

논문

# 안면도 지구대기감시소에서 관측한 탄소 에어로졸 및 대기오염물질의 공간상관성 분석

## Spatial Correlation Analysis of Carbonaceous Aerosols and Air Pollutants Observed in Anmyeondo Global Atmosphere Watch (GAW) Regional Station

이은아<sup>1)</sup>, 유나기<sup>1)</sup>, 최시영<sup>1)</sup>, 한중현<sup>2)</sup>, 오상민<sup>2)</sup>, 유희정<sup>2)</sup>, 김수민<sup>2)</sup>, 서지훈<sup>3)</sup>, 임세희<sup>1),4),\*</sup>

<sup>1)</sup>충남대학교 환경IT융합공학과, <sup>2)</sup>국립기상과학원 지구대기감시연구과  
<sup>3)</sup>한국과학기술연구원 기후·환경연구소, <sup>4)</sup>충남대학교 환경공학과

Euna Lee<sup>1)</sup>, Naki Yu<sup>1)</sup>, Siyoung Choi<sup>1)</sup>, Jongheon Han<sup>2)</sup>, Sang Min Oh<sup>2)</sup>,  
Hee-Jung Yoo<sup>2)</sup>, Sumin Kim<sup>2)</sup>, Jihoon Seo<sup>3)</sup>, Saehee Lim<sup>1),4),\*</sup>

<sup>1)</sup>Department of Environmental & IT Engineering, Chungnam National University, Daejeon, Republic of Korea

<sup>2)</sup>Global Atmospheric Watch and Research Division, National Institute of Meteorological Sciences, Jeju, Republic of Korea

<sup>3)</sup>Climate and Environmental Research Institute, Korea Institute of Science and Technology, Seoul, Republic of Korea

<sup>4)</sup>Department of Environmental Engineering, Chungnam National University, Daejeon, Republic of Korea

접수일 2025년 3월 6일  
수정일 2025년 3월 28일  
채택일 2025년 4월 1일

Received 6 March 2025  
Revised 28 March 2025  
Accepted 1 April 2025

\*Corresponding author  
Tel : +82-(0)42-821-6678  
E-mail : saehee.lim@cnu.ac.kr

**Abstract** The Anmyeondo Global Atmosphere Watch (GAW) station has played a vital role as a background site for monitoring air pollution and climate change in Northeast Asia. This study examines the association between air quality at the station and that in other domestic regions of Korea during periods when land breeze prevails at the station. We analyzed the spatial correlations between OC, EC, PM<sub>10</sub>, O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub>, CO, and SO<sub>2</sub> measured at the GAW station and air quality standard pollutants (PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub>, CO, SO<sub>2</sub>) observed at other regions in South Korea (Airkorea) for two periods when data are available at the Anmyeondo GAW station, from June 2017 to March 2019 and from September 2022 to September 2023. The concentration of PM<sub>10</sub> and gaseous pollutants observed at Anmyeondo exhibited positive correlations with those in the western coastal regions of Chungcheongnam-do and Jeolla-do. These spatial distributions likely reflect similarities in regional emission characteristics and/or the influence of meteorological conditions between Anmyeondo and neighboring areas. Under land breezes conditions at Anmyeondo, OC and EC concentrations were positively correlated with PM<sub>2.5</sub> in the western coastal regions of Chungcheongnam-do, western Gyeonggi-do, and Jeolla-do, and with NO<sub>2</sub> and CO in western Chungcheongnam-do, Seoul, and Gyeonggi-do. Given that traffic emissions were major sources of NO<sub>2</sub> and CO in Seoul and Gyeonggi-do, this results suggest that parts of OC and EC which can be emitted from road traffic sources were likely transported to Anmyeondo under land breeze. Spatial correlation patterns between carbonaceous aerosol (OC and EC) at Anmyeondo and PM<sub>2.5</sub>, NO<sub>2</sub>, and CO in other domestic regions were broadly consistent. Notably, rather than OC, EC showed the stronger correlations with these pollutants, reflecting its predominant origin from combustion processes, particularly vehicular emissions, whereas OC was derived from more diverse sources and processes. This findings will help improve our understanding of the factors influencing air quality at the station during periods dominated by land breeze.

**Key words:** Anmyeondo Global Atmosphere Watch (GAW) Regional station, Organic carbon, Elemental carbon, Airkorea, Spatial correlation analysis

## 1. 서론

PM<sub>2.5</sub>는 공기역학적 직경이 2.5 μm 이하인 입자상 물질을 지칭하며, 인체에 유입 시 폐포까지 직접 침투하여 천식이나 폐질환의 유발물과 조기 사망률을 증가시키는 것으로 알려진 대기오염물질 중 하나다 (NIER, 2024). PM<sub>2.5</sub>는 주로 무기이온, 탄소, 중금속 성분으로 구성되어 있으며 그중 탄소성분은 지역 및 계절에 따라 PM<sub>2.5</sub>의 약 10~50%를 차지한다 (Lee *et al.*, 2015). PM<sub>2.5</sub> 내 탄소 성분은 크게 유기탄소 (Organic Carbon, OC)와 원소탄소 (Elemental Carbon, EC)로 구분된다. OC는 자연적 및 인위적 배출원에서 직접 발생하는 일차 유기탄소 (Primary Organic Carbon, POC)와 POC의 산화 및 노화 과정으로 생성되거나 휘발성 유기화합물 (Volatile Organic Compounds, VOCs)의 광산화 반응으로 생성되는 이차 유기탄소 (Secondary Organic Carbon, SOC)로 구분된다 (Gentner *et al.*, 2012; Seinfeld, 1998). OC는 다환 방향족 탄화수소를 포함한 다양한 유기물질로 구성되어 있어 체내로 유입 시 해로운 영향을 미칠 수 있으며 (Błaszczak and Mathews, 2020), 태양복사를 산란시키거나 흡수하여 기후변화에도 직접적인 영향을 미친다 (Pöschl, 2005). EC는 자동차 배기 등 화석 연료나 식생의 불완전 연소로부터 직접 배출되며, 넓은 파장 범위에 걸쳐 태양복사를 흡수하여 지구 온난화에 기여하는 주요 기후변화 유발 물질 중 하나다 (Lee *et al.*, 2015). 따라서 이러한 탄소 에어로졸의 배출, 생성 및 시공간 변동을 파악하여 기후변화와 인체에 미치는 영향을 이해하고 배경대기 지역에서의 탄소 에어로졸 모니터링을 통해 지역적 규모의 배출 및 거동을 파악할 수 있다. 더 나아가 지자체별 대기오염물질 관리·규제 정책을 수립하는 데 중요한 역할을 할 것이다.

충청남도는 화력발전소와 제철소, 석유화학단지 등 대규모 점오염원이 많은 지역으로, 대형 배출시설에서 배출되는 미세먼지 및 주요 대기오염물질의 특성을 파악하는 연구가 꾸준히 수행되었다. Shin *et al.*

(2021)는 화력발전소와 석유 화학단지의 영향을 파악할 수 있는 서산과 당진의 PM<sub>2.5</sub> 개별성분의 특성을 파악하였으며, Son *et al.* (2020)는 대형 점오염원 주변 지역에서 PM<sub>2.5</sub> 고농도 사례를 선정하여 국내외 영향을 분석하였다. 충청남도 대형 점오염원에서 배출되는 대기오염물질이 다른 권역 (서울, 충청권 등)에 미치는 영향은 꾸준히 연구되고 있으나, 국지적인 배출이 많은 지역에서는 외부 유입과 국지 배출을 명확히 구분하는 데 어려움이 있다. 반면 배경지역은 국지적 오염물질의 배출이 상대적으로 적은 지역으로, 배경지역 연구를 통해 국가 전 지역의 배경농도를 파악하고 국외에서 유입되는 오염물질을 파악할 수 있다 (NIER, 2024). Jeong *et al.* (2024)는 황사 또는 연무 발생 시 안면도에서 관측한 에어로졸의 물리, 광학, 화학적 특성을 분석하였으며, 백령도와 제주도의 미세먼지 자료를 활용하여 PM<sub>2.5</sub> 개별 성분의 특성과 국내 배출 및 국외 장거리 이동 영향을 평가한 사례가 있다 (Lee *et al.*, 2022b). 안면도는 국지배출의 영향이 적은 지리적 특성을 가지고 있으나, 기상적으로 육풍이 우월할 때에는 국내 배출의 영향을 완전히 배제할 수 없을 것이다. Ham *et al.* (2019)는 conditional probability function (CPF) 기법을 통해 안면도에서 발생하는 고농도의 NO<sub>x</sub>, CO 및 SO<sub>2</sub>는 안면도 북쪽에 위치한 충청남도 대형 점오염원의 영향일 것으로 추정하였다. 안면도에서 관측된 대기오염물질의 물리, 광학적 특성이나 고농도 사례 (황사, 연무 등)의 영향 등을 분석하는 연구가 주로 이루어졌다. 그러나 안면도와 국내 다른 지역 대기오염물질 간의 관계에 관한 연구는 상대적으로 부족하다.

본 연구에서는 대기오염물질에 대해 안면도 지구대기감시소와 다른 시·군과의 공간상관성 분석을 수행했다. 이를 통해, 안면도의 대기오염물질과 특징이 유사하거나 영향을 미치는 공간적 범위를 구분하여 국내 배출이 배경지역에 미치는 영향에 대해 조사하고, 안면도에서 관측된 OC와 EC의 배출 및 거동 특성을 파악하고자 한다. 이를 위해 2017년 6월부터 2019년 3월까지와 2022년 9월부터 2023년 9월까지



Fig. 1. Location of the Anmyeondo Global Atmosphere Watch (GAW) station (36.53°N, 126.32°E, 47 m).

두 기간에 걸쳐 안면도 지구대기감시소에서 관측한 탄소 에어로졸(OC, EC) 및 대기환경기준물질( $PM_{10}$ , 오존( $O_3$ ), 질소산화물( $NO_x$ ), 일산화질소( $NO$ ), 일산화탄소( $CO$ ), 이산화황( $SO_2$ )) 관측 자료와 국내 타 지역 간 공간상관분석을 수행하였다.

## 2. 연구 방법

### 2.1 관측 장소

충청남도 태안군 안면읍에 있는 안면도 지구대기감시소(36.53°N, 126.32°E, 47 m, 그림 1)는 세계기상기구(World Meteorological Organization, WMO)의 지구대기감시(Global Atmosphere Watch, GAW) 프로그램에 참여하여 에어로졸과 온실기체 등의 기후변화 유발 물질 관측을 수행하고 있다. 안면도 지구대기감시소는 대규모 오염원과는 멀리 떨어진 서해안에 위치해 국내 인위적 배출원 영향을 적게 받는 한편, 풍향에 따라 대기오염물질의 장거리 이동과 국내 배출의 영향을 도심보다 쉽게 파악할 수 있어 배경대기 연구에 적합한 조건을 갖추고 있다(Ham *et al.*, 2019).

