

부산대학교 캠퍼스에서 관측된 이산화탄소의 농도 분석

고영화^{1),2)} · 류진우³⁾ · 최현식³⁾ · 신재원⁴⁾ · 정수종⁴⁾ · 하경자^{1),2),3)*}

¹⁾부산대학교 기후시스템전공, ²⁾IBS 기후물리연구단,

³⁾부산대학교 미래지구연구소 및 BK21 지구환경시스템학부, ⁴⁾서울대학교 환경대학원 환경관리학과

(접수일: 2025년 5월 26일, 수정일: 2025년 6월 18일, 게재확정일: 2025년 8월 11일)

Analysis of Carbon Dioxide Concentration Observed at Pusan National University Campus

Yeong Hwa Ko^{1),2)}, Jin-Woo Ryu³⁾, Hyeon Sik Choe³⁾, Jaewon Shin⁴⁾,
Sujung Jeong⁴⁾, and Kyung-Ja Ha^{1),2),3)*}

¹⁾Department of Climate System, Pusan National University, Busan, South Korea

²⁾Center for Climate Physics, Institute for Basic Science, Busan, Korea

³⁾Institute for Future Earth and BK21 School of Earth and Environmental Systems,
Pusan National University, Busan, Korea

⁴⁾Department of Environmental Management, Graduate School of Environmental Studies,
Seoul National University, Seoul, South Korea

(Manuscript received 26 May 2025; revised 18 June 2025; accepted 11 August 2025)

Abstract This study aims to measure carbon dioxide (CO₂) in Busan to enhance understanding of the urban atmospheric environment. Two sites with distinct environmental settings—Second College of Education Building (SEB; natural surroundings) and Mechanical Engineering Building (MEB; urban-adjacent)—were established at Pusan National University, and CO₂ measurements were carried out from March 2024 to February 2025 to analyze diurnal and seasonal variations. The SEB site, positioned lower than MEB, was more directly affected by local emission, resulting in an average summer CO₂ concentration of 458.2 ppm, being 12.6 ppm higher than MEB. It is noted that these differences reflect the combined effects of topography, instrument height, wind direction, and the planetary boundary layer height (PBLH). During summer, CO₂ concentrations at the SEB were higher than at MEB, with both sites showing increased levels during the night. SEB maintained elevated concentrations continuously from 6:00 p.m. to 8:00 a.m. the following day. Meteorological analysis revealed that humid air advected from the ocean in summer lowered PBLH and stabilized the near-surface atmosphere, creating favorable conditions for CO₂ accumulation. Furthermore, southwesterly wind—which accounted for about 30% of summer wind in two sites—suggests that nocturnal CO₂ emissions from vegetation respiration in nearby forests contribute to the observed summer CO₂ concentration increases. Overall, this study presents a comparative, observation-based analysis of CO₂ variability across two urban sites with contrasting environmental conditions, offering insights into the interplay between local emissions and meteorological factors. The results provide a basis for developing localized air quality management strategies.

Key words: CO₂ measurement, PBLH, Southwesterly wind, Diurnal and seasonal variation, Carbon neutral

*Corresponding Author: Kyung-Ja Ha, Department of Atmospheric Sciences, Pusan National University, 2, Busandaehak-ro 63 beon-gil, Geumjeong-gu, Busan 46241, Korea.
Phone: +82-51-510-7860, Fax: +82-51-515-1689
E-mail: kjha@pusan.ac.kr

1. 서 론

이산화탄소(CO_2)는 대표적인 온실가스로 기후변화의 주요 원인 중 하나로 널리 알려져 있다. 특히 2000년대 이후 화석 연료 사용 증가에 따른 CO_2 배출량의 급격한 증가는(Canadell et al., 2007), 기후변화에 대한 CO_2 의 기여도를 더욱 부각시켰다. CO_2 는 발전소, 산업 공정, 농업 및 축산, 수송, 건물 냉난방, 토지 이용 변화 등 다양한 인위적 활동을 통해 배출되며(Friedlingstein et al., 2023), 그 중 도시 지역은 높은 인구 밀도와 산업 활동의 집중으로 인해 대기 중 인위적 CO_2 배출량의 70% 이상을 차지한다(Seto et al., 2014). 또한 산업화 이후 지속적인 도시화 추세를 고려할 때, 도시 지역은 향후 CO_2 농도 증가에 있어 더욱 중요한 역할을 할 것으로 전망된다(Schwandner et al., 2017; Park et al., 2022). 도심 지역에서는 교통, 산업, 건물 난방 등 다양한 인위적 요인에 의해 상당량의 온실가스가 배출되며, CO_2 농도는 관측 지점 주변의 토지 이용 특성과 배출원 밀집도에 따라 크게 달라 질 수 있다. 이와 함께, 수평 및 연직적인 기상 조건과 대기 확산 특성 또한 CO_2 농도의 단기적 및 계절적 변동성에 영향을 미친다(Park et al., 2022). 따라서 도시 지역의 CO_2 배출 특성과 농도 변화에 대한 정량적이고 체계적인 이해는 기후 변화 대응 및 도시 대기 환경 개선을 위해 중요하다.

전 세계적으로 CO_2 농도 변화에 대해 장기 모니터링이 이루어지고 있으며, 특히 하와이 마우나로아(Mauna Loa Observatory, MLO)에서는 대기 중 CO_2 의 지속적인 관측이 이루어지고 있다(Keeling et al., 1976; Keeling et al., 1995). 1974년 이래 관측 결과는 대기 중 CO_2 농도가 장기적으로 증가하고 있음을 명확히 보여주었고, 이 중 약 59%가 화석 연료 연소에 기인하는 것으로 나타났다(Thoning et al., 1989). 국내에서는 안면도, 고산, 울릉도 등 세 곳의 기후변화 감시소에서 CO_2 배경 농도를 측정하고 있으며, 관측 이래 이전 10년(2003~2012) 동안에는 2.2 ppm yr^{-1} , 최근 10년(2013~2022)에는 2.5 ppm yr^{-1} 의 증가율을 보이는 등 지속적인 상승 추세를 보이고 있다(NIMS, 2023). 한편, 도시 지역은 교외나 농촌 지역에 비해 CO_2 배출량이 현저히 높기 때문에(Zhao et al., 2010), 도심 내 관측의 중요성 또한 강조되고 있다. 미국 보스턴, 중국 상하이, 프랑스 파리 등 여러 도시를 대상으로 한 선행 연구에 따르면, 도심 중심부에서 CO_2 농도가 외곽 지역보다 더 높게 나타났으며, 이는 주로 인위적 배출의 차이에 기인한다(Hutyra et al., 2011; Pan et al., 2016; Xueref-Remy et al., 2018).

국내에서는 환경부의 지원 아래, 19개 대학 및 연

구기관이 참여하는 Korea Carbon Project (KCP) 연구팀이 서울을 중심으로 “관측기반 온실가스 공간정보 지도 구축 기술개발사업”을 수행하고 있으며, 이를 통해 국가 탄소중립 이행 현황을 정량적으로 진단하고, 지역별 온실가스 농도 특성을 파악하기 위해 연구를 진행하고 있다(Korea Carbon Project; <https://korea-carbon-project.org>) (Park et al., 2021; Park et al., 2022). 수도권 지역에서는 CO_2 모니터링 체계가 점차 정비되고 있으나 수도권 이남지역, 특히 영남권에서는 관측이 거의 이루어지지 않았고, 특히, 부산 지역을 대상으로 한 실측 기반의 정량적 연구는 여전히 부족한 실정이다.

이에 본 관측에서는 부산 도심 내 배출원 및 환경 특성에 따른 CO_2 농도의 시공간적 차이를 규명하고자 부산 도시에 위치한 부산대학교 캠퍼스 내의 식생이 풍부한 환경과 거주 시설 밀집 환경 조건을 지닌 각각의 지점에 CO_2 농도 관측 장비를 설치하여 2024년 2월부터 농도 관측을 수행하였다. 또한, 본 관측에서는 두 지점의 배출원 및 환경 특성 분석을 위해 계절별 및 일주기별 CO_2 농도 변화 양상을 분석하고, 풍향, 풍속 및 PBLH 등 주요 기상 요소가 CO_2 농도 변동에 미치는 영향을 평가하고자 하였다.

