

한국대기환경학회 미세먼지위원회 대학(원)생 미세먼지 연구논문 공모전 수상작

# 2018년 3월 고농도 PM<sub>2.5</sub> 사례 분석에서 대기 순환 및 확산 지표의 적용 가능성 연구

## Applicability Study of Atmospheric Circulation and Ventilation Indices to Analysis of PM<sub>2.5</sub> Episode in March 2018

김연옥, 도현석, 김지현, 광경환<sup>1)\*</sup>, 안준영<sup>2)</sup>, 김현웅<sup>2)</sup>

강원대학교 환경의생명융합학과, <sup>1)</sup>강원대학교 환경융합학부,

<sup>2)</sup>국립환경과학원 대기환경연구과

Yeon-Uk Kim, Heon-Seok Do, Ji-Hyun Kim, Kyung-Hwan Kwak<sup>1)\*</sup>,  
Joonyoung Ahn<sup>2)</sup>, Hyunwoong Kim<sup>2)</sup>

Department of Environmental and Biomedical Convergence, Kangwon National University,  
Chuncheon, Republic of Korea

<sup>1)</sup>School of Natural Resources and Environmental Science, Kangwon National University, Chuncheon, Republic of Korea

<sup>2)</sup>Air Quality Research Division, National Institute of Environmental Research, Incheon, Republic of Korea

접수일 2022년 4월 5일  
수정일 2022년 5월 16일  
채택일 2022년 7월 16일

Received 5 April 2022  
Revised 16 May 2022  
Accepted 16 July 2022

\*Corresponding author

Tel : +82-(0)33-250-8575

E-mail : khkwak@kangwon.ac.kr

**Abstract** Recirculation factor (RF), ventilation index (VI), and stable energy (SE) of the atmosphere are the indices that could quantify the kinematic ability of the atmosphere. To verify the relationship of RF, VI, and SE with PM<sub>2.5</sub> and its components, this study analyzed the measurement data on Air Pollution Monitoring Supersite in March 2018, when the calm wind condition was prevalingly observed. In this study, the period of PM<sub>2.5</sub> episode was selected from 06 KST on March 24<sup>th</sup> to 13 KST on March 26<sup>th</sup>, 2018. Since March 25<sup>th</sup>, the PM<sub>2.5</sub> concentration remained at most 100 µg/m<sup>3</sup>. At that time, the RF continuously decreased and showed the lowest value (0.56) at 06 KST on March 26<sup>th</sup>. The correlation coefficients of PM<sub>2.5</sub> and its components (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, OC, EC) concentrations with meteorological factors (air temperature, relative humidity, wind speed, and planetary boundary layer height (PBLH)) and atmospheric indices during this episode were the highest among the entire period in March 2018, particularly for SE. When the SE was greater than 40 J/cm<sup>2</sup>, the VI was smaller than 2,000 m<sup>2</sup>/s, and the RF was smaller than 0.8, the PM<sub>2.5</sub> concentration during this episode was shown to be relatively high. In conclusion, the circulation and ventilation indices could be alternative ways to explain the PM<sub>2.5</sub> episode, compared to well-known meteorological factors in case of regional atmospheric stagnation.

**Key words:** PM<sub>2.5</sub> episode, Atmospheric stagnation, Recirculation factor, Ventilation index, Stable energy

### 1. 서 론

초미세먼지 (fine particulate matter, PM<sub>2.5</sub>)는 유기탄소 (organic carbon, OC), 원소탄소 (elemental carbon, EC), 황산염 (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>), 질산염 (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>), 암모늄 (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) 등으로 이루어진 혼합물이다. 최근 고농도 PM<sub>2.5</sub> 사례가 빈번해지면서 고농도 현상의 원인 파악이 중요해지고 있다. 1년 중 3월은 겨울철 기압계에서

여름철 기압계로 전환하는 시기이며 시베리아 고기압이 약화되면서 이동성 고기압의 영향을 자주 받는 계절이다. 이동성 고기압의 정체 현상은 우랄 산맥의 블로킹으로 인한 동아시아 지역의 서풍 약화와 일본 동쪽의 저기압 편차에 의한 것으로 알려져 있다 (KEI, 2019; Lee *et al.*, 2015; Oh *et al.*, 2015). 또한 이동성 고기압은 이동속도가 느려 대기 정체 현상을 지속적으로 유발한다. 따라서, 이동성 고기압이 정체되는 현상

을 보이는 경우, 국외에서 유입된 오염물질과 함께 국내에서 배출된 오염물질이 축적될 수 있다(Ghim *et al.*, 2019).

국내 PM<sub>2.5</sub> 자료를 보면 1년 중 3월에 농도가 가장 높은 경향을 보이고 있다. 기후변화로 인해 대기 정체가 빈번해짐에 따라 이러한 고농도 PM<sub>2.5</sub>가 지속되는 날은 증가하고 있다(KEI, 2019; Lee *et al.*, 2018). KEI (2019)는 2014년 이후 대기 정체가 발생한 횟수(일 평균 풍속이 2 m/s 이하인 일의 수)와 고농도 지속 시간이 5일 이상 발생한 횟수가 같이 증가하고 있다고 밝히고 있다. Park and Yu (2018)에 따르면 대기 정체 시 오염물질이 축적되면서 2차 생성 미세먼지가 증가한다고 밝힌 바 있다. 이에 많은 선행 연구에서는 대기 정체 상황에서 PM<sub>2.5</sub>와 주요 구성성분들의 농도 변화 특성을 파악해야 한다고 언급하고 있다(KEI, 2019; Ghim *et al.*, 2019; Yu *et al.*, 2018a; Kim *et al.*, 2017). 일부 선행 연구에서는 대기 정체 현상과 PM<sub>2.5</sub> 농도 및 PM<sub>2.5</sub> 구성성분 농도의 연관성을 파악하는 데 기상 변수를 주로 이용하여 분석하고 있다. Ryoo *et al.* (2019)은 대기 정체에 의한 대기오염물질 농도 증가를 확인했고 국외에서 유입된 물질과 국내에서 배출된 물질이 지역 내에서 축적되어 고농도 PM<sub>2.5</sub>를 보인 것을 확인했다. Yu *et al.* (2019)은 2014년 2월에 광주에서 발생한 고농도 PM<sub>2.5</sub> 현상의 원인을 종관적 기상 패턴, PBL 고도(planetary boundary layer height, PBLH), 풍속 자료 등으로 분석하였다. Kim *et al.* (2005a)은 하층대기의 연직 안정도를 이용하여 수도권의 대기오염도 저감효과를 분석한 바가 있다. 최근 Kim *et al.* (2020c)은 PM<sub>2.5</sub> 농도의 권역 간 연관성을 제시하였다. 하지만, 앞선 연구들은 고농도 PM<sub>2.5</sub> 기간에 대기의 운동학적 관점에서 대기오염물질의 확산 능력을 깊이 있게 설명하는 데 한계가 있어 이를 정량적으로 볼 필요성이 있다.

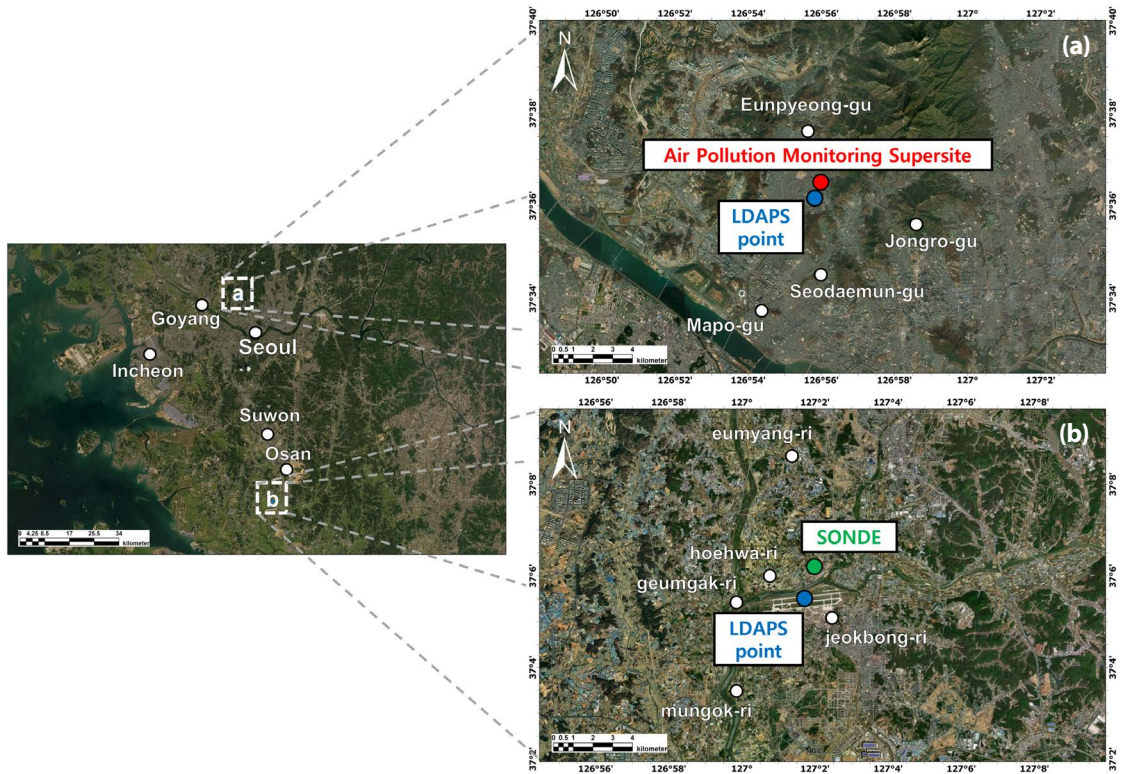
대기의 운동학적 관점을 정량적으로 설명하는 지표로 bulk Richardson number ( $Ri_b$ ), 재순환 계수(recirculation factor, RF), 확산 지수(ventilation index, VI), 안정도 에너지(stable energy, SE), boundary layer

