

논문

2015년~2021년 서울 지역 다중일 PM_{2.5} 고농도 사례 특징 분석 Characteristics of Multi-day PM_{2.5} Episode from 2015 to 2021 in Seoul

박현영¹⁾, 안준영²⁾, 박진수²⁾, 조석연^{1),3),*}

¹⁾인하대학교 환경공학과, ²⁾국립환경과학원 기후대기연구부 대기환경연구과,
³⁾수도권미세먼지연구·관리센터

HyeonYeong Park¹⁾, Joon-Young Ahn¹⁾, JinSoo Park¹⁾, SeogYeon Cho^{1),3),*}

¹⁾Department of Environmental Engineering, Inha University, Incheon, Republic of Korea
²⁾Climate and Air Quality Research Department, National Institute of Environmental
Research (NIER), Incheon, Republic of Korea
³⁾Particle Pollution Research and Management Center, Inha University, Incheon, Republic of Korea

접수일 2023년 10월 5일
수정일 2023년 10월 13일
채택일 2023년 10월 24일

Received 5 October 2023
Revised 13 October 2023
Accepted 24 October 2023

*Corresponding author
Tel : +82-(0)32-860-7506
E-mail : sycho@inha.ac.kr

Abstract Examining PM_{2.5} mass and species concentration monitoring data, all multi-day PM_{2.5} episodes from 2015 to 2021 in Seoul were analyzed to identify common meteorological and chemical characteristics and determine causes. Among the five multi-day PM_{2.5} episodes identified, four of them took place during the winter and early spring and one in autumn. The weak and western wind pattern mainly blew with a wind speed of 1~3 m/sec. The particulate nitrate mainly composed of PM_{2.5} mass during the multi-day PM_{2.5} episodes. Higher sulfur oxidation ratio (SOR) and nitrogen oxidation ratio (NOR) during the multi-day PM_{2.5} episodes were obtained and compared to those during the non-episode, implying domination of sulfate and nitrate over precursors during the multi-day PM_{2.5} episodes. Observation in Baengnyeong, up-wind region and remote site, were used to estimate long-range transport of PM_{2.5} toward Seoul with coefficient of divergence. Also, correlation between NOR and temperature were used to assess long-range transport of PM_{2.5}.

Key words: Multi-day PM_{2.5} episode, Nitrate, NOR (Nitrogen Oxidation Ratio), long-range transport

1. 서 론

PM_{2.5} (particles with an aerodynamic diameter of 2.5 μm or less)는 황산염, 질산염, 암모늄염과 같은 무기 물질과 유기물질 (organic matter, OM), 원소탄소 (elemental carbon, EC), 토양 물질 등으로 구성되며, 가지 거리, 인체건강 그리고 기후변화에 영향을 미친다. 이로 인해 여러 국가에서 대기 중 PM_{2.5} 농도 기준을 제정하고 있으며, 우리나라는 2015년부터 전국적으로 대기 중 PM_{2.5} 농도를 측정하고 대기환경기준을 설정하여 적용하고 있다. 우리나라는 2018년에 PM_{2.5}의 대기환경기준을 강화하였으며, 2023년 현재 PM_{2.5}의 대기환경기준은 연평균 15 μg/m³ 이하, 일평균 35 μg/m³

이하이다(AirKorea).

대기환경기준과 더불어 고농도 PM_{2.5} 현상이 발생했을 때, 정부는 지역별로 고농도 PM_{2.5}에 대한 주의보를 발령한다. 우리나라의 고농도 PM_{2.5} 주의보는 해당 지역의 대기자동측정소에서 측정된 PM_{2.5} 시간 평균 농도가 75 μg/m³ 이상으로 2시간 연속 지속되었을 때 발령되며, PM_{2.5} 농도가 35 μg/m³ 아래로 낮아지면 주의보를 해제한다(AirKorea).

