

대기 모니터링을 통한 메탄 탈루 배출 감축의 기후 및 경제적 효과

장동영¹⁾ · 정수종^{1),2),3),4)*}

¹⁾서울대학교 환경계획연구소, ²⁾서울대학교 환경관리학과,
³⁾서울대학교 지속가능발전연구소, ⁴⁾서울대학교 에너지 이니셔티브 연구단
(접수일: 2025년 10월 17일, 수정일: 2025년 11월 4일, 게재확정일: 2025년 11월 4일)

Climate and Economic Benefits of Reducing Fugitive Methane Emissions through Atmospheric Monitoring

Dong Yeong Chang¹⁾ and Sujong Jeong^{1),2),3),4)*}

¹⁾Environmental Planning Institute, Seoul National University, Seoul, Korea
²⁾Department of Environmental Management, Seoul National University, Seoul, Korea
³⁾Institute for Sustainable Development, Seoul National University, Seoul, Korea
⁴⁾Seoul National University Energy Initiative, Seoul, Korea

(Manuscript received 17 October 2025; revised 4 November 2025; accepted 4 November 2025)

Abstract Methane, despite having a relatively shorter atmospheric lifespan than carbon dioxide, is a potent greenhouse gas with a global warming potential over 80 times higher on a 20-year basis. Therefore, reducing methane emissions can significantly contribute to effective climate change mitigation. In the energy sector, methane emissions primarily originate from leaks during fossil fuel production, processing, transport, and usage. This study highlights the need for and the potential benefits of expanding Leak Detection and Repair (LDAR) programs based on strengthened Measurement, Monitoring, Reporting, and Verification (MMRV) systems. If LDAR is expanded to power generation facilities in Korea, it's possible to prevent methane leakage equivalent to about 2.57% of the nation's annual power generation. This could result in a saving of over 620,000 tons of LNG, achieving a cost reduction of approximately 530 billion KRW. This is further estimated to save social value costs equivalent to 5 trillion KRW and is expected to reduce greenhouse gases by about 80,000 tons of CO₂eq from the fuel combustion process. Mitigating methane emissions not only contributes to climate change mitigation but also reduces tropospheric ozone formation, thereby improving air quality and public health. Furthermore, preventing unintended energy loss yields mid- and long-term economic savings. Given that South Korea is one of the largest importers of natural gas, enhancing methane management in industrial complexes and metropolitan areas is essential for achieving national carbon neutrality goals. Moreover, Expanding LDAR programs can practically contribute to the country's Nationally Determined Contributions (NDCs).

Key words: Methane, MMRV, LDAR, Co-benefits, NDC

*Corresponding Author: Sujong Jeong, Graduate School of Environmental Studies, Seoul National University, 1 Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul 08826, Korea.
Phone: +82-2-880-5664, Fax: +82-2-885-5272
E-mail: sujong@snu.ac.kr

1. 서 론

1.1 배경: 기후변화로 인한 탄소감축 필요성 제기

전세계적으로 기후변화의 심각성이 날로 확산됨에 따라, 기후위기 대응을 위한 탄소 배출량 감축이 핵심적 글로벌 과제로 국제적 공감대가 형성되었다. 이는 약 190개국이 기후변화 대응을 위한 기후 행동 참여의 강력한 의지를 2015년 파리협정을 통해 보여주었다. 특히 참여국들은 자발적으로 온실가스 감축 기여 목표(Nationally Determined Contributions, NDCs)를 제출을 하였고, 특히, 미국, EU, 일본 등의 주요국들은 2030년까지 자국의 메탄 배출량을 40~55% 수준으로 감축하겠다는 구체적인 목표를 제시하였다.

한국은 국가 온실가스 감축목표(NDC)를 2018년을 기준연도로 하여 2030년까지 온실가스 총배출량을 40% 감축하는 것을 목표로 하고 있다. 이는 2018년 배출량 약 7억 2,760만 톤(t) CO₂eq를 2030년까지 약 4억 3,660만 톤(t) CO₂eq로 줄이는 수준에 해당한다. 전체 온실가스 배출량 중 에너지 부문이 약 87% (5.70억 톤(t) CO₂eq)를 차지하며, 그 중 발전 부문은 약 38~40% 비중(약 2.2억 톤(t) CO₂eq)으로 가장 큰 단일 부문이다. 에너지/전환 부문은 국가 전체 감축 목표(40%) 중에서도 가장 높은 비중의 감축 할당을 받은 영역으로, 2030년까지 약 44% 감축을 목표로 설정되어 있다. 그러나 2024년 잠정 온실가스 배출량은 약 6.92억 톤(t) CO₂eq로 보고되고 있어, 현재의 감축 수준만으로는 2030년 NDC 목표 달성에는 상당한 격차가 있는 것으로 평가된다(온실가스정보센터: <https://www.gir.go.kr>).