안면도는 지리적 특성상 안면도를 기준으로 내륙방향(동쪽)과 바다 방향(서쪽)이 명확히 구분됨에 따

라 상대적으로 큰 내륙의 영향이 반영될 수 있는 육풍(북풍, 북동풍, 동풍, 남동풍)과 내륙의 영향이 상대적으로 작을 수 있는 해풍(남풍, 남서풍, 서풍, 북서풍) 시기를 구분하여 공간상관분석에 활용하였다. 1시간 간격 자료에 대해 8방위 풍향의 최빈 풍향을 선정하여 풍향을 산출하였으며, 전체 관측 기간에서 육풍과 해풍의 비율은 각각 57.1%와 42.9%를 차지하였다(표 1). 육풍은 주로 19~09시에 우세하였으며, 해풍은 10~18시에 우세하였다(그림 2).

### 2.2 관측 자료

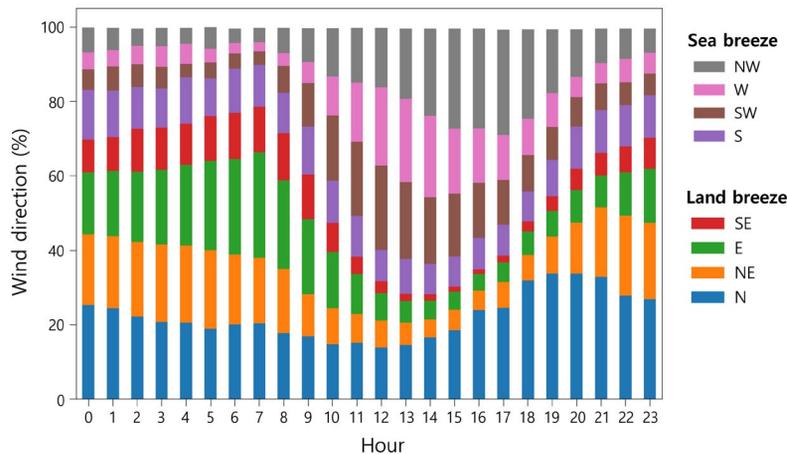
#### 2.2.1 안면도 지구대기감시소

안면도 지구대기감시소에서 2017년 6월 23일부터 2019년 3월 30일까지(기간 1) 그리고 2022년 9월 29일부터 2023년 9월 26일까지(기간 2) 동안 관측한  $PM_{2.5}$  내 탄소 에어로졸,  $PM_{10}$  및 기체상 오염물질( $O_3$ ,  $NO_x$ ,  $NO$ ,  $CO$  및  $SO_2$ ) 농도 자료를 사용하였다. 기간 1과 기간 2 사이는 탄소 에어로졸 분석 장비의 운용 중단으로 해당 기간의 자료는 본 연구에 포함되지 않았다. 탄소 에어로졸은 준실시간 OC-EC 분석기(Semi-Continuous OC-EC Field analyzer, Sunset Laboratory, USA)로 NIOSH-5040(National Institute for Occupational Safety and Health) 온도 프로토콜과 열

**Table 1.** Fractional distributions of wind direction measured at Anmyeondo Global Atmosphere Watch (GAW) station using Automatic Weather Station (AWS).

Wind direction	Land breeze				Sea breeze			
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
Ratio (%)	22.4	13.8	13.8	7.1	10.6	10.3	9.2	12.6

The eight wind direction were classified based on the station's geographical location; north (N), northeast (NE), east (E), and southeast (SE) were designated as land breeze, while south (S), southwest (SW), west (W), and northwest (NW) were designated as sea breeze.

**Fig. 2.** Diurnal distribution of wind directions (divided into eight compass direction) observed at Anmyeondo Global Atmosphere Watch (GAW) station. The x-axis indicates the hour of the day (0~23), and the y-axis represents the percentage of each wind direction in the hour.

광학 투과도법 (Thermal/Optical Transmittance method, TOT)을 적용하여, 45분간 시료를 포집하고 10~15분간 분석하는 일련의 과정을 거쳐 1시간 간격으로 자료가 산출된다. 탄소 에어로졸의 질량농도 자료는 다음의 4단계 전처리를 거쳤다: (1) 음수 및 0 값 제거, (2) 신뢰구간 적용 (OC, EC, TC 기준), (3) 단계 검사 수행 (TC 기준), (4) 레이저-온도 보정계수가 0.8 이하인 자료 제거. 이후 일부 존재하는 잡음 (noise) 수준의 EC 자료가 존재하여 기기 검출한계 ( $0.1 \mu\text{gC m}^{-3}$ )의 1/10 이상인 자료만 분석에 활용하였다. 최종적으로 산출된 OC와 EC의 질량농도는 표준상태의 온도 및 기압 조건 (1 기압,  $0^\circ\text{C}$ )으로 환산하였다.

안면도 지구대기감시소의  $\text{PM}_{10}$  질량농도는 부유 분진 측정기 ( $\beta$ -ray  $\text{PM}_{10}$ )로 5분 간격으로 측정된 자

료를 사용하였으며,  $\text{O}_3$ ,  $\text{NO}_x$ , NO, CO 및  $\text{SO}_2$ 는 각각 자외선광도 분석기 ( $\text{O}_3$ ), 가스상화학발광 분석기 ( $\text{NO}_x$ , NO), 비분산적외선 분석기 (CO), 자외선형광 분석기 ( $\text{SO}_2$ )로 1분 간격으로 측정된 자료를 사용하였다. 기상요소 (온도, 상대습도, 풍향 및 풍속)는 안면도 지구대기감시소에 설치된 무인자동기상관측장비 (Automatic Weather Station, AWS)로 1분 간격으로 측정되었다. 안면도의  $\text{NO}_2$  농도는 가스상 화학발광 분석기로 측정된  $\text{NO}_x$  및 NO 자료를 이용하여  $\text{NO}_2$  ( $\text{NO}_x - \text{NO}$ )로 계산하였다.  $\text{PM}_{10}$ ,  $\text{O}_3$ ,  $\text{NO}_x$ , CO,  $\text{SO}_2$ 의 기기 검출 한계는 각각  $4 \mu\text{g m}^{-3}$ , 0.5 ppb, 0.4 ppb, 0.04 ppm, 0.5 ppb이다.  $\text{PM}_{10}$ ,  $\text{O}_3$ ,  $\text{NO}_x$ , NO,  $\text{NO}_2$ , CO,  $\text{SO}_2$  및 기상자료는 모두 탄소 에어로졸의 시료 포집이 이루어지는 때 45분간의 자료를 평균하여 탄소 에

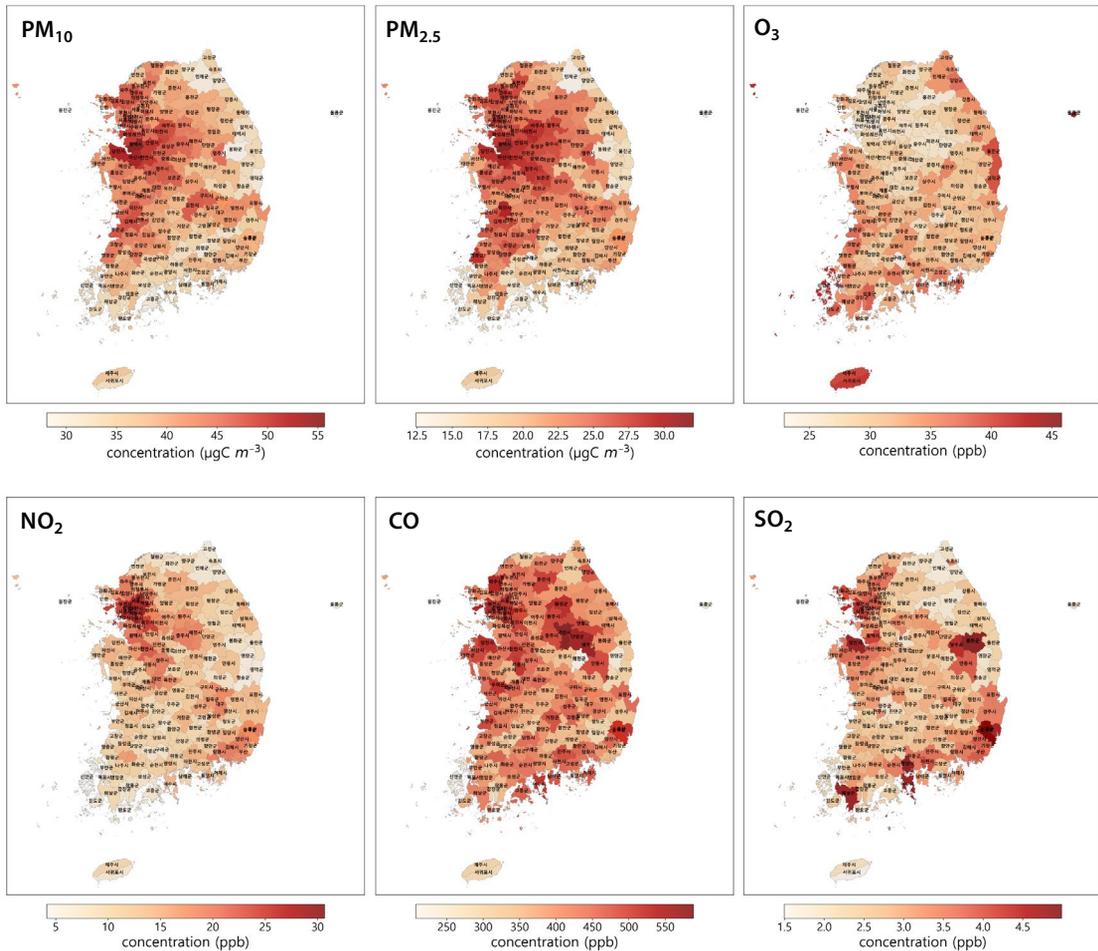


Fig. 3. Spatial distribution of  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ ,  $O_3$ ,  $NO_2$ ,  $CO$ , and  $SO_2$  concentrations during the study period (airkorea data).

어로졸과 동일한 주기의 1시간 해상도 자료로 변환하였다.

