

국내 대기 중 메탄 분포현황 및 배출정보 개선 방향

- 01 머리말
- 02 대기 중 메탄 농도와 주요 배출원 현황
- 03 메탄 감축과 배출량 검증을 위한 국제사회의 노력
- 04 국내 메탄 고농도의 지역과 주요 배출원
- 05 우리나라 메탄 배출목록의 주요 이슈와
배출량 검증 방향
- 06 맺음말 및 제언

www.kei.re.kr



환경포럼

제284호(제29권 제1호)

발행일 2025년 3월 31일 | 발행인 김홍균 | 발행처 한국환경연구원
주소 30147 세종특별자치시 시청대로 370 세종국책연구단지 B동(과학인프라동)
TEL 044-415-7777 | FAX 044-415-7799 | 홈페이지 www.kei.re.kr
© 2025 한국환경연구원

국내 대기 중 메탄 분포현황 및 배출정보 개선 방향

심창섭 선임연구위원 | 대기환경연구실 cshim@kei.re.kr

서정빈 연구원 | 대기환경연구실 jbseo@kei.re.kr

문준기 연구원 | 부산대학교 jeikeimoon@gmail.com

최형식 부연구위원 | 탄소중립연구실 hschoi@kei.re.kr

도세원 연구원 | 대기환경연구실 swdo@kei.re.kr

한지현 부연구위원 | 대기환경연구실 jhhan@kei.re.kr

홍제우 연구위원 | 국가기후위기적응센터 jwhong@kei.re.kr

요약

단기 체류 기후변화 유발물질인(SLCPs: Short Lived Climate Pollutants) 메탄은 금세기 기후 완화 정책의 핵심 대상 물질이다. 그러나 메탄의 다양한 배출원과 배출과정은 배출목록 및 배출량 산정 시 큰 불확도를 내포하기 때문에 메탄의 배출량에 대한 과학적 검증(측정·감시·보고·검증(MMRV: Measurement, Monitoring, Reporting, Verification))은 메탄 감축 정책을 위한 핵심 요소이다. 본고는 메탄 관측위성(TROPOMI)의 메탄 컬럼농도자료와 국내 지역별 주요 메탄 배출 관련 지표(proxy) 통계 자료를 활용하여 전국의 메탄 농도 분포와 고농도 지역의 주요 배출원을 파악하고자 하였다. 국내 메탄 고농도 지역은 주로 벼농사(경기, 충남, 전북, 전남)와 폐기물 매립(내륙 도시 및 산업단지), 그리고 일부 항만의 주요 산업 단지(군산, 여수 등)와 관련이 있는 것으로 나타났다. 이는 지자체별로 메탄 감축의 우선순위에 차별성이 있음을 의미하는 것이며 국가 온실가스 지역 배출정보의 고도화를 위해 반영해야 할 사항이다. 또한 정부의 메탄 배출목록은 국제기구의 글로벌 메탄 배출목록에 비해 하폐수 등 관련 메탄 배출의 누락/저평가 가능성이 있는 것으로 나타나 부문별로 상세한 국내 배출계수의 고도화와 함께 다양한 비점 오염원에 대한 정교한 관측 기반의 배출정보 고도화로 잠재적 누락 배출원을 검증·보완해야 할 필요가 있다.

* 본 내용은 기상청의 연구개발사업인 한국환경연구원(KEI) 수탁과제 「WMO IG⁶S 이행사업 개선」의 연구결과 일부를 요약·정리하고, 논의를 심화하여 시사점 및 정책 방향을 제시한 것임을 밝힙니다.

I.

머리말

메탄은 주로 유기물질이 썩어 분해되는 과정에서 생성되는 가스로서 이산화탄소, 아산화질소 등과 함께 교토의정서에서 지정한 주요 온실가스 중 하나이다. 기후변화에 관한 정부간 협의체(IPCC) 평가보고서에 의하면 메탄이 전체 온실가스에 차지하는 농도의 비중은 약 5% 정도인데 산업화 이후 지구온난화에 미친 영향은 전체 온실가스의 약 30%에 달했다(IPCC, 2021). 메탄의 온실가스 단위 분자당 지구온난화 잠재력(GWP)은 이산화탄소에 비해 약 80배 이상 높기 때문이다.¹⁾ 그러나 메탄은 대기 중 잔존시간(lifetime)이 약 10년으로 이산화탄소에 비해 매우 짧으므로(Prather, Holmes, and Hsu, 2012; Bousquet et al., 2018) 이론적으로 메탄의 실질적 감축에 의한 기후변화 완화에 미치는 기여를 비교적 짧은 시간 내에 확인할 수 있다.²⁾ 따라서 메탄의 배출량과 배출목록의 정확한 정보와 메탄 배출량 감축을 과학적으로 검증하는 것은 국제적으로 매우 중요하고 시급한 사안이 되었다(IPCC, 2021). 또한 메탄은 기후변화뿐 아니라 대기오염과도 관련이 있는데 메탄의 증가는 광화학 반응에 의해 대기오염물질 및 온실가스인 오존을 증가시킬 수 있으며 대기오염물질의 산화에 가장 중요한 하이드록실 라디칼(OH)에 영향을 준다. 따라서 메탄은 단기 체류 기후변화 유발물질로서(SLCPs: Short Lived Climate Pollutants) 중요성이 있다(UNEP, 2024).³⁾

이러한 중요성에도 불구하고 메탄의 배출의 대부분을 비점오염원이 차지하고 있으며 화석연료의 사용 이외에도 농축산업, 폐기물, 습지 등 다양한 배출원이 존재하여 배출량에 대한 불확도가 높다(IPCC, 2021; Rosentreter et al., 2021). 따라서 메탄의 시공간적 분포와 변동성을 이해하고 배출정보와의 연계성을 정량적으로 파악하는 것은 정책을 이행하기 위한 매우 중요한 전제이다. 본고에서는 이런 관점에서 국내 메탄의 고농도 분포와 함께 일부 고농도의 원인을 과학적 연구 결과에 근거해 밝히고 지역별 배출원별 정책 방향을 논의하고자 한다. 또한 국내 메탄의 배출목록의 구축현황과 메탄 배출목록의 정확도 향상과 검증을 위한 방안에 대해 논의하고자 한다.

1) 약 20년 동안의 지구 온실효과를 기준으로 함.

2) 유럽의 메탄전략(EU Methane Strategy)에 따르면 2050년까지 메탄 배출량을 50% 감축하면 2050까지 0.18℃의 기후 완화 효과가 있을 것으로 전망함.

3) SLCPs 는 45%의 지구 온난화를 유발하는 동시에 매년 전 세계적으로 대기오염으로 인한 약 700만명의 조기사망자를 유발하는 것으로 알려졌다. SLCPs는 블랙카본(BC), 메탄, 오존(대류권), 그리고 수소불화탄소(HFC)를 포함함.

