



총 설

기후변화 감시를 위한 국내 온실가스 연구 성과 및 미래 Achievements and Future Prospects of Greenhouse Gas Research for Climate Change Monitoring in Korea

주상원*, 이선란, 이수정, 오영석, 신대근, 정석한, 서원익,
Samuel Takele Kenea, 김수민

국립기상과학원 지구대기감시연구과

Sangwon Joo*, Sunran Lee, Soojeong Lee, YoungSuk Oh, Daegun Shin,
Seokhan Jeong, Wonick Seo, Samuel Takele Kenea, Sumin Kim

Global Atmospheric Watch and Research Division, National Institute of Meteorological Sciences,
Seogwipo, Republic of Korea

접수일 2025년 3월 10일
수정일 2025년 4월 9일
채택일 2025년 4월 10일

Received 10 March 2025
Revised 9 April 2025
Accepted 10 April 2025

*Corresponding author
Tel : +82-(0)64-780-6641
E-mail : swjoo@korea.kr

Abstract This review synthesizes the progress and achievements in developing Korea's domestic greenhouse gas (GHG) concentration observation network, its data processing methods, and their applications. Since the establishment of monitoring stations in Tae-ahn Peninsula and Gosan in 1990, Korea has expanded its observation network, now ranking among the world's densest ground-based GHG monitoring systems. Additionally, a three-dimensional monitoring framework incorporating aircraft, ships, and ground-based remote sensing has been implemented. Key findings indicate that background carbon dioxide concentrations over Korea are generally higher than the global average, with comparable annual increase rates but occasional discrepancies due to regional factors such as temperature and soil moisture. Methane concentrations in Korea are influenced by local and long-range emissions, as well as hydroxyl radical-induced decay, with substantial regional variability driven by agricultural and fossil fuel-related activities. Nitrous oxide levels slightly exceed the global average and exhibit notable seasonal variations. While chlorofluorocarbon (CFC) concentrations are declining worldwide, intermittent spikes in CFC-11 have been detected in Korea, prompting investigations into unexpected emissions. To analyze GHG concentration changes in Korea, tracer gas ratios and inverse modeling have been employed, enabling source attribution across diverse emission sectors, including agriculture, ocean, and fossil fuel combustion. Korea also plays an active role in global GHG monitoring by contributing to international observation networks and collaborative measurement campaigns. To further enhance the effectiveness of GHG monitoring in Korea, several key challenges must be addressed. First, ensuring standardized measurement protocols across monitoring sites is essential for maintaining data reliability. Second, future observation sites should be strategically selected to minimize local biases and improve representativeness. Third, enhancing trace gas and meteorological observations will be crucial for accurately identifying GHG sources and their contributions. Finally, strengthening collaboration between inventory and inversion modeling groups will improve the accuracy of national emission assessments.

Key words: Greenhouse gases, Atmospheric mole fraction, Monitoring, Observation, Source tracking, Climate change

1. 서 론

근대 산업화 이후 인류가 배출한 온실가스는 최근의 지구 온난화를 유발한 주요 원인으로 밝혀졌다 (IPCC, 2023). IPCC 6차 평가보고서는 최근 10년 평

균 (2011~2020) 전 지구 온도가 산업화 이전 (1850~1900) 대비 1.09°C [0.95°C~1.20°C] 상승했으며, 탄소 배출량이 매우 적은 시나리오에서도 1.5°C에 도달할 가능성이 높다고 밝혔다 (IPCC, 2023). 국립기상과학원이 2018년에 발간한 한반도 100년의 기후변화

보고서에 따르면, 최근 30년 우리나라의 연평균 기온은 20세기 초(1912~1941)보다 1.4°C 상승한 것으로 나타났다. 지구온난화로 유발되는 기후변화는 인류 문명은 물론 지구 생태계에 큰 위협으로 다가왔다. 여름 북극해빙이나 호주 대보초 등은 이미 붕괴가 시작되었으며, 동아시아 대부분 지역은 지구온난화에 따른 극한 기상 현상의 발생 빈도 증가로 인해 많은 피해가 발생하고 있다(IPCC, 2023). 또한 우리나라에서도 더 강한 극한 기후 현상이 발생할 수 있음을 확인하였고(Kim *et al.*, 2023b), 유역별 극한 강수량도 증가하는 것으로 분석되었다(Kim *et al.*, 2023c).

온실가스 증가에 따른 한반도의 기후변화는 우리 사회 전반에 다양한 영향을 미치는 것으로 나타났다. 홍수 관리 측면에서 미래 최대 유입량에 대한 고려가 필요하고(Kim *et al.*, 2018a), 댐의 재평가 및 설계 시 미래 기후변화를 반영하기 위한 적정하고 합리적인 기준 마련이 필요할 것이라고 분석되었다(Kim *et al.*, 2024c). 산림생태계와 관련하여 공간적으로 수종별 분포 적합지의 변화가 클 것으로 연구되었고(Kim *et al.*, 2023a), 우리나라 수산업은 기후변화에 대한 취약성이 매우 높은 것으로 분석되었다(Kim *et al.*, 2024a; Han *et al.*, 2023). 또한 한반도의 기후변화는 스키 관광이나 해양 관광에도 영향을 미치는 것으로 나타났고, 기후변화에 맞는 관광 정책이 필요한 것으로 연구되었다(Kim *et al.*, 2024b; Kim *et al.*, 2023d). 그 외에도 기후변화가 시중은행들과 손해보험회사들의 경영 성과 건전성에 미치는 영향(Kim, 2024), 보건과 건강 관련 분야의 영향(Shin *et al.*, 2023; Oh *et al.*, 2023; Lee *et al.*, 2012), 도시열환경(Kang *et al.*, 2018), 항공기 운영환경(Park *et al.*, 2024)에 어떠한 변화를 주는지 등 다양한 연구가 있었다.

이와 같이 기후변화는 우리 사회의 모든 분야에 지대한 영향을 줄 것으로 예상되고, 많은 자원의 투입과 시간이 요구되므로 시행착오 없는 국가정책과 민간기업의 사업전략 수립이 필요하다. 이를 위해서는 기후변화의 근본적 원인인 대기 중 온실가스의 정교한 감시가 요구된다. 대기 중 온실가스 농도는 산업

화에 의한 기후변화의 정도를 산정하는 과학적 지표로서 매우 중요한 의미를 갖는다. 특히 기후 시나리오 산정에 활용되는 Shared Socioeconomic Pathways (SSP)의 온실가스 농도 변화 경로와 실제 대기의 관측 농도 차이를 지속적으로 비교 분석하고 적절한 조치를 취함으로써 기후변화에 효과적으로 대응할 수 있다. 즉 기후위기는 온실가스 관측을 통해서 관리가 가능하다(Weiss *et al.*, 2021).

1958년 세계 최초로 Keeling 박사 연구팀이 하와이 마우나로아(Mauna Loa; MLO)에서 온실가스 관측을 시작한 이래 전 세계적으로 다양한 네트워크에서 대기 중 온실가스를 관측하고 있다. 우리나라는 1990년대에 대기 중 온실가스 관측을 시작하였다. 이후 정부 연구기관과 학계, 지자체 등을 중심으로 관측소가 확대되면서 매우 조밀한 관측망이 조성되었고, 다양한 온실가스 관측망 확대가 추진되고 있다. 이러한 관측값은 지리적, 기상적, 환경적 요인의 영향을 받게 되므로, 관측 신뢰성과 비교 가능성 확보를 위해 동일한 기준이 적용되어야 한다. 이렇게 관측된 온실가스 농도의 지역별 차이는 대기 수송과정과 육상-대기-해양 간의 교환 작용과 결합하여 온실가스의 배출원 및 흡수원을 추정하는 데 중요한 정보로 이용될 수 있다(Hall *et al.*, 2021). 따라서 온실가스 관측을 효과적으로 활용하기 위해서는 온실가스 관측 방법, 자료처리 과정 및 분석에 대한 이해가 필요하고, 이와 관련한 연구 성과 리뷰는 향후 관련된 정책 방향 설정에 도움을 줄 수 있을 것으로 기대된다.

우리나라의 온실가스 관측망은 지속적으로 확대되고 있으나 아직까지 온실가스 감축을 위한 자료로서는 그 활용도가 낮다. 온실가스 감축은 2006년 제정된 IPCC 가이드라인에 따른 상향식 기반의 배출량 인벤토리를 기반으로 한다. 배출량 인벤토리는 산업과 에너지 부문의 이산화탄소(CO₂) 배출량 산정이 비교적 정확하고, 행정구역별로 구분 가능하다는 장점이 있다(Lee *et al.*, 2008). 그러나 토지와 산림변화, 해양, 식생 등에서의 배출 및 흡수량을 정확하게 산정하기 어렵고, 그 불확도도 높은 실정이다(Feng *et*

al., 2022). 이러한 인벤토리 배출량의 한계를 개선하기 위해 기상모델을 활용하여 관측된 온실가스 농도의 변화로부터 배출/흡수량을 역으로 추적하는 하향식 배출량 산정 혹은 역모델링 방법이 대두되었다(WMO, 2019a). 역모델링 방법에서 대기의 흐름은 포괄적이므로 아무리 작은 배출원도 누락되지 않는다는 장점이 있다. 또한 실시간 관측자료를 이용하므로, 시간 지연 없이 배출량을 업데이트할 수 있고, 모델의 상세한 격자단위로 산출된다. 하향식 배출량은 기존의 인벤토리를 작성하는 상향식 배출량과는 독립된 정보이므로, 두 가지 정보를 상호보완적으로 활용하면 우리가 원하는 배출량 정보를 얻는데 유리하다(WMO, 2019a). 국내 온실가스 관측망이 지속적으로 증가할 것으로 예상되는 상황에서 온실가스 관측을 직접적으로 기후변화 감시에 활용할 수 있는 역모델링 연구 성과를 정리하고 국가적 활용방안을 모색해 보는 것은 매우 의미있는 작업일 것이다.

온실가스의 발생 기원 추적은 역모델링 방법 외에도 추적자 비율이 많이 활용되고 있다. 추적자 비율은 온실가스와 함께 배출되는 미량기체의 상대적 비율을 이용하여 온실가스의 증가 원인이 화석연료에 의한 것인지 자연적 발생/흡수원의 변화 때문인지 등을 구별할 수 있다. 예를 들어 전 지구 메탄(CH_4) 농도의 증가세가 2000년대에 들어서면서 둔화되었다가, 2000년대 중반부터 다시 가속화되는 경향을 보였다. CH_4 에 포함된 탄소안정동위원소 비율($\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4$) 분석을 통해 이러한 증가세의 주요한 원인 중 하나로 미생물의 호흡에 의한 영향을 제시할 수 있었다(WMO, 2019b). 화석연료와 자연적 발생을 구분하기 위하여 안정동위원소비, 화석연료별 발생원 구분을 위해 아산화질소(N_2O) 비, 화석연료의 연소특성에 따른 발생원 구분을 위해 일산화탄소(CO) 비 등 다양한 추적자 비율이 활용되고 있다(WMO, 2022). 우리나라는 공장과 농축산, 주거 지역 등이 근거리에 복잡하게 섞여 있기 때문에 추적자 비율을 이용하여 발생원별 기여도를 분석하는 것은 온실가스 농도 증가의 원인 분석에 매우 중요할 것이다. 따라서 추적

자 비율 관련 연구 성과를 정리함으로써 국내 관측망 구축 시, 미량기체 관측에 대한 의사결정에 도움을 주고자 한다.

본 논문은 산업화 이후 기후변화의 주요 원인인 대기 중 온실가스의 관측 방법과 이러한 관측자료를 활용한 국내 연구 성과를 정리했다. 이를 통해 온실가스 관측 연구가 미래의 기후변화 대응에 좀 더 효과적으로 활용될 수 있는 방안을 모색하는 계기를 마련했다. 2장에는 다양한 기기를 활용한 온실가스 관측 방법과 국내 관측망을 소개하고, 온실가스 농도의 정확도 확보를 위한 품질검사와 배경농도 산정 관련 연구를 3장에 포함했다. 4장에는 우리나라의 주요 온실가스 농도의 변화 특성과 장기 경향성 관련 연구 결과를 소개하고, 온실가스 증가의 원인을 파악하기 위한 역모델링 방법과 추적자 비율 연구를 5장에 정리했다. 6장에는 국내의 온실가스 관측 및 감시의 연구 성과가 국제적인 온실가스 및 기후변화 연구와 어떻게 연계되고 있는지 알아보았다. 마지막으로 7장에는 지금까지의 국내 온실가스 연구 성과를 정리하고 향후 국내 온실가스 관측의 지속적 발전과 효과적인 기후변화 대응을 위한 제언을 담았다.

2. 국내 온실가스 관측망 및 관측방법

2.1 현장관측

2.1.1 플라스크 관측

플라스크 관측은 정해진 위치에서 대기 시료를 대기압 수준으로 채취하여 실험실의 관측장비로 분석하여 온실가스 자료를 수집하는 방식이다. 미국해양대기청(National Oceanic and Atmospheric Administration; NOAA)은 1990년부터 한국 서해안지역의 태안 파도리(Tae-Ahn Peninsula; 이하 태안), 2013년부터 안면도(Anmyeondo; 이하 안면도)에서 최소 일주일 1회 플라스크 샘플링 자료를 수집하여 분석하고 품질관리된 CO_2 , CH_4 , CO , H_2 자료를 공표하고 있다

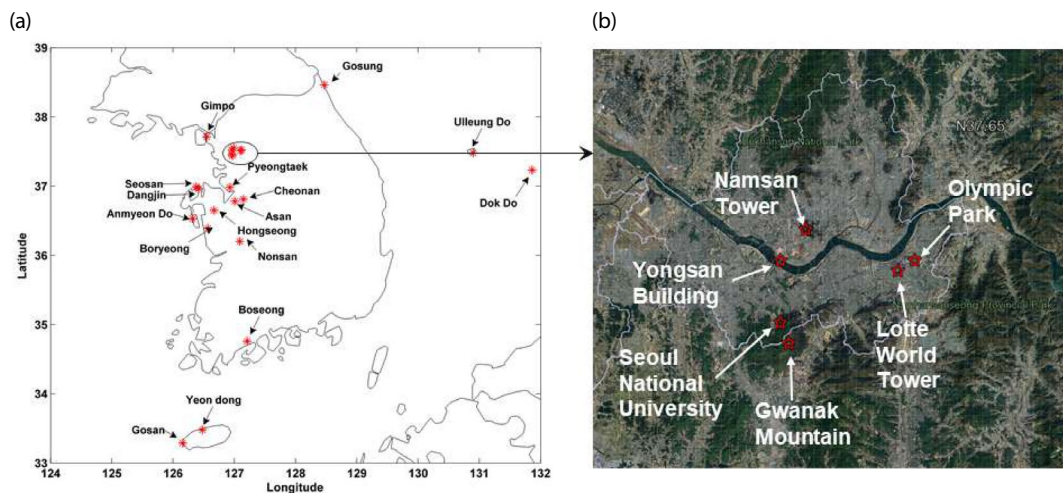


Fig. 1. The in-situ greenhouse gases monitoring sites currently reported in (a) South Korea and the sites located in (b) Seoul, marked with red stars.

(<https://gml.noaa.gov/ccgg/flask.html>, <https://gml.noaa.gov/hats/flask/flasks.html>, last access Feb. 15, 2025; Pétron *et al.*, 2024; Dlugokencky *et al.*, 2009, 1994; Conway, 1994). 1990년 8월부터 기상청 국립기상과학원은 한국의 남단 제주도 고산(Gosan, 이하 고산)에서 플라스크로 샘플링하고 CO₂를 분석 및 수집하기 시작하였다(Cho *et al.*, 1995). 플라스크는 1회 채취시 2개씩 동시에 수행하여 자료의 신뢰도 검증을 한다. 시간 해상도가 연속자료에 비해 낮지만 NOAA의 경우 한국의 태안과 안면도를 포함한 50여 개의 플라스크 사이트 자료 수집을 수 십년간 지원하고 있으며 위도별 모든 자료들을 통합하여 전 지구 온실가스 배경농도의 장기 변동성 추세를 산출하고 있다(<https://gml.noaa.gov/ccgg/flask.html>; Dlugokencky *et al.*, 2009, 1994; Conway, 1994).

2.1.2. 연속관측 및 관측망

대기 중 온실가스 연속관측 기술의 발전에 따라 국내에서도 지상 연속관측이 활발하게 시작되었다. CO₂는 분광학방법인 비분산적외선(Non-Dispersive Infrared; NDIR) 방법, CH₄, N₂O, 할로젠 화합물은 크로마토그램(Gas Chromatography; GC)과 다양한 검

출기(전자포획검출기, Electron Capture Detector; ECD, 불꽃이온화검출기, Flame Ionization Detector; FID, 질량분석기, Mass Spectroscopy; MS 등)를 기반으로 연속관측이 시작되었다. 우리나라는 안면도에서 1999년 NDIR 방법으로 연속관측을 개시하였다. 이후 NDIR 방법의 비선형성 및 수분파장과 중폭 등 단점을 극복하고자 고분해능의 레이저 분광학방법이 개발되기 시작하였다. 대표적으로 현재 CO₂, CH₄, N₂O 관측에 많이 사용되는 레이저 기반의 장비는 Picarro 공동감쇠분광기(Cavity Ring-Down Spectroscopy; CRDS), Los Gatos Research (LGR)의 공진 출력분광기(Off-Axis Integrated Cavity Output Spectroscopy; OA-ICOS), LI-COR의 미량가스분석기(Trace Gas Analyzer)가 있다. 다만 할로젠 화합물(4.4 절 참고)은 대기 중에 미량(part per trillion; ppt, 1조분의 1)으로 존재하기에 검출한계를 극복하고자 저온농축기를 부착한 GC와 검출기로 연속관측을 수행하고 있다(Miller *et al.*, 2008).

연속관측기술의 발전과 더불어 국내에서도 다양한 지상 연속관측망들이 형성되고 있다. 그림 1과 표 1에 현재 국내에서 운영되고 있는 온실가스 농도 지상 연속관측망과 각 지점별 관측항목 등을 표기하였다

Table 1. The list of in-situ greenhouse gases monitoring sites in South Korea by operation institution, location, observation elements and affiliated standard.

Site name	Operating institution	Location	Observation elements	Affiliated standard	Remarks
Anmyeondo	NIMS/KMA	36.53°N, 126.32°E	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O, SF ₆ , CFC-11, CFC-12, CFC-113, XCO ₂ , XCH ₄ , XN ₂ O	WMO/GAW Standard	WMO/GAW Regional station/ TCCON Site
Gosan	NIMS/KMA	33.29°N, 126.16°E	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O, SF ₆	WMO/GAW Standard	WMO/GAW Regional station
	KNU		Halogenated Compounds	SIO Standard	AGAGE site
Ulleungdo	NIMS/KMA	37.48°N, 130.90°E	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O, SF ₆	WMO/GAW Standard	WMO/GAW Regional station
Dokdo	NIMS/KMA	37.23°N, 131.86°E	CO ₂ , CH ₄	WMO/GAW Standard	
Lotte World Tower	NIMS/KMA	37.51°N, 127.10°E	CO ₂ , CH ₄	WMO/GAW Standard	
Boseong Tall Tower	NIMS/KMA	34.76°N, 127.21°E	CO ₂ , CH ₄	WMO/GAW Standard	
Gosung	NIER	38.46°N, 128.47°E	CO ₂ , CH ₄ , CFC-11, CFC-12, CFC-113	WMO/GAW Standard	
Gwanak Mountain	SIHE	37.44°N, 126.97°E		KRISS National Standard	
Namsan Tower	SIHE (low inlet) SNU (high inlet)	37.55°N, 126.99°E	CO ₂ , CH ₄ , CO, CO ₂	KRISS National Standard	
Olympic Park	SIHE	37.52°N, 127.12°E	CO ₂ , CH ₄	WMO/GAW Standard	
Yongsan Building	SNU	37.52°N, 126.96°E	CO ₂	KRISS National Standard	
Seoul National University		37.46°N, 126.96°E			
Boryeong	CIHE	36.39°N, 126.57°E	CO ₂ , CH ₄	KRISS National Standard	
Seosan		36.99°N, 126.38°E			
Dangjin		36.96°N, 126.42°E			
Cheonan		36.81°N, 127.15°E			
Asan		36.78°N, 127.01°E			
Nonsan		36.20°N, 127.09°E			
Hongseong		36.65°N, 126.67°E			
Gimpo		37.71°N, 126.55°E			
Pyeongtaek	GIHE	36.98°N, 126.93°E	CO ₂ , CH ₄	KRISS National Standard	
Yeondong	JIHE	33.28°N, 126.20°E	CO ₂ , CH ₄		

National Institute of Meteorological Sciences (NIMS)/Korea Meteorological Administration (KMA); Kyungpook National University(KNU); National Institute of Environmental Research (NIER); Seoul Metropolitan Government Research Institute of Public Health and Environment (SIHE); Seoul National University (SNU); Chungnam Province Institute of Health and Environment (CIHE); Gyeonggi Province Institute of Health and Environment (GIHE); Jeju Institute of Health and Environment (JIHE); World Meteorological Organization/ Global Atmosphere Watch Programme (WMO/GAW); Advanced Global Atmospheric Gases Experiment (AGAGE); Korea Research Institute of Standards and Science (KRISS); Scripps Institution of Oceanography (SIO); XCO₂, XCH₄, XN₂O: Column Averaged CO₂, CH₄, N₂O in the atmosphere; Chlorofluorocarbon (CFC).

(연보/논문의 형식으로 지속적인 자료가 공표되고 있는 관측지점). 초기에는 지역적인 오염의 영향이 적은 지역을 선정함으로써 넓은 지역의 온실가스 특성을 파악하기 위한 노력을 기울였다. 국립기상과학원에서 운영하는 안면도, 고산, 울릉도 지구대기감시소는 WMO (World Meteorological Organization)/GAW (Global Atmospheric Watch)에 지역배경농도 관측소로 등록되어 온실가스 세계자료센터 (World Data Centre for Greenhouse Gases; WDCGG)에 연속 자료를 제공하고 있다. 2014년부터 독도 관측소를 추가하여 연속관측을 수행하고 있고 매년 지구대기감시보고서에 관측자료를 공표하고 있다(NIMS, 2024). 국립환경과학원은 강원도 고성에서 한반도 동부지역 배경농도 관측을 수행하고 있으며 매년 연보를 통해 자료값을 공표한다(NIER, 2024a). 경북대에서 운영하고 있는 고산 관측소는 2003년 2월부터 CO₂ 연속 관측을 시작하였고(An, 2004) 2012년부터 레이저기반의 방법으로 장기적인 CO₂, CH₄ 온실가스와 탄소 안정 동위원소비율도 함께 관측하고 있다(Geum *et al.*, 2024). 또한, Medusa GC-MS로 2007년부터 약 50 가지 할로젠 화합물을 정밀하게 연속적으로 관측하고 있다(Kim *et al.*, 2010; Park *et al.*, 2018; Li *et al.*, 2011).

광범위한 지역을 포함하는 배경관측소 이외 국지적인 온실가스 관측도 활발하게 진행되고 있다. 국립기상과학원은 서울시 롯데월드타워 (Lotte World Tower, 555 m), 보성 타워(Boseong Tall Tower, 300 m)에서 온실가스 관측을 시작하였다(Jeong *et al.*, 2025, in revision). 서울시 보건환경연구원은 서울의 남산타워(Namsan Tower), 올림픽 공원(Olympic Park), 관악산(Gwanak Mountain) 3개 도심지역을 관측하고 있다(SIHE, 2022). 경기도 보건환경연구원은 김포(Gimpo), 평택(Pyeongtaek) 2개소(GIHE, 2024), 제주도 보건환경연구원은 연동(Yeondong)에 1개소를 설치하여 온실가스 연속관측을 수행하고 있다(Lee *et al.*, 2017, 2016). 2024년부터 충남보건환경연구원은 산업, 도시, 농촌별로 7곳(보령(Boryeong), 서산(Seo-

san), 당진(Dangjin), 천안(Cheonan), 아산(Asan), 논산(Nonsan), 홍성(Hongseong)에 온실가스 관측망을 추가 설치하여 운영을 시작하였다(CIHE, 2024). 서울대학교도 현재 서울의 남산타워(SIHE와 같은 지점, 높은 흡입구 사용), 용산구에 위치한 용산빌딩(Yongsan Building), 서울대학교 캠퍼스에 저비용 센서 기반의 Seoul National University CO₂ measurement (SNUCO2M) 관측망을 구축하여 CO₂의 연속관측을 수행하고 있다(Park *et al.*, 2021a, 2021b).