### 2.2.2 전국 대기오염측정소 측정 항목과 농도 분포

안면도 지구대기감시소를 제외한 다른 지역의 대기환경기준물질 ( $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ ,  $O_3$ ,  $NO_2$ ,  $CO$  및  $SO_2$ )은 한국환경공단의 에어코리아(www.airkorea.or.kr)에서 제공하는 도시대기측정소의 1시간 해상도 자료를 사용하였으며, 같은 시·군 내에 관측소가 여러 개 있는 경우 여러 개의 관측소 자료를 평균하여 그 지자체를 대표하는 값으로 사용하였다. 이를 통해 총

173개 지자체 (227개의 측정소)의 대기환경기준물질 농도 시계열 자료를 생산하였으며, 안면도 지구대기감시소와 타 지역 간 대기환경기준물질 농도의 공간상관성 분석을 위해 각 지역별 일평균 농도 자료를 계산하여 사용하였다.

지역별 대기환경기준물질의 농도 분포는 오염물질 종류에 따라 상이한 결과를 보였다(그림 3).  $PM_{10}$ 과  $PM_{2.5}$  농도는 산업단지가 많이 분포하는 경기 서·남부(평택, 시흥, 안성), 충남 북부(아산, 당진, 천안), 익산 등에서 다른 지역보다 높았는데, 특히 충남 북부 인근에서는  $PM_{10}$ 과  $PM_{2.5}$ 의 평균 농도가 각각  $50 \mu\text{g}$

$\text{m}^{-3}$ ,  $28 \mu\text{g m}^{-3}$  이상으로 관측되었다.  $\text{O}_3$ 는 제주도와 울릉도, 신안, 옹진 등 섬에서 가장 높은 농도를 보이며 해안가에 인접한 지역 중심으로 평균 이상의 농도가 분포하였다. 반면,  $\text{NO}_2$ 는 서울을 중심으로 내륙에서 고농도가 뚜렷하게 나타났다. CO는 서울·경기권, 충남 서부, 강원 일부, 충북 일부, 울산 등에서 500 ppb 이상의 농도가 관측되었으며,  $\text{SO}_2$ 는  $\text{PM}_{10}$ 과 마찬가지로 대형산업단지가 몰려있는 경기 서부, 충남 북부, 울산, 광양, 봉화 등에서 4 ppb 이상의 농도를 보였다.

### 2.3 분석 방법

대기오염물질의 장거리 이동, 확산 및 축적은 고기압과 저기압의 발달 및 이동과 같은 종관규모 순환(수평규모: 약 1,000 km 이상, 시간규모: 수일 이내)에 의해 큰 영향을 받는다(Seo *et al.*, 2018). 이보다 작은 공간적 규모에 해당하는 인접 지자체 간 또는 인접 권역 간 규모에서는, 각 지역의 대기오염물질 농도가 종관규모 기상장에 의한 변동성을 서로 공유하므로 높은 공간 상관성을 보인다. 따라서 특정 지점의 대기오염물질 농도의 국지적 변동 특성에 초점을 맞추어 인접 지역의 대기오염물질 농도 자료와 비교할 때는 먼저 이러한 넓은 영역에 걸쳐 공유되는 시간변동성(광역변동성)을 정의하여 제거하고, 잔여 성분(국지적 변동성)을 이용해 공간 상관분석을 수행해야 한다.

특정 지점  $s$ 에서의 대기오염물질 농도 시계열,  $x(t, s)$ 는 식 (1)과 같이 공간평균으로 정의된 광역변동 성분( $\bar{x}(t)$ )과 그 잔차로 정의된 국지적 변동 성분( $\epsilon(t, s)$ )으로 간단히 표현할 수 있다(Seo *et al.*, 2024).

$$x(t, s) = \bar{x}(t) + \epsilon(t, s) \quad (1)$$

본 연구에서는 광역변동 성분  $\bar{x}(t)$ 를 전체 지점의 대기오염물질 시계열들을 평균한 공간평균 시계열로 정의하였으며,  $\epsilon(t, s)$ 는 지점별 공간평균에 대한 편차로 국지적 변동성을 가진 시계열을 나타낸다.

공간편차  $\epsilon(t, s)$ 의 지점 간 차이는 기준 지점으로부터

터 거리가 멀어질수록 커져서, 대체로 공간편차 간의 상관관계는 가까운 지역에서 비교적 높은 양의 상관성을 띠고 먼 지역에서는 음의 상관성을 보인다. 따라서 기준 지점과 양의 상관관계를 보이는 지역은 일차적으로 두 지역 간 대기오염물질의 유입 또는 유출 영향을 받았거나 배출 및 이차생성 특성이 유사하여 대기오염물질의 국지적 변동성을 공유한다고 해석할 수 있다. 반면에 음의 상관관계는 지역 간에 대기오염물질의 국지적 변동성을 공유하지 않음을 의미한다(Seo *et al.*, 2024).

본 연구에서는 안면도 지구대기감시소의 대기오염 기준물질( $\text{PM}_{10}$ ,  $\text{O}_3$ ,  $\text{NO}_2$ , CO,  $\text{SO}_2$ )과 탄소 에어로졸(OC, EC)의 일평균 농도 시계열과 인접 지역의 대기환경기준물질 간 공간상관분석을 수행하였다. 이때, 안면도를 포함한 전국 도시대기 측정망에서 자료를 확보할 수 있었던 대기오염기준물질의 경우, 광역변동 성분을 제거한 국지적 변동성분 시계열 간 공간상관분석을 수행하였으나, 안면도에서 관측한 자료만 확보할 수 있었던 OC와 EC의 경우 광역변동 성분을 따로 정의할 수 없어 광역변동성이 제거되지 않은 농도 시계열 간 공간상관분석을 수행하였다. 또한, 대기오염물질이 국내 지역을 거쳐 안면도로 유입되었을 가능성을 보기 위해 안면도에서 육풍이 관측된 기간의 OC 및 EC 자료와 국내의 대기오염물질 자료를 사용하였다. 본 연구에서는 상관계수의 통계적 유의수준이 0.01 이하인 경우, 의미 있는 상관관계를 보인다고 판단하여 해당 자료만을 지도에 나타내었다.

### 2.4 공기계 역궤적분석

Hybrid Single Particle Lagrangian Intergrated Trajectory (HYSPLIT) 4 모델은 미국 National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) Air Resources Laboratory에서 제공하는 대기 수송 및 분산 모델이다(Stein *et al.*, 2015; Draxler and Hess, 1998, 1997). 이 연구에서는 안면도 지구대기감시소 상공으로 유입되는 공기의 이동 경로를 분석하기 위해, HYSPLIT 모델을 이용하여 500 m 고도에서 과거 72

시간 동안의 공기의 역궤적을 산출하였다. 기상자료는 공간 해상도가  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 인 Global Data Assimilation System (GDAS1)을 활용했다. 산출된 공기 역궤적은 R 패키지 openair를 사용하여 6개의 군집(cluster)으로 분류하였다.

### 3. 연구 결과

#### 3.1 안면도 지구대기감시소의 대기오염물질 농도 특성

전체 관측기간(기간 1과 기간 2) 안면도 지구대기감시소에서 관측한 탄소 성분과 대기오염기준물질들의 일평균 농도 시계열을 그림 4에 나타내었다. 전체 기간 OC와 EC의 질량농도 평균은 각각  $4.31 \mu\text{gC STPm}^{-3}$ ,  $0.77 \mu\text{gC STPm}^{-3}$ 였으며,  $\text{PM}_{10}$ ,  $\text{O}_3$ ,  $\text{NO}_2$ , CO 및  $\text{SO}_2$ 의 평균 농도는 순서대로  $33.7 \mu\text{g m}^{-3}$ ,  $41.3 \text{ ppb}$ ,  $5.72 \text{ ppb}$ ,  $219.7 \text{ ppb}$ ,  $1.2 \text{ ppb}$ 였다. 안면도 OC의 질량농도는 과거 국내 여러 지역에서 관측된 OC 농도(주로  $3 \sim 5 \mu\text{gC m}^{-3}$ )의 범위에 있었고, EC의 질량농도는

인구와 산업이 밀집된 지역(안산:  $1.8 \mu\text{gC m}^{-3}$ )보다는 낮고, 제주 배경대기 지역( $0.4 \mu\text{gC m}^{-3}$ )보다는 높은 특징을 보였다. 한편, 춘천( $0.9 \mu\text{gC m}^{-3}$ )보다도 낮은 편이었다(Lee *et al.*, 2022a, 2022b; Yoo *et al.*, 2022).

기간 1과 기간 2를 비교하였을 때, 안면도의  $\text{PM}_{10}$ 과 기체상 오염물질의 평균 농도는 감소하였으나, OC와 EC는 각각 약 15%와 29% 소폭 증가하였다(표 2). 그러나, 기간 1에 해당하는 2017~2019년은 그 주변 해보다 상대적으로 국내 대기질이 양호했던 해이고, 기간 2에 해당하는 2023년은 코로나 이후 농도가 소폭 상승하는 양상이 보였던 해이다(NIMS, 2024). 또한 중국에서도 코로나 기간의 대기오염물질 농도 감소를 보고하였다(Hao *et al.*, 2021). 따라서 코로나 기간 대기오염 농도 패턴이 변화했을 가능성이 높기 때문에, 기간 1과 기간 2의 비교만으로 오염물질의 시간적 추세를 설명하기는 어렵다.

안면도의 대기환경기준물질 농도를 전국 평균 농도와 비교하였을 때, 기간 1의  $\text{PM}_{10}$ ,  $\text{O}_3$ ,  $\text{NO}_2$ , CO 및  $\text{SO}_2$ 의 전국 평균 농도는 안면도에서 관측된 값과  $0.6 (\text{O}_3) \sim 3.5 (\text{NO}_2)$ 배 차이를 보였으며, 기간 2의 대기환

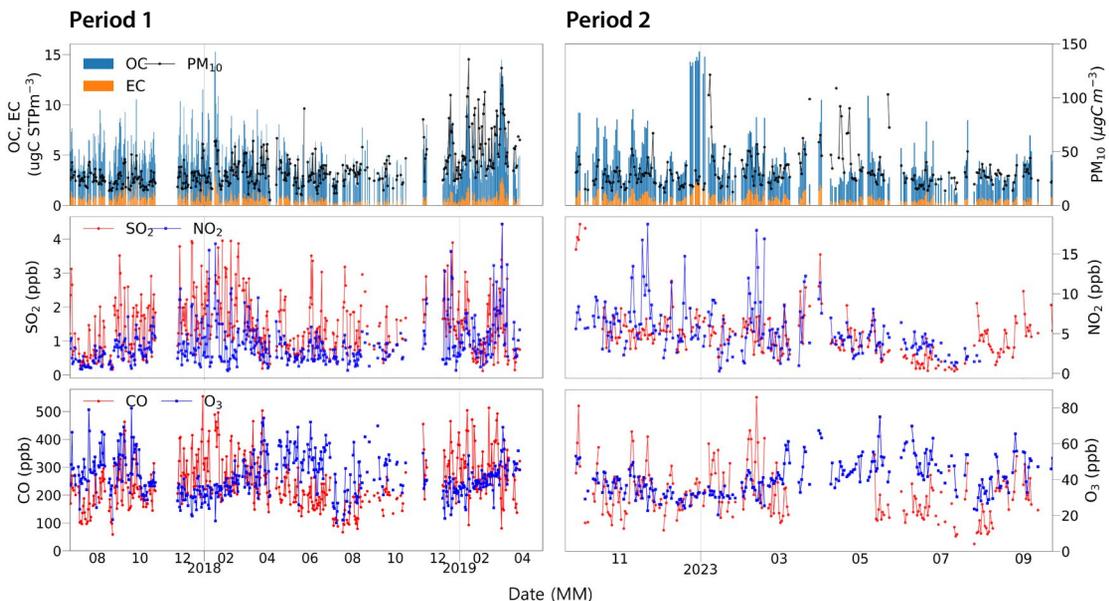


Fig. 4. Time series of OC, EC,  $\text{PM}_{10}$ ,  $\text{O}_3$ ,  $\text{NO}_2$ , CO, and  $\text{SO}_2$  observed at the Anmyeondo GAW station.

