

## 충남지역 대기 중 이산화탄소와 메탄 농도 특성

유정호<sup>†</sup> · 이지학 · 유지호 · 이낙현

충청남도 보건환경연구원 대기연구부 연구사

### Spatial and temporal characteristics of atmospheric CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> concentrations in Chungcheongnam-do, South Korea

Yu, Jung Ho<sup>†</sup> · Lee, Ji Hak · Yoo, Ji Ho and Lee, Nak Hyun

Researcher, Chungcheongnam-do Institute of Health & Environmental Research, Hongseong-gun, Korea

#### ABSTRACT

To monitor climate change and support carbon neutrality, seven greenhouse gas monitoring stations were established in Chungcheongnam-do, South Korea. These were located in two urban areas (Cheonan and Asan), three industrial areas (Seosan, Dangjin and Boryeong), and two agricultural areas (Nonsan and Hongseong). From October to December 2024, carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) and methane (CH<sub>4</sub>) concentrations were measured as representative greenhouse gases. The average CO<sub>2</sub> concentration across the seven areas was 458.1 ppm, with the highest observed in Dangjin at 465.0 ppm, and CO<sub>2</sub> concentrations tended to be higher in urban areas. Local factors, such as the location of the measurement site (e.g., city center vs. suburbs) and nearby pollution sources significantly influenced the concentrations. The average CH<sub>4</sub> concentration was 2.205 ppm, with the highest concentration in Dangjin at 2.259 ppm. While CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> concentrations varied by region, they generally increased from evening to early morning and decreased during the daytime. CO<sub>2</sub> showed a stronger correlation with nitrogen dioxide (NO<sub>2</sub>) and carbon monoxide (CO) than did CH<sub>4</sub>. CO<sub>2</sub> enhancement ( $\Delta$ CO<sub>2</sub>) varies depending on the definition of background concentration using direct measurements at background sites or statistical lower-bound values. This suggests that careful consideration is needed when applying different methodologies to study and assess the distribution characteristics of greenhouse gases.

*Key words* : Carbon Dioxide, Methane, Greenhouse Gas, CRDS, Carbon Neutral, Chungcheongnam-do

#### 1. 서론

온실가스는 대기 중에서 복사에너지를 흡수하고 방출함으로써 지구 온도를 상승시키는 가스로, 대기 중에 오래 체류하여 한번 배출되면 계속 누적되어 지구온난화를 가속시키는 물질이다. 유엔 기후변화협약(UNFCCC)에서는 이산화탄소(CO<sub>2</sub>), 메탄(CH<sub>4</sub>), 아산화질소(N<sub>2</sub>O), 수소불화탄소(HFCs), 과불화탄소(PFCs), 육불화황(SF<sub>6</sub>)을 규제 대상 온실가스로 규정하고 있다(UNFCCC, 1997). 지

구온난화에 가장 크게 기여하는 주요 온실가스는 이산화탄소, 메탄, 아산화질소이며, 이들은 산업화 이전에도 자연적으로 존재하고 배출한 만큼 흡수되어 일정 농도 수준을 유지하였지만 산업화 이후 인위적으로 배출된 온실가스가 증가하여 흡수 이후에도 많은 양이 대기 중에 남아 온실효과를 일으키고 기후변화를 유발하는 것으로 알려져 있다(Park et al., 2015).

기후변화에 관한 정부 간 협의체(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)는 온실가스 농도 증가로

<sup>†</sup>Corresponding author : free841028@korea.kr (32254, 8, Hongyegongwon-ro, Hongbuk-eup, Hongseong-gun, Chungcheongnam-do, Korea. Tel. +82-41-635-6871)

ORCID 유정호 0009-0004-5613-5833  
이지학 0009-0003-0203-6103

유지호 0009-0006-4120-6381  
이낙현 0009-0001-3913-1281

인한 지구 온도 상승을  $1.5^{\circ}\text{C}$  이하로 제한하려면 온실가스 배출량을 2030년까지 2010년 대비 45% 감축해야 하며, 2050년까지 탄소중립(Net-zero, 이산화탄소 순배출량이 0이 되도록 하는 것)을 달성해야 한다고 권고하였다(IPCC, 2018). 이에 따라 우리나라에서는 온실가스 감축을 위해 2020년 10월 ‘2050 탄소중립’을 선언하였고, 2021년 9월 「기후위기 대응을 위한 탄소중립·녹색성장 기본법」(이하 탄소중립기본법)을 제정하여, 전 세계에서 14번째로 2050 탄소중립 비전과 이행체제를 법제화한 국가가 되었다.

탄소중립 이행과 지구온난화 방지를 위해서는 통계기반의 온실가스 배출량 산정 뿐만 아니라 실측기반의 대기 중 온실가스 농도를 관측하는 일은 매우 중요한 일이다. 국외에서는 세계기상기구(World Meteorological organization, WMO)를 중심으로 세계 지구대기감시(Global Atmosphere Watch Programme, GAW)관측소에서 이산화탄소, 메탄 등의 온실가스 배경농도를 관측하고 산정한다. WMO에 따르면 2023년 기준, 이산화탄소 농도는  $420.0\text{ ppm}$ (전년 대비  $2.3\text{ ppm}$  증가), 메탄 농도는  $1.934\text{ ppm}$ (전년 대비  $0.011\text{ ppm}$  증가)으로 농도는 지속적으로 증가하고 있다(WMO, 2025).

국내에서 운영 중인 국립기상과학원(기상청)의 온실가스 관측소는 지역급 규모의 관측소로 한반도의 기후변화 감시를 목적으로 1999년부터 안면도 기후변화감시소(GAW)를 통해 관측하기 시작하였으며 2012년에는 고산, 울릉도, 독도무인으로 확대하여 현재까지 운영중에 있다(Lee et al., 2019; Seo et al., 2021). 2023년 안면도에서의 이산화탄소 배경농도는  $427.6\text{ ppm}$ 으로 전년 대비  $2.6\text{ ppm}$  증가했으며 메탄 배경농도는  $2.025\text{ ppm}$ 으로 전년 대비  $0.014\text{ ppm}$  증가하였다. 또한 국립환경과학원(환경부)에서도 지구온난화 물질의 대기 중 농도를 파악하기 위해 지구대기측정망을 2012년부터 강원도 고성에서 운영하고 있다.

충남은 석탄화력, 석유화학, 철강 등 탄소 다배출 산업군이 밀집하여 2022년 기준 온실가스 배출량이 145.5 백만톤 $\text{CO}_2\text{eq.}$ (전국 대비 20.1%)로 전국에서 가장 높은 비중을 차지하여(ME, 2023) 탄소중립 실현에 매우 어려운 상황임에도 불구하고 2022년 ‘탄소중립경제특별도’를 선포하고 2024년에는 ‘2045 탄소중립 녹색성장 기본계획’을 수립하였다. 이러한 지역단위의 탄소중립 정책을 추진하고 효과를 분석하기 위해서는 지역에서의 온실가스 농도를 측정하는 것은 매우 중요하다(NIER, 2023). 하지만 대

기 중 온실가스 측정은 안면도 등 배경지역과 서울, 경기 등 일부 지역에서 실시되고 있어 충남 내 7지점을 선정하여 중장기적 측정자료를 확보하고자 하였다. 이를 통해 대기 중 온실가스 농도 특성을 파악하여 기후변화를 감시하고 향후 탄소중립 정책의 이행평가에 필요한 기초자료를 제공하고자 한다.