지상 관측뿐 아니라 이동 관측 플랫폼(항공, 선박, 차량 등)을 통한 온실가스 관측도 활발하게 수행되고 있다. 특히, 최근 수 십년간 다양한 항공관측용 장비 개발을 통해 항공 연속관측이 가능해졌다(Li *et al.*, 2019; Machida *et al.*, 2002). 국내에서는 주로 레이저 기반의 분광학 장비들을 사용했다. 2017년 국립기상과학원은 기상항공기(Beechcraft King Air 350HW, 이하 나라호)를 도입하였으며 Picarro CRDS-2401m을 설치하여 평균 1회/월의 정기적인 임무를 통해 대기 상층의 장기간 온실가스 관측자료(CO₂, CH₄)를 수집하고 있다(Li *et al.*, 2022, 2020, 2019). 환경부도 한서대학교 비행기를 임대하여 대기질 분석을 위한 온실가스 관측을 수행하였고 주로 LGR-ICOS를 사용하였다(Crawford *et al.*, 2021). 항공기를 이용한 국내 온실가스 관측 연구는 주로 CO₂와 CH₄에 집중되었고, 기타 할로젠 화합물 온실가스에 대한 연구는 아직 미흡한 실정이다.

선박 온실가스 관측은 유럽, 호주와 일본 등에서 활발하게 수행되고 있으며 국가 온실가스 인벤토리 검증 프로젝트에 장기 선박 관측자료를 활용하고 있다(Bukosa *et al.*, 2019; Helfter *et al.*, 2019; Hoshina *et al.*, 2018). 국내의 경우 표층해수 중 CO₂ 농도의 관측은 90년대부터 활발하게 진행되어 왔지만(Kim *et al.*, 2022; Kim and Yu, 2021) 대기중 온실가스 관측 연구는 미흡하다. 2014년 기상청은 기상1호를 도입하여 해상기상관측을 수행하였고 봄철 서해상(35~38°N, 124°E 구간)에서 대기 오염물질뿐 아니라 온실가스 연속관측을 수행하고 있다(Li *et al.*, 2024). 서해상의

온실가스 분포 분석을 통해 국내 온실가스 변동에 대한 국내외 영향을 지상 관측보다 좀 더 명확하게 구분할 수 있다. 그러나 선박에서의 온실가스 관측자료의 처리는 지상보다 복잡하다. 특히 풍향/풍속에 따른 관측 선박의 배기가스 유입, 피항이나 묘박시의 자료 품질 검증 등에 대한 전체적인 분석이 필요하다 (Li *et al.*, 2024).

국내에서 차량을 이용한 관측은 최근에 활성화되고 있다. 서울대학교에서 2021년부터 차량관측 플랫폼을 구축하여 수도권의 폐기물과 에너지 부분의 주요 온실가스 배출원을 탐지하였고, 당진 등 산단 지역과 서울 등 도심 대기질 관측 캠페인을 수행하였다 (Park, 2023; Sim *et al.*, 2020).

2.2 지상 및 위성 원격관측

원격관측은 전 지구적인 실시간 온실가스 관측을 비용 효율적으로 할 수 있으며, 기후변화 대응 및 배출 감축 정책 수립에 필수적이다 (Bassous *et al.*, 2024). 최근 지상, 위성, 저비용 (Low-Cost; LC) 센서, 인공지능 기반 기술 등이 발전하면서 더욱 정밀하고 신뢰할 수 있는 원격관측이 가능해지고 있다. 또한 원격관측은 표준화된 지역별 맞춤형 감축 전략과 국가 정책에 활용될 수 있는 가능성을 보여주었다 (Choi and Kim, 2017).

원격관측 방법은 크게 지상 기반 푸리에 변환 분광기 (Fourier Transform Spectrometers; FTS)를 사용하여 대기 중 태양광 적외 흡수 스펙트럼을 측정하는 지상 원격관측 (Ground-based remote sensing) 방법과 위성 기반의 태양광 지표 산란·반사 스펙트럼을 측정하는 위성 원격관측 (Satellite-based remote sensing) 방법이 있다. 지상 원격관측은 지면에 도달하는 태양광을 지상에서 관측하고, 위성 원격관측은 지면에서 반사되는 태양광을 대기 상층의 위성에서 관측하므로 두 방법은 광 경로가 다르다. 또한 위성은 탑재하는 기기의 크기 등의 한계에 의해 관측 해상도가 낮다. 이러한 차이에 의해 지상 원격관측자료는 상대적으로 위성에 비하여 높은 해상도와 고정밀 관측이

가능하고, 위성 원격관측자료를 교정하는 데 활용된다 (Laughner *et al.*, 2024; Brault, 1985). 그러나 위성 원격관측은 지구 전역의 온실가스를 측정할 수 있다는 장점이 있어 상호 보완적이다.

두 방법 모두 표면 기압과 대기 수분량에 영향을 받지 않는 온실가스 건조 공기 평균 몰분율 (Column-averaged dry air mole fraction of GHG) 농도를 산출한다. 대표적 분석 요소인 대기 중 CO₂의 건조 공기 평균 몰분율 농도 산출 방법을 식 (1)에 보였다. 대기 중 총 온실가스 기둥 농도 (Total Column CO₂; VC_{CO₂})를 산소의 총 기둥 농도 (Total Column O₂; VC_{O₂})로 나누고, 건조 공기의 산소 몰분율 (Dry air Mole Fraction of O₂; DMF_{O₂})을 곱하면 CO₂의 건조 공기 평균 몰분율 농도인 XCO₂를 산출할 수 있다 (Toon *et al.*, 2016).

$$XCO_2 = \frac{VC_{CO_2}}{VC_{O_2}} \times DMF_{O_2} \quad (1)$$

국내에서 상시 운영되는 지상 원격관측의 위치와 특성을 표 2에 정리하였다. 국내 지상 원격관측 방법은 Total Carbon Column Observing Network (TCCON) 및 Collaborative Carbon Column Observing Network (COCCON) 규정에 따라 수행되며 (Oh *et al.*, 2018; Wunch *et al.*, 2015), TCCON과 COCCON에 대한 자세한 내용은 6.3절을 참고하기 바란다. 최근에는 지상 원격관측자료로부터 온실가스 농도의 연직 분포 (Vertical Profile)를 산출하기 위한 연구가 추진되었다 (Kim *et al.*, 2024d, 2024e). 그 결과 산출된 온실가스 농도 프로파일은 복원과정 (retrieval)에 입력되는 선험값에 매우 민감한 것으로 밝혀졌다. 원격측정 장비의 광 정렬 기술 개발을 통해 FTS 장비의 일관성 및 정밀성 기준을 확보하였으며, TCCON 기준 이상의 정확도 (99%)를 확보하였다 (Oh *et al.*, 2018).

위성 원격관측 관련하여 아직까지 국내 기관이 운영하는 온실가스 위성은 없으며, 현재 한반도 지역의 온실가스 위성 원격관측은 해외 기관에 의존하고 있

Table 2. Ground-based remote sensing networks operating in Korea.

Site name	Equipment	Objective	Monitoring elements	Location
Anmyeondo-TCCON	IFS 125HR (Fixed FTS)	National GHG Monitoring and Satellite Validation	XCO ₂ , XCH ₄ , XCO, N ₂ O, H ₂ O	36.53°N, 126.32°E
Anmyeondo-COCCON	EM27/SUN (Mobile FTS)	Regional GHG Monitoring and TCCON Support	XCO ₂ , XCH ₄ , XCO	36.53°N, 126.32°E
Ehwa-COCCON	EM27/SUN (Mobile FTS)	Regional GHG Monitoring and Satellite Validation	XCO ₂ , XCH ₄ , XCO	37.56°N, 126.95°E
SNU-COCCON	EM27/SUN (Mobile FTS)	Regional GHG Monitoring and Satellite Validation	XCO ₂ , XCH ₄ , XCO	37.46°N, 126.95°E
KRISS-COCCON	EM27/SUN (Mobile FTS)	Regional GHG Monitoring and Satellite Validation	XCO ₂ , XCH ₄ , XCO	36.23°N, 127.37°E

다. 표 3에는 국내에서 주로 활용하고 있는 국외 온실가스 인공위성자료의 특성을 보였다. 온실가스 인공위성자료는 전 지구적으로 온실가스 감축이 기후변화 완화에 얼마나 효과적인지를 평가하는 데 중요한 정보로 사용되고 있다(Kim *et al.*, 2013).

최근 저비용(Low-Cost; LC) 고성능 센서 및 인공지능 분석 기술을 활용한 원격관측 기술이 강화되고 있다(Ihsane *et al.*, 2024). 이를 이용하여 기존 원격관측 기술의 최대 단점인 공간적 제한과 높은 제작·운영·유지보수 비용을 개선할 수 있을 것으로 기대하고 있다(Kim *et al.*, 2021a). Oh *et al.* (2022)은 그래핀 기반 광전 센서로 대기 중 온실가스 건조 공기 평균 물분율 농도를 산출하는 “초소형, 저비용, 고정밀 온실가스 원격 감지기”를 개발하였다(그림 2). 기존의 화학적 또는 분광학적 감지 방법과 차별화된 방식으로 대기 전층에 대한 온실가스 농도 측정이 가능한 저비용·고정밀 관측망을 구축·운영할 수 있을 것으로 기대된다(Oh *et al.*, 2022).

3. 온실가스 자료처리

3.1 품질관리

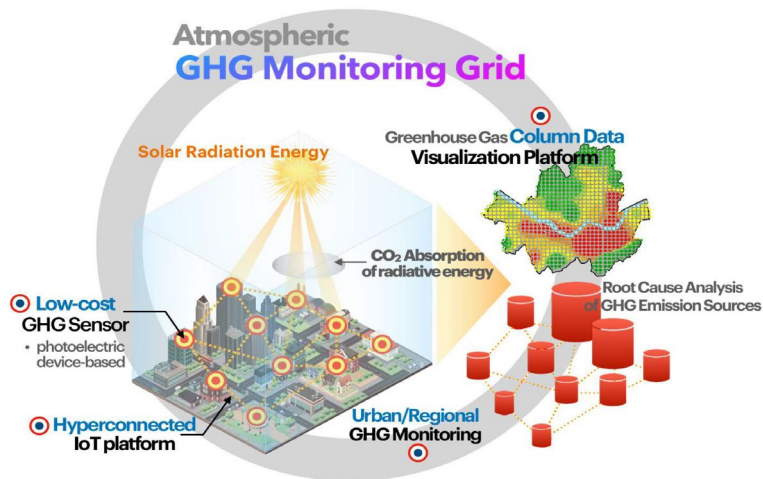
온실가스 관측기관들은 신뢰도 높은 자료를 확보하기 위해 체계적인 품질관리 절차를 도입하고 있으며, 주요 요소로는 관측 표준 설정, 교정 및 소급성 확

보, 수분 제거, 불확도 산정이 포함된다. 온실가스 관측값의 비교 가능성을 확보하기 위해서는 공통의 표준이 필요하며, 이를 관측 표준이라 한다. 온실가스 관측에서는 관측 표준을 전파하기 위해 표준가스를 사용하며, 각 네트워크마다 고유의 관측 표준을 지정하여 활용하고 있다. WMO/GAW 프로그램에서는 NOAA의 지구감시실험실(Global Monitoring Laboratory; GML)을 중앙교정실험실(Central Calibration Laboratory; CCL)로 지정하여, WMO 표준의 유지, 관리 및 보급을 담당하도록 하고 있다(WMO, 2017). 국내에서는 국립기상과학원의 안면도, 고산, 울릉도 지구대기감시소가 WMO/GAW의 지역급 관측소로 등록되어 있으며, 관측하는 모든 온실가스(CO₂, CH₄, N₂O, Sulfur Hexafluoride; SF₆, Chlorofluorocarbons; CFCs)가 WMO 표준을 따른다(표 1). WMO/GAW에서는 측정값 간의 편향을 최소화하고 관측망 내 비교가능성을 유지하기 위해 호환성 목표를 설정하고 있으며, CO₂의 경우 북반구 ±0.1 ppm, 남반구 ±0.05 ppm, CH₄ ±2 ppb, N₂O ±0.1 ppb, SF₆ ±0.02 ppt로 설정되어 있다(WMO, 2020). 경북대학교 고산 사이트의 경우 Advanced Global Atmospheric Gases Experiment (AGAGE) 네트워크에 등록되어 있으며, 네트워크에서 공유하는 Scripps Institution of Oceanography (SIO) 표준척도를 사용하고 있다. NOAA와 SIO의 척도 간 차이는 대체로 1% 미만으로 높은 일

Table 3. Characteristics of satellite-based greenhouse gas observing systems mainly utilized on the Korean Peninsula.

Satellite	Country (Institute)	Resolution (revisit period)	Monitoring species	Characteristic
GOSAT/ GOSAT-2 (Greenhouse gases Observing SATellite)	Japan (JAXA)	10.5 km (Cycle: 3 days)	XCO ₂ , XCH ₄	GHG's Dedicated Satellite, Column Resolution Doubled, TCCON and COCCON Ground Verification
		8 km (Cycle: 3 days)	XCO ₂ , XCH ₄ , XCO	
OCO-2/ OCO-3 (Orbiting Carbon Observatory)	United States (NASA)	1.29 km (Cycle: 16 days)	XCO ₂	Mounted on the ISS, Intensive Observation of Specific Areas, TCCON and COCCON Ground Verification
		Varies by Region		
TanSat (CarbonSat: Carbon Satellite)	China (CNSA)	2 km (Cycle: 16 days)	XCO ₂	Carbon Dioxide Monitoring in China, TCCON Ground Verification
Sentinel-5P (Sentinel-5 Precursor)	Europe (ESA)	7 km (Cycle: 1 days)	XCO ₂ , XCH ₄ , XCO, XNO ₂ , XO ₃	Atmospheric Environment and GHG Monitoring, TCCON and COCCON Ground Verification
Carbon Mapper	United States (NASA)	30 m (Varies by Region)	XCO ₂ , XCH ₄	High-Resolution Emission Source Tracking and Monitoring

Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA), National Aeronautics and Space Administration (NASA), China National Space Administration (CNSA), ESA(European Space Agency (ESA)

**Fig. 2.** 3D Remote Sensing Network for Greenhouse Gas (GHG) using New Sensor Technology.

관성을 나타내고 있으며 (Hall *et al.*, 2014), 최근에는 NOAA의 Halocarbons and Atmospheric Trace Species (HATS) 자료와 AGAGE 연속관측자료의 차이가 0.1% 수준으로 매우 작다 (Prinn *et al.*, 2018). 서울시 보건환경연구원 관측망의 경우, 한국표준과학연구원

(Korea Research Institute of Standards and Science; KRISS)의 표준을 사용하고 있다 (표 1). Lim *et al.* (2017)에 따르면 SF₆의 경우 NOAA와 KRISS의 표준 척도 차이는 0.49%로 나타났고, 다른 관측요소에 대해서도 국제 표준 비교 실험을 통해 전 지구적인 관

측자료의 소급성 확보를 위한 노력을 계속하고 있다 (Flores *et al.*, 2018, 2014). 각기 다른 표준 척도를 기준으로 관측되고 있는 국내 온실가스 자료 간 비교가능성을 확보하기 위한 순차순환비교실험 등의 노력이 지속적으로 이루어지고 있다. 국립기상과학원은 2016년, 2020년, 2024년 3차례에 걸쳐 국내 온실가스 순차순환비교실험을 주관하였고, 비교실험을 통해, 관측 기기에 따른 특성, 관측 요소별 검교정 방법의 개선을 통한 관측자료의 품질 관리개선 방안을 제시하였다(Lee *et al.*, 2021b).

WMO/GAW에서는 온실가스 관측의 정확성과 네트워크 간 비교가능성을 보장하기 위해 일관된 교정 체계를 유지하는 것을 강조하고 있다(WMO, 2020). 온실가스 분석 장비는 장기 운용 시 센서 및 검출기의 성능 변화로 인해 드리프트(Drift) 현상이 발생할 수 있고, 이는 관측자료에 영향을 줄 수 있으므로 정기적인 교정을 통해 이러한 오차를 보정하여야 한다. 국제적으로 추적 가능한 표준가스를 이용하여 교정을 수행하고, 표준가스는 각 관측소의 관측 범위를 포괄하여야 한다. 교정의 빈도는 드리프트 발생 속도를 고려하여 절반 정도의 주기로 수행하는 것이 권장되며, 여러 표준가스를 이용해서 반응 곡선을 검증하고 필요시 보정 함수를 적용한다(WMO, 2020). 관측소에서 관측되는 범위를 포괄하는 단일 표준가스를 활용하여 장·단기적인 안정성과 재현성을 확보하는 것이 권장된다(ICOS RI, 2020; WMO, 2020).

수분이 포함된 공기는 희석효과가 발생하여 호환성 범위를 벗어나는 관측값의 편향을 발생시킬 수 있기 때문에 온실가스 관측에 있어 수분제거는 필수적이다(ICOS RI, 2020; WMO, 2020). 수분제거 방법으로 극저온 냉동기를 활용하는 것이 가장 신뢰성 있는 방법으로 권장되며, 삼투압원리의 맴브레인, 화학제습제(MgClO₄)를 활용한 수분제거 방법 등이 활용되고 있다(ICOS RI, 2020; WMO, 2020; Rella *et al.*, 2013). 국내에서는 관측환경에 따라 극저온 냉동기와 맴브레인, 화학제습제를 활용한 수분제거 방법을 활용하여 관측을 수행하고 있다(Geum *et al.*, 2024; Lee

et al., 2023, 2020a; 2019; Li *et al.*, 2020).

불확도는 측정값이 실제 값과 얼마나 차이가 나타날 수 있는지를 나타내는 척도로 온실가스 관측에서는 표준가스, 교정, 수분, 기기 및 환경적 요인 등 다양한 원인에 의해 발생하며, 이를 정량적으로 평가하고 최소화하기 위해 노력하고 있다(ICOS RI, 2020; WMO, 2020). 결합 불확도는 개별 불확도들의 제곱합의 제곱근으로 계산된다(WMO, 2020). 각 관측네트워크에서는 불확도를 반드시 관측값과 함께 보고할 것을 요구하고 있고, 불확도는 낮추고 관측값의 신뢰도를 높이기 위해 엄격한 검교정과 지속적인 비교실험을 통해 일관성을 유지할 것을 권장하고 있다. Lee *et al.* (2019)는 안면도, 고산, 울릉도 지구대기감시소에서 관측된 CO₂의 관측 불확도를 산정하고, 수분제거 시스템의 개선, 검교정의 개선, 자료 품질 관리, 관측 방법론 개선을 통한 관측 불확도의 개선 결과를 정량화하였고, Lee *et al.* (2021b)은 국제비교실험을 통해 관측 불확도의 주요 원인을 분석하고, 동일 척도 사용 및 검교정 방법 개선을 통한 불확도 개선 효과를 검증하였다.

3. 2. 배경농도산출

온실가스 배경농도는 관측지점 주변의 인위적 및 자연적 배출과 소멸의 국지적 영향을 최소화하고, 균질하게 혼합된 대기 상태에서 측정된 농도를 의미한다(Thoning *et al.*, 1989). 그림 3은 안면도에서 관측된 CO₂의 시간 평균과 배경농도를 보여준다. 배경농도가 올바르게 산정되지 않고 관측지점 주변의 영향이 포함될 경우 지역 규모의 대표성을 확보하기 어려울 뿐 아니라, 장기 변동성에 대한 오해를 초래하여 정책 결정의 객관적 근거 마련에 제약을 가할 수 있다.

온실가스 중 CO₂, CH₄, N₂O의 경우 배경자료 선별 과정과 추가적인 필터링 과정을 거쳐 배경농도를 산출한다. 배경자료 선별 방법은 각 관측소의 지리적, 기상학적 특성을 고려하여 다양하게 개발되었다. 대표적인 선별방법으로 지시자 활용법, 기상자료 활용

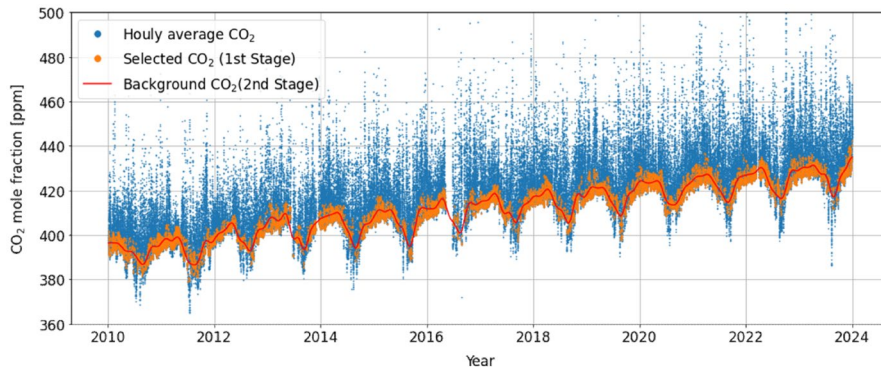


Fig. 3. Hourly averaged CO₂ mole fraction measured at Anmyeondo (blue dots), primarily selected background data (orange dots), and the final background concentration after secondary filtering (red solid line).

법, 통계기법이 있다 (Chambers *et al.*, 2016; Fang *et al.*, 2015; Bacastow *et al.*, 1985; Lowe *et al.*, 1979). 국내에서는 주로 기상자료 활용법과 통계기법을 사용하며 국립기상과학원과 국립환경과학원은 시간 표준 편차와 연속값 차이를 이용하여 배경자료를 선별한다 (NIER, 2024b; NIMS, 2021). 특히 국립기상과학원은 CO₂, CH₄의 경우 장기 지속되는 고농도 사례를 제거하기 위해 30일 이동 중앙값과의 차이를 추가적으로 사용한다 (Lee *et al.*, 2023; Seo *et al.*, 2021). 한편 풍향, 풍속과 같은 기상자료와 통계기법을 함께 사용하여 고산에서 관측한 온실기체 자료를 선별한 연구 결과도 있다 (Ju *et al.*, 2007).

북반구에서는 2~3개월 이내에 대기가 균일하게 혼합된다 (Czeplak and Junge, 1975). 따라서 배경농도를 산출할 때 이러한 대기 혼합 특성을 반영하기 위해 1차적으로 선별된 배경자료에서 2~3개월보다 짧은 시간 규모의 변동성을 제거하는 추가적인 필터링 과정을 거친다. 이를 위해 국립기상과학원과 국립환경과학원은 고속 푸리에 변환 (Fast Fourier Transform; FFT)을 이용한다. 구체적으로는 선별된 자료의 일 평균 시계열 자료를 FFT를 통해 주파수 영역으로 변환한 후 저역통과필터를 사용하여 단주기 성분을 제거한다. 이후 역 FFT를 이용하여 시간 영역으로 되돌려 최종적으로 배경농도를 산출한다 (Thoning *et al.*, 1989).

할로겐 화합물 온실가스의 배경농도는 AGAGE 네트워크에서 활용하고 있는 통계적인 방법을 이용하여 산출한다 (O'Doherty *et al.*, 2001). 이 통계 방법은 배경대기 농도가 정규분포를 이룬다는 가정하에 120 일씩 관측자료의 정규분포에서 3.0σ 이상 벗어나는 값들을 반복적으로 제거하여 배경농도를 산출한다. 현재 할로겐 화합물의 배경농도는 모두 이 방법으로 동일하게 산출하고, 고산뿐 아니라 전 세계적인 온실가스의 일관된 동향을 파악한다 (Prinn *et al.*, 2018).