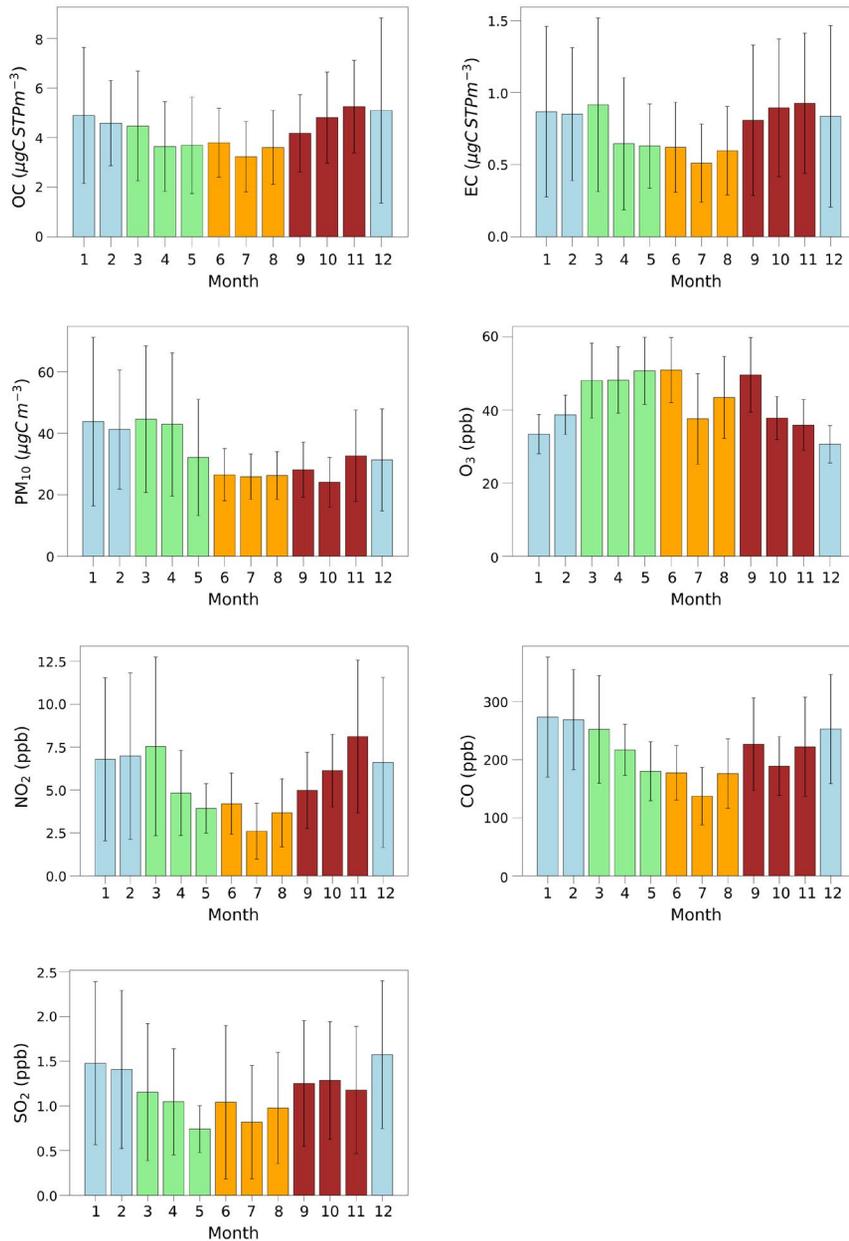
Table 2. The concentrations of Aerosols and Gaseous pollutants at the Anmyeondo (GAW) station and nationwide stations (Airkorea data).

	OC ( $\mu\text{gC-STPm}^{-3}$ )	EC ( $\mu\text{gC-STPm}^{-3}$ )	OC/EC ratio	PM <sub>10</sub> ( $\mu\text{g m}^{-3}$ )	PM <sub>2.5</sub> ( $\mu\text{g m}^{-3}$ )	O <sub>3</sub> (ppb)	NO <sub>2</sub> (ppb)	CO (ppb)	SO <sub>2</sub> (ppb)
Period 1 (2017.06.23~2019.03.30)	4.1±1.8	0.7±0.5	7.0±2.6	34.7±19.5	-	41.6±11.4	5.9±4.4	244.4±91.2	1.4±0.9
Period 2 (2022.09.20~2023.09.26)	4.7±2.8	0.9±0.5	6.4±2.4	32.0±17.2	-	40.8±10.1	5.4±3.2	166.2±50.3	0.8±0.4
Spring	4.0±2.1	0.8±0.5	6.4±2.3	40.7±22.9	-	48.8±9.7	5.8±4.2	225.7±81.9	1.0±0.6
Summer	3.5±1.6	0.6±0.3	7.1±2.5	26.2±7.4	-	43.9±10.9	3.5±1.3	163.7±41.5	1.0±0.2
Autumn	4.7±1.9	0.9±0.5	6.9±2.2	27.9±10.0	-	41.6±7.7	6.4±3.2	211.9±50.8	1.2±0.5
Winter	4.9±4.0	0.9±0.6	6.8±2.8	38.7±18.9	-	34.3±5.2	6.8±3.5	265.1±51.1	1.5±0.2
Period 1 (2017.06.23~2019.03.30)	-	-	-	43.4±29.2	25.1±20.2	26.5±18.8	20.7±14.7	487.2±247.0	4.0±3.2
Period 2 (2022.09.20~2023.09.26)	-	-	-	37.4±32.8	19.0±14.9	31.9±19.7	14.1±11.4	387.3±175.2	2.6±1.5
Spring	-	-	-	54.4±43.3	25.4±20.6	38.7±19.4	16.6±12.9	414.6±190.9	3.2±2.7
Summer	-	-	-	27.3±15.6	15.7±11.2	33.7±21.7	11.6±8.6	359.5±154.7	3.2±3.1
Autumn	-	-	-	34.0±23.0	18.7±14.6	24.9±17.4	18.0±13.6	427.9±203.5	3.1±2.1
Winter	-	-	-	46.8±29.9	27.7±20.7	21.1±13.8	22.8±15.5	538.6±267.7	3.7±2.4

경기준물질 농도는 전국 평균이 안면도에서 관측한 농도의 0.8(O<sub>3</sub>)~3.3(SO<sub>2</sub>)배 차이를 보였다(표 2). 안면도의 O<sub>3</sub> 평균 농도가 타 지역보다 상대적으로 높은 이유는 안면도 지구대기감시소가 해안가에 위치하기 때문으로 보인다. 해안에서는 해풍의 침투로 인해 대기 혼합고가 낮아져 O<sub>3</sub> 농도가 내륙지역보다 높거나 (Song and Shon, 2008), NO 배출이 적어 NO<sub>2</sub>로의 산화에 O<sub>3</sub>이 덜 사용되었거나, 야간에 육풍에 의해 바다로 유출된 전구물질이 해상에서 광화학반응을 통해 O<sub>3</sub>을 생성한 뒤 해풍에 의해 다시 유입되어 해안 지역의 O<sub>3</sub> 상승에 기여할 수 있다(Ham *et al.*, 2019; Yoo and Park, 2010).

안면도 지구대기감시소에서 관측한 OC, EC, NO<sub>2</sub>, CO 및 SO<sub>2</sub> 농도는 겨울철에 높아지는 계절적 특성이 잘 드러났다(그림 5). 이는 겨울철 난방 등을 위한 화석연료 사용의 증가, 혼합고의 감소, 중국으로부터의 대기오염물질 유입 증가 등에 기인하는 일반적인 특징이다(Kim *et al.*, 2017; Cheng *et al.*, 2016; Zhang *et al.*, 1997). 봄철 PM<sub>10</sub>의 편차가 큰 것은 몽골 대륙에서부터 유입되는 황사로 인한 고농도 사례의 영향이 반영된 것으로 추정된다(Choi *et al.*, 2016). 계절별로 안면도와 전국의 대기오염기준물질 평균 농도를 비교한 결과, 전국 평균 PM<sub>10</sub> 농도는 안면도 평균 농도의 약 1~1.3배 수준으로 계절적 차이는 뚜렷하지 않았다. 반면, CO와 SO<sub>2</sub>는 주로 여름철에 전국 평균 농도가 안면도 평균 농도의 각각 2.2배와 3.2배로, 더 큰 차이를 보였다. NO<sub>2</sub>의 전국 평균 농도는 여름철과 겨울철 각각 안면도 평균 농도의 3.3배와 3.4배로 계절에 관계없이 높은 농도가 관측되었다. NO<sub>2</sub>는 대기 중 체류시간이 짧아 국내 배출의 영향을 더 크게 받는 것으로 알려져 있다(Lama *et al.*, 2020). 따라서 안면도에서 관측된 NO<sub>2</sub> 농도는 계절에 따른 국내 영향 차이가 적은 것으로 보인다.

안면도에서 관측한 탄소 에어로졸과 기체상 오염물질 간 상관성을 분석했다. 먼저, OC와 EC는 높은 상관성을 보였다( $r=0.84$ ). EC와 CO 간의 상관관계는 비교적 유의미한 값을 보였으며( $r=0.46$ ,  $p<0.01$ ), OC



**Fig. 5.** Monthly mean concentrations of OC, EC, PM<sub>10</sub>, O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub>, CO, and SO<sub>2</sub> observed at the Anmyeondo GAW station. Colors distinguish four seasons. Error bars indicate standard deviations of these pollutants in each month.