## 2. 연구방법

### 2.1. 대상지점 및 기간

충남은 석탄화력발전소, 석유화학정제시설, 철강제조시설 등의 대형 산업시설 뿐만 아니라 동일한 지역내에서도 도시와 농업적 성격을 보여 매우 복합적인 특성을 갖는 지역이다. 이러한 지역적 특성을 고려하여 온실가스 농도를 파악하기 위해 측정지점은 7지점으로 도시지역 2지점(천안, 아산), 산업시설 주변 3지점(서산, 당진, 보령), 농업지역 2지점(논산, 홍성)을 각각 선정하였다(Fig. 1). 서산, 당진, 보령의 대표적 산업시설은 각각 석유화학정제시설, 철강제조시설, 석탄화력발전소로 다만 서산의 측정지점 주변에는 석유화학 관련 시설들이 다수 분포해 있지만 측정지점이 지표면보다 비교적 높고 야산의 형태를 갖춘 지대에 위치하고 있다. 측정장비는 대기환경측정망 설치·운영지침에 따라 운영 중인 도시대기측정소에 설치하였고 시료채취구의 높이는 지상  $1.5\text{ m} \sim 10\text{ m}$  이하로 흡입된 대기시료는 도시대기측정소의 가스상 물질을 분배하는 매니폴드를 이용하여 장비로 유입되었다. 이를 통해 온실가스와 대기오염물질을 동시에 측정하고 기후대기 통합관리를 위한 기초자료를 생산하고자 하였으며, 측정기간은 2024년 10월부터 12월까지로 24시간 연속 측정하였다.

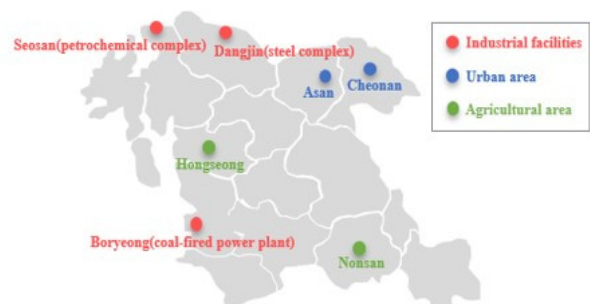


Fig. 1. Location of greenhouse gas measurement network

## 2.2. 측정방법

대기 중 온실가스는 레이저흡수분광법으로 측정하며 이는 레이저(laser) 광원을 사용하여 닫힌 샘플 경로에서 광원을 흡수하거나 산란시키는 화합물의 광학 소멸을 측정함으로써, 목적 성분 가스 농도를 자동으로 측정하는 방법이다. 측정에 사용된 장비는 Picarro사의 G2301로 레이저 흡수분광법 중 공동광자감쇠분광법(Cavity Ring-Down Spectroscopy, CRDS)으로 대기 중 시료가 펌프에 의해 샘플링되어 공동에 채워지면 특정 파장의 광소멸율에 의해 농도가 결정되는 원리이다. CRDS는 NDIR에 비해 광분해능이 높아 시간에 따른 오차가 적으며 수분의 간섭을 최소화할 뿐만 아니라 장비 내부에서 수분 농도를 측정해 내장된 수분보정 프로그램에 따라 수분의 희석효과를 보정하여 건조 공기 농도를 산출할 수 있는 장점이 있다(Li et al., 2019).

대기시료에는 수분이 0.2 ~ 3.5% 농도로 존재하기 때문에 희석효과에 의해 건조 공기 안에 있는 온실가스 농도에 영향을 미친다. 따라서 수분 제거를 위해 속관과 걸판으로 구성된 나피온제습장치를 이용하여, 속관(Nafion, 대기시료)과 걸판(PTFE, 수분이 없는 공기)의 수분농도 차이(삼투압원리)에 따라 속관의 수분이 걸판으로 이동하면서 수분을 제거하고 수분 농도는 0.05% 이하이다. 측정항목은 온실가스 대표물질인 이산화탄소와 메탄을 동시에 실시간으로 측정하였다.

온실가스공정시험기준 ES 13202(공동광자감쇠분광법)에 따라 표준가스를 사용하여 매일 2점 교정을 실시하였고, 이산화탄소는 404.5 ~ 410.3 ppm, 941.6 ~ 951.3 ppm의 표준가스를, 메탄은 2.06 ~ 2.08 ppm, 3.92 ~ 3.98 ppm의 표준가스를 사용하였다(Table 1). 기존 연구 결과에 따르면 동일한 측정장비(Picarro G2301)에 대하여 5점 교정과 1점 교정을 비교하였는데 모두 정확도가 평균 99% 이상

으로 직선성이 우수하여 정확도가 교정점 수에 큰 영향을 받지 않은 것으로 나타났다(Park et al., 2023).

## 2.3. 자료수집

측정자료는 측정장비로부터 초단위로 연속적으로 생산되어 측정소에 있는 데이터 로거로 전송된다. 데이터 로거에서는 이를 5분 단위의 평균값으로 계산하고 이를 연구원 대기환경정보시스템(TMS)에 송신한다. 5분 평균값을 활용하여 1시간 단위의 평균값(1시간 동안 5분 평균값의 합/12)을 구한 후 이를 최종적으로 사용하여 2024년 10월부터 12월까지 평균농도 산출에 활용하였다. 당진에서는 10월 18일 9시부터 11월 2일 18시까지 장비 이상으로 비교적 장기간 결측자료가 있었고 수집된 자료 중 교정중이거나 장비 점검에 따른 이상자료는 제외 후 활용·분석하였다. 또한 본 연구에서 측정한 온실가스 월평균 농도와 비교를 위해 국립기상과학원(기상청)에서 발간하는 지구대기감시 보고서의 안면도 배경농도 월평균 자료(2023년 10월 ~ 12월)를 활용하였다.

## 2.4. CPF (Conditional Probability Function) 분석

측정지점에서 얻은 풍향, 풍속 자료를 활용하여 CPF (Conditional Probability Function) 분석을 수행하였다. CPF 모델은 고농도가 나타나는 풍향과 풍속을 파악하여 배출원의 국지적 위치를 추정하는데 사용하는 것으로 본 연구에서는 프로그램 R (Version 4.2.2)의 OpenAir 패키지를 사용하여 CPF 모델을 구현하였다. CPF값은 다음의 식에 의해 계산되었고,  $n_{\Delta\theta}$ 는  $\Delta\theta$ 방향에서 불어오는 바람의 총 빈도수를,  $m_{\Delta\theta}$ 는  $\Delta\theta$ 방향에서 불어오는 바람 중 대상물질이 기준 농도 이상인 경우의 빈도수를 나타낸다.