II. 대기 중 메탄 농도와 주요 배출원 현황

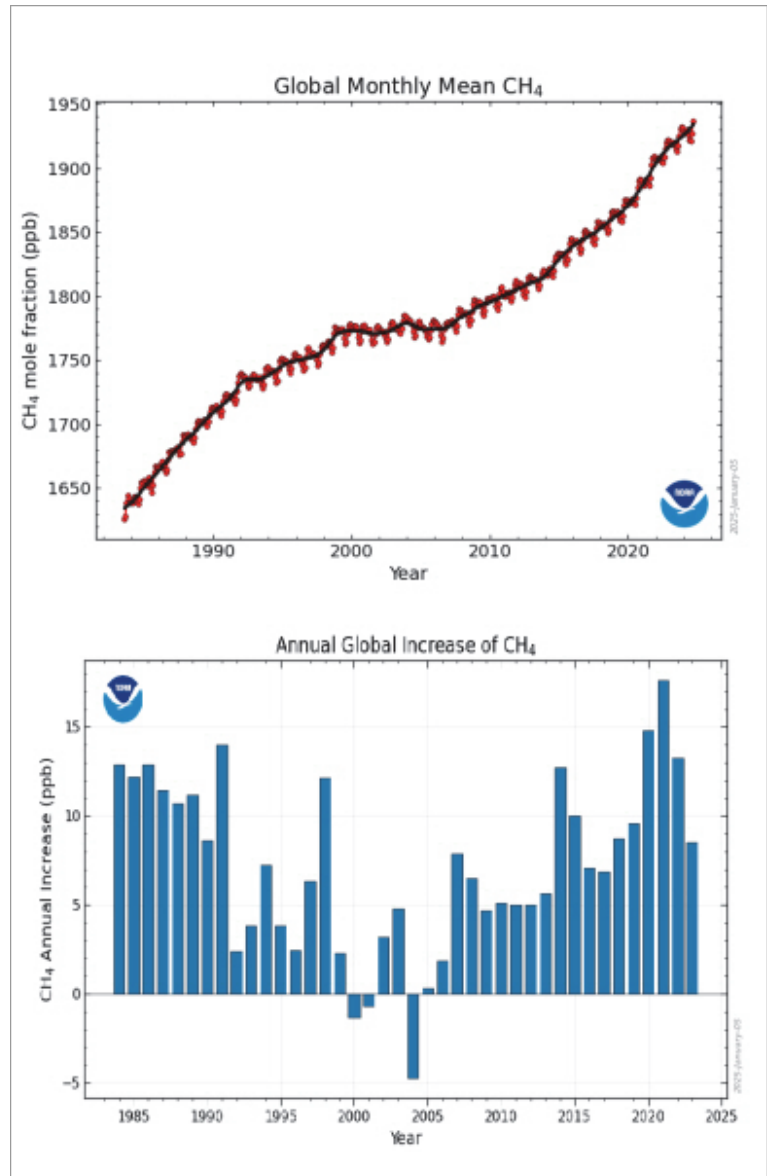
대기 중 메탄은 일반적으로 농업과 에너지, 그리고 폐기물(waste) 등에서 이뤄지는 인간 활동에 의해 주로 배출된다. 또한 습지(wetland)나 산불(biomass burning) 등과 같은 자연적 배출원도 포함하고 있다. 미국 해양대기청(NOAA)의 약 40년간 지구 평균 관측 농도에 따르면 메탄은 1990년대 후반 ~ 2000년대에 농도 상승이 정체되었다가 2010년대부터 다시 가파르게 농도가 상승하는 것을 알 수 있다(그림 1 참조). 이와 관련있는 연도별 평균 농도 상승 속도도 1990년대 중반 ~ 2000년대 중반까지 낮게 유지되다가 2010년 이후에 다시 큰 폭으로 상승하는 것을 알 수 있다(그림 1 참조). 1990년대 중반부터 시작된 메탄 농도의 안정화는 당시 선진국 중심으로 온실가스 감축 노력이 시작된 점과, 1990년대에 기온, 강수 등의 변화가 습지 기원 메탄의 발생을 비교적 억제한 것으로 추정된다(Pison et al., 2013). 이는 21세기에 신흥국을 포함하여 전 세계적으로 메탄 에너지 사용 증가 이전의 현상이라고 할 수 있다.

2010년대 이후 메탄 농도의 급격한 상승은 다양한 원인이 존재한다. 중국, 러시아, 인도 등을 중심으로 한 신흥국이 주도하는 글로벌 에너지 소비증가와 더불어 농업 생산의 지속적인 증가, 그리고 온난화와 강수패턴의 변동에 따른 습지 등 비점오염원 배출량 증가 등을 꼽을 수 있다(Pison et al., 2013; Climate Watch, 2024). 1980년대에 1,650ppb 이하였던 메탄의 지상 관측 농도는 2024년 현재 약 1,940ppb로 지난 약 40년간 약 18%(약 290ppb)나 상승했다(그림 1 참조).

지구 대기 중 메탄의 주요 배출원은 연평균 약 600Tg(혹은 6억 톤) 수준인 것으로 알려져 있다(Jackson et al., 2020; NOAA, 2024). 그러나 이 값은 관측농도를 기준으로 기존 추정 배출량을 최적화한 하향식(top-down) 방법에 따른 것으로 배출원별 및 지역별(국가별)로 배출통계를 적용, 합산한 상향식(bottom-up) 방식의 결과(약 740Tg)와 여전히 큰 차이가 있는 것으로 알려져 있다. 이는 비점오염원과 자연적 배출원을 포함한 다양한 메탄의 배출량이 여전히 매우 불확실함을 암시하고 있다(Cheewaphongphan, Chantani, and Saigusa et al., 2019; Jackson et al., 2020).

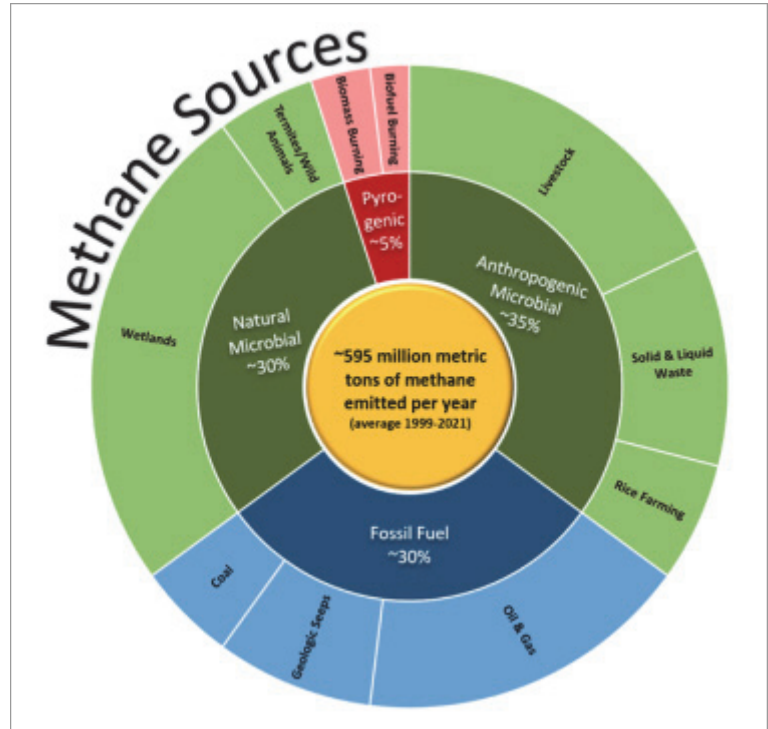
그림 1.

1985년 이후 글로벌 대기 중 메탄 평균 농도 추이(위)와 연도별 메탄농도 증가 속도(아래)



자료: 미국 해양대기청(NOAA)자료(Lan, Thoning, and Dlugokencky, "Trends in globally-averaged CH₄, N₂O, and SF₆ determined from NOAA Global Monitoring Laboratory measurements", 검색일: 2025.1.8).

그림 2.
글로벌 메탄 배출원



자료: 미국 해양대기청(NOAA) CarbonTracker-CH4(NOAA, 2024).

대기 중 메탄은 대부분 대기 중에서 하이드록실 라디칼(OH)에 의해 광화학적으로 분해된다. 메탄의 주요 배출원은 인위적 요인인 화석연료 사용(약 30%), 농축산 부문(벼농사 및 축산업)과 하폐수 및 매립지 등에서의 배출(약 35%), 그리고 습지를 중심으로 한 자연적 배출(약 30%)로 구성되어 있다(그림 2 참조). 그러나 앞서 언급하였듯 다양한 배출원에 대한 측정방법의 상이성과, 기후 조건에 따른 배출량 변화 등으로 인한 지역별 자료의 불확도에서 기인한 배출량 정보 간의 오차가 크며 이에 따라 메탄 배출목록에 대한 측정·감시·보고·검증(MMRV)의 중요성이 강조되고 있다(Asadnabizadeh, 2022; Calvin, Lee, and Romero et al., 2023; 최형식 외, 2024).