와 CO는 비교적 낮은 양의 상관성을 보였다 ( $r = 0.37$ ,  $p < 0.01$ ). CO는 자동차, 제철소, 식생연소 등으로부터 불완전 연소에 의해 발생하며 EC와 배출원 및 배출 특성이 유사하다(Dickerson *et al.*, 2002). 그

러나 안면도에서 관측된 CO와 EC의 상관관계가 높지 않은 것은, 두 물질의 배출원이나 유입 경로가 다를 가능성을 시사한다.

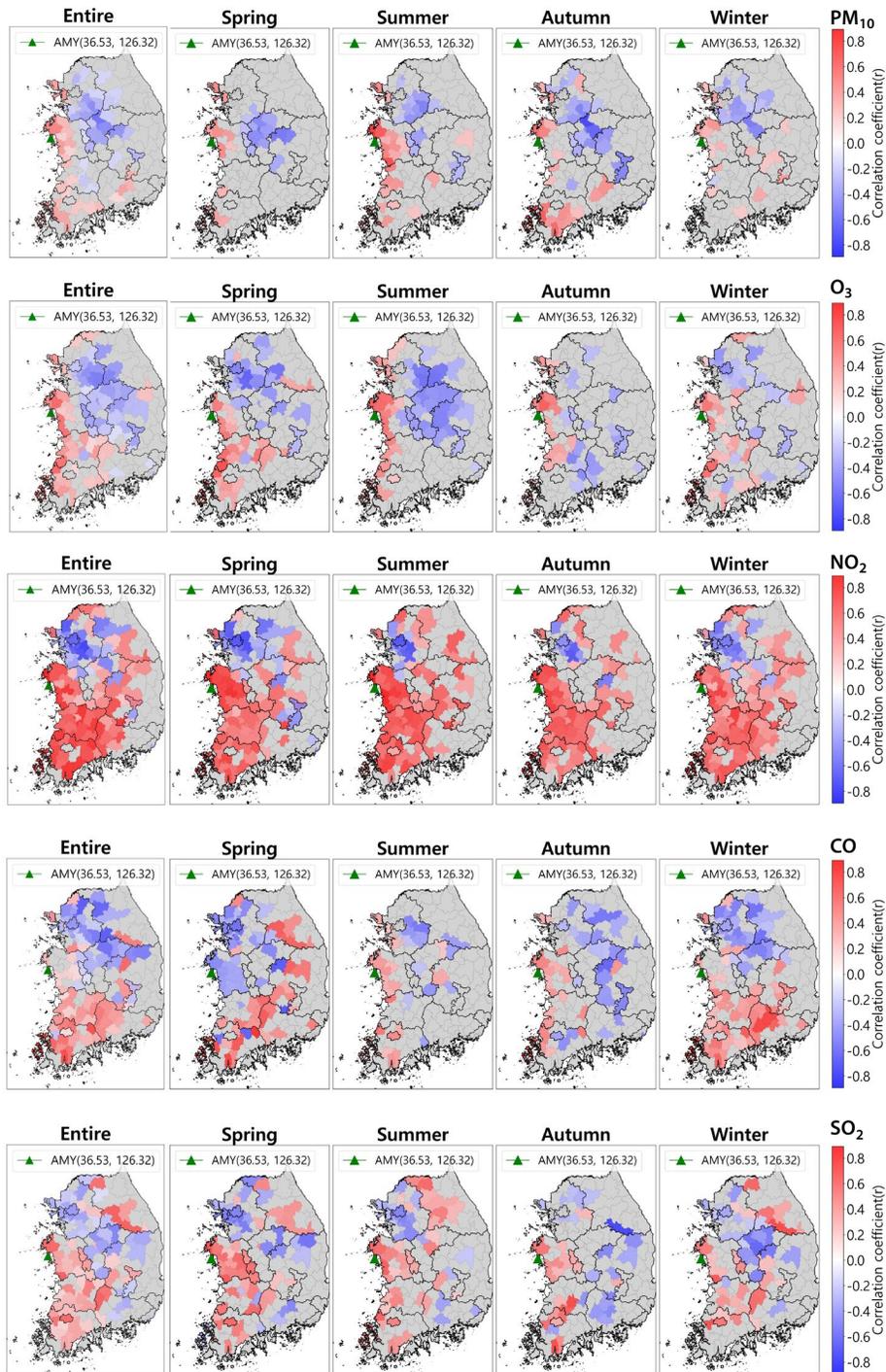
### 3.2 안면도와 국내 지역간 대기환경기준물질 농도의 공간상관성 분석

그림 6은 전체 기간 및 계절별 안면도 지구대기감시소에서 관측한 PM<sub>10</sub>, O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub>, CO 및 SO<sub>2</sub>의 공간편차와 비교 지역의 PM<sub>10</sub>, O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub>, CO 및 SO<sub>2</sub>의 공간편차 간의 상관성을 보여준다. 안면도의 이러한 5개 대기환경기준물질은 대체로 안면도의 남동쪽에 위치한 전라도 해안지역과 양의 상관관계를 보였으며 서울을 포함한 경기권과 충청북도, 강원도와 음의 상관관계를 보였다. 안면도의 O<sub>3</sub>는 충남과 전남 해안 인근에서 0.5~0.6 정도의 상관계수를 보였고, NO<sub>2</sub>는 충남 북부와 서부, 전남에서 높은 상관성( $r=0.7\sim 0.84$ )을 보였으며 가장 많은 지역과 양의 상관성이 나타났다. CO는 전남 일부(신안, 강진 등) 및 경북 예천과 상관성이 높은 편이었고( $r=0.56\sim 0.77$ ), SO<sub>2</sub>는 강원 영서 일부(횡성, 영월), 충남 서부, 경남 함양과도 양의 상관성을 보였다( $r=0.55\sim 0.6$ ). PM<sub>10</sub>은 충남 서부(서산, 태안, 보령)와 인천과 상관관계( $r=0.34\sim 0.45$ )가 있었다.

대체로 안면도는 서해안 지역과 전라도를 중심으로 양의 상관관계를 보였으며, 이러한 결과는 안면도와 지역적 특징(인구밀도가 작고 오염원이 적음) 및 기상조건(해륙풍 영향, 내륙과 해양의 NO<sub>2</sub>-O<sub>3</sub> 화학 등)의 유사성에 따른 결과로 보인다. 예를 들어, 안면도와 3개의 성분(O<sub>3</sub>, NO, CO)에서 국지적 변동성을 공유하고 있는 전남 신안은 총인구가 2022년 기준으로 38,745명이며, 주로 숙박업, 농업 및 광업이 특징인, 섬으로만 이뤄진 지역으로, 국지 배출이 적다(Shinan-gun, 2023). 안면도의 SO<sub>2</sub>와 비교적 높은 상관성을 보였던 강원 횡성과 영월은 인근에 위치한 시멘트 산업에서 배출되는 SO<sub>2</sub> 양보다 상대적으로 적은 양을 배출하는 지역이며, 충청남도과 전라남도 역시 자동차 이동오염원을 중심으로 안면도와 유사한 NO<sub>2</sub> 배출 특징을 가지고 있어 높은 양의 상관관계를 보이는 것으로 판단된다. 즉, 광역변동성분으로 정의한 비교 지역의 평균 농도보다 작은 농도값을 가지는 지역과 양의 상관성을 보이며 유사한 지역적 특성이

반영되었다. 즉, 배경대기 지역으로서 안면도의 특징을 잘 보여준다.

안면도와 비교 지역 간의 PM<sub>10</sub> 및 기체상 오염물질의 공간상관성은 계절에 따라 차이를 보였다. 안면도 PM<sub>10</sub>은 충남 태안 및 서산의 PM<sub>10</sub>과 사계절 모두 양의 상관성을 보였으며, 여름에 가장 높고( $r>0.6$ ) 겨울에 가장 낮았다( $r<0.4$ ). 또한, 다른 계절에 비해 여름철 공간편차의 상관분포는 전북 고창까지 확장된 형태를 보였다. 봄과 여름의 O<sub>3</sub>는 해안 지역을 중심으로 유의미한 상관성을 보였으며, 봄에 전라북도 내륙까지 확장된 형태를 나타냈다. NO<sub>2</sub>는 사계절 모두 전체 기간의 분석 결과와 유사하였다. 겨울철 CO의 공간분포는 북쪽 지역(수도권 포함)과는 주로 음, 남쪽 지역과는 주로 양의 상관성을 보였다. 한편, 봄에는 인근 지역 및 수도권을 포함하여 음의 상관성을 보였다. 이러한 복잡한 공간상관성 양상은 배출 자체의 특성뿐 아니라 계절풍과 같은 종관기상 조건에 따라 변화하는 풍계의 영향이 반영된 것으로 판단된다. 한편, 안면도의 남동쪽에 위치한 전라도 해안지역에서는 대체로 양의 상관관계가 나타난 반면, 서울을 포함한 경기권과 충청북도, 강원도에서는 음의 상관관계가 나타났다. 이는 인구와 산업이 집중된 수도권 지역에서 자동차 이동오염원을 포함하여 다양한 인위적 오염원으로부터 기체 및 입자 배출이 많은 배출 특성이 반영된 결과로 판단된다. 봄철 SO<sub>2</sub>의 공간상관 분포는 충남 내륙까지 양의 상관성을 보였으며, 여름에는 SO<sub>2</sub>의 공간상관 분포가 PM<sub>10</sub>과 유사한 형태를 나타냈다. 가을과 겨울은 봄보다 좁은 영역에서 국지적 변동성을 일부 공유하는 것으로 나타났다. 한편, 일부 오염물질의 공간상관 분포에서 여름철에 안면도와 서해안 지역 간의 양의 상관성이 나타났는데, 이는 여름철 해풍의 영향이 반영된 것으로 보인다. 실제로 여름은 해풍이 차지하는 비율이 약 58.4%로 가장 높아, 내륙 지역과의 상관성은 낮고 지역적 특징이 유사한 서해안 지역과 주로 양의 상관성이 나타난 것으로 판단된다.



**Fig. 6.** Seasonal spatial correlation distributions of PM<sub>10</sub>, O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub>, CO and SO<sub>2</sub> between the Anmyeondo GAW station and other regions in Korea. The colors indicate positive (red) or negative (blue) values in the correlation coefficient (r). Areas of cities/counties with statistically significant correlation at the 99% confidence level are shown.

