

연구논문

ASIA-AQ 기간 보성 종합기상탑을 활용한 온실가스 측정

정석한[†] · 신대근 · 유희정 · 원덕진

국립기상과학원 지구대기감시연구과

Greenhouse Gas Measurements using the Boseong Tall Tower during the ASIA-AQ Campaign

Seokhan Jeong[†], Daegeun Shin, Hee-Jung Yoo, and Dukjin Won

Global Atmospheric Watch and Research Division, National Institute of Meteorological Sciences (NIMS),
Seogwipo-si, Jeju-do, 63568, Korea

Received January 07, 2025 / Revised January 29, 2025 / Accepted March 11, 2025

In this study, a tall tower measurements system was established on the Boseong Tall Tower (BTT, 34.76°N, 127.21°E) to monitor greenhouse gases from long-range transport. The in situ measurement system uses a cavity ring-down spectroscopy (CRDS) analyzer, which continuously measures carbon dioxide (CO₂) and methane (CH₄) concentrations at 300 m above ground level. The system was tested during the ASIA-AQ campaign in Feb 2024. A 4-point calibration was performed for quality assurance (QA), with measurement accuracies of 0.25 ppm for CO₂ and 2.0 ppb for CH₄. During the study period, the average CO₂ concentration was 435.98 ± 6.93 ppm, and the average CH₄ concentration was 2046.1 ± 24.8 ppb. When compared with the hourly data from domestic stations, the BTT time series data showed similar concentration levels, effectively representing the inflow and outflow of greenhouse gases across the Korean peninsula. However, high CO₂ concentrations were observed under specific wind directions, suggesting the need for further analysis of long-term changes in the CO₂/CH₄ ratio.

Key words: GHGs, CO₂, CH₄, Tall tower measurement, ASIA-AQ

1. 서 론

IPCC 6차 종합보고서¹⁾에 따르면 2040년까지의 모든 단기 시나리오에서 지구온난화가 지속될 것이며, 거의 모든 배출시나리오에서 2040년 내에 1.5°C에 도달할 것으로 분석되었다. 또한, 즉각적인 대응을 하더라도 해수면 상승, 생물다양성의 손실 등 일부 변화들은 돌이킬 수 없는 수준에 이르렀다고 발표하였다. 더불어 과거부터 현재까지 전 지구 온실가스 배출량의 지역, 국가 및 개인에 따른 기여도는 균등하지 않으며, 기후 시스템을 이해하고 신뢰성 있는 예측을 위해서는 온실가스의 증감을 정량화하는 것이 필수적이라고 명시하였다. 온실가스에 의한 전지구 평균온도 상승량은 1.1°C이며, 이 중 이산화탄소

(Carbon Dioxide, CO₂), 메탄(Methane, CH₄) 순으로 기여도가 높았다.

온실가스의 측정은 대기 중 온실가스 플럭스를 정량화하고 그 기초가 되는 과정을 이해하는 데 주로 활용되어 왔다. 하지만, 일반적인 지표상의 대기질 측정은 지역적인 농도 변동성이 결과에 포함되어 자료 해석을 어렵게 만들었다.²⁾ 이러한 문제를 해결하기 위해 Bakwin et al. (1995)에서는³⁾ CO₂를 포함한 대기 화학종에 대한 고층 타워 측정을 제안하였으며, 대기 중 탄소사이클과 온실가스의 교환 과정에 대한 이해를 위해 중요하다고 강조하였다. 타워측정자료는 수송모델과의 결합을 통해 지역적 규모의 온실가스 플럭스 분석에 활용할 수 있으며, 특히 대기경계층(Planetary Boundary Layer, PBL) 부근에서의

[†]To whom correspondence should be addressed.

Tel. 82-64-780-6638, E-mail. shjeong314@korea.kr

측정은 지역적인 소스와 싱크에 대한 고해상도 자료를 제공하기 때문에 잠재적으로 강한 로컬소스의 영향을 최소화하면서 잘 혼합된 대기 농도자료를 확보할 수 있다.

이러한 이유로 지난 수십년간 전 세계적으로 다양한 고층타워 측정 프로젝트가 추진되었다. NOAA-ESRL (Earth System Research Laboratories)⁴⁾에서는 300-500 m 높이의 고층타워에 대한 네트워크를 1992년부터 구축하기 시작하였으며, 현재는 NOAA-GML (Global Monitoring Laboratory)에서 7개의 관측사이트를 지속적으로 운영하고 있다. 일본⁵⁾역시 1992년에 200 m 고층타워 측정을 시작하였으며, 유럽에서는 네덜란드⁶⁾, 폴란드⁷⁾등에서 각각 1992년, 2005년에 측정을 시작하였다. 더불어, CHIOTTO (Continuous High-precisiOn Tall Tower Observations of Greenhouse Gases in Europe) 프로젝트⁸⁾를 설립하여 유럽 전역에 대해 CO₂를 포함한 여러 온실가스에 대한 지속적인 측정을 목표로 하여 운영하고 있다.

이에 본 연구에서는 고층 온실가스 측정을 위해 각종 기상자료를 측정하고 있는 국내 유일의 고층 기상관측탑인 보성 종합기상탑에 새롭게 구축한 온실가스 측정시스템을 소개하고, 실시간으로 측정된 CO₂, CH₄에 대한 교정 및 품질관리 방법 등을 지구대기감시 관측 방법 및 관측자료 품질관리 규정의 수준에 맞추어 제시하고자 한다. 또한 2016년에 국립환경과학원과 NASA가 협력하여 진행한 ‘한미 대기질 국제 공동조사’(KORUS-AQ)의 후속 연구로 동아시아 전역의 위성, 항공, 지상 등의 다양한 관

측을 통해 대기질을 이해하고 위성-관측간의 자료연계를 목적으로 수행된 ‘아시아 대기질 공동조사’(Airborne and Satellite Investigation of Asian Air Quality, ASIA-AQ) 기간 중 한국의 집중측정 기간이었던 2024년 2-3월의 온실가스 자료를 공유하고 농도 특성을 분석하였다.

