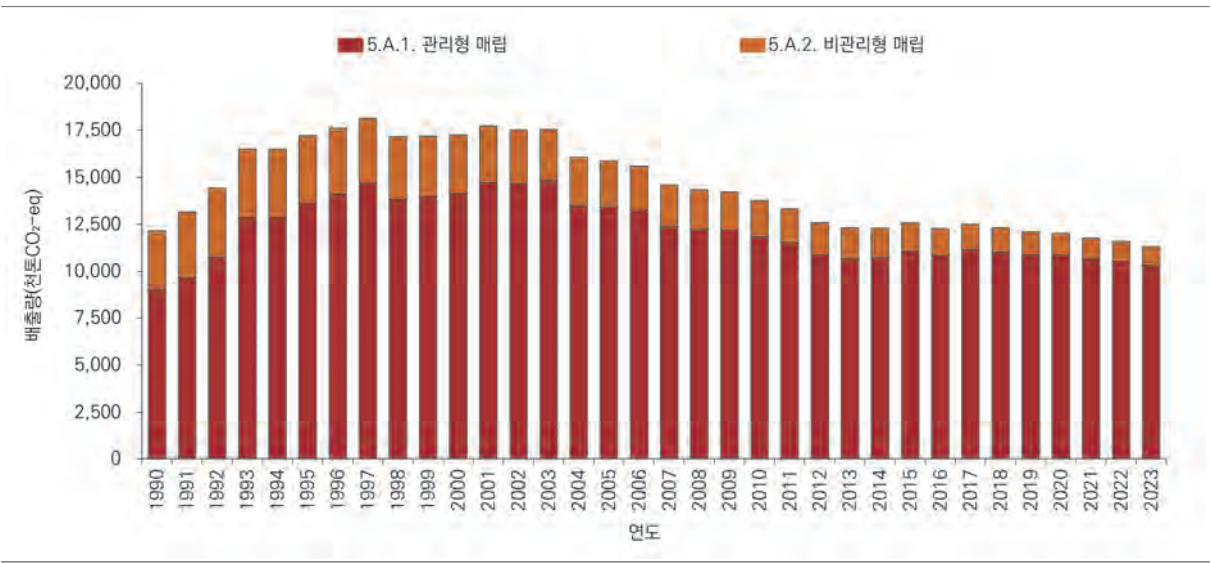
(단위: 백만톤 CO₂-eq)

부문	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001
5.A. 폐기물매립	12.1	13.2	14.4	15.5	16.5	17.2	17.6	18.1	17.2	17.2	17.3	17.7
5.B. 고형폐기물의 생물학적 처리	NE	NE	NE	NE	0.004	0.001	0.002	0.005	0.004	0.02	0.03	0.03
5.C. 폐기물소각 및 노천소각	0.6	0.7	0.9	1.1	1.5	2.2	1.6	2.0	1.9	3.2	4.3	5.0
5.D. 하·폐수처리	0.7	0.9	1.1	0.9	1.5	1.5	1.6	1.4	1.6	1.7	1.8	1.8
합계	13.4	14.8	16.4	17.4	19.6	21.0	20.8	21.5	20.7	22.2	23.4	24.6
구분	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
5.A. 폐기물매립	17.5	17.5	16.1	15.9	15.6	14.6	14.3	14.2	13.8	13.3	12.6	12.3
5.B. 고형폐기물의 생물학적 처리	0.05	0.05	0.05	0.07	0.09	0.09	0.09	0.10	0.08	0.10	0.10	0.13
5.C. 폐기물소각 및 노천소각	4.5	4.6	4.6	4.8	5.1	4.4	4.1	4.1	4.0	4.7	5.3	5.4
5.D. 하·폐수처리	2.1	1.9	1.8	1.9	1.8	1.9	1.8	1.8	1.9	2.0	1.8	2.0
합계	24.1	24.1	22.5	22.6	22.6	21.0	20.3	20.2	19.7	20.2	19.9	19.8
구분	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023		
5.A. 폐기물매립	12.3	12.6	12.3	12.5	12.3	12.1	12.0	11.8	11.6	11.3		
5.B. 고형폐기물의 생물학적 처리	0.15	0.28	0.29	0.29	0.26	0.27	0.26	0.27	0.31	0.35		
5.C. 폐기물소각 및 노천소각	4.9	5.2	5.3	5.5	5.1	4.9	4.7	4.7	4.5	5.0		
5.D. 하·폐수처리	1.8	1.7	1.8	1.9	1.7	1.4	1.5	1.6	1.7	1.5		
합계	19.2	19.8	19.6	20.2	19.3	18.7	18.5	18.3	18.1	18.2		

7.2 폐기물매립 (5.A.)

폐기물매립 부문은 매립지의 관리 형태에 따라 관리형 매립(5.A.1.), 비관리형 매립(5.A.2.), 미분류형 매립으로 구분⁴⁾하며, 국내의 경우 미분류형 매립지는 존재하지 않아 “NO”로 보고하였다.

폐기물매립 부문 2023년 배출량은 11,312 천톤 CO₂-eq로 전년 대비 2.5% 감소하였으며, 폐기물 분야 배출량의 62.2%를 차지한다. 폐기물매립 부문 하위 배출원 비중은 2023년 기준 관리형 매립이 91.2%, 비관리형 매립이 8.8%로 나타났다.



| 그림 7-3 | 폐기물매립 부문 온실가스 배출량(1990-2023)

| 표 7-2 | 폐기물매립 부문 온실가스 배출량(1990-2023)

(단위: 천톤 CO₂-eq)

구분	1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023
관리형 매립	9,000	14,145	11,860	11,050	10,668	10,552	10,317
비관리형 매립	3,149	3,113	1,907	1,278	1,100	1,046	995
합계	12,149	17,258	13,767	12,328	11,768	11,598	11,312

7.2.1 관리형 매립 (5.A.1.)

7.2.1.1 배출원 개요

2023년 기준	산정온실가스	방법론	배출계수	활동자료
	CH ₄	Tier 2	CS, D	폐기물 매립처리량, 메탄 회수량

4) 국내 매립지는 위생매립지와 비위생매립지로 분류하고 있으며, 위생매립지는 2006 IPCC GL의 관리형 매립지, 비위생매립지는 비관리형 매립지에 해당함

관리형 매립지는 매립구획 등 제반 계획에 따라 설계되고, 기계적 압축과 평탄 작업이 이루어지며, 매립가스 포집과 처리시설, 바닥 차수시설과 침출수 처리시설을 갖춘 매립지로 정의하고 있다. 관리형 매립지에서 매립된 폐기물은 혐기성 상태에서 CH₄로 배출되고, 국내에는 준호기성 및 호기성 매립지는 존재하지 않아 “NO”로 보고하였다. 배출된 CH₄ 중 매립가스가 회수된 양은 소각 처리되거나 발전 및 열 에너지원으로 이용되어 매립 부문 배출량에서는 차감되고, 해당 배출량은 에너지 분야에서 산정한다.

관리형 매립 부문의 2023년 배출량은 10,317 천톤 CO₂-eq로 전년 대비 2.2% 감소하였으며, 폐기물 매립 부문 배출량의 91.2%를 차지한다.

표 7-3 | 관리형 매립 부문 온실가스 배출량(1990-2023)

(단위: 천톤 CO₂-eq)

구분	1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023
관리형 매립	9,000	14,145	11,860	11,050	10,668	10,552	10,317

7.2.1.2 방법론

7.2.1.2.1 산정방법

관리형 매립에서는 2006 IPCC GL의 일차 분해(First-order Decay; FOD) 산정방법을 적용하였다.

〈 관리형 매립 부문 CH₄ 배출량 산정식 〉

$$CH_4 \text{ Emissions} = [\sum CH_4 \text{ generated}_{x, T} - R_T] \times (1 - OX_T)$$

$$DDOC_m = W \times DOC \times DOC_f \times MCF$$

$$DDOC_{maT} = DDOC_{mdT} + (DDOC_{maT-1} \times e^{-k})$$

$$DDOC_{m, decompT} = DDOC_{maT-1} \times (1 - e^{-k})$$

$$CH_4 \text{ generated}_{x, T} = DDOC_{m, decompT} \cdot F \cdot 16/12$$

- CH₄ Emissions : T년도에 배출된 CH₄ [Gg]
- T : CH₄ 발생량을 산정하는 해당년도(인벤토리 연도)
- x : 폐기물 카테고리나 성상/물질
- R_T : T년도에 회수된 CH₄ [Gg]
- OX_T : T년도의 산화율(분율)
- DDOC_m : 혐기적으로 분해 가능한 매립된 DOC의 총량 [Gg]
- DDOC_{maT} : T연도까지 SWDS에 축적된 DDOC_m [Gg]
- DDOC_{maT-1} : (T-1)연도까지 SWDS에 축적된 DDOC_m [Gg]
- DDOC_{mdT} : T연도까지 SWDS에 매립된 DDOC_m [Gg]
- DDOC_{m, decompT} : T연도에 SWDS에서 혐기적으로 분해된 DDOC_m [Gg]

W	: 매립된 폐기물의 총량 [Gg]
MCF	: CH_4 보정계수(Methane Correction Factor)
DOC	: 분해 가능한 유기탄소 함량 [Gg-C/Gg-waste]
DOC_f	: 혐기적으로 분해 가능한 폐기물 내 유기탄소 비율
F	: 매립가스 중 CH_4 성분비
k	: CH_4 발생속도 상수

자료: IPCC 2006 GL, Vol.5, Ch.3, Equation 3.1/ 3.2/ 3.4/ 3.5/ 3.6

7.2.1.2.2 배출계수

관리형 매립 부문에 적용하는 배출계수는 2006 IPCC GL에서 제공하는 기본 배출계수와 국가 고유 배출계수를 적용하였다.

분해 가능한 유기탄소 함량(DOC)은 폐기물 내 유기물 중 생화학적으로 분해 가능한 탄소함량으로, 폐기물 성상별 국가 고유 배출계수를 적용하고 그 외 배출계수는 2006 IPCC GL 기본계수를 적용하였다.

혐기적으로 분해 가능한 유기탄소 비율(DOC_f)은 생화학적으로 분해 가능한 탄소함량(DOC) 중 혐기성 조건에서 최종적으로 분해된 탄소비율로 음식물, 종이류, 목재류는 국가 고유 배출계수를 적용하며, 그 외의 폐기물 성상에는 2006 IPCC GL에 제시된 기본값 “0.5”(리그닌 탄소가 포함된 값)를 적용하였다.

CH_4 발생속도상수(k)는 매립된 폐기물이 분해되어 CH_4 로 발생하는 속도 상수로서, 국가 고유배출 계수 “0.05”를 적용하였다. CH_4 의 성분비(F)는 매립가스 중 CH_4 의 성분비로, 국가 고유 배출계수 “0.5629”를 적용하였다. CH_4 산화율(OX)은 매립지의 복토층에서 또는 복토층을 통과하는 CH_4 중 미생물에 의해 산화되는 CH_4 의 비율로 2006 IPCC GL에 제시된 기본값 “0.1”을 적용하였다. CH_4 보정계수(MCF)는 매립지 관리 형태에 따라 달라지는 CH_4 발생량을 보정하는 변수로서 매립지 관리 형태와 평균 매립고를 기준으로 전체 매립지를 3가지 유형으로 구분하는데, 국내 관리형 매립지의 MCF 값은 혐기성 환경으로 관리되며 2006 IPCC GL에 따라 “1.0”을 적용하였다.

표 7-4 | 관리형 매립의 매개변수

구분	$F^{1)}$	$MCF^{2)}$	$OX^{3)}$
적용값	0.5629	1.0	0.1

- 주: 1) F : 매립가스 중 CH_4 성분비, 국가 고유 배출계수 적용(2016)
 2) MCF : CH_4 보정계수 (2006 IPCC 기본 배출계수) 적용
 3) OX : CH_4 산화율 (2006 IPCC 기본 배출계수) 적용

표 7-5 | 폐기물 성상별 메탄 발생 속도상수 (k)

구분	$k^{1)}$
적용값	0.05

- 주: 1) k : CH_4 발생속도상수, 국가 고유 배출계수⁵⁾ 적용(2014)

표 7-6 | 관리형 매립의 적응 배출계수 (DOC, DOC_F)

폐기물유형	세부성상	적용수치		출처	
		DOC	DOC _F	DOC	DOC _F
생활폐기물 사업장폐기물 건설폐기물 지정폐기물	음식물	0.1319	0.6343	국가 고유 배출계수 ⁶⁾	국가 고유 배출계수 ⁷⁾
	종이류	0.3349	0.6256		
	나무류	0.3685	0.4446		
	고무피혁	0.4625	0.5		
	섬유류	0.3415	0.5		
	가연성기타류	0.2850	0.5		
	가정오니	0.1036	0.5		
	산업오니	0.1845	0.5		
	플라스틱	0	-	2006 IPCC GL	2006 IPCC GL
	불연성	0	-		

7.2.1.2.3 활동자료

a) 폐기물 매립량

폐기물 매립량의 시간적 추정 범위는 인벤토리 시작연도인 1990년의 50년 이전(1940년)부터이나, 1940년부터 1950년대는 한국전쟁(1950-1953) 등의 특수한 국가 상황으로 인해 국내 유기성 폐기물의 발생량 통계가 전무하고 폐기물 처리 개념이 도입되지 않아 폐기물 관리에 관한 국내 최초의 법률인 「오물청소법」이 제정된 1961년을 폐기물매립 처리량의 추정 시작 연도로 설정하였다.

1961년 이후의 폐기물 통계는 다음과 같이 세 단계를 거쳐 발전됐다.

1단계인 1961-1984년 기간에는 폐기물 통계가 제대로 갖추어 있지 않아, 통계적 기법을 사용하여 폐기물 발생량과 매립 비율을 추정하였다. 이때 사용한 영향인자는 인구수, 세대수, 경제성장률 등 사회적 변화 요인과 쓰레기종량제 실시와 같은 폐기물 관리 정책의 변화 등을 고려하였으며, 함수 관계에 따라 회귀분석 및 외삽법 등의 통계적 기법을 활용하였다⁸⁾.

2단계인 1985-1995년 동안에는 「폐기물관리법」 제39조 및 동법 시행규칙 제64조에 의거, 국가 폐기물 통계⁹⁾ 작성이 시작되어 이를 활용하였다. 다만, 현재와 같은 폐기물 분류체계가 마련되지 않아 폐기물 성상별 발생량 및 처리량에 대한 조사는 없었고, 전체 폐기물에 대한 통계자료만 있어, 폐기물 종류별 발생량 및 처리량은 외삽법 등을 통해 추정하였다. 추정 방법은 표 7-7과 같다.

5) 메탄 배출량 직접 측정하여 산정

6) 국가 고유 배출계수(2014-2016) → 각 성상별로 국내에서 배출 비중이 큰 폐기물을 대상으로 국가 승인 통계인 '전국폐기물통계조사(1997, 2002, 2007, 2013)'의 원소분석 및 삼성분 자료 활용하여 성상별 DOC 값 산정

7) 국가 고유 배출계수(2016) → 습식 분해 실험의 일종인 BMP test를 세부 성상에 대해 수행하여 DOC_F 값 산정
- (종이류) 시료 6종, (음식물) 시료 10종, (목재류) 시료 3종의 삼성분 분석과 원소분석 자료 활용

8) 「폐기물부문 온실가스 배출량 산정을 위한 통계 추정」(한국환경공단, 2010)

9) 「전국 쓰레기 처리 실적 및 계획」(기후환경에너지부)

3단계인 1996년부터 현재까지는 생활폐기물, 사업장배출시설계폐기물, 건설폐기물, 지정폐기물로 폐기물 분류체계가 구축되고, 폐기물 분류체계에 따른 통계를 수집하여 활동자료로 활용하였다. 「폐기물관리법」 제58조 및 동법 시행규칙 제81조에 의거, 기후에너지환경부에서 매년 발표하고 있는 「전국 폐기물 발생 및 처리현황」¹⁰⁾등 국가 폐기물 통계자료를 활용하였다.

보고 기간의 매립량 확보 방법은 아래 표와 같다.

표 7-7 | 폐기물 매립량 확보 방법

구분		1961-1980	1981-1984	1985-1991	1992-1993	1994-1995	1996-2018	2019-
생활 폐기물	발생량	회귀분석 [변수: 가구 수, GDP]			국가 폐기물 통계자료 : 「전국 폐기물 발생 및 처리현황 (환경부)」			
	매립비율	외삽법을 적용하여 추정						
사업장 배출 시설계	발생량	외삽법을 적용하여 추정				1996-1998년의 사업장 배출시설계폐기물과 건설폐기물의 평균 발생비율 적용하여 추정		
	매립비율	전문가 판단 [1961년(79%) 가정 이후 선형적 감소]						
건설 폐기물	발생량	1992-2007년 추세식 적용하여 역추정						
	매립비율	전문가 판단 [1961년(79%) → 1992년(20%)으로 선형적 감소]						
지정 폐기물	발생량	전문가 판단	외삽법을 적용하여 추정				국가 폐기물 통계자료 「지정폐기물 발생 및 처리현황(환경부)」	
	매립비율	[발생량 없음]	외삽법을 적용하여 추정					
비고		• 지정폐기물은 산업화가 급속화된 1981년부터 추정 • 1992-1995년은 사업장배출시설계 폐기물에 건설폐기물 포함 「전국 폐기물 발생 및 처리현황(환경부)」						

표 7-8 | 폐기물매립 부문 산정을 위한 활동자료 출처

항목	출처	비고
매립지별 매립량	1. 전국 폐기물 발생 및 처리현황 (기후에너지환경부)	-
	2. 지정폐기물 발생 및 처리현황 (기후에너지환경부) ¹¹⁾	-
	3. 환경부문 온실가스 배출통계 D/B 구축(환경관리공단, 2006), 부록4	1970-2005년 기간 자료 수록
매립 조성	1. 전국 폐기물 발생 및 처리현황 (기후에너지환경부)	매립지별 조성자료가 아닌 지역별 (행정구역별) 발생량 기준 조성
	2. 지정폐기물 발생 및 처리현황 (기후에너지환경부)	
	3. 전국 폐기물 통계조사 (기후에너지환경부)	-
	4. 폐기물부문 온실가스 배출량 산정을 위한 통계 추정 (한국환경공단, 2010)	폐기물 유형별 조성에 관한 과거자료
MCF	1. 환경부문 온실가스 배출통계 D/B 구축(환경관리공단, 2006), 부록4	차수시설, 평균 매립고(m) 자료 수록
회수량(R)	1. 전국 폐기물 발생 및 처리현황 (기후에너지환경부)	전국기준
	2. 수도권매립지 통계연감	수도권 매립지 CH ₄ 회수량

10) (작성 목적) 「전국 폐기물 발생 및 처리현황」의 폐기물 발생, 처리 및 순환이용 현황 조사 등을 통해 자원순환기본계획 수립과 국가 자원순환 목표 설정 등의 기초자료로 활용

(작성 방법) 1) 사업체: 전산프로그램(올바로시스템)을 통한 실적전송 또는 서면실적 환경청 및 시·도(시·군·구) 제출,

2) 환경청 및 시·도: 보고양식(엑셀자료) 공문 송부

(작성 체계) 사업체 → 환경청 및 지방자치단체(시·군·구→시·도) → 한국환경공단 → 기후에너지환경부

폐기물 관리 정책에 따라 1990년부터 비관리형 매립지를 관리형 매립지로 전환하여 2003년 이후에는 관리형 매립지만 운영하고 있으며, 연도별 관리형, 비관리형 매립지 비율은 「환경부문 온실가스 배출통계 D/B 구축(환경관리공단, 2006)」에서 조사된 매립시설 자료를 활용(표 7-10)하였다.

표 7-9 | 폐기물매립 부문 활동자료 수집방법(1990-2023)

기간	활동자료	통계명	관리기관
1990-2023	폐기물 매립 처리량	전국 폐기물 발생 및 처리현황	기후에너지환경부

표 7-10 | 연도별 관리형, 비관리형 매립지 비율

(단위: %)

구분	1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023
관리형	61	97	100	100	100	100	100
비관리형	39	3	0	0	0	0	0

* 전국 약 1,640개의 매립지에 대하여 시설의 제반계획, 복토재, 매립가스 포집 및 처리시설, 침출수 배제시설 등을 조사한 자료를 이용하여 관리형, 비관리형 매립지에 대한 비율 산정

* 「환경부문 온실가스 배출통계 DB 구축(한국환경공단, 2006)」

관리형 매립지의 폐기물 유형별·성상별 활동자료의 경우, 관리형 매립지 비율을 적용하여 다음 표 7-11, 7-12와 같이 산정하였다.