### 3.3 안면도의 탄소 에어로졸 농도와 국내 PM<sub>2.5</sub>, NO<sub>2</sub>, CO의 공간상관성 분석

OC와 EC는 PM<sub>2.5</sub>의 구성 성분으로, 자동차 배기를 포함한 다양한 화석연료 연소 및 그 외 여러 소각 활동 등과 같은 인위적인 배출원을 공유한다. 따라서 자동차 배기가스로부터 주로 발생하는 NO<sub>2</sub> 및 불완전 연소로부터 발생하는 CO와의 상관성 분석을 통해 OC와 EC의 국내외 배출 및 거동에 대한 이해가 가능할 것이다. 안면도는 지리적 특성상 대체로 서풍을 제외한 풍향이 관측될 때 국내 대기오염물질이 유입될 수 있다. 육풍과 해풍에 따른 OC의 평균 농도는 육풍일 때 더 높았다(각각 4.59, 3.87 μgC STPm<sup>-3</sup>). 따라서 육풍이 발생했을 때 국내 지역의 PM<sub>2.5</sub>, NO<sub>2</sub>, CO 농도의 상관성 분석을 통해 안면도에서 관측한 OC 및 EC 농도의 배출 및 거동 특성을 추정하는 시도가 가능할 것이다.

해풍과 육풍은 하루 중 시간 단위로 변한다. 따라서 2.1절과 2.2절에서 기술한 대로 안면도의 1분 간격 AWS 풍향 자료로부터 1시간 간격의 최빈 풍향을 8방위로 산출하였으며, 안면도의 지리적 위치를 고려하여 북풍, 북서풍, 서풍, 남서풍을 육풍으로 정의하였다. 공간상관성 분석을 위해 육풍에 해당하는 시간의 자료만 선별하여 일평균 자료를 산출하였다. 이를 이용해 광역변동성을 제거하지 않은 안면도의 OC 및 EC와 마찬가지로 광역변동성을 제거하지 않은 다른 지역의 PM<sub>2.5</sub>, NO<sub>2</sub> 및 CO와의 공간상관성을 분석하였다. 그 결과 OC와 EC는 NO<sub>2</sub> 및 CO와 보다 유사한 공간상관성 분포를 보였다.

OC와 EC는 모두 충남, 경기, 전북 및 전남 서해안 지역에서 PM<sub>2.5</sub>와 양의 상관관계를 보였다(OC:  $r=0.40\sim0.61$ , EC:  $r=0.50\sim0.75$ ). 특히, EC는 전남, 경북, 경기 동부 일부 지역까지 확장되어 유의미한 상관성을 나타냈다( $r>0.4$ ). 또한, EC는 충남, 서울, 경기 지역의 NO<sub>2</sub> 및 CO와도 비교적 유의미한 상관성을 보였다. OC보다 EC가 PM<sub>2.5</sub>, NO<sub>2</sub> 및 CO와 상대적으로 높은 상관성을 보였다. 기본적으로 EC가 OC보다 다른 지역의 대기환경기준물질과 상관성이 높

은 편인 이유는 다양한 연소 배출이 국내 배출의 중요한 부분이라는 점, OC의 상대적으로 낮은 상관성은 OC의 이차생성 비율 및 자연적 배출원 때문일 것이다.

EC 및 CO의 상관성은 충남( $r>0.4$ )보다 수도권( $r>0.5$ )과 조금 더 높게 나타났다. 2021년 기준, NO<sub>x</sub>와 CO의 주요 배출원을 살펴보면, 도로이동오염원이 서울에서 각각 41%와 30%, 경기에서 51%와 48%를 차지하며 가장 높은 비중을 보였다(NAIR, 2021). 반면, 충남 지역에서는 NO<sub>x</sub> 배출의 주요 원인이 도로이동오염원(27%)이었으며, CO 배출의 주요 원인은 생물성 연소(39%)로 나타났다. 안면도의 OC-CO 및 EC-CO의 상관성이 충남보다 수도권과 더 좋은 이유는 국내 배출원 차이에 따른 영향이 일부 반영된 것으로 추정된다. 즉, 안면도에서 육풍이 우세할 때 주로 도로이동오염원에서 배출된 OC와 EC가 관측되었을 가능성이 있다. 반면, OC는 태안, 서천, 군산의 NO<sub>2</sub>, CO와 0.5 이하의 상관성을 보였고 전국적으로 유의미한 관계를 보이지 않았다. 이는 안면도에서 관측된 OC 농도의 국내 영향이 비교적 적거나 이차생성된 OC의 비율이 높은 결과일 수 있다.

육풍 관측 시 안면도 지구대기감시소의 OC와 국내 지역의 PM<sub>2.5</sub> 농도 간 계절별 상관관계(그림 7a)는 봄, 가을, 겨울에 유사한 분포를 보였으며, 특히 충남과 충북, 경기, 전북을 포함한 일부 내륙 지역에서 유의미한 상관성을 나타냈다( $r>0.4$ ). 여름과 겨울철 PM<sub>2.5</sub>는 안면도 OC와의 상관계수가 대체로 0.4 이하로 나타났으나, 공간적 범위에서는 차이가 있었다. 이러한 상대적으로 낮은 상관계수는 다른 배출 및 대기 프로세스에 의한 PM<sub>2.5</sub> 성분 때문으로 판단된다. 특히 여름철에는 육풍의 발생 비율(약 42%)이 다른 계절보다 낮아, 공간적 분포 범위도 다른 계절보다 상대적으로 축소된 형태를 보였다. 한편, 가을철 OC와 PM<sub>2.5</sub>는 충남과 전북의 해안 인접 지역과 뚜렷한 상관관계를 보였다. 가을철 해풍 발생 시에도 OC와 국내 지역 PM<sub>2.5</sub>의 공간상관성 분포는 육풍일 때와 유사했으나 상관성은 더 낮았다( $r=0.30\sim0.57$ ). 가을철

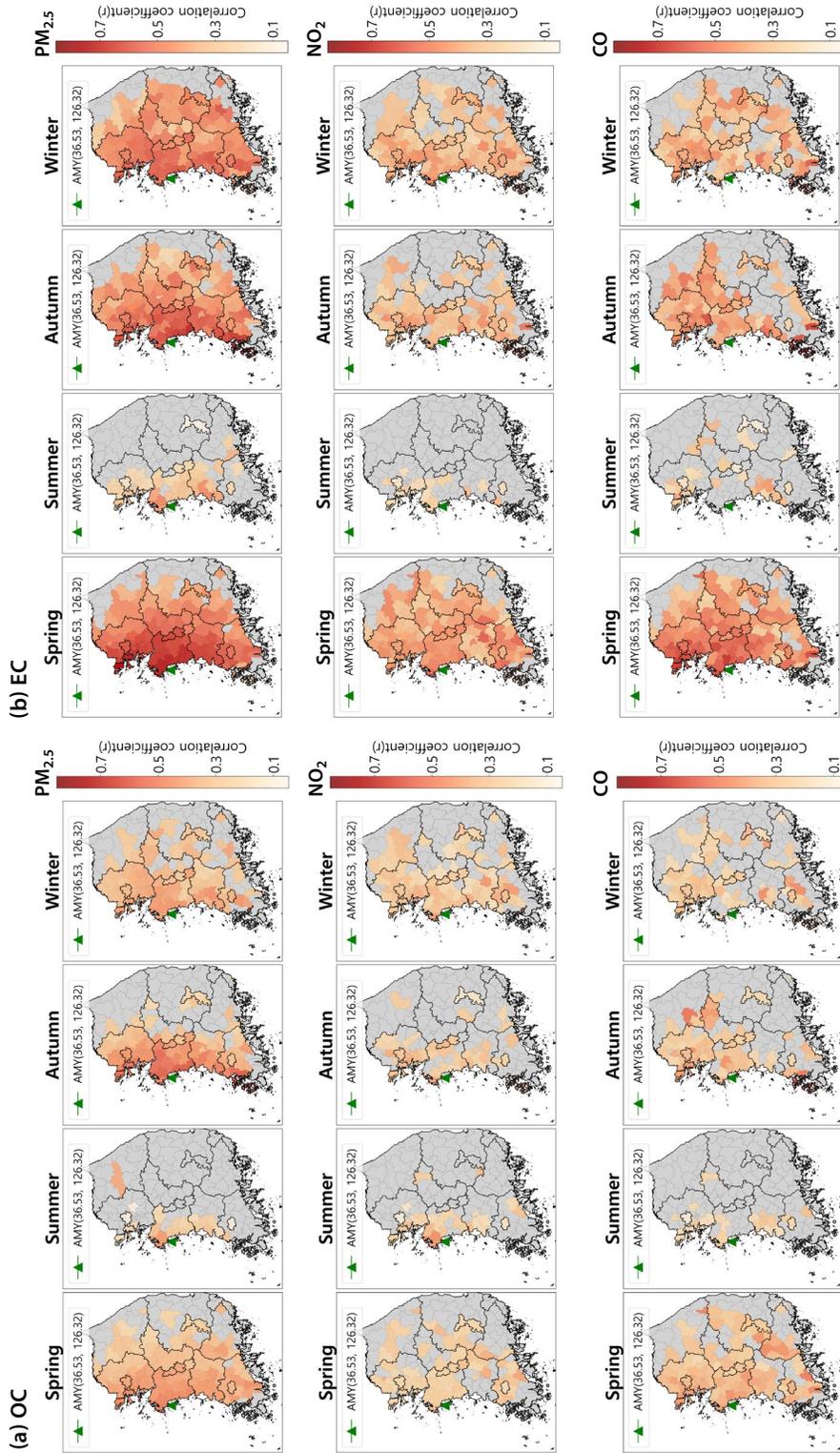


Fig. 7. Seasonal spatial correlation distribution of (a) OC, (b) EC at the Amnyeondo Global Atmosphere Watch (GAW) station and PM<sub>2.5</sub>, NO<sub>2</sub>, CO at airkorea sites in South Korea under land breeze conditions. Areas of cities/counties with statistically significant correlation at the 99% confidence level are shown.