2. 자료 및 방법

2.1 관측지점 설정 및 위치

부산은 한반도 남동단에 위치한 해안 도시로서(Fig. 1a), 대마 난류에 인접해 황해, 동해의 해안 도시에 비해 비교적 따뜻한 난류의 영향을 받는다. 1960년대 이후 급격한 산업화와 도시화가 이루어져 왔으며, 도시의 복합적인 기후변화 특성이 나타나는 지역이다(Jeon et al., 2023). 2023년 기준, 부산광역시의 탄소배출량은 $28,340,211 \text{ tonCO}_2\text{eq}$ 으로, 대한민국 지방자치단체 17개 중 10번째 순서이며 전국 배출량의 약 4.5%를 차지했다(국토교통부 탄소공간지도 시스템 통계; <https://www.carbonmap.kr/index.do>). 부산시의 부문별 배출량은 전기, 가스, 수송, 지역난방 순서로 각각 $19,526,908 \text{ tonCO}_2\text{eq}$, $6,846,679 \text{ tonCO}_2\text{eq}$, $1,894,298 \text{ tonCO}_2\text{eq}$, $72,326 \text{ tonCO}_2\text{eq}$ 를 기록했다.

본 관측은 부산광역시 금정구 장전동 소재의 부산대학교 부산캠퍼스 내 두 지점에서 2024년 3월 1일부터 2025년 2월 28일까지 1년 간 관측된 CO_2 농도 자료를 활용하였다. 부산대학교 부산캠퍼스는 금정산(고도 801.5 m) 남사면 경사지에 위치하고 있으며 캠퍼스 전역이 해발 약 40~150 m 사이에 있고 도심과 산림이 혼합된 환경에 있어 관측 장소에 따라 특성이 구분된다. 도심 내 인위적 요인과 자연환경 요소가 대기 중 CO_2 농도에 미치는 영향을 규명하고자, 관측

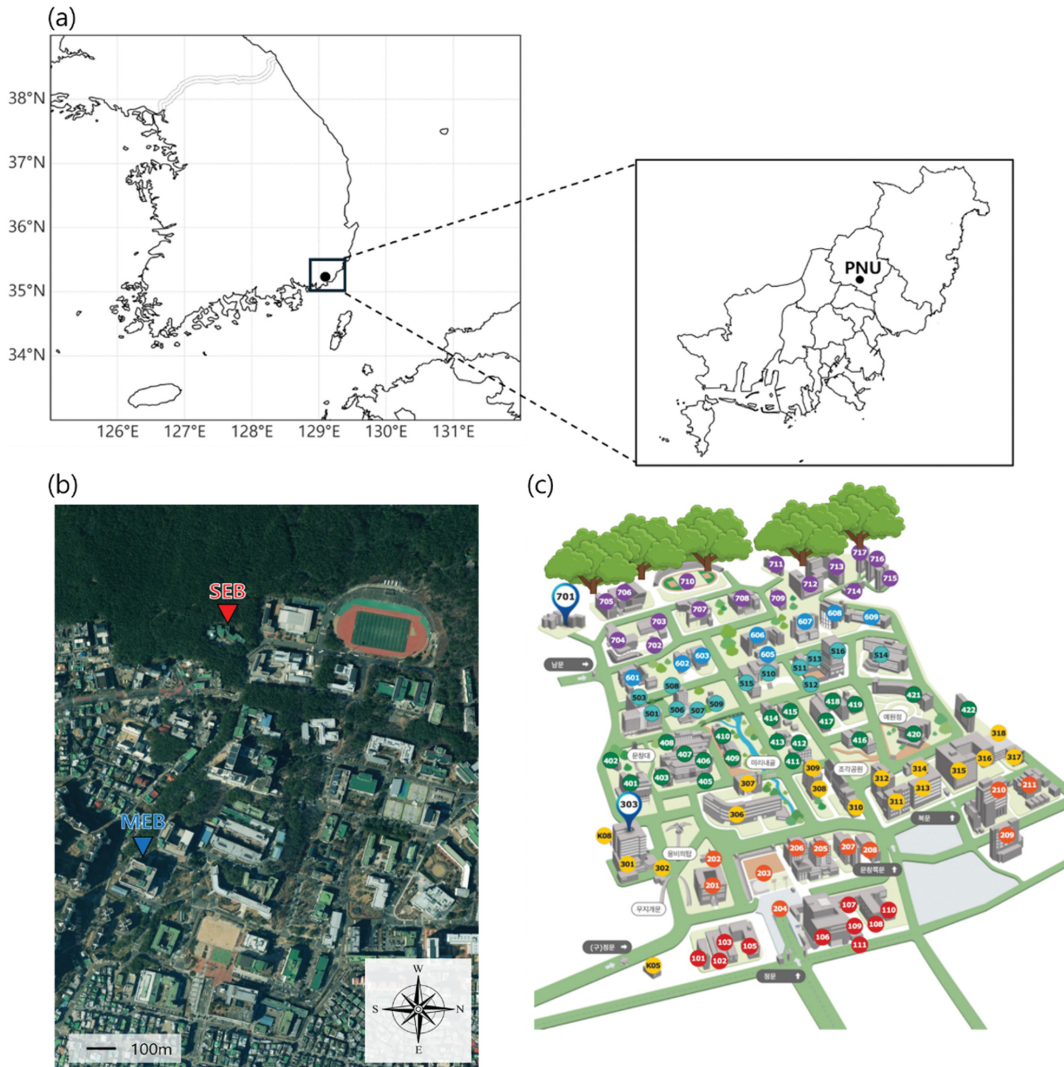


Fig. 1. (a) The location of the Busan campus of Pusan National University (PNU) in Busan, Korea (black circle). (b) Satellite map showing the Second College of Education Building (SEB; red circle) and the Mechanical Engineering Building (MEB; blue circle) on PNU. (c) Map of Busan campus of the PNU. The SEB is located on the upper left, and the MEB is located on the lower left of the campus.

대상지로 차량 진입이 활발하고 주거시설이 밀집한 지점과, 상대적으로 녹지와 산악지형의 영향을 많이 받는 지점을 대표할 수 있는 부산대학교 부산캠퍼스 내 두 지점 Second College of Education Building (SEB), Mechanical Engineering Building (MEB)을 선정하였다. 동일한 캠퍼스 내에 위치하되, 환경적 특성이 뚜렷이 대비되는 두 지점을 비교 분석함으로써, 도심 내 환경 차이가 CO₂ 농도에 어떤 영향을 미치는지를 보다 명확히 분석할 수 있다. Figure 1b는 관측 지점의 위성 관측 사진이며, Fig. 1c는 두 관측 지점

을 나타낸 부산대학교 부산캠퍼스의 약도이다. 두 지점의 관측장비는 모두 건물 옥상에 설치되었으며, 두 지점 사이의 거리가 약 555 m여서, 각 지점을 중심으로 서로 범위가 중복되지 않도록 200 m 반경으로 각 지점의 주변환경 특성을 구분하였다. SEB 지점은 해발고도가 124 m(지면과의 고도차이 11 m)로 상대적으로 고도가 높고, 식생 면적 58.1%(침엽수림 56.6%, 혼효림 0.1%, 인공 초지 1.4%), 교통지역 11%, 상업지역 6.3%, 그리고 공공시설지역, 문화, 체육 및 휴양지역이 24.6%를 차지하고 있다. 따라서, SEB 지점은

식생에 의한 CO_2 흡수 영향을 고려할 수 있는 지점으로, 배출원이 직접적인 영향을 받는 도심과 대비되는 환경에서의 CO_2 농도 변화를 관측하기 위한 목적으로 설치되었다. 반면, MEB 지점은 SEB에 비해 해발고도가 93 m(지면과의 고도차이 43 m)로 낮고 주거시설이 밀집된 도심에 비교적 가까이 위치하며, 반경 200 m에서 주거지역 42.8%, 교통지역 12.5%, 식생(활엽수림, 침엽수림, 인공 초지) 18.6%, 공공시설 지역 24.2%, 인공 나지 1.9%로 구성되어 있다. MEB 지점은 도시 지역의 특성을 반영할 수 있는 위치로, 생활권 배출원의 영향을 포함한 도시 대기 중 CO_2 농도 특성을 파악하기 위한 목적으로 설치되었다. 각 지점의 반경 200 m 토지 피복 정보는 환경부 환경공간정보서비스(<https://egis.me.go.kr/>)에서 제공한 자료를 활용하였다. 해당 자료는 2023년 5월부터 12월 사이에 제작된 중분류 토지 피복 데이터(5 m 해상도)이며, 오픈 소스 데스크탑 지리정보시스템(Quantum Geographic Information System; QGIS) 3.22.7 버전을 이용해 계산되었다.