표 7-11 | 관리형 매립의 연도별 유형별 매립 처리량(1990-2023)

(단위: 천톤)

구분	1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023
생활폐기물	17,362.3	7,700.3	3,211.0	2,746.8	2,918.2	2,356.3	2,389.8
사업장폐기물	2,420.1	6,688.3	8,507.9	7,686.8	6,165.1	6,028.5	5,377.3
건설폐기물	1,506.3	3,534.6	803.1	1,075.9	492.3	106.9	86.9
지정폐기물	87.2	336.1	668.2	1,137.0	881.8	949.8	1,024.2
합계	21,375.9	18,259.2	13,190.2	12,646.5	10,457.5	9,441.6	8,878.1

자료: 전국 폐기물 발생 및 처리현황(기후에너지환경부, 1990-2023), 지정폐기물 발생 및 처리현황(기후에너지환경부, 1990-2018)

표 7-12 | 관리형 매립의 연도별 성상별 매립 처리량(1990-2023)

(단위: 천톤)

구분	1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023
음식물	4,756.7	1,829.0	70.8	165.9	168.2	162.6	137.5
종이류	2,499.4	1,426.5	570.9	428.7	532.3	361.4	295.5
나무류	675.2	665.5	137.1	86.2	60.8	46.9	39.2
고무피혁	434.5	309.0	97.0	78.1	23.7	28.2	22.9
섬유류	24.8	32.7	9.0	8.0	93.2	70.8	64.4
가연성기타류	166.0	1,850.9	1,856.8	1,956.9	2,601.9	1615.7	1,229.0
가정오니	0.0	301.5	105.6	291.3	10.7	8.7	18.6
산업오니	564.4	471.9	381.7	786.9	364.6	438.9	568.3
플라스틱	955.0	794.4	393.8	359.9	502.8	492.4	434.9
불연성	11,299.9	10,577.8	9,567.3	8,484.6	6,099.3	6,216.0	6,067.8
합계	21,375.9	18,259.2	13,190.2	12,646.5	10,457.5	9,441.6	8,878.1

11) 2019년부터 「지정폐기물 발생 및 처리 현황」은 「전국 폐기물 발생 및 처리현황」에 통합되어 공표

b) 매립가스 회수량

매립가스는 주성분이 CH_4 와 CO_2 이고, 나머지는 미량의 여러 성분 가스로 구성되어 있다. 매립가스를 포집하여 CH_4 를 발전 및 난방에 이용하는 매립가스 자원회수시설은 1998년 수도권매립지를 시작으로 2023년 국내 총 15개소가 운영 중이다. 2023년 CH_4 회수량은 93.2천 톤 CH_4 이며, 연도별 CH_4 회수량은 표 7-14와 같다.

| 표 7-13 | 관리형 매립지의 CH_4 회수 현황

번호	대상 관리형 매립지	매립여부	사용여부
1	수도권매립지관리공사 (인천 서구)	진행	회수 중
2	난지도 (서울 마포구)	1993년 종료	회수 중
3	울산 성암동 (울산 남구)	진행	2019년 회수 종료
4	대구 방천리 (대구 달성군)	진행	회수 중
5	부산 생곡동 (부산 강서구)	진행	회수 중
6	대전 금고동 (대전 유성구)	진행	회수 중
7	광주 운정동 (광주 북구)	2004년 종료	2012년 회수 종료
8	제주 회천동 (제주 제주시)	2020년 종료	회수 중
9	포항 호동 (경북 포항 남구)	진행	2012년 회수 종료
10	청주 학천리 (충북 청주 흥덕구)	진행	회수 중
11	군산 내초동 (전북 군산 내초동)	진행	일시 중지
12	여수 만흥동 (전남 여수 만흥동)	진행	회수 중
13	순천 왕지동 (전남 순천 왕지동)	진행	2020년 회수 종료
14	목포 대양동 (전남 목포 대양동)	진행	회수 중
15	광주시 남구 (광주 남구)	진행	회수 중
16	광양시 (전남 광양 죽림리)	진행	2014년 회수 종료
17	창원시 (경남 창원 덕동동)	진행	회수 중
18	구미시 (경북 구미 구포동)	2007년 종료	2012년 회수 종료
19	거제시 (경남 거제 석포리)	진행	2012년 회수 종료
20	진주시 (경남 진주 유수리)	진행	일시 중지
21	원주시 (강원 원주 흥업면)	진행	회수 중
22	강릉시 (강원 강릉 강동면)	진행	회수 중
23	제천시 (충북 제천 신동)	진행	회수 중
24	천안시 (충북 천안 목천읍)	진행	회수 중

| 표 7-14 | 관리형 매립의 CH_4 회수량(1990-2023)(단위: 천톤 CH_4)

구분	1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023
회수량	-	64.5	137.1	101.1	94.9	94.8	93.2

연도별 CH_4 회수량은 2010년부터 「전국 폐기물 발생 및 처리현황(기후에너지환경부)」 통계를 사용하였다. 2010년 이전에 대한 CH_4 회수량 자료와 누락 되거나 매립이 종료됐지만 매립가스의 회수가 이루어지는 시설의 경우 국가통계 목록에 포함되지 않아 한국환경공단에서 자체 조사한 값을 사용하였다.

7.2.1.3 시계열 일관성

관리형 매립 부문은 동일한 산정방법과 배출계수를 일관성 있게 적용하였다. 활동자료의 경우, CH₄ 배출량은 기후에너지환경부에서 매년 발표하고 있는 「전국 폐기물 발생 및 처리현황(기후에너지환경부)」에 기초한 활동자료를 사용하여 산정하였으며, 국가 폐기물 통계자료에서 확보할 수 없는 자료에 대해서는 직접 조사 또는 추정을 통해 시계열 일관성을 확보하였다.

7.2.1.4 QA/QC

QA/QC는 제1장 서론 1.5절 내용과 동일하다.

7.2.1.5 재계산

관리형 매립에 의한 배출량 산정 시, 기초통계 수정사항¹²⁾을 반영하여 2007-2022년 배출량을 재계산하였다.

7.2.2 비관리형 매립 (5.A.2.)

7.2.2.1 배출원 개요

2023년 기준	산정온실가스	방법론	배출계수	활동자료
	CH ₄	Tier 2	CS, D	폐기물 매립 처리량

관리형 매립지로 분류되지 못한 비위생 매립지를 비관리형 매립으로 정의한다. 비관리형 매립지는 IPCC 분류체계에 따라 평균 매립고 5m를 기준으로, 깊은 매립지와 얇은 매립지로 구분된다. 비관리형 매립지는 체계적으로 관리되지 못해 외부 공기 유입이 상대적으로 취약하여 관리형 매립지보다 같은 조건에서 CH₄이 적게 발생하지만 전량 대기 중으로 배출된다. 우리나라는 위생처리와 관련된 폐기물 관리정책의 도입으로 비관리형 매립지가 지속적으로 감소하여 매립고가 5m 미만인 비관리형 매립지는 2002년 매립이 종료되었으며, 매립고가 5m 이상인 비관리형 매립지는 2003년 매립이 종료되었다.

비관리형 매립 부문의 2023년 배출량은 995 천톤 CO₂-eq로 전년 대비 4.9% 감소하였으며, 폐기물매립 부문 배출량의 8.8%를 차지한다.

표 7-15 비관리형 매립 부문 온실가스 배출량(1990-2023)

(단위: 천톤 CO ₂ -eq)							
구분	1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023
비관리형 매립	3,149	3,113	1,907	1,278	1,100	1,046	995

12) 2006년 생활폐기물 매립량과 2010년도 회수량 변경

7.2.2.2 방법론

7.2.2.2.1 산정방법

비관리형 매립 부문 CH_4 배출량은 관리형 매립 부문과 동일한 2006 IPCC GL FOD 산정방법을 적용하여 산정하였다.

7.2.2.2.2 배출계수

비관리형 매립의 CH_4 배출량 산정에 이용된 F(매립가스 중 CH_4 성분비), MCF(CH_4 보정계수)와 OX(산화율)을 제외한 매개변수는 관리형 매립과 동일한 2006 IPCC GL의 기본 배출계수와 국가 고유 배출계수를 적용하였다.

표 7-16 비관리형 매립의 매개변수

구분	평균 매립고 $\geq 5\text{m}$	평균 매립고 $< 5\text{m}$
MCF	0.8	0.4
OX	0	
F	0.5	

7.2.2.2.3 활동자료

비관리형 매립지 활동자료는 연도별·유형별 성상별 매립 처리량에 「환경부문 온실가스 배출통계 DB 구축(한국환경공단, 2006)」에서 조사된 관리형·비관리형 매립지 비율(표 7-10)을 적용하여 산정하였다.

매립지의 평균 매립고에 따른 폐기물 매립 처리량은 표 7-17와 표 7-19에 제시하였고, 성상별 폐기물 매립 처리량은 표 7-18와 표 7-20에 제시하였다.

폐기물 관리법 시행규칙에 의해 지정폐기물 매립 및 CH_4 회수는 관리형 매립지로만 관리된다.

표 7-17 비관리형 매립의 매립 처리량(평균 매립고 $\geq 5\text{m}$) (1990-2023)

(단위: 천톤)

구분	1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023
생활폐기물	8,290.0	241.9	-	-	-	-	-
사업장폐기물	1,155.5	210.1	-	-	-	-	-
건설폐기물	719.2	111.0	-	-	-	-	-
지정폐기물	0.0	0.0	-	-	-	-	-
총합	10,164.7	563.0	-	-	-	-	-

자료: 전국 폐기물 발생 및 처리현황(기후에너지환경부, 1990-2023), 지정폐기물 발생 및 처리현황(기후에너지환경부, 1990-2018), 환경부문 온실가스 배출통계 D/B 구축(환경관리공단, 2006)

* 사업장폐기물은 국내 폐기물관리법에 따라 사업장배출시설계폐기물을 지칭

| 표 7-18 | 비관리형 매립의 연도별 성상별 매립 처리량(평균 매립고 ≥ 5m) (1990-2023)

(단위: 천톤)

구분	1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023
음식물	2,271.2	57.5	-	-	-	-	-
종이류	1,193.4	44.8	-	-	-	-	-
나무류	322.4	20.9	-	-	-	-	-
고무피혁	207.5	9.7	-	-	-	-	-
섬유류	11.9	1.0	-	-	-	-	-
가연성기타류	37.6	58.1	-	-	-	-	-
가정오니	0.0	9.5	-	-	-	-	-
산업오니	269.5	11.4	-	-	-	-	-
플라스틱	456.0	24.9	-	-	-	-	-
불연성	5,395.3	325.2	-	-	-	-	-
합계	10,164.7	563.0	-	-	-	-	-

| 표 7-19 | 비관리형 매립의 매립 처리량(평균 매립고 < 5m) (1990-2023)

(단위: 천톤)

구분	1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023
생활폐기물	2,856.4	26.2	-	-	-	-	-
사업장폐기물	398.1	22.8	-	-	-	-	-
건설폐기물	247.8	12.0	-	-	-	-	-
지정폐기물	0.0	0.0	-	-	-	-	-
총합	3,502.4	61.1	-	-	-	-	-

자료: 전국 폐기물 발생 및 처리현황(기후에너지환경부, 1990-2023), 지정폐기물 발생 및 처리현황(기후에너지환경부, 1990-2018), 환경부문 온실가스 배출통계 D/B 구축(환경관리공단, 2006)

* 사업장폐기물은 국내 폐기물관리법에 따라 사업장배출시설계폐기물을 지칭

| 표 7-20 | 비관리형 매립의 연도별 성상별 매립 처리량(평균 매립고 < 5m) (1990-2023)

(단위: 천톤)

구분	1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023
음식물	782.6	6.2	-	-	-	-	-
종이류	411.2	4.9	-	-	-	-	-
나무류	111.1	2.3	-	-	-	-	-
고무피혁	71.5	1.1	-	-	-	-	-
섬유류	4.1	0.1	-	-	-	-	-
가연성기타류	13.0	6.3	-	-	-	-	-
가정오니	0.0	1.0	-	-	-	-	-
산업오니	92.8	1.2	-	-	-	-	-
플라스틱	157.1	2.7	-	-	-	-	-
불연성	1,859.0	35.3	-	-	-	-	-
합계	3,502.4	61.1	-	-	-	-	-

7.2.2.3 시계열 일관성

비관리형 매립의 CH₄ 배출량은 동일한 산정방법과 배출계수를 일관성 있게 적용하였다. 활동자료의 경우, 기후에너지환경부에서 매년 발표하고 있는 전국 폐기물 발생 및 처리현황(기후에너지환경부)에 기초한 활동자료를 사용하여 산정하고 있으며, 국가 폐기물 통계자료에서 확보할 수 없는 자료에 대해서는 직접 조사 또는 추정을 통해 시계열 일관성을 확보하였다.

7.2.2.4 QA/QC

QA/QC는 제1장 서론 1.5절 내용과 동일하다.

7.2.2.5 재계산

재계산은 수행하지 않았다.

7.3 고형폐기물의 생물학적 처리 (5.B.)

고형폐기물의 생물학적 처리 부문은 유기성 폐기물인 음식물류, 동식물 폐잔재물류,오니류 등의 폐기물이 선별·파쇄·탈수 등의 전처리 공정을 통해 퇴비화(5.B.1.)되는 과정과 바이오가스시설에서의 혐기성 소화(5.B.2.)로 인해 배출되는 CH₄, N₂O를 산정한다.

고형폐기물의 생물학적 처리 부문 2023년 배출량은 349 천톤 CO₂-eq로 전년 대비 11.9% 증가하였으며, 폐기물 분야 배출량의 1.9%를 차지한다. 고형폐기물의 생물학적 처리 부문 하위 배출원 비중은 2023년 기준 퇴비화가 67.9%, 바이오가스시설에서의 혐기성 소화가 32.1%로 나타났다.

퇴비화 부문 배출량은 237 천톤 CO₂-eq로 전년 대비 15.4% 증가하였으며, 바이오가스시설에서의 혐기성 소화 부문 배출량은 112 천톤 CO₂-eq로 전년 대비 5.2% 증가하였다.



그림 7-4 | 고형폐기물의 생물학적 처리 부문 온실가스 배출량(1990-2023)

표 7-21 | 고형폐기물의 생물학적 처리 부문 온실가스 배출량(1990-2023)

(단위: 천톤 CO₂-eq)

구분	1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023
퇴비화	NE	32	80	198	196	206	237
바이오가스시설에서의 혐기성 소화	NE	NE	3	63	73	106	112
합계	NE	32	83	260	269	312	349

7.3.1 퇴비화 (5.B.1.)

7.3.1.1 배출원 개요

2023년 기준	산정온실가스	방법론	배출계수	활동자료
	CH ₄ , N ₂ O	Tier2	CS	폐기물 퇴비화 처리량

퇴비화는 호기성 공정으로, 폐기물 내 분해 가능한 유기탄소를 호기성 미생물에 의해 CO₂로 변환시키는 과정으로 정의할 수 있다. 유기성 폐기물은 퇴비화시설에서의 선별·파쇄·혼합·발효 등의 공정을 거쳐, 물리적·생물학적으로 안정된 상태의 물질로 전환된다. 이론적으로는 CH₄ 발생이 없어야 하나, 국부 혐기성 영역에서 CH₄가 미량 발생·배출되며, 유기물의 분해로 생성된 암모니아성 질소가 질산화 및 탈질화 과정을 통해 N₂O를 발생시킨다.

퇴비화 부문 2023년 배출량은 237 천톤 CO₂-eq로 전년 대비 15.4% 증가하였으며, 고형폐기물의 생물학적 처리 부문 배출량의 67.9%를 차지한다.

표 7-22 | 퇴비화 부문 온실가스 배출량(1990-2023)

(단위: 천톤 CO ₂ -eq)							
구분	1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023
퇴비화	NE	32	80	198	196	206	237

7.3.1.2 방법론

7.3.1.2.1 산정방법

퇴비화 부문은 2006 IPCC GL 산정식을 적용하여 CH₄, N₂O 배출량을 산정한다. 고형폐기물의 생물학적 처리 퇴비화 부문에서 배출되는 CH₄, N₂O 배출량은 해당 시설에서 처리되는 폐기물 양에 배출계수를 곱하여 산정하였다.

〈퇴비화 부문 CH₄, N₂O 배출량 산정식〉

$$\text{CH}_4, \text{N}_2\text{O Emissions} = EF \times M \times 10^{-3}$$

CH₄, N₂O Emissions : 퇴비화에 따른 CH₄, N₂O 배출량 [t GHG/yr]

EF : 퇴비화에 따른 CH₄, N₂O 배출계수 [g GHG/kg waste]

M : 퇴비화시설에서 생물학적으로 분해된 유기 폐기물 총량 [t waste/yr]

자료: IPCC 2006 GL, Vol.5, Ch.4, Equation 4.1/4.2

7.3.1.2.2 배출계수

퇴비화 부문의 배출계수는 국가 고유 배출계수¹³⁾를 적용하였다.

13) 국가 고유 배출계수(2019) → 2017-2018년에 걸쳐 퇴비화시설 3개소, 혐기성소화시설 2개소에 대한 온실가스 배출농도 현장 측정을 통해 산정

| 표 7-23 | 퇴비화 부문 배출계수

CRT 코드	배출원	CH ₄ 배출계수 (g CH ₄ /kg waste)	N ₂ O 배출계수 (g N ₂ O/kg waste)
5.B.1.	퇴비화	0.26	0.15

자료: 국가 고유 배출계수 적용(2019년 승인)

7.3.1.2.3 활동자료

퇴비화 부문의 활동자료는 「전국 폐기물 발생 및 처리현황(기후에너지환경부)」을 적용하고 있다. 본 통계는 폐기물처리시설을 재활용시설, 소각시설, 매립시설, 기타시설 등 처리방법별로 구분하여 발표하고 있으며, 이 중 생물학적 처리시설은 '기타시설'로 분류되어 있다. '기타시설'에 보고된 반입폐기물 종류, 처리시설, 처리방법을 확인하여 퇴비화(5.B.1.) 폐기물 처리량을 표 7-25와 같이 산정하였다.

| 표 7-24 | 퇴비화 부문 활동자료 수집방법(1994-2023)

기간	활동자료	통계명	관리기관
1994-2023	폐기물 퇴비화 처리량	전국 폐기물 발생 및 처리현황	기후에너지환경부

| 표 7-25 | 퇴비화 부문 폐기물 처리량 (1990-2023)

(단위: 천톤)							
구분	1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023
처리량	-	672.1	1,710.3	4,203.6	4,170.9	4,371.3	5,043.5

자료: 「전국 폐기물 발생 및 처리현황(기후에너지환경부, 1990-2023)」

7.3.1.3 시계열 일관성

퇴비화 부문은 동일한 산정방법, 배출계수 및 활동자료 출처를 일관성 있게 적용하였다.

7.3.1.4 QA/QC

QA/QC는 제1장 서론 1.5절 내용과 동일하다.

7.3.1.5 재계산

재계산은 수행하지 않았다.

7.3.2 바이오가스시설에서의 혐기성 소화 (5.B.2.)

7.3.2.1 배출원 개요

2023년 기준	산정온실가스	방법론	배출계수	활동자료
	CH ₄	Tier 1	D	폐기물 혐기성 소화 처리량,

바이오가스시설에서의 혐기성 소화란 온도·수분함량·pH를 최적값에 가깝게 유지함으로써 유기 물질이 산소가 없는 상태에서 혐기성 미생물들에 의해 유기성 폐기물을 분해하여 바이오가스(CH₄, CO₂)를 생성하는 일련의 과정을 말한다.

바이오가스시설에서의 혐기성 소화 부문의 2023년 배출량은 112 천톤 CO₂-eq로 전년 대비 5.2% 증가하였으며, 고형폐기물의 생물학적 처리 부문 배출량의 32.1%를 차지한다.

표 7-26 | 바이오가스시설에서의 혐기성 소화 부문 온실가스 배출량(1990-2023)

(단위: 천톤 CO ₂ -eq)							
구분	1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023
바이오가스시설에서의 혐기성 소화	NE	NE	3	63	73	106	112

7.3.2.2 방법론

7.3.2.2.1 산정방법

바이오가스시설에서의 혐기성 소화 부문에서 발생하는 CH₄ 배출량은 2006 IPCC GL 산정식을 적용하였다.