structure index (BLSI) 등이 있다. 선행 연구에서는  $Ri_b$ , RF, VI, SE, BLSI를 이용하여 연직 난류 혼합과 수평 수송, 수평 확산, 대기 안정도에 따른 PM<sub>2.5</sub> 농도의 시간적 변화를 정량적으로 제시하였다(Zhu *et al.*, 2019; Li *et al.*, 2018; Zheng *et al.*, 2018). 하지만, 대다수 선행 연구는 PM<sub>2.5</sub>의 질량농도만을 주로 제시하고 있어, PM<sub>2.5</sub>의 주요 구성성분인  $SO_4^{2-}$ ,  $NO_3^-$ ,  $NH_4^+$ , OC, EC와 대기 순환 및 확산 지표 간 관계와의 농도 변화를 살펴볼 필요가 있다. 따라서, 본 연구에서는 최근 4년(2017~2020) 중 월별 평균 풍속이 가장 낮았던 2018년 3월(1.9 m/s) 고농도 PM<sub>2.5</sub> 사례 기간을 대상으로 대기 순환 및 확산을 정량적으로 표현할 수 있는 지표의 적용 가능성을 확인하는 것을 목적으로 하였다. 이를 위해 PM<sub>2.5</sub> 농도 및 구성성분 농도와 대기 순환 및 확산 지표와의 상관성을 분석하고 대기 정체에 의해 고농도 PM<sub>2.5</sub> 사례가 발생할 수 있는 기준 수치를 제시하고자 한다.

## 2. 방 법

### 2.1 서울(수도권) 대기환경연구소 자료

본 연구에서 PM<sub>2.5</sub>와 구성성분의 농도 자료는 서울 은평구 불광동에 위치한 수도권 대기환경연구소(Air Pollution Monitoring Supersite, APMS)에서 측정된 자료를 이용했다(그림 1). 측정소가 위치한 서울 은평구는 서해에 인접하여 해륙풍이 불어오고 시 경계에 분포한 산악으로부터의 산곡풍이 복합적으로 작용하는 지역으로 국지적인 대기 정체 및 재순환이 빈번히 일어나는 곳 중 하나다(Kim *et al.*, 2005b). 본 연구 지역의 APMS는 PM<sub>2.5</sub>의 질량 및 화학적 성분들의 농도를 측정하기 위하여 질량농도(BAM1020, MetOne Instrument Inc., USA), 탄소성분(semi-continuous carbon aerosol analyzer, Sunset Laboratory Inc., USA), 이온성분(aerosol ion monitor (AIM), URG-9000D, URG corporation, USA) 측정기 등을 운영 중이다(NIER, 2021; Kim *et al.*, 2020b). 미세먼지 질량농도는



**Fig. 1.** Map of study area showing locations of (a) Seoul and (b) Osan, Republic of Korea. The red dot represents the location of Air Pollution Monitoring Supersite. The blue dot represents Korean Meteorological Administration Local Data Assimilation and Prediction System location in this study. The green dot represents Korean Meteorological Administration radiosonde observation location.

대기 중의 입경  $2.5 \mu\text{m}$  이하의 입자를  $16.7 \text{ L/min}$ 의 유속으로 필터에 채취한 후 베타선 흡수법을 사용하여 측정하였다. 준 실시간 탄소성분 측정기는 NIOSH법인 열광학적 투과 방법에 의해 EC와 OC를 1시간 단위로 정량화한다. 이온성분 측정기는 3종 ( $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ )의 이온성분 농도를 분석한다. 이들의 측정 방법과 측정 농도의 정확도 평가 결과는 국립환경과학원에서 발간하는 “2020년 대기환경연구소 연간 운영결과보고서” (NIER, 2021)에 상세히 기술되어 있다.

## 2.2 대기 순환 및 확산 지표

본 연구에서는 대기의 운동학적인 특성을 정량적으로 표현할 수 있는 대기 순환 및 확산 지표로써 재순환

계수 (RF), 확산 지수 (VI), 안정도 에너지 (SE)를 이용했다. RF, VI, SE는 여러 선행 연구에서 각각 대기 재순환, 대기 확산, 대기 안정성을 설명하는 데 사용되고 있다 (Li *et al.*, 2018; Venegas and Mazzeo, 1999).

본 연구에서는 24시간 동안 APMS 지점 주변의 공기 덩이의 수평적 이동 정도를 정량화하기 위해 RF를 이용했다. RF는 여러 지역에서 대기오염 수송 능력을 정량화하는 데 이용되고 있는 지표 중 하나이다 (Li *et al.*, 2020; Li *et al.*, 2018; Pérez *et al.*, 2011; Nankar *et al.*, 2009; Allwine and Whiteman, 1994). RF는 여러 선행 연구에서 중규모에 해당하는 공기 덩이의 움직임과 분산의 특성을 추론하는 데 이용하고 있고 0과 1 사이의 값으로 표현이 되며 RF 값이 낮을수록 대기가 재순환했다는 것을 의미한다. RF의 값은 Allwine and

Whiteman (1994)이 제안한 식 (1)을 통해 계산하였다.

$$RF_i = \frac{l_i}{S_i} = \frac{\sqrt{(\Delta D \sum_{j=i}^{i+O} u_i)^2 + (\Delta D \sum_{j=i}^{i+O} v_i)^2}}{\Delta D \sum_{j=i}^{i+O} \sqrt{u_i^2 + v_i^2}} \quad (1)$$

여기서,  $i=1, 2, 3, \dots, N-O$ 이며,  $N$ 은 분석하고자 하는 기간의 국지 기상 예측 시스템(Local Data Assimilation and Prediction System, LDAPS) 모델 자료 수다.  $O$ 는 24시간/ $\tau-1$ 이며  $\tau$ 는 LDAPS 모델이 하루 기준으로 예보하는 시간 간격이다. 본 연구에서의  $\tau$ 는 3시간이며(2.3절 참고),  $\Delta D$ 는  $\tau$ 를 초로 환산한 것이다.  $u_i$ 와  $v_i$ 는 각각  $i$ 번째 시간 데이터의 남북 및 동서 바람 성분이다.  $S_i$ 은  $u_i$ 와  $v_i$  성분에 의해서 공기 덩이가 24시간 동안 실제로 이동한 거리를 의미하며,  $l_i$ 는 공기 덩이가 24시간 동안 이동한 순 이동 거리를 나타낸다. 결과적으로 RF는  $l$ 과  $s$ 의 비율로 표현된다. 위의 방정식에서  $s$ 와  $l$ 의 변동성은 지역 및 대규모 공기의 흐름에 의해 결정된다. RF가 0일 때, 하루 뒤의 공기 덩이가 재순환하여 원위치로 다시 돌아온 것을 의미하며 수평 수송 능력이 약한 것으로 볼 수 있다. RF가 1일 때에는 공기 덩이가 재순환하지 않는 것을 의미하며 수평 수송 능력이 강한 것으로 볼 수 있다.

SE는 지표면으로부터 주어진 특정 고도( $H$ )까지의 대기 역전층 강도 및 두께와 대기의 안정성, 대기의 수직 확산 능력을 나타낼 수 있는 지수다. SE는 지표에 있는 공기 덩이가 고도  $H$ 까지 도달하는 데 필요한 외부 가열 또는 강제 에너지의 양을 뜻하며, SE가 클수록 대기가 국지적으로 안정하고 수직 확산이 약한 것을 의미한다. Li *et al.* (2018)은 중국의 주장 삼각주 지역을 대상으로 SE와 PM<sub>2.5</sub> 농도 사이의 선형 상관 계수를 확인하였고 대기의 수직 확산 능력을 평가하는데 PBLH보다 더 좋은 상관관계를 보였다. 본 연구에서의 SE는 식 (2)와 (3)을 이용하여 구했다(Li *et al.*, 2018).

$$SE = \frac{C_p}{g} \int_{P_H}^{P_{H_0}} (T_{Dry} - T) dP \quad (2)$$

여기서,  $C_p$ 는 정압비열 (1,004 J/kg·K),  $g$ 는 중력가속도 (9.8 m/s<sup>2</sup>),  $P_H$ 와  $P_{H_0}$ 는 각각 상층과 지상의 기압 (hPa),  $T_{Dry}$ 는 건조 기온(K),  $T$ 는 기온(K)이다. 건조 기온은 식 (3)을 이용하여 계산했다.

$$T_{Dry} = T_H + r_d \times (H - h) \quad (3)$$

여기서,  $T_H$ 는 고도  $H$ 의 기온(K),  $r_d$ 는 건조단열감률 (K/m),  $H$ 와  $h$ 는 각각 상층과 지표면의 지위 고도(m)다.

VI는 대기오염물질이 PBLH 내에서 수송될 수 있는지에 대한 척도로 대기경계층의 높이와 대기경계층 고도까지의 평균 풍속을 곱한 값이다. PBLH 내 환기 능력을 알려주며 식 (4)를 이용하여 산출했다(Wu *et al.*, 2020, 2013; Pasch *et al.*, 2011). 따라서 VI는 대기오염물질의 확산에 대한 척도로 활용될 수 있으며 공기 덩이의 확산과 수송 능력을 정량화하는 데 유용한 지수 중 하나다. VI가 클수록 대기경계층 내 대기오염물질이 원활하게 확산 및 분산된다는 것을 의미한다.

$$VI = \sum_{k=1}^{k=PBLH} (h_k - h_{k-1}) \times V_k \quad (4)$$

여기서,  $h_k$ 와  $h_{k-1}$ 은 LDAPS 모델에서의 지위 고도(m)이며,  $k$ 는 LDAPS 모델 내 연직 층수이다.  $V_k$ 는  $k$ 번째 층의 풍속을 의미한다.