2.2 측정 센서, 측정요소 및 관측

본 관측은 부산 지역의 두 관측 지점에서 장기간의 CO_2 농도 측정 및 수집을 위해, 서울대학교에서 구축한 CO_2 측정 시스템(The Seoul National University CO_2 Measurement; SNU CO_2 M)을 활용하였다(Park et al., 2021; Park et al., 2022). SNU CO_2 M은 CO_2 측정 센서인 Licor 사의 LI-850 센서(Licor Inc., Lincoln,

NE, USA)와 데이터 수집 장치인 CR300 data logger (Campbell Scientific Ltd., Bremen, Germany)로 구성된다. 부산대학교에 설치된 SNU CO_2 M 구성은 Fig. 2와 같다. LI-850은 CO_2 와 수증기(H_2O)를 동시에 측정할 수 있는 장비로, CO_2 의 측정 범위는 0~20,000 ppm, 수증기 혼합비(H_2O mixing ratio)의 측정 범위는 0~60 mmol mol⁻¹이며, 초 단위(1 Hz)로 데이터를 측정한다. 또한, 해당 센서는 비분산 적외선 흡수법(NDIR, Non-Dispersive Infrared)을 기반으로 하며, CO_2 농도는 $\pm 1.5\%$ 이내의 정확도와 $< 0.4 \text{ ppm } ^\circ\text{C}^{-1}$ 이하의 온도 보정 안정성을 갖는다. LI-850을 통해 측정된 CO_2 농도 자료는 CR300 data logger (Campbell Scientific Ltd., Bremen, Germany)를 통해 기록되며, 데이터 수집 장치를 통해 실시간 모니터링 및 원격 데이터 저장 가능한다.

측정값의 정확도와 일관성을 확보하기 위한 CO_2 관측 장비의 교정(calibration)은 기기 값과 표준 값 간의 차이를 비교하여 측정 오차를 보정하기 위한 과정으로, 본 관측에서는 Park et al. (2021)을 참고하였다. 제로교정은 CO_2 농도가 0 ppm일 때 장비가 이를 정확히 0으로 읽도록 기준 값을 설정하는 절차로 교정 시 고순도 질소(0 ppm)를 제로가스(Zero Gas)로 사용해 제로교정을 실시한 후, 443.65 ppm 및 961.25 ppm CO_2 표준가스를 스펠가스(Span Gas)로 활용하여 2점 교정을 2주 간격으로 수행하였다(Fig. 2c). 제로가스 및 스펠가스는 모두 한국표준과학연구원서 제조한 가스를 사용하였다.

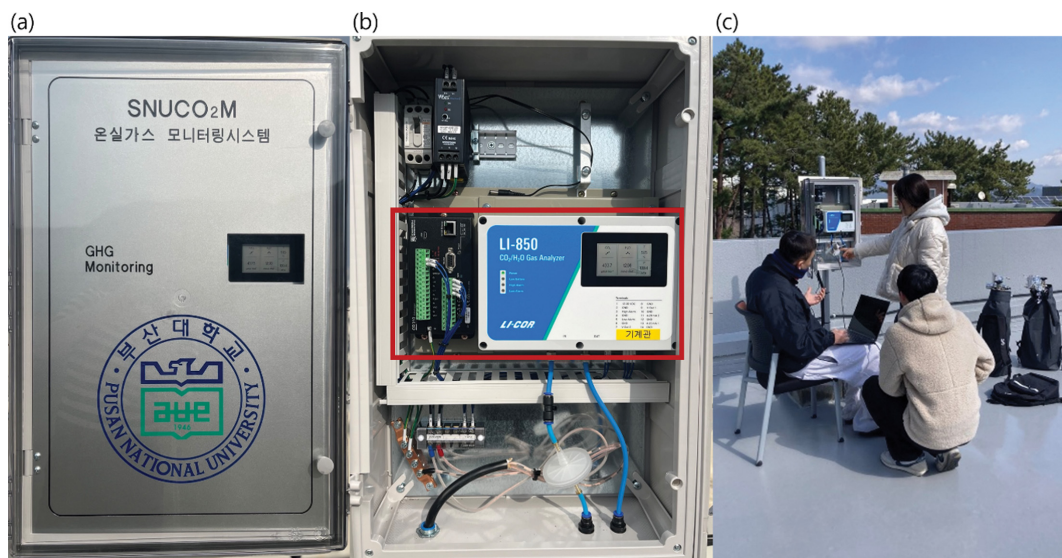


Fig. 2. (a) SNU CO_2 M CO_2 measurement instrument and (b) LI-850 sensor (central right) and the CR300 data logger (central left) inside the measurement instrument. (c) Calibration of CO_2 measurement instruments.

2.3 배경 농도, PBLH 및 바람 자료

도심 내 국지적인 배출원이 CO₂ 농도에 미치는 영향을 파악하기 위해, 국지적 오염원의 영향을 최소화하고 온실가스의 장기적인 농도 변화와 추세를 안정적으로 파악할 수 있는 배경 농도 지점의 CO₂ 농도 자료를 활용하였다. 이 자료는 한국에 위치한 울릉도(Ulleungdo-Dokdo; ULD), 고산(Gosan; GSN), 안면도(Anmyeondo; AMY)의 관측자료와 세계기상기구(WMO)에서 지정한 배경 농도 지점인 하와이의 MLO 관측소의 관측자료로 한국 배경 농도 자료는 World Data Center for Greenhouse Gases (WDCGG; <https://gaw.kishou.go.jp/>)에서 제공된 자료를 사용하였으며, MLO 자료는 NOAA Global Monitoring Laboratory (<https://gml.noaa.gov/>)에서 제공된 자료를 활용하였다.

PBL은 지표면의 직접적인 영향을 받는 대류권 하부 층을 말하며, 시공간적 기상조건 변화, 지형 등에 따라 다르지만 높이(PBLH)가 지상 100 m에서 2,000 m 정도까지 변동한다. PBLH는 대기 안정성 및 표면 열 플럭스의 영향을 크게 받아 달라지며 일일 및 계절적 주기를 보인다. PBL 상단은 자유 대기로의 이동 및 분산 과정을 부분적으로 차단하여 표면 근처의 오염 물질과 온실 가스 농도에 영향을 미친다(Vieira dos

Santos et al., 2023). 본 관측에서는 부산에서의 CO₂ 관측 농도에 PBLH가 어떠한 영향을 주는지 파악하기 위해 European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF)에서 제공하는 ERA5 재분석 PBLH 자료를 활용하였다. ERA5는 전 세계의 관측 자료와 ECMWF의 예보 모델(Integrated Forecasting System; IFS)을 통합하여 생성된 고해상도 전 지구 재분석 자료로, 약 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 의 높은 공간 해상도 및 연직 37개 기압 레벨에서 데이터를 제공한다. ERA5에서는 대기 안정도를 나타내는 지표인 벌크 리처드슨 수(bulk Richardson number)를 기반으로 PBLH를 산정하며, 임계값인 0.25를 처음 초과하는 고도를 PBLH로 정의한다.