2. 관측 개요

2.1. 관측지점

기상청에서는 2012년 전라남도 보성군 득량면에 보성 표준기상관측소(34.76°N, 127.21°E)를 설립하고 기상 관측소 내에 높이 307 m인 보성 종합기상탑을 설치하였다. 이는 국내 유일한 고층기상관측탑으로 총 11개 고도에 해당하는 각종 기상자료를 측정하고 있다. 선행연구⁹⁾에서 발췌한 보성 종합기상탑 주변지형 특성을 Fig. 1에 나타내었다. 보성군은 2020년 기준 인구 약 4만명의 도시이며 주요 산업으로 농축산업이 주를 이루고 있다. 보성 종합기상탑은 해발고도 3 m인 간척지 위에 구축되어 주변 1.5 km 이내는 논으로 구성되어있으며, 벼농사를 기본으로 하여 ASIA-AQ가 수행된 2-3월은 휴지기였다. 북쪽으로 7 km 거리에 초암산(높이 576 m)이 위치하고 남동쪽 1.5 km 거리에 해안가가 위치하고 있다. 지역적으로 동쪽으로 약 40 km 부근에 여수산업단지가 위치하고 북동쪽으로 55 km 지점에 대도시인 광주광역시가 자리 잡고 있다. 이전 연구¹⁰⁾에서 에디공분산 방법을 이용하여 측

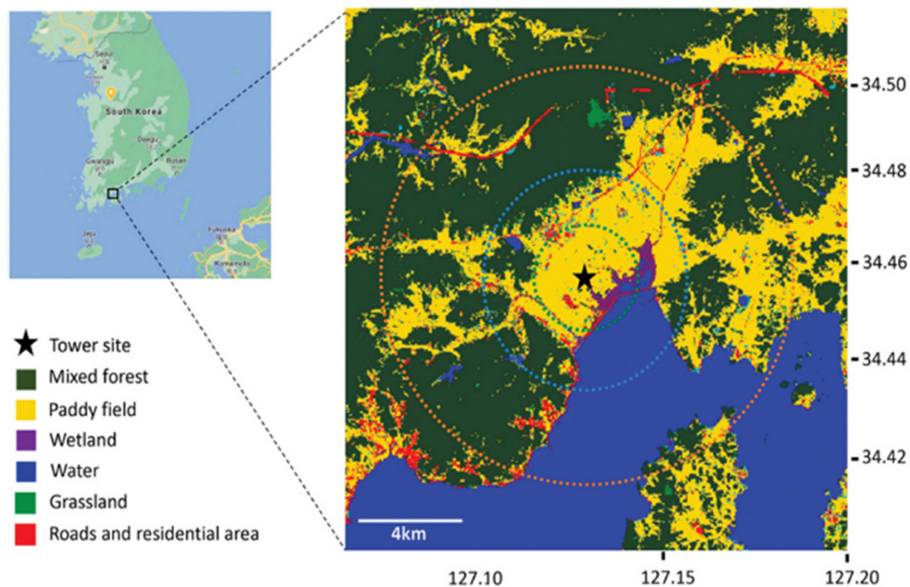


Fig. 1. Distribution of land cover areas (18 km × 18 km) after Park et al., 2021.

정된 300 m 기준 높이의 CO₂ 플럭스 발자국 분석에 의하면 여름철의 경우 8-9 km, 겨울철에는 6-8 km 범위를 나타내며, 주변의 산지와 바다를 모두 포함한다.

2.2. 측정방법

본 연구에서는 보성 종합기상탑을 활용하여 고층의 고도별 온실가스 분석을 위해 300 m와 140 m 높이에 흡입구를 설치하고 지상에 온실가스 측정 시스템을 추가로 구축하였다. Fig. 2에 보성 종합기상탑에 2024년 집중관측을 위해 구축한 온실가스 측정시스템을 나타내었다. 대기 중 공기는 흡입구로부터 지상에 위치한 펌프에 의해 Carbon Fiber flex tube(I.D. 10 mm)를 따라 흡입된다. 펌프는 KNF D-79112 모델을 사용하였으며 최대 4bar의 압력으로 공기를 흡입한다. 흡입된 공기는 버퍼볼륨(500 mL) 내에서 바이패스 시스템을 통해 여분의 공기는 배출되고 1/4" SUS 라인을 따라 멀티 포지션밸브(Multi Position Valve, MPV) 시스템으로 유입된다. 표준가스 교정 및 고도별 온실가스 측정을 위해 VIKI사의 6port-MPV를 활용하였으며 밸브번호 1, 2번에 300 m와 140 m 고도 라인이 각각 연결되어있다. 3~6번은 표준가스를 연결하여 온실가스 농도교정에 사용하였다. 30분을 주기로 하여 300 m와 140 m를 번갈아가며 측정하기 위해 라인을 설계하였으며, 실시간 측정을 위해 각 라인의 유희 상태에서도 지속해서 공기를 흡입하였다. 다만, 이번 측정에서는 140 m 라인의 점검으로 인하여 300 m 고도만을 측정하였다.

MPV 후단에 유량조절을 위한 유량조절계(Mass Flow

Controller, MFC)를 설치하였다. Line Tech 사의 M0810874 모델을 활용하였으며 250 cc/min의 공기가 온실가스 측정 기기로 주입되고 버퍼볼륨내 잔여공기는 vent를 통해 배출된다. 온실가스 측정을 위해 기기에서 필요한 공기보다 많은 양을 주입하게 되며 측정기기 전단에 체크밸브를 설치하고 양압형태로 기기의 바로 앞까지 주입한 뒤 후단 펌프에 의해 기기로 유입하도록 하였다. 온실가스 측정 장비로써 Cavity Ring-Down Spectroscopy (CRDS) 방식을 활용하는 Picarro사의 G1301 모델을 활용하였다. CRDS는 대기중의 CO₂, CH₄, H₂O를 실시간으로 측정하며, 수분 알고리즘을 통해 Dry-CO₂의 농도값이 제시되지만 수분값이 교정되지 않은 정보이기에 사용에 따라 측정값에 불확도가 발생할 수 있다.¹¹⁾ 또한 농도 교정을 위해 실험실 표준가스로 활용되는 실린더들의 일반적인 수분농도가 0.0001%로 제시되기에 이로 인한 수분 보정된 온실가스 농도의 불확실성을 제거하고자 기상청에서는 냉동기를 활용한 수분제거 방식을 택하고 있다. 본 연구에서는 온실가스 측정기기 전단에 Nafion 사의 제습 장치(Polytube dryer)를 활용하여 0.05% 수준까지 제습을 실시하였다.