1.2 메탄 감축: 가장 빠르고 강력한 기후 해법

온실가스 중 메탄의 감축이 기후변화완화에 효과적인 방법으로 여겨지는 것은 메탄의 대기 중 짧은 대기 체류 시간과 높은 지구온난화지수(Global warming potential, GWP)의 조합으로 설명된다. 메탄(CH₄)은 대기 중 평균 수명은 약 12년으로, 수십 년에서 수백 년인 이산화탄소에 비해 짧지만, 열을 가두는 능력(지구온난화지수, GWP)이 매우 높아, 동일한 양의 메탄이 이산화탄소보다 단기간에 훨씬 더 큰 온난화 효과를 가진다. 메탄의 GWP는 100년 기준(GWP₁₀₀), 이산화탄소의 온난화 효과 대비 28~30배로 평가되며, 20년 기준(GWP₂₀)으로는 약 84~86배 높게 평가된다(IPCC, 2021).

메탄의 온난화 효과는 산업화 이후 2021년까지 지구 평균 기온 상승의 약 0.5°C 기여하고 있으며(IPCC 제6차 평가보고서(IPCC AR6 WGI, 2021), 이는 전체 지구온난화의 약 30%에 해당하는 것으로 분석된다(IEA, 2022). 이 같은 이유로 파리협정의 1.5°C 온도

상승의 목표 달성을 위해 국제사회가 가장 시급히 감축해야 할 온실가스로 메탄이 논의 되었으며, 감축의 시급성 또한 논의된 바 있다(IPCC, 2021; IEA, 2024). 2021년 11월에 개최된 제26차 유엔 기후변화협약 당사국총회(COP26)에서 공식적으로 출범한 글로벌 메탄 서약(Global Methane Pledge)을 통해 한국 포함한 주요국들은 2030년까지 2020년 대비 전 세계 메탄 배출량의 최소 30%의 감축 목표량을 선언하였다.

1.3 메탄 감축의 핵심, 에너지 부문의 탈루 저감

메탄의 주요 인위적 배출원 중에서 에너지 부문이 가장 중요한 감축 대상으로 꼽힌다. 이는 에너지 부문이 전체 인위적 배출량의 35~40%를 차지할 만큼 비중이 클 뿐 아니라, 다른 부문에 비해 배출원 특성이 용이하고 비용 효율적인 감축이 가능하기 때문이다. 석유 및 가스 생산, 수송, 정제 과정과 석탄 채굴 과정에서 발생하는 메탄은 누출 탐지 및 수리(Leak Detection and Repair, LDAR) 기술을 통해 즉각적으로 포집 및 회수될 수 있으며, 이는 경제적 이익으로도 이어진다. 유엔환경계획(United Nations Environment Programme, UNEP)과 국제에너지기구(International Energy Agency, IEA) 등 다수의 보고서는 이러한 이유로 에너지 부문 메탄 감축을 가장 효과적인 기후변화 대응 방안 중 하나로 평가한다.

최근 국제사회에서는 천연가스(Liquefied natural gas, LNG)의 수요가 꾸준히 증가하고 있다. 이는 천연가스가 석탄이나 석유보다 상대적으로 깨끗한 에너지원이라는 인식과 함께, 경제 성장과 전력 수요 증가에 따른 현상이다. 국내에서도 1970년대 석유 파동을 겪은 후, 에너지 안보와 환경 개선을 위해 LNG 도입이 적극 추진되었으며, 발전용 및 산업용 수요를 중심으로 그 사용량이 지속적으로 증가하였다. 하지만, 천연가스의 주성분인 메탄(CH₄)은 저장, 운송, 유통, 사용 과정에서 누출(탈루) 될 수 있으며, 이는 강력한 온실가스로서 기후변화에 상당한 영향을 준다. 이러한 누출량은 온실가스 인벤토리에 과소 보고되는 경향이 있어, 실제 기후변화 기여도는 보고된 값보다 클 수 있다는 점을 여러 선행 연구들이 입증하였다(Alvarez et al., 2012, 2018; Allen et al., 2013; Miller et al., 2013; Brandt et al., 2014; Kuo et al., 2015; McKain et al., 2015; Subramanian et al., 2015; Englander et al., 2018; Gurney et al., 2021; Sherwin et al., 2024; Dowd et al., 2024).

메탄의 의도치 않은 누출을 막는 LDAR 프로그램은 에너지 효율을 높이고 온실가스 배출을 줄이는 데 핵심적인 역할을 한다. LDAR는 메탄 누출을 즉각적으로 감소시켜 GWP가 높은 메탄의 영향을 줄이고, 에너지 연소량 감소를 통해 이산화탄소(CO₂) 배출까

지 억제하여 중장기적인 온실가스 감축에 기여한다. 최근 연구들은 LDAR 프로그램이 단기적이고 저비용으로 메탄을 감축할 수 있음을 보여주며, IEA는 전 세계 석유·가스 부문 메탄 배출량의 약 40%가 순비용 없이 저감 가능하다고 분석한다. 특히, 고배출원(high-emitters)에 대한 집중적인 관리는 이러한 경제적 효용을 극대화하는 방안이며(Kemp and Ravikumar, 2021, Rutherford et al., 2021 등), 위성 기반 원격감지 기술의 발전은 LDAR 비용을 더욱 낮추어 효율적인 감축 활동을 가능하게 하였다(Aldy et al., 2025).