4. 국내 온실가스 관측결과 및 장기 변동성

4.1 이산화탄소

안면도 (1999~), 고산 (2012~), 울릉도-독도 (2014~), 태안(1990~) 및 강원도 고성(2012~)에서 10년 이상 관측된 장기 자료를 통해 우리나라 CO₂의 장기 변동성을 살펴볼 수 있다 (Lee *et al.*, 2019; Kim *et al.*, 2014a). Lee *et al.* (2019)에 따르면 안면도에서 관측한 CO₂의 계절 변동성은 비슷한 위도에 위치한 다른 관측소 (예, Ryori; RYO, Waliguan; WLG)에 비해 변동폭이 컸지만 연간 증가율은 비슷한 추세를 보였다. 태안에서 1991년부터 2011년까지 관측한 CO₂ 배경농도는 MLO에 비해 큰 값을 보였다 (Kim *et al.*, 2014a). 이러한 차이는 한반도 식생의 변화 혹은 중국 등에서의 장거리 수송의 영향으로 해석된다 (Lee *et al.*

al., 2019; Kim *et al.*, 2014a). 특히, 코로나-19로 인한 2020년 1~3월 락다운 시기, 안면도에서 관측한 CO₂의 증가분이 2018~2019년에 비해 약 43% 감소한 것으로 나타났는데, 중국 동부지역의 인간 활동 감소가 안면도에서 관측한 CO₂ 농도에 영향을 준 것으로 분석되었다(Sim *et al.*, 2022).

CO₂의 배경농도 자료는 한반도 및 동아시아 지역의 탄소순환을 이해하는 중요한 정보이다. 안면도의 최근 10년(2013~2022) CO₂ 평균 증가율은 지난 10년(2003년~2012년) 평균(2.2 ppm/year)에 비해 다소 증가한 2.5 ppm/year로 관측되었지만 연간 변동성이 크게 나타났다(Lee *et al.*, 2024; NIMS, 2024). 안면도 CO₂의 증가율의 연간 변동성을 견인하는 요인 중 하나는 전 지구적인 강한 엘니뇨남방진동(El Nino-Southern Oscillation; ENSO)이다. 강한 엘니뇨 해인 2015/2016년, 라니냐 해인 2021/2022년에 안면도의 CO₂ 증감률은 전 지구적인 CO₂ 증감률과 비슷했다. 다른 요인으로 우리나라 주변의 기온 및 토양수분에 의한 지상 식생의 변동도 크게 영향을 주는 것으로 나타났다(Lee *et al.*, 2024). 한반도에서의 탄소 중립 달성을 위해서 생태관측측면에서 CO₂ 장기관측자료의 면밀한 검토가 지속적으로 수행되어야 한다.

단기적인 변동성과 관련하여, 관악산에서 관측한 CO₂는 행성경계층의 일변화에 의해 아침에 높고 점심에 낮은 전형적인 일 변동성을 나타냈으며(Ghosh *et al.*, 2010), 높은 고도에서 관측하기에 도심 배경농도의 기준으로도 활용되고 있다(Park *et al.*, 2021a). 서울 도심에 위치한 용산빌딩에서 단기 관측한 CO₂ 농도는 코로나19 팬데믹 기간과 일치하게 농도 감소가 뚜렷하게 관측되었다(Park *et al.*, 2021b). 국립기상과학원도 2022년부터 롯데월드타워에서 CO₂의 연속관측을 수행하고 도심 관측자료를 수집하고 있다(Lee *et al.*, 2024). 또한 보성타워에서는 2024년 2~3월에 단기적인 관측을 수행하였고 관측된 CO₂ 농도는 안면도와 유사한 값을 보였다(Jeong *et al.*, 2025).

이동 관측(항공, 선박)은 관측 빈도가 낮지만 한반도 내의 확장된 수평/수직관측이 가능하다. 항공기

연직분포 관측은 조밀한 고도에서의 농도 변화를 관측할 수 있다. Li *et al.* (2022)에 따르면 같은 날 안면도에서 관측한 온실가스 농도가 행성경계층(Planetary Boundary Layer; PBL) 높이 이하와 이상에서 국내 및 국외 배출원 기여가 선명하게 분리되었다. 또한 강한 서풍 제트기류를 따라 대기 상층(4 km~)에서 크게 증가한 CO₂, CH₄가 관측되기도 하였으며, 남아시아 지역의 배출 영향까지 관측할 수 있었다(Li *et al.*, 2019). 한반도 경기도, 충청도, 전라도 지역을 포함하는 행성경계층 고도 이하의 저고도 자료에서는 경기도와 충청도 도심에서 크게 증가한 온실가스 농도가 관측되었으며, 한국의 전라도 지역이 경기도, 충청도 지역보다 좀 더 낮은 농도를 보이면서 강한 CO₂의 흡수 패턴을 보였다(Li *et al.*, 2022). 직접적인 오염원이 없는 서해에서 관측한 CO₂는 중국과 한국의 기원을 뚜렷하게 구분할 수 있는 추적자 비율의 기준을 명확히 하였다(Li *et al.*, 2024).

4.2 메탄

Kim *et al.* (2015)에 의하면 1991년부터 2013년까지 태안에서 수집한 플라스크 CH₄ 농도는 MLO와 큰 차이를 보였으며 이는 상대적으로 태안이 주변지역 및 장거리 배출원의 영향을 많이 받았기 때문인 것으로 분석되었다. 또한 동아시아의 다른 관측소에 비해 상이한 계절 변동성을 보였으며 7~8월에 표준편차가 크게 나타났는데, 이는 OH 라디칼(hydroxyl radical)에 의한 CH₄ 소멸과 중국 동부 비농사 지역에서의 고농도 유입 때문으로 분석되었다. 국립기상과학원에서 운영하는 안면도, 고산, 울릉도에서 관측한 CH₄ 농도는 안면도 > 고산 > 울릉도 순으로 나타났으며 특히 안면도는 동아시아에서 비슷한 위도에 위치한 RYO, WLG 관측소보다 높은 농도를 보였다. 이는 태안과 유사하게 지역 배출뿐 아니라 장거리 수송에 의한 영향으로 추정된다(Lee *et al.*, 2023; Kim *et al.*, 2015). 장기적인 증가추세는 최근 10년(2012년~2022년)이 과거 10년(2003년~2012년)에 비해 급격하게 증가하는 경향을 보이고 있다(NIMS, 2024).

전 지구 평균 CH_4 농도는 1999년부터 2007년까지 증가가 둔화되었다가(1 ppb/year) 2007년부터 다시 꾸준히 증가하여 2023년에는 약 10 ppb/year의 급격한 증가율을 기록하고 있다(NIMS, 2024; WMO, 2019b). 우리나라 안면도와 태안에서 관측한 CH_4 배경농도도 전 지구와 비슷한 추세를 보이고 있다(Lee *et al.*, 2023; Kim *et al.*, 2015). 최근 많은 연구 결과는 2007년부터 꾸준히 증가하는 CH_4 의 원인 중 하나로 동아시아, 아프리카, 북미 지역에서의 활발한 농업활동에 의한 토양 및 장발효 미생물 배출을 들었다(IPCC, 2023; WMO, 2019b). 안면도 CH_4 의 고농도 사례인 2015/16년과 2019년을 분석한 결과, 엘니뇨 혹은 기타 기상-기후 조건에 의해 한반도가 고온, 다습한 경우에 농업활동과 관련한 배출이 CH_4 농도 증가에 큰 영향을 준 것으로 나타났다(Kenea *et al.*, 2021).

2021년 서해에서 선박으로 관측한 결과를 보면 한반도 남단에서 유입되는 기류에서 CH_4 농도가 상당히 높았으며, 나라호 항공 관측 결과를 분석하면 여름철 전라남도가 경기도, 충청도에 비해 CH_4 농도가 높은 것으로 나타났는데 이는 전라도 지역 농업활동에 의한 미생물 기원 배출의 기여 때문인 것으로 분석되었다(Li *et al.*, 2020). 서해 대산 산업단지 근처에서 항공기와 차량으로 관측한 CH_4 의 농도는 같은 시기 MLO보다 약 139~315 ppb 높게 나타났으며 Weather Research and Forecasting/Stochastic Lagrangian Transport (WRF-STILT) 모델로 배출원 지역을 추적한 결과, 근처 축산과 해안선에 따라 위치한 산업단지가 고농도 CH_4 의 배출원임을 알아냈다(Chang *et al.*, 2021). 차량으로 서울 주요 배출원인 매풍지, 물재생센터, 복합화력발전소, 천연가스버스 등에서도 수만 ppb의 CH_4 농도가 관측되고 있어(Park, 2023) 우리나라 주요 배출원에서의 CH_4 농도의 지속적인 관측이 필요함을 시사한다.

4.3 아산화질소

N_2O 에 대한 국내 연구는 주로 농경지 배출량 추

정, 하폐수처리장 등의 배출농도측정 등 단기적이고 지역적인 연구 및 의료목적에 따른 인체영향, 오남용과 관련된 연구(Yoo, 2014; Kim *et al.*, 2011; Park *et al.*, 2011)가 대부분이었고, 장기간의 대기 중 온실가스 농도에 대한 연구는 미흡한 실정이다. 국립기상과학원은 지구대기감시보고서 발간을 통해 안면도는 1999년, 고산은 2012년, 울릉도는 2019년부터 N_2O 측정자료를 제공하고 있다. 현재 대기 중의 N_2O 농도는 산업화 이전 배경농도로 추정되는 270.1 ppb보다 약 25% 상승한 상태이며, 최근 10년을 기준으로 평균 1.1 ppb/year 수준으로 꾸준히 증가하고 있다(NIMS, 2021). 또한, 2007년 국립환경과학원에서 작성한 고산의 4년간 온실가스 측정 분석 결과에 따르면, 2005년 전 지구 N_2O 농도보다 1.3 ppb 높게 나타났으며, 계절적으로 여름에 낮고 겨울에 높은 변동성을 보였다(Ju *et al.*, 2007). 이후 국립환경과학원의 배경대기 측정은 고산에서 강원도 고성으로 이전하여 2012년부터 대기환경연보를 통해 고성의 월평균 농도를 제공하고 있다(NIER, 2024a).

4.4 할로젠 화합물

우리나라에서 장기간의 할로젠 화합물 온실가스의 연속관측은 배경대기 지역인 안면도(1999~)에서 3종, 고산(2007~)에서 32종, 고성(2012~)에서 3종을 관측하고 있으며, 안면도와 태안에서 NOAA 플라스크 샘플링 네트워크(Greenhouse Gas Reference Network; GGRN, HATS)의 샘플링 관측이 수행되고 있다. CFCs는 오존층 파괴물질(Ozone Depleting Substances; ODS)로 몬트리올 의정서에 의해 단계적으로 사용이 금지된 이후 1990년대 중반부터 CFC-11, CFC-12, CFC-113은 전 지구적인 추세와 마찬가지로 한반도에서도 감소 추세를 나타내고 있다(<https://gml.noaa.gov/odgi/>; last access Feb 19, 2025). 오존층 파괴력(Ozone Depletion Potential)이 CFCs보다 낮은 중간 대체물질인 수소염화불화탄소(Hydrochlorofluorocarbons; HCFCs)의 지구온난화지수(Global Warming Potential; GWP)는 CFCs보다 낮지만 여전히

히 높은 수준(수백~수천)이다. HCFCs는 2020년 이후 단계적으로 사용을 중단할 예정이지만, 1990년대부터 꾸준히 증가했다(Velders, 2007). 하지만 우리나라에서는 HCFCs에 대한 관측 및 관련 연구가 부족한 실정이며, 측정기법 등의 연구가 필요하다. CFCs의 2세대 대체물질인 수소불화탄소(Hydrofluorocarbons; HFCs)는 오존층을 파괴하지 않기 때문에 몬트리올 의정서에 의해서 규제를 받지 않지만, GWP가 1,300~14,800에 이르는 강력한 온실가스로서 교토의 정서에 의해 규제를 받으며, 몬트리올 의정서의 키갈리 개정안에 의해 감축목표가 설정되었다(Velders *et al.*, 2007). CFC-12는 1930년대부터 냉매와 발포제로 널리 사용되었으나 몬트리올 의정서에 의해 규제된 이후 CFC-12의 대체물질로 HCFC-22와 HFC-134a가 도입되었다(McCulloch *et al.*, 2003). 1990년 초부터 2000년까지 HFC-134a의 배출이 급격히 증가하였고, 이후 HFC-125, HFC-32 등 차세대 혼합냉매 성분의 사용이 확대되며 전체 HFC 배출도 증가하였다(Velders *et al.*, 2022). 한편, HCFC-22 생산에 따른 부산물인 HFC-23은 반도체 산업 및 특수 냉동, 소화 분야에 일부 사용되며, 최근까지도 배출량이 지속적으로 증가하였다(Stanley *et al.*, 2020). 고산 AGAGE 관측소에서 측정한 HFCs의 농도는 2008년부터 2020년까지 전 지구적인 추세와 유사하게 증가하였고, 전 기간동안 오염신호가 관측되어 동아시아 지역에서 지속적인 HFC의 배출이 증가함을 확인할 수 있었다(Choi *et al.*, 2024). 특징적으로 HFC-134a, HFC-143a는 지속적인 선형증가추세를 나타내었고 HFC-32와 HFC-125는 지수적으로 증가하였으며 HFC-152a는 완만한 증가세를 나타내었다(Choi *et al.*, 2024).

국내에서 수행되고 있는 할로젠 화합물의 관측은 주요 배출지역인 동아시아 지역의 배출 감시 및 평가에 있어 중요한 역할을 한다(Choi *et al.*, 2024; Park *et al.*, 2021c; Kim and Yu, 2021; Fang *et al.*, 2019; Kim *et al.*, 2012b; Li *et al.*, 2011). Montzka *et al.* (2018)과 Rigby *et al.* (2019)은 몬트리올 의정서의 영향으로 1980년대 중반 이후 전 지구적으로 감소하고 있는

CFC-11의 대기 중 농도가 2012년부터 다시 증가하는 현상을 발견하였고, 이는 특히 2012~2017년의 고산 관측소에서 빈번한 고농도 관측과 맞물려 나타났다. 이 자료를 기반으로 2012년 이후 중국 동부에서의 급격한 배출량 증가를 확인하였고(Rigby *et al.*, 2019), 또한 이후 중국 정부의 규제 조치에 따라 2017~2018년부터 다시 배출량이 감소함을 확인하였다(Park *et al.*, 2021c). CFC-11의 원료물질인 사염화탄소(Carbon tetrachloride; CCl₄)도 CFC-11과 비슷한 증감패턴을 보여 중국에서 CFC-11의 생산이 이루어졌음을 확인하였고, 부산물인 CFC-12의 감소 시점이 CFC-11 감소 시점과 일치함을 확인하여 정확한 관측을 통해 정책적 규제 조치를 유도하여 생산 중단을 이끌어냈음을 증명하였다(Park *et al.*, 2021c). 안면도에서 관측한 CFC-11도 고산에서 관측한 사례와 비슷하게 2017년부터 지속적으로 감소하는 추세를 나타냈다(NIMS, 2022). CFC-12는 전 지구보다 높은 감소세를 나타내고 있으며, CFC-113은 최근 5년간 전 지구 평균과 유사한 감소세를 나타내고 있다(NIMS, 2022). CCl₄는 1세대 오존층 파괴 물질로 몬트리올의 정서에 의해 2010년 전 지구적으로 배출 목적의 생산 및 사용이 금지된 물질이나, 아직까지 화학 원료(feedstock) 및 공정 용제(process agent)로 사용이 허가되어 있다. Park *et al.* (2018)은 제주 고산 관측소에서 2008~2015년 동안 CCl₄가 고농도로 빈번하게 관측됨을 통해 대기 중에서 지속적으로 존재함을 확인하였고, 대기 역추적 모델을 통해 중국의 주요 화학 산업 공정에서 CCl₄가 부산물 또는 원료 사용 과정에서 누출되고 있음을 발견하였다. 이를 통해 규제 대상이 아닌 비분산(non-dispersive) 용도로 사용되는 CCl₄의 관리 강화 필요성을 제기하였다(Park *et al.*, 2018). Li *et al.* (2011)은 고산 할로젠 화합물 관측자료를 역모델링에 활용하여 동아시아 지역에서 할로젠 화합물의 중국 배출 기여가 80% 이상임을 확인하였고, Kim *et al.* (2021b)은 2008~2019년 고산 사불화탄소(Carbon tetrafluoride; CF₄)와 디클로로아세틸렌(Dichloroacetylene; C₂F₆) 관측자료를 활용하여 동

아시아 지역에서의 배출량을 정량화하였고, 중국의 알루미늄 산업이 CF_4 와 C_2F_6 배출 증가의 주요 원인이며, 일본과 한국의 반도체 및 평판디스플레이 산업에서 보고된 배출량 감축이 과대평가되었을 가능성을 제시하였다.

5. 온실가스 기원추적 연구

5.1 추적자 비율

온실가스의 지역별/부문별 배출원과 흡수원을 구분하기 위해 다양한 추적자 비율을 사용한다. CO - CO_2 - CH_4 - C_2H_6 는 동일한 연소 배출원을 가지고 있지만 CH_4 는 토양미생물에 의해서도 배출이 되는 특성을 보인다. 따라서 이러한 추적자들의 비율을 적절하게 활용하면 손쉽게 발생원을 파악할 수 있다. 화석 연료의 연소 효율을 파악하기 위해 CO/CO_2 추적자 비율을 활용한다. 한반도에서 지상뿐 아니라 항공기 및 선박에서 관측한 CO/CO_2 의 비율은 발생원이 한국인지 혹은 중국인지에 따라서 큰 차이가 났다 (Li *et al.*, 2020).

서울을 포함한 우리나라에서 기원한 대기 중 CO/CO_2 의 비율은 약 0.1% ($\text{CO}[\text{ppm}]/\text{CO}_2[\text{ppm}] \times 100$)이고 중국, 특히 산업활동이 활발한 산둥반도에서 기원한 대기 중 CO/CO_2 의 비율은 2% 이상 높은 수준을 나타냈다 (Li *et al.*, 2024, 2020; Halliday *et al.*, 2019). 우리나라에서 관측하는 CO/CO_2 비율은 지역적인 오염원을 구분하는 중요한 추적자이지만, 개발도상국에서 꾸준히 연소 효율을 개선하고 있기에 추적자 비율의 연간 변동성을 꾸준히 모니터링할 필요가 있다.

인위적인 활동이 활발한 지역에서 토양미생물에 의한 영향이 크게 증가하면 CH_4/CO 비율도 같이 증가하기 때문에 이 비율을 이용하면 농업과 연소배출을 구분할 수 있다 (표 4, Li *et al.*, 2022, 2020). 토양미생물의 활동은 토양온도에 민감하기 때문에 뚜렷한 지역적/계절적 특징을 보인다. 전라도 지역은 여름철에 CH_4/CO 가 높은 비율 (~1[ppb/ppb])을 유지하지만 겨울철은 주로 미생물에 의한 배출의 영향이 낮아지고 화석연료에 의한 배출이 높아지게 되므로 ~0.5 수준으로 낮아진다 (Li *et al.*, 2020). CH_4 와 C_2H_6 의 비

Table 4. Linear regression slope of $\text{CH}_4/\text{C}_2\text{H}_6$ and CH_4/CO observed in previous studies at different regions and periods.

Studies (Periods)	Regions	Slope of $\text{CH}_4/\text{C}_2\text{H}_6$	Slope of CH_4/CO
Xiao <i>et al.</i> , 2004 (Mar. and Apr. 2001)	Chinese outflow (> 30°N, 0~2 km)	43	0.38
	Tropical Asian outflow	42	0.46
	Japanese/Korean Plumes	45	0.65
Hsu <i>et al.</i> , 2010 (Apr. 2007-Feb.2008)	Mt. Wilson observatory in southern California	–	0.52
Baker <i>et al.</i> , 2012 (Jun.-Sep., 2008)	CARIBIC* flight tracks between ~10°N and 40°N	91 ± 9 (Jun.)	0.96 ± 0.11 (Jun.)
		232 ± 26 (Jul.)	1.88 ± 0.22 (Jul.)
		353 ± 26 (Aug.)	4.43 ± 0.56 (Aug.)
		396 ± 73 (Sep.)	1.98 ± 0.23 (Sep.)
Tohjima <i>et al.</i> , 2014 (Nov.~Mar. 1999~2010)	Hateruma background site in Japan(East Asian outflow)	–	About 0.2~0.4
Li <i>et al.</i> , 2022	Korean Daesan Industry Seoul and Busan City Jeolla-do	250 (May~Jun.) 53 (May~Jun.) 150~250 (May~Jun.)	–
Li <i>et al.</i> , 2020	Jeolla-do	–	2.5 (Summer)

*CARIBIC (Civil Aircraft for the Regular Investigation of the atmosphere Based on the Instrument Container)

올도 미생물과 화석연료에 의한 영향을 구분하는 좋은 추적자이다(표 4). 국립환경과학원과 NASA가 공동으로 추진한 관측캠페인인 Korea and United State - Air Quality (KORUS-AQ) 기간에 관측한 두 물질의 비율은 관측된 공기의 기원에 따라 큰 차이를 보였다(Li *et al.*, 2022).

또 다른 강력한 추적자 비율은 온실가스 탄소동위원소 비율인 $\delta^{13}\text{C}-\text{CO}_2$, $\delta^{14}\text{C}-\text{CO}_2$, $\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4$ 가 있다. 탄소동위원소 비율은 아래 수식과 같이 표현한다.

$$\delta = (R_{\text{sample}}/R_{\text{reference}} - 1) \times 1000 (\text{‰}) \quad (2)$$

식 (2)에서 동위원소 비율을 뜻하는 $R = [\text{heavy isotope}]/[\text{light isotope}]$ 이며(예, $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$; $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$), R_{sample} 은 대기 샘플의 동위원소 비율을, $R_{\text{reference}}$ 는 현재 전 세계적으로 사용하고 있는 국제원자력기구(International Atomic Energy Agency; IAEA)의 Vienna Peeled belemnite (VPDB) 규격 표준 동위원소 비율을 뜻한다. CO_2 의 농도는 꾸준히 증가하지만, $\delta^{13}\text{C}-\text{CO}_2$ 비율은 지속적으로 감소하고 있다. 산업혁명 이전 대기 중 동위원소 비율은 약 -6.5‰ 였지만 2006년에는 약 -8‰ , 2015년에는 약 -8.4‰ 수준이다. 식물은 대기에 비해 적은 ^{13}C 를 함유하고 있으며 동위원소 비율이 약 -28‰ 이다(Vaughn *et al.*, 2004). 따라서 식물이 주 재료인 화석연료는 대기보다 낮은 ^{13}C 를 함유하므로 화석연료를 사용하게 되면 $\delta^{13}\text{C}-\text{CO}_2$ 는 감소한다. 표 5에 배출원에 따른 동위원소 비율을 제시하였으며 사전 연구에서는 CO_2 와 안정동위원소 비율을 이용하여(킬링곡선) 농도 증가에 대한 배출원별 기여도를 산정했다(Geum *et al.*, 2024; Lee *et al.*, 2023; Kenea *et al.*, 2021; Ciais *et al.*, 1995). Kim *et al.* (2015)는 태안의 안정동위원소 비율을 분석하여 깨끗한 해

양과 인위적 오염원이 많은 아시아대륙 기원의 공기에서 뚜렷한 차이를 발견했다. 한편, 화석연료에서는 ^{14}C 가 배출되지 않기에 대기 중 $\delta^{14}\text{C}-\text{CO}_2$ 를 측정하면 화석연료의 배출량을 산정할 수 있다. 안면도와 태안에서는 안정동위원소(^{13}C)와 방사성동위원소(^{14}C) 모두 관측하고 있으며 $\delta^{14}\text{C}-\text{CO}_2$ 를 이용하여 화석연료의 배출량을 산정한 바 있다(Lee *et al.*, 2020b; Turnbull *et al.*, 2009).