2.3. 농도교정

농도교정을 위해 세계기상기구 척도인 (WMO-X2019 (CO₂), WMO-X2019(CH₄))^{12),13)}에 호환성을 갖는 표준가스를 사용하였다. 세계기상기구에서는 1989년부터 지구대기감시(Global Atmosphere Watch, GAW) 프로그램을 운영하고 있으며, 전 지구적으로 각 관측소에서 생산

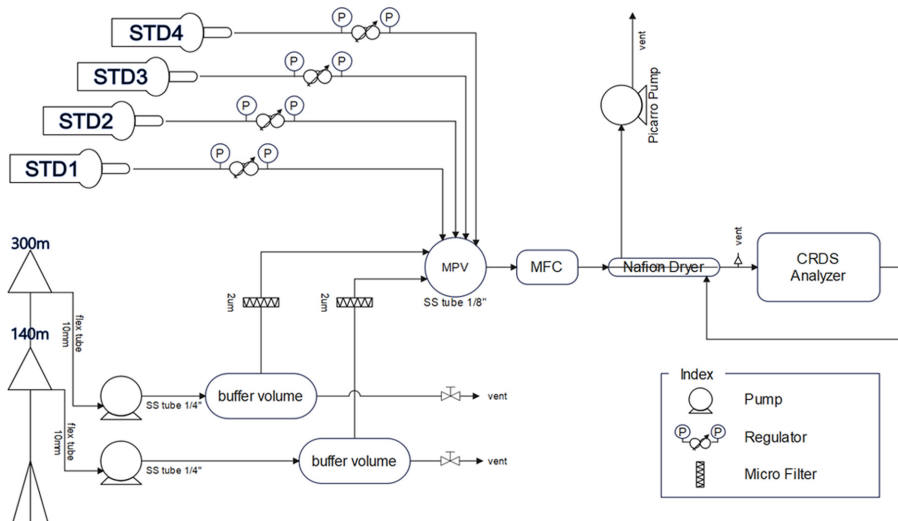


Fig. 2. Schematic of the greenhouse gas measurement system at the Boseong Tall Tower.

Table 1. Standard gas concentrations of CO₂ and CH₄ assigned by WCC-SF₆ at NIMS

Cylinder No.	CO ₂ (ppm)	CO ₂ std. (ppm)	CH ₄ (ppb)	CH ₄ std. (ppb)
D641092	379.20	0.02	1787.9	0.1
D641099	415.05	0.02	2064.7	0.1
D641100	449.86	0.02	2183.3	0.1
D232850	478.03	0.02	2370.2	0.1

하는 온실가스 관측자료의 조화성을 확보하기 위해 공식적인 합의를 통해 기준값을 설정하고 있다. 현재 WMO/GAW 네트워크의 온실가스 척도는 (WMO-X2019(CO₂), WMO-X2019(CH₄))로 통일되어있으며 표준척도를 유지하고 보급하는 중앙교정실험실(Central Calibration Laboratory, CCL)을 통해 관리되고 있다. CCL에서는 절대적인 물분을 측정법을 활용하여 척도를 유지하고 있으며, CO₂의 경우 NOAA-GML의 Halocarbons 및 미량그룹과 Carbon Cycle 그룹에서 공동으로 관리하고 있으며, CH₄의 경우 Carbon Cycle 그룹에서 관리하고 있다. 본 연구에서 활용한 표준가스는 CCL에서 인증한 표준가스를 활용하여 국립기상과학원의 육불화황 세계표준센터(World Calibration Centre for Sulfur Hexafluoride, WCC-SF₆)에서 교차 검증한 실린더들을 분석에 활용하였다. 동일 척도를 사용하고 있는 관측 네트워크 내에서 관측 오차를 줄이기 위해 네트워크에서는 호환성 목표를 제시하고 있으며 본 연구에서 측정한 온실가스인 CO₂는 0.10 ppm, CH₄는 2.0 ppb로 설정하고 있다.

CRDS의 교정에 사용한 표준가스의 정보는 Table 1과 같다. 측정기기 교정을 위해 4개의 표준가스를 사용하여 4점 교정을 수행하였으며, 측정시간을 전·후로 2회 수행하여 불확도를 산정하였다. 자료 안정화를 위해 각 표준가스를 30분 이상 연속으로 흘려준 후 마지막 10분을 평균하여 해당 값을 기준으로 교정을 수행하였다[그림 3]. 4개의 표준가스는 관측기간 내 측정되는 온실가스의 최저농도, 최고농도를 포함하기 위한 범위로 선정하였다. 교정결과 전 구간에서 표준편차 CO₂ 0.30 ppm, CH₄ 2.0 ppb 수준의 오차를 나타내었다.