Ⅲ. 메탄 감축과 배출량 검증을 위한 국제사회의 노력

UN은 2020년에 2050년까지 탄소중립(넷제로)의 목표를 수립하였다. 또한 IPCC 6차 평가보고서에서는 파리협정의 달성을 위해서 2030년까지 탄소배출이 정점을 이루고 2060년까지 탄소중립이 달성되어야 한다고 보고하였다. 이러한 차원에서 국제기구 및 여러 국가에서 메탄 감축에 대한 정책과 협업을 이행하고 있다. UN에서 주관하는 전 지구적 이행점검(GST: Global Stocktake)은 파리협정 제6조에 따라 5년 마다 이루어지는 국제적 온실가스 이행실적의 평가과정이다. GST는 각 국가가 제출한 국가 결정 기여(NDCs: Nationally Determined Contributions)를 기반으로 집단적으로 온실가스 배출량 감축 노력의 충분성을 평가하고, 더 높은 수준의 기후 행동을 유도하는 것을 목표로 한다(UNFCCC, 2022). GST는 투명하고 과학적인 NDC에 대한 검증(MMRV)을 위해 국제협력의 중요성을 강조하며, 각국이 국가 온실가스 배출량과 저감노력을 관측기반의 과학적 방법으로 검증할 것을 요구하고 있다.⁴⁾

2021년 제 26차 유엔기후변화협약 당사국 총회(COP26)에서 국제 메탄 서약(Global Methane Pledge)이 출범되었다. 메탄 서약은 전 세계적으로 메탄 배출량을 줄이기 위한 국제 사회의 노력이며 2030년까지 2020년 대비 메탄 배출량을 30% 감축하는 것을 목표로 하고 있다. 메탄 서약은 농축산업과 에너지/폐기물 분야에서 메탄 관리 방안을 강화해 배출량을 줄이는 것과 더불어, 메탄 배출량에 대한 정교한 감시와 검증을 추구하고 있으며, 각국의 연구 협력과 정책 사례를 공유하여 메탄 감축의 목표 달성을 추구하고 있다(Global Methane Pledge, 2025).

유럽연합은 2020년 메탄 배출량 저감을 위한 ‘EU Strategy to Reduce Methane(메탄 배출 저감 전략)’을 발표하였다.⁵⁾ 메탄 배출 저감 전략은 유럽 Green Deal의 한 전략으로서 2050 탄소중립을 위한 유럽연합의 목표가 그 배경이며, EU 국가들의 부문별 조치 등을 포함하고 있다(EU, 2020; 최형식 외 2024). 이어 유럽연합은 2024년 5월 최초의 메탄 규제 법률이 공식 발효되었는데 주요 내용은 표 1과 같다.

4) UNFCCC, "Global Stocktake 2022", 검색일: 2025.1.15.

5) European Commission(2020.10.14), "Reducing greenhouse gas emissions: Commission adopts EU Methane Strategy as part of European Green Deal", 검색일: 2025.1.18.

표 1.

EU의 메탄 규제 법률의
주요 내용

부문	반응내용	비고
에너지	<ul style="list-style-type: none"> - 메탄 배출량 감축에 대한 독립기구 지정 - 배출원 단위에서 일반적 배출계수를 통한 배출목록 구축 (2025.6.30. 기한) - 배출원 단위에서 특정배출계수 정량화(2025년 말까지) - 운영자산의 직접 측정에 의한 정량화 수행(2026년 말까지) 	Tier 3 수준 ⁶⁾
감시 및 규제	배출되는 메탄의 의무 감시 및 배출과 연소 금지 이행	
메탄 수입시 메탄 수출국에 대한 규제	<p>메탄 수출국의 메탄 배출량에 대한 측정, 보고, 감축 행동에 대한 정보 수집 및 배출량 산정</p> <ul style="list-style-type: none"> - phase1) 글로벌 메탄 배출 모니터링 도구 기반 정보수집 - phase2) EU 수입업자들은 천연가스 생산에 대한 MMRV 자료 제시(2027.1.1.부터) - phase3) EU에 수입되는 메탄에 대한 최대 메탄 강도 (Maximum CH₄ intensity) 규정 마련과 초과시 부과금 징수 예정(2030년까지) 	

자료: 최형식 외(2024); New European Parliament(2024.4.10.), "Methane: Parliament Adopts New Law to Reduce Emissions from Energy Sector", 검색일: 2025.1.9를 바탕으로 저자 작성.

앞서 언급한 GST 차원의 노력 중 하나로 세계기상기구(WMO: World Meteorological Organization)는 기존의 온실가스 배출량 산정법의 한계를 보완하기 위해 관측기반의 하향식(top-down) 온실가스 정보 산출 기법으로 '통합 지구 온실가스 정보체계'(IG³IS: Integrated Global Greenhouse Gas Information System)개발을 시작하였다.⁷⁾ WMO IG³IS는 다양하게 관측된 온실가스 농도로부터 기상 등 수치모형을 활용하고 역모델링을 활용하여 배출량을 추정하는 방식이다. 이는 검증된 세계 기상기구의 온실가스 네트워크를 활용하여 기존의 상향식 배출량 정보를 보완하고 배출량과 각국의 감축정책에 대한 신뢰도와 검증에 기여하기 위함이다. 이러한 노력은 국가 온실가스 인벤토리의 지침인 '2006 IPCC 가이드라인의 2019년 개정판'에서 배출량의 검증 방안으로 인정받고 있으며 우리 정부도 이 국제사업에 참여하고 있다(IPCC, 2019; 주상원 외, 2022).

6) IPCC 기준으로 Tier 1은 보편적 기본배출계수, Tier 2는 국가별 배출계수, Tier 3은 (배출원별) 시설단위 수준을 평가하는 특정 배출계수 산정 수준을 의미함.

7) WMO(2018), "An Integrated Global Greenhouse Gas Information System (IG³IS) Science Implementation Plan", 검색일: 2025.1.8.

국제메탄관측기구(IMEO: International Methane Emissions Observatory, IMEO)는 MARS(Methane Alert and Response System) 프로그램을 통해 메탄 배출 경고 시스템을 운영하고 있다(UNEP, 2024). 또한 미국 민간기구인 Environmental Defense Fund(EDF)의 고해상도 메탄감시위성인 Methane SAT를 활용하여 석유 및 가스 산업의 메탄 배출을 세부적으로 모니터링하고 검증할 계획이며, 이를 바탕으로 관련 국가 및 기업에 과학적으로 검증된 메탄 배출량 데이터를 제공할 예정이다.⁸⁾

8) MethaneSAT(2025), "Resources", methanesat.org/resources, 검색일: 2025.2.2.

IV.

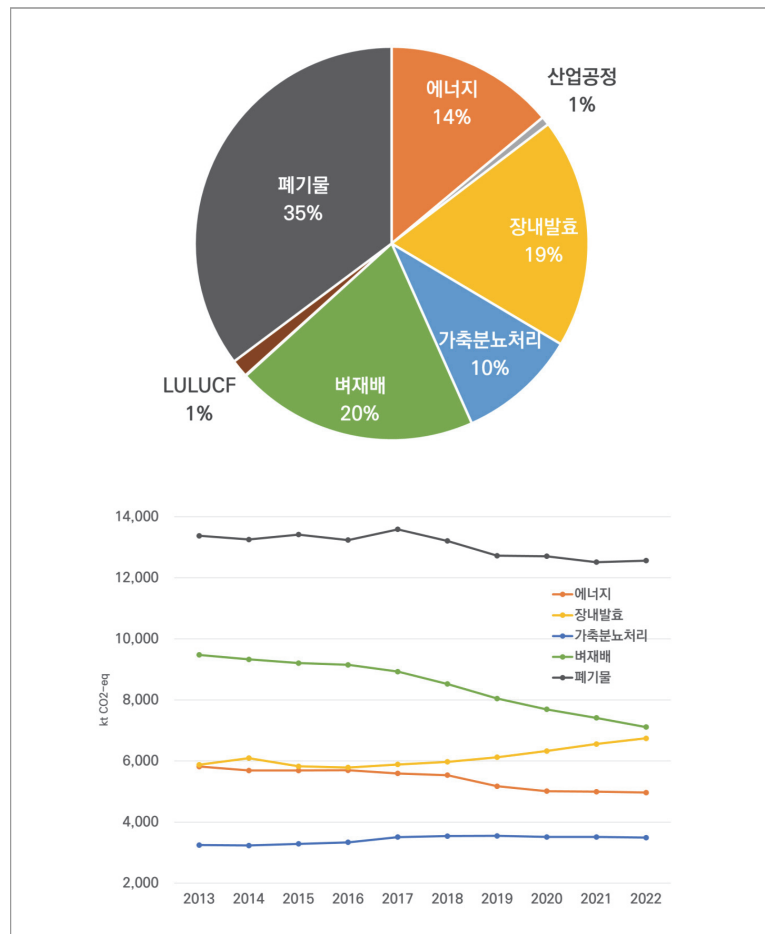
국내 메탄 고농도 지역과 주요 배출원⁹⁾

그림 3.

