

온실가스 입체관측 플랫폼을 활용한 한반도 온실가스 관측

신대근^{*†} · 이선란^{**} · 이수정^{*} · 서원익^{**} · 정석한^{**} · 고미영^{**} · 강희윤^{**} · 최홍우^{**} ·
이충훈^{**} · 부준오^{*} · 오영석^{*} · 사무엘^{**} · 김수민^{***} · 김상백^{***}

^{*}국립기상과학원 지구대기감시연구과 연구사, ^{**}국립기상과학원 지구대기감시연구과 연구원, ^{***}국립기상과학원 지구대기감시연구과 연구관

Greenhouse gas observations over the Korean Peninsula using integrated platforms

Shin, Daegun^{*†} · Lee, Sunran^{**} · Lee, Soojeong^{*} · Seo, Wonick^{**} · Jeong, Seokhan^{**} · Ko, Miyoung^{**} ·
Kang, Heeyun^{**} · Choe, Hong Woo^{**} · Lee, Choong Hoon^{**} · Bu, Jun-Oh^{*} · Oh, YoungSuk^{*} ·
Kenea Samuel Takele^{**} · Kim, Sumin^{***} and Kim, Sang Baek^{***}

^{*}Research Scientist, Global Atmospheric Watch and Research Division,
National Institute of Meteorological Sciences (NIMS), Jeju, Korea

^{**}Researcher, Global Atmospheric Watch and Research Division, NIMS, Jeju, Korea

^{***}Senior Research Scientist, Global Atmospheric Watch and Research Division, NIMS, Jeju, Korea

ABSTRACT

This study introduces integrated greenhouse gases observation platforms over the Korean Peninsula. The integrated network consists of three World Meteorological Organization Global Atmosphere Watch regional stations (Anmyeondo, Gosan, and Ulleungdo), ground-based Fourier-Transform Spectroscopy (FTS) at Anmyeondo (AMY), Boseong Tall Tower, Seoul Lotte World Tower, aircraft, and ocean vessel. The AMY station, which has the longest continuous observation history, monitors nine greenhouse gas species, including carbon dioxide (CO₂), methane (CH₄), nitrous oxide (N₂O), sulfur hexafluoride (SF₆) and CFCs (CFC-11, CFC-12, CFC-113). Moreover, observations from different platforms occur simultaneously at AMY. The column-averaged mole fractions of CO₂ and CH₄ observed by ground-based FTS were comparable to the global mean. With regard to aircraft data, the CO₂ and CH₄ concentrations became closer to the global average and showed less seasonal variation with increasing altitude. The concentrations measured in the Yellow Sea by the vessel were almost identical to those measured at AMY and followed its increasing trend.

Key words : Greenhouse Gas Observation, Aircraft, Vessel, FTS, Tower, Long-Term Analysis

1. 서론

지구온난화로 인한 기후변화는 현대 인류가 직면하고 있는 가장 심각한 문제이며, 인간활동으로 인한 온실가스 배출과 이로 인한 대기 중 온실가스 농도 증가에 기인한다(IPCC, 2023). 온실가스 농도의 관측은 이러한 기후변화를 진단하고 기후변화 대응 정책의 효과를 확인하기 위한 가장 기초적인 정보를 제공한다. 세계기상기구(World

Meteorological Organization; WMO)는 체계적인 온실가스 관측의 중요성을 거듭 강조하고 있으며, 전지구적인 온실가스 관측 정보를 통합하고, 시의적절하게 활용하기 위한 노력을 이어가고 있다(WMO, 2024). 특히, 최근에는 온실가스 농도변화 감시를 넘어 기후위기 대응 정책지원을 위해 항공기, 선박, 타워, 위성 등 다양한 플랫폼에서 얻어지는 온실가스 입체관측 자료에 대한 수요가 커지고 있다(WMO, 2024).