더불어, 관측 기간을 전후로 각 교정농도에 대한 안정성을 평가하기 위해 D641099, D641100 표준가스를 활용하여 불확도를 산정하였다. 불확도는 1σ를 기준으로 CO₂는 0.25 ppm, CH₄ 2.5 ppb로 나타났으며, WMO/GAW에서 제시하는 호환성 범위인 CO₂ 0.10 ppm, CH₄ 2.0 ppb에 못 미치는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 H₂O의 측정 결과에서 원인을 찾을 수 있었는데, 0.001% 이하 수준으로 건조된 안정적인 표준가스를 주입하고 있음에도 불구하고 기기의 H₂O 농도 평균은 0.03% 수준에

Table 2. Parameter values for the correction coefficients after Chen et al., 2010

Parameter	Value
a	-1.20×10^{-2}
b	-2.67×10^{-4}
c	-9.823×10^{-3}
d	2.39×10^{-4}

0.036%의 표준편차를 보였다. 이러한 큰 편차는 장비의 온실가스 농도측정에도 영향을 준 것으로 판단된다. 본 연구에 활용한 G1301 모델을 기준으로 Picarro사에서 제공하는 수분보정에 대한 내용^{11),14)}을 살펴보면 건조공기와 습공기의 비율에 대해 2차 방정식으로 계산된 식을 제시하고 있다.

$$\frac{C_{wet}}{C_{dry}} = 1 + a[H_2O] + b[H_2O]^2 \quad (1)$$

C_{wet}과 [H₂O]는 각각 측정된 성분농도와 수분농도를 나타내며, 해당 논문에서는 Table 2에 따라 변수 a와 b를 제시하고 있으며 이를 활용하여 계산하면 수분 0.03±0.036%에 대해서 CO₂는 약 0.08% CH₄는 약 0.06%의 오차가 나타날 수 있다.

2.4. 데이터 품질관리 처리

기상청 국립기상과학원에서 운영하는 지구대기감시소의 온실가스 관측자료들은 지구대기감시 관측 방법 및 관측자료 품질관리 규정¹⁵⁾에 의거하여 관리되고 있다. 본 연구에서 활용한 측정자료는 이를 기반으로 정립하였으며, 기준 목록은 Table 3과 같다. 온실가스 측정기기에서 관측된 초 단위 자료를 원시 자료로 정의하고 자동 품질검사(Auto Quality Control, AQC)와 수동 품질검사(Manual Quality Control, MQC) 절차를 거친다. AQC로써 측정기기의 공동온도와 압력이 기준값의 범위에서 벗어날 때, 관측된 CO₂와 CH₄의 농도가 계기한계값을 넘어갈 때 등을 기준으로 품질관리를 수행하였다. 그 이후 관측에 사용된 G1301모델의 원시자료가 장비 상태에 따라 최소 5초에서 1분 이상의 측정 주기를 가지는 점을 고려하여 1분 단위로 평균한 뒤 1시간 자료수를 계산하였

Table 3. Quality-control processing method for BTT observation data

Component	Standard Value	Note
Cavity Pressure	139.95 Torr < Value < 140.05 Torr	Equipment stability test
Cavity Temperature	44.99°C < Value < 45.01°C	
CO ₂	Value < 800 ppm	Physical range check
CH ₄	Value < 5000 ppb	
delta CO ₂	CO ₂ (t) - CO ₂ (t±1) < 20	Equipment stability test
delta CH ₄	CH ₄ (t) - CH ₄ (t±1) < 20	
H ₂ O	Value < 0.055%	
n data	n data(min) > 30 times/hour	

다. MQC의 경우 관측자의 필터 교체, 장비의 검교정 기간, 관측유량의 변동, 제습장치 교체 등을 고려하여 플래깅 후 처리하였다. 다만, 이번 연구에서는 배경농도 산정을 위한 추가적인 자료처리를 수행하지 않았는데, 이는 배경농도 산정을 위해서는 장기간 누적 관측자료 기반의 통계적 기법¹⁶⁾이 활용되기 때문이다. 국제적으로 활용하고 있는 배경농도 산정방식은 일평균농도 자료처리를 위해

30일 이동표준편차가 필요하며, 월평균 자료처리를 위해 최소 365.25일의 자료가 필요하다. 해당 자료를 활용하여 각 감시소별 시간표준편차와 연속값의 차이를 장기간에 걸쳐 얻어내고 주변의 인위적/자연적 영향을 제거하여 계산한다. 이러한 연유로 향후 보성 종합관측소 지점에 대해 장기간 측정자료가 확보되면 배경농도 산출 및 분석이 추가로 수행될 예정이다.

관측요소 중 수분의 경우 본 연구 장비 불확도를 고려하여 넓은 범위의 기준값을 새롭게 제시하였다. 수분 기준값은 기존 품질관리 규정으로 제시된 0.02% 이하 수분 농도에 장비농도 교정시 확인된 1σ 불확도를 더하여

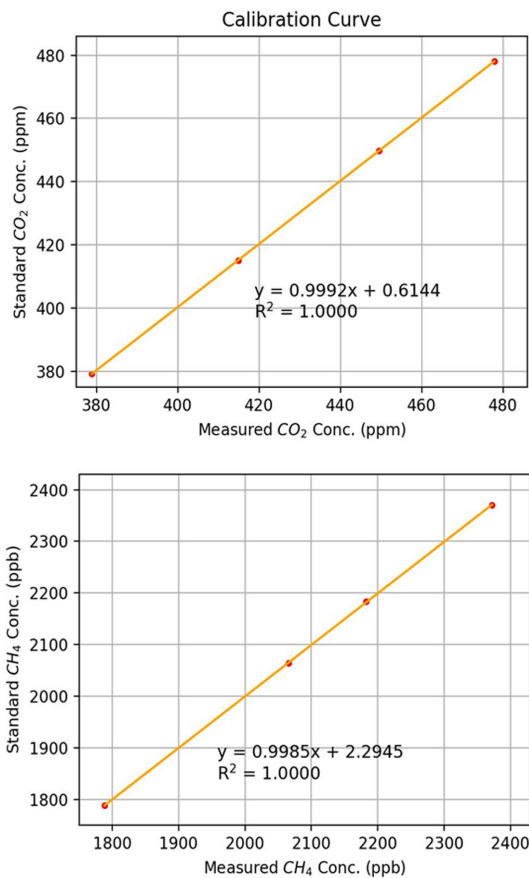


Fig. 3. Four-point calibration curves for CO₂ and CH₄.