### 2.3 기상 자료

본 연구에서는 연구 대상 지역의 RF, VI, SE를 산출하기 위한 지상과 상층의 기상 자료로 기상청에서 제공하고 있는 LDAPS 모델 자료를 이용했다. 먼저 LDAPS 모델 자료를 검증하기 위해 라디오존데 자료를 이용하였다. LDAPS는 한반도 영역을 대상으로 기온, 강수량, 일사량 등을 예측하며 수평 해상도가 1.5 km, 연직 층수는 70층(약 40 km)이다. LDAPS는 하루 8회(00, 03, 06, 09, 12, 15, 18 UTC) 3시간 간격으로 예측 결과를 생산한다(Kim *et al.*, 2020a). LDAPS의 예측 자료 중 예측 시간이 0시간인 분석장 자료를 이용하였다. 검증을 위해 APMS와 오산 라디오존데 지점

**Table 1.** LDAPS variables used for calculating RF, VI, and SE.

	Variable
Single-level	10-m component of wind, 2-m air temperature, planetary boundary layer height, pressure
Pressure-level (1,000~800 hPa)	west-east component of wind, north-south component of wind, air temperature, geopotential height

에서 각각 가장 가까운 LDAPS 격자의 값을 추출하였다(그림 1).

RF, VI, SE를 산출하기 위해 필요한 LDAPS의 자료는 다음과 같다. RF를 계산하기 위해서는 등압면 자료 중 975 hPa의 동-서 바람 성분과 남-북 바람 성분이 필요하다. SE는 등압면 자료 중 975 hPa의 기온과 지위고도가 필요하며 단일면 자료는 기압(hPa) 변수가 필요하다. VI를 계산하기 위해서는 단일면 자료의 PBLH와 등압면 자료 중 PBLH까지의 고도별 바람 벡터가 필요하다. 본 연구에서 RF, SE, VI 계산에 필요한 LDAPS의 변수를 표 1에 정리하였다.

라디오존데는 하루에 총 4회(00, 06, 12, 18 UTC)에 걸쳐 30 km 이상의 상공까지 기온, 풍향, 풍속 등을 관측하고 있다. 라디오존데는 상층까지 기상요소를 관측할 수 있는 장점을 지니고 있어 예측 모델 혹은 타 관측 장비와의 비교 검증에 많이 이용되고 있다(Kang *et al.*, 2016). 이에 RF, VI, SE 계산 고도와 가장 유사한 925 hPa의 00, 06, 12, 18 UTC에서 오산 라디오존데 지점 자료에 대해 LDAPS 자료를 비교 검증했다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 LDAPS 자료 검증

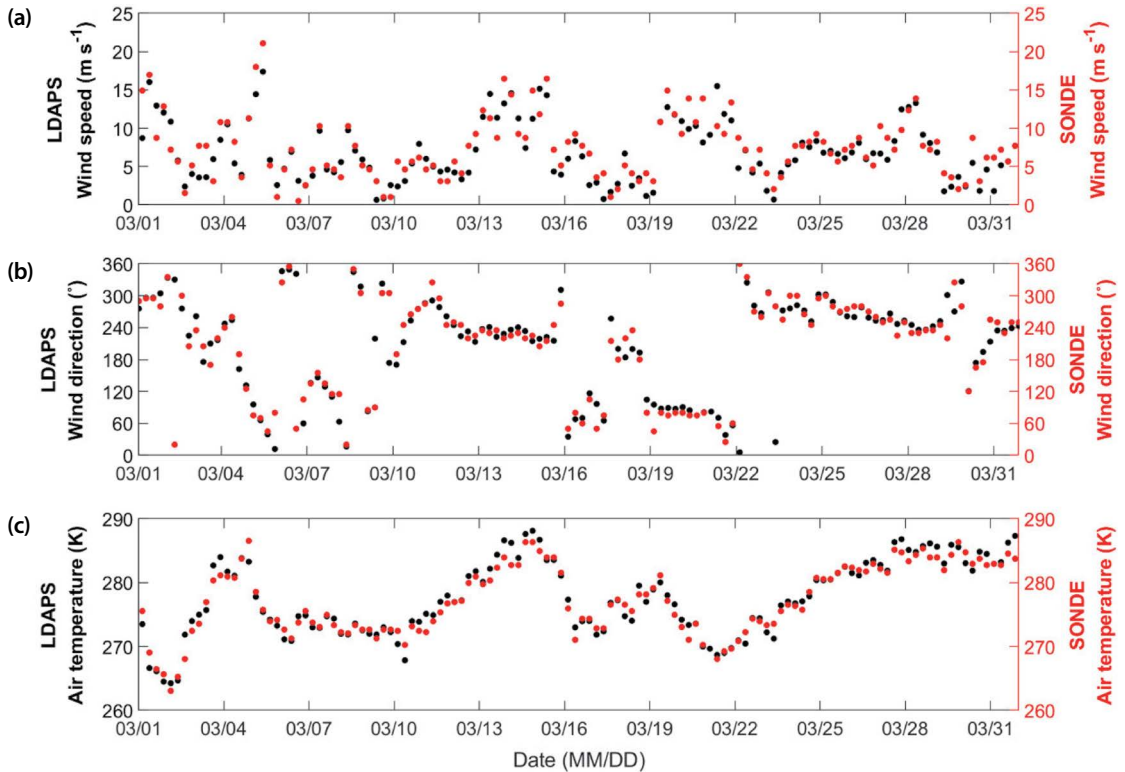
그림 2a와 그림 2b에서 LDAPS 자료와 라디오존데 자료의 풍속과 풍향 시계열을 나타냈다. 풍속의 경우, LDAPS 자료와 라디오존데 자료와의 상관계수는 0.95, RMSE는 2.14 m/s였다. 풍향의 상관계수는 0.77이었다. 이에 LDAPS 자료를 이용하여 연직 바람 자료를 분석하기에 적합하다고 판단했다. 그림 2c는

LDAPS 자료와 라디오존데 자료의 기온 시계열이다. 기온의 상관계수는 0.98, RMSE는 1.35 K였다. 결과적으로 2018년 3월 측정 기간에 대해 LDAPS 자료의 기온, 풍향, 풍속은 관측값을 잘 모의했다고 판단하였다.

#### 3.2 2018년 3월 측정 기간 동안의 대기질과 기상 개황

그림 3은 APMS 지점에서 측정된  $PM_{2.5}$  농도와 OC, EC,  $SO_4^{2-}$ ,  $NO_3^-$ ,  $NH_4^+$  농도 자료의 시계열이며, LDAPS 모델에서 수도권 APMS 지점과 가장 가까운 지점에 대해 추출한 기상 변수(기온, 상대습도, PBLH, 풍속, 풍향)의 시계열이다. 이때, APMS 자료는 1시간, LDAPS 자료는 3시간 간격이다. 고농도  $PM_{2.5}$  사례일 선정 시, 측정된  $PM_{2.5}$  농도 시계열을 기준으로 매우 나쁨 기준인  $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 보다 높은 농도가 하루 이상 유지되고 강수가 내리지 않은 기간을 선택하였다. 강수가 내리지 않은 조건에서의 고농도  $PM_{2.5}$  사례 기간은 2018년 3월 12일 12~22시와 3월 24일 06시~26일 13시였다. 서울 기상 관측소(108지점) 기준 3월 중 일 강수량이 1 mm 이상인 날은 3월 4, 5, 8, 15, 19, 21일이었다. 3월 12일 12~22시 사례는 총 기간이 만 하루가 되지 않아 제외했다. 따라서, 본 연구에서는 최종 사례 분석 기간을 2018년 3월 24일 06시~26일 13시로 선정했다.

사례 기간 중 3월 24일 20시~26일 16시에 수도권 지역에 초미세먼지주의보가 발령되었다. 3월 전체 평균  $PM_{2.5}$  농도는  $35.96 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었고, OC, EC,  $SO_4^{2-}$ ,  $NO_3^-$ ,  $NH_4^+$  농도는 각각 3.54, 1.02, 6.08, 9.79,  $5.31 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다. 선정된 사례 기간 동안 평균  $PM_{2.5}$  농도는  $108.10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었고, OC, EC,  $SO_4^{2-}$ ,  $NO_3^-$ ,  $NH_4^+$  농도는 각각 7.97, 2.31, 22.53, 32.03,  $17.12 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었