1.4 메탄 MMRV 필요성 및 LDAR의 성공적 사례

메탄 감지 기술의 향상으로 지상, 항공기, 위성 기반의 대기 중 메탄 관측이 가능해졌으며, 집중 관측 결과, 다수의 국가 온실가스 인벤토리에 보고된 메탄 배출량이 실제보다 과소평가되는 사례가 빈번히 확인되었다. 최근 연구들에 따르면 천연가스의 생산 단계(Upstream)부터 소비 단계(Downstream)에 이르기까지 의도적 혹은 비의도적으로 배출되는 메탄 탈루(fugitive emission)가 공식 보고치보다 상당히 초과한다는 사실이 밝혀졌다(Allen et al., 2013; Kuo et al., 2015; McKain et al., 2015; Subramanian et al., 2015; Englander et al., 2018; Gurney et al., 2021; Dowd et al., 2024; Sherwin et al., 2024).

메탄의 초고배출원(super-emitter)인 천연가스 생산 시설에 대한 다양한 측정 방법을 활용한 집중 관측 결과, 석유 및 가스 생산 공정에서 누출되는 메탄의 측정 기반 배출량은 공식 보고치보다 약 1.5~3배 높게 나타났다(Miller et al., 2013; Brandt et al., 2014; Alvarez et al., 2018). 또한 최근 주요 6개 석유·가스 생산 지역에서 수집된 100만 건 이상의 항공관측 자료를 분석한 결과, 총 탈루량은 전체 생산량의 약 3% [600만 톤(t) 이상]로, 이는 미국 환경보호청(Environmental Protection Agency, EPA)이 추정한 누출률 1%의 약 3배에 해당하며, 앞선 연구들과 유사한 수준의 차이를 보여주었다(Sherwin et al., 2024). 이러한 차이는 배출량 산정 시 사용되는 배출계수 및 활동자료가 오래되어 현재의 상황을 충분히 반영하지 못하는 데 기인한다. 따라서 관측 기반의 인벤토리 고도화가 필요하며, 이는 Measurement, Monitoring, Reporting, and Verification (MMRV) 체계의 활성화를 전제로 한다.

고도화된 인벤토리 분석을 통해 초고배출원을 우선적으로 탐지 및 수리를 집중적으로 적용하는 LDAR를 적용하는 것이 메탄 감축의 효율적인 전략이다(Kuo et al., 2015). LDAR의 경제적 효과를 평가한 Sherwin et al. (2024)에 따르면, 미국의 석유와 가스 생산과정에서 연간 약 600만 톤(t)의 메탄 누출되고 있으며, 이로 인한 경제적 손실은 연간 약 10억 달러, 사회적 비

용(기후 피해 등을 포함한 총 손실)은 약 93억 달러에 달한다고 한다. 따라서 항공 및 원격 감지 조사를 정기적으로 실시해 누출 배출원을 빠르게 발견하고 감축하는 것이 중요하며, 이를 통한 공식 배출 통계의 정확도 향상과 효과적인 배출 감지 기술 도입의 필요성이 강조된다. LDAR 프로그램은 공정의 운영 효율성 향상으로 기업 입장에서 경제적 부담이 아닌, 경제적 이익을 주며 환경적·경제적 가치를 동시에 실현 가능하게 한다.

최근 메탄 감지 기술의 고도화로, 생산단에서 발생하는 고농도 메탄뿐만 아니라 상대적으로 저농도 메탄까지 민감하게 탐지할 수 있게 되면서 메탄 모니터링의 범위가 효과적으로 확장되었다. 이에 따라 고농도로 배출원이 명확히 특정 가능한 생산시설(Upstream)뿐만 아니라, 도시 지역 및 산업시설과 같이 천연가스가 주요 에너지원으로 사용되는 공급 및 소비 단계(Downstream)에서의 메탄 누출 탐지도 가능해졌다. 예를 들어, 미국 보스턴 지역의 연료 사용과정인 송전, 배전, 최종 사용을 포함한 천연가스 시스템 전반의 메탄 누출 사고가 발생하였다(McKain et al., 2015). 대기 측정 및 모델링 연구 분석결과, 보스턴 지역의 전체 메탄 배출량의 60~100%가 천연가스에서 비롯되며, 연평균 메탄 배출량은 18.5 gm^{-2} 으로 추정되었다. 실제 누출되고 있는 메탄은 공급량의 약 2.7%로, 공식 보고된 1.1%보다 2~3배 높아 기존 보고값이 과소 추정되었음을 보여준다. 이러한 사례는 공급 및 최종 사용 단계 시설의 주기적 모니터링 필요성을 강조한다.

또한, MMRV의 고도화와 더불어 LDAR 프로그램의 확장 가능성을 보여주는 사례로 영국 첼튼엄 인근에서 발생한 대규모 메탄 누출 탐지 및 수리 사례가 있다(Dowd et al., 2024). 고해상도 온실가스 감시 위성을 통해 저압 가스관에서 발생한 비교적 작은 규모의 누출 지점을 특정하고, 지상 모바일 관측으로 이를 확인한 후 배관 수리를 완료하였다. 이후 약 11주간 위성을 통한 모니터링에서 추가 누출이 발생하지 않음이 확인되어, 위성-지상 연계 모니터링 체계의 효과성을 입증하였다.