2022년(위) 및 최근
10년(2013~2022년)간
(아래) 국내 부문별 메탄
배출량 통계

1. 국내 지역별 메탄 주요 배출정보의 중요성

우리나라 국가온실가스종합 정보센터 자료에 따르면 2022년 메탄(CH₄)의 국내 총 배출량은 약 3,515만톤(CO₂-eq)으로 국가 총배출량의 약 4.9%를 차지하는 것으로 나타났다. 그러나 우리나라 메탄 배출량은 감소하는 경향을 보이지 않고 있는데, 주요 배출원 중 산업에너지와 폐기물에 의한 배출량은 정체되는 양상이고, 벼생산량은 감소하는 추세이나 가축관련 메탄 배출량은 소폭 증가추세이다.¹⁰⁾



자료: 온실가스종합정보센터(2025.1.3), “2024년 국가 온실가스 인벤토리(1990-2022) 공표(’06, ’96 IPCC 지침)”, 검색일: 2025.1.22를 바탕으로 저자 작성.

9) 본 절은 관련 연구인 Moon et al.(2024)의 주요 내용을 정책적 관점에서 요약함.

10) 온실가스종합정보센터(2022), “2022 국가 온실가스 인벤토리(1990-2020) 보고서(NIR)”, 검색일: 2025.1.24.

현 국가 온실가스 정보는 국내 산업 등 상세한 부문의 배출통계를 제시하고 있으나, 시공간적인 메탄의 배출변화에 대한 상세한 정보를 제공하는 수준은 아니다. 또한 전국 차원의 메탄 고농도 지역과 이에 대한 주요 원인(배출원)에 대한 정보가 현재 부재한 실정이다. 따라서 본고에서는 이 부분에 대한 정보를 도출하고 정책적 함의를 제시하고자 하였다.

2. 국내 메탄 고농도와 원인 분석 방법

본고에서는 상세한 국내 메탄 농도 분포와 그 정도를 파악하기 위해 유럽 우주청(ESA)과 미국 항공우주국(NASA)이 공동으로 관측한 TROPOMI (TROPOspheric Monitoring Instrument)의¹¹⁾ 메탄 위성 관측자료를 활용하여 2018년 8월부터 2019년 7월까지 1년간 우리나라의 연평균 메탄 고농도 지역의 분포를 10km의 공간 해상도로 파악하였다.¹²⁾

위성 관측자료는 메탄의 대기 중 컬럼농도(XCH_4)인데 해당 기간 우리나라의 메탄 평균 농도는 1,863ppb로서 동일 기간 전세계 평균과 비슷한 수준을 보여주고 있다. 그러나 우리나라는 벼농사와 습지 등의 영향으로 더운 계절(약 6~9월)의 농도가 상대적으로 높은 강한 계절 변화를 보인다(Moon et al., 2024). 이는 논에 있는 수생 조건 미생물의 활동과 관계가 있는데 벼농사를 주로 하는 중국 및 인도 등과 비슷한 계절 변화를 보인다(Matthews, Fung, and Lerner, 1991).

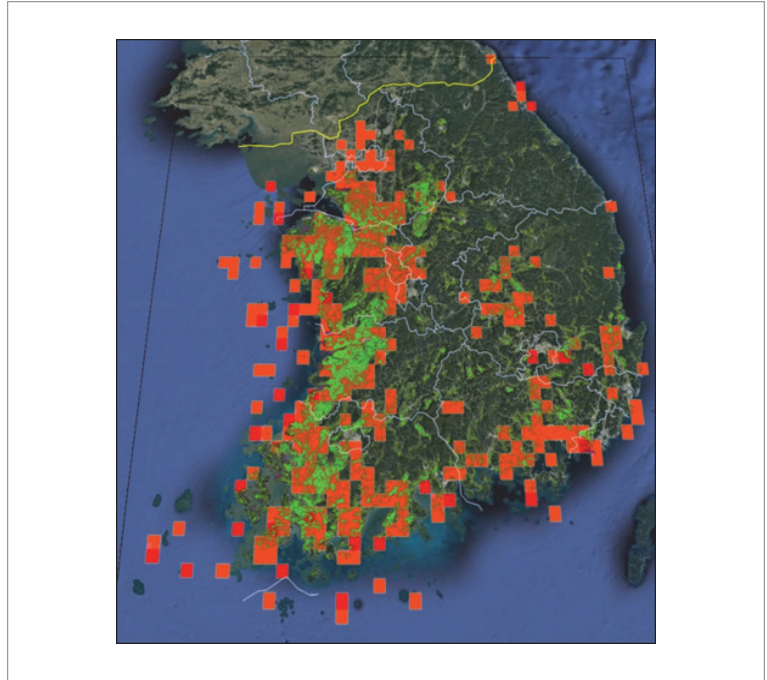
우리나라 지역의 메탄 농도를 통계적으로 분석하였을 때 상위 30%에 해당하는(연평균 약 1,870ppb 이상) 지역은 주로 남한지역의 서부와 남부에 걸쳐 있는데 이 지역의 상당 부분은 논농사 지역과 공간 분포상 유사성이 있었다(그림 4 참조). 또한 더 높은 농도인 상위 5%에 대한 농도(연평균 약 1,880ppb) 분포는 산발적인데 주로 항만과 관련된 주요 산업 지역들(예: 군산, 여수 등)이 많았다. 그러나 산업 혹은 폐기물 등의 영향은 도시지역을 중심으로 1,880ppb 이하의 다양한 고농도 지역에서도 연관성이 많았다.

11) TROPOMI(2017), "TROPOMI", 검색일:2025.1.28.

12) 본 절은 Moon et al(2024)의 주요 결과를 요약하고 추가 설명을 하였음.

그림 4.

우리나라 상위 30% 수준의 메탄 분포 지역(적색 사각형) 논농사 지역(밝은 녹색 지역)



자료: Moon et al.(2024).

Moon et al.(2024)에 따르면 국내 주요 메탄 배출원은 화석연료 사용(석탄 제외), 축산업, 벼농사, 그리고 폐기물 매립으로서 이들의 비중은 국내 메탄 전체 배출량의 약 80%를 차지하고 있다(CO₂-eq 기준). 그것의 공간적 상관관계를 설명할 지표(proxy)로서의 국가 통계는 화석연료 사용과 관련 있는 석유 및 천연가스 지자체별 소비량(석탄제외), 가축 배출원과 관련 있는 암모니아 지역별 배출통계(축산업), 논 면적(벼농사), 그리고 지자체별 연간 폐기물 매립량(폐기물)이다. 이러한 주요 배출원과 관련 지표 통계, 그리고 배출과정 및 저감 가능 방법에 대해 표 2에서 설명하였다.

Moon et al.(2024)에서는 TROPOMI 메탄 위성자료로 수집된 연평균 메탄 컬럼농도(XCH₄)와¹³⁾ 동일한 공간해상도로 구축된 메탄의 주요 배출원 지표 통계자료와의 공간 상관성 분석(Species Distribution Modeling, SDM)을¹⁴⁾ 실시하여 주요 국내 메탄 고농도 지역의 주요 원인을 규명하고자 하였다.

13) 컬럼농도는 대기 중 메탄의 수직 평균농도를 의미하는 것으로 지표 농도에 비해 대략 1% 정도 작은 값을 보임.

14) 자세한 지표 출처와 공간 상관성 방법론은 Moon et al(2024)에 설명되었음.

표 2.