우리나라의 수도권 서울의 PM_{2.5} 오염의 심각성은 여러 연구에서 거론되었다(Park *et al.*, 2023; Lim *et al.*, 2022; Cho *et al.*, 2021a; Park *et al.*, 2020; Kim *et al.*, 2018; Kang *et al.*, 2004). 2015년부터 2021년까지 서울에 발령된 PM_{2.5} 주의보 및 경보 횟수는 총 53회였다.

서울에 발령된 PM_{2.5} 주의보 및 경보 횟수는 2015년 6회를 시작으로 2019년에 17회로 가장 많았다. 2020년에 PM_{2.5} 주의보 및 경보 횟수는 5회로 감소하였으나, 2021년에 2019년과 비슷한 수준인 12회의 주의보 및 경보가 발령되었다. 대부분의 주의보는 수 시간에서 하루 정도로 짧은 시간 동안 발령되었으나, 서울에서는 2018년 1월에 처음으로 PM_{2.5} 주의보가 이틀을 초과하여 발령되었다.

본 연구에서는 PM_{2.5} 주의보가 이틀을 초과하여 발령된 사례를 ‘다중일 (multi-day) PM_{2.5} 고농도 사례’로 정의하였다. 서울에서 발생한 다중일 PM_{2.5} 고농도 사례는 여러 연구에서 거론되었으나 (Jo *et al.*, 2022; Shim *et al.*, 2022; Cho *et al.*, 2021b; Oh *et al.*, 2020; Lee *et al.*, 2019), 주로 2018년과 2019년에 발생한 고농도 사례 중 한 개의 사례를 대상으로 하였다. 또한 국내 PM_{2.5} 고농도 사례에서 2차 무기 에어로졸 (Secondary Inorganic Aerosol, SIA)의 중요성은 여러 연구에서 보고되었으나 (Jo *et al.*, 2022; Son *et al.*, 2021; Park *et al.*, 2013; Choi *et al.*, 2012; Kang *et al.*, 2004), 2018년 1월 다중일 PM_{2.5} 고농도 사례를 대상으로 한 Jo *et al.* (2022)을 제외하고 2019년 1월 PM_{2.5} 고농도 사례를 다룬 Oh *et al.* (2020)과 2019년 2월 27일~3월 7일 PM_{2.5} 고농도 사례를 다룬 Shim *et al.* (2022), Cho *et al.* (2021b), Lee *et al.* (2019)에서 화학 성분 분석은 보고되지 않았다. 또한 2020년 이후에 발생한 PM_{2.5} 고농도 사례는 기존 연구에서 거의 다루지지 않았기 때문에 2020년 이후에 발생한 다중일 PM_{2.5} 고농도 사례의 화학 성분 분석 연구는 미진하다. 이와 더불어 Jee *et al.* (2022a, 2022b)은 다중일 PM_{2.5} 고농도 사례를 포함하여 2015년부터 2021년까지 발생한 국내 PM_{2.5} 고농도 사례의 기상 특징을 조사하였으나, 화학적 특징은 조사하지 않았다.

본 연구는 에어코리아 PM_{2.5} 주의보 발령 기록을 기준으로 선정된 2015년 1월부터 2021년 12월까지 서울 지역에 발생한 다중일 PM_{2.5} 고농도 사례의 특성을 조사하고자 하였다. 먼저, 다중일 PM_{2.5} 고농도 사례 기간의 기상 조건을 조사하였고, 다음으로 준실시

간으로 측정된 PM_{2.5} 질량 농도와 PM_{2.5} 화학 성분 측정치를 분석하여 다중일 PM_{2.5} 고농도 사례에서의 주요 화학 성분들의 거동과 특성을 살펴보았다. 또한 풍상방향에 위치한 백령도 지역의 준실시간 PM_{2.5} 측정 자료를 활용하여 백령도를 통한 서울로의 PM_{2.5} 중장거리 이동 영향을 조사하였다.