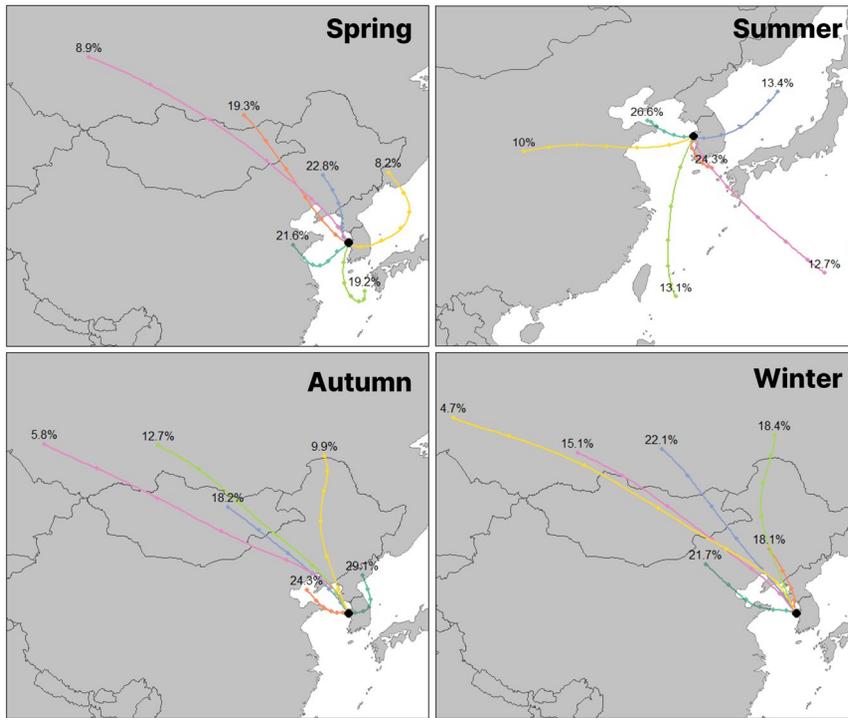


Fig. 8. Cluster analysis of 3-day backward trajectories calculated at 500m altitude for each season.

중국 북동부 및 인근에서 발생한 식생연소(Chen *et al.*, 2017) 및 산불이 북풍 및 동풍을 타고 영향을 끼쳤을 가능성을 배제할 수 없다. 또한 동쪽에서 유입되는 기류의 대기 정체에 따라(그림 8) 인접한 지역의 대기오염물질을 서로 공유했을 가능성도 있다. 생성기작 측면에서는, OC와  $PM_{2.5}$ 가 상대적으로 가을철에 유사한 생성기작(예: 일차배출)을 공유했을 수 있다.

계절별로 육풍 조건에서 국내 지역의  $PM_{2.5}$ ,  $NO_2$  및 CO와 안면도 EC의 계절별 공간상관 분포는 OC와 양상이 유사했으나, EC와의 상관성이 더 높았다(그림 7b). 봄과 가을, 겨울철 EC와  $PM_{2.5}$ 는 대부분 지역(서해안 지역 일대와 전북 내륙 일부, 서울 및 경기 서·남부)에서 뚜렷한 관계를 보였다(0.50~0.79). 안면도의 EC와 타 지역  $NO_2$ , CO의 공간상관성 역시 여름철에 낮고, 봄, 가을, 겨울에 유사한 형태를 보였으나 봄에 좀 더 상관성이 높은 편이었다. 가을과 겨

울에는 난방을 포함하여 보다 다양한 연소 배출이 예상되나, 봄에는 특정 연소 배출원(예: 도로이동오염원)을 좀 더 강하게 공유할 가능성이 있다. 여름철 EC와 CO는 유의미한 상관성이 나타나지 않거나 공간분포의 연속성이 보이지 않았다.

계절별 안면도로 유입된 기류의 3일 궤적(그림 8)을 보면, 겨울과 가을은 북서계절풍의 영향으로 인한 중국, 몽골, 러시아 지역으로부터의 유입이 주를 이루었다. 반면 여름철에는 해양으로부터 유입되는 기류가 약 74%를 차지하였고, 동쪽에서의 유입은 약 13.4%에 불과하였다. 겨울철 기류는 기원은 다르나 안면도에 북서풍 계열로 유입되는 형태를 보였는데, 넓은 영역에 걸쳐 나타난 높은 상관성은 이러한 풍계와 관련된 것으로 보인다. 가을은 북서-서풍 계열과 북-동풍 계열로 구분되며, 육풍이 관측되었을 때 안면도 지구대기감시소의 OC와 EC는 안면도의 북동쪽 지역을 중심으로  $PM_{2.5}$ ,  $NO_2$ 보다 CO와 더 강한

상관성을 보였다. 이는 북쪽에서 유입된 기류에 불완전 연소에서 배출된 대기오염물질이 포함되어 안면도에 도달했을 가능성을 보여준다. 봄철에는 크게 북한을 거쳐서 유입되는 북서풍 계열, 산둥반도를 지나 서해상에서 들어오는 서풍 계열, 정체된 형태를 보이는 남서풍 계열, 그리고 중국 북동쪽에서 동해안을 거쳐 유입되는 동풍 계열로 구분된다(각각 51.0%, 21.6%, 19.2%, 8.2%). 동쪽에서 기류가 유입될 때 안면도의 OC 농도 ( $4.72 \mu\text{gC STPm}^{-3}$ )는 다른 계절들 ( $2.81 \sim 4.56 \mu\text{gC STPm}^{-3}$ )보다 약간 높은 농도를 보여, 안면도에서 관측된 OC와 EC는 높은 양의 상관관계를 보인 지역에서 배출된 대기오염물질의 영향을 받았거나 유사한 배출 및 생성기작임을 파악할 수 있다. 한편, 넓은 범위에 걸쳐 나타난 공간상관성 분포는 황사를 포함한 아시아 대륙에서 기원하여 유입된 영향(따라서, 광역변동성)이 반영된 결과일 수도 있다.

#### 4. 결 론

본 연구는 안면도 지구대기감시소에서 관측한 탄소 에어로졸(OC와 EC)과 국내 다른 지역 대기오염물질과의 공간상관성 분석을 수행하였다. 분석에 활용한 자료의 수집 기간은 2017년 6월 23일부터 2019년 3월 30일까지 약 20개월, 2022년 9월 29일부터 2023년 9월 26일까지 약 12개월 동안이었다. 먼저, 광역변동성을 제외한 후, 안면도와 타 지역 대기환경기준물질과의 공간상관성을 분석하여 안면도에서 관측한 대기 성분들의 배출 및 거동을 이해하고자 하였다. 그 후, 육풍 조건일 때만 선정하여, 광역변동성을 포함한 안면도의 OC, EC와 타 지역의  $\text{PM}_{2.5}$ ,  $\text{NO}_2$ , CO와의 공간상관성을 분석하였다. 이 분석을 통해 국지배출 영향이 상대적으로 클 수 있는 육풍 시기에 안면도 지구대기감시소에서 관측되는 OC와 EC의 배출 및 거동을 이해하고자 하였다.

전체 기간 안면도 지구대기감시소에서 관측한

$\text{PM}_{10}$ ,  $\text{O}_3$ ,  $\text{NO}_2$ , CO,  $\text{SO}_2$ 의 평균 농도 대비 전국 평균 농도는 3.5배로, 안면도에서 이들 성분의 농도가 월등히 낮은 편이었다. 특히, 여름철 안면도의  $\text{NO}_2$ , CO,  $\text{SO}_2$  농도 대비 전국 평균 농도는 2.2~3.3배 높았다. 안면도 지구대기감시소의  $\text{PM}_{10}$  및 기체상 오염물질의 국지적 변동성은 주로 충남 서해안 및 전라도 서해안을 중심으로 양의 상관성을 보였으며,  $\text{NO}_2$ , CO,  $\text{SO}_2$ 는 전남 내륙까지 공간 분포가 조금 더 확장된 형태를 보였다. 이러한 공간상관성 분포 형태는 안면도가 전국 평균 농도(광역변동성분)보다 낮은 농도를 가지는 지역들과 대기 오염물질의 농도 수준이 유사함을 의미한다. 계절별 공간상관성 역시, 충남과 전북 서해안을 중심으로 유사한 분포를 보였다. 한편,  $\text{NO}_2$ 의 공간상관성 분포는 사계절 내내 비슷한 형태를 유지했으며, CO의 공간상관성 분포는 봄과 겨울에 충남 지역에서 서로 다른 양상을 나타냈다. 즉, 안면도와 양의 상관관계를 보이는 지역은 대체로 안면도의 지역적 특성(직접적인 오염원 배출이 적음)이나 기상조건 등이 유사함을 나타낸다.

육풍이 발생했을 때, 광역변동성이 포함된 안면도 OC와 EC 농도는 충남과 경기 서부, 전북 및 전남 해안 지역의  $\text{PM}_{2.5}$ 와 충남 및 수도권의  $\text{NO}_2$ , CO와 양의 상관성을 보였다( $r > 0.4$ ). 수도권과 충남에서 이들의 주요 배출원이 도로이동오염원임을 고려할 때 안면도에서 관측된 OC와 EC는 주로 도로이동오염원에서 배출되었을 가능성을 시사한다. 또한, 육풍 시기의 계절별 공간상관분포는 OC와 EC 모두  $\text{PM}_{2.5}$ 와  $\text{NO}_2$ , CO와 봄, 가을, 겨울에 넓은 영역에서 양의 상관관계를 보였으며, OC보다는 EC와  $\text{PM}_{2.5}$ ,  $\text{NO}_2$ , CO와의 상관성이 높은 편이었다. 한편, 가을에 안면도와 서해안 지역들의 상관성이 높은 편이었는데, 중국 북동부 인근을 거쳐 유입되는 대기의 정체로, 국외 영향과 국내 인접 지역의 대기오염물질 공유 등 여러 가능성이 제기될 수 있다.

결과적으로, 성분별, 계절별 차이가 복잡하게 나타나기도 하지만, 전체적으로 안면도 지구대기감시소에서 관측한 성분들이 평균 농도보다 훨씬 작은 값을

가지는 지역과 양의 상관성을 보이는 것은 배경농도 지역으로서 안면도 특성을 잘 보여준다. 한편, 광역변동성의 영향을 제거하지 않았으므로 안면도의 OC 및 EC와 특정 지역 PM<sub>2.5</sub>, NO<sub>2</sub>, CO의 높은 상관성에 대한 해석은 여러 방면에서 고려되어야 한다. 또한, 추후 하루 중 발생한 육풍의 비율을 고려하여 분석한다면 지역 간의 상관성을 더 뚜렷하게 볼 수 있을 것으로 기대된다. 향후 전국적인 OC 및 EC 자료가 확보되고, 기상자료, 지형 자료 등 다양한 요인이 함께 분석된다면 안면도와 타 지역의 공간상관성 분석을 통해 안면도에 유입되는 탄소 에어로졸의 배출 및 거동에 대한 이해가 높아질 것이라 기대된다. 이러한 기초연구는 우리나라의 대표적인 배경대기 감시소인 안면도 지구대기감시소의 관측 자료의 활용에 도움이 될 것으로 기대한다.

### 감사의 글

이 자료는 기상청 국립기상과학원 「기상업무지원 기술개발연구」 “황사·연무 감시 및 예보기술 개발 (KMA2018-00521)”와 한국연구재단 (2021R1C1C2011543 & RS-2023-00249553)의 지원으로 수행되었습니다. 대기환경기준물질 농도 자료(Airkorea)와 기상자료(AWS)를 제공해준 한국환경공단과 기상청에 감사드립니다.