본고에 분석된 국내 주요 메탄 배출원과 관련 국내 지표 통계 및 메탄 발생 원인 및 저감 가능 방법

배출원	활용된 지역 지표 통계	비중 (%) ¹⁵⁾	발생 원인	저감 가능 방법
화석연료 사용	석유 및 천연가스 소비량 ¹⁶⁾	13.9	공정상 배출, 탈루, 연소 등	공정상, 운반상 탈루(fugitive emissions)를 감시하고 저감 유도
축산업 ¹⁷⁾	암모니아 배출량 통계	28.7	가축 소화과정, 분뇨	저 메탄 발생 사료 개발 및 보급과 분뇨의 고형화 및 자원화
벼농사	논면적	19.9	논에서 수생 방식 벼농사는 논 미생물을 활성화시켜 논에서 메탄 발생을 유발하고 비료 사용은 이를 촉진	- 메탄 발생 저감 벼품종 개발 - 저비료 사용 벼품종 개발 - 관계 방식의 개선
폐기물 매립 ¹⁸⁾	연간 매립량	32.8	폐기물의 혐기성 분해 과정에서 발생	매립지 발생 메탄의 수집 및 재활용(예, 바이오가스) 메탄 발생 모니터링 강화

자료: Moon et al.,(2024)과 온실가스종합정보센터(2022), “2022 국가 온실가스 인벤토리 (1990-2020) 보고서(NIR)”, 검색일: 2025.1.24를 바탕으로 저자 작성.

15) 비중은 활용된 지표와 연관된 메탄 배출원의 비중이며(국가온실가스통계) 지표로부터의 메탄 배출을 직접 의미하지는 않음.

16) 석탄은 분석용 지표에는 미포함 되었으나 메탄 배출 비중에는 포함된 값임.

17) 장내발효와 가축분뇨처리의 합.

18) 하·폐수처리는 포함하지 않음.

3. 주요 메탄 고농도와 관련 배출원

가. 고농도 지역과 관련 배출원

그림 5과 표 3은 위성 관측을 기반으로 우리나라의 메탄 농도의 공간 분포와 함께 지역 메탄 농도와 관련 지표와의 공간 상관성 분석으로 규명된 일부 메탄 고농도 지역의 주요 배출원을 보여주고 있다. 국내에서 연평균 메탄 농도가 가장 높은 수준을 보이는(XCH_4 1,880ppb 이상) 지역은 군산시와 여수시 등 항만 인근의 산업단지가 있는 지역이었다(그림 5, 표 3 참조). 비슷한 원인으로 비항만 지역에서는 당진시와 창원시가 산업단지 및 폐기물과 관련성이 높았다(그림 5, 표 3 참조). 또한 산업단지는 보통 해당 지자체에서 폐기물을 처리하기 때문에 산업단지와 매립지의 분포가 부분적으로 유사한 경우가 많았다.

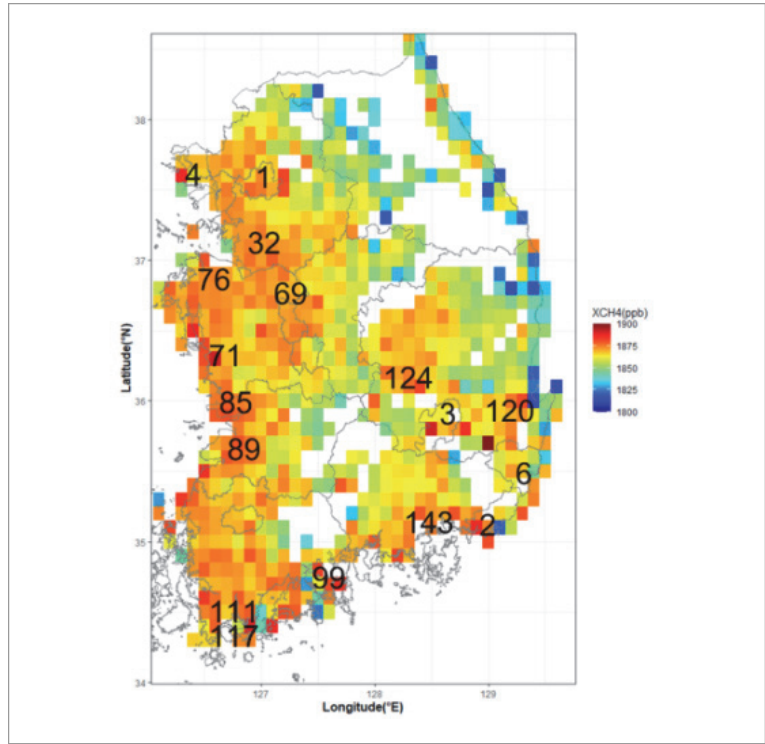
메탄 농도 상위 30%인 1,870ppb 이상 지역의 경우 우리나라 서부 및 남부 지역의 벼농사 및 축산 지역 등과 관련성이 높다. 해남군과 김제시, 완도군, 경기 화성, 안성시 등이 벼농사로 인한 메탄 배출지역으로 나타나며 이런 지역 들은 보통 축산업과도 부분적으로 유사한 공간 상관성을 보였다(그림 5, 표 3 참조). 서울 및 부산 등 대도시도 광범위한 지역에서 메탄 농도가 높게 나타났는데 (~1,875ppb) 이러한 대도시의 경우 생활 폐기물뿐 아니라 하폐수 등 기타 원인 혹은 누락(과소) 배출원이 포함되었을 가능성이 있어(Joo et al., 2024) 추가적인 연구가 필요하다.

이러한 전국단위의 메탄 고농도 지역과 국가 메탄 배출 관련 주요 지표를 활용한 국내 메탄 고농도 지역에 대한 원인 규명은 지역 차원의 메탄 저감 대책의 구체적 우선순위를 제시할 수 있으므로¹⁹⁾ 국내 탄소중립 이행에 있어서 의미가 있다. 또한 이러한 관측기반의 지역 배출정보를 추론하는 하향식(top-down) 연구 결과는 온실가스 종합정보센터 등 국가 온실가스 정보 구축과 검증에 반영하면 바람직할 것이다.

19) 「기후위기 대응을 위한 탄소중립녹색성장 기본법」 제4조에 '지방자치단체의 책무'로서 '해당 지방자치단체의 지역적 특성과 여건을 고려해야 한다'라는 조항이 있다.

그림 5.

우리나라 연간 메탄
고농도 지역 분포



주: 메탄 고농도 지역은 주황색~적색 지역이며, 번호는 배출원이 상관이성이 규명된 지역임.
자료: Moon et al.(2024)을 바탕으로 저자 작성.

표 3.

우리나라 주요 메탄
고농도 지역과 농도,
추정된 주요 배출원

번호	지역명	농도 ⁽²⁰²¹⁾ (ppb)	주요 배출원	번호	지역명	농도 (ppb)	주요 배출원
99	여수	1,881	산업, 항만, 폐기물	120	포항	1,873	폐기물
85	군산	1,881	산업, 항만, 폐기물	32	화성/안성	1,873	벼농사/복합영향
111	해남	1,878	벼농사, 축산	124	구미	1,872	폐기물
89	김제	1,877	벼농사	4	인천	1,872	산업단지, 항만
143	창원	1,876	산업단지, 폐기물	69	천안	1,870	산업, 축산, 복합
117	완도	1,875	축산	71	보령	1,870	폐기물
1	서울	1,875	복합 원인	6	울산	1,865	산업
2	부산	1,874	폐기물	3	대구	1,863	폐기물
76	당진	1,874	산업단지, 폐기물				

자료: Moon et al.(2024)을 바탕으로 저자 작성.

20) 상기 농도는 연평균 기준으로 해당 지역은 고농도 원인 파악이 가능한 주요지역의 농도 순서이며 전국 모든 지역의 농도순만 고려한 것은 아님. 또한 지역명은 해당 지자체 뿐 아니라 인근 지역을 포함할 수 있음.

21) 해당 농도는 연평균(2018년) 대기 컬럼 농도(XCH₄)이므로 지상 관측 농도와 상이함.

V.