측정기기 주변 배출원의 영향을 평가하고자 풍향 및 풍속 정보는 기상청 기상자료개방포털(Open MET Data Portal)을 통해 수집한 융합기상자료를 기반으로 하였으며, 1시간 간격의 시계열 자료를 활용하였다. 해당 융합기상자료는 기상청, 산림청 및 농촌진흥청 등 여러 공공기관 관측자료에 지형효과를 반영한 3차원 객관분석 기법을 적용하여 생산한 500 m 공간 해상도의 고해상도 격자 자료이다. 본 관측에서는 2024년 3월부터 2025년 2월까지의 데이터를 이용하였으

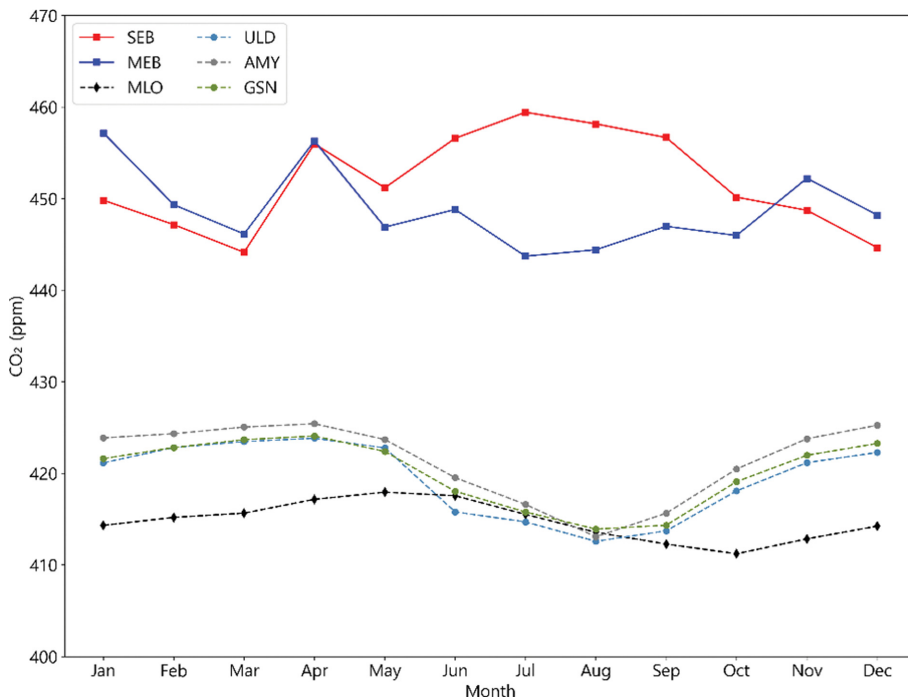


Fig. 3. Monthly variation of CO₂ concentration over MEB, SEB from May 1, 2024, to Feb 28, 2025 and over Gosan (GSN), Anmyeondo (AMY), Ulleungdo-Dokdo (ULD) and Mauna Loa Observatory (background concentration sites) from 2018 to 2023. Data for the background concentration sites were obtained from the World Data Centre for Greenhouse Gases (WDCGG).

며, MEB (위도 35.1349°N, 경도 129.0451°E) 지점과 SEB (위도 35.1355°N, 경도 129.0430°E) (Fig. 1b 참조)을 기준으로 자료를 활용하였다.

3. 관측 결과 분석

3.1 월별 관측 자료 분석 및 배경 농도와의 비교

부산대학교의 두 지점(SEB, MEB)에서 관측된 CO₂ 농도 결과의 분석에 앞서, 상대적으로 지역 배출원의 영향이 적은 배경지역에서의 월별 CO₂ 농도 경향성을 먼저 분석하였다. 한국의 배경 농도 지점인 ULD, JGS, AMY는 국지적인 오염원의 영향이 적고 배경 농도 관측에 적합한 지역으로, 이산화탄소를 포함한 주요 온실가스의 장기적인 농도 변화와 추세를 안정적으로 파악할 수 있는 특징을 가진 관측소이다. 해당 관측소들은 국가 차원의 기후변화 감시체계의 일환으로 운영되며, 대기 중 온실가스 농도 변화의 기초 자료 생산에 중요한 역할을 하고 있다. 이들과 SEB, MEB의 관측자료를 비교함으로써 도심 내 국지적인 배출원이 CO₂ 농도의 월별 경향성에 미치는 영향을 파악하고자 하였다. WMO에서 지정한 배경 농도 지점인 MLO를 포함한 네 지역의 월별 평균 CO₂ 농도는 네 관측소에서 공통적으로 확보되는 최근 6개년(2018-2023) 자료를 기반으로 활용하였다.

Figure 3은 두 관측 지점 SEB, MEB와 배경 농도 지역의 월별 CO₂ 농도 변화를 시계열로 시각화한 결과를 보여준다. 분석 결과, 배경 농도 지점에서의 연평균 CO₂ 농도는 ULD: 419.4 ppm, GSN: 420.1 ppm,

AMY: 421.4 ppm, MLO: 414.8 ppm으로 나타났으며, 한국의 배경 농도 지역에서는 여름철에 CO₂ 농도가 낮아지고, 가을부터 다음 해 봄까지 점진적으로 증가하는 경향을 보였다. 이는 식물의 광합성 작용이 여름철에 활발해지면서 대기 중 CO₂를 흡수하는 반면, 봄과 겨울철에는 식물의 호흡이 감소하여 CO₂ 농도가 상대적으로 증가하는 일반적인 CO₂ 농도 변동의 계절적 특성과 일치한다(Randerson et al., 1997). 반면, 부산대학교 내 두 관측 지점의 경우, SEB는 평균 451.9 ppm으로 한국 배경 농도 ULD, GSN, AMY의 평균치인 420.3 ppm보다 약 31.6 ppm 높았고, MEB는 448.8 ppm으로 약 28.5 ppm 높은 수치를 나타냈다. 이와 같은 차이는 배경 농도 지점과 달리 두 지점 모두 도시화로 인한 인위적 CO₂ 배출 증가의 영향을 받고 있음을 시사하며, 이러한 차이는 지역 배출원이 온실가스 농도 증가에 어느 정도의 기여를 하는지 정량적으로 확인할 수 있는 지표가 될 수 있다.

한편, 두 지점 모두 배경 농도에 비해 연 평균 CO₂ 농도가 더 높게 나타나는 점은 동일하지만, 계절에 따른 변동성은 지점별로 다르게 나타났다. 따라서 본 관측에서는 이러한 계절별 변동성의 차이 분석을 위해 두 지점의 계절별 및 월별 CO₂ 농도 변화를 분석하고자 하였다.