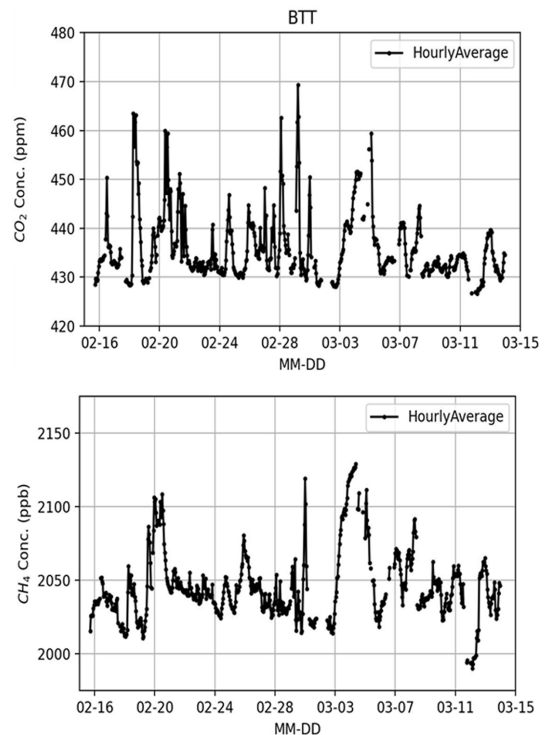


Fig. 4. Four-point calibration curves for CO₂ and CH₄.

0.055% 수준으로 확장하였다. 추가로 측정 기간 보고되었던 검교정기간과 펌프불안정으로 인한 유량변동 등을 MQC로 처리하였으며, 이후 평균 처리한 1분자료가 30회 이상 기록된 시간에 대해서만 시간 평균자료로 계산하였다. 기간은 2024년 2월에 수행된 ASIA-AQ 캠페인 중 한국 연구 기간인 2024년 2월 15일부터 3월 13일까지(28일) 분석하였다. 품질관리 처리 결과 측정 기간이었던 28일(672시간)을 기준으로 각각 CO₂ 578시간(80%), CH₄ 594시간(88%)의 자료를 확보하였다.

3. 측정결과

3.1. 시계열

보성 타워의 300 m 높이에서 측정된 CO₂ 농도와 CH₄ 농도의 시계열 자료를 Fig. 4에 나타내었다. 해당기간 CO₂ 평균농도는 435.98±6.93 ppm이었으며, CH₄는 2046.1±24.8 ppb로 나타났다. 2023년 지구대기감시보고서¹⁷⁾에 따르면 2023년 2월과 3월 안면도에서 측정된 월평균 CO₂ 배경농도는 약 430 ppm 수준으로 최근 10년 증가율인 2.50 ppm/year를 기준으로 삼았을 때보다 약간 높은

농도가 관측되었으며, NOAA에서 제공¹⁸⁾하는 2023년 전지구 평균농도인 419.33 ppm 과는 10 ppm 이상 차이를 보였다. 다만, 보성 고층타워 측정자료의 경우 배경농도 산정을 위한 처리가 불가능한 시간 평균자료로써 장기간 관측을 통해 계산된 배경농도 산정 시 월평균농도는 더 낮아질 수 있다. CH₄의 경우 2023년 2-3월 안면도 배경농도인 2040 ppb와 유사한 수준으로 나타났으나, 2023년 전지구 평균농도¹⁹⁾ 1921.7 ppb에 비하여 120 ppb 수준 높은 것으로 나타났다.

측정 기간 지구대기감시소의 시간 측정자료와 본 연구 결과를 Fig. 5와 Table 4에 나타내었다. 기간 평균농도의 경우 안면도(AMY)-보성(BTT)-고산(GSN) 순으로 높게 나타났다. CO₂ 농도를 살펴보았을 때 2월 19일과 3월 3일의 고농도의 CO₂가 울릉도를 제외한 전 측정지점에서 나타났다. 이는 CH₄도 농도가 상승하는 동일한 결과를 나타내고 있으며, 이러한 결과는 해당기간의 온실가스 농도 상승이 한반도 전체의 공기유입으로 인한 영향으로 판단된다. 안면도 지역의 경우 다른 지역에 비해 높은 CH₄ 농도가 관측되었으며, 이는 이전 연구결과²⁰⁾에서 안면도의 지역적인 영향으로 분석된 바 있다. CH₄의 경우 안면도

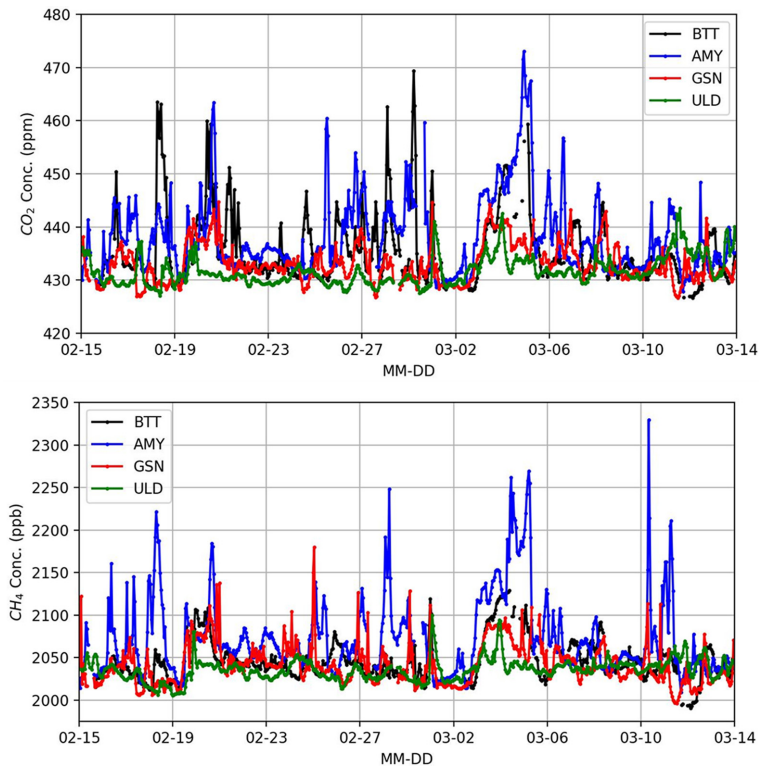


Fig. 5. Time series of CO₂ and CH₄ from different sampling sites: Boseong Tall Tower (BTT, black), Anmyeon-do (AMY, blue), Gosan (GSN, red) and Ulleungdo (ULD, green).