CH_4 배출원의 종류에 따라 탄소 안정동위원소가 풍부해지거나 고갈되는 현상을 이용하면 CH_4 의 배출원을 구분할 수 있다(표 6). 예를 들면 고온에서 형성된 CH_4 에는 무거운 동위원소(^{13}C)가 풍부해지는 반면, 생물기원에서는 무거운 동위원소가 고갈된다. 서로 다른 광합성 경로로 인해 C3과 C4 식물은 매우 다른 유기탄소 동위원소 특성을 가지며, 이런 식물들이 연소되면서 방출되는 CH_4 는 서로 다른 동위원소 비율 특성을 가진다. 또한 식물을 소화하는 반추동물도 섭취하는 식물의 종류에 따라 다른 범위의 CH_4 동위원소 특성을 보인다. 천연가스 산업에서도 CH_4 의 누출이 크지만 배출원(생체 생성 또는 열 생성)의 형성온도에 따라 다양한 동위원소 특성을 가진 CH_4 를 생산한다. 안면도와(플라스크자료) 고산(연속자료)에서 관측한 $\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4$ 의 분석을 통해 우리나라의 CH_4 기원 특성을 분석한 결과, 겨울철에는 주로 화석연료에 의해 발생하지만, 여름철에는 토양미생물과 화석연료의 영향을 모두 받고, 특히 토양미생물의 영향이 절반 이상(45~79%)인 것으로 나타났다(Geum *et al.*, 2024; Lee *et al.*, 2023). 동위원소 비율은 부문별 배출원을 정확하게 추적하고 정량화할 수 있는 강력한 추적자이지만 관측이 어렵기 때문에 아직까지 국내에서의 연구는 미흡한 실정이다.

Table 5. The ranges of CO_2 stable carbon isotope ratio ($\delta^{13}\text{C}-\text{CO}_2$) by emission source and biosphere and ocean sink (Graven *et al.*, 2020).

Sources	Fossil fuel	Terrestrial biosphere	Ocean	Atmosphere
Range of $\delta^{13}\text{C}-\text{CO}_2$	-44~-19‰	-29~-12‰	-0.6 to 2‰	-6.5‰ (Pre-industrial) ~-8.4‰ (in 2015)

Table 6. The ranges of CH₄ stable carbon isotope ratio ($\delta^{13}\text{C}\text{-CH}_4$) by emission sources (WMO, 2019b).

Source	Wetland		Biomass burning		Animal		Natural gas	
	High Latitude in Northern hemisphere	Tropical region	Savanna grassland	Boreal forest	C4-plant animals	C3-plant animals	Russia	North Sea
$\delta^{13}\text{C}\text{-CH}_4$	-70~-60‰	-60~-50‰	-20~-15‰	-30~-25‰	-55~-50‰	-65~-60‰	about -50‰	-35 or -25‰

5.2 역모델링

하향식 온실가스 정보 분석 방법은 통계 기반의 상향식 온실가스 배출량 산정 방안의 한계를 극복하기 위해, 대기 중 온실가스 관측자료와 대기 수치모델링 기술을 활용하여 온실가스 배출 정보를 분석한다. 하향식 온실가스 분석은 베이지안 이론에 기반한 역모델링 기법이 적용되기 때문에 역모델링(또는 역추정 모델링) 분석이라 명하기도 한다. WMO는 이러한 방법론을 통해 대기 중 온실가스의 다양한 정보를 분석하는 통합 전 지구 온실가스 정보체계(Integrated Global Greenhouse Gas Information System; IG³IS)라는 개념을 제시하였으며, 이에 대해서는 6.5장에서 자세히 설명하였다(WMO, 2019a; 6.5장 참조).

역모델링 분석 시스템은 전방모델로 사용되는 대기확산모델의 종류, 오차공분산을 정의하는 방법, 선행(a priori) 배출정보, 온실가스 관측자료의 종류 등에 따라 다양한 방식으로 시스템을 구성할 수 있다. 역모델링 분석과 관련된 국내 연구 사례로는 NOAA에서 개발한 전 지구 온실가스 모델인 Carbon Tracker(CT) 모델을 기반으로 동아시아 지역의 CO₂ 플럭스를 앙상블 칼만 필터 방법을 사용하여 추정한 연구들이 있다(Kim *et al.*, 2018b, 2017, 2014b, 2014c, 2012a). CT 모델은 식생과 해양에서의 CO₂ 흡수를 최적화하는 자료동화 기법을 적용하였으며, Kim *et al.* (2014a)은 CT 모델로 분석했을 때 상향식 기반의 동아시아 지역 선행 배출량이 과소 추정되었다는 결과를 제시하였다. Kim *et al.* (2017)은 시베리아 지역의 관측자료가 추가됨에 따라 시베리아 지역 CO₂ 흡수와 불확실성이 모두 감소함을 보였고, Kim *et al.*

(2018b)은 CT 모델의 자료동화 윈도우 길이와 앙상블 크기에 대한 아시아 지역 생물권 플럭스의 민감도 검사를 수행하여, 앙상블 크기가 자료동화 윈도우 길이보다 영향이 크다고 밝혔다.

중국의 CFC-11 배출량 변화를 역모델링으로 분석한 연구로 Rigby *et al.* (2019)은 고산과 일본의 하테루마 지점에서 관측된 CFC-11 농도 관측자료를 영국 기상청(Met Office)의 Numerical Atmospheric-dispersion Modelling Environment (NAME) 모델과 FLEXible PARTicle dispersion model (FLEXPART)에 기반한 역모델링 시스템들을 앙상블(NAME-HB, NAME-InTEM, FLEXPART-MIT, FLEXPART-Empa)로 분석하여 중국에서 보고되지 않은 CFC-11과 관련 화학물질(CCl₄, CFC-12)들의 추가적인 배출을 증명해 냈다. 그 후속 연구로서 Park *et al.* (2021c)은 2019년 중국 지역의 CFC-11 배출이 2013년 이전 수준으로 회복되었다는 사실을 밝혔다. 해당 연구들에서 네 개의 역모델링 시스템들은 각각 브리스톨 대학, 영국 기상청, Massachusetts Institute of Technology (MIT), 스위스 Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology (EMPA)에 의해 구동되었으며, 이들 모델로 계산된 CFC-11 배출량은 2019년 5.0 ± 1.0 Gg/year로 2014~2017 기간의 10 ± 3 Gg/year에 비해 상당 수준 줄어든 것을 확인하였다.

STILT 대기확산 모델에 기반한 CO₂ 역모델링 시스템 관련 연구로 Kenea *et al.* (2024)는 STILT 모델에 기상청의 수치예보모델인 Korea Meteorological Administration Integrated Model (KIM)을 결합한 역모델링 시스템을 기반으로 한반도의 추가적인 지상

관측소 설계를 위한 연구를 수행하였으며, 국립기상과학원에서 운영 중인 국내 5개 관측소(안면도, 고산, 울릉도, 보성 타워, 서울롯데월드타워)에 추가적인 7개 후보지에 대한 CO₂ 배출량 추정 불확실성 감소치(Uncertainty reduction)를 평가하여, 포항, 여수, 세종, 부산, 대구, 전주, 울산 지점 순으로 CO₂ 역모델링 분석에 유리하던 결론을 도출하였다. Sim (2024)는 WRF-STILT 모델을 기반으로 서울을 목표로 한 도시 규모의 온실가스 배출량 분석시스템을 설계하였으며, 이를 위해 서울 내 6개 온실가스 관측지점(관악산, 남산타워 고층/저층, 올림픽공원, 서울대학교, 용산빌딩) 자료와 OCO-2 위성자료를 함께 사용하였다. 그 결과 분석이 수행된 2021년 12월 서울 지역의 선행 배출량이 약 8.69% 가량 과대추정되었음을 확인하였고, 역모델링 분석을 통해 9.7%의 배출량 추정 불확실성 감소치를 얻을 수 있었다.

Joo *et al.* (2022)은 WMO의 IG³IS 개발사업으로 공식 승인받아 국립기상과학원에서 개발한 온실가스 기원추적모델인 INverse modelling for Validating and Evaluating Reduction of the Sectoral greenhouse gas Emissions in KOREA (INVERSE-KOREA) 시스템의 구성 및 활용 계획을 소개하였다. Weather Research and Forecasting model coupled with Chemistry/Data Assimilation Research Testbed (WRF-Chem/DART) 모델을 기반으로 하는 INVERSE-KOREA는 라그랑지안 모델을 기반으로 설계된 기존의 하향식 모델들과 달리 오일러리안 모델인 WRF-Chem 모델과 DART 자료동화 시스템을 활용하여, 한반도 격자에 대한 지표 배출량 뿐만 아니라 3차원 농도 분석자료도 동시에 생산이 가능한 특징을 갖는다. Kwon (2022)은 INVERSE-KOREA 역모델링 시스템의 세부적인 시스템 설정 및 결과를 제시하였으며, 초기분석 결과에서 선행(prior) 배출량으로 사용된 Fossil Fuel Data Assimilation System (FFDAS) 자료 대비, 분석(posterior) 배출량이 1월에 지역에 따라 1~2% 증가하고, 6월에 5~10% 가량 감소하는 결과를 보였다. Koo (2025)는 CO₂ 뿐만 아닌 CH₄에 대한 분석이 가

능하도록 INVERSE-KOREA 시스템을 개선하였으며, The Emissions Database for Global Atmospheric Research (EDGAR) v8.0 자료를 동일하게 선행 배출량으로 사용하여 2020년의 국내 배출량을 분석한 결과 CO₂는 선행 배출량 대비 -0.6%, CH₄는 +1.1% 증가한 결과를 보였다. 또한, 선행배출량 자료에 따른 민감도 검사를 수행하여 배출량 분석 결과가 선행배출량 자료에 크게 영향을 받음을 보였다. INVERSE-KOREA 시스템은 최근 SF₆에 대한 분석까지 가능하도록 시스템을 확장하였다(KMA, 2024).

역모델링 분석은 관측된 농도를 적용하므로 실제 대기 특성의 변화가 반영된 온실가스 배출정보를 시의적절하게 제공할 수 있다는 장점을 갖는다. 그러나 관측자료의 양과 품질뿐만 아니라 선행정보와 대기 확산모델의 정확도에도 크게 의존하기 때문에, 그 결과에 대한 신뢰도 검증이 필수적이다. 따라서, 다양한 역모델링 시스템 간의 지속적인 상호 비교 및 검증을 통해 모델의 신뢰성을 확보하기 위한 노력이 매우 중요할 것으로 사료된다.

6. 국제 온실가스 관측망에서의 국내 역할

6.1 GAW

WMO는 1989년 GAW 프로그램을 출범시켜, 대기 중 온실가스를 비롯한 주요 기후변화 유발 물질을 정량적으로 감시하는 전 지구적 관측체계를 구축하였다. GAW 프로그램의 온실가스 관측망은 현재 지구급 관측소 36개소, 지역급 관측소 157개소 기여관측소 18개소 등 총 265개의 관측소로 구성되어 있으며, 이를 통해 대기 중 온실가스 농도 변화를 지속적으로 감시하고 있다(<https://gawsis.meteoswissch/GAW-SIS>). 우리나라에서는 기상청이 1992년부터 GAW 프로그램에 참여하고 있으며, 현재 안면도(1998년 등록), 고산(1990년 등록), 울릉도(2023년 등록)가 GAW 지역급 관측소로 등록되어 있다(NIMS, 2024). 그림 4에 GAW 등록 관측소를 보였다.

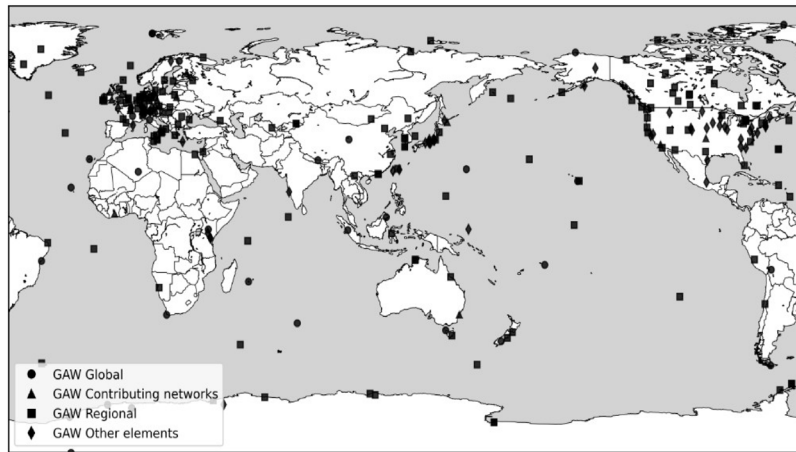


Fig. 4. Global network of the World Meteorological Organization's Global Atmosphere Watch (WMO/GAW) program, based on data from GAW SIS (<https://gawsis.meteoswiss.ch/GAW SIS/index.html#/search/station>, accessed on Mar 6, 2025). The network consists of Global stations (●), Contributing networks (▲), Regional stations (■), and Other elements (◆), which collectively support the monitoring of atmospheric composition and long-term changes in greenhouse gases.

GAW 프로그램은 전 지구적 온실가스 관측의 정확성과 일관성을 유지하기 위해 엄격한 품질보증 체계를 운영하고 있다. 관측자료의 국제적 비교 가능성과 일관성을 확보하기 위해, GAW 프로그램은 과학자문그룹 (Scientific Advisory Group; SAG), 중앙교정실험실 (Central Calibration Laboratory; CCL), 세계/지역 표준센터 (World Calibration Centre; WCC/ Regional Calibration Centre; RCC), 품질보증/과학활동센터 (Quality Assurance/ Science Activity Centre; QA/ SAC), 세계자료센터 (World Data Centre; WDC) 등의 주요기구로 이루어진 품질 보증 체계를 갖추고 있다 (WMO, 2023a, 2023b). CCL은 WMO 온실가스 관측 표준을 유지·관리하는 기관으로서, 현재 NOAA/ GML이 그 역할을 수행하고 있으며, 정기적으로 순차순환비교실험 (Round-robin intercomparison)을 주관하며 관측자료의 소급성과 호환성을 평가하고 있다 (WMO, 2024c). WCC/RCC는 CCL에 의해 유지되는 관측 표준에 따른 관측자료의 품질 보증 책임을 갖고 있는 실험실로 관측소의 관측 품질 검증을 위한 적합성평가 (Audit)와 비교실험을 수행하며, 관측 기술을 지원한다. 네트워크 내 관측소들은 주기적인 적

합성 평가를 통해 관측환경을 점검하고, 관측자료의 품질과 소급성을 검증받도록 권고된다. 각 관측소들은 관측자료를 WDC에 매년 제출하여야 하며, 전 세계 관측소에서 생성된 자료는 WDC가 통합 관리한다. 자료의 흐름을 그림 5에 보였다.

국립기상과학원은 WMO와 국제원자력기구 (IAEA)가 공동으로 주최하는 국제 순차순환비교실험에 2002년부터 참여하고 있다. CO₂의 경우, 5차 비교실험 결과 0.005~0.543 ppm의 차이값으로 호환성 범위를 벗어났으나, 실험 결과를 기반으로 검교정 방법을 개선하고, 관측 기술 향상 등을 통해 2014년부터 0.03~0.04 ppm의 차이값으로 호환성 범위 내의 매우 안정된 분석 결과를 보였다 (https://gml.noaa.gov/ccgg/wmorr/wmorr_results.php; https://gml.noaa.gov/ccgg/wmorr/wmorr_results.php; last access Feb 27, 2025). 또한, WMO/GAW 지역급 관측소로 지정되어 있는 안면도는 2014년, 2017년, 2022년 총 세 차례, 고산은 2017년, 2022년 두 차례의 적합성 평가 (Audit)를 통해 관측환경과 자료 품질을 검증받았다 (WMO, 2023a, 2023b; Zellweger, 2017a, 2017b, 2014). 안면도, 고산, 울릉도를 포함한 GAW 관측소에서 수

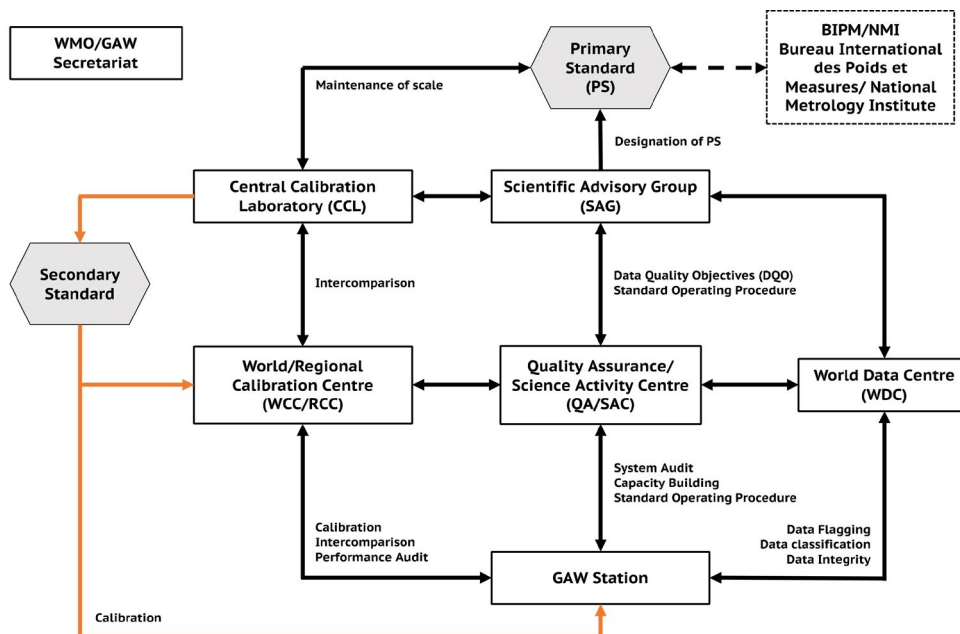


Fig. 5. Elements of Quality Assurance system, QA activities and workflow in GAW (Reconstructed based on WMO, 2017).

집된 온실가스 관측자료는 WDC에 제출되고, 동아시아 및 전 지구에서의 온실가스 농도 변화에 대한 정량적 분석에 활용된다. GAW 프로그램을 통해 수집된 자료는 WMO가 매년 발간하는 온실가스 연보 (Greenhouse gas bulletin)의 기초정보로 활용되고, IPCC 평가보고서의 대기 중 온실가스의 시계열 변화를 분석하는데 이용된다. 이 결과들은 각국 정부 및 국제기구의 기후 정책 수립을 위한 근거 자료로 활용된다. 따라서 지속적인 고품질의 온실가스 관측과 국제적 자료 공유는 전 지구적 기후변화 연구 및 정책적 대응에 있어 매우 중요한 의미를 갖는다.

한편, 국립기상과학원은 GAW 네트워크 내에서 품질관리 및 역량개발 측면에서 중요한 역할을 수행하고 있다. 국립기상과학원은 2012년 GAW 품질관리체계의 중앙기구 중 하나인 육불화황 세계표준센터 (WCC-SF₆)를 유치하여 운영하고 있으며, 전 세계 SF₆ 관측소를 대상으로 비교실험을 주관하여 육불화황 관측자료의 소급성을 평가하고 비교가능성을 강화하였다 (Lee *et al.*, 2021a; WCC-SF₆, 2017). 또한, 관

측소의 적합성평가를 통해 관측환경을 점검하고, 관측기술을 지원함으로써 전 지구적 SF₆ 감시 체계를 주도하고 있다 (WCC-SF₆, 2019, 2018a, 2018b). 이와 함께 2010년부터 아시아 태평양 지역의 온실가스 관측 기술 발전과 협력을 지원하기 위해 ‘온실가스 전문가 워크숍’을 정기적으로 개최하고 있으며, 온실가스 관측 관련 연구 성과 및 기술 정보를 공유하는 뉴스레터를 발간하고 있다. 또한, 2014년부터 GAW 네트워크 내 연구자 및 관측자들을 대상으로 온실가스 관측 이론 및 기술 향상을 위한 전문가 교육과정을 운영하고 있으며, 이를 통해 GAW 네트워크 내 역량 개발에도 기여하고 있다 (WMO, 2024b).

6.2 AGAGE

AGAGE는 할로겐 화합물 온실가스 관측 기술을 선도하는 국제 네트워크이며 전 세계 약 16개의 관측소가 운영되고 있다 (Prinn *et al.*, 2018). 한국에서는 경북대에서 운영하는 고산 관측소가 AGAGE 네트워크에 포함되어 있다. 고산은 2007년부터 2시간 간격



Fig. 6. A map showing the locations of the TCCON stations in 2024 (NASA and TCCON, 2024).

으로 성층권 오존층 파괴물질(CFCs)과 그 대체물질인 할로겐 화합물(예, HCFCs, HFCs, SF₆ 등), 유기휘발성물질(벤젠, 톨루엔, 에탄등) 등 약 50가지를 연속적으로 정밀하게 관측하고 있다. 고산 관측소는 아시아대륙에서의 할로겐 화합물 온실가스의 장기 경향을 파악하는 부분에서 큰 역할을 한다(Park *et al.*, 2018; Li *et al.*, 2011). 2007년부터 고산에서 관측한 CFC는 몬트리올 의정서의 규제로 1991년부터 꾸준히 감소하였지만 2019년 빈번한 고농도 사례가 나타났다. 역모델링으로 계산한 결과 중국동부 지역에서 보고되지 않은 CFC의 배출이 단기적으로 증가하였음을 발견하였다(Park *et al.*, 2021c; Rigby *et al.*, 2019). 이는 우리나라에서 장기 관측자료를 통해 몬트리올 의정서에서 규제하는 온실가스 감축 이행을 정확하게 감시할 수 있다는 대표적인 사례로 평가된다.

6.3 TCCON과 COCOON

TCCON은 CO₂, CH₄, CO, N₂O, H₂O 등의 대기 중 건조 공기 물분율 측정을 통하여 기후변화 연구와 온실가스 위성자료 검증을 목적으로 운영 중이며, 2004년 미국 위스콘신주 Park Falls에 첫 측정소가 설치된 이후, 현재 그림 6과 같이 전 세계 29개의 관측소가

운영되고 있다(Wunch *et al.*, 2015).

TCCON은 I2S (Interferogram to Spectrum) 알고리즘을 사용하여 간접계 관측 정보를 스펙트럼으로 변환하며, 변환된 스펙트럼은 GFIT (Gas Fit) 비선형 최소제곱 피팅 알고리즘을 사용하여 모델링된 스펙트럼과 측정된 스펙트럼을 정합하여 온실가스 농도를 산출하게 된다. 이렇게 산출된 농도를 대기 중 온실가스 건조 공기 평균 물분율 농도라고 한다(Laughner *et al.*, 2024).

TCCON은 29개 관측소 자료의 표준을 유지하기 위하여 데이터 품질관리(QC) 과정을 엄격히 수행하며, 미국 California Institute of Technology Jet Propulsion Laboratory (JPL)에서 검증된 모든 자료를 관리한다(Wunch *et al.*, 2015).