3.2 계절적 변동성 분석

부산대학교에서 관측된 CO₂ 농도는 계절에 따른 변동성이 지점별로 서로 다르게 나타남을 확인하였으며, Fig. 4는 두 지점에서의 계절별 변동성 차이 분석을

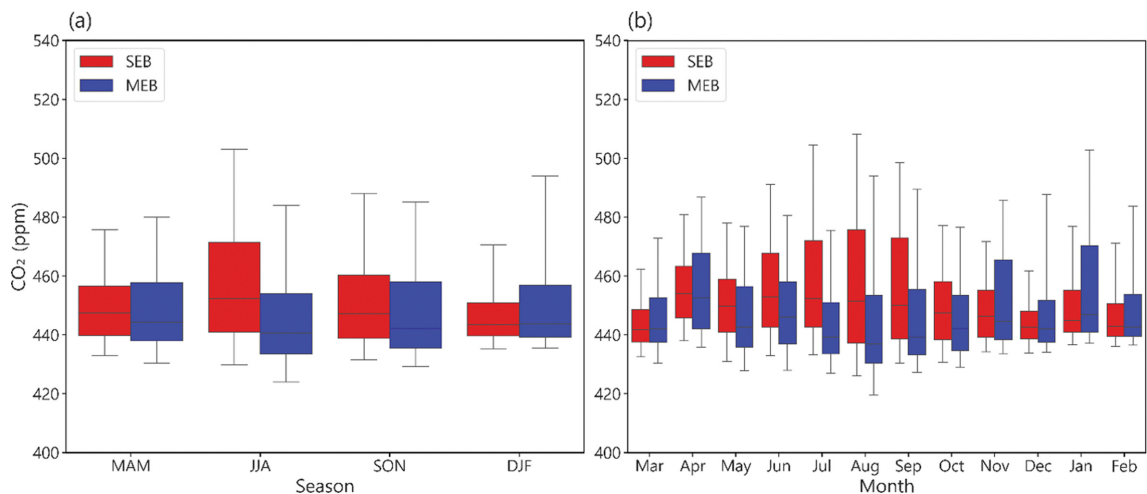


Fig. 4. A box plot illustrating (a) the seasonal cycle and (b) monthly variations of CO₂ concentrations at SEB (red) and MEB (blue). The box represents the 25th to 75th percentiles. The black whiskers indicate the 5th and 95th percentiles. The black line within each box indicates the median value.

위해 계절별, 월별 CO₂ 농도 변화를 시계열로 나타낸 그림이다. SEB의 계절별 평균 CO₂ 농도는 각각 449.8 ppm(봄), 458.2 ppm(여름), 451.8 ppm(가을), 447.2 ppm(겨울)으로 나타났고, MEB의 경우 449.1 ppm(봄), 445.6 ppm(여름), 448.4 ppm(가을), 451.6 ppm(겨울)으로 관측되었으며, 다른 배경 농도 지역과 마찬가지로 여름철에 평균 CO₂ 농도가 낮아지는 경향을 보였다. 그러나 SEB는 6월부터 8월까지 CO₂ 농도가 지속적으로 높은 농도를 유지하며, 여름철 농도가 오히려 다른 계절보다 높은 비전형적인 계절 패턴을 보였다.

SEB 지점은 MEB 지점보다 지형고도는 높지만(SEB: 124 m, MEB: 93 m), 지표면과의 고도 차이는 오히려 작으며(SEB: 11 m, MEB: 43 m), 관측소 주변의 식생 비율이 더 높은 특징을 가진다. 본 관측에서 이러한 지점별 CO₂ 농도의 차이는 주변 식생 비율 및 지표면과 관측 지점의 고도의 차이가 여름철 SEB 지점에서 나타난 비전형적인 CO₂ 농도 패턴의 원인으로 작용했을 가능성이 있다고 판단하였으며, 두 지점 간 계절별 주·야간 CO₂ 농도 변동성에 어떤 차이가 있는지 확인하기 위해 일주기 변동 특성을 분석하였다.

3.3 일주기 분석

Figure 5는 시간에 따른 CO₂ 농도의 특징을 파악하고자 계절별 일주기 변동 특성을 분석하였다. 먼저, SEB 지점에서는 봄과 가을에 오후 13시, 여름과 겨울에는 오후 14시경에 하루 중 최소 농도를 기록한 후, 새벽까지 점진적으로 증가하는 양상을 보였다. 하루 중 최대 농도는 봄, 가을에는 오전 7시, 여름의 경우 상대적으로 빠른 오전 5시로 최고치를 나타냈으며, 겨울에는 오전 8시경으로 나타났다. MEB 지점에서는 봄에는 오후 12시, 여름에는 오후 16시, 가을과 겨울에는 오후 14시경에 CO₂ 농도가 가장 낮게 나타났으며, 최대 농도는 봄에는 오전 5시, 여름에는 오전 6시, 가을에는 오전 7시, 겨울에는 오전 8시경으로 나타났다.

이처럼 두 지점 모두 CO₂ 농도는 야간 동안 높은 농도를 유지하며, 일출 직전에 최대 농도에 도달하는 반면, 주간 동안에 농도가 꾸준히 감소하는 양상을 보였다. 이는, 일출 시간 이후 일사량 증가 및 식물의 활발한 광합성으로 인 해 낮 시간 동안 식물의 CO₂ 흡수량이 증가하기 때문이다(Bacastow et al., 1985).

그러나, SEB 지점에서의 주간 CO₂ 농도가 계절에 따라 큰 차이를 보이지 못한 반면, 야간 시간대의 평균 농도는 계절 별로 뚜렷한 차이를 보였으며, 이는 MEB 지점과 SEB 지점 간의 가장 뚜렷한 차이 요소로 확인되었다. 특히, SEB는 여름철에 야간의 CO₂ 농도가 다른 계절에 비해 크게 상승하는 특징적인 패턴을 보였으며, 여름철 야간 부터 이른 아침 시간대(0000~0700 LST)에 CO₂ 농도는 약 468.9 ppm으로, CO₂ 농도가 가장 낮았던 겨울철(448.5 ppm) 야간 대비 20.4 ppm 이상 높게 관측되어 다른 계절에 비해 두드러지게 높아지는 경향이 관측되었다. 이와 더불어, SEB 지점에서는 여름철에 시간대별 CO₂ 농도 변동성 또한 다른 계절보다 크게 나타났으며, 이와 같은 계절별 변동성 증가는 Fig. 6의 박스 플롯에서 뚜렷하게 확인된다. 이러한 계절적 패턴으로 미루어 볼 때, 3.1절에서 언급한 여름철 SEB 지점의 CO₂ 농도 증가는 해당 지점에서의 야간 CO₂ 농도가 다른 계절에 비해 높게 나타났기 때문으로 보인다. 이에 따라, 여름철 SEB 지점에서 야간 CO₂ 농도가 상승한 원인을 규명하기 위해 계절별 풍향·풍속 분포 및 PBLH의 변화를 추가로 분석하였으며, 이를 통해 SEB 지점에서 계절별 CO₂ 패턴이 MEB 또는 기타 배경 농도 지점과 어떻게 다른지 파악하고자 하였다.

3.4 계절에 따른 풍향 및 풍속의 차이가 CO₂ 농도에 미치는 영향 분석

3.2에서 나타난 바와 같이, 부산대학교에서 관측된 CO₂ 농도는 지점에 따라 계절패턴의 차이가 발생하

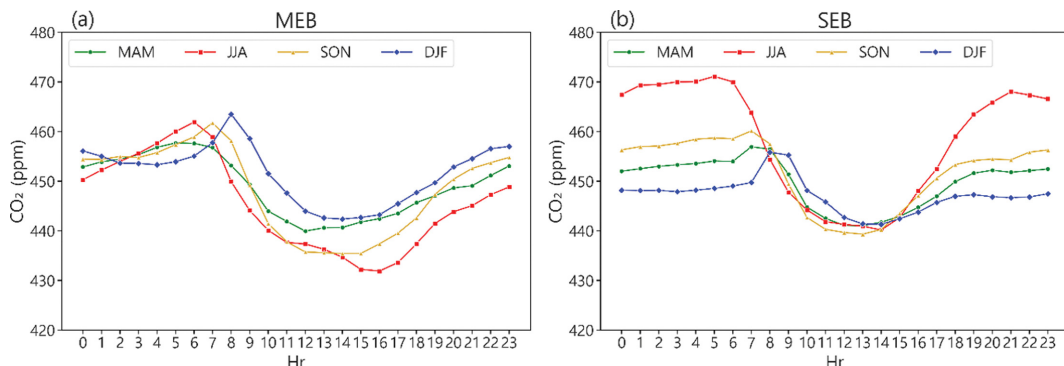


Fig. 5. Diurnal cycle of seasonal CO₂ concentration at (a) MEB and (b) SEB for each season.