우리나라 메탄 배출목록의 주요 이슈와 배출량 검증 방향

우리나라는 ‘국제 메탄 서약’에 동참을 선언한 바 있으며, 2050 탄소중립 녹색성장위원회는 2023년 ‘2030 메탄 감축 로드맵’을 제시하였다.²²⁾ 여기에는 2030년까지 메탄 국내 배출을 2020년 대비 30% 이상 감축한다는 목표를 제시하였다. 농축산 부문에서는 저메탄 사료 보급과 가축분뇨의 정화처리 비율을 확대하여 축산부문의 메탄 발생을 억제하고, 에너지 부문의 메탄 탈루 및 배출에 대한 감시 강화, 에너지 사용 절감 유도하는 것을 포함하였다. 폐기물 부문에서는 매립지의 메탄 회수 및 바이오가스화 추진과 생활 폐기물 저감을 추진하기로 하였다.²³⁾

우리나라는 「기후위기 대응을 위한 탄소중립녹색성장 기본법(2024)」에 따라 ‘온실가스종합정보센터’를 설치하고 국가 및 지역별 온실가스 배출량, 흡수량 및 관련 계수 등 각종 정보 및 통계를 개발·분석·검증하도록 하고 있다. 한편, UN은 글로벌 기후 대응의 일환으로 국가별 온실가스 저감 노력의 투명성(transparency)과 정확성(accuracy)를 제고하고, 책임 있는 감시 및 측정, 보고 시스템을 통해 이행 상황을 증명할 것을 각 국가에 요구하고 있다. 이에 따라 국내 메탄 배출의 특성을 파악하고 배출량을 과학적 방법론에 의해 정량화하는 작업의 필요성이 점차 커지고 있다.²⁴⁾

그러나 우리나라 온실가스 인벤토리는 국가 전체 단위의 연간 메탄 배출량만 산정하고 있어, 지역별 주요 메탄 배출원이나 계절적인 특성을 파악하기 어렵다. 또한 산정 방법도 부분적으로 기초적인 단계에 머무르고 있어 배출량에 대한 불확도가 높은 상황이다(표 4 참조). 미국과 영국 등은 대부분 주요 부문에서 국가 고유 배출계수를 개발하여 배출량 산정에 활용하거나 측정 데이터와 고도화된 모델링 기법을 적용하고 있지만, 우리나라는 현재 제한적인 부문에서만 국가 고유 배출계수를 활용하고 있어 전반적인 개선이 필요한 실정이다.

따라서 국내 인벤토리의 정확도를 개선하고 국제적인 신뢰도를 확보하기 위해서는 현장 측정 기반의 배출계수 산정과 고도화된 배출량 산정 방법의 도입이 시급하다.

22) 김예윤(2024), “지구온난화 주범 ‘메탄’... 산업단지-농축산 지역서 집중 발생”, 『동아일보』, 검색일: 2025.1.6.

23) 탄소중립녹색성장위원회(2023), 검색일: 2025. 1.15.

24) UNCC, “FOCUS: Mitigation – Reporting on National Implementation and MRV”, 검색일: 2025.1.17.

표 4.

국내외 주요 부문별
메탄 배출량 산정 방법

구분		한국	미국	영국
인벤토리 보고서		온실가스종합정보센터 (2024)	EPA(2024)	UK(2024)
IPCC 산정방식		1996 GL	2006 GL	2006 GL
에너지	연료연소	Tier 1, 2	Tier 1, 2	Tier 1, 2, 3
	탈루	Tier 1, 2	Tier 2, 3	Tier 1, 2, 3
산업공정		Tier 1	Tier 1	Tier 1, 2, 3
농업	장내발효	Tier 1	Tier 1, 2	Tier 1, 3
	가축분뇨처리	Tier 1	Tier 1, 2	Tier 1, 2
	벼재배	Tier 2	Tier 1, 3	
	작물잔사소각	Tier 1	Tier 2	Tier 1
폐기물	폐기물매립	Tier 1, 2	Tier 2, 3	Tier 2
	하폐수처리	Tier 1, 2	Tier 1, 2	Tier 1, 2

자료: 최형식 외(2024)를 참고하여 저자 재작성.

국내 메탄 인벤토리의 검증 및 정확도 개선을 위해 글로벌 메탄 인벤토리 데이터를 비교·참고할 수 있다. 글로벌 온실가스 인벤토리는 전 세계적인 온실가스 배출 현황을 파악하고 국가 간 비교가 가능하도록 국가별로 일관된 방법론을 활용하여 산정된다. 그러나 활동 자료나 국가 고유 배출계수 등 국가별 고유한 특성을 충분히 반영하지 못한다는 한계가 있다.

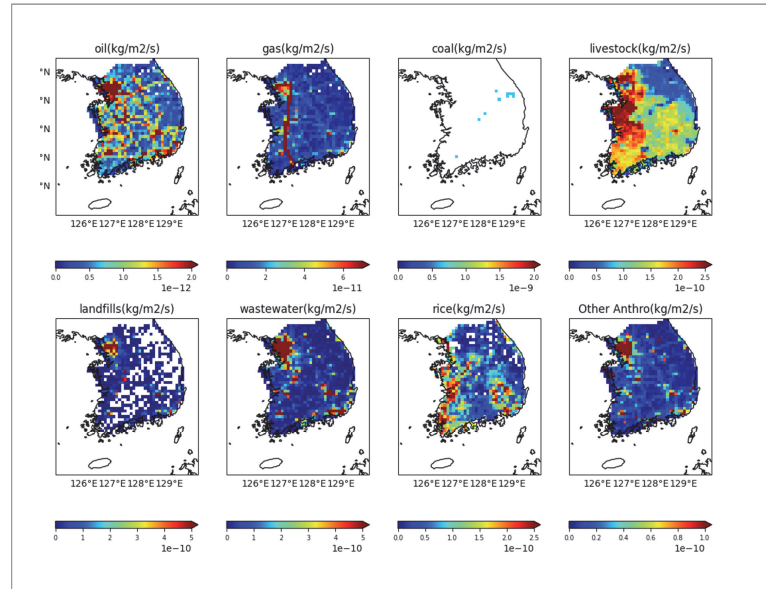
그럼에도 불구하고, 글로벌 메탄 인벤토리를 활용하면 특정 배출원의 과소 또는 과대 평가 여부를 파악하고, 국내 인벤토리에서 누락된 소규모 배출원이나 비공식 배출원 등의 가능성을 검토할 수 있다. 특히, 유럽연합 공동연구센터(JRC: Joint Research Centre)와 네덜란드 환경평가청(PBL)에서 제공하는 EDGAR (Emissions Database for Global Atmospheric Research)는 전 세계에 걸쳐 10km 수준의 고해상도로 부문별(에너지, 농업, 폐기물 등) 메탄 배출량을 제공하여 국내 메탄의 배출의 공간적인 특성을 분석하는 데 유용하게 활용될 수 있다. 예를 들어, 인구 밀집도가 높은 지역이나(예, 수도권) 주요 산업단지가 위치한 지역에서는 에너지 및 폐기물 관련 메탄 배출량이 높으며, 가축 및 벼재배와 관련된 메탄 배출량은 농축산업이 주요 산업인 지역과 일치하는 분포를 보이는 것을 확인할 수 있다(그림 6 참조).

이처럼 글로벌 메탄 배출목록은 국제에너지기구(IEA), 유엔기후변화협약(UNFCCC), 세계철강협회(World Steel Association) 등 전 세계적인 통계자료를 기반으로

산정되어 우리나라의 배출 특수성을 상세히 고려하지 못하는 한계점에도 불구하고 부문별 고배출 지역을 시공간적으로 파악하고 국내 저감정책을 수립하는 데 중요한 참고 자료로 활용될 수 있다(Janssens-Maenhout et al., 2019).

그림 6.

EDGAR 메탄
배출목록의 국내
부문별 메탄 배출량과
분포(2018년 기준)



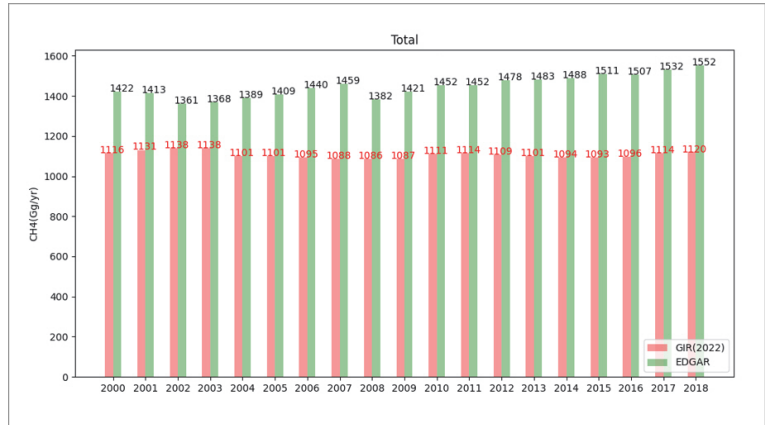
자료: EDGAR 메탄 배출목록을 바탕으로 저자 작성.