TCCON은 표준 대기 질량 및 온도 보정을 수행하여 관측자료의 정확도를 향상시키며, 보정은 검증된 관측자료만을 대상으로 하고 있다. 측정 기압과 모델 기압의 비교를 통해 기압 센서 오류를 검증하고, 불완전한 데이터를 제거하여 소프트웨어 오류를 줄인다. 그리고 태양의 천정각(82° 이하)과 태양광 변동(5% 이하) 범위 조건을 제한하여 양질의 관측자료를 선택한다. 또한 관측기기의 실시간 레이저 샘플링

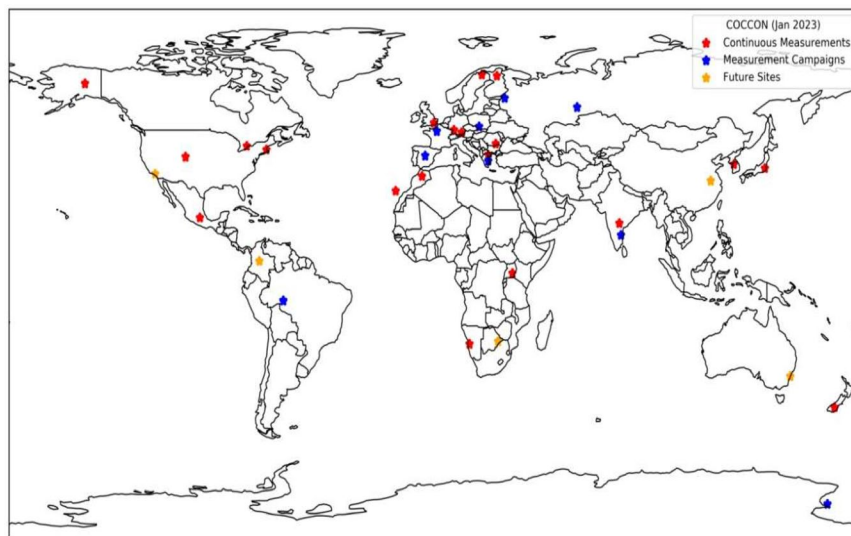


Fig. 7. A map showing the locations of the COCCON stations in 2023 (KIT and COCCON, 2023).

을 통하여 광학 장비 정렬을 확인하고, 태양 추적기 및 기타 관측 부품의 상태 점검 정보를 확인한다 (Toon *et al.*, 2016; Hase *et al.*, 2013).

TCCON은 Goddard Global Greenhouse Gas retrieval (GGG)2020의 최신 데이터 분석·처리 소프트웨어를 사용한다. GGG2020은 GGG 전방 모델(GGG forward model)에 새로운 선행 모델을 적용하여 측정 장비의 광학 정렬 오차가 보정될 수 있도록 하였다. 하지만 WMO 기준과의 정합성 및 편향에 대한 지속적 오차 개선이 요구되고 있다. 2024년 TCCON은 GGG2020.1버전 업데이트를 통하여 WMO 기준의 정합성과 편향에 대한 문제점들을 해결해 나갈 계획을 공표하였다. 또한 NASA 및 ESA의 운영·발사 준비 중인 온실가스 위성(OCO-2, OCO-3, GOSAT, GOSAT-2, MicroCarb, TanSat, Sentinel-5P 등)에 대한 지상검증을 강화하고 전담 관측망으로 나아갈 계획이다(William *et al.*, 2023; Wunch *et al.*, 2015).

COCCON은 CO₂, CH₄, CO의 대기 중 건조 공기 물분을 측정을 통하여 지역별 온실가스 배출원 및 흡수원 정량화를 목적으로 운영 중이며, 2014년 독일 Karlsruhe Institute of Technology (KIT)에서 장비가

개발되면서 관측이 시작되었다. 현재 전 세계 47대 이상의 EM27/SUN 장비가 보급되었고 그림 7과 같이 40개 이상의 관측소가 운영되고 있다.

COCCON은 사전 교정 절차(Pre-deployment Calibration)를 통한 광 정렬 안정성과 이동, 유지보수가 수월하여 다양한 관측 환경에서 정보를 습득할 수 있다(Matthias *et al.*, 2019). COCCON은 장비의 일관성 및 정밀성 기준을 확보 측면에서 TCCON과의 비교 및 교정이 필요하다. 하지만, TCCON 대비 다양한 환경에서 저렴한 비용으로 관측 정보를 생산할 수 있는 장점이 있다(Frey *et al.*, 2019).

COCCON은 Profile-Fitting Algorithm (PROFFIT) Version 9.6의 비선형 최소제곱 스펙트럼 피팅 알고리즘을 사용하여 모델링된 스펙트럼과 측정된 스펙트럼을 정합하여 온실가스 농도를 산출한다. 또한, COCCON은 관측자료의 장기 안정성과 측정 신뢰도를 확보하고자 자료 분석 시 TCCON과 동등한 조건을 사용한다. COCCON과 TCCON 관측망의 데이터 일관성 유지를 위한 자료의 비교 및 교정이 필수 사항이며, 이 사항이 충족되었을 때 두 관측망은 상호 보완적 역할을 할 수 있다(Hase *et al.*, 2004).

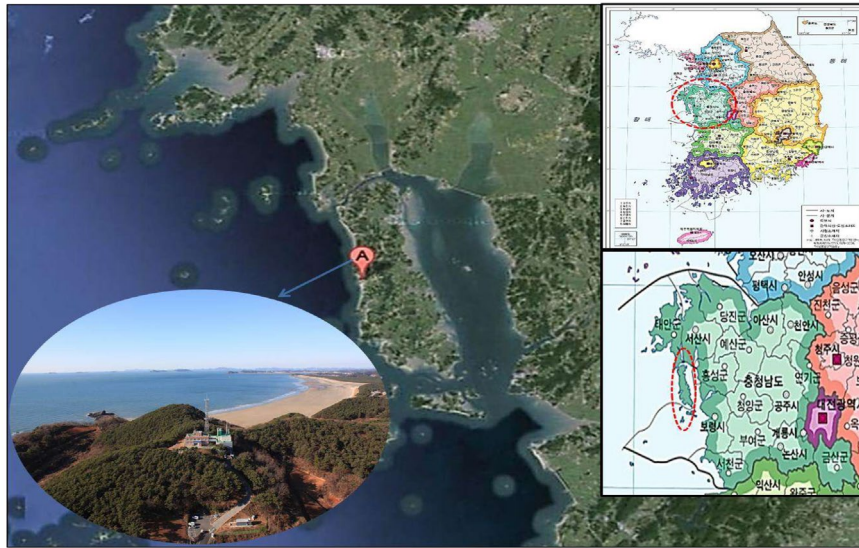


Fig. 8. A map showing the locations of the Anmyeondo TCCON and COCCON station (Oh *et al.*, 2018).

최근 COCCON은 기존 개방형 경로(open-path, OP) 방식과 새로운 기체 셀(cell) 방식 비교를 통한 기기 보정 정확도 개선을 제시하며, COCCON 관측망 전반의 신뢰도 강화를 도모하고 있다. 이는 TCCON과 차별적인 관측 신뢰도를 확보하고자 하는 목적이다. 특히 COCCON은 ESA의 지원을 통한 유럽 기반의 중앙 데이터 처리 시스템 구축을 진행 중이며, 인공지능 기반 자동 보정 시스템도 개발하고 있다. 이렇게 신뢰도가 개선된 COCCON 관측망을 활용하여 향후 유럽연합의 위성 검증에 필요한 지상 원격관측자료의 확대를 도모하고 있다(Alberti *et al.*, 2022).

국내에서는 국립기상과학원의 안면도 관측소가 TCCON 관측망에 가입되어 실시간 운영되고 있다(그림 8). 안면도 관측소는 2014년 20번째 TCCON 관측소로 지정되었으며, FTS (IFS-125HR) 관측기기 기반 자체 관측 체계(Operational Automatic System for the Intensity of Sunray; OASIS)를 구축하여 TCCON 기준 이상의 정확도(99%)로 검증된 관측자료를 생산·제공하고 있다(그림 9).

안면도 TCOON 관측소는 관측 표준을 유지하기

위하여 TCCON의 데이터 품질관리(QC) 과정에 참여하고 있으며, 관측자료는 물론 기압 센서 오류, 소프트웨어 오류, 관측 품질 검열, 관측 시간 동기화 오류 등을 포함한 모든 관측 정보를 실시간으로 TCCON 관측망과 공유하고 있다. 또한, GGG2014 및 GGG2020의 최신 데이터 분석·처리 소프트웨어를 모두 사용하고 있으며, GGG2020.1버전 업데이트를 위해 분석·처리 정보를 NASA JPL과 공유·분석도 수행하고 있다(Oh *et al.*, 2018).

안면도 TCCON은 한반도 온실가스(CO_2 , CH_4) 농도의 계절 및 장기적 변화를 평가하고 있으며, 위성(OCO-2, GOSAT 등) 및 항공관측자료를 활용하여 정확도 검증 평가를 주기적으로 수행한다. 이를 통해 온실가스 위성 검증이 가능한 국제 TCCON 관측망의 신뢰도를 유지하고 있으며, 향후 국내 위성 원격관측이 운영되면 차별적 검증 및 보정 방식을 제시할 수 있을 것으로 기대된다(Labzovskii *et al.*, 2019).

국내 COCCON 관측소는 2.3절의 표 2에서와 같이 지정되어 있다. 서울대학교(SNU-COCCON)는 2022년 국내 첫 COCCON 관측소로 지정되었고, 안면도(Anmyeondo-COCCON, 그림 10)와 이화여대

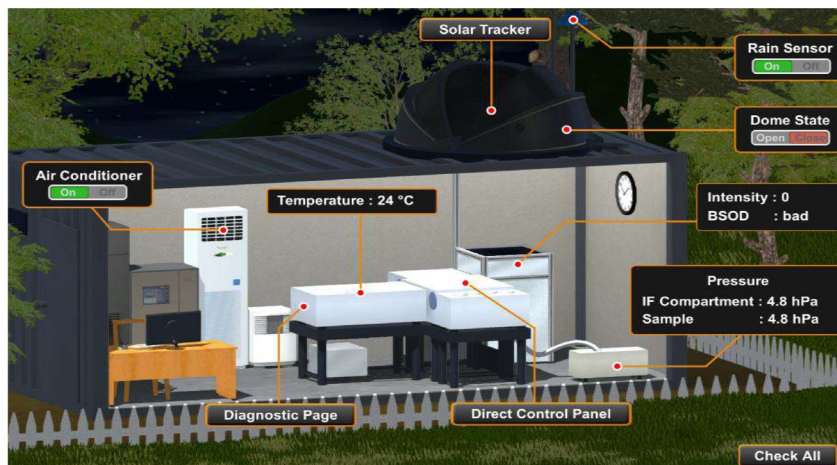


Fig. 9. Observation and operation system of Anmyeondo TCCON station (2014.8.) (Oh *et al.*, 2018).



Fig. 10. Observation and operation system of the COCCON station (2024.2.) in Anmyeondo.

(Ewha-COCCON), 한국표준과학연구원 (KRISS-COCCON) 관측소는 2024년도에 지정되었다. COCCON 관측소는 이동형 FTS 장비인 EM27/SUN를 유지, 관리하는 기관을 의미하며, 실제 관측은 연구 목적에 따라 필요한 장소로 이동하여 캠페인 형태로 운영된다. 특징적으로 국립기상과학원은 1대의 EM27/SUN 기기를 이용하여 배경지역인 안면도와 도심지역인 이화여대를 각각 모(母) 관측소와 자(子) 캠페인 관측소로 COCCON의 승인을 받아, 한 개의 장비로 두 개의 COCCON 관측소가 지정되었다. COCCON 관측소는 장소를 변경하면서 관측이 이루어지

기 때문에, 관측 결과의 일관성 및 정밀성 기준을 확보하기 위하여 보다 정밀한 TCCON 기준 장비와 주기적으로 비교 검증할 것을 권고하고 있다.

서울대학교 COCCON 관측소는 교내와 주요 도심 캠페인 관측을 통해 온실가스 배출원 영향을 감시·분석하고 있다. 이화여대와 표준과학연구원의 COCCON 관측소는 2024년 ASIA-AQ 캠페인 기간 중 2월 13일부터 3월 14일까지 서울 도심의 실시간 표적 관측을 수행하였다. 이때 활용된 이화여대와 표준과학연구원 COCCON 관측소의 EM27/SUN 2대는 안면도 TCCON 기준 관측장비와 비교 관측을 통해 사전

Table 7. The payloads of GHGs measurements for all flights operated during ASIA-AQ.

Plane	Instrument	Parameters
DC-8	IR Absorption Spectrometry (DACOM)	In situ CO, CH ₄ , CO ₂ , N ₂ O
King Air 350	CRDS	CO ₂ , CH ₄ , CO
	Flask sampling	$\delta_{13}\text{C-CO}_2$, $\delta_{13}\text{C-CH}_4$
Vessel	CRDS	CO ₂ , CH ₄
1900D	LGR greenhouse gas analyser	CO, CH ₄ , CO ₂
C90GT	LGR MCEA1-911/OA-ICOS	CO, CH ₄ , CO ₂

검·교정을 수행하였다. 관측 결과에 의하면 배경 대기인 안면도 TCCON 농도 대비 서울 도심의 일일 낮 시간(9시~17시) 평균 XCO₂는 약 2 ppm, XCH₄는 약 5 ppb 높은 특성을 보였다. 지속적인 COCCON 관측소 운영을 통해 향후 비도심, 도심/산업단지 지역의 온실가스 배출량과 거동 특성 규명에 필요한 과학적 정보 확보 및 온실가스 위성 검증과 감시의 가능성을 제시하였다(Kang *et al.*, 2025).

6. 4 특별관측 캠페인

국내에서 수행되었던 항공-선박-지상관측을 결합한 특별 캠페인으로서 YELLOW-Sea Air Quality (YES-AQ)는 2017년부터 서해에서 수행되었다. 서해는 아시아대륙의 풍하측에 위치하여 아시아 대륙의 오염 물질이 한국, 일본, 서태평양지역으로 유입되는 주요한 경로이지만 관측이 부족한 지역이다. 이 관측공백을 해소하기 위하여 국립기상과학원은 연구선(기상1호)과 항공기(나라호)로 서해의 입체적 온실가스 분포를 관측하는 YES-AQ 캠페인을 2017년부터 현재까지 매년 봄철 수행하고 있다. 이 캠페인을 통해 서해 상 온실가스의 위도별 특성을 파악하고 한반도 남단에서 기원한 미생물 기원의 CH₄ 농도를 감지하여 한국의 서남부 지역의 높은 CH₄ 배출원을 파악할 수 있었다(Li *et al.*, 2024).

2016년 NASA와 국립환경과학원은 KORUS-AQ 캠페인을 수행하였다. KORUS-AQ는 우리나라 대기오염에 영향을 주는 주요 원인을 파악하기 위한 항공관측 캠페인이지만 온실가스 항공관측도 함께 수행하였다(Crawford *et al.*, 2021). 서울지역에서 CO₂/CO

의 분 간격의 조밀한 기율기를 계산하여 CO₂의 장거리 수송과 국내 발생을 구분할 수 있는 기준을 마련하였다(Halliday *et al.*, 2019). 또한 CH₄과 C₂H₆의 조성비율을 분석하여 지역에 따른 CH₄의 배출특징을 파악하기도 하였다(Li *et al.*, 2022).

2024년 2월부터 3월까지 NASA와 국립환경과학원이 공동으로 주관하는 아시아 지역 대기질 관측을 위한 Airborne and Satellite investigation of Asian Air Quality (ASIA-AQ) 국제 캠페인이 추진되었다. AISA-AQ 캠페인은 2016년 KORUS-AQ의 후속으로, 관측영역을 아시아 지역으로 확대하면서 기후변화의 중요성을 인식하고 온실가스 측정을 강화하게 되었다(Crawford *et al.*, 2021). ASIA-AQ에서의 온실가스 측정은 수도권을 포함한 한반도 지역에서의 3차원적인 온실가스 관측자료를 확보하여 온실가스 기원추적 모델인 INVERSE-KOREA를 검증하기 위한 목적으로 추진되었다. 캠페인 기간 NASA의 DC8 항공기, 국립환경과학원의 1900D, C90GT, 국립기상과학원의 나라호 총 4대의 항공기에서 온실가스 연속관측이 이루어졌다(표 7). KORUS-AQ와 같이 많은 기관들이 참여한 캠페인으로써 향후 모든 플랫폼 자료를 활용한 다양한 연구 결과가 도출될 수 있을 것으로 기대한다.

2022년 NASA는 상부대류권과 하부성층권에서 대기조성물질의 기후영향을 파악하기 위하여 8월 한국에서 Asian Summer Monsoon Chemical & CLimate Impact Project (ACCLIP) 항공관측 캠페인을 수행하였다. 이 캠페인에서는 열대성 저기압을 통한 단기체류물질(CH₂Cl₂ 등)이 성층권으로 빠르게 수송되어

성층권 오존의 파괴의 메커니즘을 밝히는데 크게 기여하였다(Pan *et al.*, 2024). 국립기상과학원도 나라호를 이용하여 총 5회 NASA와의 매칭 비행을 수행하였다. 아시아몬순 시기 강한 열대저기압으로 인하여 대기 상층에서 고농도 온실가스 사례가 빈번하게 발생하는 것을 캠페인을 통해 발견하였다(Pan *et al.*, 2022).

6.5 IG³IS 및 GGGW

WMO는 하향식 온실가스 정보 산출 기법을 기반으로 하는 IG³IS 개념을 제시하였다(WMO, 2019a). WMO IG³IS는 국가, 도시, 산업시설 규모의 온실가스 배출 측정과 감시의 모범적 연구 수행을 위한 기술적 지침을 제공하며, 각 규모별 IG³IS 연구를 위해 사용 가능한 방법론과 최적의 구현 방법, 그리고 이들로부터 얻을 수 있는 결과물들을 제시하고 있다(WMO, 2022, 2019a).

WMO IG³IS는 기존의 상향식 배출량과는 독립적인 정보로서 배출량의 신뢰도 향상에 기여할 수 있을 것으로 기대되고 있다. 특히 국가 인벤토리 작성의 지침이 되는 「2006 IPCC 가이드라인의 2019년 개정판」에 배출량의 품질보증/품질검사와 검증 방안으로 IG³IS가 새롭게 추가되면서 국가 배출량의 불확도 개선을 위한 방안으로 제시되었다(IPCC, 2019). 이 가이드라인에서는 온실가스 배출량의 품질 개선을 위하여 상향식 배출량을 산정하는 인벤토리 그룹이 IG³IS 하향식 배출량을 활용하는 방안을 구체적으로 제시하였다(그림 11).

2023년 영국, 독일, 호주, 뉴질랜드 등은 IG³IS 결과를 인벤토리 배출량의 품질보증과 보완을 위한 방법으로 활용하고 있다(Australia, 2022; Germany, 2022; New Zealand, 2022; United Kingdom, 2022). 이러한 IG³IS 기술 개발의 성과가 파리협약의 이행에 필요한 정보를 지원하고, 기후변화 대응에 실질적으로 기여할 수 있도록 WMO는 2023년에 전 지구 온실가스감시(Global Greenhouse Gas Watch: GGGW) 프로그램을 출범하였다. GGGW 프로그램은 실시간 운영이

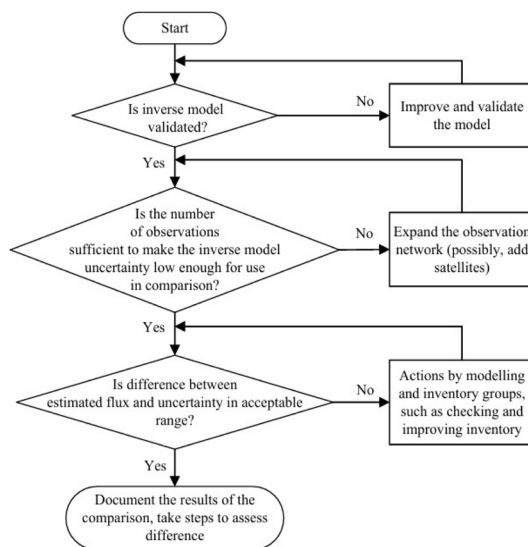


Fig. 11. A decision tree for checking the conditions for using the inverse model estimation in the National Inventory Verification (IPCC, 2019).

가능한 전 지구 규모의 IG³IS 체계를 구축하고 기후변화와 관련된 온실가스 발생원과 흡수원의 변동을 시의적절하게 감시하게 된다. 마치 일기도를 이용하여 위험기상의 원인을 찾아내고 대응하는 것처럼, 온실가스 일기도를 이용하여 온실가스가 어디에서 증가하는지 찾아내고 기후변화에 대하여 신속하게 대응하는 것을 목표로 하고 있다. GGGW 프로그램은 UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change) 정책 지원을 위해 다음의 두 가지 핵심 정보를 산출하게 된다. 첫 번째는 CO₂, CH₄, N₂O의 대기 중 연직 농도로, 전 지구에 대하여 수평수 km 수준으로 매 시간 생산하게 된다. 두 번째는 100 km 간격으로 월 평균된 CO₂, CH₄, N₂O의 배출량이다. GGGW는 이 정보를 기반으로 파리협약에 의한 신기후 체계의 전 지구 이행점점(Global Stock Take)을 우선적으로 지원할 예정이다(WMO, 2024a).

우리나라도 IG³IS 및 GGGW 사업과 관련된 연구가 일부 진행되고 있다. IG³IS 관련하여 INVERSE-KOREA 사업이 WMO의 IG³IS 공인 사업으로 승인받아 국가 규모의 역모델링 체계를 개발하였다(Joo

et al., 2022). INVERSE-KOREA는 WRF-Chem 모델을 기반으로 앙상블칼만 필터 자료동화 기법을 적용하여 국립기상과학원의 안면도, 고산, 울릉도 관측자료를 자료동화하는 체계이다(5.2절 참조). 또한 도시 규모의 IG³IS 추진과 관련하여 서울시에 대하여 라그랑지안 입자모델인 STILT를 이용한 연구가 진행되었다(Sim, 2024). 이 연구를 통해 지상과 위성 온실가스 관측을 이용한 역모델링 결과가 서울과 같은 도시에서의 온실가스 배출량의 불확실성을 개선하는 데 중요한 역할을 할 수 있다는 점을 보여주었다.

GGGW는 관련하여 우리나라는 주로 관측자료를 제공하는 역할을 담당하게 될 것이 예상된다. 이미 GAW 관측소로 등재되어 실시간으로 자료를 제공하는 안면도, 고산, 울릉도 온실가스 관측자료가 1차적으로 활용될 예정이다. 2023년 WMO의 GGMT (Carbon Dioxide, Other Greenhouse Gases and Related Tracers Measurement Techniques)-2022 회의에서 국립환경과학원은 국내에서 추진하고 있는 온실가스 관측망 확대 계획을 소개하였고, 향후 GGGW 관련하여 활용이 가능할 것으로 기대된다. 다만 국내 모든 관측값이 GGGW에 활용되기 위해서는 국제 수준의 소급성 확보가 필요할 것이다. GGGW의 모델 관련한 개발은 전 지구 규모로 국내의 하향식 역모델링 연구와의 직접적인 연관성은 부족하다. 하지만 국내에서 개발 중인 INVERSE-KOREA가 GGGW의 역모델링 체계와 같은 오일러리안 기반이므로 GGGW에서 생산된 전 지구 농도 분포를 지역 모델 버전인 INVERSE-KOREA에 초기자료와 경계자료로 사용할 수 있다. 이를 통해 INVERSE-KOREA는 GGGW와 분석 결과의 일관성을 유지하면서 한반도 지역에 상세한 분석 정보를 생산할 수 있다는 장점이 있다. 이러한 이유로 INVERSE-KOREA가 GGGW를 이용한 전 지구 온실가스 감시와 지역별 혹은 국가별로 개발되는 온실가스 감시 체계의 연계를 위한 벤치마킹 체계로 주목받고 있다(Tarasova, personal communication).