Table 1. Specifications of greenhouse gas measurement network

| Area      | Address                      | Span gas (ppm)  |                 | Equipment     |
|-----------|------------------------------|-----------------|-----------------|---------------|
|           |                              | CO <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub> |               |
| Cheonan   | 24, bokja 1-gil              | 404.5, 942.0    | 2.08, 3.97      | Picarro G2301 |
| Asan      | 20, beonyeong-ro 224beon-gil | 410.3, 951.3    | 2.06, 3.92      |               |
| Seosan    | 385, pyeongsin 1-ro          | 410.3, 951.0    | 2.06, 3.92      |               |
| Dangjin   | 342-27, yugok-ro             | 410.3, 941.6    | 2.06, 3.97      |               |
| Boryeong  | 396, ulgyeun-gil             | 404.5, 942.0    | 2.08, 3.97      |               |
| Nonsan    | 389, simin-ro                | 404.6, 951.1    | 2.08, 3.92      |               |
| Hongseong | 8, hongyegongwon-ro          | 410.3, 942.3    | 2.06, 3.98      |               |

$$CPF_{\Delta\theta} = \frac{m_{\Delta\theta}}{n_{\Delta\theta}}$$

CPF값이 높을수록 해당 방향에 배출원이 존재할 가능성이 높은 것으로 풍속이 0.5 m/s 미만으로 매우 낮은 경우는 불어오는 방향에 대한 불확도가 높아 분석에서 제외하였고, 한계값은 75 백분위 수를 적용하였다(Kim et al., 2004; Heo et al., 2009; Oh et al., 2023).

## 2.5. 이산화탄소 증가분(CO<sub>2</sub> Enhancement, $\Delta$ CO<sub>2</sub>)

대기 중 이산화탄소 농도는 식생 활동 등 자연적 배출 및 기상, 인위적 배출, 타 지역으로부터 유입 등이 복합적으로 작용한 결과이다. 자연적 영향을 받는 농도는 인위적 배출원에서 배출되지 않더라도 일변화(식생의 광합성·호흡, 대류활동), 계절적 변화(식생의 활동으로 인해 여름철에는 낮아졌다가 봄철까지는 높아짐)가 있으며 대기 중 일정 농도 수준으로 존재한다. 내륙에서의 이산화탄소 배출 특성을 파악하고, 더 나아가 통계기반의 배출량을 검증하기 위해서는 이러한 자연적 변동성을 제거한 증가분(CO<sub>2</sub> Enhancement,  $\Delta$ CO<sub>2</sub>)이라는 개념을 사용한다. 이산화탄소 증가분은 배경농도를 제외한 인위적 배출원에 의해 증가된 이산화탄소 농도를 의미하고 다음과 같이 계산한다(NIER, 2023; Sim, 2024).

$$\Delta\text{CO}_2 = (\text{CO}_2)_{\text{obs}} - (\text{CO}_2)_{\text{bck}}$$

(CO<sub>2</sub>)<sub>obs</sub>는 내륙 등 측정지점에서 측정한 이산화탄소 농

도이고, (CO<sub>2</sub>)<sub>bck</sub>는 이산화탄소 배경농도이다. 이산화탄소 배경농도는 배경 지점에서의 농도, 풍상측 지점에서의 농도, 각 측정지점에서의 통계적 하위값(24시간 이동평균 5th percentile) 등이 활용된다. 이번 연구에서는 증가분 계산을 위해 안면도 배경 지역(2023년 10월부터 12월까지)에서의 월평균 농도(429.9 ppm)와 측정지점에서의 통계적 하위값을 활용하여 계산하였다. 통계적 하위값은 각 측정지점에서의 24시간 이동평균을 계산한 후 5 백분위 수(5th percentile)를 구하였다.

## 3. 연구결과 및 고찰

### 3.1. 온실가스 평균농도

2024년 10월부터 12월까지 7지점의 이산화탄소 평균농도는 458.1 ppm으로 배경지역인 안면도의 2023년 10월부터 12월까지의 평균농도 429.9 ppm 보다 28.2 ppm 높은 수준으로 나타났다. 지역별로는 당진에서 465.0 ppm으로 가장 높았는데 주로 도로(차량 통행)와 철강제조시설의 영향으로 예상되었다. 서산에서는 450.2 ppm로 가장 낮았는데 주변에 석유화학 관련 시설이 다수 있음에도 불구하고 측정지점과 배출원과의 거리, 측정지점이 지표면보다 높은 야산지대에 있어 다른 지역에 비하여 지표면의 온실가스 영향을 덜 받은 것으로 추정된다(Fig. 2). 또한 이산화탄소 농도가 가장 높은 당진을 제외하고 도시지역인 천안과 아산에서 각각 461.8 ppm, 463.2 ppm, 농업지역인 논산에서 459.7 ppm 순으로 높았다. 이는 3곳의 측정지점이 도심에 위치하고 있어 이산화탄소 농도는 시군 특성에

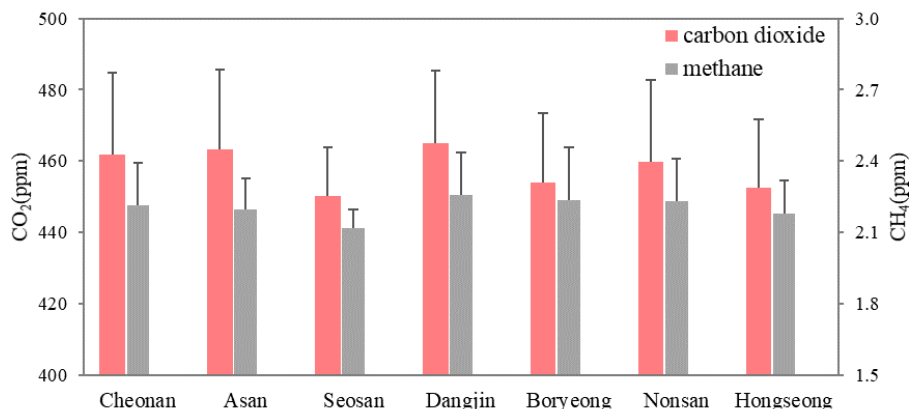


Fig. 2. Atmospheric concentrations of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> measured at 7 sites located in Chungcheongnam-do (Republic of Korea) in October–December, 2024

따른 지역구분보다 측정지점의 위치(도심 또는 교외)나 국지적 영향을 크게 받는 것으로 보인다.

동일 기간 메탄 평균농도는 2.205 ppm으로 배경지역인 안면도의 2023년 10월부터 12월까지의 평균농도 2.039 ppm 보다 0.166 ppm 높은 수준으로 나타났다. 지역별로는 당진에서 2.259 ppm으로 가장 높았고, 서산에서 2.116 ppm으로 가장 낮았는데 이산화탄소와 마찬가지로 측정지점의 위치로 인해 서산에서의 메탄 농도가 가장 낮은 것으로 보였다(Fig. 2). 당진에서 메탄 농도가 높은 것은 철강제조시설에서의 탈루, 공공하폐수처리시설의 혐기성 소화 과정에서의 생성, 지역적 특이성 등 여러 가지 원인이 예상되어 주변의 배출원 파악이 필요해 보인다. 보령의 메탄 농도는 2.237 ppm으로 7지점 중 두 번째로 높았는데 (이산화탄소 농도는 다섯 번째로 높음) 보령의 측정지점

이 교외에 위치하고 있어 농·축산업, 미생물의 분해·발효 등 자연적 영향을 받는 것으로 판단되었다.