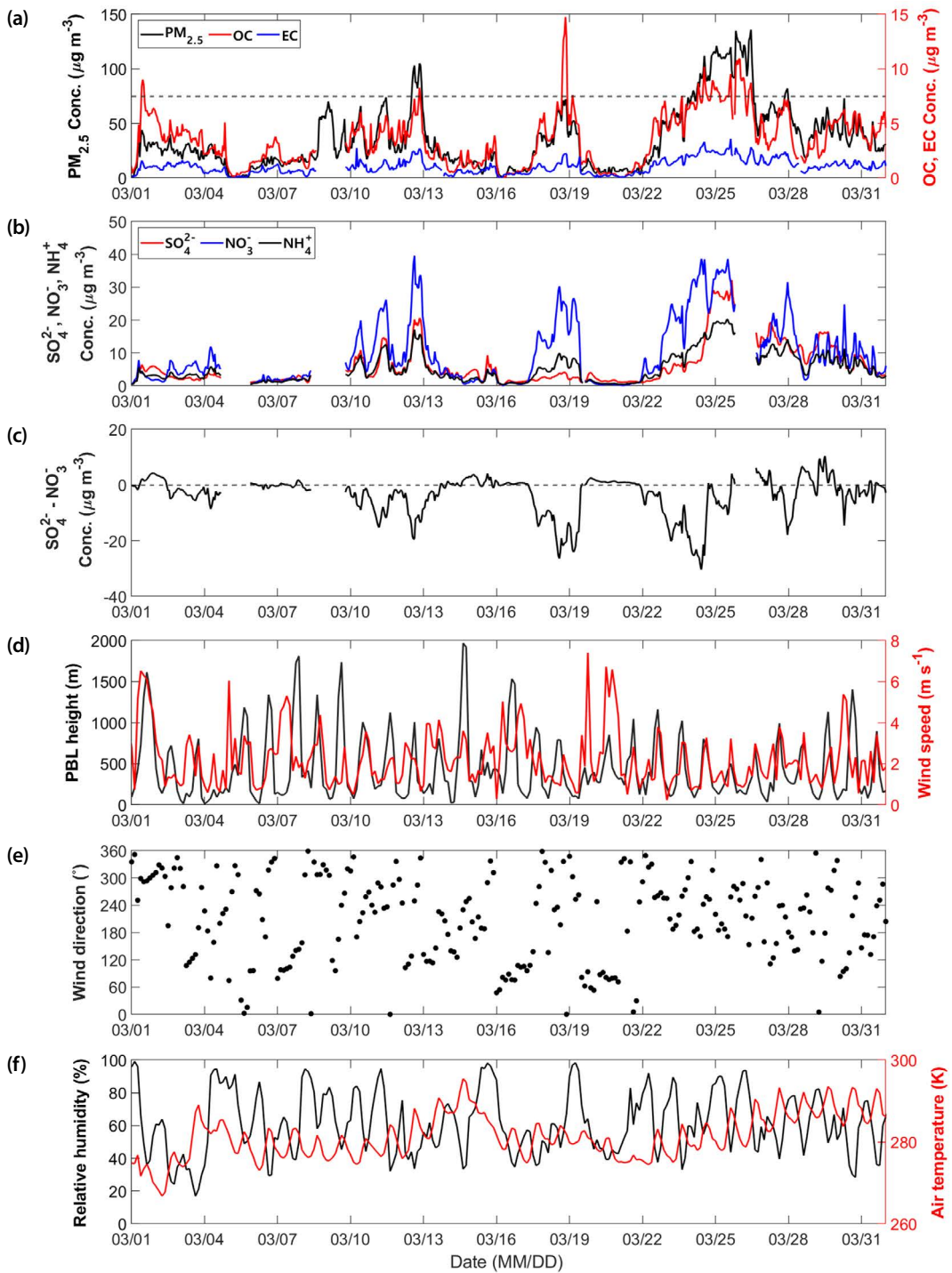


**Fig. 2.** Time series plots of meteorological variables from March 1 to 31, 2018 ((a): wind speed, (b): wind direction, and (c): air temperature). The black dots represent Korean Meteorological Administration Local Data Assimilation and Prediction System data in Seoul. The red dots represent Korean Meteorological Administration radiosonde data in Osan.

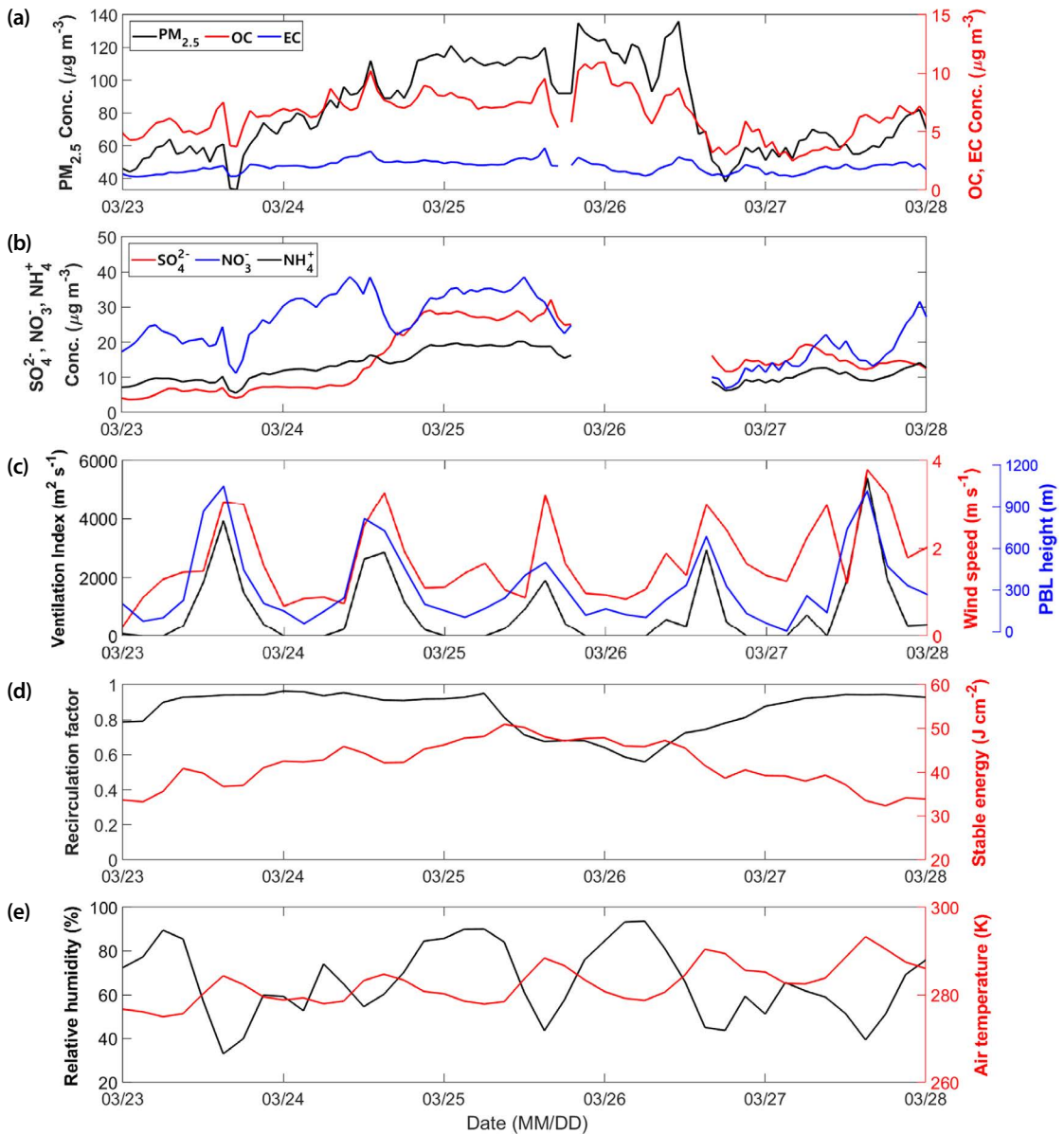
다. 선정된 사례 기간의 평균 PM<sub>2.5</sub> 및 구성성분 농도는 3월 전체 평균 농도보다 약 2배 이상 높은 농도를 보였다(그림 3a, b). 국외 기여도와 국내 기여도를 비교하기 위해 S-N(SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) 농도 차를 이용하였다(그림 3c). S-N 농도 차가 음수이면 국내 기여도가 국외 기여도보다 높은 것을 의미한다(Ghim *et al.*, 2019). 본 연구에서의 고농도 PM<sub>2.5</sub> 사례 기간의 S-N 농도 차는 전반부에 음의 값을 보이다가 후반부에는 0 부근의 값을 보였다(그림 3c). 이는 고농도 PM<sub>2.5</sub> 사례 기간의 국내 기여도가 국외 기여도보다 전반적으로 높거나 비슷함을 의미한다. 3월 전체 기간의 주풍은 주로 남서풍이었고(그림 3e), 앞서 선정한 사례 기간의 주풍도 남서풍을 보여 전반적으로 유사하였다. 하지만, 사례 기간의 평균 PBLH와 풍속은 각각 307

m와 1.5 m/s로, 3월 평균 PBLH와 풍속인 444 m와 2.2 m/s보다 상대적으로 낮아 대기가 확산하기 어렵고 정체 현상의 특징을 보였다(그림 3d). 3월 평균 기온과 상대습도는 각각 281.4 K와 61%였고, 사례 기간의 평균 기온과 상대습도는 각각 281.6 K와 74%로 3월 평균과 비교했을 때 큰 차이를 보이지 않았다(그림 3f).

따라서, 3월의 고농도 PM<sub>2.5</sub> 현상은 국외에서 유입된 오염물질과 국내에서 배출된 오염물질이 함께 대기 정체에 의해 축적된 것으로 판단된다. 이를 정량적으로 제시하고자 앞서 선정한 사례 기간의 대기의 수송 및 확산 능력에 대해 RE, VI, SE를 계산하여 분석하고 PM<sub>2.5</sub>와 구성성분의 농도 변화와의 상관성을 확인하고자 하였다.



**Fig. 3.** Time series plots of the concentrations of PM<sub>2.5</sub> and its components ((a): PM<sub>2.5</sub>, OC, and EC, (b): SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, and NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, and (c): S-N (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> - NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)), and meteorological variables ((d): PBL height and wind speed, (e): wind direction, and (f): air temperature and relative humidity) from March 1 to 31, 2018.