〈바이오가스시설에서의 혐기성 소화 부문 CH₄ 배출량 산정식〉

$$\text{CH}_4 \text{ Emissions} = [EF \times M \times 10^{-3}] - R^*$$

CH₄ Emissions : 혐기성 처리시설에 따른 CH₄ 배출량 [t CH₄/yr]

EF : 혐기성 처리시설에 따른 CH₄ 배출계수 [g CH₄/kg waste]

M : 혐기성 처리시설에서 생물학적으로 분해된 유기 폐기물 총량 [t waste/yr]

자료: IPCC 2006 GL, Vol.5, Ch.4, Equation 4.1

* R은 회수된 CH₄ 총량으로 이미 배출계수에 CH₄ 회수가 고려되어 '0' 적용

7.3.2.2.2 배출계수

바이오가스시설에서의 혐기성 소화 부문의 배출계수는 2006 IPCC GL에서 제시하는 기본계수 중 습량 기준을 적용하였으며, 우리나라에서 처리되는 폐기물의 수분함량(평균 60% 이상)을 고려하여¹⁴⁾ “0.8”을 적용하였다.

14) 2006 IPCC GL, Vol5, Ch.4, 4.1

| 표 7-27 | 바이오가스시설에서의 혐기성 소화 부문 배출계수

구분	배출원	CH ₄ 배출계수 (g CH ₄ /kg waste)	N ₂ O 배출계수 (g N ₂ O/kg waste)	비고
5.B.2.	바이오가스시설에서의 혐기성 소화	0.8	-	습량 기준

자료: 2006 IPCC GL, Vol.5, Ch.4.6, Table 4.1

7.3.2.2.3 활동자료

바이오가스시설에서의 혐기성 소화 부문의 활동자료는 「전국 폐기물 발생 및 처리현황(기후에너지 환경부)」을 적용하며, 2015년부터 공표하고 있는 「유기성 폐자원 바이오가스화시설 현황(기후에너지 환경부)」 자료와 교차 검증하여 산정하고 있다. 본 통계에서 바이오가스시설에서의 음식물, 음폐수, 분뇨처리량을 반영하여 폐기물 처리량을 표 7-29와 같이 수집하였다.

| 표 7-28 | 바이오가스시설에서의 혐기성 소화 부문 활동자료 수집방법(2010-2023)

기간	활동자료	통계명	관리기관
2010-2023	폐기물 혐기성 소화 처리량, 회 수량	전국 폐기물 발생 및 처리현황	기후에너지환경부
2015-2023		유기성 폐자원 바이오가스화시설 현황	

| 표 7-29 | 바이오가스시설에서의 혐기성 소화 부문 폐기물 처리량 (1990-2023)

(단위: 천톤)							
구분	1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023
처리량	-	-	121	2,796	3,246	4,751	4,998

7.3.2.3 시계열 일관성

바이오가스시설에서의 혐기성 소화 부문은 전 시계열에 대해 동일한 산정방법, 배출계수 및 활동자료 출처를 일관성 있게 적용하였다.

7.3.2.4 QA/QC

QA/QC는 제1장 서론 1.5절 내용과 동일하다.

7.3.2.5 재계산

혐기성 소화시설에서 발생하는 CH₄ 배출량의 산정방법론이 변경되어 전 시계열 재계산하였다.

7.4 폐기물소각 및 노천소각 (5.C.)

7.4.1 폐기물소각 (5.C.1.)

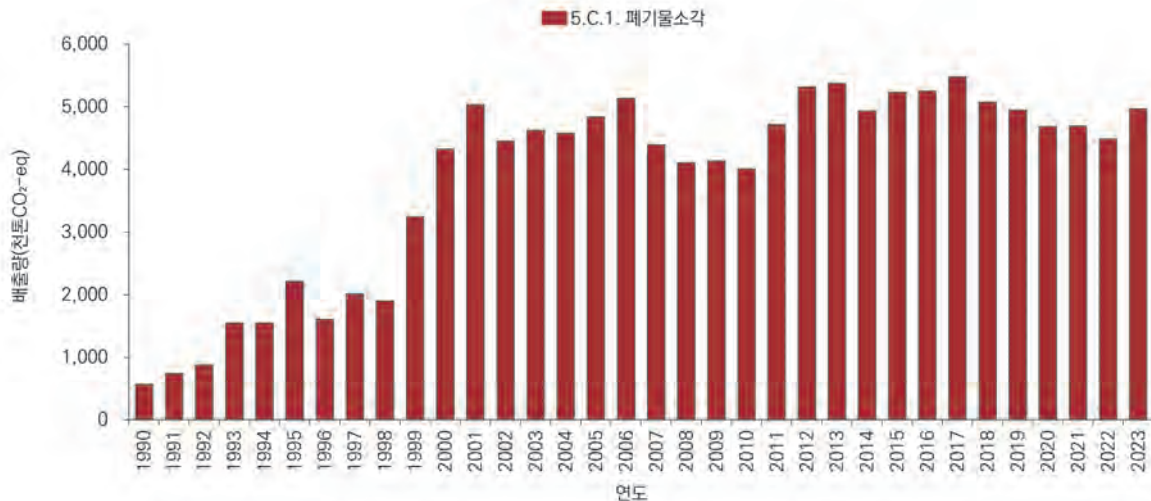
7.4.1.1 배출원 개요

2023년 기준	산정온실가스 CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O	방법론 Tier 2	배출계수 D, CS	활동자료 폐기물 소각 처리량

폐기물소각 부문은 폐기물소각(5.C.1.) 및 노천소각(5.C.2.) 부문으로 구분되며, 화석연료 기반 폐기물(플라스틱, 합성 섬유, 폐유 등)이 소각에 의해 배출되는 CO₂, CH₄, N₂O 배출량을 산정한다. 2006 IPCC GL에 따라 폐기물 소각시설로부터 에너지를 회수할 경우 해당 배출량을 에너지 분야에서 산정·보고하여야 한다. 국내 통계에서는 에너지회수시설을 통한 에너지 생산 목적으로 소비된 도시형 폐기물, 산업폐기물(시멘트킬른보조연료) 배출량은 에너지 분야에서 산정하고, 일부 폐기물 연료 중 열 회수 여부가 불분명한 경우 폐기물 분야에서 산정하여 이중 산정을 방지하고 있다.

폐기물의 노천소각은 소각 굴뚝을 거치지 않고, 개방된 공간에서 폐기물이 직접 연소되어 온실가스가 대기로 배출되는 행위를 의미한다. 그러나 국내에서는 노천소각이 법적으로 금지¹⁶⁾되어 있어 노천소각으로 인한 배출은 발생하지 않아 “NO”로 보고하였다.

폐기물소각 및 노천소각 부문 2023년 배출량은 4,966 천톤 CO₂-eq로 전년 대비 10.8% 증가하였으며, 폐기물 분야 배출량의 27.3%를 차지한다.



| 그림 7-5 | 폐기물소각 및 노천소각 부문 온실가스 배출량(1990-2023)

16) 폐기물관리법 제25조 및 동법시행규칙 제10조에 따라 허가된 폐기물처리시설에서만 소각 가능

| 표 7-30 | 폐기물소각 부문 온실가스 배출량(1990-2023)

(단위: 천톤 CO₂-eq)

구분		1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023
생활폐기물		198	440	188	647	860	588	794
사업장 폐기물	사업장 고형폐기물	253	2,574	2,505	2,976	2,573	2,617	2,855
	하수슬라지	0.1	4	74	76	88	93	89
건설폐기물		59	564	487	434	243	250	256
지정폐기물(의료 외)		51	737	693	818	813	814	864
의료폐기물		IE	5	60	121	116	122	108
합계		561	4,324	4,007	5,072	4,693	4,484	4,966

7.4.1.2 방법론

7.4.1.2.1 산정방법

폐기물소각 부문에서 발생하는 CO₂ 배출량은 2006 IPCC GL 산정식을 적용하였으며, 성상별 폐기물 소각 처리량에 에너지 회수가 없는 소각시설의 소각 비율을 고려하여 산정하였다.

〈폐기물소각 부문 CO₂ 배출량 산정식〉

$$\text{CO}_2 \text{ Emissions} = \sum_{i,j} \{SW_{i,j} \times EF_{i,j} \times OF_i\} \times 44/12$$

- CO₂ Emissions : 온실가스 배출량 [t CO₂-eq]
 SW_{i,j} : 소각된 폐기물의 양 [t waste]
 EF_{i,j} : 배출계수 [t CO₂-eq/t waste]
 OF_i : 산화율
 i : 폐기물 종류(생활폐기물, 사업장폐기물, 건설폐기물, 지정폐기물)
 j : 폐기물 성상

자료: IPCC 2006 GL, Vol.5, Ch.5.2, Equation 5.2

폐기물소각 시 발생하는 CH₄, N₂O 배출량은 성상별 폐기물 소각 처리량에 에너지 회수가 없는 소각시설의 소각 비율을 적용하였으며, CH₄, N₂O의 고유 배출계수를 곱하여 산정하였다.

〈폐기물소각 부문 CH₄, N₂O 배출량 산정식〉

$$\text{CH}_4, \text{N}_2\text{O Emissions} = IW_i \times EF_{i,j} \times 10^{-6}$$

- CH₄, N₂O Emissions : 온실가스 배출량 [t N₂O 또는 t CH₄]
 IW_i : 소각된 폐기물의 양 [t waste]
 EF_{i,j} : 배출계수 [t CH₄/t waste 또는 t N₂O/t waste]
 i : 폐기물 종류(생활폐기물, 사업장폐기물, 건설폐기물, 지정폐기물)
 j : 온실가스 종류 (CH₄, N₂O)

자료: IPCC 2006 GL, Vol.5, Ch.5.2, Equation 5.4/5.5

7.4.1.2.2 배출계수

폐기물소각 부문의 CO₂ 배출계수는 폐기물의 화석탄소 함량과 관련되어 있고, 이는 건조물질 함량과 건조물질 중 유기탄소 함량, 유기탄소 중 화석탄소 비율의 곱으로 표현 가능하다.

$$EF_{i,j} = DM_{i,j} \times CF_{i,j} \times FCF_{i,j}$$

여기서 DM 은 건조물질 함량, CF 는 유기탄소 함량, FCF 는 유기탄소 중의 화석탄소 함량 비율이다. 폐기물의 성상별 건조물질 함량과, 탄소함량, 화석탄소 비율은 표 7-32와 같이 국가고유 배출계수¹⁷⁾ 및 2006 IPCC GL에서 제시하는 기본 배출계수를 적용하였다.

| 표 7-31 | 폐기물소각 부문 CO₂ 매개변수

폐기물 유형	폐기물 유형별 성상	DM _{i,j}	CF	FCF	비고*
생활폐기물	종이/판지	0.7951	0.4276	0.01	도시고형폐기물 (MSW)
	섬유	0.7763	0.5176	0.2	
	음식물	0.4	0.38	-	
	고무/가죽	0.9343	0.5705	0.2	
	플라스틱	0.8605	0.7630	1.0	
	목재	0.85	0.5	-	
	유리	1.0	NA	NA	
	금속	1.0	NA	NA	
	기타(가연성)	0.5548	0.5137	1.0	
	기타(불연성)	0.9	0.03	1.0	
사업장폐기물	하수처리오니	0.227	0.4566	0	하수슬러지
	폐지	0.6997	0.4252	0.01	하수슬러지 외
	폐섬유	0.9897	0.5488	0.16	
	폐합성수지	0.9803	0.6695	0.8	
	폐합성고무	0.9978	0.8293	0.17	
	폐피혁	0.9843	0.5779	0.03	
	폐수처리오니	0.425	0.4737	0.9	
	공정오니	0.3197	0.4246	0.9	
	정수처리오니	0.1677	0.4143	0.9	
	동식물성 폐잔류물	0.435	0.5222	0	
	폐식용유	0.985	0.7305	0	
	폐목재	0.8846	0.6060	0	
	소각재	0.8684	0.3097	0.03	
	기타	0.9	0.04	0.03	
건설폐기물	폐목재	0.8846	0.606	0	사업장폐기물 (IW)
	폐합성수지	0.9803	0.6695	0.8	
	폐섬유	0.9897	0.5488	0.16	
	폐벽지	0.966	0.4069	0.01	

17) 국가 고유 배출계수(2014) → 국가 승인 통계인 '전국폐기물통계조사(2013)'의 원소분석 및 삼성분 자료 활용하여 성상별 탄소함량 값 산정

폐기물 유형	폐기물 유형별 성상	DM _{ij}	CF	FCF	비고*
지정폐기물	폐보드류	0.983	0.2216	0.9	유해폐기물 (HW)
	폐판넬	0.985	0.6179	0.9	
	기타	0.9	0.04	0.03	
	공정오니	0.3197	0.4246	0.9	
	기타 폐유기용제	0.1783	0.4000	0.9	
	소각재	0.9943	0.2652	0.9	
	폐농약	0.3233	0.3503	0.9	
	폐수처리오니	0.5667	0.2796	0.9	
	폐유	0.9650	0.6207	1.0	
	폐유독물	0.3823	0.6054	0.9	
	폐촉매	0.9840	0.1199	0.9	
	폐페인트 및 폐락카	0.4763	0.7865	0.9	
	폐합성고무	0.8354	0.8162	0.17	
	폐합성수지	0.8312	0.6757	0.8	
	폐흡착제 및 폐흡수제	0.9970	0.8227	0.9	
	할로겐족유기용제	0.0057	0.7554	0.9	
	PCB함유폐기물	0.8793	0.9190	0.9	
	기타	0.9	0.04	0.03	
	의료폐기물	0.6945	0.5123	0.4	의료폐기물 (CW)

* CRT 기준 폐기물 유형

주: : 국가온실가스 배출계수 개발값

: 2006 IPCC GL, Vol.5, Ch.2, Table 2.4, 2.5의 기타 화석탄소 함량 적용

: 2006 IPCC GL, Vol.5, Ch.5, Table 5.2의 사업장폐기물, 병원성폐기물의 화석탄소 함량 및 폐기물 종류별 산화계수 적용

CH₄, N₂O 배출계수는 국가 고유 배출계수를 적용하였다.

표 7-32 | 폐기물소각 부문 Non-CO₂ 배출계수

폐기물 유형	CH ₄ 배출계수 (g CH ₄ /t waste)	N ₂ O 배출계수 (g N ₂ O/t waste)
생활폐기물 ¹⁾	6.1	52.1
사업장배출시설계폐기물 ¹⁾	13.9	129.7
하수슬러지 ¹⁾	18.0	449.1
건설폐기물/지정폐기물(의료폐기물 외)	13.9	129.7
지정폐기물(의료폐기물) ¹⁾	2.8	94.5

주: 1) 국가 고유 배출계수¹⁸⁾는 생활폐기물, 사업장배출시설계폐기물, 하수슬러지, 지정폐기물(의료폐기물)임

* 건설폐기물 및 지정폐기물(의료폐기물 외)은 사업장배출시설계폐기물과 동일하게 적용

18) 성상별 배출계수는 국내 대표적인 5-9개 소각시설(고정상, 유동상, 연속식, 회분식)을 선정하여 온실가스 배출농도 측정을 통해 국가 고유 배출계수 산정(2011~2021)

7.4.1.2.3 활동자료

폐기물소각 부문의 활동자료는 「폐기물관리법」 제58조 및 동법 시행규칙 제81조에 의거, 기후에너지환경부에서 매년 발표하는 국가 폐기물 통계자료인 「전국 폐기물 발생 및 처리 현황」과 「지정 폐기물 발생 및 처리현황」을 활용하였다. 다만, 시계열적으로 폐기물 성상별 자료가 부재한 경우, 외삽법을 적용하여 추정하였다(표 7-33).

표 7-33 | 폐기물 소각량 결정방법

구분		1990-1993	1994-1995	1996 이후
생활 ¹⁾ 폐기물		외삽법을 적용하여 추정	국가 폐기물 통계자료: 「전국 폐기물 발생 및 처리현황 (기후에너지환경부)」	
사업장 배출 시설	슬러지	외삽법을 적용하여 추정		국가 폐기물 통계자료 적용: 「전국 폐기물 발생 및 처리현황 (기후에너지환경부)」
	슬러지 외			
건설 폐기물 ²⁾		외삽법을 적용하여 추정		
지정 폐기물		외삽법을 적용하여 추정	국가 폐기물 통계자료 적용: 「지정 폐기물 발생 및 처리현황 (기후에너지환경부)」	
의료 폐기물		지정폐기물에 포함		국가 폐기물 통계자료 적용: 「지정 폐기물 발생 및 처리현황 (기후에너지환경부)」 ※2000년부터 지정폐기물로부터 의료폐기물 분리

주: 1) 1990-1993년도까지 정확한 양이 제시되지 않아 외삽법을 적용하여 추정

2) 1990-1995년은 현 분류체계와 다르게 사업장배출시설폐기물은 과거 활동자료 중 건설 폐기물을 포함하여 보고되고 있어, 해당 기간 활동자료는 1996-1998년의 사업장배출시설폐기물과 건설폐기물의 평균 비율을 적용하여 분리

※ 「전국 폐기물 발생 및 처리현황(기후에너지환경부)」의 전국 시군구별 현황-6 가. 지방자치단체의 에너지 이용실태를 참고하여 에너지회수 시설의 소각처리량 활동자료를 수집

※ 1994.4.1.폐기물 분류체계 변경으로 특정폐기물(오니류, 폐석고 등) 중 일부가 일반폐기물로 전환됨에 따라 사업장폐기물량 급증

2006 IPCC GL에 따라 에너지회수가 일어나는 소각시설의 배출량은 폐기물소각 부문에서 제외하였다.

표 7-34 | 폐기물 유형별 국내승인통계 기준성상 분류 목록

폐기물 유형	국내승인통계의 폐기물 유형별 성상
음식물류	종량제음식물, 음식물류분리배출, 재활용폐식용유
종이류	종량제 종이류, 재활용 종이류
나무류	종량제 나무류, 재활용 가구류
섬유류	재활용 의류
고무피혁류	종량제 고무 피혁류, 재활용 타이어
플라스틱류	종량제 플라스틱류, 재활용 플라스틱류, 재활용 합성수지, 재활용 발포수지류, 재활용 영농폐기물 등
금속류	종량제 금속류, 재활용 고철류, 재활용 캔류
유리류	종량제 유리류, 재활용 유리병류, 재활용 형광등
기타(가연성)	종량제 가연성 기타, 재활용폐식용유
기타(불연성)	종량제 불연성 기타, 재활용 가능자원분리배출 기타 등
오니류	재활용 유기성오니, 재활용 무기성오니

| 표 7-35 | 폐기물소각 부문 활동자료 수집방법(1990-2023)

기간	활동자료	통계명	관리기관
1990-2023	폐기물 소각 처리량	전국 폐기물 발생 및 처리현황	기후에너지환경부

| 표 7-36 | 폐기물 종류별 소각 처리량(1990-2023)

(단위: 천톤)

구분	1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023
생활폐기물	544.9	1,985.6	3,872.2	5,023.5	5,640.2	5,530.1	5,565.2
사업장 폐기물	사업장 고형폐기물	536.5	2,897.4	2,296.6	2,911.1	2,474.3	2,502.6
	하수 슬러지	1.1	35.1	617.3	635.1	733.5	775.6
건설폐기물	107.3	755.8	335.6	238.6	135.9	146.0	148.9
지정폐기물(의료 외)	41.1	584.1	513.0	607.8	593.3	587.1	626.9
의료폐기물	IE	9.7	109.1	221.4	211.9	223.8	197.2
합계	1,231.0	6,267.8	7,743.8	9,637.5	9,789.2	9,765.4	9,903.6

자료: 「전국 폐기물 발생 및 처리현황(기후에너지환경부, 1990-2023)」, 「지정폐기물 발생 및 처리현황(기후에너지환경부, 1990-2018)」

※ 에너지회수시설에서 처리되는 소각량은 에너지 분야에서 산정하며 폐기물 분야에서는 산정하지 않음

7.4.1.3 시계열 일관성

폐기물소각 부문 배출량은 동일한 산정방법과 배출계수, 활동자료 출처를 일관성 있게 적용하였다. 일부 시계열적으로 폐기물 성상별 자료가 부재한 경우, 외삽법을 적용하여 시계열 일관성을 확보하였다.

7.4.1.4 QA/QC

QA/QC는 제1장 서론 1.5절 내용과 동일하다.