### 3.2. 온실가스 시간대별 농도

이산화탄소 시간대별 농도는 지역별로 높고 낮은 정도의 차이는 있지만 대체로 저녁부터 다음날 오전 8~9시까지 높아지고 낮시간에는 낮아지는 경향이 나타났다. 이러한 시간대별 변동성은 대기 안정도와 출퇴근 시간 차량 통행의 영향 때문으로 보이며, 식물의 광합성 활동과 대류활동이 활발한 오후 시간대에 저농도가 나타나고 일출 직전 또는 직후에 고농도가 나타난 앞선 연구 결과와 유사한 결과를 보인다(Chung et al., 2007). 다만, 당진에서는 다른 지점과 다르게 오후 14~17시 사이에 이산화탄

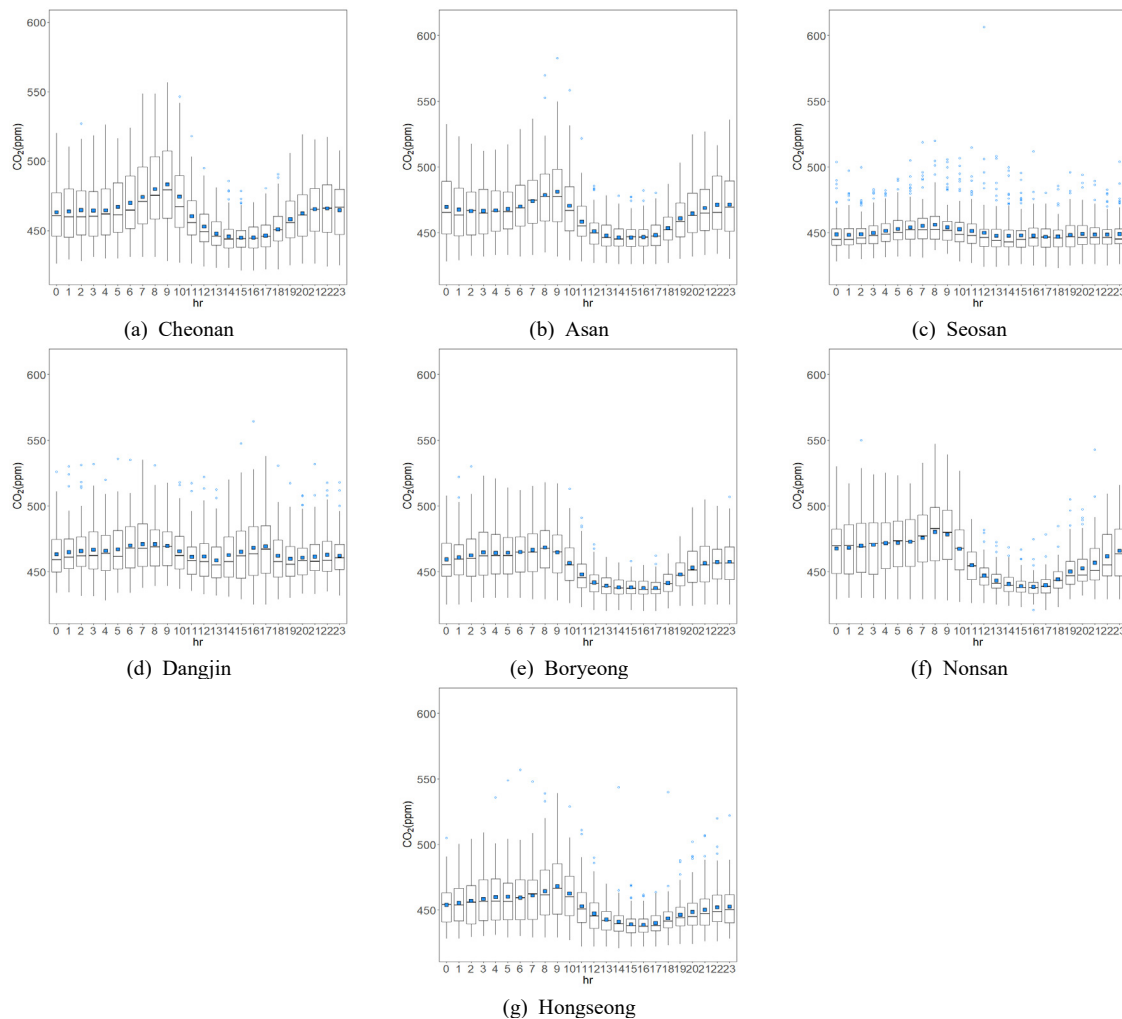


Fig. 3. Diurnal variation of atmospheric CO<sub>2</sub> concentration measured at 7 sites