[†]Corresponding author : shingeun@korea.kr (33 Seohobuk-ro, Seogwipo-si, Jeju 63568, Korea. Tel. +82-64-780-6646)

ORCID 신대근 0000-0002-8408-5210 최홍우 0009-0007-0161-154X
이선란 0000-0001-6789-0229 이충훈 0009-0000-9732-9336
이수정 0000-0002-6249-0282 부준오 0000-0001-5702-7982
서원익 0000-0001-9669-3902 오영석 0000-0001-8010-1597
정석한 0009-0009-8622-8658 사무엘 0000-0002-4453-7753
고미영 0009-0007-2104-9208 김수민 0009-0001-3673-1150
강희윤 0009-0004-5520-1309 김상백 0009-0008-8593-7818

Received: April 18, 2025 / Revised: May 16, 2025 1st, June 2, 2025 2nd, June 9, 2025 3rd / Accepted: June 20, 2025

국내의 온실가스 입체관측과 관련된 연구로 National Aeronautics and Space Administration (NASA)와 국립환경과학원 주관의 The Korea-United States Air Quality (KORUS-AQ) 캠페인에서 온실가스 항공관측을 함께 수행하였고(Crawford et al., 2021), Li et al. (2020, 2022)은 기상항공기 관측자료를 활용하여 한반도 서해상 및 내륙의 수평 및 연직구조를 조사하고, 기원을 분석하였다. Choi et al. (2014)은 GOSAT 위성과 안면도 이산화탄소의 상관성을 분석하였고, Kenea et al. (2019)은 항공관측자료를 활용하여 안면도의 Fourier Transform Spectroscopy (FTS) 자료를 검증하였다. 또한, Li et al. (2024)에서는 기상관측선으로부터 관측된 서해상의 온실가스 자료를 통해 서해로 유입되는 기류 특성을 분석하여 그 기원을 조사한 바 있다.

선행 연구들에서 볼 수 있듯이 국내의 입체관측 관련 연구에는 기상항공기 및 기상관측선, FTS 등 기상청의 온실가스 입체관측 플랫폼에서 얻어진 온실가스 관측 자료가 널리 활용되고 있다. 기상청은 한반도의 입체적인 온실가스 농도 특성을 이해하고, 대기 중 온실가스의 기원을 찾기 위해 보성종합기상관측탑, 서울 롯데월드타워 등 온실가스 관측 지점 및 플랫폼을 지속적으로 확대하고 있다. 본 연구에서는 기상청이 구축하여 운영 중인 온실가스 입체관측망을 소개하고, 다양한 입체관측 플랫폼 간의 주기적인 동시관측이 수행되는 안면도의 지상관측을 원격, 항공, 선박 등의 입체관측자료와 상호 비교하여 그 차이를 이해하는데 목적을 둔다.

2. 한반도 온실가스 입체관측망

국립기상과학원은 1990년 처음 고산 지구대기감시소의 이산화탄소 관측을 시작으로, 현재까지 30년 이상 온실가스 관측을 이어오며(Cho et al., 1995; NIMS, 2021), 온실가스 관측에 대한 높은 수준의 기술을 확보하였다(WMO, 2023a, 2023b). 현재는 안면도와 고산, 울릉도 세 개의 WMO GAW 지역급 관측소와 함께 Fig. 1과 같은 온실가스 입체관측망을 구축하고 있다.

Table 1은 각 플랫폼에서 관측되고 있는 온실가스 종들의 관측 주기 및 시작연도를 나타낸다. WMO GAW 지역급 감시소인 안면도와 고산, 울릉도 지구대기감시소는 각각 한반도의 서쪽과 남쪽, 동쪽을 대표하는 배경농도 자료를 생산하며 한반도 전체를 아우르는 온실가스 변동 특성을 감시한다. 안면도에서는 이산화탄소(CO_2), 메탄

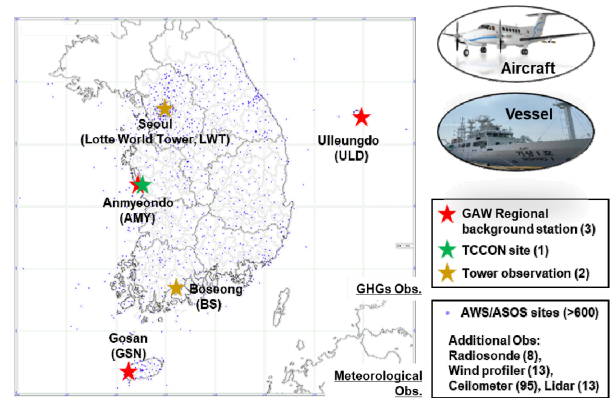


Fig. 1. The integrated greenhouse gas observing network of National Institute of Meteorological Sciences