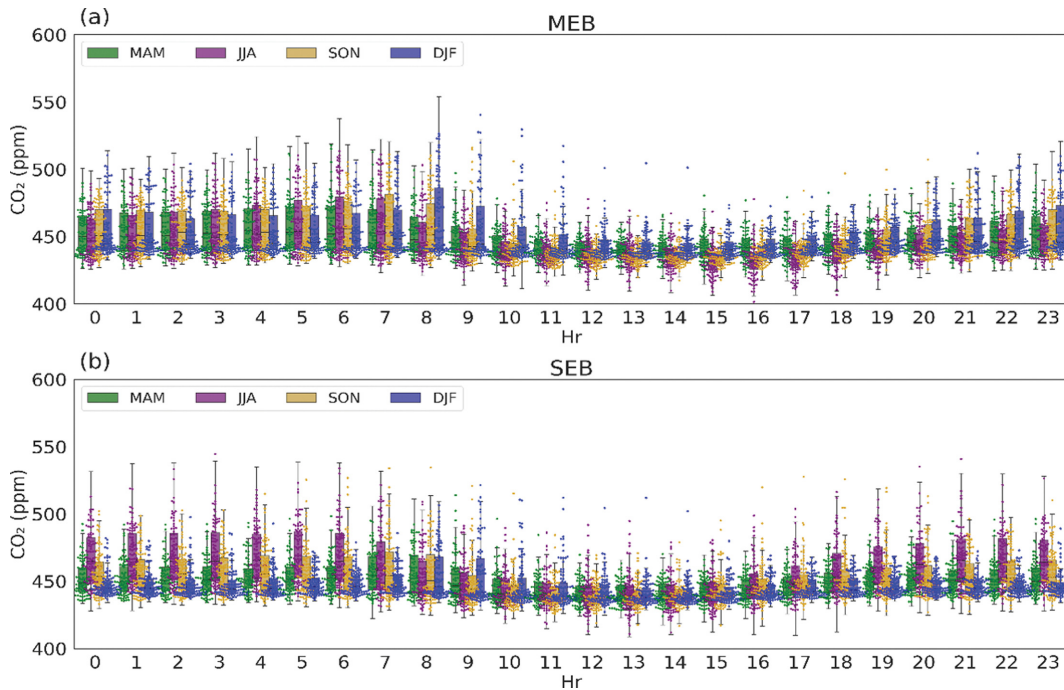


Fig. 6. A box plot illustrates the diurnal cycle of seasonal concentration at (a) MEB and (b) SEB for each season. The box represents the 25th to 75th percentiles. The black whiskers indicate the 5th and 95th percentiles. The black line within each box indicates the median value, and the dots represent hourly mean concentrations averaged for each month.

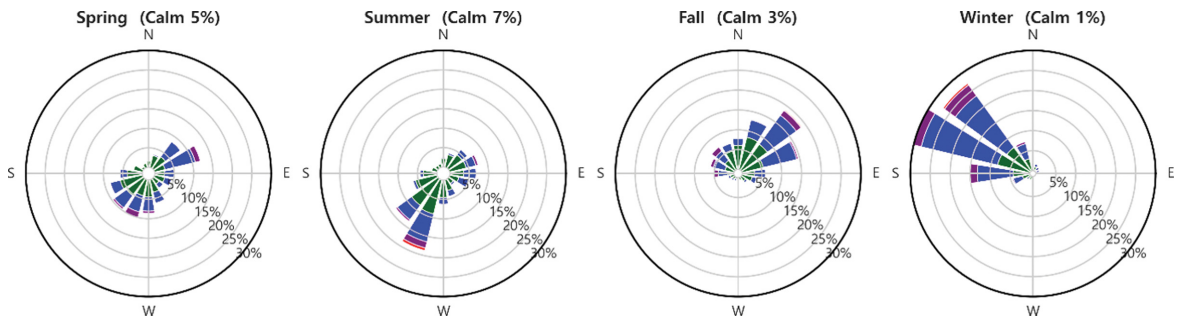


Fig. 7. Wind rose for each season (Spring, Summer, Fall, Winter) at MEB. Wind speed was categorized using thresholds of 0.5, 2.0, 3.5 and 5 m/s. Corresponding color codes were assigned as follows: green for speeds ≥ 0.5 m/s, blue for ≥ 2.0 m/s, purple for ≥ 3.5 m/s, and red for ≥ 5.0 m/s.

였으며, 이는 특히 여름철 야간에서의 CO₂ 농도 차이에 의한 것으로 분석되었다. 따라서, 본절에서는 계절에 따른 주변 배출원의 영향을 평가하고자 기상청 바람 자료를 통한 풍향, 풍속 분석을 수행하였다. 본 관측에서 활용한 풍향·풍속 자료는 기상청 관측망의 500 m 수평 해상도로 산출된 격자 값으로, SEB와 MEB 지점이 격자상 서로 인접(직선거리 555 m)하여 지점 간 풍향·풍속 차이가 뚜렷하게 나타나지 않아

MEB 지점에 가장 근접한 그리드 포인트의 풍향·풍속 값을 기준으로 분석하였다. Figure 7은 MEB 지점에서 일정 기간 동안 관측된 바람의 방향별 출현 빈도를 그래프로 시각화한 것으로, 막대는 바람이 불어오는 방향을 의미한다. 막대의 길이는 해당 방향에서의 출현 비율(%)을 나타내며, 풍속은 0.5, 2.0, 3.5, 5 m s⁻¹를 기준으로 구간을 나누어 분석하였으며, 각 풍속 계급은 색상 구분을 통해 시각적으로 표현하였다. 풍속

이 0.4 m s^{-1} 이하인 바람(Calm)의 비율은 각 계절별 그래프 제목 옆에 함께 표기하였다.

분석 결과, 여름을 제외한 봄, 가을, 겨울철에는 북동풍 및 북서풍을 포함한 북풍계열 바람이 주로 관측되었다. 봄철에는 남서풍이 조금 더 우세한 경향을 보였으나, 북동풍과 남서풍이 혼재하는 경향을 보였고, 가을철에는 전체 바람의 40%의 북동풍, 겨울철에는 북서풍과 북풍이 주로 나타나 북풍 계열의 바람 빈도가 높게 나타났으며, 풍속 $2.0\text{--}3.5 \text{ m s}^{-1}$ 이상의 바람이 우세하게 관측되었다. 반면, 여름철 전체 바람의 약 35% 이상이 남서방향에서 불어왔으며, 주로 남서풍의 풍속은 2.0 m s^{-1} 이상으로 나타났다. 또한, 겨울철의 0.4 m s^{-1} 미만의 바람 비율이 1%로 사계절 중 가장 낮았던 것에 반해, 여름의 경우 전체 바람의 7%가 0.4 m s^{-1} 미만의 풍속을 보여, 상대적으로 대기의 혼합이 억제되는 현상을 보였다.

이러한 여름철의 풍속과 풍향 분포는 SEB 주변에 풍부한 식생 환경이 여름철 SEB의 야간 CO_2 농도 증가에 직접적인 영향을 미치는 데 기여한 것으로 분석됐다.

선행 연구에 따르면, 주변 식생 비율이 도시에 비해 상대적으로 높은 지역에서 여름철에 주간에는 광합성으로 CO_2 농도가 감소하지만, 야간에는 식물 호흡의 영향으로 CO_2 농도가 상승하는 것으로 보고되었다(Haszpra, 2024). SEB 지점의 여름철 CO_2 농도는 특히 야간에 증가하는 경향을 띄었는데, 이는 SEB 지점의 관측기기가 MEB 지점보다 지표면에 더 가까운 높이에 설치되어 있었으며, 해당 지점이 금정산의 산사면에 위치하여, 식생에 의해 배출된 CO_2 의 영향을 더 크게 받았기 때문으로 분석되었다.

또한, 여름철에 주로 형성된 남서풍과 상대적으로 낮은 풍속의 비율이 높은 점도 식생에 의해 배출된 CO_2 가 SEB 지점의 야간 CO_2 농도 상승에 영향을 미

친 것으로 파악되었다.