7. 요약 및 제언

본 논문에서는 국내 온실가스 농도 관측망과 자료 처리 방법 및 분석과 활용 관련된 연구 성과를 소개하였다. 1990년 우리나라에 처음으로 태안과 고산에서 온실가스 감시가 시작된 이래, 국내 정부연구기관, 학계, 지자체 등은 지속적으로 온실가스 관측망을 확충하였고, 현재 우리나라는 매우 조밀한 지상 관측망을 갖춘 지역이 되었다. 또한 항공기와 선박, 지상 원격관측을 이용한 3차원적인 입체적 관측망을 구축하게 되었다. 다만 국내 위성을 이용한 온실가스 관측은 아직까지 개발 단계에 있는 것으로 파악되었다. 이러한 관측망을 활용하여 분석된 주요 결과는 다음과 같다. 한반도의 CO₂ 배경농도는 지역적인 특성에 의해 청정지역인 MLO보다 좀 더 높은 값을 보였지만, 연간 증가율은 유사하였다. 다만 연간 증가율이 크게 차이가 나는 경우는 한반도 주변의 온도 및 토양수분에 의한 지상 식생의 변동 때문인 것으로 분석되었다. 한반도에서 관측된 CH₄ 농도는 MLO 및 동아시아 지역과 다른 특성을 보였는데, 지역 및 장거리 수송 배출원의 차이와 OH 라디칼에 의한 소멸 등에 기인한 것으로 분석되었다. 또한 농업에 의한 미생물의 호흡이나 화석연료 사용의 차이 등으로 한반도 내 지역별 변동도 큰 것으로 나타났다. 국내에서 관측된 N₂O 농도는 전 지구 평균보다 약간 높은 값을 보였고, 여름에 낮고 겨울에 높은 계절 변동성을 보였다. N₂O와 관련된 연구는 CO₂나 CH₄에 비해 상대적으로 부족했다. N₂O는 농업분야가 주요 배출원으로 우리나라를 포함한 아시아 지역의 기여도가 크기 때문에, 향후 N₂O 관측 및 분석 연구가 확대될 필요가 있다. 할로겐 화합물과 관련하여 국내에서 수행되고 있는 할로겐 화합물의 관측은 주요 배출지역인 동아시아 지역의 배출 감시 및 평가에 있어 중요한 역할을 했다 CFC-11나 CCl₄에 대한 고농도 사례 관측과 이에 대한 원인 분석을 통해 중국 지역에서의 배출을 과학적으로 밝히고, 정책적 규제 조치를 유도하는 성과를 얻을 수 있었다.

관측된 온실가스 농도 증가의 원인 분석을 위해 추적자 비율이나 역모델링 기법이 활용되었다. CO-CO₂ 비율을 활용하여 중국 유입과 국내 발생을 구분하는 연구가 많았고, CH₄/CO 비율을 이용하여 국내 지역에서의 농업과 화석연료의 영향을 구분하는 연구가 진행되었다. CH₄과 C₂H₆의 비율도 미생물과 화석연료에 의한 영향을 구분하는 좋은 추적자로 산업단지에서의 배출을 확인하는데 활용되었다. 안면도와 태안의 안정동위원소(¹³C)와 방사성동위원소(¹⁴C) 비율을 이용하여 해양과 대륙기원의 CO₂를 구분하고, 화석연료 배출량을 산정하는 연구가 수행되었다. CH₄ 탄소안정동위원소비를 이용하여, 안면도와 고산의 CH₄ 증가에 화석연료와 농업관련 미생물 호흡의 영향을 정량적으로 분석하였다. 국내에서 역모델링을 이용한 기원추적 연구에서는 라그랑지안 입자확산 모델을 이용한 방법이 주로 활용되었다. NOAA의 CT 모델을 동아시아 지역에 맞게 수정한 동아시아 CT 모델이 2008년에 구축되었으나, 현재는 개발이 중단되었다. 이후 다수의 역모델링을 대상으로 이용하여 북반구의 CFC11 증가 원인을 규명하는 연구가 있었다. 복잡한 도시에서의 온실가스 변화 원인을 밝히기 위한 연구도 진행되었는데, 서울시에서 위성자료를 활용한 역모델링을 이용하여 배출량의 불확실성을 줄일 수 있었다. 위의 연구들은 라그랑지안 입자모델을 이용하였고, 상대적으로 오일러리안 모델을 이용한 역모델링 연구는 많지 않았다. 2021년에 한반도 영역에 대하여 WRF-Chem/DART를 이용한 오일러리안 역모델링 방법이 개발되었고, 9 km 격자로 하향식 배출량과 연직 대기 농도 분포 분석을 위한 기반을 구축하였다.

국내 온실가스 관측의 국제적 신뢰성 확보와 집중 관측자료 확보를 위해 전 지구적인 관측망과 연계된 연구도 다수 추진되었다. WMO가 주도하는 GAW 관측망에 국립기상과학원이 운영하는 안면도와 고산, 울릉도 온실가스 관측소가 포함되어 있고, 할로젠 화합물의 정밀한 관측을 위해 NOAA에서 주도하는 AGAGE 관측망에 경북대에서 운영하는 고산 관측소

가 포함되었다. 이 외에도 온실가스 위성 관측자료의 보정을 위한 목적으로 TCCON 관측망에 안면도 FTS가 참여하고 있다. 또한 이동 가능하고 편의성을 높인 모바일 FTS를 이용한 COCOON 관측망에도 서울대와 안면도, 이화여대, 표준과학연구원에 위치한 관측소가 참여하고 있다. 역모델링을 기반으로 온실가스의 증가 변화 원인을 찾아내기 위하여, WMO는 IG³IS와 GGGW 프로그램을 주도하고 있고, 국내에서 INVERSE-KOREA 사업이 직접적으로 참여하고 있다. 또한 KORUS-AQ, ACCLIP, ASIA-AQ, YES-AQ 등 다양한 국내의 관측 캠페인을 통해 한반도에서의 온실가스 집중 관측을 추진하고 국내 온실가스 분포 특성과 배출 특성에 관한 연구가 진행되었다.

지금까지 국내에서의 연구 성과를 보면 관측망이 획기적으로 증가하고 있어 전 세계 어느 지역보다도 조밀한 관측망을 확보할 수 있을 것으로 예상된다. 또한 추적자 비율을 이용한 온실가스 증가 원인 분석과 역모델링을 이용한 하향식 배출량을 추정하기 위한 연구도 진행되고 있다. 이러한 연구가 지속적으로 발전하고 기후변화 대응에 효과적으로 활용되기 위해서는 다음과 같은 몇 가지 사항을 고려할 필요가 있을 것이다.

첫 번째로 국내 관측망을 효과적으로 활용하기 위해서는 관측자료 상호간의 비교가 가능하도록 일관성을 확보해야 한다. 즉 국내에서 운영되는 모든 온실가스 관측은 동일한 표준가스를 적용하거나 소급성을 확보하기 위한 노력이 필요하다. 또한 정기적인 순차 비교실험을 수행하여, 동일한 시료에 대한 각 관측소의 값을 비교 점검하고, 상호간의 비교가능성을 주기적으로 확인해야 할 것이다. 이러한 과정을 통해 국내에서 운영되는 모든 관측자료를 통합적으로 분석하여 장기적 변동성이나 지역별 미세한 특성을 찾아낼 수 있을 것이다.

두 번째로 향후 추가되는 관측망으로부터 최대한의 효과를 얻기 위해서는 관측망 구성에 대한 신중한 접근이 필요하다. 온실가스는 체류기간이 길고, 반응성이 약하기 때문에 넓은 풋프린트를 갖는다. 따라서

넓은 지역에 대한 대표성을 갖추기 위해서는 국지적인 발생원의 영향을 강하게 받는 관측지점은 적절하지 않다. Karion *et al.* (2020)은 행성경제층내에서 잘 혼합된 온실가스 농도 관측을 위해 지상 100 m 이상의 높이에서 공기를 포집할 것을 권고하고 있다. 반면에 좁은 영역의 온실가스 농도 특성을 분석하기 위해서는 영역 외부에서 유입되는 온실가스의 영향을 최소화하는 것이 바람직하다. 결국 관측망 구성은 전 지구, 국가, 도시, 산업시설 등 어떤 범위의 온실가스 특성을 파악하고자 하는지에 따라 차이가 난다. 즉 목적에 따라 차별화된 기준이 필요하다. 이러한 기준은 지역적인 온실가스 배출/흡수 특성뿐만 아니라 해륙풍이나 계곡풍, 행성경제층, 습도 등 기상학적 특성을 고려해야 한다. 또한 추적자 비율 산정을 위해 어떠한 가스종을 추가적으로 관측해야 할지도 결정해야 한다. 이와 같이 온실가스 관측망은 고려해야 할 사항이 많고 많은 노력과 비용이 소요되므로, 과학적이고 종합적인 관측망 구축(예, Observing System Simulation Experiments 등)이 필요하다(Kenea *et al.*, 2024; Lopez-Coto *et al.*, 2017). 특히 연구 기관 간의 중복되는 관측을 최소화하면서 협력을 통해 효율적으로 우리나라의 전체적인 온실가스 관측망을 구성하는 방안에 대한 연구가 필요하다.

세 번째로 온실가스 농도 변화의 원인을 정확하게 파악하기 위해서 미량기체와 기상 관측을 강화할 필요가 있다. 인위적, 자연적 기원을 구분하기 위해서는 CO나 N₂O 등 반응 가스 관측을 활용할 수 있다. 이를 통해 온실가스 증가가 내부의 발생에 의한 것인지 외부에서 유입되는 것인지를 분석할 수 있다. CO₂ 동위원소 관측값을 이용하면 화석연료에 의한 증가 원인을 정량화할 수 있으며, CH₄ 동위원소를 이용하면 CH₄ 발생 기원을 구별할 수 있다. 최근 CH₄의 증가 원인을 이해하는 데 동위원소분석이 연구가 매우 중요한 역할을 하고 있다. 또한 온실가스 농도의 변동성은 행성경제층 고도나 지역적인 바람의 변화, 장거리 수송과 관련된 몬순, ENSO 등의 영향을 받기 때문에, 기상관측과 연계된 연구를 통해 온실가스 농도

의 변화 원인을 좀 더 명확하게 이해할 수 있을 것이다.

마지막으로 관측된 온실가스 농도 기반의 하향식 배출량의 적극적인 활용이 필요하다. 온실가스 관측은 기후변화의 심각성에 대한 지표로서 매우 중요한 역할을 하지만 기후변화 대응을 위한 구체적인 정책 실현을 위해서는 온실가스 배출원을 파악해야 한다. IPCC는 하향식 배출량을 기존 상향식 배출량 인벤토리의 검증 및 품질보증을 위한 독립정보로 활용을 권고하고 있고(IPCC, 2019), 이미 많은 국가에서 국가 인벤토리 작성 시 배출량의 신뢰도 확보를 위해 하향식 배출량을 활용하고 있다. 하향식 배출량 산정을 위해서는 온실가스의 관측과 기상모델을 결합하는 역모델링이 필요하다. 역모델링 기술 개발은 온실가스뿐만 아니라 대기의 흐름까지도 정확하게 모의해야 하는 어려움이 있다. 따라서 온실가스 관측 연구진과 수치모델링 연구진의 공동연구를 통해 빠른 시간내에 이러한 어려움을 해소할 수 있을 것이다. 또한 역모델링을 이용한 배출량 산정 연구 결과는 단일 모델을 이용한 경우 불확실성이 많기 때문에 모델간 앙상블을 위한 공동연구도 필요할 것으로 판단된다. 특히 하향식 배출량 산정 연구진과 인벤토리 배출량 산정 연구진의 협력을 통해 우리나라에서 산정하는 배출량의 불확도를 개선하는 데 크게 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

이 연구는 기상청 국립기상과학원 「기상업무지원 기술개발연구」 “기후변화 입체감시 기술개발(KMA2018-00324)”의 지원으로 수행되었습니다.

References

Alberti, C., Hase, F., Frey, M., Dubravica, D., Thomas, B., Dehn, A.,

- Castracane, P., Gregor, S., Roland, H., Baier, B.C., Bés, C., Bi, J., Boesch, H., Butz, A., Cai, Z., Chen, J., Crowell, S.M., Nicholas, M.D., Ene, D., Franklin, J.E., García, O., David, G., Grouiez, B., Grutter, M., Hamdouni, A., Houweling, S., Humpage, N., Jacobs, N., Jeong, S., Joly, L., Jones, N., Jougla, D., Kivi, R., Kleinschek, R., Lopez, M., Medeiros, D., Morino, I., Mostafavipak, N., Müller, A., Hirofumi, O., Paul, I.P., Mahesh, P., Pollard, D., Raffalski, U., Ramonet, M., Ramsay, R., Mahesh, K.S., Shiomi, K., Simpson, W., Stremme, W., Sun, Y., Tanimoto, H., Té, Y., Mengistu, G.T., Voltaire, A.V., Vogel, F., Watanabe, M., Wei, C., Wunch, D., Yamasoe, M., Lu, Z., Orphal, J. (2022) Improved calibration procedures for the EM27/SUN spectrometers of the Collaborative Carbon Column Observing Network (COCCON), *Atmospheric Measurement Techniques*, 15, 2433-2463. <https://doi.org/10.5194/amt-15-2433-2022>
- An, J. (2004) Continuous carbon dioxide (CO₂) monitoring in the atmosphere at Gosan, Jeju [Master dissertation, Seoul National University].
- Australia (2022) National Inventory Report 2020 Volume I, Australian Department of Industry, Science, Energy and Resources, Australia, 432pp. <https://unfccc.int/sites/default/files/resource/aus-2022-nir-27may22.zip1> (accessed on May 27, 2022).
- Bacastow, R. B., Keeling, C.D., Whorf, T.P. (1985) Seasonal amplitude increase in atmospheric CO₂ concentration at Mauna Loa, Hawaii, 1959-1982, *Journal of Geophysical Research*, 90, 10529-10540. <https://doi.org/10.1029/JD090iD06p10529>
- Baker, A.K., Schuck, T.J., Brenninkmeijer, C.A.M., Rauthe-Schöch, A., Slemr, F., van Velthoven, P.F.J., Lelieveld, J. (2012) Estimating the contribution of monsoon-related biogenic production to methane emissions from South Asia using CARBIC observations, *Geophysical Research Letters*, 39(10), L10813. <https://doi.org/10.1029/2021GL051756>
- Bassous, N.J., Rodriguez, A.C., Celina, I., Lomeli, L., Jung, H.Y., Lee, C.K., Joo, S., Kim, S., Yun, C., Hahm, M.G., Ahn, M.-H., Kim, S.-W., Oh, Y.S., Shin, S.R. (2024) Significance of Various Sensing Mechanisms for Detecting Local and Atmospheric Greenhouse Gases (A Review), *Advanced Sensor Research*, 3(2). <https://doi.org/10.1002/adsr.202300094>
- Brault, J.W. (1985) Fourier Transform Spectroscopy, Fifteenth Advanced Course of the Swiss Society of Astronomy and Astrophysics, Geneva Observatory, 61pp.
- Bukosa, B., Deutscher, N.M., Fisher, J.A., Kubistin, D., Walsh, C.P., Griffith, D.W.T. (2019) Simultaneous shipborne measurements of CO₂, CH₄ and CO and their application to improving greenhouse-gas flux estimates in Australia, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 19, 7055-7072. <https://doi.org/10.5194/acp-19-7055-2019>
- Chambers, S.D., Williams, A.G., Conen, F., Griffiths, A.D., Reimann, S., Steinbacher, M., Krummel, P.B., Steele, L.P., van der Schoot, M.V., Galbally, I.E., Molloy, S.B. Barnes, J.E. (2016) Towards a Universal "Baseline" Characterisation of Air Masses for High- and Low-Altitude Observing Stations Using Radon-222, *Aerosol and Air Quality Research*, 16, 885-899. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2015.06.0391>
- Chang, D.Y., Jeong, S., Oh, E., Sim, S., Kim, Y., Park, C., Park, H., Kim, J., Park, J., Kim, H., Choi, J.-S. (2021) Finding the missing link in methane emission inventories using aircraft and mobile observations, *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 236. <https://doi.org/10.1007/s13143-021-00248-z>
- Cho, H.-M., Park, M.-K., Nam, J.-C., Min, D.-H., Kim, K.-R., Song, B.-H., Kim, B.-S., Kim, S.-K., Chong, Y.-S. (1995) Trends of background concentration of atmospheric carbon dioxide in Korea, *Journal of the Korean Meteorological Society*, 31(3), 301-312, (in Korean with English Abstract).
- Choi, H., Redington, A.L., Park, H., Kim, J., Thompson, R.L., Muhle, J., Salameh, P.K., Harth, C.M., Weiss, R.F., Manning, A.J., Park, S. (2024) Revealing the significant acceleration of hydrofluorocarbon (HFC) emissions in eastern Asia through long-term atmospheric observations, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 24, 7309-7330. <https://doi.org/10.5194/acp-24-7309-2024>
- Choi, W.J., Kim, S. (2017) A Study of the Acquisition Plan for GHG Data using CAS500, *Journal of Satellite, Information and Communications*, 12(3), 1-7.
- Chungnam Province Institute of Health and Environment (CIHE) (2024) The report of Chungnam Province Institute of Health and Environment Research, 34, 91-103. <https://www.chungnam.go.kr/healthenv/bbs/B0000377/view.do?nttlId=28499&menuNo=1100034&pageUnit=10&pageIndex=1> (accessed on Mar. 7, 2025).
- Ciais, P., Tans, P.P., Troler, M., White, J.W.C., Francey, R.J. (1995) A large northern hemisphere terrestrial CO₂ sink indicated by the ¹³C/¹²C ratio of atmospheric CO₂, *Science*, 269, 1098-1102.
- Conway, T.J. (1994) Evidence for interannual variability of the carbon cycle from the National Oceanic and Atmospheric Administration. *Climate Monitoring Diag-*

- nostics Laboratory Global Air Sampling Network, *Journal of Geophysical Research*, 99, 22831-22855. <https://doi.org/10.1029/94JD01951>
- Crawford, J.H., Ahn, J.-Y., Al-Saadi, J., Chang, L., Emmons, L.K., Kim, J., Lee, G., Park, J.-H., Park, R.J., Woo, J.H., Song, C.-K., Hong, J.-H., Hong, Y.-D., Lefer, B.L., Lee, M., Lee, T., Kim, S., Min, K.-E., Yum, S.S., Shin, H.J., Kim, Y.-W., Choi, J.-S., Park, J.-S., Szykman, J.J., Long, R.W., Jordan, C.E., Simpson, I.J., Fried, A., Dibb, J.E., Cho, S.Y., Kim, Y.P. (2021) The Korea-United States Air Quality (KORUS-AQ) field study. *Elementa: Science of the Anthropocene*, 9(1), 2-27 <https://doi.org/10.1525/elementa.2020.00163>
- Czeplak, G., Junge, C.E. (1975) Studies of Interhemispheric Exchange in the Troposphere by a Diffusion Model. *Advances in Geophysics*, 18, 57-72. [https://doi.org/10.1016/S0065-2687\(08\)60571-3](https://doi.org/10.1016/S0065-2687(08)60571-3)
- Dlugokencky, E.J., Steele, L.P., Lang, P.M., Masarie, K.A. (1994) The growth rate and distribution of atmospheric methane, *Journal of Geophysical Research*, 99, 17021-17043.
- Dlugokencky, E.J., Bruhwiler, L., White, J.W.C., Emmons, L.K., Novelli, P.C., Montzka, S.A., Masarie, K.A., Lang, P.M., Crotwell, A.M., Miller, J.B., Gatti, L.V. (2009) Observational Constraints on recent increases in the atmospheric CH₄ burden, *Geophysical Research Letter*, 36, L18803. <https://doi.org/10.1029/2009GL039780>
- Fang, S.X., Tans, P.P., Steinbacher, M., Zhou, L.X., Luan, T. (2015) Comparison of the regional CO₂ mole fraction filtering approaches at a WMO/GAW regional station in China, *Atmospheric Measurement Techniques*, 8, 5301-5313. <https://doi.org/10.5194/amt-8-5301-2015>
- Fang, X., Park, S., Saito, T., Tunncliffe, R., Ganesan, A.L., Rigby, M., Li, S., Yokouchi, Y., Fraser, P.J., Harth, C.M., Krummel, P.B., Muhle, J., O'Doherty, S., Salameh, P.K., Simmonds, P.G., Weiss, R.F., Young, D., Lunt, M.F., Manning, A.J., Gressent, A., Prinn, R.G. (2019) Rapid increase in ozone-depleting chloroform emissions from China, *Nature Geoscience*, 12(2), 89-93. <https://doi.org/10.1038/s41561-018-0278-2>
- Flores, E., Viallon, J., Choteau, T., Moussay, P., Wielgosz, R.I., Kang, N., Kim, B.M., Zalewska, E., van der Veen, A., Konopelko, L., Wu, H., Han, Q., Rhoderick, G., Guenther, F.R., Watanabe, T., Shimosaka, T., Kato, K., Hall, B., Brewer, P. (2014) International comparison CCQM-K82: Methane in Air at Ambient level (1800-2200) nmol/mol, final report, Bureau International des Poids et Mesures (BIPM) and National Institute of Standards and Technology (NIST). <https://www.bipm.org/documents/20126/44675878/CCQM-K82.pdf/510dce59-8df2-a7fa-06ff-be8eefdd3857> (accessed Mar 3, 2025).
- Flores, E., Viallon, J., Choteau, T., Moussay, P., Idrees, F., Wielgosz, R.I., Lee, J., Zalewska, E., Nieuwenkamp, G., van der Veen, A., Konopelko, L.A., Kustikov, Y.A., Kolobova, A.V., Chubchenko, Y.K., Efremova, O.V., Zhe, B.I., Zhou, Z., Miller Jr, W.R., Rhoderick, G.C., Hodge, J.T., Shimosaka, T., Aoki, N., Hall, B., Brewer, P., Cieciora, D., Segal, M., Mace, T., Fűkő, J., Szilágyi, Z.N., Büki, T., Jozela, M.I., Ntsasa, N.G., Leshabane, N., Tshilongo, J., Johri, P., Tarhan, T. (2018) International comparison, CCQM-K120a Carbon dioxide in air at background level (380-480) $\mu\text{mol/mol}$, CCQM-K120b carbon dioxide in air at urban level (480-800) $\mu\text{mol/mol}$, final report, Bureau International des Poids et Mesures (BIPM) and National Institute of Standards and Technology (NIST), USA. <https://www.bipm.org/documents/20126/44695456/CCQM-K120.pdf/c76f0923-8590-3d2c-05b1-fc0f5a1df2e6> (accessed Mar 3, 2025).
- Frey, M., Sha, M.K., Hase, F., Kiel, M., Blumenstock, T., Harig, R., Surawicz, G., Deutscher, N.M., Shiomi, K., Franklin, J. E., Bösch, H., Chen, J., Grutter, M., Ohyama, H., Sun, Y., Butz, A., Mengistu Tsidu, G., Ene, D., Wunch, D., Cao, Z., Garcia, O., Ramonet, M., Vogel, F., Orphal, J. (2019) Building the COCCON: long-term stability and ensemble performance of the EM27/SUN Fourier transform spectrometer, *Atmospheric Measurement Technique*, 12, 1513-1530, <https://doi.org/10.5194/amt-12-1513-2019>
- Germany (2022) National Inventory Report for the German Greenhouse Gas Inventory 1990-2020, Federal Environment Agency, Germany, 1042pp. https://unfccc.int/sites/default/files/resource/deu-2022-nir-14apr22_0.zip (accessed on May 27, 2022).
- Geum, S., Park, H., Choi, H., Kim, Y., Lee, H., Joo, S., Oh, Y.-S., Michel, S.E., Park, S. (2024) Identifying emission sources of CH₄ in East Asia based on in-situ observations of atmospheric $\delta^{13}\text{C-CH}_4$ and C₂H₆. *Science of The Total Environment*, 908, 168433. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168433>
- Ghosh, S., Jung, K., Jeon, E.C., Kim, K.-H. (2010) Seasonal and diurnal trend of carbon dioxide in a mountainous site in Seoul, Korea. *Asian Journal of Atmospheric Environment*, 4, 166-176.
- Gyeonggi Province Institute of Health and Environment (GIHE) (2024) The report of Gyeonggi Province Institute of Health and Environment, 37, 33-40.