(CH_4), 아산화질소(N_2O), 육불화황(SF_6), 염화불화탄소류(CFCs) 등을 포함한 가장 많은 종의 온실가스를 가장 오랜 기간 동안 관측해오고 있으며, 최근에는 CO_2 와 CH_4 의 탄소 안정동위원소비율($\delta^{13}\text{C}$)을 추가하여 더 심도 있는 온실가스 기원분석 연구를 수행하고 있다. 또한, 안면도는 기후변화 연구와 온실가스 위성 자료 검증을 목적으로 구축된 국제 지상원격 온실가스 네트워크인 Total Carbon Column Observing Network (TCCON) 관측망에도 포함되어 지상에서 고분해 태양광흡수분광계(Fourier Transform Spectrometers; FTS)를 활용한 온실가스의 기주평균 농도를 관측하고 있다. 고산과 울릉도에서는 CO_2 , CH_4 , N_2O , SF_6 총 네 종의 온실가스 연속관측을 수행하고 있으며, 안면도와 함께 체계적인 품질관리를 통해 GAW의 호환성 범위를 만족하는 고품질의 연속관측 자료를 안정적으로 생산하고 있다(Seo et al, 2021; WMO 2023a, 2023b). 오랜 기간 축적된 온실가스 관측 경험 및 기술은 고층타워, 항공기, 선박 등 다른 플랫폼의 관측에도 적용되어 고품질의 온실가스 자료를 생산하는데 활용된다.

보성과 서울에서는 각각 2021년과 2022년부터 300 m와 555 m의 고층타워에서 연속관측장비를 통한 온실가스 관측을 수행하고 있으며, 서울롯데월드타워는 서울 도심의 배경농도 특성을, 보성 종합기상관측탑에서는 한반도 남부 교외 농경지역의 온실가스 농도 특성을 각각 대표할 수 있는 CO_2 와 CH_4 자료를 생산한다. 서울과 보성은 현재 관측환경을 개선하고, 고품질 자료를 생산하기 위한 시험운행을 수행 중이며, 최근 ASIA-AQ 국제관측 캠페인에 참여하여 유의미한 결과를 확인할 수 있었다. 이들 자료는 최종 검토 및 안정화 단계에 있어, 빠른 시일 내에

Table 1. Current species and frequencies of greenhouse gas observation platforms

Platform	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	SF ₆	CFCs	$\delta^{13}\text{C}$ in CO ₂	$\delta^{13}\text{C}$ in CH ₄
AMY (in situ)	CRDS (1999)	CRDS (1999)	LGR-ICOS (1999)	GC-ECD (2007)	GC-ECD (1999)	CRDS* (2023)	CRDS* (2024)
	Flask sampling (2014)						
AMY (TCCON, total column)	FTS (2014)	FTS (2014)	FTS (2014)				
GSN (in situ)	CRDS (2009)	CRDS (2015)	GC-ECD (2010)	GC-ECD (2016)			
ULD (in situ)	CRDS (2012)	CRDS (2012)	GC-ECD (2012)	GC-ECD (2015)			
NARA (Aircraft)	CRDS (2018)	CRDS (2018)				Flask ($\delta^{13}\text{C}$, 2023)	Flask ($\delta^{13}\text{C}$, 2023)
Gisang (Vessel)	CRDS** (2021)	CRDS** (2021)					
BTT (Boseong Tall Tower)	CRDS* (2021)	CRDS* (2021)					
LWT (Lotte World tower)	CRDS* (2022)	CRDS* (2022)					

*Test operation, **Only for Winter-Spring seasons; NARA: NIMS Atmospheric Research Aircraft

온실가스 연구에 활용 가능한 수준의 안정적인 자료 생산이 가능할 것으로 기대된다.