1.5 국제 동향, 메탄 인위적 배출 저감을 위한 규제 및 조치

메탄 감축의 기후·경제·환경 공편익에 근거하여, 미국과 유럽연합(EU)은 메탄 감축 목표 설정과 더불어, 고배출원 중심의 인벤토리 방법론을 개발하고 위성 및 현장 측정과 같은 첨단 기술을 활용하여 감시·보고 체계를 강화하고 있다. 현재 미국과 EU 및 주요 국가가 참여하는 국제 메탄 측정·감시·보고·검증(MMRV) 협의체가 활동 중이며 메탄 측정 보고에 방식에 대한 국제적인 가이드라인을 작성 중 이다. 미

국에서는 EPA 주도로 메탄의 인벤토리 고도화를 진행 중이며, 메탄 발생에 대해 메탄요금을 부과하기로 했다. 유엔환경계획(UNEP)과 국제메탄배출관측소(International Methane Emissions Observatory, IMEO)에서는 메탄 탐지 위성을 발사하여 메탄 배출량 인벤토리 정확도 향상을 위해 노력 중이다.

미국의 EPA는 미국 기후 목표(2030년까지 2005년 대비 온실가스 50~52% 감축) 달성을 위해 2021년부터 메탄 규제를 크게 강화하였고, 2023년 말 최종 확정된 메탄 배출 규정(Methane Rule)은 신규·기존 석유·가스 시설 모두에 대해 엄격한 LDAR, 장비 표준 개선, 불필요한 메탄 방출 금지 등을 포함한다. 모니터링 빈도 및 방법을 강화하고, 원격 감지 기술과 메탄 배출량이 시간당 100 kg 이상인 주요 배출원에 대해서는 제3자 감시 권한을 도입했다. 미국은 또한 석유 및 가스 산업에게 과도한 메탄의 배출량에는 인플레이션 감축법(IRA)에 따라 메탄세를 징수할 예정이다. 이에 메탄 배출에 대한 규제 강화나 탄소세 부과 시, LDAR을 통한 선제적 감축이 벌금 회피 및 규제 준수 비용 절감 효과를 가져올 수 있다.

또한, 최근 미국 교통부 산하 파이프라인 및 위험물 안전청(Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration, PHMSA)은 천연가스 배송관의 LDAR 기준을 강화하는 최종 규정(Final Rule)을 2025년 1월 17일에 발표했다. 이 규정은 파이프라인 운영자에게 첨단 누출탐지 기술 도입과 체계적인 수리 프로그램 구축을 의무화한다. 미국 내 약 450만 km의 천연가스 파이프라인, 398개 지하 저장시설(UNGSF), 173개 액화천연가스(LNG) 시설에 적용되며, PHMSA는 이 규정을 통해 연간 최대 50만 톤(t)의 메탄 배출 감축과 15억 달러(약 2조 원) 규모의 순편익(net benefit)이 발생할 것으로 추정하고 있다. 핵심 내용은 다음 네 가지로 요약된다. 1) 첨단 기술 의무화: 항공/차량 탐지, 휴대형 감지기, 연속 모니터링 등 상용 첨단 기술(Advanced Leak Detection Technology)을 의무적으로 사용하여 누출 탐지 빈도와 정밀도를 강화했다. 2) 보고 최소 기준 하향: 보고 최소 기준(threshold)을 낮춰 소규모 누출을 조기에 감지하고, 장비 결함 등에서 의의도적 배출을 최소화하도록 하였다. 3) 의도적 배출 저감: 유지·보수(venting 및 blowdown) 시 발생하는 메탄 배출을 줄이기 위해 가스 포집 및 재활용 장비의 활용을 권장하였다. 4) 수리 기한 명확화: 공공 안전 및 환경 위해성의 정도에 따라 누출 수리 기한(timeframe)을 명확하게 규정하였다. 이 포괄적인 규정은 강력한 온실가스인 메탄의 배출을 천연가스 인프라 전반에서 대폭 줄이는 것을 목표로 한다.

EU에서도 메탄법을 제정하고 EU 사업장 내에서 메탄 인벤토리 고도화와 LDAR 프로그램의 의무화를 진

행 중이며, 수입 메탄에 대해 메탄 배출량 목표치를 설정하고 2030년부터 메탄 배출량을 초과하는 LNG에는 벌금을 부과하기로 했다. 규정은 메탄 누출의 정기적 탐지와 수리(LDAR), 배출 모니터링 및 보고(MRV) 체계 도입, 불필요한 가스 연소와 방출 금지 등을 의무화한다. 유럽 기업들의 경우, 정기적인 실측 데이터 제출과 인벤토리 보고를 통해 MMRV(측정·모니터링·보고·검증) 체계를 정교하게 운영하고 있으며, 이는 국제에너지기구(IEA)의 추정치와의 차이가 비교적 작게 나타나는 요인으로 작용하여 메탄세와 같은 문제에 효과적으로 대응을 위한 준비를 진행 중이다. 이는 EU 차원에서 최초로 메탄 감축을 직접 규제하는 법제화로, 향후 국제적인 메탄 감축 규범 형성에 도 중요한 전환점이 될 것으로 평가된다.