### References

- Błaszczak, B., Mathews, B. (2020) Characteristics of Carbonaceous Matter in Aerosol from Selected Urban and Rural Areas of Southern Poland, *Atmosphere*, 11(7), 687. <https://doi.org/10.3390/atmos11070687>
- Chen, J., Li, C., Ristovski, Z., Milic, A., Gu, Y., Islam, M.S., Wang, S., Hao, J., Zhang, H., He, C., Guo, H., Fu, H., Miljevic, B., Morawska, L., Thai, P., LAM, Y.F., Pereira, G., Ding, A., Huang, X., Dumka, U.C. (2017) A review of biomass burning: Emissions and impacts on air quality, health and climate in China, *Science of The Total Environment*, 579, 1000-1034. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.11.025>
- Cheng, Y., Zheng, G., Wei, C., Mu, Q., Zheng, B., Wang, Z., Gao, M., Zhang, Q., He, K., Carmichael, G., Poschl, U., Su, H. (2016) Reactive nitrogen chemistry in aerosol water as a source of sulfate during haze events in China, *Science Advances*, 2(12), e1601530. <https://doi.org/doi:10.1126/sciadv.1601530>
- Choi, D.R., Koo, Y.S., Jo, J.S., Jang, Y.K., Lee, J.B., Park, H.J. (2016) The effect of dust emissions on PM<sub>10</sub> concentration in East Asia, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 32(1), 32-45, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2016.32.1.032>
- Dickerson, R.R., Andreae, M.O., Campos, T., Mayol-Bracero, O.L., Neusuess, C., Streets, D.G. (2002) Analysis of black carbon and carbon monoxide observed over the Indian Ocean: Implications for emissions and photochemistry, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 107(D19), INX2-16. <https://doi.org/10.1029/2001JD000501>
- Draxler, R.R., Hess, G.D. (1997) Description of the HYSPLIT\_4 modeling system. NOAA Tech. Memo. ERL ARL-224, 24.
- Draxler, R.R., Hess, G.D. (1998) An overview of the HYSPLIT\_4 modeling system for trajectories, dispersion, and deposition, *Austrian Meteorological Magazine*, 47, 295-308.
- Gentner, D.R., Isaacman, G., Worton, D.R., Chan, A.W.H., Dallmann, T.R., Davis, L., Liu, S., Day, D.A., Russell, L.M., Wilson, K.R., Weber, R., Guha, A., Harley, R.A., Goldstein, A.H. (2012) Elucidating Secondary Organic Aerosol from Diesel and Gasoline Vehicles through Detailed Characterization of Organic Carbon Emissions, *Environmental Sciences*, 109(45), 18318-18323. <https://doi.org/10.1073/pnas.1212272109>
- Ham, J., Lee, M., Ryoo, S.-B., Lee, Y.-G. (2019) Distribution Characteristics and Background Air Classification of PM<sub>2.5</sub> OC and EC in Summer Monsoon Season at the Anmyeondo Global Atmosphere Watch (GAW) Regional Station, *Atmosphere*, 29(4), 429-438, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.14191/ATMOS.2019.29.4.429>
- Hao, X., Li, J., Wang, H., Liao, H., Yin, Z., Hu, J., Wei, Y., Dang, R. (2021) Long-term health impact of PM<sub>2.5</sub> under whole-year COVID-19 lockdown in China, *Environmental Pollution*, 290, 118118. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118118>

- Jeong, M., Yoo, H., Ko, H., Oh, S., Hwang, S. (2024) Comparison of Physical, Optical, and Chemical Properties of Aerosols from Asian Dust and Haze Episodes Observed at Anmyeon-Do in 2018~2021, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 40(2), 171-179, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2024.40.2.171>
- Kim, H.C., Kim, E., Bae, C., Cho, J.H., Kim, B.U., Kim, S. (2017) Regional contributions to particulate matter concentration in the Seoul metropolitan area, South Korea: seasonal variation and sensitivity to meteorology and emissions inventory, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17(17), 10315-10332. <https://doi.org/10.5194/acp-17-10315-2017>
- Lama, S., Houweling, S., Boersma, K.F., Eskes, H., Aben, I., Denier van der Gon, H.A.C., Krol, M.C., Dolman, H., Borsdorff, T., Lorente, A. (2020) Quantifying burning efficiency in megacities using the NO<sub>2</sub>/CO ratio from the Tropospheric Monitoring Instrument (TROPOMI), *Atmospheric Chemistry and Physics*, 20(17), 10295-10310. <https://doi.org/10.5194/acp-20-10295-2020>
- Lee, H., Kang, K., Park, S., Han, Y., Bae, M. (2022a) Characteristics of Atmospheric Particulate Organic Carbon and PAHs in Chuncheon during Cold Season, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 38(6), 882-894, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2022.38.6.882>
- Lee, H., Kim, N., Jo, M., Lee, S., Choi, J., Kang, K., Choi, S. (2022b) Characteristics of PM<sub>2.5</sub> Pollution and Long-Range Atmospheric Transport in Background Areas (Baengnyeong and Jeju Islands), *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 38(4), 524-541, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2022.38.4.524>
- Lee, Y., Park, M., Jung, S., Kim, S., Jo, M., Song, I., Lyu, Y., Lim, Y., Kim, J., Jung, H., Lee, S., Choi, W., Ahn, J., Lee, M., Kang, H., Park, S., Seo, S., Jung, D., Hyun, J., Park, J., Hwang, T., Hong, Y., Hong, J., Shin, H., Shin, H. (2015) Characteristics of Particulate Carbon in the Ambient Air in the Korean Peninsula, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 31(4), 330-344, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2015.31.4.330>
- National Air Emission Inventory and Research Center (NAIR) (2021) National Air Pollutants Emission Service, (in Korean). <https://www.air.go.kr/main.do> (accessed on Feb. 04, 2025)
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2024) Annual Report of Air Quality in Korea 2023. National Institute of Meteorological Sciences (NIMS) (2024) Report of Global Atmosphere Watch 2023.
- Poschl, U. (2005) Atmospheric aerosols: composition, transformation, climate and health effects. *Angewandte Chemie International Edition*, 44(46), 7520-7540. <https://doi.org/10.1002/anie.200501122>
- Seo, J., Park, D.-S.R., Kim, J.Y., Youn, D., Lim, Y.B., Kim, Y. (2018) Effects of meteorology and emissions on urban air quality: a quantitative statistical approach to long-term records (1999-2016) in Seoul, South Korea, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18, 16121-16137. <https://doi.org/10.5194/acp-18-16121-2018>
- Seo, J., Gweon, J., Kim, J., Youn, D., Kim, K., Lee, K., Kim, J. (2024) Spatial Correlation Analysis on PM<sub>2.5</sub> Local Variability in the Chungcheong Area, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 40(1), 131-148, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2024.40.1.131>
- Shin, J., Kim, Y., Park, C., Ahn, J., Yu, H., Kim, J., Jeong, G., Choi, J. (2021) Study on the Characteristics of PM<sub>2.5</sub> Components from Emission Sources in Chungcheongnam-Do, *Journal of Environmental Analysis, Health and Toxicology*, 24(1), 26-34, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.36278/jeaht.24.1.26>
- Shinan-gun (2023) Shinan Statistical Year Book (Vol. 63), [https://www.shinan.go.kr/home/www/openinfo/openinfo\\_11/openinfo\\_11\\_21/page.wscms](https://www.shinan.go.kr/home/www/openinfo/openinfo_11/openinfo_11_21/page.wscms)
- Son, S., Park, S., Bae, M., Kim, S. (2020) A Study on Characteristics of High PM<sub>2.5</sub> Pollution Observed around Large-Scale Stationary Sources in Chungcheongnam-Do Province, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 36(5), 669-687, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2020.36.5.669>
- Song, S.-K., Shon, Z.-H. (2008) Analysis of Chemical and Meteorological Effects on the Concentration Difference of Photochemical Air Pollutants between Coastal and Inland Regions in Busan, *Journal of Environmental Sciences*, 17(10), 1169-1182, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5322/JES.2008.17.10.1169>
- Stein, A.F., Draxler, R.R., Rolph, G.D., Stunder, B.J.B., Cohen, M.D., Ngan, F. (2015) NOAA's HYSPLIT Atmospheric Transport and Dispersion Modeling System, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 96(12), 2059-2077. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00110.1>
- Steinfeld, J.I. (1998) *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change*. Environment: Science and Policy for Sustainable Development,

40(7), 26. <https://doi.org/10.1080/00139157.1999.10544295>

- Yoo, E., Park, O. (2010) A study on the formation of photochemical air pollution and the allocation of a monitoring network in Busan, Korean Journal of Chemical Engineering, 27, 494-503. <https://doi.org/10.1007/s11814-010-0076-z>
- Yoo, H., Kim, K., Kim, Y., Jung, C., Shin, H., Moon, K., Park, S., Lee, J. (2022) Validation of SOC Estimation Using OC and EC Concentration in PM<sub>2.5</sub> Measured at Seoul, Aerosol and Air Quality Research, 22(4), 210388. <https://doi.org/10.4209/aaqr.210388>
- Zhang, Y., Sperber, K.R., Boyle, J.S. (1997) Climatology and inter-annual variation of the East Asian winter monsoon: Results from the 1979-95 NCEP/NCAR reanalysis, Monthly Weather Review, 125(10), 2605-2619. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1997\)125<2605:CAIVOT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1997)125<2605:CAIVOT>2.0.CO;2)
- 이은아(충남대학교 환경IT융합공학과 석사과정)  
(dmsdk6946@naver.com)
- 유나기(충남대학교 환경IT융합공학과 석사과정)  
(ik\_k99@naver.com)
- 최시영(충남대학교 환경IT융합공학과 박사과정)  
(swing0128@gmail.com)
- 한중현(국립기상과학원 지구대기감시연구과 연구원)  
(jh365@korea.kr)
- 오상민(국립기상과학원 지구대기감시연구과 연구원)  
(sangmin80@korea.kr)
- 유희정(국립기상과학원 지구대기감시연구과 연구사)  
(heejuyoo@korea.kr)
- 김수민(국립기상과학원 지구대기감시연구과 연구관)  
(sulla@korea.kr)
- 서지훈(한국과학기술연구원 기후·환경연구소 박사후 연구원)  
(jseo@kist.re.kr)
- 임세희(충남대학교 환경공학과 및 환경IT융합공학과 교수)  
(saehee.lim@cnu.ac.kr)

## Authors Information