항공기 관측 자료는 기상청에서 운영하는 기상항공기 나라호(King Air 350)를 통해 2018년부터 한반도 상층의 온실가스 농도를 주기적으로 확보해 오고 있다. 항공기관측은 지상에서는 확인하기 어려운 온실가스의 연직 구조를 직접 관측한다는 점에서 큰 이점을 갖는다. 기상항공기를 이용한 온실가스 관측은 안면도 감시소가 위치한 태안반도 상공에서 연직 나선형으로 수행되거나 서해상과 서해안(내륙)의 농도차이를 비교하기 위한 경로로 수행된다. 기상항공기는 온실가스 관측이 아닌 다른 목적의 관측(환경기상 감시, 위험기상 선행관측, 구름물리관측 및 기상조절실험 등)에서도 온실가스 자료를 수집하기 때문에 평균적으로 약 2주에 1회 가량 온실가스 항공관측 자료가 수집된다. 선박관측은 기상청의 기상관측선인 기상1호를 활용하여 봄철 서해상의 대기 중 온실가스 캠페인 관측을 통해 2021년부터 수행되고 있다. 선박관측이 수행되는 서해상은 중국에서 한반도로 기류가 넘어오는 통로이기 때문에 대기오염물질과 함께 한반도로 유입되는 온실가스 특성을 이해하는데 큰 역할을 할 수 있다. 2024년까지는 서해상 대기질 입체관측(Yellow Sea Air Quality;

YES-AQ) 캠페인, 2025년부터는 서해상 탄소에어로졸 집중관측(Yellow Sea-Black carbon Aerosol Measurement; YES-BAM) 캠페인의 일환으로 2월에서 4월의 기간 중에 관측을 수행하였다. 이처럼 기상청이 자체적으로 운영하는 기상항공기(나라호)와 기상관측선(기상1호) 자료는 대부분 단기적인 캠페인 단위로 이루어지는 국내외의 항공기 또는 선박관측 자료에 비해 안정적으로 대기상층 및 해양의 관측값을 확보할 수 있다는 점에서 큰 강점을 갖는다.

각 플랫폼의 자료들을 안정적으로 확보하고 품질을 유지하기 위해서 체계적인 품질관리와 함께 분석기법 및 환경개선이 지속적으로 이루어지고 있다. 국립기상과학원은 WMO/GAW 네트워크에서 표준 척도를 유지하고 전파하는 중앙교정실험실(Central Calibration Laboratory; CCL)의 표준 규격으로 주기적인 장비교정을 통해 자료의 소급성을 확보하고 있으며, 다양한 비교실험들을 통해 호환성을 검증하고 있다(Lee et al., 2021). 또한, 기상청의 GAW 관측소들은 WMO/GAW 네트워크의 품질 보증 책임을 갖는 세계표준센터(World Calibration Centres; WCC)의 주기적인 적합성평가를 통해, 관측자료 및 환경에 대한 평가를 받고 있다(WMO, 2023a, 2023b).

3. 온실가스 입체관측 특성 분석

한반도에서 가장 오랜 기간 온실가스 연속관측 자료를 수집하고 있는 안면도 감시소는 FTS 원격관측, 나선형 항공기관측이 동시에 이루어진다. 또한, 인접한 서해에서 매년 봄철 선박관측이 이루어지고 있어 각기 다른 플랫폼의 자료를 상호 비교하여 입체적인 온실가스 분포 특성을 살펴보기 용이한 지점이다. 안면도는 한반도 서해에 인접하며, 북동쪽으로 약 120 km 거리에는 한반도에서 가장 많은 인구가 밀집한 수도권 지역이, 반경 50 km 이내에 대규모 농경지 및 축산지와 35 km 이내에 화력발전소 및 대규모 석유 화학단지들이 위치해 있어 기류에 따라 주변의 매우 다양한 배출원들의 영향을 직접 또는 간접적으로 받는다(Lee et al., 2019, 2023).