**Fig. 4.** Time series plots of the concentrations of PM<sub>2.5</sub> and its components ((a): PM<sub>2.5</sub>, OC, and EC and (b): SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, and NH<sub>4</sub><sup>+</sup>), and meteorological variables ((c): VI, PBLH, and wind speed, (d): RF, SE, and (e): air temperature and relative humidity) from March 23 to 27, 2018.

### 3.3 사례 기간 분석

고농도 PM<sub>2.5</sub>가 장기간 유지되었던 2018년 3월 24일 06시~26일 13시 기간을 중심으로 3월 23일 00시~27일 23시의 PM<sub>2.5</sub> 구성성분 농도, 기상요소(풍

향, 풍속)와 RF, VI, SE의 시계열을 그림 4에 나타냈다. SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 농도의 자료 중 3월 25일 19시~26일 15시까지의 자료 누락으로 인해 표기되지 않았다. 기온과 상대습도는 일평균 282.2 K, 73.6%이며, 기온



은 점차 증가하는 경향을 보였다(그림 4e). 풍속은 비교적 일정한 수준을 보였다(그림 4c).  $PM_{2.5}$  농도는 3월 23일 18시 이후 증가하였으며, 3월 25일 이후  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$  이상 유지되었고 3월 26일 오전 11시 이후 감소했다(그림 4a).  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NH}_4^+$  농도 경향을 보면  $\text{SO}_4^{2-}$  농도가 3월 24일 10시 이후 다른 성분들에 비해 크게 증가하였다(그림 4b). RF는 3월 25일 09시 이후에 점차 감소했고 3월 26일 06시에 0.56으로 최저를 보였다(그림 4d). 이는 3월 25일 09시부터 3월 26일 06시까지의 APMS 주변 공기 덩이가 재순환했다는 것을 의미한다. VI는 3월 25일에 일 최고  $1,914 \text{ m}^2/\text{s}$ 로 가장 낮았으며 26일 이후부터 증가하였다(그림 4d). 이는 3월 25일에 연직 확산할 수 있는 능력이 다른 일자보다 낮았음을 의미한다. SE는 3월 23일부터 지속적으로 증가하였으며 3월 25일 09시에  $51 \text{ J}/\text{cm}^2$ 으로 최고 값을 보였고 이후 유지하다가 3월 26일 09시 이후 감소하였다. 이는 3월 25일에 다른 일자보다 대기가 안정했다는 것을 의미한다.

RF, VI, SE를 종합해 보면 사례 기간 중 3월 25일~26일은 RF와 VI는 최하 값을 보인 시간대였고, SE는 가장 높았던 시간대를 포함하였다. 즉, 3월 25일~26일은 공기 덩이가 재순환하고 연직 확산이 다른 시기

보다 잘 되지 않는 조건이고 결과적으로 대기가 정체되었던 환경이었다. 따라서 3월 23일~24일에 국외와 국내에서 발생한  $PM_{2.5}$ 와  $PM_{2.5}$ 의 구성성분 물질들이 유입되었고 이후 RF와 VI가 감소하고 SE는 증가하면서 대기의 수평 수송 및 확산이 약해지고 재순환하면서 대기 정체가 발생하여 고농도  $PM_{2.5}$ 가 유지된 것으로 보인다. 3월 27일에는 다시 RF와 VI가 증가하고 SE는 낮아지면서 정체되어 있던 대기가 수평 및 연직적으로 원활하게 확산하고 순환하여  $PM_{2.5}$  농도와  $PM_{2.5}$  구성성분의 농도가 급감한 것으로 보인다.

### 3.4 $PM_{2.5}$ 구성성분과 대기 순환 및 확산 지표 간의 상관관계

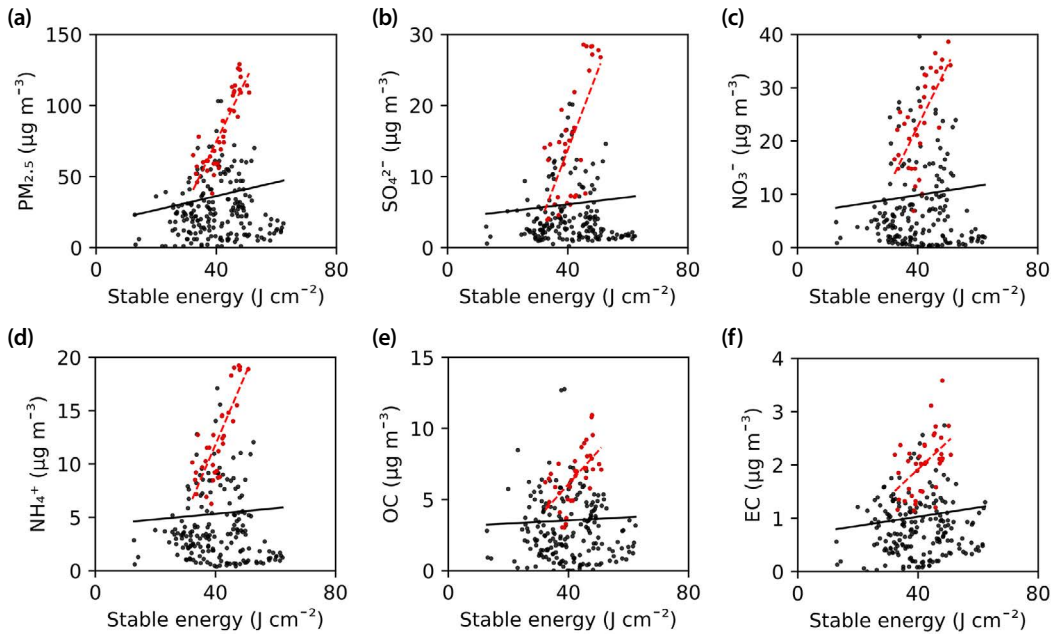
대기의 순환과 확산 지표를 비롯한 기상요소들은  $PM_{2.5}$ 와  $PM_{2.5}$  구성성분들의 농도를 결정하는 데 중요하므로 농도 변화에 미치는 영향을 통계적으로 확인할 필요가 있다.

3월 전체 기간과 사례 기간 동안 기상요소 및 RF, VI, SE가  $PM_{2.5}$  농도 및  $PM_{2.5}$ 의 구성성분 농도 변화에 미치는 영향을 통계적으로 확인하기 위해 Pearson 상관분석을 수행하였다(표 2). 2018년 3월 전체 기간에 대한  $PM_{2.5}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ , OC, EC 농도와 기

**Table 2.** The correlation coefficients of the concentrations of  $PM_{2.5}$  and its components ( $PM_{2.5}$ , OC, EC,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ , and  $\text{NH}_4^+$ ) and meteorological variables (air temperature, relative humidity, wind speed, PBL height, VI, RF, and SE) from March 1 to 31, 2018.

Period	Factor	$PM_{2.5}$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{NO}_3^-$	$\text{NH}_4^+$	OC	EC
2018.03.01 ~ 03.31	Air temperature	0.15*	0.30**	0.12*	0.22**	0.06	0.14*
	Relative humidity	0.15*	0.14*	0.16*	0.17*	0.03	-0.02
	Wind speed	-0.26**	-0.15*	-0.30**	-0.26**	-0.17**	-0.21**
	PBL height	-0.13*	-0.06	-0.11	-0.10	-0.04	-0.05
	RF	0.03	0.08	0.15*	0.13	0.02	0.08
	VI	-0.18**	-0.10	-0.22**	-0.18**	-0.04	-0.13*
	SE	0.15*	0.08	0.08	0.06	0.04	0.11
2018.03.23 ~ 03.27	Air temperature	-0.38**	0.07	-0.58**	-0.34*	-0.36*	-0.15
	Relative humidity	0.47**	0.27	0.42**	0.42**	0.31**	0.00
	Wind speed	-0.25	0.03	-0.31*	-0.18	-0.17	0.01
	PBL height	-0.26	-0.10	-0.22	-0.19	-0.11	0.07
	RF	-0.46**	-0.31*	0.08	-0.10	-0.36*	-0.08
	VI	-0.29*	-0.11	-0.29	-0.24	-0.14	-0.02
	SE	0.88**	0.69**	0.70**	0.82**	0.70**	0.63**

Note : \* and \*\* test of significance,  $p$ -value < 0.05 and  $p$ -value < 0.01, respectively.



**Fig. 5.** Scatter plots of SE for the concentrations of PM<sub>2.5</sub> and its components ((a): PM<sub>2.5</sub>, (b): SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, (c): NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, (d): NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, (e): OC, and (f): EC). The black lines and black dots represent values from March 1 to 31, 2018. The red lines and red dots represent values from March 23 to 27, 2018.

상요소(기온, 상대습도, 풍속, PBLH) 및 RE, VI, SE와의 상관성에서는 기상요소 중 풍속이 가장 유의미한 상관성을 보여주었다. PM<sub>2.5</sub>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, OC, EC 농도와 풍속의 상관계수는 각각 -0.26, -0.15, -0.30, -0.26, -0.17, -0.21로 전반적으로 음의 상관관계를 보였다. 이러한 한 달 전체 기간에 대한 상관계수는 초봄의 전형적인 계절적 변화를 반영하고 있어 인과관계를 뚜렷하게 구분하기 어려운 것으로 보인다. 한편, 사례 기간 동안 PM<sub>2.5</sub>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, OC, EC 농도와 기상요소 및 RE, VI, SE의 상관계수에서는 대기 순환 및 확산 지표 중 SE와의 상관관계가 더 컸다. PM<sub>2.5</sub>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, OC, EC 농도와 SE와의 상관계수는 각각 0.88, 0.69, 0.70, 0.82, 0.70, 0.63로 모두 양의 상관관계를 보였다. 단기간 분석 결과인 사례 기간에 대한 상관계수는 계절적인 변화보다 일 변화 등 국지적인 변화를 크게 반영하기 때문에 높은 상관계수가 나온 것으로 판단한다.