7.4.1.5 재계산

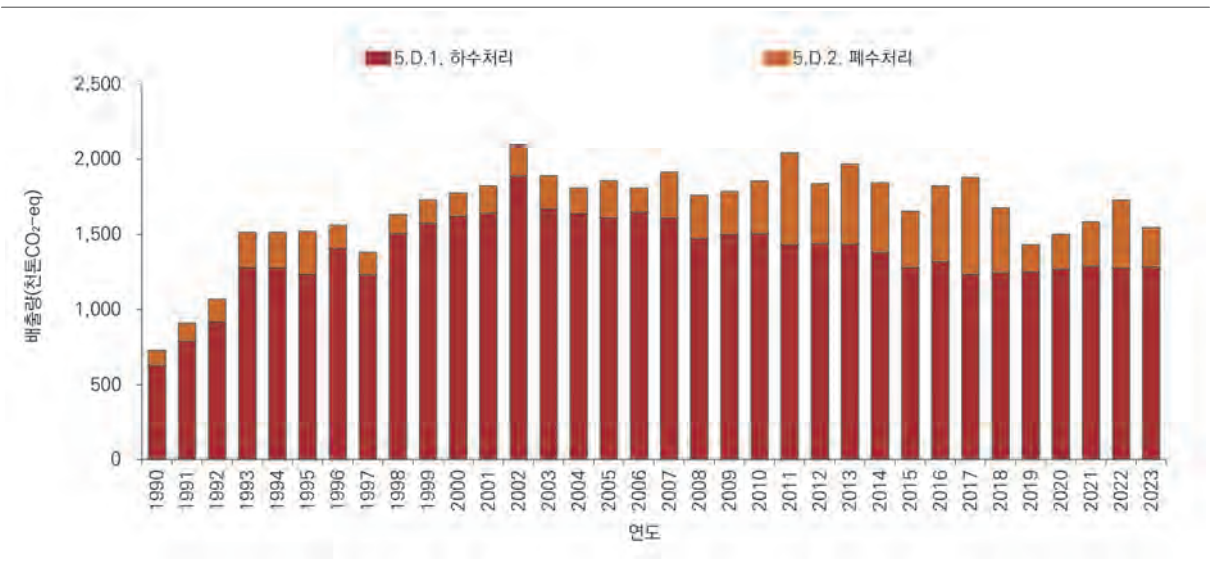
폐기물 소각 배출량 산정 시, 2012-2016년 소각량을「전국 폐기물 발생 및 처리현황 (기후에너지환경부)」의 수치를 적용하여 재계산하였다.

7.5 하·폐수처리 (5.D.)

하·폐수처리 부문은 하·폐수가 혐기적으로 처리되는 과정에서의 온실가스 배출을 산정하며, 세부 배출원은 하수처리(5.D.1.), 폐수처리(5.D.2.)가 있다.

하·폐수처리 부문 2023년 배출량은 1,545 천톤 CO₂-eq로 전년 대비 10.6% 감소하였으며, 폐기물 분야 배출량의 8.5%를 차지한다. 하·폐수처리 부문 하위 배출원 비중은 2023년 기준 하수처리가 83.2%, 폐수처리가 16.8%로 나타났다.

하수처리 배출량은 1,285 천톤 CO₂-eq로 전년 대비 0.8% 증가하였으며, 폐수처리 배출량은 260 천톤 CO₂-eq로 전년 대비 42.5% 감소하였다.



| 그림 7-6 | 하·폐수처리 부문 온실가스 배출량(1990-2023)

| 표 7-37 | 하·폐수처리 부문 온실가스 배출량(1990-2023)

(단위: 천톤 CO₂-eq)

구분	1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023
하수처리	631	1,621	1,505	1,247	1,291	1,275	1,285
폐수처리	98	155	349	429	293	453	260
합계	730	1,776	1,854	1,676	1,583	1,728	1,545

7.5.1 하수처리(5.D.1.)

7.5.1.1. 배출원 개요

2023년 기준	산정온실가스	방법론	배출계수	활동자료
	CH ₄ , N ₂ O	Tier 2	D, CS	하수처리 부하량, 메탄회수량, 질소 부하량

하수처리 부문은 공공하수처리와 미처리·미차집으로 구분된다. 공공하수처리는 생활오수 및 상업 지역에서 발생하는 오수를 포집하여, 하수관거를 통해 시 등 지방 정부 관할의 대규모 하수처리시설로 이송·처리하는 방식이다. 우리나라의 공공하수처리시설은 폭기조¹⁹⁾ 등을 활용한 호기성 처리가 주를 이루고 있고, 질소(N)와 인(P)과 같은 영양염류를 추가로 제거하기 위한 고도처리 공정을 대부분 갖추고 있다. 공공하수처리시설의 CH₄는 혐기성 조건에서 유기물이 분해될 때 생성되며, N₂O는 고도처리 공정의 탈질 공정에서 주로 발생한다.

미처리·미차집 온실가스 배출은 하수관거가 미설치된 지역 등에서 발생하는 하수가 공공수역으로 방류되어 자연적 분해 반응을 거치면서 발생한다. 우리나라에서 발생하는 하수는 대부분 공공하수처리 시설에서 처리(2023년 기준 하수도보급률 95.4%) 되지만, 일부 농·어촌지역 등 하수관거 설치가 어려운 격지, 또는 개인 하수도처리시설 및 정화조의 경우 미처리·미차집에 속한다.

하수처리 부문 2023년 배출량은 1,285 천톤 CO₂-eq로 전년 대비 0.8% 증가하였으며, 하·폐수처리 부문 배출량의 83.2%를 차지하고 있다.

표 7-38 | 하수처리 부문 온실가스 배출량(1990~2023)

(단위: 천톤 CO ₂ -eq)							
구분	1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023
하수처리	631	1,621	1,505	1,247	1,291	1,275	1,285

7.5.1.2. 방법론

1) 산정방법

공공하수처리 부문은 CH₄와 N₂O 배출량을 산정하며, 2006 IPCC GL의 방법론을 적용하고 있다.

공공하수처리의 CH₄ 배출량에 대한 산정식은 2006 IPCC GL 방법론을 따르되, 2006 IPCC GL 방법론에서 제시한 소득수준별(고소득, 저소득) 인구통계 및 처리방식 비율 등은 국내 실정에 맞지 않아 다음과 같이 2006 IPCC GL 산정방법의 기준을 일부 수정하여 적용하였다. 수정된 산정방식은 먼저, 국내 하수처리방식을 「하수도통계(기후에너지환경부)」 자료를 활용하여 하수처리 그룹별(하수처리인구, 폐수처리인구²⁰⁾)과 방식별(물리적처리, 생물학적처리, 고도처리, 폐수종말처리²¹⁾)로 구분하고, 여기에

19) 하수에 공기를 주입하여 물과 공기를 충분히 접촉시키는 반응장치

배출계수를 곱하여 CH₄ 배출량을 산정한다. 이렇게 산정된 CH₄ 배출량에서 CH₄ 회수량을 제외한 후 혐기성 소화조 CH₄ 누출량²²⁾을 더하여 배출량을 산정하였다.

〈공공하수처리 부문 CH₄ 배출량 산정식〉

$$\text{CH}_4 \text{ Emissions} = \sum_{i,j} \{ (TOW_{i,j} - S_{i,j}) \times EF_{i,j} \} - R + L_m$$

CH ₄ Emissions	: 공공하수처리로부터 배출되는 CH ₄ 배출량 [t CH ₄ /yr]
i	: 하수처리 그룹 (하수처리인구 / 폐수종말처리인구)
j	: 하수처리 방식별 구분 (물리적처리, 생물학적처리, 고도처리, 폐수종말처리)
EF _{i,j}	: 하수처리 그룹 및 방식별 CH ₄ 배출계수 [t CH ₄ / t BOD]
TOW _{i,j}	: 하수 그룹 및 방식별 BOD 부하량 [t BOD/yr]
S _{i,j}	: 하수 중 슬러지로 제거되는 유기물 [t BOD/yr]
R	: [(TOW * EF) - R] > 0 시설의 CH ₄ 회수량 [t CH ₄ /yr]
L _m	: 소화가스 CH ₄ 누출량 [t CH ₄ /yr]

* S_{i,j}는 통계자료 부재로 기본값 0 적용

자료: IPCC 2006 GL, Vol.5, Ch.6.2, Equation 6.1

공공하수처리 소화가스 누출량의 경우 「하수도통계(기후에너지환경부)」를 사용하였으며, 포집 후 회수된 가스량에 하수슬러지(하수슬러지, 가축분뇨) 투입량 비율을 곱하여 소화가스 발생량을 계산하였다. 그 후, 소화가스 포집 손실율(메탄 손실율) 5%를 적용하여 소화가스 누출량을 계산하였다. 혐기성 소화조 활동자료는 2015년부터 확보되어 해당 연도부터 배출량 산정에 적용하였다.

〈소화가스 CH₄ 누출량 산정식〉

$$\text{Leakage} = R / (1 - \eta) \times C \times K \times 0.7143 \times 365 \times 10^{-3}$$

Leakage	: 혐기성소화조에서 누출되는 CH ₄ 배출량 [t CH ₄ /yr]
R	: 소화가스 발생량 [m ³ /day]
η	: 소화가스 포집 손실율 [5%]
C	: 소화가스 중 CH ₄ 농도 [60%]
K	: 소화조에서의 소화가스 누출률 [5%]
0.7143	: 환산계수(CH ₄ 부피 → 질량) [16/22.4]

20) 공공하수처리구역 내 입주업체 등에서 발생하는 오·폐수가 공공폐수처리시설로 유입되는 지역에 거주하는 인구수(2024 하수도통계 작성방법, 한국환경공단, 2024.12)

21) 공공하수처리구역 내 입주업체 등에서 발생하는 오·폐수를 처리하는 공공폐수처리시설을 의미(공공폐수처리시설 설치 및 운영관리지침, 기후에너지환경부, 2024.03)

22) 5.B 고형폐기물의 생물학적 처리 부문과 동일한 방법론을 적용하여 [(TOW * EF) - R] < 0인 시설

공공하수처리 N₂O²³⁾ 배출량은 처리 그룹(하수처리인구, 폐수처리인구) 및 방식별(물리적처리, 생물학적처리, 고도처리, 폐수종말처리) 질소 부하량에 N₂O의 국가 고유 배출계수를 곱하여 산정하였다.

〈공공하수처리 부문 N₂O 배출량 산정식〉

$$N_2O \text{ Emissions} = \sum_{i,j} (TN_{i,j} \times EF_{i,j})$$

N₂O Emissions : 하수 유출수로부터 배출되는 N₂O 배출량 [t N₂O/yr]
 TN_{ij} : 하수처리 그룹 및 방식별 N 부하량 [t N/yr]
 EF_{ij} : 하수처리 그룹 및 방식별 N₂O 배출계수 [t N₂O/t N]
 i : 하수처리 그룹(하수처리인구, 폐수처리인구)
 j : 하수처리 방식별 구분(물리적처리, 생물학적처리, 고도처리, 폐수종말처리)

미처리·미차집의 CH₄ 배출량은 배출계수와 활동자료의 곱으로 산정한다.

〈미처리/미차집 CH₄ 배출량 산정식〉

$$CH_4 \text{ Emissions} = AD \times EF$$

CH₄ Emissions : 미처리/미차집으로부터 배출되는 CH₄ 배출량 [t CH₄/yr]
 AD : 미처리/미차집 BOD 부하량 [t BOD/yr]
 EF : 미처리/미차집 CH₄ 배출계수 [t CH₄/t BOD]

2) 배출계수

공공하수처리의 배출계수는 2006 IPCC GL에서 소득수준별 하수처리방식 비율은 국내 실정에 맞지 않아 소득 수준별 하수처리방식 비율을 적용하지 않고 「하수도 통계(기후에너지환경부)」의 하수처리 방식에 기초하여 물리적처리, 생물학적처리, 고도처리, 폐수종말처리로 구분하여 배출계수를 적용하였다. 생물학적처리와 고도처리 배출계수는 국가 고유 배출계수를 적용하며, 물리적처리, 폐수종말처리 배출계수는 기존 국내 연구자료(환경부 2000, 2002)²⁴⁾ 값을 적용하였다.

표 7-39 | 하수처리 공법별 배출계수

(단위: t CH₄/t BOD, t N₂O/t N)

구분	물리적처리*	생물학적처리**	고도처리**	폐수종말처리*
CH ₄ 배출계수	0.01532 (회수율 76.8%)	0.02245 ¹⁾	0.00779 ¹⁾	0.0017698
N ₂ O 배출계수	0.00174	0.018 ¹⁾	0.0122 ¹⁾	0.0056814

주: 1) 국내에서 대표적인 5-9개 하수처리시설에 대해 시설별 온실가스 발생량을 측정하여 국가 고유 배출계수를 산정(2015-2021년)

자료: * 환경기초시설에서 발생하는 온실가스 배출량 조사(환경부, 2000), 환경부문의 온실가스 배출량 조사 및 통계구축(환경부, 2002)

** 국가 고유 배출계수 적용공법

23) 우리나라는 대부분의 하수가 공공하수처리시설로 유입되며, 「하수도통계 (기후에너지환경부)」에 시설별 질소 농도에 대한 통계가 구축되어 있으며, 「하수도법」의 방류수수질기준에 의해 공공수역으로 방류되는 질소농도도 법에 의해 규제되고 있음

24) 국내를 대표하는 폐수종말처리시설에 대해 온실가스 발생량을 측정하여 배출계수 산정

미처리·미차집의 배출계수는 CH₄ 최대 생성가능량에 메탄 보정계수(Methane Correction Factor; MCF)를 곱하여 결정한다.

$$EF = B_0 \times MCF$$

자료: IPCC 2006 GL, Vol.5, Ch.6, Equation 6.2

여기서 B_0 는 메탄 최대 생성가능량생성율(B_0), MCF 는 메탄 보정계수이다. B_0 는 2006 IPCC GL에서 제시한 기본값 0.6 kg CH₄/kg BOD를 적용하였고, MCF 는 2006 IPCC GL에서 제시한 0.1(미처리시스템, 바다, 강 또는 호수로 유입)을 적용하여 미처리·미차집의 CH₄ 배출계수는 0.06 톤 CH₄/톤 BOD를 적용하였다.

3) 활동자료

공공하수처리의 활동자료($TOW_{1,i}$)는 공공하수처리 그룹의 방식별 부하량($TOW_{1,i}$)과 폐수종말처리 그룹 부하량(TOW_2)으로 구분된다. 공공하수처리 그룹의 방식별(물리적처리, 생물학적처리, 고도처리) 부하량($TOW_{1,i}$) 활동자료는 하수처리 과정에서 제거되는 유기물 부하량(t BOD/yr, t N/yr)으로, 하수처리량(m³/day), BOD 및 N 농도(mg/L)와 제거율(%)을 이용하여 산정하였다. 공공하수처리 방식 중, 생물학적 처리와 고도처리의 활동자료는 유입된 유기물 부하량을 기준으로 산정하고, 물리적 처리는 유기물 부하량 제거율을 적용하여 개발된 배출계수와와의 정합성을 고려하여, 활동자료 산정 시 유입된 유기물 부하량에 제거율(%)을 적용하였다.

공공하수처리 활동자료 산정 시 공공하수처리인구 비율(T_1)과 폐수종말처리인구 비율(T_2)은 공공하수처리 인구수, 폐수종말처리 인구수를 하수처리구역 내 인구수로 나누어 산정하였다. 유기물 농도와 제거율²⁵⁾은 하수처리장별 유입수와 방류수 농도를 하수처리량에 따라 가중 평균하였다.

〈공공하수처리 부문 활동자료 산정식〉

$$TOW_{1,i} = Q_i \times T_1 \times C \times (\lambda^*) \times 365 \times 10^{-6}$$

$TOW_{1,i}$	: 공공하수처리 방식별 유기물 부하량[t BOD/yr or t N/yr]
Q_i	: 공공하수처리 방식별 하수량 [m ³ /day]
T_1	: 공공하수처리 인구비율 [%]
C	: 하수처리 유입 유기물 농도 [mg/L]
λ	: 유기물질 제거율

* 물리적 처리 산정시에만 적용

자료: IPCC 2006 GL, Vol.5, Ch.6, Equation 6.3

폐수종말처리 그룹 부하량(TOW_2) 활동자료는 하수량 및 유기물 농도 자료가 부재하여, 공공하수처리 총 하수량에 폐수종말처리 인구비율을 적용하였고, 유기물 농도는 공공하수처리와 동일한 값을 적용하였다.

25) 일 처리유량 500톤 미만 시설의 경우, 값이 매우 작고 신뢰도가 낮아 제외하고 산정

〈폐수종말처리 부문 활동자료 산정식〉

$$TOW_2 = Q \times T_2 \times C \times 365 \times 10^{-6}$$

TOW_2 : 폐수종말처리 유기물 부하량 [t BOD/yr or t N/yr]
 Q : 공공하수처리 총 하수량 [m^3/day]
 T_2 : 폐수종말처리 인구비율 [%]
 C : 공공하수처리 유입 유기물 농도 [mg/L]
 자료: IPCC 2006 GL, Vol.5, Ch.6, Equation 6.3

표 7-40 공공하수처리 부문 활동자료 수집방법(1990-2023)

기간	활동자료	통계명	관리기관
1990-2023	하수 BOD 부하량, N 부하량	하수도 통계	기후에너지환경부
2015-2023	메탄 회수량	하수도 통계, 유기성 폐자원 바이오가스화시설 현황	기후에너지환경부

표 7-41 공공하수처리 부문 CH_4 활동자료 현황(1990-2023)

(단위: kt BOD/yr)

구분	1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023
BOD 부하량	133.4	567.5	1,010.8	1,184.1	1,261.4	1,255.7	1,274.3

표 7-42 공공하수처리 부문 N_2O 활동자료 현황(1990-2023)

(단위: kt T-N/yr)

구분	1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023
N 부하량	13.2	188.3	257.1	279.4	298.4	300.1	300.2

공공하수처리 부문 회수량은 「하수도 통계(기후에너지환경부)」의 소화조 발생 가스량 자료를 사용하였으며, 1990년부터 2014년까지 국내 통계자료가 부재하여 2015년부터 산정하였다.

표 7-43 공공하수처리 부문 CH_4 회수량(1990-2023)

(단위: 천톤 CH_4)

구분	1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023
회수량	-	-	-	86.3	74.4	72.7	74.4

미처리·미차집의 활동자료는 공공수역으로 배출되는 미처리·미차집된 유기물 부하량이며, 이때 적용된 활동자료는 하수처리구역 내 인구 1인당 하수처리 부하량을 산정한 후 하수처리구역 외 인구를 곱하여 산정하였다. 이때, BOD 농도는 공공하수처리 시설의 유입 BOD 농도를 적용하였다. 일부 누락된 연도의 활동자료는 중첩법을 적용하여 추정하였다.

〈미처리/미차집 활동자료 산정식〉

$$\text{활동자료} \left[\frac{t \text{ BOD}}{yr} \right] = \frac{\text{하수처리량} \left[\frac{m^3}{day} \right] \times \text{하수처리장 유입수 BOD 농도} \left[\frac{mg}{L} \right]}{\text{하수처리구역 내 인구}} \times \text{하수처리구역 외 인구} \times 365 \times 10^{-6}$$

표 7-44 | 미처리/미차집 활동자료 현황(1990-2023)

(단위: 1,000명, 천 m³/day, mg/L)

구분	1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023
하수처리구역내인구	14,120	33,843	46,358	49,834	49,968	50,059	50,252
하수처리구역외인구	28,749	14,134	5,077	3,239	2,764	2,569	2,422
미처리/미차집 하수량	6,999.8	6,586.5	2,128.6	1,297.7	1,117.6	1,018.2	991.5
BOD 농도	122.7	99.0	142.5	162.5	171.1	173.4	169.7

자료: 하수도 통계(기후에너지환경부, 1990-2023)

7.5.1.3 시계열 일관성

하수처리 부문에서의 CH₄, N₂O 배출량은 동일한 산정방법과 배출계수, 활동자료 출처를 일관성 있게 적용하였으며, 미처리·미차집의 일부 활동자료 누락 연도에 대해서는 중첩법을 적용하여 일관성을 확보하였다.

7.5.1.4 QA/QC

QA/QC는 제1장 서론 1.5절 내용과 동일하다.

7.5.1.5 재계산

재계산은 수행하지 않았다.

7.5.2 폐수처리(5.D.2.)