지상 FTS로부터 관측된 안면도의 CO_2 와 CH_4 기주평균 농도를 안면도 연속관측 및 전지구 농도와 비교하여 살펴보면 Fig. 2와 같다. 지상 FTS는 구름이 없고 맑은 낮 시간에만 관측이 가능하기 때문에 지표 연속관측에 비해 상대적으로 관측공백이 많이 나타난다. 기주평균 농도는 고분해능의 태양광 적외 흡수 스펙트럼으로부터 산출하게 되며, 태양이 통과하는 대기 전체의 온실가스 정보를 포함한다(Oh et al., 2018). 따라서 지표에서 관측된 연속관측 농도보다는 대기 중에 충분히 혼합된 전지구 평균 농도에 가까운 값을 보이게 된다. 안면도의 CO_2 기주평균 농도(XCO_2)는 지표 연속관측 및 전지구와 비슷한 지속적인 증가 추세를 보이고 있으며, 전지구보다 다소 높고, 지표 연속관측보다는 낮은 수준이다. 계절변동성은 지표 연속관측만큼 크진 않았으나 전지구 농도와 비슷한 수준의 변동폭을 보였다. CH_4 의 경우에도 마찬가지로 지표 연속

관측 및 전지구와 비슷한 지속적인 증가 추세를 보였다. CH_4 의 연직 기주평균 농도는 전지구와 비슷한 수준이었으며, 계절변동성은 관측공백과 상대적으로 높은 관측 불확실성으로 인해 CO_2 만큼 뚜렷하진 않았다.

항공기와 선박에서 관측된 온실가스 농도는 Fig. 3과 같다. 기상항공기는 항공관측용 공동감쇠분광기(CRDS 2401-m)를 탑재하여 연속관측을 수행하며, 안면도 나선형 관측을 수행하는 경우에는 안면도 상공 0.5 ~ 9.0 km를 나선형으로 비행하면서 온실가스 농도의 연직 구조를 관측한다(Li et al., 2020, 2022). 안면도 나선형 관측은 매년 평균 5 ~ 6회 가량 관측을 수행하고 있으며, 2022년 6월부터 2023년 11월 기간에는 항공관측 장비 오류 및 다른 집중관측 기간으로 인해 일부 관측공백이 발생하였다. 항공기에서 관측한 CO_2 와 CH_4 농도는 안면도 지표 연속관측과 전지구 평균 농도 사이에 위치하며, 전반적으로 지표 관측과 유사한 지속적인 증가추세를 나타낸다. 계절변동 특성은 CH_4 에 비해 CO_2 에서 뚜렷하게 나타났다. 고도별로 살펴보면 CO_2 와 CH_4 모두 하층(3 km 이하)에서 상층(5 km 이상)으로 갈수록 안면도보다 전지구 배경농도에 가까워지며, 관측값 표준편차는 줄어드는 모습을 보였다. 지표와 5 km 이상 상층의 CO_2 농도 차이는 여름철에 1.9 ppm으로 가장 낮았고, 겨울철에 9.6 ppm으로 가장 컸다. CH_4 의 경우에도 지표와 5 km 이상의 농도차는 여름철에 낮고, 겨울철에 컸으며 그 차이는 각각 34.4 ppb와 80.5 ppb였다. 이러한 계절별 농도차이는 계절별 경계층 고도 변화 및 수직적인 대류의 발달의 계절특성에 기인한다(Li et al., 2022). 선박의 온실가스 관측은 2021년부터 시작되었으며, 관측기간이 봄철 일부로 제한된다. 따라서 Fig. 3(c)와 Fig. 3(d)의 시계열에서 선박관측은 해당 연도의 캠페인

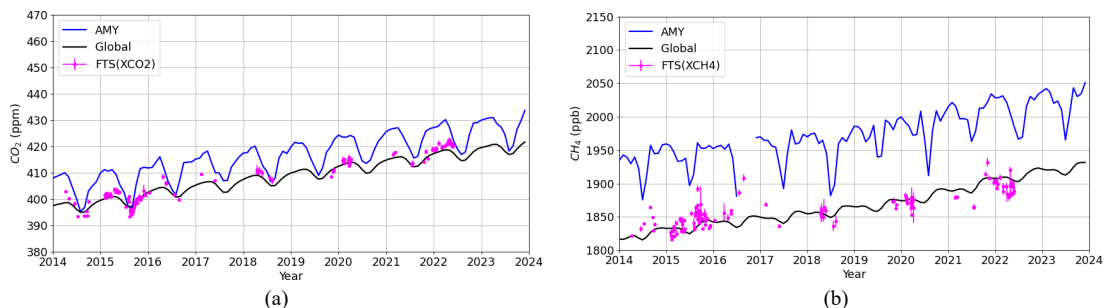


Fig. 2. The monthly time series of (a) XCO_2 and (b) XCH_4 compare with surface atmospheric CO_2 and CH_4 at Anmyeondo (AMY) station and global. The errorbars indicate the daily standard deviations. Global monthly data are from NOAA/GML (<https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/>)