표 2에서 3월 전체 기간보다 사례 기간에서 기상요

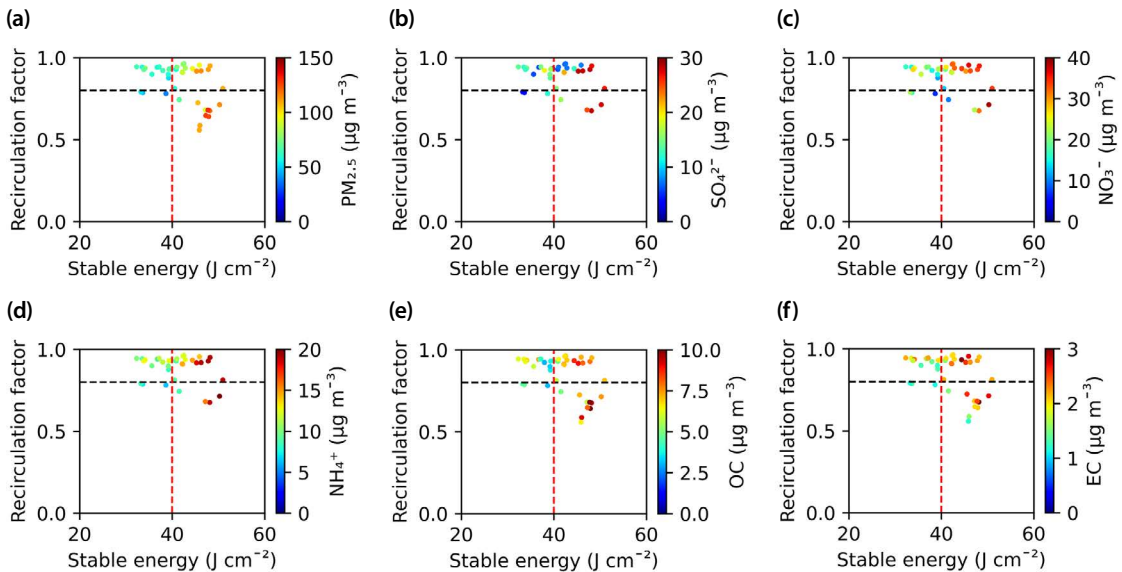
소의 상관성이 더 컸으며, 사례 기간 중 SE가 가장 높은 상관성을 보였다. 이에 2018년 3월 전체 기간(3월 1일 00시~31일 23시)과 사례 기간(3월 23일 00시~27일 23시)에 대해 PM<sub>2.5</sub> 농도 및 PM<sub>2.5</sub> 구성성분의 농도와 SE 간 산점도를 그림 5에 나타내었다. 그림 5의 PM<sub>2.5</sub> 농도 및 PM<sub>2.5</sub> 구성성분의 농도 자료는 LDAPS 자료와 같은 3시간 간격의 자료다. 그리고 그림 5에서의 검은색 점과 검은색 실선은 3월 전체 기간, 빨간색 점과 빨간색 점선은 사례 기간에 대한 산점도와 추세선이다. 3월 전체 기간에서보다 사례 기간에서 PM<sub>2.5</sub> 농도 및 PM<sub>2.5</sub> 구성성분의 농도가 SE와 더 큰 기울기를 가지며 높은 상관성을 보였다.

고농도 PM<sub>2.5</sub> 기간 PM<sub>2.5</sub>의 구성성분에 대한 유의미한 상관성을 보인 변수의 상관계수( $p$ -value < 0.05)를 정리하면 다음과 같다. NO<sub>3</sub><sup>-</sup>은 저온 고습인 대기 상태에서 입자상으로 존재하기 때문에 질량농도가 증가하는 것으로 알려져 있다(Seo, 2015). 본 연구에서의 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>는 기온과의 상관계수가 -0.58, 상대습도와의

상관계수가 0.42로 저온 고습인 상황에서 농도가 증가해 Seo (2015)의 연구와 비슷했다. 그리고 풍속과의 상관계수는 -0.31, SE와의 상관계수는 0.70으로 바람이 약하게 불고 대기 연직 확산 능력이 약한 상황에서 농도가 증가했다.  $\text{SO}_4^{2-}$ 는 기온 및 상대습도와 유의미한 상관성을 보이지 않았고, RF와 SE와는 유의미한 상관성을 보였다. RF와의 상관계수는 -0.31, SE와의 상관계수는 0.69로 대기의 수평 수송 능력 및 연직 확산 능력이 약한 상황에서 농도가 증가했다.  $\text{NH}_4^+$ 는 기온과의 상관계수가 -0.34, 상대습도와의 상관계수가 0.42, SE와 상관계수가 0.82로 기온이 낮으면서 상대습도가 높은 환경과 대기 연직 확산 능력이 약할 때 농도가 증가했다.  $\text{NH}_4^+$ 는 대기 중 수분에  $\text{NH}_3$ 가 용해되어 생성되는 것으로 알려져 있고(Seo, 2015) 대기의 연직 확산 능력이 약한 상황에서 농도가 증가한 것으로 판단된다. OC는 기온과의 상관계수가 -0.36, 상대습도와의 상관계수는 0.31, SE와는 0.70이었다. 대기의 연직 확산 능력이 약할 때 농도가 증가하고 그 경향이 기온이나 상대습도보다 컸다. EC는 SE와의 상

관계수가 0.63으로, 대기의 연직 확산 능력이 약할 때 농도가 증가하였다. 일반적으로 EC는 국지적으로 배출되는 오염물질로 풍속이 증가함에 따라 농도가 감소하는 경향을 보이거나, 본 연구에서는 뚜렷한 상관성을 보이지 못했다. 이는 Yu *et al.* (2018b)에서도 OC와 EC의 농도는 풍속과의 뚜렷한 관련성을 찾을 수 없었다고 언급한 바와 일치한다. 본 연구 사례 기간의 EC와 OC가 풍속보다는 대기의 연직 확산이 약해질수록 농도가 높아진 점으로 볼 때, 국외 혹은 국내에서 배출된 물질들이 수직 확산하지 못하여 장기간 고농도로 유지한 것으로 판단된다.

대기 순환 및 확산 지표로 이용된 RF, VI, SE와 각 구성성분 간 상관계수는 3월 전체 기간보다 고농도  $\text{PM}_{2.5}$  사례 기간에서 더 높았고 유의미한 상관성을 보였다. SE와  $\text{PM}_{2.5}$ 의 각 구성성분 간 상관계수는 개별 기상요소와의 상관계수보다 높았다. 또한,  $\text{PM}_{2.5}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ , OC와 RF와의 상관계수가 개별 기상요소와의 상관계수보다 높았다.  $\text{PM}_{2.5}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ , OC는 일부 개별 기상요소와 유의한 상관성도 보여주었고 RF와 SE와



**Fig. 6.** Scatter plots of SE-RF for the concentrations of  $\text{PM}_{2.5}$  and its components ((a)  $\text{PM}_{2.5}$ , (b)  $\text{SO}_4^{2-}$ , (c)  $\text{NO}_3^-$ , (d)  $\text{NH}_4^+$ , (e) OC, and (f) EC). The red dashed lines represent SE equivalent to  $40 \text{ J/cm}^2$ . The black dashed lines represent RF equivalent to 0.8.

도 좋은 상관성을 보여주었다. 즉, 개별 기상요소로도 기상 영향을 설명할 수 있지만, 대기의 수평 수송 능력과 연직 수송 능력에 의한 농도 변화가 주요하게 작용한 사례 기간에서 대기 순환 및 확산 지표가 더 유용함을 확인하였다. 이에 고농도 PM<sub>2.5</sub> 사례 기간의 대기 순환 및 확산으로 인한 PM<sub>2.5</sub> 구성성분 농도 변화의 원인을 찾기 위하여 두 가지 이상의 지표를 연계하여 추가 분석을 수행하였다.

### 3.5 사례 기간 대기 순환 및 확산 특성

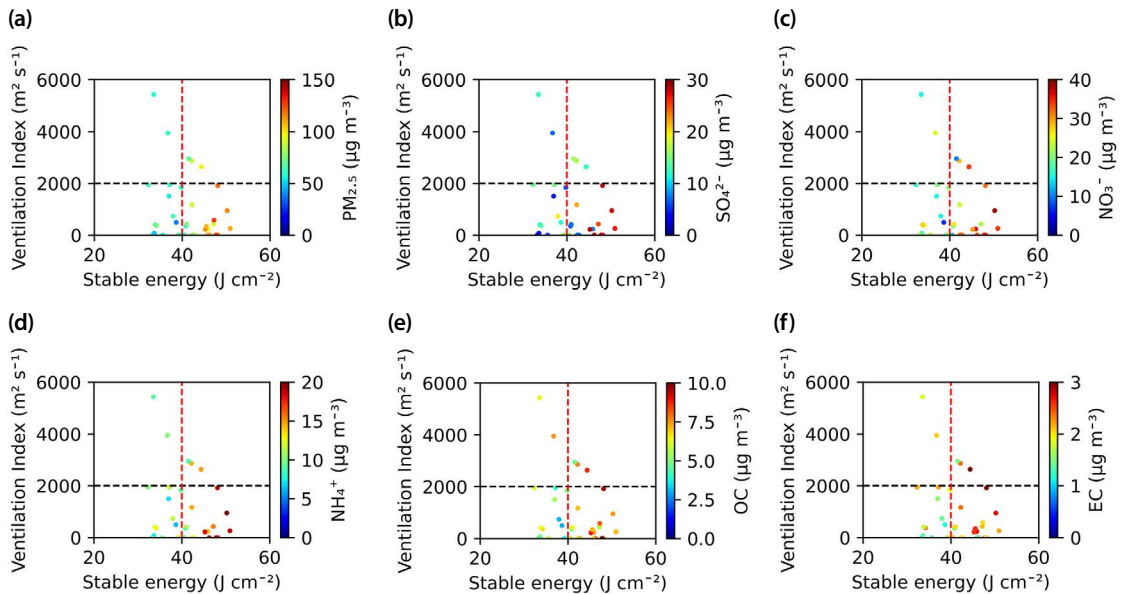
앞선 결과를 통해 고농도 PM<sub>2.5</sub> 사례 기간은 대기 확산과 수송이 PM<sub>2.5</sub> 및 PM<sub>2.5</sub> 구성성분 농도에 복합적으로 영향을 주는 것을 확인하였다. 하지만, 단일 지표인 RF, VI, SE와의 상관분석으로만 충분히 설명하기에는 어려움이 있다.