7.5.2.1 배출원 개요

2023년 기준	산정온실가스	방법론	배출계수	활동자료
	CH ₄	Tier 2	CS	산업폐수 COD 부하량

산업폐수는 가정 및 상업활동 이외의 산업활동에 의해 발생하는 폐수를 의미한다. 우리나라는 산업 폐수의 경우 「물환경보전법」에 의하여 폐수처리 시설에서 처리되며, 일부 공공하수처리구역내에서 발생하는 폐수는 「물환경보전법」과 「하수도법」에 따라 생활하수와 연계하여 공공하수처리시설에서 처리한다.²⁶⁾ 폐수처리 부문에서는 하수처리시설과 연계 처리하는 것을 제외한 폐수처리 시설에서의

26) 공공하수도에 폐수를 유입하려면 공공하수도관리청의 허가를 받아야 하며, 허가시 공공하수도 설비 및 처리시설의 용량, 수질기준 등을 종합적으로 검토한다. 또한 공공하수처리시설에 유입되는 폐수의 배출허용기준은 「물환경보전법」과 하위 시행규칙에 따라 정해지며, 지역구분 및

온실가스 발생량을 산정·보고한다. 산업별로 폐수처리 공정이 다양하여 일반화하기는 쉽지 않으나, 일반적으로 혐기성 조건에서 폐수에 함유된 유기물이 분해되는 과정에서 CH₄가 배출된다. N₂O는 질산화 및 탈질화 과정에서 배출되며, N₂O의 경우 국내 활동자료가 부재하여 “NE”로 보고하였다.

우리나라는 산업을 11개 업종별로 분류하여 산업폐수 처리 과정에서 발생하는 CH₄ 배출량을 산정·보고한다. 폐수처리 부문 2023년 배출량은 전년 대비 42.5% 감소한 260 천톤 CO₂-eq으로 하·폐수처리 부문 배출량의 16.8%를 차지하고 있다.

표 7-45 | 폐수처리 부문 온실가스 배출량(1990-2023)

(단위: 천톤 CO₂-eq)

구분	1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023
폐수처리	98	155	349	429	293	453	260

7.5.2.2 방법론

7.5.2.2.1 산정방법

폐수처리 부문은 2006 IPCC GL 산정식을 적용하며 업종별 COD 부하량에 업종별 국가 고유 배출계수를 곱하여 산정하였다. 산업폐수에서 발생하는 CH₄ 회수량은 2006 IPCC GL에서 제시하고 있는 기본값 0을 적용하였다.

〈폐수처리 부문 CH₄ 배출량 산정식〉

$$\text{CH}_4 \text{ Emissions} = \sum_i (\text{IND}_i \times \text{EF}_i) - R^*$$

CH₄ Emissions : 산업폐수로부터 배출되는 CH₄ 배출량 [t CH₄/yr]

IND_i : 업종별 COD 부하량 [t COD/yr]

EF_i : 업종별 CH₄ 배출계수 [t CH₄/t COD]

i : 업종구분

* R은 통계자료 부재로 기본값 0 적용

자료: IPCC 2006 GL, Vol.5, Ch.6.2, Equation 6.4

7.5.2.2.2 배출계수

폐수처리 부문의 CH₄ 배출계수는 업종별 국가 고유 배출계수를 적용하였다.

표 7-46 | 폐수처리 부문 CH₄ 배출계수

(단위: t CH₄/ t COD)

구분	화학	전기 전자	음식 료품	제지	피혁 신발	섬유	비금속	발전 수도	폐수 처리업	금속	기타
국가 고유 배출계수	0.00168	0.00160	0.01000	0.00340	0.00360	0.00148	0.00020	0.00028	0.03250	0.00330	0.00576

주: 업종별로 대표 사업장 2-4개에 대해 온실가스 배출 농도를 현장 측정하여 국가 고유 배출계수 산정(2013-2020년)

폐수량에 따라 다르게 적용되고 있다.

7.5.2.2.3 활동자료

폐수처리 부문의 활동자료는 「산업폐수의 발생과 처리(기후에너지환경부)」의 표 7-48의 통계상 업종분류표를 기준으로 11종으로 분류하여 업종별 COD 유입 부하량을 산정하였다. 현재 통계에서는 업종별 폐수 발생량과 BOD를 공표하고 COD 자료는 부재하여 전문가 검토에 따라 확보된 BOD 자료에 COD/BOD 전환계수를 적용해 BOD를 COD로 전환하여 사용하였다.

| 표 7-47 | 폐수처리 부문 활동자료 수집방법(1990-2023)

기간	활동자료	통계명	관리기관
1990-2023	업종별 BOD 부하량	산업폐수의 발생과 처리	기후에너지환경부

| 표 7-48 | 폐수처리 활동자료에 대한 업종분류표

인벤토리 업종분류 (11종)	산업통계의 업종분류(24종) (2010년 이전 적용)	산업통계의 업종분류(34종) (2011년 이후 적용)
화학	화학	화학물질 및 화학제품 제조업; 의약품 제외 의료용 물질 및 의약품 제조업
전기전자	전기전자	전자부품, 컴퓨터, 영상, 음향 및 통신장비 제조업 전기장비 제조업
음식료품	음식료품 수산물판매	식료품 제조업 음료 제조업 도매 및 상품중개업
제지	담배제지목재	담배 제조업 목재 및 나무제품 제조업; 가구제외 펄프, 종이 및 종이제품 제조업
피혁신발	피혁신발	의복, 의복액세서리 및 모피제품 제조업 가죽, 가방 및 신발 제조업
섬유	섬유	섬유제품 제조업; 의복 제외
비금속	비금속	비금속광물제품 제조업
발전수도	발전수도	전기, 가스, 증기 및 공기조절 공급업 수도사업
폐수처리업	폐수처리업	폐기물 수집운반, 처리 및 원료재생업
금속	가공금속 조립금속	1차 금속 제조업 금속가공제품 제조업; 기계 및 가구 제외
기타	광업시설 출판인쇄사진 석유정제 시험시설 운수장비 세탁시설 정수시설 병원시설 세정응축시설 도금시설 기타	석탄, 원유 및 천연가스 광업 금속광업 비금속광물광업; 연료용 제외 인쇄 및 기록매체 복제업 코크스, 연탄 및 석유정제품 제조업 고무제품 및 플라스틱제품 제조업 가구제조업 보건업 기타 개인 서비스업 도금시설 운수장비 수선 및 세차 또는 세척시설

인벤토리 업종분류 (11종)	산업통계의 업종분류(24종) (2010년 이전 적용)	산업통계의 업종분류(34종) (2011년 이후 적용)
기타	고무플라스틱시설	산업시설의 정수시설 산업시설의 폐가스·분진, 세정·응축시설 이화학 시험시설 제1호부터 제81호까지의 분류에 속하지 아니하는 시설

표 7-50 | 폐수처리 업종별 유입 COD 부하량(1990-2023)

(단위: 천톤 COD)

구분	1990	2000	2010	2018	2021	2022	2023
화학	63.5	111.1	193.6	125.8	156.0	143.5	102.3
전기전자	0.1	14.2	55.9	32.5	27.6	23.6	37.5
음식료품	151.6	136.2	138.1	142.8	116.6	124.4	122.1
제지	214.2	250.9	134.2	169.1	126.6	136.7	131.5
피혁신발	28.8	21.5	16.1	7.1	3.2	4.6	3.9
섬유	172.4	71.3	59.3	48.8	42.7	42.5	39.2
비금속	4.1	14.2	5.1	2.5	4.0	4.1	4.4
발전수도	48.3	69.1	37.6	108.4	71.6	63.9	55.7
폐수처리업	0.3	19.0	213.4	367.0	225.1	404.5	202.1
금속	86.9	332.8	490.9	65.2	83.7	69.4	57.0
기타	86.4	206.7	260.9	137.7	149.3	121.5	93.8
합계	856.5	1,247.2	1,605.3	1,207.0	1,006.3	1,138.7	849.5

자료: 산업폐수의 발생과 처리(기후에너지환경부, 1990-2023)

7.5.2.3 시계열 일관성

산업폐수 부문 배출량은 동일한 산정방법과 배출계수, 활동자료 출처를 일관성 있게 적용하였다.

7.5.2.4 QA/QC

QA/QC는 제1장 서론 1.5절 내용과 동일하다.

7.5.2.5 재계산

폐수처리 배출량 산정 시, 2022년 업종별 COD 부하량을 「산업폐수의 발생과 처리(기후에너지환경부)」의 수치를 적용하여 재계산하였다.

부록

부록 1. 주요 배출원 분석 결과

부록 2. 용어 설명

부록 3. 참고문헌

부 록

부록 1. 주요 배출원 분석 결과

1990년 기준연도 온실가스 인벤토리와 2023년 온실가스 인벤토리의 배출·흡수원에 대한 수준평가와 추세평가(LULUCF 포함) 결과의 주요내용은 부표 1-1, 부표 1-2와 같다. 2023년 국가 온실가스 인벤토리 수준평가와 추세평가 누계에서 95%까지 해당하는 주요 배출원·흡수원은 각각 총 23개, 28개로 굵게 표시하였다.

부표 1-1 | 국가 온실가스 인벤토리 수준평가에 따른 주요 배출·흡수원(LULUCF 포함)

순위	IPCC 온실가스 배출·흡수원 (LULUCF 포함)	온실가스	2023년 배출량 (kt CO ₂ -eq)	수준평가 비중 (총합=1)	수준평가 비중 누계
1	1.A.1. 에너지산업: 고체연료	CO ₂	159,568	0.212	0.212
2	1.A.2. 제조업 및 건설업: 고체연료	CO ₂	103,789	0.138	0.349
3	1.A.3.b. 도로수송	CO ₂	92,058	0.122	0.472
4	1.A.1. 에너지산업: 기체연료	CO ₂	67,876	0.090	0.562
5	4.A.1. 산림지로 유지된 산림지	CO ₂	-41,331	0.055	0.616
6	2.F.1. 냉장 및 냉방	F-gases	29,714	0.039	0.656
7	1.A.4. 기타: 기체연료	CO ₂	29,380	0.039	0.695
8	2.B.8. 석유화학제품 및 카본블랙 생산	CO ₂	28,078	0.037	0.732
9	2.C.1. 철강생산	CO ₂	23,519	0.031	0.763
10	2.A.1. 시멘트생산	CO ₂	22,737	0.030	0.793
11	1.A.2. 제조업 및 건설업: 기체연료	CO ₂	20,936	0.028	0.821
12	1.A.1. 에너지산업: 액체연료	CO ₂	18,077	0.024	0.845
13	1.A.2. 제조업 및 건설업: 액체연료	CO ₂	14,650	0.019	0.865
14	1.A.4. 기타: 액체연료	CO ₂	14,087	0.019	0.883
15	5.A. 폐기물매립	CH ₄	11,312	0.015	0.898
16	1.A.2. 제조업 및 건설업: 기타화석연료	CO ₂	7,174	0.010	0.908
17	3.C. 버재배	CH ₄	6,879	0.009	0.917
18	3.A. 장내발효	CH ₄	6,739	0.009	0.926
19	5.C. 폐기물소각 및 노천소각	CO ₂	4,742	0.006	0.932
20	2.A.2. 석화생산	CO ₂	4,110	0.005	0.938
21	2.E. 전자 산업	F-gases	3,624	0.005	0.942
22	3.B. 가축분뇨처리	CH ₄	3,478	0.005	0.947
23	2.G. 기타 제품제조 및 소비	F-gases	3,386	0.004	0.952
24	1.A.5. 미분류: 액체연료	CO ₂	3,004	0.004	0.955
25	4.B.2. 타토지에서 전용된 농경지	CO ₂	2,863	0.004	0.959

순위	IPCC 온실가스 배출·흡수원 (LULUCF 포함)		온실가스	2023년 배출량 (kt CO ₂ -eq)	수준평가 비중 (총합=1)	수준평가 비중 누계
26	3.B.	가축분뇨처리	N ₂ O	2,504	0.003	0.963
27	1.B.1.	고체연료	CH ₄	2,327	0.003	0.966
28	2.F.3.	소화기	F-gases	2,126	0.003	0.969
29	1.A.3.a.	국내항공	CO ₂	1,756	0.002	0.971
30	1.A.3.b.	도로수송	N ₂ O	1,692	0.002	0.973
31	3.D.1.	직접배출	N ₂ O	1,621	0.002	0.975
32	2.F.2.	발포제	F-gases	1,552	0.002	0.977
33	1.A.3.d.	국내해운: 액체연료	CO ₂	1,367	0.002	0.979
34	1.A.1.	에너지산업: 기타화석연료	CO ₂	1,322	0.002	0.981
35	4.E.1.	정주지로 유지된 정주지	CO ₂	-1,211	0.002	0.982
36	3.D.2.	간접배출	N ₂ O	1,206	0.002	0.984
37	5.D.	하폐수처리	N ₂ O	977	0.001	0.985
38	2.A.4.	탄산염의 기타 공정 사용	CO ₂	919	0.001	0.987
39	1.B.2.b.	천연가스	CH ₄	748	0.001	0.988
40	1.A.1.	에너지산업: 고체연료	N ₂ O	732	0.001	0.989
41	1.A.4.	기타: 고체연료	CO ₂	721	0.001	0.990
42	1.A.3.b.	도로수송	CH ₄	664	0.001	0.990
43	2.D.	비에너지 제품 및 용매 사용	CO ₂	640	0.001	0.991
44	5.D.	하폐수처리	CH ₄	568	0.001	0.992
45	1.A.4.	기타: 기타화석연료	CO ₂	507	<0.001	0.993
46	4.G.	수확된 목재제품	CO ₂	-449	<0.001	0.993
47	1.A.4.	기타: 바이오매스	CH ₄	423	<0.001	0.994
48	4.D.1.a.	습지로 유지된 습지 : 내륙습지	CH ₄	388	<0.001	0.994
49	1.A.1.	에너지산업: 기체연료	N ₂ O	311	<0.001	0.995
50	4.A.3.	산불(산림지에서 바이오매스 연소에 의한 배출)	CO ₂	265	<0.001	0.995
51	2.A.3.	유리생산	CO ₂	261	<0.001	0.995
52	5.C.	폐기물소각 및 노천소각	N ₂ O	222	<0.001	0.996
53	1.A.2.	제조업 및 건설업: 고체연료	N ₂ O	217	<0.001	0.996
54	5.B.	고형폐기물의 생물학적 처리	N ₂ O	200	<0.001	0.996
55	2.B.8.	석유화학제품 및 카본블랙 생산	CH ₄	191	<0.001	0.997
56	2.C.4.	마그네슘 생산	SF ₆	185	<0.001	0.997
57	1.A.3.c.	철도	CO ₂	165	<0.001	0.997
58	2.G.	기타 제품제조 및 소비	N ₂ O	152	<0.001	0.997
59	5.B.	고형폐기물의 생물학적 처리	CH ₄	149	<0.001	0.997
60	1.B.2.a.	석유	CH ₄	122	<0.001	0.998
61	1.A.1.	에너지산업: 바이오매스	N ₂ O	107	<0.001	0.998
62	2.B.2.	질산 생산	N ₂ O	101	<0.001	0.998
63	3.H.	요소 사용	CO ₂	92	<0.001	0.998
64	1.A.4.	기타: 액체연료	N ₂ O	83	<0.001	0.998
65	1.A.2.	제조업 및 건설업: 액체연료	N ₂ O	82	<0.001	0.998
66	1.A.1.	에너지산업: 바이오매스	CH ₄	79	<0.001	0.998
67	1.A.2.	제조업 및 건설업: 바이오매스	N ₂ O	77	<0.001	0.998
68	1.A.2.	제조업 및 건설업: 고체연료	CH ₄	74	<0.001	0.999

순위	IPCC 온실가스 배출·흡수원 (LULUCF 포함)		온실가스	2023년 배출량 (kt CO ₂ -eq)	수준평가 비중 (총합=1)	수준평가 비중 누계
69	1.A.4.	기타: 기체연료	CH ₄	74	<0.001	0.999
70	1.A.3.e.	기타수송	CO ₂	72	<0.001	0.999
71	2.B.10.	기타	N ₂ O	70	<0.001	0.999
72	1.A.2.	제조업 및 건설업: 기타화석연료	N ₂ O	62	<0.001	0.999
73	1.A.4.	기타: 고체연료	CH ₄	62	<0.001	0.999
74	1.A.2.	제조업 및 건설업: 바이오매스	CH ₄	61	<0.001	0.999
75	2.C.7.	기타	CO ₂	61	<0.001	0.999
76	1.A.4.	기타: 바이오매스	N ₂ O	57	<0.001	0.999
77	2.B.9.	불소화합물 생산	F-gases	55	<0.001	0.999
78	1.A.2.	제조업 및 건설업: 기타화석연료	CH ₄	49	<0.001	0.999
79	1.A.4.	기타: 액체연료	CH ₄	45	<0.001	0.999
80	1.A.4.	기타: 기타화석연료	CH ₄	41	<0.001	0.999
81	1.B.2.c.	탈기 및 소각	CH ₄	37	<0.001	0.999
82	1.A.2.	제조업 및 건설업: 액체연료	CH ₄	34	<0.001	1.000
83	1.A.2.	제조업 및 건설업: 기체연료	N ₂ O	25	<0.001	1.000
84	1.A.1.	에너지산업: 액체연료	N ₂ O	24	<0.001	1.000
85	4.D.1.b.	습지로 유지된 습지 : 연안습지	CO ₂	-23	<0.001	1.000
86	4.D.2.	타토지에서 전용된 습지	CO ₂	23	<0.001	1.000
87	4.A.3.	산불(산림지에서 바이오매스 연소에 의한 배출)	CH ₄	22	<0.001	1.000
88	1.A.3.c.	철도	N ₂ O	17	<0.001	1.000
89	1.A.3.a.	국내항공	N ₂ O	15	<0.001	1.000
90	1.A.1.	에너지산업: 기타화석연료	N ₂ O	15	<0.001	1.000
91	1.A.1.	에너지산업: 기체연료	CH ₄	15	<0.001	1.000
92	1.A.4.	기타: 기체연료	N ₂ O	14	<0.001	1.000
93	2.F.5.	용매	F-gases	13	<0.001	1.000
94	1.A.1.	에너지산업: 기타화석연료	CH ₄	12	<0.001	1.000
95	3.F.	작물잔사소각	CH ₄	12	<0.001	1.000
96	1.A.1.	에너지산업: 고체연료	CH ₄	12	<0.001	1.000
97	4.A.3.	산불(산림지에서 바이오매스 연소에 의한 배출)	N ₂ O	12	<0.001	1.000
98	1.A.5.	미분류: 액체연료	CH ₄	11	<0.001	1.000
99	1.A.3.d.	국내해운: 액체연료	N ₂ O	10	<0.001	1.000
100	1.A.2.	제조업 및 건설업: 기체연료	CH ₄	9.5	<0.001	1.000
101	4.C.2.	타토지에서 전용된 초지	CO ₂	8.1	<0.001	1.000
102	2.F.4.	에어로졸	F-gases	7.9	<0.001	1.000
103	1.B.1.	고체연료	CO ₂	7.0	<0.001	1.000
104	1.A.5.	미분류: 액체연료	N ₂ O	6.4	<0.001	1.000
105	1.A.4.	기타: 기타화석연료	N ₂ O	5.9	<0.001	1.000
106	1.A.1.	에너지산업: 액체연료	CH ₄	5.2	<0.001	1.000
107	1.A.3.d.	국내해운: 액체연료	CH ₄	3.6	<0.001	1.000
108	1.A.3.d.	국내해운: 기체연료	CO ₂	3.4	<0.001	1.000
109	1.A.4.	기타: 고체연료	N ₂ O	2.9	<0.001	1.000
110	3.F.	작물잔사소각	N ₂ O	2.9	<0.001	1.000
111	3.G.	석회 사용	CO ₂	2.7	<0.001	1.000

순위	IPCC 온실가스 배출·흡수원 (LULUCF 포함)		온실가스	2023년 배출량 (kt CO ₂ -eq)	수준평가 비중 (총합=1)	수준평가 비중 누계
112	5.C.	폐기물소각 및 노천소각	CH ₄	1.9	<0.001	1.000
113	1.A.3.e.	기타수송	N ₂ O	1.4	<0.001	1.000
114	1.B.2.b.	천연가스	CO ₂	1.3	<0.001	1.000
115	2.B.10.	기타	CO ₂	1.0	<0.001	1.000
116	1.A.3.a.	국내항공	CH ₄	0.5	<0.001	1.000
117	2.C.2.	합금철 생산	CO ₂	0.5	<0.001	1.000
118	1.A.3.e.	기타수송	CH ₄	0.3	<0.001	1.000
119	1.A.3.c.	철도	CH ₄	0.3	<0.001	1.000
120	1.B.2.c.	탈기 및 소각	CO ₂	0.2	<0.001	1.000
121	1.A.3.d.	국내해운: 기체연료	CH ₄	0.2	<0.001	1.000
122	1.B.2.a.	석유	CO ₂	0.1	<0.001	1.000
123	1.A.3.d.	국내해운: 기체연료	N ₂ O	0.05	<0.001	1.000
총계				667,767	1.000	