Table 4. Average concentrations of CO₂ and CH₄ from each sampling site

Site	Avg. CO ₂ (ppm)	CO ₂ std.(ppm)	Avg. CH ₄ (ppb)	CH ₄ std.(ppb)
BTT	435.98	6.93	2046.1	24.8
AMY	438.05	7.39	2073.3	47.1
GSN	433.06	3.61	2042.0	24.6
ULD	431.72	2.72	2035.7	12.8

를 제외한 전 지역에서 시계열의 변화가 유사하게 나타나는 것에 비하여, 보성측정지역의 경우 2월 18일, 2월 25일 등 일부 구간에서 CO₂ 농도가 추가로 높게 나타났다. 18일의 경우 야간에 100 mm 이상의 강수가 기록되었으나, 당일 관측된 고농도 CO₂는 오전 중 발생하여 강수와 다른 외부요인에 의한 상승으로 추정된다. 마찬가지로 2월 25일, 28일의 농도 상승 역시 오전 중에 발생하였으며 향후 장기관측을 통한 고농도 CO₂에 대한 원인 분석이 필요하다.

3.2. 오염바람장미

Fig. 6에 측정 기간 전체에 대한 CO₂, CH₄의 오염 바람장미를 나타내었다. 해당 바람 자료의 경우 보성종합기

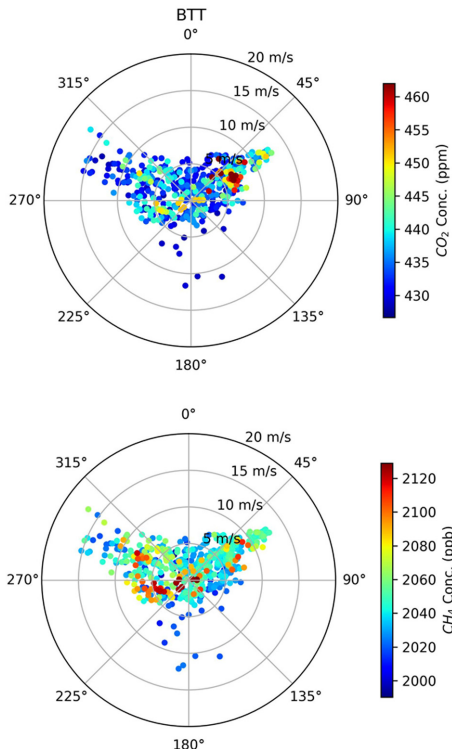


Fig. 6. Bivariate polar plots for CO₂ and CH₄.

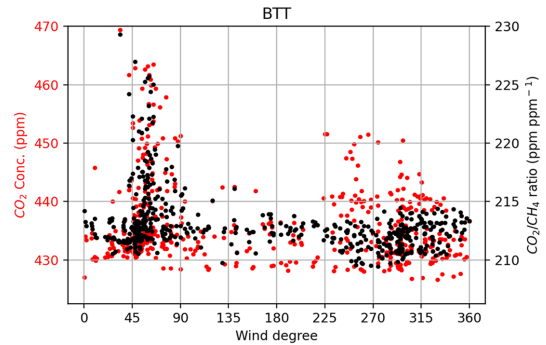


Fig. 7. CO₂ and CO₂/CH₄ concentration ratio depending on wind direction.

상탑에서 측정 중인 300 m 높이의 풍향계 자료를 평균하여 활용하였다. 시간 평균 풍속 5.5 m/s 수준으로 나타났으며, 관측 계절의 특성상 북서풍이 주 풍향으로 관찰되었다. 또한, 주 풍향과 더불어 자료의 약 43% 정도가 북동풍으로 관측되었다. 풍향에 따른 CO₂의 농도를 살펴보면 북동풍으로 유입되는 CO₂의 비율이 높은 것으로 나타났으며, CH₄의 경우 바람 방향이나 바람 세기에 따른 특정한 패턴이 나타나지 않았다. 북동풍으로 유입되는 고농도의 CO₂의 영향은 CO₂/CH₄ 비율의 변화에서 더 뚜렷하게 확인되었는데, Fig. 7에 나타난 풍향에 따른 CO₂/CH₄ 비율을 살펴보면 풍향 각 40°에서 100° 사이에 관측된 고농도 CO₂에 의한 높은 비율의 CO₂/CH₄에 영향을 준 것으로 보인다. 다만, 풍향 각 200° 이상의 서북서풍으로 유입된 CO₂ 농도는 CO₂/CH₄ 비율에 영향을 미치지 않은 것으로 보인다.

대기 중 CO₂의 인위적 발생 요인은 주로 에너지를 위한 석유·석탄·천연가스의 연소에 의한 배출이 주를 이루는 것으로 알려져 있으며, CH₄의 경우 논농사, 가축의 활동 등에 의한 농축산부문의 배출이 주를 이루며 폐기물 매립, 에너지산업에 의한 배출 순으로 알려져 있다. 우리나라의 경우 2023년 환경부에서 발표한 국가 온실가스 배출량 조사 결과에 따르면 2021년 기준 국내 CO₂ 총 배출량 중 90% 이상이 에너지 산업연소에 의한 것으로 조사되었다. 이에, 본 연구결과에서 나타난 보성 종합기상탑의 풍향별 CO₂/CH₄ 농도비 차이는 두 온실가스의 발생원 차이로 인한 지역적인 영향으로 사료되며, CO₂/CH₄ 농도비를 활용하여 시간자료에서의 배경대기값과 오염대기값을 구분할 수 있을 것으로 기대된다. 나아가 북동풍으로 유입되는 공기와 서풍으로 유입되는 공기에 대한 추가적인 추적모델 연구를 통해 분석을 수행할 계획이다.