뿐만 아니라 EDGAR(Monforti-Ferrario et al., 2022) 등의 글로벌 배출목록들은 국내 온실가스 인벤토리와 정량적인 비교를 통해 상호 검증 및 배출원별 과소 또는 과대 평가 여부를 비교·검증하는 데 유용하게 활용될 수 있다. EDGAR 격자 자료를 활용하여 한반도 내 격자별 면적을 고려한 총 배출량을 산정하고, 동일 기간의 국내 메탄 총 배출량과 비교하였다.²⁵⁾ 비교 결과, 글로벌 인벤토리와 대비하여 국내 인벤토리가 메탄 배출량을 다소(약 25%) 과소하게 산정하는 것처럼 나타났다. 또한, EDGAR에서는 최근 국내 메탄 배출량이 다소 증가 경향을 보이는 반면, 국내 인벤토리의 경우 비교적 일정한 추세를 수준을 유지하는 것에서도 차이를 보였다(그림 7 참조).

25) 온실가스종합정보센터(2022), “2022 국가 온실가스 인벤토리(1990-2020) 보고서(NIR)”, 검색일: 2025.1.24.

그림 7.

2000~2018년
EDGAR 및 온실가스
종합정보센터(GIR)
연간 메탄 총 배출량 비교



자료: 저자 작성.

EDGAR의 경우 연료연소 내 수송부문에서 항공 이착륙 시 발생하는 배출량을 포함하거나, 탈루 배출량을 따로 계산하지 않고 연료 사용에 따른 모든 배출량을 통합적으로 계산하며, 습지에서 발생하는 배출량은 포함하지 않는 등 국내 메탄 인벤토리와 배출원 및 분류 체계에서 차이를 보인다. 동일한 분류를 바탕으로 국내 메탄 인벤토리와 EDGAR의 부문별 배출량 차이를 비교하기 위해 IPCC 1996 지침에 제시된 분류 코드를 기준으로 매칭하여 재계산한 값을 활용하여 분석하였다.

2018년 배출량을 기준으로 비교한 결과, 수송과 산업 등 다수의 부문에서는 비교적 유사한 값을 산정한 반면, 일부 부문에서 값에 큰 차이를 보였다. 국가 고유 배출계수를 활용하고 있는 연료연소, 탈루, 폐기물 매립, 벼재배와 관련된 메탄 배출량의 경우 EDGAR와 비교하여 국내 온실가스 인벤토리에서 다소 높게 산정된 것으로 나타났다. 반면, 하폐수처리 및 장내발효 부문에서는 국내 인벤토리가 과소 산정된 경향을 보였다.

특히, 하·폐수처리 부문에서 두 인벤토리 간 가장 큰 차이를 보였으며, 이는 EDGAR에서 과대 추정했을 가능성뿐만 아니라, 국내 인벤토리에서 하수관망을 통해 배출되는 메탄 등 누락된 배출원(Joo et al., 2024)이 존재할 가능성이 있음을 시사한다. 장내발효 부문 배출량 역시 EDGAR보다 비교적 큰 차이로 적게 산정되고 있는데, 국내 인벤토리의 부문별 산정 방식이 부분적으로 Tier 1 수준에 머무르고 있어 유의미한 검증을 위해서는 관측 데이터를 기반으로 한 검증 및 측정 기반의 국가 고유 배출계수 산정이 필요하다.

본 장에서는 글로벌 온실가스 인벤토리를 활용하여 국내 메탄 배출의 공간적인 특성을 살펴보고, 국내 인벤토리와의 비교를 통해 누락 배출원, 국가 고유 배출계수 개발 필요성 등 정확도 개선 방안을 논의하였다. 특히, 주요 배출원의 대부분이 비점오염원인 메탄의 지역적 특성과 부문·지역별 배출량 상호 검증을 통한 국가 온실가스 인벤토리 정확도 개선을 위해서는 시공간적 정보 수준의 개선이 필수적이다. 이와 더불어 신뢰도 높은 국가 온실가스 인벤토리를 구축하고, 효과적인 감축 정책 수립에 이를 활용하기 위해서는 Tier 3 수준의 정밀한 배출량 산정과 다양한 전문적 관측 데이터에 기반한 검증이 병행되어야만 한다.

VI. 맺음말 및 제언

본고에서는 대기 중에 비교적 단기 체류하면서 지구 온난화 및 대기질에 영향을 주는 메탄의 국내 농도 분포와 주요 원인 및 배출원에 대해 설명하고자 하였다. 또한 우리나라 온실가스 통계의 현 수준과 글로벌 인벤토리와의 비교를 통해 국내 메탄 인벤토리의 개선 방향과 관련 정책 방향에 대해 논의하고자 하였다.

현재 정부 차원의 기초 지자체 혹은 상세한 지역별 메탄의 배출원 정보를 공식적으로 제공하는 데 기술적 한계가 있는 상황에서 위성자료와 국내 지역 메탄 배출 관련 정부 통계 기반 지표와의 공간 상관성 분석으로 고농도 지역의 배출 상관성을 도출하였다. 이는 향후 국내 지역별 메탄 정책 우선순위를 함의한다는 점에서 의미가 있다. 특히 국내 산업단지의 탈루 관리와 인근 관련 폐기물 매립 관련 메탄 발생을 저감하기 위한 정책적 우선순위가 필요하며 도시 및 인근지역에서는 산업 및 생활 폐기물 발생을 억제하는 것이 메탄 발생 억제와 긴밀한 관련이 있다고 할 수 있다. 또한 국내 산업단지 및 항만지역 등에서 에너지 제품 등의 생산, 수송에서의 메탄의 측정, 감시와 탈루에 대한 전주기적 관리 강화를 제도화할 필요가 있을 것이다.

농축산 부문에서도 대기질에 영향을 미치는 가축 분뇨의 암모니아뿐 아니라 메탄 발생을 감소시킬 수 있는 사료의 개발, 가축분뇨의 기화 억제를 위한 기술 및 정책 도입도 중요한 이슈이다. 벼농사의 관계 방식을 단기적으로 개선하는 데는 한계가 있는 것으로 보인다. 그러나 최근 국내에서 메탄 배출을 억제하는 품종개량에 성공한 바 있으며(농촌진흥청, 2023), 이를 점진적으로 추진하는 것도 국가 메탄 저감 정책 차원에서 검토할 필요가 있다.

또한 현재 국가 온실가스의 대부분 배출목록에는 여전히 Tier 1/Tier 2 수준의 배출량 산정체계가 많아 국내 메탄의 정확한 배출량 정보와 감축 이행 평가에 한계가 존재한다. 따라서 에너지 부분의 탈루성 배출 및 비점오염원인 하천, 습지(농업 포함) 등 상대적으로 매우 불확실한 메탄 배출원에 대한 현지 관측기반(Tier 3) 배출량의 정확도 향상과 보완이 필요하다. 이러한 인벤토리 개선 노력은 대표적인 배출 부문에 대한 지역별 정교한 관측을 통해 국가 온실가스 배출 정보 향상에 기여해야 하며, 메탄 누락 배출원에 대한 연구 및 조사도 병행되어야 한다. 마지막으로 국가 통계에 의한 메탄의 상향식 배출량은 여전히 불확도가 높을 수 있으므로 국제적 기준에 부합하도록 관측 및 역모델링 방식에 의한 하향식 방법에 따른 배출량을 함께 상호 검증하며 배출량과 저감에 대한 과학적 평가와 검증이 병행될 필요가 있다.