주: F-gases는 HFCs, PFCs, SF₆, NF₃의 합

부표 1-2 | 국가 온실가스 인벤토리 추세평가에 따른 주요 배출·흡수원(LULUCF 포함)

순위	IPCC 온실가스 배출·흡수원 (LULUCF 포함)		온실가스	배출량(kt CO ₂ -eq)		추세평가	추세평가 비중 (총합=1)	추세평가 비중 누계
				1990년	2023년			
1	1.A.1.	에너지산업: 고체연료	CO ₂	18,037	159,568	0.382	0.150	0.150
2	1.A.4.	기타: 고체연료	CO ₂	35,438	721	0.258	0.113	0.263
3	1.A.2.	제조업 및 건설업: 액체연료	CO ₂	33,737	14,650	0.200	0.089	0.352
4	1.A.4.	기타: 액체연료	CO ₂	32,253	14,087	0.191	0.085	0.437
5	4.A.1.	산림지로 유지된 산림지	CO ₂	-38,227	-41,331	0.183	0.077	0.514
6	1.A.1.	에너지산업: 기체연료	CO ₂	4,800	67,876	0.096	0.073	0.587
7	2.F.1.	냉장 및 냉방	F-gases	-	29,714	0.082	0.039	0.626
8	1.A.1.	에너지산업: 액체연료	CO ₂	19,026	18,077	0.081	0.037	0.663
9	3.C.	버재배	CH ₄	14,073	6,879	0.081	0.036	0.699
10	1.A.4.	기타: 기체연료	CO ₂	1,652	29,380	0.071	0.033	0.732
11	1.B.1.	고체연료	CH ₄	10,745	2,327	0.069	0.031	0.764
12	1.A.2.	제조업 및 건설업: 기체연료	CO ₂	509	20,936	0.064	0.026	0.789
13	5.A.	폐기물매립	CH ₄	12,149	11,312	0.058	0.024	0.814
14	2.A.1.	시멘트생산	CO ₂	15,871	22,737	0.053	0.021	0.835
15	1.A.3.b.	도로수송	CO ₂	31,003	92,058	0.052	0.021	0.855
16	2.B.8.	석유화학제품 및 카본블랙 생산	CO ₂	5,264	28,078	0.043	0.020	0.875
17	1.A.2.	제조업 및 건설업: 고체연료	CO ₂	37,699	103,789	0.023	0.014	0.890
18	2.C.1.	철강생산	CO ₂	13,041	23,519	0.021	0.011	0.901
19	1.A.2.	제조업 및 건설업: 기타화석연료	CO ₂	-	7,174	0.020	0.009	0.910
20	1.A.4.	기타: 고체연료	CH ₄	2,864	62	0.014	0.009	0.919
21	1.A.3.d.	국내해운: 액체연료	CO ₂	2,457	1,367	0.012	0.006	0.925
22	2.E.	전자 산업	F-gases	-	3,624	0.011	0.005	0.930
23	2.A.2.	석화생산	CO ₂	257	4,110	0.011	0.005	0.935
24	5.C.	폐기물소각 및 노천소각	CO ₂	530	4,742	0.010	0.004	0.939
25	2.G.	기타 제품제조 및 소비	F-gases	168	3,386	0.008	0.004	0.943
26	4.B.2.	타토지에서 전용된 농경지	CO ₂	-30	2,863	0.008	0.004	0.947
27	2.B.10.	기타	CO ₂	1,058	1.0	0.007	0.003	0.950
28	3.D.1.	직접배출	N ₂ O	1,706	1,621	0.007	0.003	0.953
29	1.A.5.	미분류: 액체연료	CO ₂	182	3,004	0.007	0.003	0.957
30	3.D.2.	간접배출	N ₂ O	1,513	1,206	0.007	0.003	0.960
31	2.B.9.	불소화합물 생산	F-gases	1,042	55	0.006	0.003	0.963
32	3.A.	장내발효	CH ₄	3,728	6,739	0.006	0.003	0.966
33	2.F.3.	소화기	F-gases	-	2,126	0.005	0.003	0.969
34	1.A.3.c.	철도	CO ₂	882	165	0.004	0.003	0.972
35	2.F.2.	발포제	F-gases	-	1,552	0.003	0.002	0.974
36	4.E.1.	정주지로 유지된 정주지	CO ₂	-729	-1,211	0.003	0.002	0.976
37	3.B.	가축분뇨처리	CH ₄	1,968	3,478	0.003	0.002	0.978
38	1.A.1.	에너지산업: 기타화석연료	CO ₂	-	1,322	0.003	0.002	0.979
39	5.D.	하폐수처리	CH ₄	681	568	0.003	0.001	0.981
40	1.A.3.e.	기타수송	CO ₂	451	72	0.002	0.001	0.982
41	3.H.	요소 사용	CO ₂	432	92	0.002	0.001	0.983
42	4.G.	수확된 목재제품	CO ₂	206	-449	0.002	0.001	0.985

순위	IPCC 온실가스 배출·흡수원 (LULUCF 포함)		온실가스	배출량(kt CO ₂ -eq)		추세평가	추세평가 비중 (총합=1)	추세평가 비중 누계
				1990년	2023년			
43	5.D.	하폐수처리	N ₂ O	49	977	0.002	0.001	0.986
44	3.B.	가축분뇨처리	N ₂ O	1,322	2,504	0.002	0.001	0.987
45	1.B.2.b.	천연가스	CH ₄	23	748	0.001	0.001	0.988
46	1.A.1.	에너지산업: 고체연료	N ₂ O	75	732	0.001	0.001	0.988
47	1.A.4.	기타: 기타화석연료	CO ₂	-	507	0.001	0.001	0.989
48	1.B.1.	고체연료	CO ₂	187	7.0	0.001	0.001	0.990
49	2.B.2.	질산 생산	N ₂ O	219	101	0.001	0.001	0.990
50	1.A.4.	기타: 바이오매스	CH ₄	0.01	423	0.001	0.001	0.991
51	2.A.4.	탄산염의 기타 공정 사용	CO ₂	202	919	0.001	0.001	0.991
52	2.B.10.	기타	N ₂ O	198	70	0.001	0.001	0.992
53	1.A.3.b.	도로수송	N ₂ O	524	1,692	0.001	0.001	0.992
54	1.A.3.a.	국내항공	CO ₂	857	1,756	0.001	<0.001	0.993
55	1.A.4.	기타: 고체연료	N ₂ O	144	2.9	0.001	<0.001	0.993
56	1.A.4.	기타: 액체연료	N ₂ O	171	83	0.001	<0.001	0.994
57	1.A.1.	에너지산업: 기체연료	N ₂ O	2.3	311	0.001	<0.001	0.994
58	4.C.2.	타토지에서 전용된 초지	CO ₂	-670	8.1	0.001	<0.001	0.994
59	4.D.1.a.	습지로 유지된 습지 : 내륙습지	CH ₄	279	388	0.001	<0.001	0.995
60	4.A.3.	산불(산림지에서 바이오매스 연소에 의한 배출)	CO ₂	0.2	265	0.001	<0.001	0.995
61	2.D.	비에너지 제품 및 용매 사용	CO ₂	357	640	0.001	<0.001	0.996
62	1.A.4.	기타: 액체연료	CH ₄	114	45	0.001	<0.001	0.996
63	1.A.3.c.	철도	N ₂ O	90	17	0.001	<0.001	0.996
64	5.B.	고형폐기물의 생물학적 처리	N ₂ O	-	200	0.001	<0.001	0.996
65	1.A.3.b.	도로수송	CH ₄	191	664	0.001	<0.001	0.997
66	4.D.2.	타토지에서 전용된 습지	CO ₂	86	23	0.001	<0.001	0.997
67	2.C.4.	마그네슘 생산	SF ₆	0.8	185	0.001	<0.001	0.997
68	1.A.2.	제조업 및 건설업: 액체연료	N ₂ O	100	82	<0.001	<0.001	0.997
69	2.G.	기타 제품제조 및 소비	N ₂ O	-	152	<0.001	<0.001	0.997
70	5.B.	고형폐기물의 생물학적 처리	CH ₄	-	149	<0.001	<0.001	0.998
71	5.C.	폐기물소각 및 노천소각	N ₂ O	30	222	<0.001	<0.001	0.998
72	2.A.3.	유리생산	CO ₂	57	261	<0.001	<0.001	0.998
73	1.A.1.	에너지산업: 바이오매스	N ₂ O	-	107	<0.001	<0.001	0.998
74	3.F.	작물잔사소각	CH ₄	44	12	<0.001	<0.001	0.998
75	1.A.1.	에너지산업: 바이오매스	CH ₄	-	79	<0.001	<0.001	0.998
76	1.A.2.	제조업 및 건설업: 바이오매스	N ₂ O	-	77	<0.001	<0.001	0.999
77	2.B.8.	석유화학제품 및 카본블랙 생산	CH ₄	50	191	<0.001	<0.001	0.999
78	1.A.1.	에너지산업: 액체연료	N ₂ O	36	24	<0.001	<0.001	0.999
79	1.A.4.	기타: 기체연료	CH ₄	4.0	74	<0.001	<0.001	0.999
80	1.A.2.	제조업 및 건설업: 기타화석연료	N ₂ O	-	62	<0.001	<0.001	0.999
81	1.A.2.	제조업 및 건설업: 바이오매스	CH ₄	-	61	<0.001	<0.001	0.999
82	2.C.7.	기타	CO ₂	-	61	<0.001	<0.001	0.999
83	1.A.2.	제조업 및 건설업: 액체연료	CH ₄	38	34	<0.001	<0.001	0.999
84	2.C.3.	알루미늄 생산	CO ₂	23	-	<0.001	<0.001	0.999

순위	IPCC 온실가스 배출·흡수원 (LULUCF 포함)		온실가스	배출량(kt CO ₂ -eq)		추세평가	추세평가 비중 (총합=1)	추세평가 비중 누계
				1990년	2023년			
85	1.A.4.	기타: 바이오매스	N ₂ O	0.01	57	<0.001	<0.001	0.999
86	1.A.2.	제조업 및 건설업: 고체연료	N ₂ O	65	217	<0.001	<0.001	0.999
87	1.A.2.	제조업 및 건설업: 기타화석연료	CH ₄	-	49	<0.001	<0.001	0.999
88	1.A.1.	에너지산업: 액체연료	CH ₄	20	5.2	<0.001	<0.001	0.999
89	1.A.4.	기타: 기타화석연료	CH ₄	-	41	<0.001	<0.001	0.999
90	4.D.1.b.	습지로 유지된 습지 : 연안습지	CO ₂	-21	-23	<0.001	<0.001	0.999
91	1.A.2.	제조업 및 건설업: 고체연료	CH ₄	43	74	<0.001	<0.001	0.999
92	1.A.3.d.	국내해운: 액체연료	N ₂ O	17	10	<0.001	<0.001	1.000
93	1.B.2.c.	탈기 및 소각	CH ₄	1.9	37	<0.001	<0.001	1.000
94	1.B.2.a.	석유	CH ₄	38	122	<0.001	<0.001	1.000
95	1.A.2.	제조업 및 건설업: 기체연료	N ₂ O	0.2	25	<0.001	<0.001	1.000
96	3.F.	작물잔사소각	N ₂ O	11	2.9	<0.001	<0.001	1.000
97	1.A.3.e.	기타수송	N ₂ O	10	1.4	<0.001	<0.001	1.000
98	4.A.3.	산불(산림지에서 바이오매스 연소에 의한 배출)	CH ₄	0.02	22	<0.001	<0.001	1.000
99	1.A.1.	에너지산업: 기타화석연료	N ₂ O	-	15	<0.001	<0.001	1.000
100	2.F.5.	용매	F-gases	-	13	<0.001	<0.001	1.000
101	1.A.1.	에너지산업: 기타화석연료	CH ₄	-	12	<0.001	<0.001	1.000
102	1.A.4.	기타: 기체연료	N ₂ O	0.8	14	<0.001	<0.001	1.000
103	1.A.3.d.	국내해운: 액체연료	CH ₄	6.3	3.6	<0.001	<0.001	1.000
104	4.A.3.	산불(산림지에서 바이오매스 연소에 의한 배출)	N ₂ O	0.01	12	<0.001	<0.001	1.000
105	1.A.5.	미분류: 액체연료	CH ₄	0.7	11	<0.001	<0.001	1.000
106	1.A.1.	에너지산업: 기체연료	CH ₄	2.4	15	<0.001	<0.001	1.000
107	1.A.2.	제조업 및 건설업: 기체연료	CH ₄	0.3	9.5	<0.001	<0.001	1.000
108	2.F.4.	에어로졸	F-gases	-	7.9	<0.001	<0.001	1.000
109	1.A.3.e.	기타수송	CH ₄	2.8	0.3	<0.001	<0.001	1.000
110	1.A.4.	기타: 기타화석연료	N ₂ O	-	5.9	<0.001	<0.001	1.000
111	1.A.5.	미분류: 액체연료	N ₂ O	0.4	6.4	<0.001	<0.001	1.000
112	3.G.	석회 사용	CO ₂	2.5	2.7	<0.001	<0.001	1.000
113	1.A.3.d.	국내해운: 기체연료	CO ₂	-	3.4	<0.001	<0.001	1.000
114	1.A.3.a.	국내항공	N ₂ O	7.6	15	<0.001	<0.001	1.000
115	1.A.3.c.	철도	CH ₄	1.4	0.3	<0.001	<0.001	1.000
116	1.A.1.	에너지산업: 고체연료	CH ₄	5.3	12	<0.001	<0.001	1.000
117	1.B.2.b.	천연가스	CO ₂	0.04	1.3	<0.001	<0.001	1.000
118	5.C.	폐기물소각 및 노천소각	CH ₄	0.4	1.9	<0.001	<0.001	1.000
119	1.A.3.a.	국내항공	CH ₄	0.5	0.5	<0.001	<0.001	1.000
120	2.C.2.	합금철 생산	CO ₂	-	0.5	<0.001	<0.001	1.000
121	1.A.3.d.	국내해운: 기체연료	CH ₄	-	0.2	<0.001	<0.001	1.000
122	1.B.2.c.	탈기 및 소각	CO ₂	0.01	0.2	<0.001	<0.001	1.000
123	1.A.3.d.	국내해운: 기체연료	N ₂ O	-	0.05	<0.001	<0.001	1.000
124	1.B.2.a.	석유	CO ₂	0.02	0.1	<0.001	<0.001	1.000
총계				271,460	667,767	2.2	1.0	

주: F-gases는 HFCs, PFCs, SF₆, NF₃의 합

1990년 기준연도 온실가스 인벤토리와 2023년 온실가스 인벤토리의 배출원에 대한 수준평가와 추세평가(LULUCF 제외) 결과의 주요내용은 부표 1-3, 부표 1-4와 같다. 2023년 국가 온실가스 인벤토리 수준평가와 추세평가 누계에서 95%까지 해당하는 주요 배출원은 각각 총 21개, 25개로 굵게 표시하였다.

| 부표 1-3 | 국가 온실가스 인벤토리 수준평가에 따른 주요 배출원(LULUCF 제외)

순위	IPCC 온실가스 배출원 (LULUCF 제외)		온실가스	2023년 배출량 (kt CO ₂ -eq)	추세평가 비중 (총합=1)	수준평가 비중 누계
1	1.A.1.	에너지산업: 고체연료	CO ₂	159,568	0.226	0.226
2	1.A.2.	제조업 및 건설업: 고체연료	CO ₂	103,789	0.147	0.372
3	1.A.3.b.	도로수송	CO ₂	92,058	0.130	0.503
4	1.A.1.	에너지산업: 기체연료	CO ₂	67,876	0.096	0.599
5	2.F.1.	냉장 및 냉방	F-gases	29,714	0.042	0.641
6	1.A.4.	기타: 기체연료	CO ₂	29,380	0.042	0.682
7	2.B.8.	석유화학제품 및 카본블랙 생산	CO ₂	28,078	0.040	0.722
8	2.C.1.	철강생산	CO ₂	23,519	0.033	0.755
9	2.A.1.	시멘트생산	CO ₂	22,737	0.032	0.787
10	1.A.2.	제조업 및 건설업: 기체연료	CO ₂	20,936	0.030	0.817
11	1.A.1.	에너지산업: 액체연료	CO ₂	18,077	0.026	0.842
12	1.A.2.	제조업 및 건설업: 액체연료	CO ₂	14,650	0.021	0.863
13	1.A.4.	기타: 액체연료	CO ₂	14,087	0.020	0.883
14	5.A.	폐기물매립	CH ₄	11,312	0.016	0.899
15	1.A.2.	제조업 및 건설업: 기타화석연료	CO ₂	7,174	0.010	0.909
16	3.C.	버재배	CH ₄	6,879	0.010	0.919
17	3.A.	장내발효	CH ₄	6,739	0.010	0.928
18	5.C.	폐기물소각 및 노천소각	CO ₂	4,742	0.007	0.935
19	2.A.2.	석화생산	CO ₂	4,110	0.006	0.941
20	2.E.	전자 산업	F-gases	3,624	0.005	0.946
21	3.B.	가축분뇨처리	CH ₄	3,478	0.005	0.951
22	2.G.	기타 제품제조 및 소비	F-gases	3,386	0.005	0.956
23	1.A.5.	미분류: 액체연료	CO ₂	3,004	0.004	0.960
24	3.B.	가축분뇨처리	N ₂ O	2,504	0.004	0.964
25	1.B.1.	고체연료	CH ₄	2,327	0.003	0.967
26	2.F.3.	소화기	F-gases	2,126	0.003	0.970
27	1.A.3.a.	국내항공	CO ₂	1,756	0.002	0.972
28	1.A.3.b.	도로수송	N ₂ O	1,692	0.002	0.975
29	3.D.1.	직접배출	N ₂ O	1,621	0.002	0.977
30	2.F.2.	발포제	F-gases	1,552	0.002	0.979
31	1.A.3.d.	국내해운: 액체연료	CO ₂	1,367	0.002	0.981
32	1.A.1.	에너지산업: 기타화석연료	CO ₂	1,322	0.002	0.983
33	3.D.2.	간접배출	N ₂ O	1,206	0.002	0.985
34	5.D.	하폐수처리	N ₂ O	977	0.001	0.986
35	2.A.4.	탄산염의 기타 공정 사용	CO ₂	919	0.001	0.987