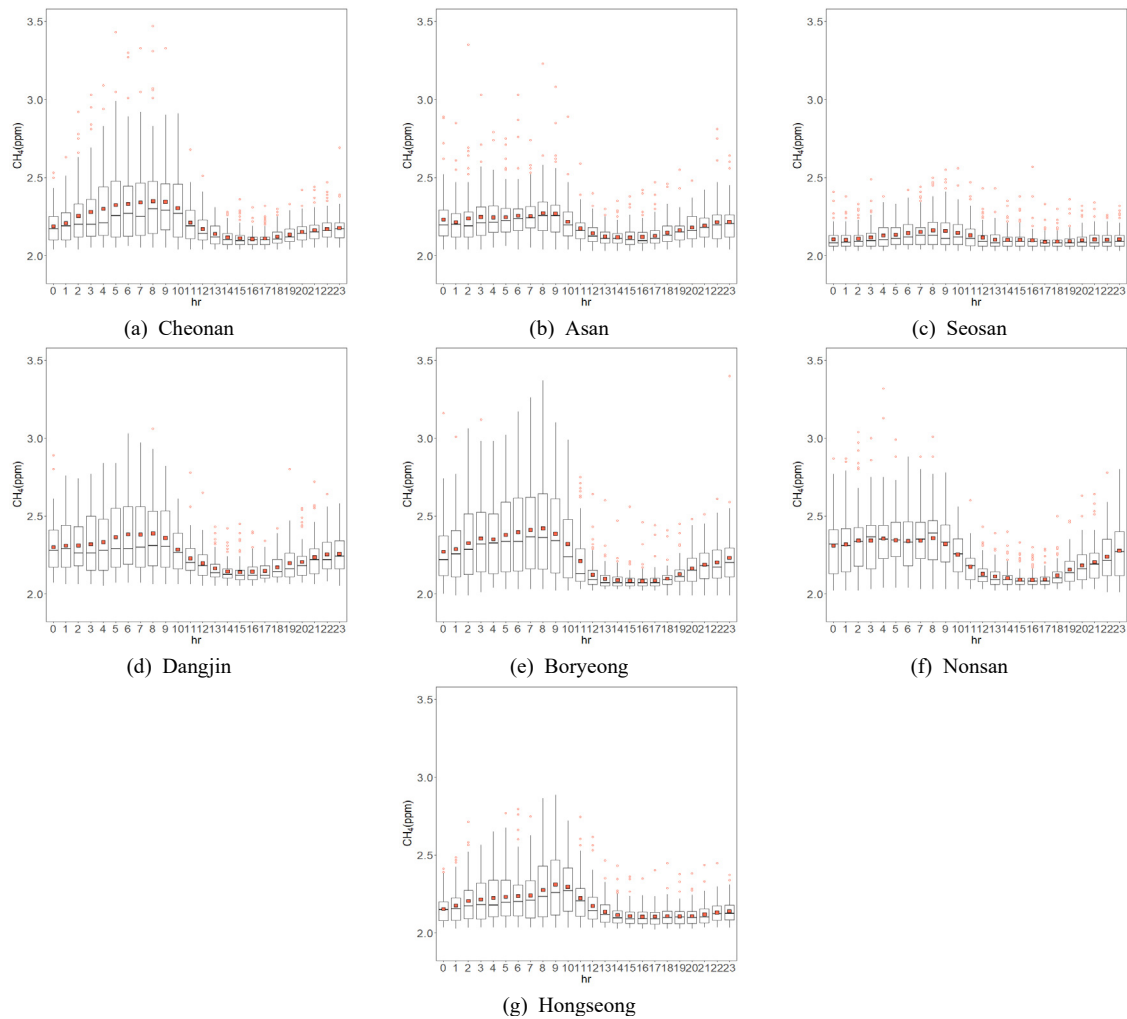


Fig. 4. Diurnal variation of atmospheric CH<sub>4</sub> concentration measured at 7 sites

소 농도가 높아지는데 해당 시간대에 인근 도로의 교통량 증가, 주변 사업장으로부터의 직접 배출 및 차량 출입량 증가 등의 영향을 받는 것으로 판단된다(Fig. 3).

메탄 시간대별 농도도 이산화탄소와 마찬가지로 지역 별로 높고 낮은 정도의 차이는 있지만 대체로 저녁부터 다음날 오전 8~9시까지 높아지고 낮 시간에는 낮아지는 경향을 보여 대기 안정도에 의한 영향을 주로 받는 것으로 판단된다(Fig. 4).

### 3.3. CPF (Conditional Probability Function) 분석

CPF 분석을 수행하기 전 각 지점에서의 풍향과 풍속을 함께 나타낸 바람장미(windrose)를 활용하여 주풍향을 파악하였고 이러한 기상 특성과 CPF 분석 결과를 고려하여

온실가스의 농도에 영향을 주는 국지적 오염원을 추정하였다(Shin et al., 2024). 천안에서의 풍속은 평균 0.63 m/s로 주풍은 남동풍이었지만, 이산화탄소와 메탄의 75 백분위 수 고농도는 대체로 풍속이 약하거나 대기 정체 시에 나타나 도심에서는 온실가스 농도가 전반적으로 고르게 분포하고 오염원을 특정할 수 없는 것으로 분석된다(Fig. 5). 이는 아산(평균 풍속 0.67 m/s, 주풍 동풍)에서도 비슷한 결과를 보이는데 도심에서의 온실가스 농도 특성으로 판단된다(Ham et al., 2017). 석유화학 관련 시설들이 주변에 많은 서산에서는 평균 풍속 2.48 m/s, 주풍은 북서풍이었는데 메탄의 농도가 북서방면 유입 시에 높아져 메탄 발생원이 북서방면에 위치하고 있는 것으로 보인다. 한편 이산화탄소는 정남방면의 유입 영향을 크게 받는 것으로 나타나 인근 도로 즉, 이동오염원의 영향 때문인 것으로

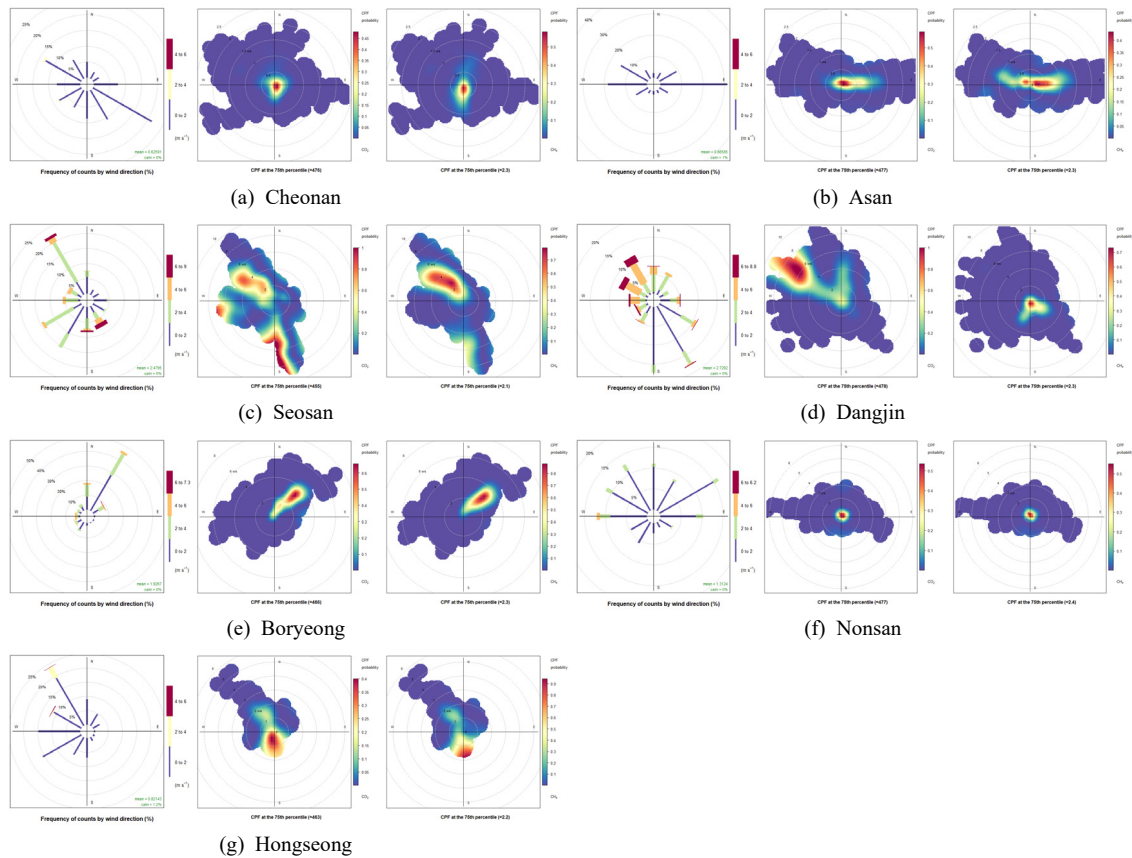


Fig. 5. Wind rose (left) and CPF analysis plots of CO<sub>2</sub> (middle), CH<sub>4</sub> (right) concentration measured at 7 sites