1.6 국내의 메탄 비산(탈루) 배출량 현황

한국은 2024년 기준 세계 3위 규모의 LNG 수입국으로, LNG 총 수입량은 약 4,720만 톤(t)에 달한다. 이에 따라 LNG 공급 및 사용 과정에서 발생할 수 있는 비의도적 메탄 누출에 대한 우려가 크다. 따라서 MMRV 고도화를 통한 인벤토리 정확도의 향상은 배출원별 맞춤형 감축 방안 도출에 필수적이다. 그러나 현재까지 국내에서는 이를 뒷받침할 구체적인 규정과 정책이 부재한 상황이다. 본 연구에서는 국내 LNG 발전시설 세 곳에서 장기간 수행한 모바일 관측 결과를 기반으로 LDAR의 효과에 대한 예비 분석을 실시하였고, 이를 기반으로 메탄 감축에 의한 기후, 경제 및 환경 공편익에 관한 논의를 하고자 한다.

2. LDAR의 직접적인 기후 편익: 온실가스 감축의 핵심

LNG를 주요 에너지원으로 사용하는 발전시설을 잠재적 배출원으로 특정하고, 서울과 인천지역의 LNG 발전소들을 대상으로 2023년 5월부터 2024년 5월까지, 1년간 주기적인 모바일 관측을 수행하였다. 모바일 관측 차량은 온실가스 배출의 영향을 최소화하기 위해 전기차를 사용하였고, 차량 상단(2.1 m 높이)에는 인렛을 설치하여 대기 샘플링을 진행하였다. 이를 LI-7810 (LI-COR)와 GLA131-MEA (Los Gatos Research)를 이용하여 CH₄, C₂H₆, H₂O 농도를 정밀도로 측정하였다. 두 장비는 미국 해양대기청(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA) 기준의 표준 가스를 이용해 교정되었고, 온실가스 탐지 장비와 바람의 방향과 속도 측정 및 GPS(모델명: AK-770)를 탑재한 모바일 랩을 통해(Fig. 1), 위치정보(위도, 경도, 고도 및 이동 속도)와 1초 간격으로 측정된 값을 기준으로 발전소별 메탄 누출량을 산정하였다(Joo et



Fig. 1. Vehicle-mounted mobile GHG platform: analyzer rack with LI-7810/LI-7815 fast-response analyzers ($\text{CH}_4/\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$) and calibration cylinders; portable anemometer mast for on-site meteorology; ABB LGR GLA131-MEA analyzer for $\text{CH}_4/\text{C}_2\text{H}_6$ source attribution; high-precision GPS/GNSS receiver for position/time synchronization; and a field laptop/logger with power unit for data acquisition.

Table 1. Measured and reported methane emission rates at three LNG power plants in Seoul and Incheon, South Korea.

LNG Power Plant	Observed value ($\text{tCH}_4 \text{ h}^{-1}$)	Reported value ($\text{tCH}_4 \text{ h}^{-1}$)
Seoul	2.053 ± 0.28	0.347
Incheon A	3.227 ± 0.44	0.248
Incheon B	0.296 ± 0.04	0.079

al., 2024).

관측 결과, 발전소별 평균 메탄 누출량은 시간당 0.3 t에서 최대 3.2 t으로 나타나, 기존 보고값($0.08 \text{ t h}^{-1} - 0.35 \text{ t h}^{-1}$)의 3.7~13배 수준으로 크게 높았다 (Table 1). 국내에서 공식적으로 보고되는 누출되는 메탄의 양은 발전소에 투입된 연료량과 배출계수를 기반으로 산정되는데, 동일 시간대의 실제 관측값과 비교한 결과, 보고값이 실제 누출량에 비해 과소평가하는 경향이 확인되었다.

서울 LNG 발전소는 기준으로 온실가스 배출량과 LDAR 프로그램의 적용 전후 비교를 통한 에너지 절감 및 온실가스 감축 효과를 산정하였다 (Table 2). 관측 시간대 발전량은 시간당 80 t으로, 시간당 LNG 연료 투입량 대비 누출되는 메탄의 양을 누출률로 산정하였다. 관측기반 기준 메탄의 누출률은 2.57%로 산정되며, 이는 보고치인 0.43%의 약 5.9배에 해당한다. LNG 투입량 80 t 기준, 시간당 누출되는 메탄은 2,053 kg CH_4 으로, 이는 CO_2 환산 시 약 5.75 t CO_2eq 에 해

당한다. 연소 과정에서 배출되는 온실가스는 이산화탄소 221.9 kg CO_2 과 불완전 연소로 발생한 메탄 1.6 kg CH_4 을 포함하여 총 267.3 kg CO_2eq 으로 추정된다.