그림 6은 사례 기간 동안 PM<sub>2.5</sub> 및 구성성분 농도와 SE와 RF 간의 분포를 산점도로 나타낸 것이다. PM<sub>2.5</sub>는 RF가 0.8 이하, SE가 40 J/cm<sup>2</sup> 이상인 조건에서 더 높은 농도를 보였다(그림 6a). PM<sub>2.5</sub>의 구성성분인

SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, OC, EC는 RF와 상관성이 보이지 않았지만, SE가 40 J/cm<sup>2</sup> 이상인 조건에서 고농도로 존재했다. 따라서, 사례기간의 PM<sub>2.5</sub>는 SE가 40 J/cm<sup>2</sup> 이상, RF가 0.8 이하 수준으로 대기 연직 확산이 약하고 대기 재순환이 발생할 때 고농도로 존재했다. PM<sub>2.5</sub> 구성성분인 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, OC, EC는 SE가 40 J/cm<sup>2</sup> 이상 수준으로 대기 연직 확산이 약할 때 각 성분별 고농도가 나타났음을 확인하였다.

그림 7은 사례 기간 동안 PM<sub>2.5</sub> 및 구성성분 농도와 SE와 VI 간의 산점도를 나타낸 것이다. SE가 40 J/cm<sup>2</sup> 전후, VI가 2,000 m<sup>2</sup>/s 전후를 경계로 PM<sub>2.5</sub> 및 PM<sub>2.5</sub> 구성성분 모두 뚜렷한 차이를 보였다. 따라서, 고농도 PM<sub>2.5</sub> 사례 기간의 PM<sub>2.5</sub>와 PM<sub>2.5</sub> 구성성분인 EC, OC, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>는 SE가 40 J/cm<sup>2</sup> 이상, VI가 2,000 m<sup>2</sup>/s 이하 수준으로 연직 확산과 수평 확산이 낮은 조건에서 고농도로 존재하는 특성을 보인다고 판단된다.

그림 6과 그림 7을 종합하여 보면 연구 지역에 대한 사례 기간의 고농도 PM<sub>2.5</sub> 현상은 SE가 40 J/cm<sup>2</sup> 이상, VI는 2,000 m<sup>2</sup>/s 이하, RF는 0.8 이하일 때라는 정량적



**Fig. 7.** Scatter plots of SE-VI for the concentrations of PM<sub>2.5</sub> and its components ((a): PM<sub>2.5</sub>, (b): SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, (c): NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, (d): NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, (e): OC, and (f): EC). The red dashed lines represent SE equivalent to 40 J/cm<sup>2</sup>. The black dashed lines represent VI equivalent to 2,000 m<sup>2</sup>/s.

인 결론을 얻을 수 있다. 이와 비슷한 사례로 Wu *et al.* (2013)에 따르면 중국 광저우는 VI가 2,000 m<sup>2</sup>/s 이하, RF는 0.6 미만일 때 고농도 PM<sub>2.5</sub>로 존재했다고 밝힌 바 있다. 본 연구에서 밝혀진 VI와 비슷한 조건이었으며 RF는 다소 차이를 보였으나, 평상시보다 RF가 감소한 상황에서 고농도 현상이 일어났다는 점은 동일했다.

#### 4. 결론 및 한계점

본 연구는 서울에 위치한 수도권 대기환경연구소에서 측정한 자료를 바탕으로 고농도 PM<sub>2.5</sub>가 발생한 기간 중 하나인 2018년 3월 22일 00시~27일 23시를 사례 기간으로 선정했다. 선정된 사례 기간의 대기 순환 및 확산을 정량적으로 표현할 수 있는 지표인 대기 순환 및 확산 지수(RE, SE, VI) 및 기상요소(풍속, 기온, 상대습도, PBLH)를 이용하여 PM<sub>2.5</sub> 농도 및 구성 성분 농도와의 상관성을 분석했다. 그리고 RE, SE, VI를 이용하여 사례 기간의 대기 순환 및 확산을 설명하는 정량적인 기준 수치를 제시했다.

3월 전체 기간에서의 PM<sub>2.5</sub> 및 구성성분의 농도는 대체로 풍속, 기온과의 상관계수가 RE, SE, VI와의 상관계수보다 높았다. 하지만, 앞서 선정한 고농도 사례 기간에서는 풍속과 기온과의 상관계수가 SE와의 상관계수보다 높지 않아 상대적으로 유의미하지 않았다. 이는 대기 정체 기간 중 고농도 PM<sub>2.5</sub> 현상을 설명하는 데 SE가 유효함을 의미한다. PM<sub>2.5</sub> 및 PM<sub>2.5</sub> 구성성분과 SE와의 상관성이 양의 상관관계로 나타나 대기의 안정도가 강해질수록 농도가 증가했음을 정량적으로 확인하였다. 그리고 PM<sub>2.5</sub>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, OC는 3월 전체 기간에서 유의미한 상관성을 보이지 않던 RF와 사례 기간에서 유의미한 상관성을 보여 사례 기간에서는 대기 수평 수송 능력이 약해짐에 따라 PM<sub>2.5</sub>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, OC 농도가 증가했음을 정량적으로 확인하였다. 사례 기간의 고농도 PM<sub>2.5</sub> 현상에서 SE가 40 J/cm<sup>2</sup> 전후일 때 PM<sub>2.5</sub> 및 구성성분의 농도 변화가 컸다. 전체적으로 SE가 40 J/cm<sup>2</sup> 이상이고 VI가 2,000 m<sup>2</sup>/s,

RF가 0.8 이하인 조건에서 고농도 PM<sub>2.5</sub> 현상이 발생했다. 따라서, 본 연구의 사례 기간 동안 대기가 안정되고 수직 방향으로의 대기오염물질의 확산이 불리해지면서 대기 하층에서 대기오염물질의 농도가 높아진 것으로 판단된다. 결론적으로 고농도 PM<sub>2.5</sub> 현상이 발생한 기간의 원인을 분석하는 데 개별 기상요소만을 이용하는 것보다는 대기 순환 및 확산 지표를 함께 이용하여 분석하는 것이 유용하다는 결론을 얻었다. 향후, 발생하는 고농도 PM<sub>2.5</sub> 현상에 대기 순환 및 확산 지표를 적용할 수 있을 것으로 기대된다.

다만, 본 연구에서는 대기 확산 및 순환 지표를 적용하는 데 있어 몇 가지 제한점 및 한계점이 있다. 먼저, 연구 기간이 짧고 특정 계절만을 대상으로 하고 있어 연구 지역에서 발생하는 장기적인 고농도 PM<sub>2.5</sub> 현상을 일반화하는 데 한계가 있다. 다른 계절에서 발생하는 고농도 PM<sub>2.5</sub> 현상에 대기 확산 및 순환 지표를 적용하여 분석하는 경우에는 본 연구의 경향과 다를 수 있다는 점을 유의할 필요가 있다. 그리고 대기 확산 및 순환 지표는 상층 수송의 영향으로 오염물질이 외부로부터 유입되는 현상과 대기 중 화학적 반응의 영향을 반영하지 못하는 단점이 있다. 이를 반영하기 위해서는 3차원 대기 확산 모델을 이용하여 그 영향을 확인할 필요가 있다. 향후, 장기간 자료와 3차원 대기 확산 모델 결과를 이용하여 고농도 PM<sub>2.5</sub> 현상과 대기 확산 및 순환 지표의 연관성을 일반화하는 후속 연구가 필요하며, 본 연구의 결과가 그러한 가능성과 방향을 선제적으로 제시하는 데 기여하였다.

#### 감사의 글

본 연구는 한국연구재단의 동북아-지역 연계 초미세먼지 대응 기술개발 사업(NRF-2021M3G1A1081539)과 국립환경과학원의 국내 권역별 대기질의 장단기적 변화 특성 분석 사업(NIER-2021-04-02-174)과 2021년도 환경부 “미세먼지관리 전문인력 양성사업”의 지원을 받아 수행되었습니다. 이에 감사를 드립니다.