순위	IPCC 온실가스 배출원 (LULUCF 제외)		온실가스	2023년 배출량 (kt CO ₂ -eq)	추세평가 비중 (총합=1)	수준평가 비중 누계
36	1.B.2.b.	천연가스	CH ₄	748	0.001	0.988
37	1.A.1.	에너지산업: 고체연료	N ₂ O	732	0.001	0.989
38	1.A.4.	기타: 고체연료	CO ₂	721	0.001	0.991
39	1.A.3.b.	도로수송	CH ₄	664	0.001	0.991
40	2.D.	비에너지 연료 및 용매 사용	CO ₂	640	0.001	0.992
41	5.D.	하폐수처리	CH ₄	568	0.001	0.993
42	1.A.4.	기타: 기타화석연료	CO ₂	507	0.001	0.994
43	1.A.4.	기타: 바이오매스	CH ₄	423	0.001	0.994
44	1.A.1.	에너지산업: 기체연료	N ₂ O	311	<0.001	0.995
45	2.A.3.	유리생산	CO ₂	261	<0.001	0.995
46	5.C.	폐기물소각 및 노천소각	N ₂ O	222	<0.001	0.996
47	1.A.2.	제조업 및 건설업: 고체연료	N ₂ O	217	<0.001	0.996
48	5.B.	고형폐기물의 생물학적 처리	N ₂ O	200	<0.001	0.996
49	2.B.8.	석유화학제품 및 카본블랙 생산	CH ₄	191	<0.001	0.996
50	2.C.4.	마그네슘 생산	SF ₆	185	<0.001	0.997
51	1.A.3.c.	철도	CO ₂	165	<0.001	0.997
52	2.G.	기타 제품제조 및 소비	N ₂ O	152	<0.001	0.997
53	5.B.	고형폐기물의 생물학적 처리	CH ₄	149	<0.001	0.997
54	1.B.2.a.	석유	CH ₄	122	<0.001	0.998
55	1.A.1.	에너지산업: 바이오매스	N ₂ O	107	<0.001	0.998
56	2.B.2.	질산 생산	N ₂ O	101	<0.001	0.998
57	3.H.	요소 사용	CO ₂	92	<0.001	0.998
58	1.A.4.	기타: 액체연료	N ₂ O	83	<0.001	0.998
59	1.A.2.	제조업 및 건설업: 액체연료	N ₂ O	82	<0.001	0.998
60	1.A.1.	에너지산업: 바이오매스	CH ₄	79	<0.001	0.998
61	1.A.2.	제조업 및 건설업: 바이오매스	N ₂ O	77	<0.001	0.998
62	1.A.2.	제조업 및 건설업: 고체연료	CH ₄	74	<0.001	0.999
63	1.A.4.	기타: 기체연료	CH ₄	74	<0.001	0.999
64	1.A.3.e.	기타수송	CO ₂	72	<0.001	0.999
65	2.B.10.	기타	N ₂ O	70	<0.001	0.999
66	1.A.2.	제조업 및 건설업: 기타화석연료	N ₂ O	62	<0.001	0.999
67	1.A.4.	기타: 고체연료	CH ₄	62	<0.001	0.999
68	1.A.2.	제조업 및 건설업: 바이오매스	CH ₄	61	<0.001	0.999
69	2.C.7.	기타	CO ₂	61	<0.001	0.999
70	1.A.4.	기타: 바이오매스	N ₂ O	57	<0.001	0.999
71	2.B.9.	불소화합물 생산	F-gases	55	<0.001	0.999
72	1.A.2.	제조업 및 건설업: 기타화석연료	CH ₄	49	<0.001	0.999
73	1.A.4.	기타: 액체연료	CH ₄	45	<0.001	0.999
74	1.A.4.	기타: 기타화석연료	CH ₄	41	<0.001	1.000
75	1.B.2.c.	탈기 및 소각	CH ₄	37	<0.001	1.000
76	1.A.2.	제조업 및 건설업: 액체연료	CH ₄	34	<0.001	1.000
77	1.A.2.	제조업 및 건설업: 기체연료	N ₂ O	25	<0.001	1.000
78	1.A.1.	에너지산업: 액체연료	N ₂ O	24	<0.001	1.000

순위	IPCC 온실가스 배출원 (LULUCF 제외)	온실가스	2023년 배출량 (kt CO ₂ -eq)	추세평가 비중 (총합=1)	수준평가 비중 누계
79	1.A.3.c. 철도	N ₂ O	17	<0.001	1.000
80	1.A.3.a. 국내항공	N ₂ O	15	<0.001	1.000
81	1.A.1. 에너지산업: 기타화석연료	N ₂ O	15	<0.001	1.000
82	1.A.1. 에너지산업: 기체연료	CH ₄	15	<0.001	1.000
83	1.A.4. 기타: 기체연료	N ₂ O	14	<0.001	1.000
84	2.F.5. 용매	F-gases	13	<0.001	1.000
85	1.A.1. 에너지산업: 기타화석연료	CH ₄	12	<0.001	1.000
86	3.F. 작물잔사소각	CH ₄	12	<0.001	1.000
87	1.A.1. 에너지산업: 고체연료	CH ₄	12	<0.001	1.000
88	1.A.5. 미분류: 액체연료	CH ₄	11	<0.001	1.000
89	1.A.3.d. 국내해운: 액체연료	N ₂ O	9.5	<0.001	1.000
90	1.A.2. 제조업 및 건설업: 기체연료	CH ₄	9.5	<0.001	1.000
91	2.F.4. 에어로졸	F-gases	7.9	<0.001	1.000
92	1.B.1. 고체연료	CO ₂	7.0	<0.001	1.000
93	1.A.5. 미분류: 액체연료	N ₂ O	6.4	<0.001	1.000
94	1.A.4. 기타: 기타화석연료	N ₂ O	5.9	<0.001	1.000
95	1.A.1. 에너지산업: 액체연료	CH ₄	5.2	<0.001	1.000
96	1.A.3.d. 국내해운: 액체연료	CH ₄	3.6	<0.001	1.000
97	1.A.3.d. 국내해운: 기체연료	CO ₂	3.4	<0.001	1.000
98	1.A.4. 기타: 고체연료	N ₂ O	2.9	<0.001	1.000
99	3.F. 작물잔사소각	N ₂ O	2.9	<0.001	1.000
100	3.G. 석회 시용	CO ₂	2.7	<0.001	1.000
101	5.C. 폐기물소각 및 노천소각	CH ₄	1.9	<0.001	1.000
102	1.A.3.e. 기타수송	N ₂ O	1.4	<0.001	1.000
103	1.B.2.b. 천연가스	CO ₂	1.3	<0.001	1.000
104	2.B.10. 기타	CO ₂	1.0	<0.001	1.000
105	1.A.3.a. 국내항공	CH ₄	0.5	<0.001	1.000
106	2.C.2. 합금철 생산	CO ₂	0.5	<0.001	1.000
107	1.A.3.e. 기타수송	CH ₄	0.3	<0.001	1.000
108	1.A.3.c. 철도	CH ₄	0.3	<0.001	1.000
109	1.B.2.c. 탈기 및 소각	CO ₂	0.2	<0.001	1.000
110	1.A.3.d. 국내해운: 기체연료	CH ₄	0.2	<0.001	1.000
111	1.B.2.a. 석유	CO ₂	0.1	<0.001	1.000
112	1.A.3.d. 국내해운: 기체연료	N ₂ O	0.05	<0.001	1.000
총계			707,200	1.000	

주: F-gases는 HFCs, PFCs, SF₆, NF₃의 합

부표 1-4 | 국가 온실가스 인벤토리 추세평가에 따른 주요 배출·흡수원(LULUCF 제외)

순위	IPCC 온실가스 배출원 (LULUCF 제외)		온실가스	배출량(kt CO ₂ -eq)		추세평가	추세평가 비중 (총합=1)	추세평가 비중 누계
				1990년	2023년			
1	1.A.1.	에너지산업: 고체연료	CO ₂	18,037	159,568	0.382	0.174	0.174
2	1.A.4.	기타: 고체연료	CO ₂	35,438	721	0.258	0.117	0.291
3	1.A.2.	제조업 및 건설업: 액체연료	CO ₂	33,737	14,650	0.200	0.091	0.382
4	1.A.4.	기타: 액체연료	CO ₂	32,253	14,087	0.191	0.087	0.469
5	1.A.1.	에너지산업: 기체연료	CO ₂	4,800	67,876	0.183	0.083	0.553
6	2.F.1.	냉장 및 냉방	F-gases	-	29,714	0.096	0.044	0.596
7	1.A.4.	기타: 기체연료	CO ₂	1,652	29,380	0.082	0.038	0.634
8	1.A.1.	에너지산업: 액체연료	CO ₂	19,026	18,077	0.081	0.037	0.671
9	3.C.	버재배	CH ₄	14,073	6,879	0.081	0.037	0.708
10	1.B.1.	고체연료	CH ₄	10,745	2,327	0.071	0.032	0.740
11	1.A.3.b.	도로수송	CO ₂	31,003	92,058	0.069	0.031	0.772
12	1.A.2.	제조업 및 건설업: 기체연료	CO ₂	509	20,936	0.064	0.029	0.801
13	1.A.2.	제조업 및 건설업: 고체연료	CO ₂	37,699	103,789	0.058	0.026	0.827
14	5.A.	폐기물매립	CH ₄	12,149	11,312	0.053	0.024	0.851
15	2.B.8.	석유화학제품 및 카본블랙 생산	CO ₂	5,264	28,078	0.052	0.024	0.875
16	2.A.1.	시멘트생산	CO ₂	15,871	22,737	0.043	0.020	0.894
17	1.A.2.	제조업 및 건설업: 기타화석연료	CO ₂	-	7,174	0.023	0.011	0.905
18	1.A.4.	기타: 고체연료	CH ₄	2,864	62	0.021	0.009	0.914
19	2.C.1.	철강생산	CO ₂	13,041	23,519	0.020	0.009	0.923
20	1.A.3.d.	국내해운: 액체연료	CO ₂	2,457	1,367	0.014	0.006	0.929
21	2.E.	전자 산업	F-gases	-	3,624	0.012	0.005	0.935
22	5.C.	폐기물소각 및 노천소각	CO ₂	530	4,742	0.011	0.005	0.940
23	2.A.2.	석회생산	CO ₂	257	4,110	0.011	0.005	0.945
24	2.G.	기타 제품제조 및 소비	F-gases	168	3,386	0.010	0.004	0.950
25	1.A.5.	미분류: 액체연료	CO ₂	182	3,004	0.008	0.004	0.953
26	2.B.10.	기타	CO ₂	1,058	1.0	0.008	0.004	0.957
27	2.B.9.	불소화합물 생산	F-gases	1,042	55	0.007	0.003	0.960
28	3.D.1.	직접배출	N ₂ O	1,706	1,621	0.007	0.003	0.964
29	3.D.2.	간접배출	N ₂ O	1,513	1,206	0.007	0.003	0.967
30	2.F.3.	소화기	F-gases	-	2,126	0.007	0.003	0.970
31	1.A.3.c.	철도	CO ₂	882	165	0.006	0.003	0.973
32	3.A.	장내발효	CH ₄	3,728	6,739	0.006	0.003	0.975
33	2.F.2.	발포제	F-gases	-	1,552	0.005	0.002	0.978
34	1.A.1.	에너지산업: 기타화석연료	CO ₂	-	1,322	0.004	0.002	0.979
35	3.B.	가축분뇨처리	CH ₄	1,968	3,478	0.003	0.001	0.981
36	5.D.	하폐수처리	CH ₄	681	568	0.003	0.001	0.982
37	1.A.3.e.	기타수송	CO ₂	451	72	0.003	0.001	0.984
38	3.H.	요소 사용	CO ₂	432	92	0.003	0.001	0.985
39	5.D.	하폐수처리	N ₂ O	49	977	0.003	0.001	0.986
40	1.B.2.b.	천연가스	CH ₄	23	748	0.002	0.001	0.987
41	1.A.1.	에너지산업: 고체연료	N ₂ O	75	732	0.002	0.001	0.988
42	1.A.4.	기타: 기타화석연료	CO ₂	-	507	0.002	0.001	0.989

순위	IPCC 온실가스 배출원 (LULUCF 제외)		온실가스	배출량(kt CO ₂ -eq)		추세평가	추세평가 비중 (총합=1)	추세평가 비중 누계
				1990년	2023년			
43	3.B.	가축분뇨처리	N ₂ O	1,322	2,504	0.002	0.001	0.990
44	1.A.3.b.	도로수송	N ₂ O	524	1,692	0.002	0.001	0.990
45	2.A.4.	탄산염의 기타 공정 사용	CO ₂	202	919	0.001	0.001	0.991
46	1.A.4.	기타: 바이오매스	CH ₄	0.01	423	0.001	0.001	0.992
47	1.B.1.	고체연료	CO ₂	187	7.0	0.001	0.001	0.992
48	2.B.2.	질산 생산	N ₂ O	219	101	0.001	0.001	0.993
49	2.B.10.	기타	N ₂ O	198	70	0.001	0.001	0.993
50	1.A.4.	기타: 고체연료	N ₂ O	144	2.9	0.001	<0.001	0.994
51	1.A.4.	기타: 액체연료	N ₂ O	171	83	0.001	<0.001	0.994
52	1.A.1.	에너지산업: 기체연료	N ₂ O	2.3	311	0.001	<0.001	0.995
53	1.A.3.b.	도로수송	CH ₄	191	664	0.001	<0.001	0.995
54	1.A.4.	기타: 액체연료	CH ₄	114	45	0.001	<0.001	0.995
55	5.B.	고형폐기물의 생물학적 처리	N ₂ O	-	200	0.001	<0.001	0.996
56	1.A.3.a.	국내항공	CO ₂	857	1,756	0.001	<0.001	0.996
57	1.A.3.c.	철도	N ₂ O	90	17	0.001	<0.001	0.996
58	2.C.4.	마그네슘 생산	SF ₆	0.8	185	0.001	<0.001	0.997
59	2.D.	비에너지 연료 및 용매 사용	CO ₂	357	640	0.001	<0.001	0.997
60	5.C.	폐기물소각 및 노천소각	N ₂ O	30	222	<0.001	<0.001	0.997
61	2.G.	기타 제품제조 및 소비	N ₂ O	-	152	<0.001	<0.001	0.997
62	5.B.	고형폐기물의 생물학적 처리	CH ₄	-	149	<0.001	<0.001	0.998
63	1.A.2.	제조업 및 건설업: 액체연료	N ₂ O	100	82	<0.001	<0.001	0.998
64	2.A.3.	유리생산	CO ₂	57	261	<0.001	<0.001	0.998
65	1.A.1.	에너지산업: 바이오매스	N ₂ O	-	107	<0.001	<0.001	0.998
66	3.F.	작물잔사소각	CH ₄	44	12	<0.001	<0.001	0.998
67	1.A.1.	에너지산업: 바이오매스	CH ₄	-	79	<0.001	<0.001	0.998
68	1.A.2.	제조업 및 건설업: 바이오매스	N ₂ O	-	77	<0.001	<0.001	0.998
69	2.B.8.	석유화학제품 및 카본블랙 생산	CH ₄	50	191	<0.001	<0.001	0.999
70	1.A.2.	제조업 및 건설업: 고체연료	N ₂ O	65	217	<0.001	<0.001	0.999
71	1.A.4.	기타: 기체연료	CH ₄	4.0	74	<0.001	<0.001	0.999
72	1.A.2.	제조업 및 건설업: 기타화석연료	N ₂ O	-	62	<0.001	<0.001	0.999
73	1.A.2.	제조업 및 건설업: 바이오매스	CH ₄	-	61	<0.001	<0.001	0.999
74	2.C.7.	기타	CO ₂	-	61	<0.001	<0.001	0.999
75	1.A.1.	에너지산업: 액체연료	N ₂ O	36	24	<0.001	<0.001	0.999
76	1.A.4.	기타: 바이오매스	N ₂ O	0.01	57	<0.001	<0.001	0.999
77	2.C.3.	알루미늄 생산	CO ₂	23	-	<0.001	<0.001	0.999
78	1.A.2.	제조업 및 건설업: 액체연료	CH ₄	38	34	<0.001	<0.001	0.999
79	1.A.2.	제조업 및 건설업: 기타화석연료	CH ₄	-	49	<0.001	<0.001	0.999
80	1.A.4.	기타: 기타화석연료	CH ₄	-	41	<0.001	<0.001	0.999
81	1.A.1.	에너지산업: 액체연료	CH ₄	20	5.2	<0.001	<0.001	1.000
82	1.B.2.a.	석유	CH ₄	38	122	<0.001	<0.001	1.000
83	1.B.2.c.	탈기 및 소각	CH ₄	1.9	37	<0.001	<0.001	1.000
84	1.A.3.d.	국내해운: 액체연료	N ₂ O	17	9.5	<0.001	<0.001	1.000
85	1.A.2.	제조업 및 건설업: 기체연료	N ₂ O	0.2	25	<0.001	<0.001	1.000

순위	IPCC 온실가스 배출원 (LULUCF 제외)		온실가스	배출량(kt CO ₂ -eq)		추세평가	추세평가 비중 (총합=1)	추세평가 비중 누계
				1990년	2023년			
86	1.A.2.	제조업 및 건설업: 고체연료	CH ₄	43	74	<0.001	<0.001	1.000
87	3.F.	작물잔사소각	N ₂ O	11	2.9	<0.001	<0.001	1.000
88	1.A.3.e.	기타수송	N ₂ O	10	1.4	<0.001	<0.001	1.000
89	1.A.1.	에너지산업: 기타화석연료	N ₂ O	-	15	<0.001	<0.001	1.000
90	2.F.5.	용매	F-gases	-	13	<0.001	<0.001	1.000
91	1.A.4.	기타: 기체연료	N ₂ O	0.8	14	<0.001	<0.001	1.000
92	1.A.1.	에너지산업: 기타화석연료	CH ₄	-	12	<0.001	<0.001	1.000
93	1.A.3.d.	국내해운: 액체연료	CH ₄	6.3	3.6	<0.001	<0.001	1.000
94	1.A.5.	미분류: 액체연료	CH ₄	0.7	11	<0.001	<0.001	1.000
95	1.A.1.	에너지산업: 기체연료	CH ₄	2.4	15	<0.001	<0.001	1.000
96	1.A.2.	제조업 및 건설업: 기체연료	CH ₄	0.3	9.5	<0.001	<0.001	1.000
97	2.F.4.	에어로졸	F-gases	-	7.9	<0.001	<0.001	1.000
98	1.A.3.e.	기타수송	CH ₄	2.8	0.3	<0.001	<0.001	1.000
99	1.A.4.	기타: 기타화석연료	N ₂ O	-	5.9	<0.001	<0.001	1.000
100	1.A.5.	미분류: 액체연료	N ₂ O	0.4	6.4	<0.001	<0.001	1.000
101	1.A.3.d.	국내해운: 기체연료	CO ₂	-	3.4	<0.001	<0.001	1.000
102	3.G.	석회 시용	CO ₂	2.5	2.7	<0.001	<0.001	1.000
103	1.A.3.c.	철도	CH ₄	1.4	0.3	<0.001	<0.001	1.000
104	1.A.3.a.	국내항공	N ₂ O	7.6	15	<0.001	<0.001	1.000
105	1.B.2.b.	천연가스	CO ₂	0.04	1.3	<0.001	<0.001	1.000
106	5.C.	폐기물소각 및 노천소각	CH ₄	0.4	1.9	<0.001	<0.001	1.000
107	1.A.3.a.	국내항공	CH ₄	0.5	0.5	<0.001	<0.001	1.000
108	2.C.2.	합금철 생산	CO ₂	-	0.5	<0.001	<0.001	1.000
109	1.A.1.	에너지산업: 고체연료	CH ₄	5.3	12	<0.001	<0.001	1.000
110	1.A.3.d.	국내해운: 기체연료	CH ₄	-	0.2	<0.001	<0.001	1.000
111	1.B.2.c.	탈기 및 소각	CO ₂	0.01	0.2	<0.001	<0.001	1.000
112	1.A.3.d.	국내해운: 기체연료	N ₂ O	-	0.05	<0.001	<0.001	1.000
113	1.B.2.a.	석유	CO ₂	0.02	0.1	<0.001	<0.001	1.000
총계				310,566	707,200	2.2	1.0	

주: F-gases는 HFCs, PFCs, SF₆, NF₃의 합

부록 2. 용어 설명

- 국가 온실가스 인벤토리 보고서(National Inventory Document, NID) : 기후변화에 관한 정부 간 협의체(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 지침과 같은 국제적으로 공인된 방법에 따라 작성한 국가 온실가스 배출량과 배출원의 정량화된 자료들의 목록으로 구성된 국가 온실가스 통계(인벤토리) 보고서.
- 공통 보고 표(Common Reporting Table, CRT): 국가 온실가스 인벤토리의 배출·흡수 항목별로 활동자료, 배출계수 및 배출량 등을 포함한 공통 보고 양식으로, UNFCCC로 의무 제출하는 연간 국가 인벤토리 보고 양식.
- CRT 코드: CRT에 보고하는 온실가스 배출·흡수 항목별로 부여된 분류 코드.
- 표기기호(Notation key): UNFCCC 인벤토리 보고 지침(FCCC/CP/2013/10/Add.3)에 따라 CRT에 보고하는 배출·흡수량의 완전성 평가에 활용되는 기호. 총 5개로 분류함.
 - NO (Not Occurring): 국내에 배출·흡수가 발생하는 해당 활동 및 공정이 없는 경우.
 - NE (Not Estimated): 배출·흡수활동 및 공정이 있으나 산정하지 아니하는 경우(미산정).
 - NA (Not Applicable): 특정 온실가스 종류가 자연·이론적으로 발생하지 않는 활동 및 공정의 경우.
 - IE (Included Elsewhere): 해당 항목의 배출·흡수량을 다른 항목에 포함하여 보고하는 경우.
 - C (Confidential): 해당 항목의 배출·흡수량이 보안상 기밀정보인 경우.
- 기준 연도(Base year): 인벤토리 산정 및 분석의 최초 연도. 보통 1990년을 기준으로 함.
- 배출·흡수계수(Emission Factor, EF): 단위 활동자료 당 온실가스의 배출 또는 흡수를 정량화하는 계수(coefficient). 배출·흡수계수는 특정 조건 하 활동에서 발생하는 온실가스 배출율을 표본 측정하여 평균한 대푯값을 추출하는 방식으로 개발함.
- 매개변수(Parameter): 단위 활동당 온실가스의 배출 또는 흡수를 정량화하는 배출·흡수계수에 영향을 미치는 인자로 간주되는 변수로 배출·흡수계수 산출 시 사용됨.
- 활동자료(Activity Data, AD): 특정 기간 동안에 온실가스의 배출 또는 흡수를 야기하는 인간 활동량에 대한 자료.
- 온실가스(Greenhouse Gas, GHG): 7대 직접온실가스는 이산화탄소(CO₂), 메탄(CH₄), 아산화질소(N₂O), 수소불화탄소(HFCs), 과불화탄소(PFCs), 육불화황(SF₆), 삼불화질소(NF₃)이며, 적외선 복사열을 흡수하거나 재방출하여 온실효과를 유발하는 대기 중의 가스 상태의 물질.
- 불소계 온실가스(Fluorinated gases, F-gases): 수소불화탄소(HFCs), 과불화탄소(PFCs), 육불화황(SF₆), 삼불화질소(NF₃).
- 품질보증(Quality Assurance, QA): 인벤토리 취합과 개발 과정에 직접적으로 참여하지 않은 사람이 인벤토리 데이터의 품질 목표 달성도를 확인하는 검토 체계. 배출·흡수량이 현존하는 과학적 지식과 데이터를 활용하여 최선의 정확도로 산정되었는지 확인하고 효과적인 품질관리를 지원함.
- 품질관리(Quality Control, QC): 인벤토리 개발 과정 중 데이터 품질의 측정과 관리를 위해 통상적으로 기술적으로 시행되는 활동. 데이터의 정합성(integrity), 정확성, 완전성, 오류와 누락을 지속적으로 확인하고, 품질관리 활동 전반과 인벤토리 자료를 기록하는 활동.