LDAR 프로그램 적용으로 메탄의 누출이 없다는 가정하에, 발전시설의 시간당 약 LNG 2.07 톤(t)의 절감이 예상되며, 이로 인해 연소 과정 온실가스 배출량은 267.3 kg CO_2eq 에서 6.9 kg CO_2eq 로 감소하여, LDAR 실행 전 대비 연소과정의 온실가스의 약 2.6%가 감축될 수 있다. 연간 기준으로 적용시, 발전시설의 부하율을 30~80%로 가정 시, 약 1만~1.8만 톤(t)의 에너지 절감과 온실가스 796.8~1,593.6 kg CO_2eq 의 감축이 가능하다.

국가 전체 LNG 발전 부문으로 확장 적용시, 2024년의 총 LNG 수입량 4720만 톤(47.2 Mt LNG)을 기준으로, 약 51%인 2410만 톤(24.1 Mt LNG)이 발전량으로 사용되며, 위와 같이 관리가 잘되고 있는 발전시설과 같은 정도의 누출률을 동일하게 확장 적용할 경우, 누출 지점 수리를 통한 에너지 절감 효과는

Table 2. Projected CO₂ and CH₄ emissions reductions and associated economic benefits under a successful LDAR program.

Feed rate: 80 t LNG per hour (treated as CH ₄ by mass); Leak rate = 2.566% (mass basis)	
CO ₂ emissions from combustion	221.9 kgCO ₂ h ⁻¹
CH ₄ emissions from combustion	1.6 kgCH ₄ h ⁻¹
Fugitive CH ₄ emissions	2053 kgCH ₄ h ⁻¹
Total GHG emission	5.78 tCO ₂ eq h ⁻¹
Expected benefits of LDAR implementation	
Total GHG emission	260.4 kgCO ₂ h ⁻¹
Energy (LNG) savings	2.07 t
Total GHG reductions (combustion + fugitive)	57.49 tCO ₂ eq h ⁻¹
Combustion-process GHG reductions	6.93 (5.753 + 1.176) kgCO ₂ h ⁻¹
Leak (fugitive) reductions	57.48 tCO ₂ eq
Baseline annual LNG consumption for power generation [24.1 million tonnes (t)]	
CO ₂ emissions from combustion	66,856.87 tCO ₂
CH ₄ emissions from combustion	13667.40 (488.12 tCH ₄)
Fugitive CH ₄ emissions	17.317 MtCO ₂ eq yr ⁻¹ (618466.3 tCH ₄)
Total GHG emissions	17.397 MtCO ₂ eq yr ⁻¹
Energy (LNG) savings	618,466.3 tCH ₄ yr ⁻¹
Combustion-process GHG reductions	2,069.99 tCO ₂ eq yr ⁻¹

약 62만 톤(t)에 달하며, 이는 비의도적 메탄 탈루의 방지를 통해 약 17.317 Mt CO₂eq의 온실가스 감축에 기여한다. 또한 감축된 에너지로, 연료연소 과정에서 약 2069.99 t CO₂eq 감축이 예상된다. LDAR를 통한 총 감축량은 국내의 발전부문 연료연소로 인한 CO₂ 배출량 기준(2022년 기준 236 Mt CO₂) 시 약 7.3%의 해당하는 상당한 양의 감축에 기여가 예상된다.

3. 논 의

3.1 LDAR의 경제적 편익: 비용 절감 및 자원 효율성

국내의 LNG 발전소 세 곳의 사전 조사 결과와 유사한 수준으로 메탄의 누출이 발생한다는 가정하에, 국가 전체 LNG 발전 부문의 LDAR를 통한 메탄 탈루 방지를 통해 에너지 절감량은 연간 약 62만 톤(t)으로 산정되었다. 이와 같은 에너지 절감 효과를 경제적 효과로 산정 시, LNG의 수입단가[1 톤(t)당 USD 619, 1 USD = 1,381원 적용]를 기준으로, 약 5,300억 원에 달하는 직접적 경제 손실의 방지가 가능하다. 나아가 Sherwin et al. (2024)의 연구에서 제시된 바와 같이, 메탄 누출로 인한 사회적 비용은 직접적 경제 손실의 약 9.3배에 준하여, 한국은 LDAR의 성공적 실시로 약 5조 원 규모의 막대한 사회적 가치 비용 절감 효과를 얻을 수 있는 것으로 추정된다.

3.2 LDAR의 간접적 대기질 개선 편익: 인류 건강 보호

LDAR 프로그램을 통해 메탄 누출을 실시간으로 감지하고 신속한 수리를 통하여, 대기 중 메탄 농도를

효과적으로 감소시킬 수 있다. 메탄 자체는 화학적으로 안정하고 반응이 낮아 인체에 직접적인 건강 피해는 보고 되고 있지 않지만, 메탄은 오존(O₃)을 형성을 촉진하는 전구물질로, 대류권의 오존 농도 및 휘발성 유기화합물(Volatile Organic Compounds, VOCs)를 증가시킬 수 있다(McDuffie et al., 2016). 오존은 강력한 대기오염물질로 다양한 호흡기 질환 및 조기 사망 등 인체의 건강에 큰 영향을 준다. 최근 국내의 대류권의 오존이 증가하고 있는데(Lee et al., 2022), 대기 중 메탄 농도 감소는 지표면 오존 농도 감소로 이어져 대기질 개선에 기여 가능하다. 이는 호흡기 질환 및 조기 사망률 감소 등 인류 건강 보호에 긍정적인 영향을 미치며, 이러한 간접적 공중보건 편익은 여러 연구에서 실증적으로 확인되고 있다(Fiore et al., 2002; West et al., 2006 등).