판단된다. 당진은 평균 풍속 2.73 m/s, 주풍은 남서풍이었는데 북서방면에서 풍속 6 m/s 이상의 강한 바람이 불 때 이산화탄소 농도가 높아지는 것으로 나타나 북서방면에 위치한 도로, 철강제조시설의 영향으로 보인다. 한편, 당진에서의 메탄은 대기 정체 시에 고농도를 보여 대기 중 고르게 분포하거나 이산화탄소와 다르게 측정지점 주변의 공공하폐수처리시설의 영향을 주로 받는 것으로 추정된다(Cho et al., 2016; Hwang, 2022). 보령(평균 풍속 1.93 m/s, 주풍 북동풍)은 측정지점 정서 방면에는 석탄화력발전소, 북동방면에는 왕복 4차선의 도로가 있고 주변에는 빌딩, 건물 등이 거의 없는 전형적인 교외지역이다. 이곳의 이산화탄소 농도는 북동방면 유입 시에 높아지는 것으로 나타나 석탄화력발전소보다는 도로(이동 오염원)의 영향을 크게 받는 것으로 판단되지만, 메탄의 농도도 동시에 높아졌다는 것은 메탄의 오염원 또는 지역적인 특성 때문인지 추가적인 확인이 필요할 것으로 보인다. 논산(평균 풍속 1.31 m/s, 주풍 북서풍)에서의 온실가스 농

도는 도시지역인 천안, 아산과 같이 대기 정체 시 고농도가 나타나 오염원을 특정할 수 없는 도시지역의 특성을 보였다. 이는 논산을 농업지역으로 분류하였지만 측정지점이 도시에 위치하고 있어 온실가스 농도는 국지적인 영향을 크게 받는 것으로 판단된다. 홍성에서는 평균 풍속 0.82 m/s, 주풍은 북서풍이었지만 온실가스의 농도가 정남방면 유입 시에 고농도를 보여 정남방면에 위치한 도로의 영향을 받는 것으로 보인다.

### 3.4. 이산화탄소 증가분(CO<sub>2</sub> Enhancement, $\Delta$ CO<sub>2</sub>)

이산화탄소 증가분 계산을 위해 배경농도는 배경 지점인 안면도에서의 농도(429.9 ppm)와 각 측정지점에서의 통계적 하위값(24시간 이동평균 5th percentile)을 산출하여 활용하였다(Table 2). 배경 지점에서의 농도를 활용한 이산화탄소 증가분은 당진 > 아산 > 천안 > 논산 > 보령 > 홍성 > 서산 순으로 나타났고 각 측정지점에서의 통계적 하

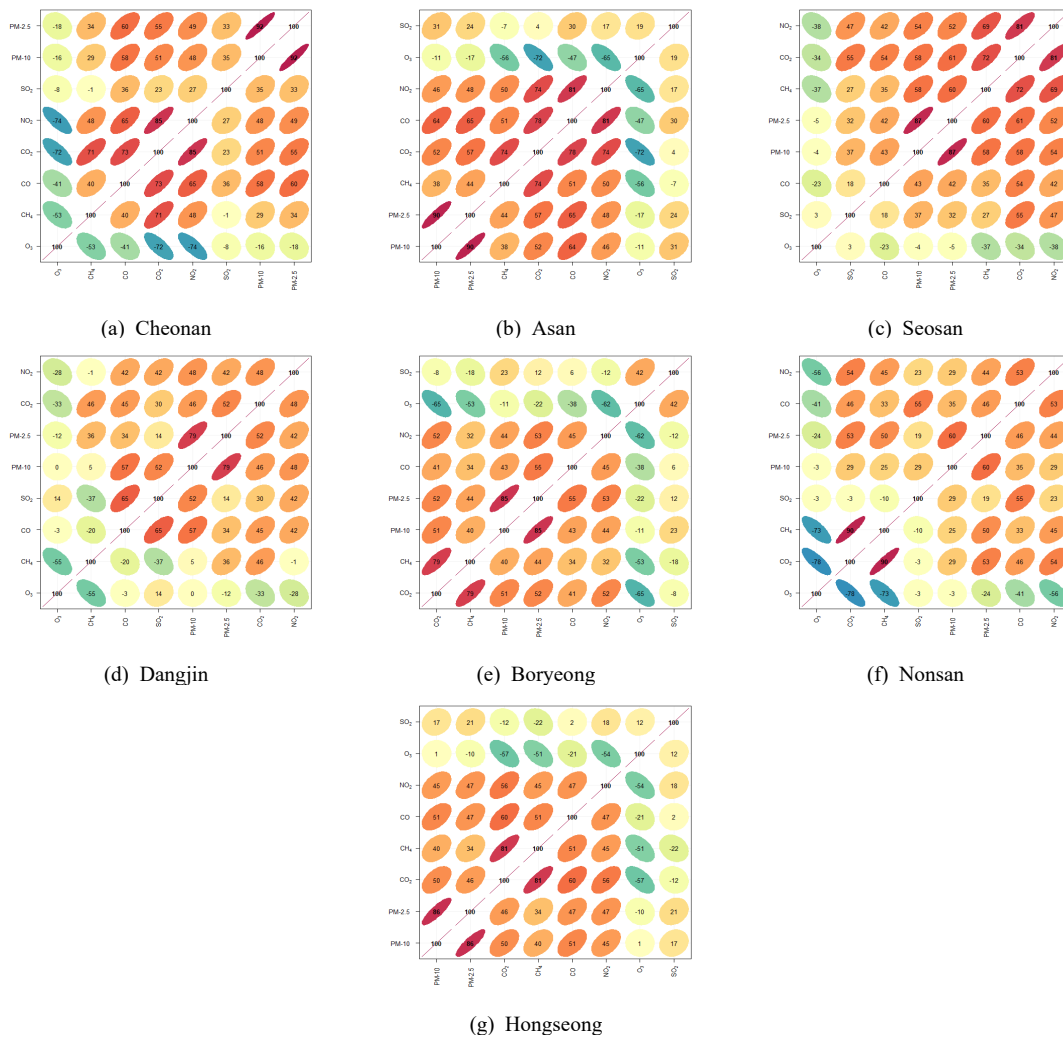
Table 2. Enhancement of CO<sub>2</sub> concentration

(unit: ppm)

|           | Measurement* | 5th percentile** | Measurement $\Delta$ CO <sub>2</sub> *** | Statistic $\Delta$ CO <sub>2</sub> **** |
|-----------|--------------|------------------|------------------------------------------|-----------------------------------------|
| Cheonan   | 461.8        | 438.8            | 31.9                                     | 23.0                                    |
| Asan      | 463.2        | 440.4            | 33.3                                     | 22.8                                    |
| Seosan    | 450.2        | 439.8            | 20.3                                     | 10.4                                    |
| Dangjin   | 465.0        | 449.4            | 35.1                                     | 15.6                                    |
| Boryeong  | 454.0        | 437.3            | 24.1                                     | 16.7                                    |
| Nonsan    | 459.7        | 437.9            | 29.8                                     | 21.8                                    |
| Hongseong | 452.5        | 434.1            | 22.6                                     | 18.4                                    |