참고문헌



국내문헌



국외문헌

- 주상원 외(2022), “탄소중립을 위한 하향식 온실가스 배출 분석기법 개발 및 활용방안”, 『한국대기환경학회지』, 38(6), 한국대기환경학회, pp.933-947.
- 최형식 외(2024), 「메탄 감축 이행을 위한 메탄 측정·감시·보고·검증(MMRV) 개선 방안」, 한국환경연구원.
- Asadnabizadeh, Majid(2022), “Critical Findings of the Sixth Assessment Report (AR6) of Working Group I of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) for Global Climate Change Policymaking a Summary for Policymakers (SPM) Analysis”, *International Journal of Climate Change Strategies and Management*, 15(5), Emerald Publishing, pp.652-670, <https://doi.org/10.1108/IJCCSM-04-2022-0049>.
- Bousquet, P. et al.(2018), “Error Budget of the Methane Remote Lidar Mission and It’s Impact on the Uncertainties of the Global Methane Budget”, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123(20), American Geophysical Union, pp.11-766, <https://doi.org/10.1029/2018JD028907>.
- Calvin, K., H. Lee, and J. Romero(2023), “IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change,” Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)] (IPCC), Geneva, Switzerland
- Cheewaphongphan, P., S. Chatani, and N. Saigusa(2019), “Exploring Gaps between Bottom-up and Top-down Emission Estimates Based on Uncertainties in Multiple Emission Inventories: a Case Study on CH4 Emissions in China”, *Sustainability*, 11(7), MDPI, p.2054.
- Climate Watch(2024), “Greenhouse Gas Emissions by Sector”- with Major Processing by Our World in Data.
- IPCC(1995), “IPCC Second Assessment Report: Climate Change 1995”, IPCC, Geneva, Switzerland.
- IPCC(2019), “2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories”, Volume 1: General Guidance and Reporting, IPCC, Geneva, Switzerland.

- IPCC(2021), "Climate Change 2021 – The Physical Science Basis", In Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press.
- Jackson, R. B. et al.(2020), "Increasing Anthropogenic Methane Emissions Arise Equally from Agricultural and Fossil Fuel Sources", *Environmental Research Letters*, 15(7), IOP Publishing, pp.071002.
- Janssens-Maenhout, G. et al.(2019), "EDGAR v4.3.2 Global Atlas of the Three Major Greenhouse Gas Emissions for the Period 1970–2012", *Earth System Science Data*, 11(3), pp.959–1002. <https://doi.org/10.5194/essd-11-959-2019>.
- Joo, J. et al.(2024), "Missing Methane Emissions from Urban Sewer Networks", *Environmental Pollution*, Vol.342, <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.123101>.
- Matthews, E., I. Fung, and J. Lerner(1991), "Methane Emission from Rice Cultivation: Geographic and Seasonal Distribution of Cultivated Areas and Emissions," *Global Biogeochemical Cycles*, 5(1), American Geophysical Union, pp.3–24, <https://doi.org/10.1029/90GB02311>.
- Moon, J. et al.(2024), "Evaluation of Korean Methane Emission Sources with Satellite Retrievals by Spatial Correlation Analysis," *Environmental Monitoring and Assessment*, 196(3), Springer, 296, <https://doi.org/10.1007/s10661-024-12449-w>.
- Pison, I. et al.(2013), "Stable Atmospheric Methane in the 2000s: Key Role of Emissions from Natural Wetlands," *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13(23), European Geosciences Union, pp.11609–11623, <https://doi.org/10.5194/acp-13-11609-2013>.
- Prather, M. J., C. D. Holmes, and J. Hsu(2012), "Reactive Greenhouse Gas scenarios: Systematic Exploration of Uncertainties and the Role of Atmospheric Chemistry," *Geophysical Research Letters*, 39(9), American Geophysical Union, <https://doi.org/10.1029/2012GL051440>.
- Rosentreter, J. A. et al.(2021), "Half of Global methane Emissions Come from Highly Variable Aquatic Ecosystem Sources," *Nature Geoscience*, 14(4), Nature Publishing Group, pp.225–230, <https://doi.org/10.1038/s41561-021-00715-2>.
- UK(2024), "UK Greenhouse Gas Inventory, 1990 to 2022", *Annual Report for Submission under the Framework Convention on Climate Change*, https://uk-air.defra.gov.uk/assets/documents/reports/cat09/240411649_ukghgi-90-22_Main_Issue1.pdf.



온라인 자료

- UNEP(2024), “An Eye on Methane: Invisible but not Unseen: How Data-driven Tools Can Turn the Tide on Methane Emissions —If We Use Them”, Nairobi.
- EPA(2024), “Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks: 1990–2022”, EPA 430–R–24–004.
- 김예윤(2024), “지구온난화 주범 ‘메탄’... 산업단지-농축산 지역서 집중 발생”, 『동아일보』, <https://www.donga.com/news/Society/article/all/20240408/124384017/1>, 검색일: 2025.1.6.
- 농촌진흥청(2023), “세계 최초로 메탄 발생 획기적으로 줄인 벼 개발”, https://www.rda.go.kr/board/board.do?boardId=farmprmninfo&prgId=day_farmprmninfoEntry&currPage=1&dataNo=100000792150&mode=updateCnt&searchSDate=&searchEDate=&searchOrgDeptKey=org&searchOrgDeptVal=&searchKey=&searchVal=, 검색일: 2025.1.17.
- 온실가스종합정보센터(2022), “2022 국가 온실가스 인벤토리(1990–2020) 보고서(NIR)”, <https://www.gir.go.kr/home/board/read.do?pagerOffset=0&maxPageItems=10&maxIndexPages=10&searchKey=&searchValue=&menuId=36&boardId=76&boardMasterId=2&boardCategoryId=>, 검색일: 2025.1.24.
- 온실가스종합정보센터(2025.1.3), “2024년 국가 온실가스 인벤토리(1990–2022)공표(‘06, ‘96 IPCC 지침)”, <https://www.gir.go.kr/home/board/read.do?pagerOffset=0&maxPageItems=10&maxIndexPages=10&searchKey=&searchValue=&menuId=36&boardId=79&boardMasterId=2&boardCategoryId=>, 검색일: 2025.1.22.
- 탄소중립녹색성장위원회(2023), <https://www.2050cnc.go.kr/base/main/view>, 검색일: 2025. 1.15.
- European Commission(2020.10.14), “Reducing greenhouse gas emissions: Commission adopts EU Methane Strategy as part of European Green Deal”, https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_20_1833, 검색일: 2025.1.18.
- Global Methane Pledge, <https://www.globalmethanepledge.org/>, 검색일: 2025.1.8.
- Lan, X., K. W. Thoning, and E. J. Dlugokencky, “Trends in Globally-averaged CH₄, N₂O, and SF₆ Determined from NOAA Global Monitoring Laboratory Measurements,” Version 2025–01, <https://doi.org/10.15138/P8XG-AA10>, 검색일: 2025.1.8.

- MethaneSAT(2025), “Resources”, methanesat.org/resources, 검색일: 2025.2.2.
- Monforti-Ferrario, F. et al.(2021), “EDGAR v6.0 Greenhouse Gas Emissions”, European Commission, Joint Research Centre (JRC) [Dataset] PID: <http://data.europa.eu/89h/97a67d67-c62e-4826-b873-9d972c4f670b>, 검색일:2025.1.29.
- News European Parliament(2024.4.10), “Methane: Parliament Adopts New Law to Reduce Emissions from Energy Sector”, <https://www.europarl.europa.eu/news/en/press-room/20240408IPR20309/methane-parliament-adopts-new-law-to-reduce-emissions-from-energy-sector>, 검색일: 2025.1.9.
- NOAA(2024), “CarbonTracker CT-CH4-2023”, <https://gml.noaa.gov/ccgg/carbontracker-ch4/>, 검색일:2025.2.5.
- UNCC, “FOCUS: Mitigation – Reporting on National Implementation and MRV”, <https://unfccc.int/topics/mitigation/workstreams/measurement-reporting-and-verification>, 검색일: 2025.1.17.
- UNEP Climate Clean Air Coalition, “Short-Lived Climate Pollutants”, <https://www.ccacoalition.org/content/short-lived-climate-pollutants>, 검색일: 2025.1.7.
- UNFCCC, “Global Stocktake 2022,” <https://unfccc.int/topics/global-stocktake>, 검색일: 2025.1.15.
- WMO(2018), *An Integrated Global Greenhouse Gas Information System (IG3IS) Science Implementation Plan*, GAW Report No 245, WMO, Switzerland, <https://library.wmo.int/records/item/56863-an-integrated-global-greenhouse-gas-information-system-ig3is-science-implementation-plan>, 검색일: 2025.1.8.