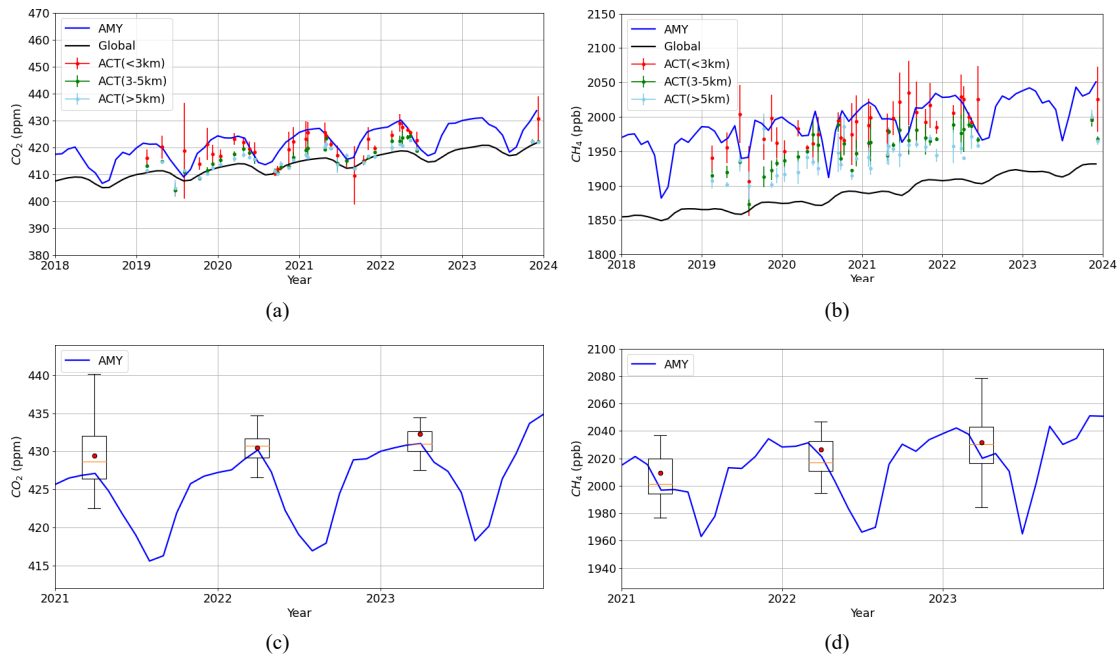


Fig. 3. The time series of atmospheric (a, c) CO_2 and (b, d) CH_4 obtained from (a, b) aircraft (daily) over the Anmyeondo (monthly) and (c, d) vessel (box plots with campaign period) in the Yellow sea, respectively. The errorbars in (a), (b) indicate the daily standard deviations

기간 동안 관측된 모든 자료를 박스플롯으로 표현하였다. 선박에서 관측된 서해상 CO_2 및 CH_4 농도는 다른 관측들과 마찬가지로 매 년 농도가 증가하고 있으며, 안면도 지표 연속관측과 거의 비슷한 수준의 농도를 나타냈다. 즉, 안면도의 배경농도가 서해상의 온실가스 농도특성을 잘 반영하고 있음을 알 수 있다. 하지만, 선박관측의 경우 관측기간이 봄철로 제한되기 때문에 일부 사례의 영향이 크게 작용할 수 있으며, 이로 인해 관측값의 변동폭이 크게 나타났다. 따라서, 서해상의 온실가스 농도 특성을 정확하게 이해하기 위해서는 봄철이 아닌 다른 계절을 포함한 추가적인 장기 관측자료 확보 및 사례 분석이 필요할 것으로 사료된다.