\* Measurement: 1-hour average concentration

\*\* 5th percentile: 24-hour moving window 5th percentile

\*\*\* Measurement  $\Delta$ CO<sub>2</sub>: (Measurement) - (Anmyeon-do background concentration 429.9 ppm)\*\*\*\* Statistic  $\Delta$ CO<sub>2</sub>: (Measurement) - (5th percentile)Fig. 6. Correlation between greenhouse gases (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>) and air pollutants (PM-10, PM-2.5, O<sub>3</sub>, CO, SO<sub>2</sub> and NO<sub>2</sub>) measured at 7 sites

위값을 통한 이산화탄소 증가분은 천안 > 아산 > 논산 > 홍성 > 보령 > 당진 > 서산 순으로 나타났다(Table 2). 이는 배경농도를 배경 지점에서의 실측값을 활용하느냐, 통계적 하위값을 활용하느냐에 따라지는 결과로 향후 연구 목적에 따라 이산화탄소 증가분 계산 시 배경농도 활용에 있어 주의가 필요하다고 볼 수 있다.

### 3.5. 온실가스과 대기오염물질 간 상관관계

측정지점에서의 온실가스 2종(이산화탄소, 메탄)과 대기오염물질 6종(미세먼지, 초미세먼지, 오존, 이산화질소, 일산화탄소, 아황산가스) 간의 상관성 확인을 위하여 1시간 평균값을 활용하여 계산하였다. 이산화탄소와 이산화질소 간 상관계수는 각각 천안 0.85, 아산 0.74, 서산 0.81, 당진 0.48, 보령 0.52, 논산 0.54, 홍성 0.56이었고, 이산화탄소와 일산화탄소 간 상관계수는 각각 천안 0.73, 아산 0.78, 서산 0.54, 당진 0.45, 보령 0.41, 논산 0.46, 홍성 0.60으로 나타났다(Fig. 6). 7지점 중 도심(천안, 아산)에서는 다른 지점에 비해 이산화탄소와 이산화질소, 이산화탄소와 일산화탄소 간 상관성이 큰 것으로 나타났는데 연료 연소, 수송이 밀집된 영향으로 보인다. 일산화탄소는 연료 속의 탄소성분이 불완전 연소되거나 산업공정과 발전, 수송 부문에서 주로 발생하며 이산화질소는 자동차, 발전소 등의 고온 연소공정에서 주로 발생된다. 따라서 도심에서의 이산화탄소 농도는 이산화질소, 일산화탄소 농도와 밀접한 관계에 있으므로 이들이 발생하는 배출원 관리를 통해 이산화탄소의 농도를 제어할 수 있을 것으로 판단된다(Yu et al., 2024).

메탄과 이산화질소 간 상관계수는 각각 천안 0.48, 아산 0.50, 서산 0.69, 당진 -0.01, 보령 0.32, 논산 0.45, 홍성 0.45, 메탄과 일산화탄소 간 상관계수는 각각 천안 0.40, 아산 0.51, 서산 0.35, 당진 -0.20, 보령 0.34, 논산 0.33, 홍성 0.51로 나타났다. 메탄과 일산화탄소, 메탄과 이산화질소 간 상관성은 이산화탄소에 비해 낮은 것으로 나타나 연관성이 크지 않은 것으로 보인다. 한편, 온실가스와 다른 대기오염물질(미세먼지, 초미세먼지, 오존, 아황산가스) 간 상관성은 낮은 것으로 나타났다.

## 4. 결론

충남은 석탄화력발전소, 석유화학정제시설, 철강제조시설 등 산업군이 다양할 뿐만 아니라 도시와 농촌의 성격

이 혼재하여 복합적인 지역적 특성을 보인다. 이를 고려하여 지역별 농도 특성을 파악하고 기후위기 대응 및 탄소중립 정책 지원을 위해 도내 7지점에 온실가스 측정망을 구축하였다. 지역별로 도시지역 2지점(천안, 아산), 산업시설 주변 3지점(서산, 당진, 보령), 농업지역 2지점(논산, 홍성)에서 2024년 10월부터 12월까지 이산화탄소와 메탄을 실시간으로 측정하였고 1시간 단위의 측정자료를 활용하여 분석하였다.

7지점의 이산화탄소 평균농도는 458.1 ppm으로 배경지역인 안면도의 전년 동일 기간 대비 28.2 ppm 높은 수준이었다. 지역별로는 차량 통행과 철강제조시설의 영향을 직접 받는 당진에서 465.0 ppm으로 가장 높았고 서산에서는 인근에 석유화학 관련 시설들이 다수 분포하고 있음에도 불구하고 측정지점의 위치로 인해 7지점 중 가장 낮은 농도인 450.2 ppm으로 나타났다. 측정지점이 도심에 위치한 천안과 아산에서는 연료 연소, 자동차 배기가스 등 인위적 오염원의 영향을 받아 이산화탄소 농도가 대체로 높았고 특히 대기가 정체될 때 높아져 도심에서의 농도 특성을 확인할 수 있었다. 논산은 농업지역으로 분류하였지만 측정지점이 도심에 위치하여 도시가 아닌 곳에 비해 이산화탄소 농도가 비교적 높게 나타났다. 이를 통하여 이산화탄소 농도는 도시, 농업, 대형 배출원의 유무 등을 통한 지역 구분보다는 측정지점의 위치(도심 또는 교외), 주변 오염원 유무(반경 수십 m 안) 등 국지적인 영향을 크게 받는 것으로 판단된다.

7지점의 메탄 평균농도는 2.205 ppm으로 배경지역인 안면도의 전년 동일 기간 대비 0.166 ppm 높은 수준이었다. 지역별로는 당진에서 2.259 ppm으로 가장 높게 나타났는데 CPF 분석에 따라 대기가 정체 상태일 때 높고 이산화탄소의 고농도 분포 특성과 다르게 나타난 점을 토대로 철강제조시설의 영향보다는 공공하폐수처리시설이나 자연발생적 원인으로 추정된다. 보령의 메탄 농도는 2.237 ppm으로 7지점 중 두 번째 높았는데 측정지점이 교외에 위치하여 농·축산업, 미생물의 분해·발효 등 자연발생적 영향을 받는 것으로 판단된다. 서산에서는 이산화탄소와 마찬가지로 측정지점의 위치로 인하여 가장 낮은 농도인 2.116 ppm으로 나타났지만 북서쪽에 위치한 오염원의 영향으로 고농도가 나타나는 것으로 추정된다.

이산화탄소와 메탄의 시간대별 농도는 지역별로 높고 낮은 정도의 차이는 있지만 대기 안정도에 의한 영향으로 대체로 저녁부터 다음날 오전 8~9시까지 높아지고 낮시간에는 낮아지는 경향을 보인다. 반면 서산의 측정지점은

지상에 있지만 지표면보다 비교적 높은 야산지대에 위치하여 다른 지역의 측정지점에 비해 지표면의 온실가스 영향을 덜 받아 시간대별 농도 변화가 크지 않은 것으로 추정된다. 이는 해당 지역의 온실가스 특성을 파악하는데 있어 측정지점의 고도(또는 시료채취구 높이)에 따라 국지적 배출 영향을 덜 받을 수 있기 때문에 측정목적에 부합하는 시료채취 높이를 확보해야 하며 향후 온실가스 측정망 설치 시 이를 고려할 필요가 있을 것으로 보인다 (Song et al., 2005).