4. 결론 및 토의

한국은 2024년 기준 세계 3위의 천연가스 수입국으로, 도시 및 산업 부문의 주요 에너지원인 천연가스의 공급부터 사용까지 전 과정에서 비의도적 메탄 누출이 발생하고 있다. 본 연구에서는 고해상도 메탄 위성 관측과 고성능 지상 이동식 측정 장비를 활용한 결과, 국내 천연가스 발전 시설의 실측 배출량이 공식 인벤토리 보고값을 상당량 상회함이 확인되었으며, 이는 국외 연구 사례와 유사한 결과이다. 본 연구는 국내 천연가스 발전 시설에 대한 최초의 실측 기반 배출량 보고 사례라는 점에서 의의가 크다.

최근 항공 및 위성 메탄 감시 기술의 발전으로 국

제사회의 모니터링이 강화되고 있으나, 메탄 배출량 관리 및 MMRV 시스템은 주로 생산 단계(Upstream)에 집중되어 있다. 따라서 한국은 산업시설을 포함한 도시지역의 가스 배급망과 사용단(Downstream)에 대한 정기적 현장 관측을 통해 미보고 된 잠재적 누출원을 관리해야 한다. 또한, 활동자료와 배출계수 등의 지속적인 갱신을 통해 MMRV의 정교화를 이루어 인벤토리의 정확도를 개선할 수 있으며, 이를 위해 장기적이고 주기적인 모니터링을 기반으로 한 LDAR 프로그램이 필수적이다(Englander et al., 2018).

MMRV 강화와 더불어 LDAR의 확장은 메탄 감축에 있어 생산시설에만 한정되지 않으며, 관련된 모든 시설에 효과적인 방법임이 선행 연구에서 입증되었다(Allen et al., 2013; Kuo et al., 2015; Subramanian et al., 2015; Englander et al., 2018). 국내 발전시설의 메탄 누출량($2.053 \text{ t CH}_4 \text{ h}^{-1}$)을 기반으로 LDAR의 효과를 국내 천연가스 발전 부문의 에너지 사용량에 적용할 경우, 연간 약 62만 톤(t)의 LNG 절감을 통해 약 5,300억 원의 직접적인 연료비 절감과, 사회적 비용을 포함할 시 약 5조 원에 달하는 총 경제적 효과가 기대된다. 누출 방지를 통해 회피되는 메탄 배출량은 약 17 Mt CO_2eq 의 온실가스 감축 효과로 추정되며, 여기에 연료 사용 감축으로 인한 연료 연소 기인 온실가스 약 2,070 t CO_2eq 의 추가 감축까지 고려하면, LDAR를 통한 총 온실가스 감축량은 2022년 국내 발전 부문 연료연소 CO_2 배출량의 약 7%에 해당하는 수준으로, NDC 목표 달성에 크게 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

결론적으로 LDAR 프로그램의 확대는 단순한 환경 규제 준수를 넘어 기후변화 완화, 대기질 개선, 그리고 경제적 이익 창출을 아우르는 다각적인 공동 편익을 제공하는 핵심적인 전략이다. 메탄은 단기 온실효과가 매우 크므로 LDAR를 통한 누출 최소화는 지구 온도 상승 속도를 늦추는 가장 비용 효율적인 방법이며, 누출되던 LNG 포집은 기업의 직접적인 운영 비용 절감과 지속가능성을 높인다. 미국, EU 등 주요국들이 LDAR 의무화를 강력히 추진하는 것 또한 이러한 중요성 때문이다. 최대 LNG 수입국인 한국은 메탄 배출에 대한 직접적 경제적 제재(벌금·부담금) 규제가 부재한 상황에서, 에너지 부문의 탈루성 메탄(누출)에 대한 LDAR 의무화와 MMRV 강화 등 이른바 ‘선한 규제’를 조속히 도입·법제화함으로써 NDC 목표 달성과 기후변화 완화에 보다 적극적이고 선도적인 역할을 수행할 필요가 있다.

감사의 글

본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원

의 관측기반 온실가스 공간정보지도 구축 기술개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다(RS-2023-00232066).