## References

- Allwine, K.J., Whiteman, C.D. (1994) Single-station integral measures of atmospheric stagnation, recirculation and ventilation, *Atmospheric Environment*, 28(4), 713-721. [https://doi.org/10.1016/1352-2310\(94\)90048-5](https://doi.org/10.1016/1352-2310(94)90048-5)
- Ghim, Y.S., Choi, Y., Park, J., Kim, S., Bae, C.H., Seo, J., Shin, H.J., Lim, Y.J., Lyu, Y.S., Lee, Y.J. (2019) Overall Characteristics of Nationwide High PM<sub>2.5</sub> Episodes during 2013-2016, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 35(5), 609-624, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/kosae.2019.35.5.609>
- Kang, M., Lim, Y.-K., Cho, C., Kim, K.R., Park, J.S., Kim, B.-J. (2016) Accuracy Assessment of Planetary Boundary Layer Height for the WRF Model Using Temporal High Resolution Radio-sonde Observations, *Atmosphere*, 26(4), 673-686, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.14191/atmos.2016.26.4.673>
- Kim, C.-H., Park, I.-S., Lee, S.-J., Kim, J.-S., Hong, Y.-D., Han, J.-S., Jin, H.-A. (2005a) Evaluation of the effect of traffic control program on the ambient air quality in Seoul metropolitan area using the lower level stability index of atmosphere, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 21(2), 243-257, (in Korean with English abstract).
- Kim, D.J., Kang, G., Kim, D.Y., Kim, J.J. (2020a) Characteristics of LDAPS-predicted surface wind speed and temperature at automated weather stations with different surrounding land cover and topography in Korea, *Atmosphere*, 11(11), 1-16. <https://doi.org/10.3390/atmos11111224>
- 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>
- Kim, J.A., Lim, S., Shang, X., Lee, M., Kang, K.S., Ghim, Y.S. (2020b) Characteristics of PM<sub>2.5</sub> Chemical Composition and High-concentration Episodes Observed in Jeju from 2013 to 2016, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 36(3), 388-403, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2020.36.3.388>
- Kim, T., Myoung, J., Jung, M., Lee, Y., Suh, I. (2020c) Analytical study on the trends of the high PM<sub>2.5</sub> concentrations and interregional association, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 36(2), 275-286, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2020.36.2.27>
- Kim, Y.-H., Koo, H.-J., Nam, J.-C. (2005b) Evaluation of Urban Effect Based on the Spatial and Temporal Characteristics of Rainfall in the Seoul Region: The Change of Characteristics of Rainfall Induced by Urbanization, *Seoul Studies*, 6(2), 165-183. <https://doi.org/10.23129/seouls.6.2.200506.165>
- Korea Environment Institute (KEI) (2019) A Study on predicting Levels of Particulate matter and Devising Mid-to Long-Term Management Policy in Consideration of Climate Change. <https://www.kei.re.kr/> (accessed on Mar.1, 2022).
- Lee, H.-J., Jeong, Y., Kim, S.-T., Lee, W.-S. (2018) Atmospheric circulation patterns associated with particulate matter over South Korea and their future projection, *Journal of Climate Change Research*, 9(4), 423-433, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.15531/KSCCR.2018.9.4.423>
- Lee, Y.G., Ho, C.H., Kim, J.H., Kim, J. (2015) Quiescence of Asian dust events in South Korea and Japan during 2012 spring: Dust outbreaks and transports, *Atmospheric Environment*, 114, 92-101. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.05.035>
- Li, H., Wang, B., Fang, X., Zhu, W., Fan, Q., Liao, Z., Liu, J., Zhang, A., Fan, S. (2018) Combined effect of boundary layer recirculation factor and stable energy on local air quality in the Pearl River Delta over southern China, *Journal of the Air and Waste Management Association*, 68(7), 685-699. <https://doi.org/10.1080/10962247.2018.1439125>
- Li, W., Wang, Y., Bernier, C., Estes, M. (2020) Identification of Sea Breeze Recirculation and Its Effects on Ozone in Houston, TX, During DISCOVER-AQ 2013, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 125(22), 1-21. <https://doi.org/10.1029/2020JD033165>
- Nankar, D.P., Patra, A.K., Dole, M.U., Venkataraman, S., Hegde, A.G. (2009) Atmospheric stagnation, recirculation and ventilation characteristics at Kakrapar atomic power station site, *Annals of Nuclear Energy*, 36(4), 475-480. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2008.12.005>
- National Institute of Environmental research (NIER) (2021) 2020 Annual Report of Intensive Air Quality Monitoring Station. <https://ecolibrary.me.go.kr/nier/> (accessed on Mar. 1, 2022).
- Oh, H.R., Ho, C.H., Kim, J., Chen, D., Lee, S., Choi, Y.S., Chang, L.S., Song, C.K. (2015) Long-range transport of air pollut-

- ants originating in China: A possible major cause of multi-day high-PM<sub>10</sub> episodes during cold season in Seoul, Korea, *Atmospheric Environment*, 109, 23-30. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.03.005>
- Park, S.S., Yu, G.H. (2018) Effect of air stagnation conditions on mass size distributions of water-soluble aerosol particles, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 34(3), 418-429, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2018.34.3.418>
- Pasch, A.N., MacDonald, C.P., Gilliam, R.C., Knoderer, C.A., Roberts, P.T. (2011) Meteorological characteristics associated with PM<sub>2.5</sub> air pollution in Cleveland, Ohio, during the 2009-2010 Cleveland Multiple Air Pollutants Study, *Atmospheric Environment*, 45(39), 7026-7035. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.09.065>
- Pérez, I.A., Sánchez, M.L., García, M.A., Paredes, V. (2011) Relationship between CO<sub>2</sub> at a rural site and integral measures of atmospheric stagnation, recirculation, and ventilation, *Naturwissenschaften*, 98(7), 565-574. <https://doi.org/10.1007/s00114-011-0800-5>
- Ryoo, J.-Y., Kwon, T.-H., Kang, I.-S., Lee, K.-S., Jo, C.-W., Kim, J.-S., Kim, H.-H., Jang, W., Park, J.-J., Yoo, T.-S. (2019) A Study for Characteristics of Fine Particulate Matter and Atmospheric Stagnation Considering Elevation and Backward Trajectory, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 35(6), 701-712, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/kosae.2019.35.6.701>
- Seo, Y.-H. (2015) Characterization of high concentration PM<sub>2.5</sub> by nitrate and ammonium ions of PM<sub>2.5</sub> in Seoul, *Journal of Korean Society of Environmental Administration*, 20(3), 71-80, (in Korean with English abstract).
- Venegas, L.E., Mazzeo, N.A. (1999) Atmospheric stagnation, recirculation and ventilation potential of several sites in Argentina, *Atmospheric Research*, 52(1-2), 43-57. [https://doi.org/10.1016/S0169-8095\(99\)00030-7](https://doi.org/10.1016/S0169-8095(99)00030-7)
- Wu, M., Luo, Y., Zheng, Y.-P., Wu, X.-X., Fan, S.-J., Wu, D. (2020) Study of the vertical wind field structure and its relationship with PM<sub>2.5</sub> air pollution over the pearl river delta in autumn, *Journal of Tropical Meteorology*, 26(1), 82-92. <https://doi.org/10.16555/j.1006-8775.2020.008>
- Wu, M., Wu, D., Fan, Q., Wang, B.M., Li, H.W., Fan, S.J. (2013) Observational studies of the meteorological characteristics associated with poor air quality over the Pearl River Delta in China, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13(21), 10755-10766. <https://doi.org/10.5194/acp-13-10755-2013>
- Yu, G.-H., Lee, B.-J., Park, S.-S., Jung, S.A., Jo, M.R., Lim, Y.J., Kim, S. (2019) A Case Study of Severe PM<sub>2.5</sub> Event in the Gwangju Urban Area during February 2014, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 35(2), 195-213, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/kosae.2019.35.2.195>
- Yu, G.-H., Park, S.-S., Jung, S.A., Jo, M.R., Lim, Y.J., Shin, H.J., Lee, S.B., Ghim, Y.S. (2018a) Investigation on Characteristics of High PM<sub>2.5</sub> Pollution Occurred during October 2015 in Gwangju, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 34(4), 567-587, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/kosae.2018.34.4.567>
- Yu, G.H., Park, S.S., Ghim, Y.S., Shin, H.J., Lim, C.S., Ban, S.J., Yu, J.A., Kang, H.J., Seo, Y.K., Kang, K.S., Jo, M.R., Jung, S.A., Lee, M.H., Hwang, T.K., Kang, B.C., Kim, H.S. (2018b) Difference in Chemical Composition of PM<sub>2.5</sub> and Investigation of its Causing Factors between 2013 and 2015 in Air Pollution Intensive Monitoring Stations, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 34(1), 16-37, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/kosae.2018.34.1.016>
- Zheng, X., Qin, J., Liang, S., Yuan, Z., Mbululo, Y. (2018) The development of boundary layer structure index (BLSI) and its relationship with ground air quality, *Atmosphere*, 10(1), 3. <https://doi.org/10.3390/atmos10010003>
- Zhu, J., Zhu, B., Huang, Y., An, J., Xu, J. (2019) PM<sub>2.5</sub> vertical variation during a fog episode in a rural area of the Yangtze River Delta, China, *Science of The Total Environment*, 685, 555-563. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.319>

## Authors Information

- 김연옥 (강원대학교 환경의생명융합학과 박사과정 학생)  
(yukim@kangwon.ac.kr)
- 도현석 (강원대학교 환경의생명융합학과 석사과정 학생)  
(dotordi@kangwon.ac.kr)
- 김지현 (강원대학교 환경의생명융합학과 석사과정 학생)  
(jhi2d@kangwon.ac.kr)
- 광경환 (강원대학교 환경융합학부 부교수)  
(khkwak@kangwon.ac.kr)
- 안준영 (국립환경과학원 대기환경연구과 연구관)  
(nierair@korea.kr)
- 김현웅 (국립환경과학원 대기환경연구과 전문연구원)  
(khw1659@korea.kr)