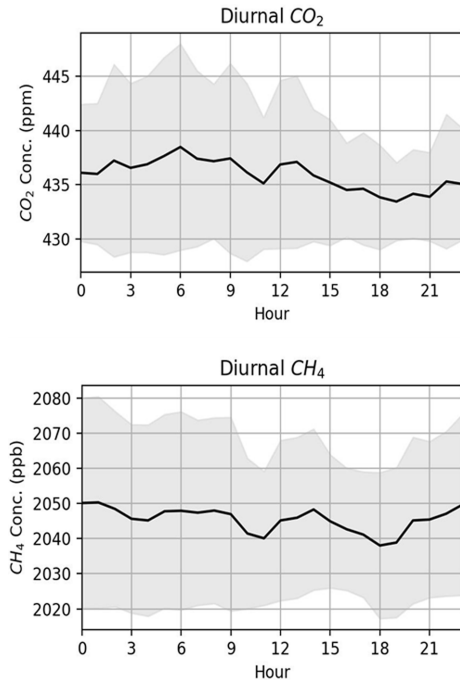


Fig. 8. Diurnal variation of CO₂ and CH₄ concentration.

3.3. 일주기

Fig. 8에 측정기간에 대한 CO₂와 CH₄ 농도의 일 주기 변화를 나타내었다. CO₂의 경우 7시에 최대농도, 19시에 최소농도가 관찰되며 약 5 ppm 수준의 차이를 보이며, 일몰과 일출에 따른 대기경계층의 높이 변화로 인한 일 농도 변동성이 뚜렷하게 나타났다. 이러한 결과는 보성 종합기상탑에서 플럭스 관측을 수행한 선행연구⁹⁾에서 2015년부터 2019년까지의 장기 관측한 CO₂ 측정자료의 일변화 그래프와 유사한 결과를 보인다. 온실가스의 일 농도 변동은 야간에 발생하는 인위적인 배출과 식물의 호흡 그리고 PBL 높이 감소로 인한 수직혼합의 약세등이 야간의 농도증가에 영향을 미치며, 낮 시간대의 대기혼합이 주간의 농도감소에 영향을 준 것으로 보인다. CH₄의 경우 CO₂보다 약 2시간 뒤인 9시부터 농도가 점차 감소하여 19시에 최소농도가 관찰되며 약 12 ppb 수준의 차이를 보였다. CO₂에 비해 CH₄의 주간 감소추세가 늘어지는 현상은 선행 연구결과인 스위스²¹⁾, 시베리아²²⁾, 폴란드⁷⁾ 등에서 관측한 논문에서도 동일한 결과가 나타났다. 이러한 현상은 CO₂와 CH₄의 주간 net-flux의 차이로 사료되며, 광합성으로 인한 CO₂ 싱크에 의해 일변동성이 다른 형태를 보이는 것으로 추정된다. 다만, 본 연구의 측정에서 CH₄의 일변동성이 주간에도 크게 상승하는 패턴이 나타나며 CH₄가 CO₂에 비해 지역적인 배출이 인접하여 영향

을 주고 있을 것으로 판단된다. 또한 선행연구들에서 계절적인 대기경계층의 변화는 겨울철보다 여름철에 크게 나타나며 이로 인한 온실가스 일변동성 역시 여름철에 크게 나타났던 점을 고려하여 장기간 측정을 통한 지속적인 분석이 필요할 것으로 보인다.

4. 결 론

본 연구에서는 보성 종합기상탑을 활용하여 ASIA-AQ 캠페인 기간이었던 2024년 2월부터 약 1달간 300 m 고도에서 CO₂와 CH₄의 측정을 수행하였다. 실시간 온실가스 측정을 위해 CRDS를 활용하였으며 펌프를 추가로 설치하여 300 m 높이의 충분한 흡입력을 확보하였다. 온실가스 측정을 위한 수분 불확도를 최소화하기 위하여 Nafion 사의 제습장치를 활용하여 제습을 실시하였으나, 기기 노후화 등으로 인한 한계로 CO₂는 0.25 ppm, CH₄ 2.5 ppb로 편차가 나타났다. 이러한 수분에 의한 불확도는 2025년 계획중인 CRDS 신규장비의 도입으로 충분히 개선 될 것으로 판단되며, 현재 국내지구대기감시소에서 활용 중인 냉동 제습 시스템을 추가로 구축하면 수분농도 0.001% 이하 수준까지 감소시켜 더욱 개선될 여지가 있다.

측정 기간 평균 온실가스 농도는 각각 CO₂ 435.98 ppm, CH₄ 2046.1 ppb로 나타났으며 이는 2023년 지구대기감시보고서에 기록된 안면도 감시자료와 유사한 수준의 농도가 관측된 것으로 확인하였다. 또한, 동일 기간 관측된 지구대기감시소의 시간 관측자료와 비교하였을 때 한반도 전 지역에 미치는 유입, 유출된 온실가스에 대해서도 잘 나타나는 것으로 확인하였다. 다만, 풍향에 따라 2월 18일 등 일부 구간에서 CO₂/CH₄ 비율이 뚜렷한 차이를 나타내는 것을 확인하였으며 배출원이 다른 온실가스 유입으로 역추적 모델등을 위한 자료로 활용될 수 있다. 본 연구에서는 측정 기간의 부족을 이유로 배경농도 산정을 수행하지 않았기에 향후 장기 관측을 통해 배경농도 처리 이후의 온실가스 성분 비율과 시간자료에서 나타난 유입 공기에 따른 온실가스 성분 비율을 바탕으로 하여 배경농도 산정을 위한 기초자료 및 풍향에 따른 발생원 추적 자료로써 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

300 m 고도에서의 온실가스 농도의 일주기 변화가 충분히 나타나는 것으로 확인되었으며, 이는 이전 고층타워를 통한 온실가스 관측 결과들^{7),21),22)}과 유사한 형태를 보였다. 다만, 이전 논문들에서 겨울보다 여름철의 온실가스 일변화가 뚜렷하게 나타나며, 낮은 고도 관측에서의 일

변화 폭이 크게 나타났다고 언급된 만큼 다양한 고도 및 장기적인 추가 관측을 통해 자료를 확보할 필요가 있다. 지속적인 자료확보 및 연구를 통해 계절 농도 변동성과 계절별 일주기 변화 등을 기초자료로 활용하여 온실가스 역추적 모델의 검증 및 개선에 필요한 기초자료로써 활용 계획이다.