REFERENCES

- Aldy, J. E., P. Bolton, Z. M. Halem, and M. T. Kacperczyk, 2025: Show & Tell: An analysis of corporate climate messaging and its financial impacts. *Financial Analysts J.*, **81**, 82-101, doi:10.1080/0015198X.2024.2444384.
- Allen, D. T., and Coauthors, 2013: Measurements of methane emissions at natural gas production sites in the United States. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, **110**, 17768-17773, doi:10.1073/pnas.1304880110.
- Alvarez, R. A., S. W. Pacala, J. J. Winebrake, W. L. Chamides, and S. P. Hamburg, 2012: Greater focus needed on methane leakage from natural gas infrastructure. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, **109**, 6435-6440, doi:10.1073/pnas.1204097109.
- , and Coauthors, 2018: Assessment of methane emissions from the U.S. oil and gas supply chain. *Science*, **361**, 186-188, doi:10.1126/science.aar7204.
- Brandt, A. R., and Coauthors, 2014: Methane leaks from North American natural gas systems. *Science*, **343**, 733-735, doi:10.1126/science.1247045.
- Dowd, E., and Coauthors, 2024: First validation of high-resolution satellite-derived methane emissions from an active gas leak in the UK. *Atmos. Meas. Tech.*, **17**, 1599-1615, doi:10.5194/amt-17-1599-2024.
- Englander, J. G., A. R. Brandt, S. Conley, D. R. Lyon, and R. B. Jackson, 2018: Aerial interyear comparison and quantification of methane emissions persistence in the Bakken Formation of North Dakota, USA. *Environ. Sci. Technol.*, **52**, 8947-8953, doi:10.1021/acs.est.8b01665.
- Fiore, A. M., and Coauthors, 2002: Linking ozone pollution and climate change: The case for background ozone. *Geophys. Res. Lett.*, **29**, 1780, doi:10.1029/2002GL015601.
- Gurney, K. R., J. Liang, G. Roest, Y. Song, K. Mueller, and T. Lauvaux, 2021: Under-reporting of greenhouse gas emissions in U.S. cities. *Nature Commun.*, **12**, 553, doi:10.1038/s41467-020-20871-0.
- IEA, 2022: Global Methane Tracker 2022. IEA, Paris: International Energy Agency [Available online at <https://www.iea.org/reports/global-methane-tracker-2022>].
- , 2024: *Global Methane Tracker 2024*. IEA, Paris, International Energy Agency [Available online at

- <https://www.iea.org/reports/global-methane-tracker-2024>].
- IPCC, 2021: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change [Available online at <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>].
- Joo, J., S. Jeong, J. Shin, and D. Y. Chang, 2024: Missing methane emissions from urban sewer networks. *Environ. Pollut.*, **342**, 123101, doi:10.1016/j.envpol.2023.123101.
- Kemp, C. E., and A. P. Ravikumar, 2021: New technologies can cost-effectively reduce oil and gas methane emissions, but policies will require careful design to establish mitigation equivalence. *Environ. Res. Lett.*, **16**, 024012, doi:10.1088/1748-9326/abe6ae.
- Kuo, J., T. C. Hicks, B. Drake, and T. F. Chan, 2015: Estimation of methane emission from California natural gas industry. *J. Air Waste Manag. Assoc.*, **65**, 844-855, doi:10.1080/10962247.2015.1025924.
- Lee, T., S. Go, Y. G. Lee, S. S. Park, J. Park, and J.-H. Koo, 2022: Temporal variability of surface air pollutants in megacities of South Korea. *Front. Environ. Sci.*, **10**, 915531, doi:10.3389/fenvs.2022.915531.
- McDuffie, E. E., and Coauthors, 2016: Influence of oil and gas emissions on summertime ozone in the Colorado Northern Front Range. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **121**, 8712-8729, doi:10.1002/2016JD02526.
- McKain, K., and Coauthors, 2015: Methane emissions from natural gas infrastructure and use in the urban region of Boston, Massachusetts. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, **112**, 1941-1946, doi:10.1073/pnas.1416261112.
- Miller, S. M., and Coauthors, 2013: Anthropogenic emissions of methane in the United States. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, **110**, 20018-20022, doi:10.1073/pnas.1314392110.
- Rutherford, J. S., E. D. Sherwin, A. P. Ravikumar, G. A. Heath, and A. R. Brandt, 2021: Closing the methane gap in U.S. oil and natural gas production emissions inventories. *Environ. Sci. Technol.*, **55**, 3071-3081, doi:10.1021/acs.est.1c00173.
- Sherwin, E. D., S. H. El Abbadi, P. M. Burdeau, Z. Zhang, Z. Chen, J. S. Rutherford, Y. Chen, A. R. Brandt, 2024: Single-blind test of nine methane-sensing satellite systems from three continents. *Atmos. Meas. Tech.*, **17**, 765-782, doi:10.5194/amt-17-765-2024.
- Subramanian, R., and Coauthors, 2015: Methane emissions from natural gas compressor stations in the transmission and storage sector: Measurements and comparisons with the EPA Greenhouse Gas Reporting Program protocol. *Environ. Sci. Technol.*, **49**, 3252-3261, doi:10.1021/es5060258.
- West, J. J., A. M. Fiore, L. W. Horowitz, and D. L. Mauzerall, 2006: Global health benefits of mitigating ozone pollution with methane emission controls. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, **103**, 3988-3993, doi:10.1073/pnas.0600201103.