4. 결론 및 토의

본 연구에서는 WMO GAW 프로그램을 기반으로 고품질 자료를 생산하는 지구대기감시소를 중심으로 고층타워, 원격관측, 기상항공기, 그리고 선박 등으로 구성된 기상청의 온실가스 입체관측망 구축 현황을 살펴보고, 각 플랫폼으로부터 얻어진 자료가 갖는 특성을 분석하였다.

지상 FTS로부터 얻어진 기주평균 농도는 대기 전층의 평균적인 온실가스 농도 정보를 반영하며, 안면도에서 전지구 평균과 비슷한 수준의 온실가스 농도와 지속적인 증가 추세를 나타냈다. 기상항공기의 경우 고도가 높을수록 전지구 평균과 비슷한 농도 및 계절변동폭을 보였다. 기상관측선에서 관측된 서해상의 온실가스 농도는 안면도와 거의 비슷한 수준으로 매 년 농도가 증가하는 경향을 보였다.

기상청의 온실가스 입체관측망으로부터 지속적으로 얻어지는 온실가스 관측자료는 향후 한반도의 온실가스 농도 증가를 감시할 뿐만 아니라 한반도 내의 입체적인 온실가스 농도분포 및 수송을 이해하기 위한 기초 자료가 될 것으로 사료된다. WMO의 통합 전지구 온실가스 과학정보시스템(An Integrated Global Greenhouse Gas Information System; IG³IS) 프로젝트와 관련된 역모델링 시스템에서도 신뢰할 수 있는 온실가스 관측자료는 기존의 인벤토리가 갖는 불확실성을 개선할 수 있는 중요한 수단으로 활용될 수 있다(IPCC, 2019; Joo et al., 2022; WMO, 2020). WMO에서는 전지구 온실가스 감시(Global Greenhouse Gas Watch; G3W) 프로그램을 통해 기후위기

대응을 위한 전지구적인 협력체계를 구축하여, IG³IS 기반의 온실가스 배출정보를 시의적절하게 제공할 계획을 추진하고 있다(WMO, 2024). 이에 따라 고품질의 온실가스 입체관측 자료의 중요성은 향후 더욱 커질 것으로 예상된다. 최근 기후위기 상황에 대한 이해가 확산됨에 따라 기상청 뿐만 아닌 국내 다수의 기관들에서도 온실가스 관측을 확대하고 있다. 그러나 단순히 관측 자료 수집을 넘어서 고품질의 유의미한 온실가스 관측 자료를 확보하기 위해서는 온실가스 관측과 관련된 국내 기관들 간의 긴밀한 협력을 통한 체계적인 자료 수집 및 관리가 매우 중요하다. 이러한 노력을 바탕으로 얻어진 온실가스 관측 자료는 탄소중립 정책을 지원할 수 있는 과학적 정보생산에 기여하고, 기후변화에 적응하는데 큰 역할을 할 수 있을 것으로 기대된다.