감사의 글

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

참고문헌

- IPCC, “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”. **2023**, 1-34.
- P. P. Tans, “Uncertainties in the Global Carbon Cycle”, *Pure Appl. Chem.*, **1991**, 63, 766-768.
- P. S. Bakwin, P. S. Tans, C. Zhao, W. Ussler III, and E. Quesnell, “Measurements of carbon dioxide on a very tall tower.” *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, **1995**, 47(5), 535-549.
- P. S. Bakwin, P. Tans, D. F. Hurst, and C. Zhao, “Measurements of carbon dioxide on very tall towers: results of the NOAA/CMDL program”. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, **1998**, 50(5), 401-415.
- H. Y. Inoue and H. Matsueda, “Measurements of atmospheric CO₂ from a meteorological tower in Tsukuba, Japan”, *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, **2001**, 53(3), 205-219.
- A. T. Vermeulen, A. Hensen, M. E. Popa, W. C. M. van den Bulk, and P. A. C. Jongejan, “Greenhouse gas observations from Cabauw Tall Tower (1992–2010)”, *Atmospheric Measurement Techniques Discussions*, **2001**, 4, 617-644.
- M. E. Popa, M. Gloor, A. C. Manning, A. Jordan, U. Schultz, F. Haensel, T. Seifert, and M. Heimann, “Measurements of greenhouse gases and related tracers at Bialystok tall tower station in Poland”, *Atmospheric Measurement Techniques Discussions*, **2010**, 3(2), 407-427.
- Vermeulen, T. A, A. Hensen, M. Gloor, A. C. Manning, P. Ciaia, R. Eisma, W.C.M. van den Bulk, J. J. Mols, and J. W. Erisman. “CHIOTTO - Continuous high-precision tall tower observations of greenhouse gases.” **2004**, JRC Ispra.
- C. Park, Y. Lee, and S. Lee, “Characteristics of atmospheric CO₂ fluxes and the estimation of their potential sources around Boseong Standard Weather Observatory(BSWO)”, *Atmospheric Environment*, **2021**, 252, 118340.
- 이영태, 황성은, 김병택, 김기훈, “보성 농업지역에서의 장기간 플럭스 특성 분석”, *한국기상학회지*, **2024**, 34(1), 69-81.
- H. Chen, J. Winderlich, C. Gerbig, A. Hofer, C. W. Rella, E. R. Crosson, A. D. Van Pelt, J. Steinbach, O. Kolle, V. Beck, B. C. Daube, E.W. Gottlieb, V. Y. Chow, G. W. Santoni, and S. C. Wofsy, “High-accuracy continuous airborne measurements of greenhouse gases (CO₂ and CH₄) using the cavity ring-down spectroscopy (CRDS) technique”, *Atmospheric Measurement Techniques Discussions*, **2010**, 3(2), 375-386
- World Meteorological Organization, “20th WMO/IAEA Meeting on Carbon Dioxide, Other Greenhouse Gases and Related Tracers Measurement Techniques (GGMT-2019)”, **2020**, GAW Report No. 264.
- Joint Committee for Guides in Metrology(JCGM), “The International Vocabulary of Metrology – Basic and General Concepts and Associated Terms, 3rd edition”, **2012**.
- B. Wastine, C. Kaiser, C. Vuillemin, J. V. Lavric, M. Schmidt, and M. Ramonet, “Evaluation of the Picarro EnviroSense 3000i analysers for continuous CO₂/CH₄ measurements.”, *Commissariat a Lenergie Atomique*, **2009**, Rapport CEA-R-6218.
- 기상청, “지구대기감시 관측 방법 및 관측자료 품질관리 규정”, **2002**.
- 서원익, 이해영, 김연희, “지난22년간 한반도 이산화탄소 배경농도 재산정 연구-WMO/GAW 척도 변경과 NIMS 온실가스 배경농도 산출기법을 중심으로”, *한국기상학회지*, **2021**, 31(5), 593-606.
- 국립기상과학원, “2023 지구대기감시 보고서”, **2024**, 7-19.
- X. Lan, K. W. Thoning, and E.J. Dlugokencky, “Trends in globally-averaged CH₄, N₂O, and SF₆ determined from NOAA Global Monitoring Laboratory measurements.”, **2025**.
- X. Lan, P. Tans, and K.W. Thoning “Trends in globally-averaged CO₂ determined from NOAA Global Monitoring Laboratory measurements.”, **2023**.
- H. Lee, S. Han, S. Ryoo, J Lee, and G. Lee, “The measurement of atmospheric CO₂ at KMA GAW regional stations, its characteristics, and comparisons with other East Asian sites”, *Atmospheric Chemistry and Physics*, **2019**, 19(4), 2149-2163

21. T. A. Berhanu, E. Satar, R. Schanda, P. Nyfeler, H. Moret, D. Brunner, B. Oney, and M. Leuenberger, "Measurements of greenhouse gases at Beromünster tall-tower station in Switzerland", *Atmospheric Measurement Techniques Discussions*, **2016**, 9(6), 2603-2614.
22. J. Winderlich, H. Chen, C. Gerbig, T. Seifert, O. Kolle, J. V. Lavrič, C. Kaiser, A. Höfer, and M. Heimann, "Continuous low-maintenance CO₂/CH₄/H₂O measurements at the Zotino Tall Tower Observatory (ZOTTO) in Central Siberia", *Atmospheric Measurement Techniques Discussions*, **2010**, 3(2), 1113-1128.