온실가스와 대기오염물질 간 상관계수를 보면 이산화탄소는 이산화질소, 일산화탄소와 각각 0.48 ~ 0.85, 0.41 ~ 0.78로 메탄과 이산화질소(-0.01 ~ 0.69), 일산화탄소(-0.20 ~ 0.51)에 비해 상관성이 높은 것으로 나타났다. 이를 통해 지역 내 이산화질소, 일산화탄소 배출원 관리를 통해 이산화탄소 농도 제어가 가능할 것으로 예상하지만 물질 간 상관계수 분석만으로는 한계가 있다. 또한 이산화탄소 증가분( $\text{CO}_2$  Enhancement,  $\Delta\text{CO}_2$ )은 배경농도를 배경 지점에서의 실측값 또는 통계적 하위값 중 어느 것을 활용하느냐에 달라지는 결과를 보여 온실가스 분포 특성을 연구하고 평가할 시에 다양한 방법론을 적용하는데 있어 주의가 요구된다.

본 지역별 농도 특성 연구는 3개월로 짧은 기간이지만 이를 토대로 다양하고 더 넓은 분야에서 활용될 것이다. 향후 측정자료를 활용한 정밀한 분석기법이 마련되면 온실가스 및 대기오염물질 공동 배출원 추적, 실측기반 온실가스 인벤토리 검증, 온실가스 측정망 확대 구축 논리 개발 등 탄소중립 정책 이행에 필요한 기초자료 제공을 통해 지역 맞춤형 정책을 추진하는데 있어 큰 역할을 할 수 있을 것으로 기대한다.

## 사사

이 연구는 환경부의 재원으로 국립환경과학원의 지원(NIER-2024-01-03-001)을 받아 수행하였습니다.

## Reference

Cho SH, Kim HW, Han YJ, Kim WJ. 2016. Characteristics of fine particles measured in two different functional areas and identification of factors enhancing their concentrations. J Korean Soc Atmos

Environ 32(1): 100-113. doi: 10.5572/KOSAE.2016.32.1.100

Chung UR, Lee KJ, Lee BW. 2007. Preliminary report of observed urban-rural gradient of carbon dioxide concentration across Seoul, Suwon, and Icheon in South Korea. Korean J Agric For Meteorol 9(4): 268-276.

Ham JY, Lee HJ, Cha JW, Ryoo SB. 2017. Potential source of PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, and OC and EC in Seoul during spring 2016. Atmosphere 27(1): 41-54. doi: 10.14191/Atmos.2017.27.1.041

Heo JB, Hopke PK, Yi SM. 2009. Source apportionment of PM<sub>2.5</sub> in Seoul, Korea. Atmos Chem Phys 9: 4957-4971. doi: acp-9-4597-2009

Hwang IJ. 2022. Estimation of source apportionment for PM<sub>2.5</sub> data of air pollution monitoring site in Pohang using the EPA-PMF Model. J Korean Soc Atmos Environ 38(3): 354-374. doi: 10.5572/KOSAE.2022.38.3.354

IPCC. 2018. Global warming of 1.5°C.

Kim EG, Hopke PK. 2004. Comparison between conditional probability function and nonparametric regression for fine particle source directions. Atmos Environ 38: 4667-4673.

Lee HY, Han SO, Ryoo SB, Lee JS, Lee GW. 2019. The measurement of atmospheric CO<sub>2</sub> at KMA GAW regional stations, its characteristics, and comparisons with other East Asian sites. Atmos Chem Phys 19(4): 2149-2163. doi: 10.5194/acp-19-2149-2019

Li SL, Goo TY, Moon HJ, Lev Labzovskii, Samuel Takele Kenea, Oh YS, Lee HY, Byun YH. 2019. Airborne in-situ measurement of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> in Korea: Case study of vertical distribution measured at anmyeon-do in winter. Atmosphere 29(5): 511-523. doi: 10.14191/Atmos.2019.29.5.511

ME. 2023. National greenhouse gas inventory report of Korea; [accessed 2025 Mar 17]. <http://www.gir.go.kr/home/main.do>

NIER. 2023. A study on the comparison of causes of air pollutants and greenhouse gases in major area of

- Northeast Asia( I ). National Institute of Environmental Research. Evaluation Report 2023.
- Oh SM, Kim JY, Won SR, Kwon SJ, LEE SJ, Choi SD, Lee JY, Shin HJ. 2023. Comparison of the chemical characteristics and source apportionment of PM<sub>1.0</sub> and PM<sub>2.5</sub> using real-time air quality monitoring network data of air pollutants. *J Korean Soc Atmos Environ* 39(4): 448-468. doi: 10.5572/KOSAE.2023.39.4.448
- Park CR, Jeong SJ, Jeong SH, Lee JI, Kim IS, Lim CS. 2023. Assessment of atmospheric greenhouse gas concentration equipment performance. *Atmosphere* 33(5): 549-560. doi: 10.14191/Atmos.2023.33.5.549
- Park JH, Lee DK, Lee MJ, Park C, Jung TY, Kim SK, Hong SC, Baek SJ, Lee JH. 2015. Estimating climate pollutants emissions and service demands considering socio-economic Change: residential.commercial sector, transportation sector, industrial sector. *J Clim Change Res* 6(4): 291-302. doi: 10.15531/KSCCR.2015.6.4.291
- Seo WI, Lee HY, Kim YH. 2021. Revision of 22-year records of atmospheric baseline CO<sub>2</sub> in South Korea: Application of the WMO X2019 CO<sub>2</sub> scale and a new baseline selection method(NIMS Filter). *Atmosphere* 31(5): 593-606. doi: 10.14191/Atmos.2021.31.5.593
- Shin SH, Park JS, Kim JB, Kim PH, Kim CH, Hwang KC, Park SM, Lee JY, Park JM, Kim JH. 2024. Characteristics of volatile organic compounds distribution in downtown Ansan near industrial complexes. *J Environ Anal Health Toxicol* 27(1): 14-28. doi: 10.36278/jeaht.27.1.14
- Sim SJ. 2024. Development of bayesian inverse modeling framework to verify CO<sub>2</sub> emissions in Seoul [dissertation]. Seoul National University
- Song BH, Park KJ, Yoo HJ, Choi BC. 2005. A comparative study on two consecutive years' CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> measurement from the different height of air sample inlet at KGAWO. *Asia-Pac J Atmos Sci* 41(5): 851-859
- UNFCCC. 1997. Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change.
- WMO. 2025. State of the Global Climate 2024. Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization. Policy Report.
- Yu JH, Shin KC, Kim IY, Nam YS, Park BU, Yoon SJ, Kim JW. 2024. A Study on the characteristics of CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> concentration around sources and sinks in Chungcheongnam-do. *J Chungnam Inst Health & Environ Res* 34: 91-103.