3.5 PBLH 변화의 비교를 통한 관측 특성

본 관측에서는 추가적으로 PBLH가 CO_2 농도에 미치는 영향을 파악하기 위해, CO_2 농도의 일주기 및 월별 PBLH 변화를 분석하였다. Vieira dos Santos et al. (2023) 에 따르면 PBLH와 CO_2 농도는 음의 상관관계가 있으며, 특히 PBLH가 낮아지는 야간에는 CO_2 의 연직 혼합이 제한되어 지표 근처에서의 농도 상승을 유발할 수 있는 것으로 알려져 있다.

ERA5 재분석장에서 나타난 부산지역 일 최고 PBLH는 3월에 월평균 약 1,400 m로 연중 가장 높게 나타났다. 여름철의 경우 강한 태양 복사에너지의 영향으로 지표면의 온도가 매우 높아졌음에도 불구하고 일 최고 PBLH는 약 1,000 m 이하로 다른 계절에 비해 상대적으로 낮게 관측되었다. 이는 해양의 영향에 기인한 것으로 추정되며, 해양에서 유입된 수증기가 하층 대기의 안정도를 높여 경계층 발달을 억제했을 가능성이 있다(Kim et al., 2024; Zeng et al., 2004). Figure 8b는 PBLH의 계절별 일주기 패턴을 분석한 결과로, Fig. 8a와 마찬가지로 여름철에 다른 계절에 비해 낮은 PBLH가 일관되게 나타났다. 특히, 일 최고 PBLH가 형성되는 오후 시간대(1200~1700 LST)에서도 여름철 PBLH는 다른 계절보다 낮은 값을 유지했으며, PBLH는 각 계절 주간 시간대(0900~2100 LST)에 봄철 최고 970 m, 여름철 최고 780 m, 가을철 최고 940 m, 겨울철 최고 1,060 m로 최대값이 나타났다. 야간 시간대(2100~0900 LST)에는 봄철 340 m, 여름철 390 m, 가을철 380 m, 겨울철 430 m로 각각의 최대값이 관측되었다. 주간 및 야간 고도차는 봄철 630 m, 여름철 390 m, 가을철 560 m, 겨울철 630 m로 각각의 최대값이 관측되었다. 주·야간 고도차는 봄과 겨울이 630 m로 가장 컸으며, 여름철

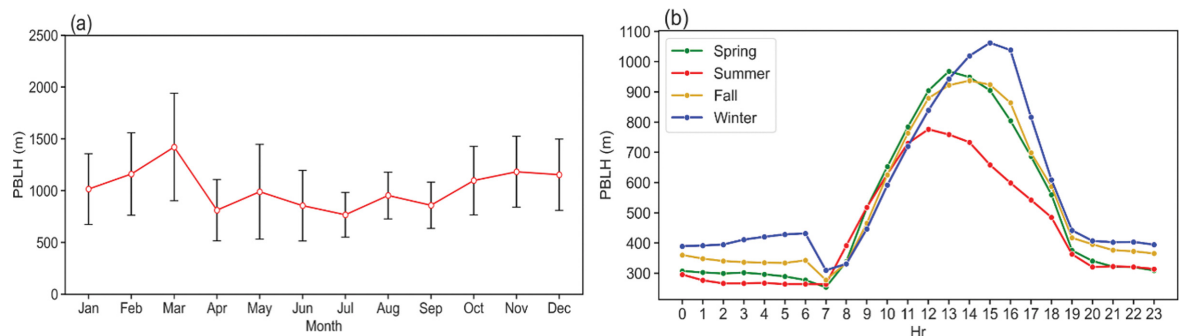


Fig. 8. (a) Monthly means (red) of the daily maximum planetary boundary layer height (PBLH). The black bar means the standard deviation for daily maximum PBLH and (b) diurnal cycle of mean PBLH for each season (Spring, Summer, Fall, Winter).

은 390 m로 계절 중 가장 작은 일변화 폭을 보였다. 이는 여름철에 상대적으로 CO₂ 농도가 높게 관측된 주요 원인으로 해석된다. 일반적으로 여름철은 광합성이 활발하게 일어나 CO₂의 농도가 낮게 측정된다(Fig. 3 참조). 그러나, SEB 지점에서는 오히려 여름철의 CO₂ 농도가 높게 측정되었으며, 이는 여름철 야간에 식물의 강한 호흡 작용과 더불어, 여름철 PBLH 차이가 가장 적었던 시기에 남서풍 계열의 바람으로 유입된 CO₂가 역전층에 축적되어 농도가 증가한 것으로 해석된다(Haszpra, 2024).

4. 요약 및 결론

본 관측에서는 2024년 3월 1일부터 2025년 2월 28일까지 부산대학교 내 두 지점에서 관측된 대기 중 CO₂ 농도 자료를 기반으로, 일주기, 월별 및 계절별 변동성을 비교 분석함으로써, 관측지의 공간 및 환경 특성에 따른 CO₂ 농도의 차이를 살펴보았다. 연평균 CO₂ 농도는 SEB 지점이 451.9 ppm, MEB 지점이 448.8 ppm으로 나타났으며, 이는 한국 내 배경 농도 관측소(ULD, GSN, AMY 평균: 420.3 ppm)보다 각각 약 31.6 ppm, 28.5 ppm 높은 수치이다. 이러한 결과는 두 지점 모두 도시화로 인한 인위적 CO₂ 배출의 영향을 받고 있음을 시사하며, 배경 대비 농도 차이는 지역 배출원의 기여를 정량적으로 평가할 수 있는 지표로 해석된다. 두 지점의 계절별 CO₂ 농도 분석에서는 MEB의 경우 국내 배경 농도 관측소들과 유사하게 여름철에는 CO₂ 농도가 낮고 가을 이후 점차 증가하는 전형적인 계절 패턴이 나타났지만, SEB에서는 여름철 CO₂ 농도가 오히려 458.2 ppm으로 일 년 중 가장 높게 관측되었고, 이러한 경향을 보다 정밀하게 파악하기 위해 여름철의 일주기 변동성에 대한 추가 분석이 수행되었다. 그 결과, SEB는 여름철 야간부터 이른 아침 시간대(0000~0700 LST)에 CO₂ 농도가 가장 높게 나타났으며, 이 시간대 평균 CO₂ 농도는 SEB에서 468.9 ppm, MEB에서는 456.4 ppm으로, 두 지점 간 약 12.5 ppm의 뚜렷한 차이가 확인되었다. 기상 요인이 여름철 CO₂ 농도에 미치는 영향을 파악하기 위해, 풍향, 풍속 및 PBLH를 분석한 결과, 여름철 부산 지역은 남서풍의 빈도가 35%로 가장 높게 나타났으며, PBLH가 여름철 다른 계절에 비해 낮게 형성되고 일변화 폭도 가장 작아, 해양에서 유입된 수증기로 인한 하층 대기안정도의 증가와 혼합 억제 현상이 함께 나타난 것으로 해석된다. SEB 지점의 동쪽에는 주거지역이, 서쪽에는 숲이 위치하고 있으며(Fig. 1b), 여름철 야간에 식생의 호흡에 의해 방출된 CO₂가 낮은 PBLH와 결합되어 지면 부근에 축적될 수 있는 환경이 형성된다. 특히, 이 시기에는 남

서풍 계열의 바람이 우세하게 나타나, 서쪽 숲에서 배출된 CO₂가 SEB 지점으로 유입되었을 가능성이 있다. 이러한 조건은 SEB 지점에서 여름철 야간 CO₂ 농도가 상대적으로 높게 나타난 원인으로 해석될 수 있다. 한편, SEB 지점에서 관측 장비는 지면에서 불과 11 m로 MEB (43 m)보다 낮아서, 상대적으로 지표면에서 발생하는 토양 및 식생 기원 CO₂ 배출원의 영향을 직접적으로 받을 가능성이 크며, 반경 200 m 내 환경에서 식생 비율이 약 58%로 MEB (약 18%)에 비해 훨씬 높다. 게다가, 관측기기가 설치된 건물이 소나무 숲에 사방으로 둘러싸인 형태라서 야간에 낮은 PBLH 조건과 남서풍 계열 바람이 강한 식생 호흡으로 배출된 CO₂를 이류시켰을 때 높은 농도로 축적되기 좋은 환경이 된다. 이처럼, 계절별 풍향과 풍속의 차이는 주변 지형 및 토지 이용 특성과 결합하여 CO₂ 농도 분포에 영향을 미치는 주요 요인으로 작용할 수 있다. 다만, 본 관측에서는 1년간의 관측 자료(2024.03~2025.02)를 기반으로 분석되었기 때문에, 향후 장기 관측자료를 통한 후속 연구가 필요하다.