사사

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

Reference

- Cho HM, Park MK, Nam JC, Min DH, Kim KR, Song BH, Kim BS, Kim SK, Chong YS. 1995. Trends of background concentration of atmospheric carbon dioxide in Korea (in Korean with English Abstract). *J Korean Meteorol Soc* 31(3): 301-312.
- Choi JH, Joo SM, Um JS. 2014. Cross-correlation analysis between GOSAT and CO₂ concentration observed by the KGAWC station (in Korean with English abstract). *J Korean Soc Geospatial Inf Syst* 22(2): 11-16. doi: 10.7319/kogsis.2014.22.2.011
- Crawford JH, Ahn JY, Al-Saadi J, Chang L, Emmons LK, Kim J, Lee G, Park JH, Park RJ, Woo JH, Song CK, Hong JH, Hong YD, Lefer BL, Lee M, Lee T, Kim S, Min KE, Yum SS, Shin HJ, Kim YW, Cho, JS, Park JS, Szykman JJ, Long RW, Jordan CE, Simpson IJ, Fried A, Dibb JE, Cho SY, Kim YP. 2021. The Korea-United States Air Quality (KORUS-AQ) field study. *Elem Sci Anth* 9(1): 2-27, doi: 10.1525/elementa.2020.00163
- 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, Geneva, Switzerland; [accessed on 2025 Apr 18]. 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. Contribution of working groups I, II and III to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Geneva, Switzerland. doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001
- Joo S, Lee H, Hong J, Kwon D, Shim C, Oh YS, Li S, Kenea ST, Lee S, Kim JE, Boo KO. 2022. Consideration of top-down greenhouse gas estimation approaches to prepare carbon neutral policy (in Korean with English abstract). *J Korean Soc Atmos Environ* 38(6): 933-947. doi: 10.5572/KOSAE.2022.38.6.933
- Kenea ST, Oh YS, Goo TY, Rhee JS, Byun YH, Labzovskii LD, Li S. 2019. Comparison of XCH₄ Derived from g-b FTS and GOSAT and evaluation using aircraft in-situ observations over TCCON site. *Asia-Pac J Atmos Sci* 55: 415-427. doi: 10.1007/s13143-019-00105-0
- Lee H, Han SO, Ryoo SB, Lee JS, Lee GW. 2019. The measurement of atmospheric CO₂ at KMA GAW regional stations, its characteristics, and comparisons with other East Asian sites, *Atmos Chem Phys* 19: 2149-2163. doi: 10.5194/acp-19-2149-2019.
- Lee H, Seo W, Li S, Lee S, Kenea ST, 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. *Atmos Chem Phys* 23: 7141-7159. doi: 10.5194/acp-23-7141-2023.

- Lee SJ, Lee H, Kim S, Kim Y. 2021. Inter-comparison experiment for Korea GAW network to improve the GHGs measurement quality (in Korean with English Abstract). *J Korean Soc Atmos Environ* 37(5): 790-802. doi: 10.5572/KOSAE.2021.37.5.790.
- Li S, Kenea ST, Kim S, Yoo HJ, Joo S, Lee H, Oh S, Jeong MJ, Seo W, Ko M, Lee S, Oh YS, 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. *Atmos Environ* 317: 120201. doi: 10.1016/j.atmosenv.2023.120201
- Li S, Kim S, Lee H, Kenea ST, Kim JE, Chung CY, Kim YH. 2022. Analysis of source distribution of high carbon monoxide events using airborne and surface observations in Korea. *Atmos Environ* 289(15): 119316. doi: 10.1016/j.atmosenv.2022.119316
- Li S, Kim Y, Kim J, Kenea ST, Goo TY, Labzovskii LD, Byun YH. 2020. In situ aircraft measurements of CO₂ and CH₄: Mapping spatio-temporal variations over Western Korea in high-resolutions. *Remote Sens* 12(18): 3093. doi: 10.3390/rs12183093
- National Institute of Meteorological Sciences (NIMS). 2021. Report of Global Atmosphere Watch 2020; [accessed on 2025 Apr 18]. <http://www.climate.go.kr/home/bbs/list.php?code=25&bname=report>
- Oh YS, Kenea ST, Goo TY, Chung KS, Rhee JS, Ou ML, Byun YH, Wennberg PO, Matthäus K, Joshua DG, Glenn D, Voltaire V, David G. 2018. Characteristics of greenhouse gas concentrations derived from ground-based FTS spectra at Anmyeondo, South Korea. *Atmos Meas Tech* 11: 2361-2374. doi: 10.5194/amt-11-2361-2018
- Seo W, Lee H, Kim YH. 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) (in Korean with English abstract). *Atmosphere* 31(5): 593-606. doi: 10.14191/Atmos.2021.31.5.593
- World Meteorological Organization (WMO). 2020. 20th WMO/IAEA Meeting on Carbon Dioxide, Other Greenhouse Gases and Related Measurement Techniques (GGMT-2019), Geneva, Switzerland. <https://library.wmo.int/idurl/4/57135>
- 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. Geneva, Switzerland. <https://library.wmo.int/idurl/4/68689>
- 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. Geneva, Switzerland. <https://library.wmo.int/idurl/4/68502>
- World Meteorological Organization (WMO). 2024. Global Greenhouse Gas WATCH-G3W: The implementation plan. Geneva, Switzerland. https://filecloud.wmo.int/share/s/T4e_wCW0TbyY8v2quDL1vQ