- Graven, H., Keeling, R.F., Rogelj, J. (2020) Changes to carbon isotopes in atmospheric CO₂ over the industrial Era and into the future, *Global Biogeochemical Cycles*, 34, e2019GB006170. <https://doi.org/10.1029/2019GB006170>
- Hall, B.D., Engel, A., Muhle, J., Elkins, J.W., Artuso, F., Atlas, E., Aydin, M., Blake, D., Brunke, E.-G., Chiavarini, S., Fraser, P.J., Happell, J., Krummel, P.B., Levin, I., Loewenstein, M., Montzka, S.A., O'Doherty, S., Reimann, S., Rhoderick, G., Saltzman, E.S., Scheel, H.E., Weiss, R.F., Worthy, D., Yokouchi, Y. (2014) Results from the International Halocarbons in Air Comparison Experiment (IHALACE), *Atmospheric Measurement Techniques*, 7(2), <https://doi.org/10.5194/amt-7-469-2014>
- Hall, B.D., Crotwell, A.M., Kitzis, D.R., Mefford, T., Miller, B.R., Schibig, M.F., Tans, P.P. (2021) Revision of the World Meteorological Organization Global Atmosphere-Watch (WMO/GAW) CO₂ calibration scale, *Atmospheric Measurement Techniques*, 14(4), 3015-3032. <https://doi.org/10.5194/amt-14-3015-2021>
- Halliday, H.S., DiGangi, J.P., Choi, Y., Diskin, G.S., Pusede, S.E., Rana, M., Nowak, J.B., Knute, C., Ren, X., He, H. (2019) Using short-term CO/CO₂ ratios to assess air mass differences over the Korean peninsula during KOURS-AQ, *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 124, 10951-10972. <https://doi.org/10.1029/2018JD029697>
- Han, I.-S., Lee, J.-S., Kim, C., Yang, J.-Y. (2023) Impacts, projections and assessments related to climate change in ocean and fisheries, *Journal of Climate Change Research*, 14(6-2), 965-972, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.15531/KSCCR.2023.14.6.965>
- Hase, F., Drouin, B., Roehl, C., Toon, G.C., Wennberg, P.O., Wunch, D., Blumenstock, T., Desmet, F., Feist, D., Heikinen, P., Maziere, M., Rettinger, M., Robinson, J., Schneider, M., Sherlock, V., Sussmann, R., Te, Y., Warneke, T., Weinzier, I.C. (2013) Calibration of sealed HCl cells used for TCCON instrumental line shape monitoring, *Atmospheric Measurement Techniques*, 6(12), 3527-3537. <https://doi.org/10.5194/amt-6-3527-2013>
- Hase, F., Hannigan, J., Coffey, M., Goldman, A., Hopfner, M., Jones, N., Rinsland, P., Wood, S. (2004) Intercomparison of retrieval codes used for the analysis of high-resolution, ground-based FTIR measurements, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 87, 25-52. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2003.12.008>
- Helfter, C., Mullinger, N., Vieno, M., O'Doherty, S., Ramonet, M., Palmer, P.I., Nemitz, E. (2019) Country-Scale greenhouse gas budgets using shipborne measurements: a case study for the UK and Ireland. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 19, 3043-3063. <https://doi.org/10.5194/acp-19-3043-2019>
- Hoshina, Y., Tohjima, Y., Katsumata, K., Machida, T., Nakaoka, S.-I. (2018) In situ observation of atmospheric oxygen and carbon dioxide in the North Pacific using a cargo ship, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18, 9283-9295. <https://doi.org/10.5194/acp-18-9283-2018>
- Hsu, Y.K., Vancuren, T., Park, S., Jakober, C., Herner, J., FitzGibbon, M., Blake, D.R., Parrish, D.D. (2010) Methane emissions inventory verification in southern California. *Atmospheric Environment*, 44, 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.10.002>
- Ihsane, G., Chaimae, A., Mounir, G., Abdellatif, K. (2024) Applications of machine learning & Internet of Things for outdoor air pollution monitoring and prediction: A systematic literature review, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 137, 109-182. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2024.109182>
- Integrated Carbon Observation System Research Infrastructure (ICOS RI) (2020) ICOS Atmosphere Station Specification V2.0 (editor: O. Laurent), ICOS ERIC. <https://doi.org/10.18160/GK28-22188>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2019) 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Volume 1: General Guidance and Reporting, Ch6 QUALITY ASSURANCE/QUALITY CONTROL AND VERIFICATION, IPCC, Switzerland. https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/1_Volume1/V1_6_Ch6_QA_QC.pdf
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2023) Summary for policymakers. In: *Climate change 2023: Synthesis report*, Switzerland, 42pp, <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001>
- Jeong, S., Shin, D., Yoo, H., Won, D. (2025) Greenhouse gas measurement using Boseong Tall-Tower During ASIA-AQ campaign, *Journal of Environmental Analysis, Health and Toxicology*, (in revision) (in Korean with English Abstract).
- Joo, S., Lee, H., Hong, J., Kwon, D., Shim, C., Oh, Y.S., Li, S., Kenea, S.T., Lee, S., Kim, J.E., Boo, K.-O. (2022) Consideration of top-down greenhouse gas estimation approaches to prepare carbon neutral policy, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 38(6), 933-947, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2022.38.6.933>
- Ju, O.-J., Cha, J.-S., Lee, D.-W., Kim, Y.-M., Lee, J.-Y., Park, I.-S.

- (2007) Analysis of Variation Characteristics of Greenhouse Gases in the Background Atmosphere Measured at Gosan, Jeju, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 23(4), 487-497, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2007.23.4.487>
- Kang, J., Kim, W., Yun, J., Lee, J., Kim, S. (2018) A Study on the Urban Heat Simulation Model Incorporating the Climate Changes, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 34(5), 697-707, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2018.34.5.697>
- Kang, M., Ahn, M.-H., Kang, M., Oh, Y.-S. (2025) Greenhouse gas measurement using a mobile FTS during ASIA-AQ, Remote Sensing of the Atmosphere, Clouds, Precipitation VIII, SPIE, 13262, 132620P1-132620P10. <https://doi.org/10.1117/12.303995>
- Karion, A., Callahan, W., Stock, M., Prinzivalli, S., Verhulst, K.R., Kim, J., Salameh, P.K., Lopez-Coto, I., Whetstone, J. (2020) Greenhouse gas observations from the North-east Corridor tower network, *Earth System Science Data*, 12, 699-717. <https://doi.org/10.5194/essd-12-699-2020>
- Kenea, S.T., Lee, H., Joo, S., Li, S., Labzovskii, L.D., Chung, C.-Y., Kim, Y.-H. (2021) Interannual variability of atmospheric CH₄ and its driver over South Korea captured by integrated data in 2019, *Remote Sensing*, 13, 2266. <https://doi.org/10.3390/rs13122266>
- Kenea, S.T., Shin, D., Li, S., Joo, S., Kim, S., Labzovskii, L.D. (2024) Designing additional CO₂ in-situ surface observation networks over South Korea using bayesian inversion coupled with Lagrangian modelling, *Atmospheric Environment*, 326, 120471. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2024.120471>
- Kim, C., Han, I.-S., Lee, J.-S., Yang, J.-Y. (2024a) Establishment of a foundation for risk assessment in fisheries issues and identification of the impact of marine climate change, *Journal of Climate Change Research*, 15(5-2), 909-918, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.15531/KSCCR.2024.15.5.909>
- Kim, C., Kim, J., Hong, M., Song, C., Lee, W.-K. (2023a) Prediction of the Future Distribution of Tree Species Based on the Representative Concentration Pathways (RCP) and Shared Socioeconomic Pathways (SSP) Climate Change Scenarios in Korea, *Journal of Climate Change Research*, 14(2), 119-134, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.15531/KSCCR.2023.14.2.119>
- Kim, C.G., Park, J., Cho, J. (2018a) Future Climate Change Impact Assessment of Chungju Dam Inflow Considering Selection of GCMs and Downscaling Technique, *Journal of Climate Change Research*, 9(1), 47-58, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.15531/KSCCR.2018.9.1.47>
- Kim, D.S., Jeong, J.-M., Park, H.J., Kim, Y.K., Lee, K.G., Choi, B.G. (2021a) Highly Concentrated, Conductive, Defect-free Graphene Ink for Screen-Printed Sensor Application, *Nano-Micro Letters*, 13(87), 3-14. <https://doi.org/10.1007/s40820-021-00617-3>
- Kim, E., Baek, S., Yoon, H. (2024b) The impact of climate change on ski tourism demand: Focusing on the nonlinear effects of weather, *Journal of Climate Change Research*, 15(5-1), 635-652, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.15531/KSCCR.2024.15.5.635>
- Kim, G.-Y., Jeong, H.-C., Kim, M.-K., Roh, K.-A., Lee, D.-B., Kang, K.-K. (2011) Evaluation of indirect N₂O Emission from Nitrogen Leaching in the Ground-water in Korea. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*, 44(6), 1232-1238, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.7745/KJSSF.2011.44.6.1232>
- Kim, H.-O., Yoon, B.-Y., Hong, S.-H. (2013) Technical Trend of Analysis on Carbon Dioxide Monitoring using Space-based Observations, *Current Industrial and Technological Trends in Aerospace*, 11(2), 3-11.
- Kim, H.-S., Chung, Y.-S., Tans, P.P. (2014a) A study on carbon dioxide concentrations and carbon isotopes measured in East Asia during 1991-2011, *Air Quality, Atmosphere & Health*, 7, 173-179.
- Kim, H.-S., Chung, Y.S., Tans, P.P., Dlugokencky, E.J. (2015) Decadal trends of atmospheric methane in East Asia from 1991-2013, *Air Quality, Atmosphere & Health*, 8, 293-298.
- Kim, J., Kim, H.M., Cho, C.-H. (2012a) Application of Carbon Tracking System based on Ensemble Kalman Filter on the Diagnosis of Carbon Cycle in Asia, *Atmosphere*, 22(4), 415-427. <https://doi.org/10.14191/atmos.2012.22.4.415>
- Kim, J., Kim, H.M., Cho, C.-H. (2014b) The Effect of Optimization and the Nesting Domain on Carbon Flux Analyses in Asia Using a Carbon Tracking System Based on the Ensemble Kalman Filter, *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 50(30), 327-344. <https://doi.org/10.1007/s13143-014-0020-y>
- Kim, J., Kim, H.M., Cho, C.-H. (2014c) Influence of CO₂ observations on the optimized CO₂ flux in an ensemble Kalman filter, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14, 13515-13530. <https://doi.org/10.5194/acp-14-13515-2014>

13515-2014

- Kim, J., Kim, H.M., Cho, C.-H., Boo, K.-O., Jacobson, A.R., Sasakawa, M., Machida, T., Arshinov, M., Fedoseev, N. (2017) Impact of Siberian observations on the optimization of surface CO₂ flux, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17, 2881-2899. <https://doi.org/10.5194/acp-17-2881-2017>
- Kim, J., Kim, H.M., Cho, C.-H. (2018b) Effect of Data Assimilation Parameters on The Optimized Surface CO₂ Flux in Asia, *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Science*, 54(1), 1-17. <https://doi.org/10.1007/s13143-017-0049-9>
- Kim, J., Thompson, R., Park, H., Bogle, S., Mühle, J., Park, M.K., Kim, Y., Harth, C.M., Salameh, P.K., Schmidt, R., Ottinger, D., Park, S., Weiss, R.F. (2021b) Emissions of tetrafluoromethane (CF₄) and hexafluoroethane (C₂F₆) from East Asia: 2008 to 2019, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 126(16), e2021JD034888.
- Kim, J.-U., Kim, M.-H., Chung, C.-Y., Byun, Y.-H., Kim, T. (2023b) High-resolution projection of future climate change over South Korea under global warming levels of 1.5°C, 2°C, and 3°C based on shared socioeconomic pathways scenarios, *Journal of Climate Change Research*, 14(4), 501-520, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.15531/KSCCR.2023.14.4.501>
- Kim, J., Li, S., Kim, K.-R., Stohl, A., Muhle, J., Kim, S.-K., Park, M.-K., Kang, D.-J., Lee, G., Harth, C.M., Salameh, P.K., Weiss, R.F. (2010) Regional atmospheric emissions determined from measurements at Jeju Island, Korea: Halogenated compounds from China, *Geophysical Research Letter*, 37, L12801. <https://doi.org/10.1029/2010GL043263>
- Kim, J., Li, S., Muhle, J., Stohl, A., Kim, S.K., Park, S., Park, M.-K., Weiss, R.F., Kim, K.R. (2012b) Overview of the findings from measurements of halogenated compounds at Gosan (Jeju Island, Korea) quantifying emissions in East Asia, *Journal of Integrative Environmental Sciences*, 9: 71-80. <https://doi.org/10.1080/1943815X.2012.696548>
- Kim, M., Jang, S., Lee, G., Son, Y. (2024c) Analysis of dam stability based on future climate change scenarios, *Journal of Climate Change Research* 2024, 15(5-2), 965-976, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.15531/KSCCR.2024.15.5.965>
- Kim, M., Hwang, J., Kim, G., Na, T., Kim, T.-H., Hyun, J.-H. (2022) Carbon cycling in the East Sea (Japan Sea): A Review, *Frontiers In Marine Science*, 9. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.938935>
- Kim, M.-H., Oh, Y.-S., Ahn, M.-H., Kang, M., Shi, H., Park, R., Kim, M., Joo, S., Kim, S.-W. (2024d) Retrieving the Vertical Profile of Greenhouse Gas Using Fourier Transform Spectrometer (FTS) - Part I: Carbon Dioxide (CO₂), *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 40(3), 349-360. <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2024.40.3.349>
- Kim, M.-H., Oh, Y.-S., Ahn, M.-H., Kang, M., Shi, H., Park, R., Kim, M., Joo, S., Kim, S.-W. (2024e) Retrieving the Vertical Profile of Greenhouse Gas Using Fourier Transform Spectrometer (FTS) - Part II: Methane (CH₄), *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 40(3), 361-372. <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2024.40.3.361>
- Kim, S. (2024) Climate Change-Induced Physical Risks' Impact on Korean Commercial Banks and Property Insurance Companies in the Long Run, *Atmosphere*, 34(2), 107-121, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.14191/Atmos.2024.34.2.107>
- Kim, S.-L., Yu, O.-H. (2021) Understanding the spatial and Temporal Distribution and Environmental Characteristics of Polychaete Assemblages in the Coastal Waters of Ulleungdo, East Sea of Korea, *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(11), 1310. <https://doi.org/10.3390/jmse9111310>
- Kim, S.T., Lee, W.-S., Jung, I.-W., Han, J.-M., Byun, Y.-H., Kim, J.-U. (2023c) Change in Extreme Precipitation by Watersheds of South Korea Under Future Shared Socio-Economic Pathway (SSP) Scenarios, *Journal of Climate Change Research*, 14(2), 83-093, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.15531/KSCCR.2023.14.2.083>
- Kim, T., Sung, S., Park, J.-H., Ryu, J. (2023d) Impacts of Climate Change on Coastal Tourist Destinations : Focusing on the Changes in Weather Conditions and Flood Areas of Beaches, *Journal of Climate Change Research*, 14(2), 135-144, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.15531/KSCCR.2023.14.2.135>
- Koo, B. (2025) Development of High-Resolution Regional Modeling System for Greenhouse Gas Emission Monitoring, Republic of Korea, 62pp. [Master dissertation, Yonsei University]. https://dcollection.yonsei.ac.kr/public_resource/pdf/000000559274_20250305165216.pdf (accessed on Mar. 5. 2025).
- Korea Meteorological Administration (KMA) (2024) Top-down monitoring system development of greenhouse gases emission based on the observation, KMA, Republic of Korea, 86pp. <https://scienceon.kisti.re.kr/commons/util/originalView.do?cn=TRKO2024>

- 00012601&dbt=TRKO&rn=(accessed on Mar. 3. 2025).
- Kwon, D. (2022) Development of High-Resolution Regional Modeling System for Greenhouse Gas Emission Monitoring, Republic of Korea, 106pp. [Master dissertation, Yonsei University]. https://dcollection.yonsei.ac.kr/public_resource/pdf/000000545502_20250305165321.pdf (accessed on Mar. 5. 2025).
- Labzovskii, L.D., Mak, H.W.L., Kenea, S.T., Rhee, J.-S., Lashkari, A., Li, S., Goo, T.-Y., Oh, Y.-S., Byun, Y.-H. (2019) What can we learn about effectiveness of carbon reduction policies from inter annual variability of fossil fuel CO₂ emissions in East Asia?, *Environmental Science & Policy*, 96, 132-140. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2019.03.011>
- Laughner, J.L., Toon, G.C., Joseph, M., Christof, P., Sébastien, R., Wunch, D., Blavier, J.-F., David, T.W.G., Pauli, H., Ralph, F.K., Matthäus, K., Rigel, K., Coleen, M.R., Britton, B.S., Bianca, C.B., Chen, H., Choi, Y., Nicholas, M.D., Joshua, P.D., Jochen, G., Benedikt, H., Pascal, J., Thomas, L., Xin, L., Erin, M., Kathryn, M., John, M., Morino, I., Justus, N., Hirofumi, O., David, F.P., Markus, R., Haris, R., Constantina, R., Mahesh, K.S., Kei, S., Kimberly, S., Ralf, S., Té, Y., Voltaire, A.V., Steven, C.W., Minqiang, Z., Wennberg, P.O. (2024) The Total Carbon Column Observing Network's GGG2020 data version, *Earth System Science Data*, 16(5), 2197-2260. <https://doi.org/10.5194/essd-16-2197-2024>
- Lee, H., Han, S.-O., Ryoo, S.-B., Lee, J.-S., Lee, G.-W. (2019) The measurement of atmospheric CO₂ at KMA GAW regional stations, its characteristics, and comparisons with other East Asian sites, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 19, 2149-2163. <https://doi.org/10.5194/acp-19-2149-2019>
- Lee, H., Ko, M., Kim, S., Seo, W., Park, Y.S. (2020a) Comparison of GC-μECD and OA-ICOS Methods for High-Precision Measurements of Atmospheric Nitrous Oxide (N₂O) at a Korean GAW Station, *Atmosphere*, 11(9), 948. <https://doi.org/10.3390/atmos11090948>
- Lee, H., Dlugokencky, E.J., Turnbull, J.C., Lee, S., Lehman, S.J., Miller, J.B., Petron, G., Lim, J.-S., Lee, G.-W., Lee, S.-S., Park, Y.-S. (2020b) Observations of atmospheric ¹⁴CO₂ at Anmyeondo GAW station, South Korea: implications for fossil fuel CO₂ and emission ratios, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 20, 12033-12045. <https://doi.org/10.5194/acp-20-12033-2020>
- Lee, H., Lee, J., Hall, B., Dlugokencky, E., Kim, S., Kim, Y.H. (2021a) Inter-comparison activities of the WMO/GAW world calibration centre for SF₆: a strategy for the high precision atmospheric measurements, *Journal of Korean Society Atmospheric Environment*, 37(3), 512-522. <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2021.37.3.512>
- Lee, H., Seo, W., Li, S., Lee, S., Kenea, S.T., Joo, S. (2023) Measurement report: Atmospheric CH₄ at regional stations of the Korea Meteorological Administration-Global Atmosphere Watch Programme: measurement, characteristics, and long-term changes of its drivers, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 23, 7141-7159. <https://doi.org/10.5194/acp-23-7141-2023>
- Lee, J.-B., Lee, H.-J., Moon, K.J., Hong, S.-C., Kim, D.-R., Song, C.-K., Hong, Y.-D. (2012) Vulnerability Assessment of Human Health Sector due to Climate Change: Focus on Ozone, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 28(1), 22-38, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2012.28.1.022>
- Lee, S., Shin, D., Joo, S., Seo, W., Kim, S. (2024) Analysis of carbon dioxide growth rate observed at Anmyeon-do, Korea, globally over the last decade, *Journal of the Korean Society for Atmospheric Environment*, 40(6), 601-613, (in Korean with English Abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2024.40.6.601>
- Lee, S.B., Hong, J.H., Kim, D.G., Lee, S.H., Lee, J.A., Lee, S.A. (2008) Development of GHG emission inventory by bottom-up approach and analysis of emission characteristics, *Proceeding of the 47th Meeting of KOSAE*, 489-490.
- Lee, S.-J., Lee, H., Kim, S., Kim, Y. (2021b) Inter-comparison Experiment for Korea GAW Network to Improve the GHGs Measurement Quality, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 37(5), 790-802. <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2021.37.5.790>
- Lee, S.-J., Song, S.-K., Park, Y.-H. (2016) A study on changes in CO₂ concentrations and their impact on radiative forcing at urban center and background site on Jeju island in Recent years, *Journal of Environmental Science International*, 25(7), 973-987, (in Korean with English Abstract). <https://doi.org/10.5322/JESI.2016.25.7.973>
- Lee, S.-J., Song, S.-K., Han, S.-B. (2017) Influence of greenhouse gases on radiative forcing at urban center and background sites on Jeju Island using the atmospheric radiative transfer model, *Atmosphere*, 27(4), 423-433. <https://doi.org/10.14191/Atmos.2017.27.4.423>
- Li, S., Kenea, S.T., Kim, S., Yoo, H.-J., Joo, S., Lee, H., Oh, S., Jeong, M., Seo, W., Ko, M., Lee, S., Oh, Y.-S., Shin, D. (2024) Latitudinal distribution and sources analysis of greenhouse gases and air pollutants observed during the