본 관측 결과는 도시 지역 기상 및 주변 환경조건이 CO₂ 농도 분포에 미치는 영향을 정량적으로 이해하는 데 기여하며, 향후 영남권 내 온실가스 관측지 확대를 통해 지역별 CO₂ 농도의 공간적·시간적 특성을 보다 정밀하게 파악할 수 있다. 이는 국지적 배출원의 식별 및 효과적인 온실가스 저감 정책 수립에 기여함과 동시에, 도시 기후 관리, 온실가스 감축 및 탄소중립 전략 수립을 위한 기초 자료로도 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

이 연구는 부산대 연구처의 캠퍼스 기초연구 인프라 구축 지원사업의 지원을 받아 수행되었습니다. 부산대 과제를 지원해 주신 유인권 처장님과 탄소측정장소를 지원해 주신 김홍수 학장님께 감사드립니다. 이 연구는 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 관측 기반 공간정보지도 구축 기술개발사업(RS-2023-00232066)의 지원으로 수행되었습니다. 이 연구는 환경부 기후변화특성화대학원사업의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- Bacastow, R., C. Keeling, and T. Whorf, 1985: Seasonal amplitude increase in atmospheric CO₂ concentration at Mauna Loa, Hawaii, 1959-1982. *J. Geophys. Res.: Atmos.*, **90**, 10529-10540, doi:10.1029/JD090iD06p10529.

- Canadell, J. G., and Coauthors, 2007: Contributions to accelerating atmospheric CO₂ growth from economic activity, carbon intensity, and efficiency of natural sinks. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, **104**, 18866-18870, doi:10.1073/pnas.0702737104.
- Friedlingstein, P., and Coauthors., 2023: Global Carbon Budget 2023. *Earth Syst. Sci. Data*, **15**, 5301-5369, doi:10.5194/essd-15-5301-2023.
- Haszpra, L., 2024: Multi-decadal atmospheric carbon dioxide measurements in Hungary, central Europe. *Atmos. Meas. Tech.*, **17**, 4629-4647, doi:10.5194/amt-17-4629-2024.
- Hutyra, L. R., S. M. Raciti, N. P. Phillips, and J. W. Munger, 2011: Exploring space-time variation in urban carbon metabolism. *Addressing Grand Challenges for Global Sustainability*, 11.
- Jeon, H.-E., K.-J. Ha, and H.-R. Kim, 2023: A study on characteristics of climate variability and changes in weather indexes in Busan since 1904. *Atmosphere*, **33**, 1-20.
- Keeling, C. D., T. P. Whorf, M. Wahlen, and J. Van der Plichtt, 1995: Interannual extremes in the rate of rise of atmospheric carbon dioxide since 1980. *Nature*, **375**, 666-670, doi:10.1038/375666a0.
- Keeling, C. D., R. B. Bacastow, A. E. Bainbridge, C. A. Ekdahl Jr, P. R. Guenther, L. S. Waterman, and J. F. Chin, 1976: Atmospheric carbon dioxide variations at Mauna Loa observatory, Hawaii. *Tellus*, **28**, 538-551, doi:10.3402/tellusa.v28i6.11322.
- Kim, M.-S., S.-S. Oh, M.-S. Park, M. Kang, J. Um, H.-Y. Jo, and C.-H. Kim, 2024: Characteristics of seasonal variations of planetary boundary layer heights in Busan-A comparative study of Busan vs. Seoul metropolitan area (VI). *J. Environ. Sci. Int.*, **33**, 883-899, doi:10.5322/JESI.2024.33.12.883.
- LI-850, 2022. Licor Inc, Lincoln, NE, USA. Available from: https://www.licor.com/env/products/gas_analysis/LI-830_LI-850/ (last access: 19 May 2025).
- NIMS, 2023: Report of global atmosphere watch 2023. National Institute of Meteorological Sciences, Jeju, 134 pp.
- Pan, C., X. Zhu, N. Wei, X. Zhu, Q. She, W. Jia, M. Liu, and W. Xiang., 2016: Spatial variability of daytime CO₂ concentration with landscape structure across urbanization gradients, Shanghai, China. *Clim. Res.*, **69**, 107-116, doi:10.3354/cr01394.
- Park, C., S. Jeong, H. Park, S. Sim, J. Hong, and E. Oh, 2022: Comprehensive assessment of vertical variations in urban atmospheric CO₂ concentrations by using tall tower measurement and an atmospheric transport model. *Urban Clim.*, **45**, 101283, doi:10.1016/j.uclim.2022.101283.
- Park, C., and Coauthors, 2021: Challenges in monitoring atmospheric CO₂ concentrations in Seoul using low-cost sensors. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **57**, 547-553, doi:10.1007/s13143-020-00213-2.
- Randerson, J. T., M. V. Thompson, T. J. Conway, I. Y. Fung, and C. B. Field, 1997: The contribution of terrestrial sources and sinks to trends in the seasonal cycle of atmospheric carbon dioxide. *Global Biogeochem. Cycles*, **11**, 535-560, doi:10.1029/97GB02268.
- Schwandner, F. M., and Coauthors, 2017: Spaceborne detection of localized carbon dioxide sources. *Science*, **358**, eaam5782, doi:10.1126/science.aam5782.
- Seto, K. C., and Coauthors, 2014: *Human settlements, infrastructure, and spatial planning*. In: *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change (eds. etc.)*, Cambridge University Press, 923-1000, doi:10.1017/CBO9781107415416.018.
- Thoning, K. W., P. P. Tans, and W. D. Komhyr, 1989: Atmospheric carbon dioxide at Mauna Loa Observatory: 2. Analysis of the NOAA GMCC data, 1974-1985. *J. Geophys. Res.: Atmos.*, **94**, 8549-8565, doi:10.1029/JD094iD06p08549.
- Vieira dos Santos, A., T. Souto, M. B. Almeida, F. J. S. Lopes, W. M. Nakaema, V. W. J. H. Kirchhoff, T. Tirabassi, J. C. Carvalho, and M. A. Yamasoe, 2023: Comparison of PBL heights from ceilometer measurements and greenhouse gases concentrations in São Paulo. *Atmosphere*, **14**, 1830, doi:10.3390/atmos14101830.
- Xueref-Remy, I., and Coauthors, 2018: Diurnal, synoptic and seasonal variability of atmospheric CO₂ in the Paris megacity area. *Atmos. Chem. Phys.*, **18**, 3335-3362, doi:10.5194/acp-18-3335-2018.
- Zeng, X., M. A. Brunke, M. Zhou, C. Fairall, N. A. Bond, and D. H. Lenschow, 2004: Marine atmospheric boundary layer height over the eastern Pacific: Data analysis and model evaluation. *J. Clim.*, **17**, 4159-4170, doi:10.1175/JCLI-3190.1.
- Zhao, M., Z.-h. Kong, F. J. Escobedo, and J. Gao, 2010: Impacts of urban forests on offsetting carbon emissions from industrial energy use in Hangzhou, China. *J. Environ. Manage.*, **91**, 807-813, doi:10.1016/j.jenvman.2009.10.010.