※ 출처: 2006 IPCC GL, IPCC GPG 2000 Glossary에서 발췌

부록 3. 참고문헌

제1장 서론

- 관계기관 합동 (2015) 제1차 국가 온실가스 통계 총괄관리계획.
- 관계기관 합동 (2020) 제2차 국가 온실가스 통계 총괄관리계획.
- 관계기관 합동 (2024) 제3차 국가 온실가스 통계 총괄관리계획.
- 국립기상과학원 (2022) 남한 상세 기후변화 전망보고서: SSP 4종 시나리오에 따른 기후변화 전망.
- 기상청·국립과학원 (2021) 우리나라 109년(1912-2020년) 기후변화 분석보고서.
- 기상청 (2025) 한국 기후위기 평가보고서 2025
- 온실가스종합정보센터 (2020) 국가 온실가스 배출·흡수계수 개발 검증 지침.
- UN (2014) *Fundamental Principles of Official Statistics*.
- UNFCCC (2018) *Modalities, procedures and guidelines for the transparency framework for action and support referred to in Article 13 of the Paris Agreement(Decision 18/CMA.1)*.
- IPCC (2014) *Fifth Assessment Report: Climate Change 2014*.
- IPCC (2006) *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, The National Greenhouse Gas Inventories Programme, The Intergovernmental Panel on Climate Change*.
- IPCC (2013) *Supplement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Wetlands*.
- IPCC (2019) *2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*.

제2장 국가 온실가스 배출 및 흡수 추이

- 농림축산식품부 (2024) 2023년 농림축산식품통계연보.
- 산림청 (2023) 산림임업통계연보.
- 국가데이터처 (2024) 농업면적조사.
- 국가데이터처 (2022-2024) 2021-2023년 농림어업조사 마이크로데이터.
- 국가데이터처 (2024) 가축동향조사.
- 한국교통안전공단 (2024) 2023 자동차주행거리통계.
- 한국교통안전공단 (2024) 항공운송업체 연료소비량 현황조사.
- 한국은행 (2024) 국민계정: 경제활동별 GDP 및 GNI 원계열 실질 분기 및 연간, <http://kosis.kr> [2025.12.29. 접속].
- 한국철강협회 (2024) 연간 조강 생산량, <http://kosa.or.kr> [2024.10. 접속].

제3장 에너지

국토교통부 (1990-2008) 항공기 등록대수.

산업통상자원부 (1990-2023) 에너지 총조사 보고서.

산업통상자원부령(2022 개정) 에너지법 시행규칙.

온실가스종합정보센터 (2012-2021) 국가 고유 배출계수.

온실가스종합정보센터 (2025) 제1차 격년투명성보고서(Biennial Transparency Report), 1.2.1 전환, 3.2.2 전환.

에너지경제연구원 (2025) 에너지수급통계.

에너지경제연구원 (2025) 에너지 연소부문 온실가스 인벤토리 작성 및 품질 개선.

한국가스공사 (1990-2023) 천연가스 부피 환산계수. 한국가스공사 홈페이지(<https://www.kogas.or.kr>) 가스 정보>천연가스 정보>LNG 단위환산기 [2025.12.23. 접속].

한국광해광업공단 (1990-2023) 지하폐광 개소 자료.

한국교통안전공단 (2024) 항공운송업체 연료소비량 현황조사.

한국무역협회 (2024) 수출의 국민경제 기여 효과 분석(2020년 기준 GDP).

한국석유공사 (2024) 2023 석유류수급통계.

한국유희유공업협회 (2024) 유희유 산업자료.

한국전력공사 (1990-2023) 1990-2023년 한국전력통계(한전 등 사업자 및 한전 구입분 기준).

한국항공진흥협회 (1990-2008) 민간항공기(국적 항공사) 등록대수.

기후에너지환경부 (2025) 요소수 통계 조사자료.

기후에너지환경부 (2024) 온실가스 배출권거래제의 배출량 보고 및 인증에 관한 지침. 별표 6, 14. 석유 정제활동.

Decision 18/CMA.1 Modalities, procedures and guidelines for the transparency framework for action and support referred to in Article 13 of the Paris Agreement, Annex 제54조.

Decision 5/CMA.3 Guidance for operationalizing the modalities, procedures and guidelines for the enhanced transparency. framework referred to in Article 13 of the Paris Agreement, Annex V.

EMEP/EEA (2019) EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2019.

IEA (2019) Oil Information.

IPCC (2006) 2006 IPCC Guideline for National Greenhouse Gas Inventories, The National Greenhouse Gas Inventories Programme, The Intergovernmental Panel on Climate Change.

LNG 공급사 (2025) 선박 LNG 공급량.

제4장 산업공정 및 제품 사용

관세청 (1990-2023) 수출입 무역통계.

식품의약품안전처 (2004-2023) 의료용 N_2O 생산실적.

한국무역협회 (1990-2023) 수출입 무역통계.

한국석유화학협회 (1990-2023) 석유화학편람.

한국시멘트협회 (1990-2006) 시멘트통계연보.

한국철강협회 (1990-2006) 철강통계연보(석회석 및 백운석 소비량).

한국철강협회 (1990-2006) 철강통계연보.

한국환경산업기술원 (2015) 석유화학 산업의 납사 온실가스 배출량 산정 모델 개발 및 배출특성 연구.

한국정밀화학산업진흥회 (1990-2006) 불소화합물 통계자료.

한국비철금속협회 (1990) 협회 자료.

한국윤활유공업협회 (1990-2023) 협회 자료.

한국반도체산업협회 (1997-2006) 협회 자료.

한국디스플레이산업협회 (1999-2006) 협회 자료.

한국석회석가공업협동조합 (1990-2006) 조합 자료.

한국유리산업협동조합 (2018-2023) 병유리생산 통계.

한국에너지공단 (1990-2004) 소다회 생산량 조사자료.

한국에너지공단 (1990-2005) 아디프산 생산량 조사자료.

한국에너지공단 (1999-2005) 칼슘카바이드 생산량 조사자료.

한국에너지공단 (1999-2005) 칼슘카바이드 소비량 조사자료.

한국에너지공단 (1990-2006) 클링커 생산량 조사자료.

한국에너지공단 (1990-2006) 고칼슘석회, 고토석회 생산량 조사자료.

한국에너지공단 (1990-2011) 암모니아 생산량 조사자료.

한국에너지공단 (1990-2006) 질산 생산량 조사자료.

한국에너지공단 (1990-2017) 유리생산량 통계.

한국에너지공단 (1998-2006) 석회석, 백운석, 마그네사이트 소비량 조사자료.

한국에너지공단 (1999-2023) NF_3 생산량 조사자료.

한국에너지공단 (2008-2023) 용도별, 가스별, 생산량, 수입량, 수출량 조사자료.

한국전기안전공사 (1990-2023) 단계별(생산, 사용, 폐기) 정격용량 사용전검사 통계.

한국전력공사 (1990-2023) 단계별(생산, 사용, 폐기) 정격용량 내부 자료.

6대 발전사 (1990-2023) 단계별(생산, 사용, 폐기) 정격용량 조사자료.

기후에너지환경부 (1990-2023) 단계별(생산, 사용, 폐기) 정격용량 사업장 명세서.

기후에너지환경부 (2007-2013) HCFC-22 생산 사업장 명세서.

기후에너지환경부 (2007-2023) 클링커 생산 사업장 명세서.

기후에너지환경부 (2007-2023) 고칼슘석회, 고토석회 생산 사업장 명세서.

기후에너지환경부 (2007-2023) 석회석, 백운석, 마그네사이트 소비 사업장 명세서.

기후에너지환경부 (2007-2023) 질산 생산 시, N_2O 배출 사업장 명세서.

기후에너지환경부 (2007-2023) 아디프산 생산 시, N_2O 배출 사업장 명세서.

기후에너지환경부 (2007-2023) 카프로락탐 생산 시, N_2O 배출 사업장 명세서.

기후에너지환경부 (2007-2023) 탄산염 소비 사업장 명세서.

기후에너지환경부 (2007-2023) 석회석, 백운석 소비 사업장 명세서.

기후에너지환경부 (2007-2023) HFCs, PFCs, SF_6 배출 사업장 명세서.

기후에너지환경부 (2011-2023) 불소계 온실가스 배출 사업장 명세서.

기후에너지환경부 (2018-2023) 유리 생산 사업장 명세서.

UNFCCC (2007-2022) CDM모니터링보고서.

IPCC (2006) 2006 IPCC Guideline for National Greenhouse Gas Inventories, The National Greenhouse Gas Inventories Programme, The Intergovernmental Panel on Climate Change.

제5장 농업

〈축산〉

기상청 (2024) 기상연보.

농림수산부 (1989-1996) 1988-1995년 농림수산물통계연보.

농림부 (1997-2007) 1996-2006년 농림통계연보.

농림수산물식품부 (2008-2013) 2007-2012년 농림수산물식품통계연보.

농림축산식품부 (2014-2024) 2013-2023년 농림축산식품통계연보.

국가데이터처 (1990-2023) 가축동향조사.

국가데이터처 (2012-2024) 2011-2023년 농림어업조사.

IPCC (2006) 2006 IPCC Guideline for National Greenhouse Gas Inventories, The National

Greenhouse Gas Inventories Programme, The Intergovernmental Panel on Climate Change.
IPCC (2019) *2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.*

〈재배(경종)〉

국립농업과학원 (2008) *기후변화협약 관련 농업부문 탄소 흡수원 연구.*

국립농업과학원 (2018) *2006 신규 가이드라인 적용 대비 요소 및 석회 사용에 따른 CO₂ 배출계수 개발 연구.*

농림수산부 (1989-1996) *1988-1995년 농림수산물통계연보.*

농림부 (1997-2007) *1996-2006년 농림통계연보.*

농림수산식품부 (2008-2013) *2007-2012년 농림수산물통계연보.*

농림축산식품부 (2014-2024) *2013-2023년 농림축산식품통계연보.*

농촌진흥청 (2017) *제5차 작물별 비료사용 처방 기준.*

농협경제지주 (2022-2024) *2021-2023년 비료사업통계요람.*

국가데이터처 (1988-2023) *농업면적조사.*

국가데이터처 (1988-2023) *농작물생산조사.*

국가데이터처 (1988-2023) *농축산물생산비조사.*

국가데이터처 (2011) *2010년 농림어업총조사.*

국가데이터처 (2016) *2015년 농림어업총조사.*

국가데이터처 (2011-2024) *2010-2023년 농림어업조사.*

한국비료협회 (1991-2021) *1990-2020년 비료연감.*

IPCC (1996) *Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.*

IPCC (2006) *2006 IPCC Guideline for National Greenhouse Gas Inventories, The National Greenhouse Gas Inventories Programme, The Intergovernmental Panel on Climate Change.*

IPCC (2019) *2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.*

제6장 토지이용, 토지이용 변화 및 임업

〈산림지〉

국립산림과학원 (2021) *2020 한국의 산림자원. 연구자료 제976호*

산림청 (1990-2021) *국가산림자원조사(NFI).*

산림청 (1990-2021) 산림기본통계.

산림청 (1990-2023) 산림임업통계연보.

산림청 (2017) 제8차 국가산림자원조사 및 산림의 건강·활력도 현지조사 지침서.

산림청 (2021) 제8차 국가산림자원조사 기본계획.

IPCC (2006) *2006 IPCC Guideline for National Greenhouse Gas Inventories, The National Greenhouse Gas Inventories Programme, The Intergovernmental Panel on Climate Change.*

〈농경지〉

국가데이터처 (1970-2023) 농업면적조사.

농어촌연구원 (1987-1992) 농공기술 2권.

농촌진흥청 (2011) 한국의 토양분류 및 해설.

IPCC (2006) *2006 IPCC Guideline for National Greenhouse Gas Inventories, The National Greenhouse Gas Inventories Programme, The Intergovernmental Panel on Climate Change.*

〈초지〉

국토교통부 (1970-2022) 지적통계.

농촌진흥청 (2011) 한국의 토양분류 및 해설.

IPCC (2006) *2006 IPCC Guideline for National Greenhouse Gas Inventories, The National Greenhouse Gas Inventories Programme, The Intergovernmental Panel on Climate Change.*

〈습지〉

기상청 (1990-2023) 연도별 기상관측소의 결빙일수. 기상연보.

국토교통부 (1980-2023) 지적통계.

해양수산부 (1990-2023) 국가 블루카본 정보시스템(K-BIS), <http://bluecarbon.kr>.

IPCC (2006) *2006 IPCC Guideline for National Greenhouse Gas Inventories, The National Greenhouse Gas Inventories Programme, The Intergovernmental Panel on Climate Change.*

IPCC (2013) *2013 Supplement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Wetlands.*

Lee, J.-W., An, J.-B., Hwang, T. Y., & Yun, H.-G. (2022). A study on classification of forest wetlands types and inventory establishment in Korea. *Journal of Wetlands Research*, 24 (1), 1-24. <https://doi.org/10.17663/JWR.2022.24.1.1>

〈정주지〉

국토교통부 (1990-2022) 지적통제.

국토교통부 (2002, 2019, 2022) 연속지적도.

국토정보지리원 (2002, 2019, 2022) 항공정사영상.

산림청 (1996-2005) 제4차 산림항공사진.

IPCC (2006) *2006 IPCC Guideline for National Greenhouse Gas Inventories, The National Greenhouse Gas Inventories Programme, The Intergovernmental Panel on Climate Change.*

〈수확된 목재제품〉

산림청 (2008-2023) 목재이용실태조사.

산림청 (1990-2023) 산림임업통계연보.

IPCC (2006) *2006 IPCC Guideline for National Greenhouse Gas Inventories, The National Greenhouse Gas Inventories Programme, The Intergovernmental Panel on Climate Change.*

IPCC (2019) *2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.*

제7장 폐기물

기후에너지환경부 (1985-1990) 전국 쓰레기 처리 실적 및 계획.

기후에너지환경부 (1990-2018) 지정폐기물 발생 및 처리 현황.

기후에너지환경부 (1990-2023) 전국 폐기물 발생 및 처리 현황.

기후에너지환경부 (1990-2023) 산업폐수의 발생과 처리.

기후에너지환경부 (1990-2023) 하수도 통계.

기후에너지환경부 (2015-2023) 유기성 폐자원 바이오가스화시설 현황.

환경부 (2000) 환경기초시설에서 발생하는 온실가스 배출량 조사.

환경부 (2002) 환경 부문의 온실가스 배출량 조사 및 통계구축.

환경부 (2024) 공공폐수처리시설 설치 및 운영관리지침.

한국환경공단 (2006) 환경 부문 온실가스 배출통계 D/B구축.

한국환경공단 (2010) 폐기물 부문 온실가스 배출량 산정을 위한 통계 추정.

한국환경공단 (2024) 2024 하수도통계 작성방법.

IPCC (2006) *IPCC 2006 Guideline for National Greenhouse Gas Inventories, The National Greenhouse Gas Inventories Programme, The Intergovernmental Panel on Climate Change.*

2025년 국가 온실가스 인벤토리 보고서 발간 관련기관 및 참여자

기후위기 대응을 위한 탄소중립·녹색성장 기본법 제36조의 규정에 따른 <2025년 국가 온실가스 인벤토리 보고서>는 다음과 같은 참여자들의 협력으로 발간되었다(분야 순).

총괄 작성 및 편집(온실가스종합정보센터)

최민지(총괄)	김지연(에너지·산업공정)	민경서(공통·에너지(발전, 산업 등))	이소정(LULUCF)
최형욱(검토)	박미경(농업)	김소현(산업공정)	장진아(폐기물)
이소향(공통)	김문정(농업·LULUCF)	이혜철(공통·산업공정)	오미란(공통)
김정은(공통)	여현아(폐기물)	박연재(산업공정)	
김대욱(에너지)	안경아(에너지(수송, 탈루))	조원기(농업)	

에너지 분야

손인성	에너지경제연구원
추다해	에너지경제연구원
오진주	한국교통안전공단
정지훈	한국교통안전공단
강동호	한국교통안전공단
이아연	한국교통안전공단
장준영	해양환경공단
김세훈	해양환경공단

산업공정 분야

이연상	한국에너지공단
장혜빈	한국에너지공단

농업 분야

박설화	국립축산과학원
이형석	국립농업과학원

폐기물 분야

노용국	한국환경공단
서태원	한국환경공단
이한결	한국환경공단

LULUCF 분야

임종수	국립산림과학원
이선정	국립산림과학원
김민지	국립산림과학원
임정철	국립생태원
이형석	국립농업과학원
전상호	국립농업과학원
김경영	국립농업과학원
정종성	국립축산과학원
고하늘	국립축산과학원
장준영	해양환경공단
김세훈	해양환경공단
이은엽	토지주택연구원
김영민	토지주택연구원

기후위기 대응을 위한 탄소중립·녹색성장 기본법 제36조의 규정에 따른 <2025년 국가 온실가스 인벤토리 보고서>는 국가 온실가스 통계 작성 총괄을 담당하고 있는 기후에너지환경부 온실가스종합정보센터의 주관으로 다음과 같은 정부부처 및 기관들의 협력으로 발간되었다 (가나다 순).

국가데이터처	국무조정실	산림청	한국에너지공단
국립농업과학원	국토교통부	산업통상부	한국환경공단
국립산림과학원	기후에너지환경부	에너지경제연구원	해양수산부
국립생태원	농림축산식품부	토지주택연구원	해양환경공단
국립축산과학원	농촌진흥청	한국교통안전공단	



승인 번호
제 115018 호

작성참여기관

총괄	온실가스종합정보센터
에너지·폐기물	기후에너지환경부
산업공정	산업통상부
에너지(수송)	국토교통부
에너지(해운)	해양수산부
농업·LULUCF	농림축산식품부, 국토교통부, 해양수산부, 기후에너지환경부

2025 국가 온실가스 인벤토리 보고서

2026년 5월 발행

펴낸이 온실가스종합정보센터장

펴낸곳 **온실가스종합정보센터**

충청북도 청주시 흥덕구 오송읍 오송생명로8로 227, 오송바이오프라자
빌딩 4-5층

우편번호: 28222

대표전화 043-714-7548, Fax 043-715-7530

홈 페이지 <http://www.gir.go.kr>

정부간행물
비매품 11-1482023-100007-10

본 통계의 게재 내용을 전재 또는 인용 시에는 출처 정보를 명시하여 주시기 바랍니다.
오류 발견 시 연락주시시오.

2025

국가온실가스
인벤토리 보고서

National Greenhouse Gas Inventory Report of Korea



기후에너지환경부
온실가스종합정보센터