- 2021 Yellow Sea air quality campaign aboard a research vessel, *Atmospheric Environment*, 317. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2023.120201>
- Li, S., Kim, J., Kim, K.R., Mühle, J., Kim, S.K., Park, M.K., Stohl, A., Kang, D., Arnold, T., Harth, C.M., Salameh, P.K., Weiss, R.F. (2011) Emissions of halogenated compounds in East Asia determined from measurements at Jeju Island, Korea, *Environmental Science & Technology*, 45(13), 5668-5675. <https://doi.org/10.1021/es104124k>
- Li, S., Kim, Y., Kim, J., Kenea, S.T., Goo, T.Y., Labzovskii, L.D., Byun, Y.H. (2020) In Situ Aircraft Measurements of CO₂ and CH₄: Mapping Spatio-Temporal Variations over Western Korea in High-Resolutions. *Remote Sensing*, 12(18), 3093. <https://doi.org/10.3390/rs12183093>
- Li, S., Kim, S., Lee, H., Kenea, S.T., Kim, J.E., Chung, S.-Y., Kim, Y.-H. (2022) Analysis of source distribution of high carbon monoxide events using airborne and surface observations in Korea, *Atmospheric Environment*, 289, 119316. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2022.119316>
- Li, S., Goo, T.-Y., Moon, H., Labzovskii, L., Kenea, S.T., Oh, Y.-S., Lee, H., Byun, Y.-H. (2019) Airborne in-situ measurements of CO₂ and CH₄ in Korea: case study of vertical distribution measured at Anmyeon-do in winter, *Atmosphere*, 29(5), 511-523. <https://doi.org/10.1491/Atmos.2019.29.511>
- Lim, J.S., Lee, J., Moon, D., Kim, J.S., Lee, J., Hall, B.D. (2017) Gravimetric standard gas mixtures for global monitoring of atmospheric SF₆, *Analytical Chemistry*, 89(22), 12068-12075
- Lopez-Coto, I., Ghosh, S., Prasad, K., Whetstone, J. (2017) Tower-based greenhouse gas measurement network design—The National Institute of Standards and Technology North East Corridor Testbed, *Advances in Atmospheric Sciences*, 34(9), 1095-1105. <https://doi.org/10.1007/s00376-017-6094-6>
- Lowe, D.C., Guenther, P.R., Keeling, C.D. (1979) The concentration of atmospheric carbon dioxide at Baring Head, New Zealand, *Tellus*, 31(1), 58-67. <https://doi.org/10.3402/tellusa.v31i1.10410>
- Machida, T., Kita, K., Kondo, Y., Blake, D., Kawakami, S., Inoue, G., Ogawa, T. (2002) Vertical and meridional distributions of the atmospheric CO₂ mixing ratio between northern midlatitudes and southern subtropics, *Journal of Geophysics and Research*, 107, 8401. <https://doi.org/10.1029/2001JD000910>
- Matthias, F., Mahesh, K.S., Frank, H., Matthäus, K., Thomas, B., Roland, H., Gregor, S., Nicholas, M.D., Kei, S., Jonathan, E.F., Hartmut, B., Jia, C., Michel, G., Hirofumi, O., Sun, Y., André, B., Gizaw, T., Dragos, E., Wunch, D., Zhen-song, C., Omaisra, G., Michel, R., Felix, V., Johannes, O. (2019) Building the COLlaborative Carbon Column Observing Network (COCCON): long-term stability and ensemble performance of the EM27/SUN Fourier transform spectrometer, *Atmospheric Measurement Techniques*, 12, 1513-1530. <https://doi.org/10.5194/amt-12-1513-2019>
- McCulloch, A., Midgley, P.M., Ashford, P. (2003) Release of refrigerant gases (CFC-12, HCFC-22 and HFC-134a) to the atmosphere, *Atmospheric Environment*, 37(7), 889-902. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(02\)00975-5](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(02)00975-5)
- Miller, B.R., Weiss, R.F., Salameh, P.K., Tanhu, T., Grealley, B.R., Mühle, J., Simmons, P.G. (2008) Medusa: A sample preconcentration and GC-MS detector system for in-situ measurements of atmospheric trace halocarbons, Hydrocarbons, and sulfur compounds, *Analytical Chemistry*, 80(5), 1536-1545. <https://doi.org/10.1021/ac702084k>
- Montzka, S.A., Dutton, G.S., Yu, P., Ray, E., Portmann, R.W., Daniel, J.S., Kuijpers, L., Hall, B.D., Mondeel, D., Siso, C., Nance, J.D., Rigby, M., Manning, A.J., Hu, L., Moore, F., Miller, B.R., Elkins, J.W. (2018) An unexpected and persistent increase in global emissions of ozone-depleting CFC-11, *Nature*, 557(7705), 413-417. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0106-2>
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2024a) Annual report of air quality in Korea, Republic of Korea, 407pp. <https://www.airkorea.or.kr/jfile/readDownloadFile.do?fileId=1941a24dae590&fileSeq=1> (accessed on Apr. 15, 2025).
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2024b) Guidelines for the Installation and Operation of Air Quality Monitoring Networks, Republic of Korea, 667pp. <https://www.airkorea.or.kr/jfile/readDownloadFile.do?fileId=1960eb694f138&fileSeq=1&useSecurity=&uploadMode=db> (accessed on Apr. 15, 2025).
- National Institute of Meteorological Sciences (NIMS) (2021) Report of Global Atmosphere Watch 2020, Republic of Korea, 411pp. http://www.climate.go.kr/home/cc_data/2021/Report_of_Global%20Atmosphere%20Watch_2020.pdf (accessed on Apr. 15, 2025).
- National Institute of Meteorological Sciences (NIMS) (2022) Report of Global Atmosphere Watch 2021, Republic of Korea, 330pp. http://www.climate.go.kr/home/cc_data/2022/Report%20of%20Global%20Atmo

- sphere%20Watch%202021.pdf (accessed on Apr. 15, 2025).
- National Institute of Meteorological Sciences (NIMS) (2024) Report of Global Atmosphere Watch 2023, Republic of Korea, 134pp. <http://www.climate.go.kr/home/bbs/view.php?code=24&bname=report&vcode=6940&cpage=1&vNum=85&skind=&sword=&category1=&category2=> (accessed on Apr. 15, 2025).
- New Zealand (2022) 1990-2020 New Zealand's Greenhouse Gas Inventory Volume 1, Ministry for the Environment, New Zealand, 531pp. https://unfccc.int/sites/default/files/resource/nzl-2022-nir-14apr22_0.zip
- O'Doherty, S., Simmonds, P.G., Cunlold, D.M., Wang, H.J., Sturrock, G.A., Fraser, P.J., Ryall, D., Derwent, R.G., Weiss, R.F., Salameh, P., Miller, B.R., Prinn, R.G. (2001) In situ Chloroform measurements at advanced global atmospheric gases experiment atmospheric research stations from 1994 to 1998, *Journal of Geophysical Research*, 106(D17), 20429-20444. <https://doi.org/10.1029/2000JD900792>
- Oh, J., Kim, A., Kang, C., Kim, H. (2023) Health effects of climate change: Focusing on health sector risks, *Journal of Climate Change Research*, 14(6-1), 859-869, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.15531/KSCCR.2023.14.6.859>
- Oh, Y.-S., Kim, H.-S., Bassous, N., Kim, D.-W., Lee, C.-K., Joo, S., Lee, H., Chung, C.-Y., Kim, Y.-H., Jung, S.-M., Shin, S.-R., Jung, H.-Y. (2022) Non-contact, low-cost regional greenhouse gases detection via 3D laminated graphene-based photoelectric construct, *Carbon*, 197, 246-252. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2022.06.044>
- Oh, Y.-S., Kenea, S.T., Goo, T.-Y., Chung, K.-S., Rhee, J.-S., Ou, M.-L., Byun, Y.-H., Wennberg, P.O., Matthes, K., Joshua, D.G., Glenn, D., Voltaire, V., David, G. (2018) Characteristics of greenhouse gas concentrations derived from ground-based FTS spectra at Anmyeondo, South Korea, *Atmospheric Measurement Techniques*, 11, 2361-2374. <https://doi.org/10.5194/amt-11-2361-2018>
- Pan, L.L., Kinnison, D., Liang, Q., Chin, M., Santee, M.L., Fleming, J., Smith, W.P., Honomichl, S.B., Bresch, J.F., Lait, L.R., Zhu, Y., Tilmes, S., Colarco, P.R., Warner, J., Vuvan, A., Clerbaux, C., Atlas, E.L., Newman, P.A., Thornberry, T., Randel, W.J., Toon, W.B. (2022) A multimodel investigation of Asian summer monsoon UTLS transport over the western pacific, *Journal of Geophysical Research-Atmosphere*, 127, e2022JD037511. <https://doi.org/10.1029/2022JD037511>
- Pan, L.L., Atlas, E.L., Honomichl, S.B., Smith, W.P., Kinnison, D.E., Solomon, S., Santee, M.L., Saiz-Lopez, A., Laube, J.C., Wang, B., Ueyama, R., Bresch, J.E., Hornbrook, R.S., Apel, E.C., Hills, A.J., Treadaway, V., Smith, K., Schauffler, S., Donnelly, S., Hendershot, R., Lueb, R., Campos, T., Viciani, S., D'Amato, F., Bianchini, G., Barucci, M., Podolske, J.R., Iraci, L.T., Gurganus, C., Bui, P., Dean-Day, J.M., Millán, L., Ryoo, J.-M., Barletta, B., Koo, J.-H., Kim, J., Liang, Q., Randel, W.J., Thornberry, T., Newman, P.A. (2024) East Asian summer monsoon delivers large abundances of very short-lived organic chlorine substances to the lower stratosphere, *Proceedings of the National-Academy of Sciences*, 121(12) e2318716121. <https://doi.org/10.1073/pnas.2318716121>
- Park, C., Jeong, S., Park, H., Woo, J.-H., Sim, S., Kim, J., Son, J., Park, H., Shin, Y., Shin, J.-H., Kwon, S.-M., Lee, W.-Y. (2021a) Challenges in Monitoring Atmospheric CO₂ Concentrations in Seoul using low-cost sensor, *Asian-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 57, 547-553. <https://doi.org/10.1007/s13143-020-00213-2>
- Park, C., Jeong, S., Shin, Y.-S., Cha, Y.-S., Lee, H.-C. (2021b) Reduction in urban atmospheric CO₂ enhancement in Seoul, South Korea, resulting from social distancing policies during the COVID-19 pandemic, *Atmospheric Pollution Research*, 12(9), 101176. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2021.101176>
- Park, J. (2023) Characterizing urban methane emissions in Seoul, South Korea using a greenhouse gas monitoring mobile lab [Master dissertation, Seoul National University].
- Park, S.-W., Choi, J.-H., Park, J.-W. (2011) The estimation of N₂O emissions from municipal solid waste incineration facilities: The Korea case, *Waste Management*, 31(8), 1765-1771. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.03.010>
- Park, S., Li, S., Muhle, J., O'Doherty, S., Weiss, R.F., Fang, X., Reimann, S., Prinn, R.G. (2018) Toward resolving the budget discrepancy of ozone-depleting carbon tetrachloride (CCl₄): an analysis of top-down emissions from China. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18(16), 11729-11738. <https://doi.org/10.5194/acp-18-11729-2018>
- Park, S., Western, L.M., Saito, T., Redington, A.L., Henne, S., Fang, X., Prinn, R.G., Manning, A.J., Montzka, S.A., Fraser, P.J., Ganesan, A.L., Harth, C.M., Kim, J., Krummel, P.B., Liang, Q., Muhle, J., O'Doherty, S., Park, H., Park, M.-K., Reimann, S., Salameh, P.K., Weiss, R.F., Rigby, M. (2021c) A decline in emissions of CFC-11

- and related chemicals from eastern China, *Nature*, 590, 433-437. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03277-w>
- Park, S.-Y., Park, S.-H., Lee, K.-H., Jung, H.-J., Kang, G.-M., Kim, G.-Y., Hwang, J.-D., Kim, S. (2024) The Impact of Climate Change on Future Aircraft Operation, *Atmosphere*, 34(3), 273-281, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.14191/Atmos.2024.34.3.273>
- Pétron, G., Crotwell, A.M., Mund, J., Crotwell, M., Mefford, T., Thoning, K., Hall, B., Kitzis, D., Madronich, M., Moglia, E., Neff, D., Wolter, S., Jordan, A., Krummel, P., Langenfelds, R., Patterson, J. (2024) Atmospheric H₂ observations from the NOAA cooperative Global Air Sampling Network, *Atmospheric Measurement Techniques*, 17, 4803-4823. <https://doi.org/10.5194/amt-17-4803-2024>
- Prinn, R.G., Weiss, R.F., Arduini, J., Arnold, T., DeWitt, H.L., Fraser, P.J., Ganesan, A.L., Gasore, J., Harth, C.M., Hermansen, O., Kim, J., Krummel, P.B., Li, S., Loh, Z.M., Lunder, C.R., Maione, M., Manning, A.J., Miller, B.R., Mitrevski, B., Mühle, J., O'Doherty, S., Park, S., Reimann, S., Rigby, M., Saito, T., Salameh, P.K., Schmidt, R., Simmonds, P.G., Steele, L.P., Vollmer, M.K., Wang, R.H., Yao, B., Yokouchi, Y., Young, D., Zhou, L. (2018) History of chemically and radiatively important atmospheric gases from the Advanced Global Atmospheric Gases Experiment (AGAGE), *Earth System Science Data*, 10(2), 985-1018. <https://doi.org/10.5194/essd-10-985-2018>
- Rella, C.W., Chen, H., Andrews, A.E., Filges, A., Gerbig, C., Hatakaka, J., Karion, A., Miles, N.L., Richardson, S.J., Steinbacher, M., Sweeney, C., Wastine, B., Zellweger, C. (2013) High accuracy measurements of dry mole fractions of carbon dioxide and methane in humid air. *Atmospheric Measurement Techniques*, 6(3), 837-860. <https://doi.org/10.5194/amt-6-837-2013>
- Rigby, M., Park, S., Saito, T., Western, L.M., Redington, A.L., Fang, X., Henne, S., Manning, A.J., Prinn, R.G., Dutton, G.S., Fraser, P.J., Ganesan, A.L., Hall, B.D., Harth, C.M., Kim, J., Kim, K.-R., Krumme, P.B., Lee, T., Li, S., Liang, Q., Lunt, M.F., Montzka, S.A., Mühle, J., O'Doherty, S., Park, M.-K., Reimann, S., Salameh, P.K., Simmonds, P., Tunnicliffe, R.L., Weiss, R.F., Yokouchi, Y., Young, D. (2019) Increase in CFC-11 emissions from eastern China based on atmospheric observations, *Nature*, 569, 546-550. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1193-4>
- Seo, W., Lee, H., Kim, Y.-H. (2021) Revision of 22-year Records of Atmospheric Baseline CO₂ in South Korea: Application of the WMO X2019 CO₂ Scale and a New Baseline Selection Method (NIMS Filter), *Atmosphere, Korean Meteorological Society*, 31(5), 593-606, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.14191/Atmos.2021.31.5.593>
- Shin, J., Baek, J., Chae, S. (2023) Climate change and mental health in Korea: A scoping review, *Journal of Climate Change Research*, 14(6-2), 989-1003, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.15531/KSCCR.2023.14.6.989>
- Seoul Metropolitan Government Research Institute of Public Health and Environment (SIHE) (2022) The report of Seoul Metropolitan government Research institute of Public Health and Environment Research, 58, 96-103.
- Sim, S. (2024) Development of Bayesian inverse modeling framework to verify CO₂ emissions in Seoul, Republic of Korea, 131pp [Ph.D. Dissertation of Science, Seoul National University]. <https://doi.org/10.23170/snu.000000181856.11032.0001490>
- Sim, S., Jeong, S., Park, H., Park, C., Kwak, K.-H., Lee, S.-B., Kim, C.H., Lee, S., Chang, J.S., Kang, H., Woo, J.-H. (2020) Co-benefit potential of urban CO₂ and air quality monitoring: A study on the first mobile campaign and building monitoring experiments in Seoul during the winter. *Atmospheric Pollution Research*, 11, 1963-1970. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2020.08.009>
- Sim, S., Lee, H., Oh, E., Kim, S., Ciaia, P., Piao, S., Lin, J.C., Mallia, D.V., Lee, S., Kim, Y.-H. (2022) Short-term reduction of regional enhancement of atmospheric CO₂ in China during the first COVID-19 pandemic period, *Environmental Research Letters*, 17. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac507d>
- Stanley, K.M., Say, D., Mühle, J., Harth, C.M., Krummel, P.B., Young, D., O'Doherty, S.J., Salameh, P.K., Simmonds, P.G., Weiss, R.F., Prinn, R.G., Fraser, P.J., Rigby, M. (2020) Increase in global emissions of HFC-23 despite near-total expected reductions, *Nature Communications*, 11(1), 397. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-13899-4>
- Thoning, K.W., Tans, P.P., Komhyr, W.D. (1989) Atmospheric carbon dioxide at Mauna Loa Observatory: 2. Analysis of the NOAA GMCC data, 1974-1985, *Journal of Geophysical Research*, 94(D6), 8549-8565. <https://doi.org/10.1029/JD094iD06p08549>
- Tohjima, Y., Kubo, M., Minejima, C., Mukai, H., Tajimoto, H., Ganshin, A., Maksyutov, S., Katsumata, K., Machida, T., Kita, K. (2014) Temporal changes in the emissions of CH₄ and CO from China estimated from CH₄/CO₂ and CO/CO₂ correlations observed at Hateruma

- Island, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14(3), 1663-1677. <https://doi.org/10.5194/acp-14-1663-2014>
- Toon, G.C., Jean, F.B., Sung, K.Y., Rothman, L.S., Gordon, I.E. (2016) HITRAN spectroscopy evaluation using solar occultation FTIR spectra, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 182, 324-336. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2016.05.021>
- Turnbull, J., Rayner, P., Miller, J.B., Naegler, T., Ciais, P., Cozic, A. (2009) On the use of $^{14}\text{CO}_2$ as a tracer for fossil fuel CO_2 : quantifying uncertainties using an atmospheric transport model, *Journal of Geophysical Research-Atmosphere*, 114, D22302. <https://doi.org/10.1029/2009JD012308>
- United Kingdom (2022) UK Greenhouse Gas Inventory, 1990 to 2020, Department for Business Energy and Industrial Strategy, UK, 1072pp. https://unfccc.int/sites/default/files/resource/gbk-2022-nir-14apr22_0.zip
- Vaughn, B.H., Ferretti, D.F., Miller, J.B., White, J.W.C. (2004) Stable isotope measurements of atmospheric CO_2 and CH_4 , in *Handbook of stable isotope analytical techniques*, edited, Elsevier BV, Amsterdam, The Netherlands, 1372pp.
- Velders, G.J., Andersen, S.O., Daniel, J.S., Fahey, D.W., McFarland, M. (2007) The importance of the Montreal Protocol in protecting climate, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(12), 4814-4819. <https://doi.org/10.1073/pnas.0610328104>
- Velders, G.J., Daniel, J.S., Montzka, S.A., Vimont, I., Rigby, M., Krummel, P.B., Muhle, J., O'Doherty, S., Prinn, R.G., Weiss, R.F., Young, D. (2022) Projections of hydrofluorocarbon (HFC) emissions and the resulting global warming based on recent trends in observed abundances and current policies, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 22(9), 6087-6101. <https://doi.org/10.5194/acp-22-6087-2022>
- Weiss, R.F., Ravishankara, A.R., Newman, P.A. (2021) Huge gaps in detection networks plague emissions monitoring, *Nature*, 595(7868), 491-493. <https://doi.org/10.1038/d41586-021-01967-z>
- William, K., Steffen, M., Sean, C., Christopher, O. (2023) A non-linear data-driven approach to bias correction of XCO_2 for NASA's OCO-2 ACOS version 10, *Atmospheric Measurement Techniques*, 16, 5725-5748. <https://doi.org/10.5194/amt-16-5725-2023>
- World Calibration Centre for Sulfur Hexafluoride (WCC-SF₆) (2017) The report of the result on SF₆ Inter-Comparison Experiment 2016-2017, Republic of Korea, 60pp.
- World Calibration Centre for Sulfur Hexafluoride (WCC-SF₆) (2018a) Report on the system and performance audit of Sulfur Hexafluoride Global GAW station Cape Point (CPT) South Africa June 2016, WCC-SF₆ Report 2018-1, Republic of Korea, 23pp.
- World Calibration Centre for Sulfur Hexafluoride (WCC-SF₆) (2018b) Report on the system and performance audit of Sulfur Hexafluoride Global GAW station Zugspitze-Schneefernerhaus (ZSF) Germany, November 2017, WCC-SF₆ Report 2018-2, Republic of Korea, 35pp.
- World Calibration Centre for Sulfur Hexafluoride (WCC-SF₆) (2019) Report on the system and performance audit of Sulfur Hexafluoride Global GAW station Mauna Loa (MLO) USA, October 2018, WCC-SF₆ Report 2019-1, Republic of Korea, 24pp.
- World Meteorological Organization (WMO) (2017) WMO Global Atmosphere Watch (GAW) Implementation Plan: 2016-2023, GAW Report No. 228, Switzerland, 75pp.
- World Meteorological Organization (WMO) (2019a) An Integrated Global Greenhouse Gas Information System (IG³IS) Science Implementation Plan, GAW Report No. 245, WMO, Switzerland, 71pp. https://library.wmo.int/viewer/56863/download?file=gaw_245_en.pdf&type=pdf&navigator=1 (accessed on Mar. 3, 2025).
- World Meteorological Organization (WMO) (2019b) WMO Greenhouse Gases Bulletin: The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations through 2018. WMO, Switzerland, 8pp.
- World Meteorological Organization (WMO) (2020) 20th WMO/IAEA Meeting on Carbon Dioxide, Other Greenhouse Gases and Related Measurement Techniques (GGMT-2019), GAW Report No. 255, Switzerland, 140pp.
- World Meteorological Organization (WMO) (2022) IG³IS Urban Greenhouse Gas Emission Observation and Monitoring Good Research Practice Guidelines, GAW Report No. 275, WMO, Switzerland, 176pp.
- World Meteorological Organization (WMO) (2023a) System and Performance Audit of Surface Ozone, Carbon Monoxide, Methane, Carbon Dioxide And Nitrous Oxide at the Regional GAW Station Jeju Gosan, Republic of Korea, June 2022, GAW Report No. 288, WCC-Empa Report No. 22/1, Switzerland, 43pp.
- World Meteorological Organization (WMO) (2023b) System And Performance Audit of Surface Ozone, Carbon Monoxide, Methane, Carbon Dioxide And Nitrous Oxide at the Regional GAW Station Anmyeon-Do, Republic of Korea, June 2022, GAW Report No. 285, WCC-

- Empa Report No. 22/2, Switzerland, 44pp.
- World Meteorological Organization (WMO) (2024a) GLOBAL GREENHOUSE GAS WATCH -G3W: The Implementation Plan, WMO, Switzerland, 64pp. https://filecloud.wmo.int/share/s/T4e_wCW0TbyY8v2quDL1vQ
- World Meteorological Organization (WMO) (2024b) Overview of and Lessons Learned from GAW's Capacity Development Efforts, GAW Report No. 291, Switzerland, 26pp.
- World Meteorological Organization (WMO) (2024c) Twenty-First WMO/IAEA Meeting on Carbon Dioxide, Other Greenhouse Gases and Related Tracers Measurement Techniques (GGMT-2022), GAW Report No. 292, Switzerland, 112pp.
- Wunch, D., Toon, G.C., Sherlock, V., Deutscher, N.M., Liu C., Feist, D.G., Wennberg, P.O. (2015) Documentation for the 2014 TCCON Data Release, 14, 1-42. <https://doi.org/10.14291/TCCON.GGG2014.DOCUMENTATION.R0/1221662>
- Xiao, Y., Jacob, D.J., Wang, J.S., Logan, J.A., Palmer, P.I., Suntharalingam, P., Yantosca, R.M., Sachse, G.W., Blake, D.R., Streets, D.G. (2004) Constraints on Asian and European sources of methane from CH₄-C₂H₆-CO correlations in Asian outflow, *Journal of Geophysical Research*, 109, D15S16. <https://doi.org/10.10292003JD004475>
- Yoo, D.-H. (2014) Effect of fuel component on nitrous oxide emission characteristics in diesel engine, *Journal of Advanced Marine Engineering and Technology*, 38(9), 1045-1050, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5916/jkosme.2014.38.9.1045>
- Zellweger, C., Steinbacher, M., Buchmann, B. (2014) System and Performance Audit of Methane and Carbon Dioxide at the Regional GAW Station Anmyeon-do, Republic of Korea, October 2014, WCC-Empa Report No. 14/2, Switzerland, 18pp.
- Zellweger, C., Steinbacher, M., Buchmann, B., Steinbrecher, R. (2017a) System and Performance Audit of Surface Ozone, Carbon Monoxide, Methane, Carbon Dioxide and Nitrous Oxide at the Regional GAW Station Anmyeon-do Republic of Korea June 2017, WCC-Empa Report No. 17/1, Switzerland, 48pp.
- Zellweger, C., Steinbacher, M., Buchmann, B., Steinbrecher, R. (2017b) System and Performance Audit of Surface Ozone, Carbon Monoxide, Methane, Carbon Dioxide and Nitrous Oxide at the Regional GAW Station Jeju Gosan Republic of Korea June 2017, WCC-Empa Report No. 17/2, Switzerland, 42pp.

Authors Information

- 주상원 (국립기상과학원 지구대기감시연구과 기상연구관)
(swjoo@korea.kr)
- 이선란 (국립기상과학원 지구대기감시연구과 연구원)
(sunranlee@korea.kr)
- 이수정 (국립기상과학원 지구대기감시연구과 기상연구사)
(soojeonglee@korea.kr)
- 오영석 (국립기상과학원 지구대기감시연구과 기상연구사)
(ysoh306@korea.kr)
- 신대근 (국립기상과학원 지구대기감시연구과 기상연구사)
(shingeun@korea.kr)
- 정석한 (국립기상과학원 지구대기감시연구과 연구원)
(shjeong314@korea.kr)
- 서원익 (국립기상과학원 지구대기감시연구과 연구원)
(wiseo@korea.kr)
- Samuel Takele Kenea (국립기상과학원 지구대기감시연구과 연구원) (samueltake@korea.kr)
- 김수민 (국립기상과학원 지구대기감시연구과 기상연구관)
(sulla@korea.kr)