2. 연구 방법

2.1 PM_{2.5} 자동 측정망 개요 및 대상 지역 선정

2011년, PM_{2.5} 대기환경기준이 신설되면서 전국 4개 시·군에 설치된 PM_{2.5} 측정망 4곳과 집중측정망 4곳에서 자동 측정기기를 사용한 PM_{2.5} 농도 측정이 진행되었다 (NIER, 2012). PM_{2.5} 측정망은 PM_{2.5}의 농도 및 성분 파악을 통해 배출원을 규명하기 위한 목적으로 설치되었고, 집중측정망은 대기오염물질의 중장거리 이동과 국가 배경지역 및 수도권 등 주요 권역별의 대기질 현황과 고농도 오염현상에 대한 원인을 규명하기 위해 설치되었다. PM_{2.5} 측정망과 집중측정망은 PM_{2.5} 질량 농도 및 화학 성분 농도를 측정하는 역할을 하고 있으며, 2021년 12월 기준, PM_{2.5} 측정망은 ‘PM_{2.5} 성분 측정망’이라는 이름으로 전국에 42개소가 설치되었고, 집중측정망은 ‘대기환경연구소’로 명명되어 전국에 10개소가 설치되었다.

2015년에 PM_{2.5} 대기환경기준이 적용되면서 도시 대기측정소의 측정 항목에 PM_{2.5}가 추가되었다. 2015년에 전국에 설치된 도시대기측정소는 259개였으나, 측정기기 설치 미비와 비용 등의 문제로 인해 48%의 측정소만이 PM_{2.5} 농도를 고시하였다. 그중, 서울과 부산은 유일하게 각 도시에 설치된 모든 도시대기측정소에서 PM_{2.5} 농도를 고시한 지역이었다. 2016년까지 전국 도시대기측정소 대비 PM_{2.5} 농도를 고시한 측정소의 비율은 69%였으나, 2018년에 98%까지 증가하였고, 2021년에 100%를 달성하였다.

서울은 2015년 이전부터 PM_{2.5} 측정망 등에서 PM_{2.5} 농도를 측정해왔고, 25개의 지역구당 한 개의

도시대기측정소에 PM_{2.5} 자동 측정기기를 구축하여 2015년부터 현재까지 각 측정소의 PM_{2.5} 농도를 고시하고 있다. 서울은 2015년부터 현재까지 도시대기측정소의 개수에 변화가 없는 반면, 부산에는 2017년 이후에 도시대기측정소 9곳이 더 증설되었다. 따라서, 2015년부터 측정소의 증설 없이 도시 지역 PM_{2.5} 평균 농도를 완전하게 고시한 지역은 서울이 유일하다. 또한 수도권을 대표하는 대기환경연구소가 위치하고 있고, 국내 PM_{2.5} 고농도 사례가 나타나는 주요 지역이기 때문에 본 연구의 대상 지역으로 선정하였다.

2.2 준실시간 PM_{2.5} 및 성분 농도 측정 개요

은평구 불광동에는 도시대기측정소와 더불어 준실시간으로 PM_{2.5}, PM_{2.5} 화학 성분, SO₂, NO₂, O₃, CO 등 가스상 물질 농도를 측정하는 대기환경연구소가 2008년부터 운영되고 있다. 대기환경연구소는 2007년 백령도를 시작으로 2021년까지 서울, 대전, 광주, 울산, 제주, 안산, 서산, 익산, 춘천 등 총 10군데에 설치되었다. 본 연구는 불광동 대기환경연구소(SU site) 측정자료를 사용하여 서울 지역 다중일 PM_{2.5} 고농도 사례의 특징을 조사했으며, 이와 더불어 백령도 대기환경연구소(BN site) 측정자료를 활용하여 다중일 PM_{2.5} 고농도 사례에서의 중장거리 이동 영향을 평가하였다.

대기환경연구소의 PM_{2.5} 및 PM_{2.5} 화학 성분 농도 등의 측정 방법은 국립환경과학원에서 발간한 대기환경연구소 연간 운영결과보고서(NIER, 2022a)에 명시되어 있다. PM_{2.5} 농도는 베타선 흡수법을 사용하여 측정되었으며, 장비는 BAM-1020 (Met One Ins.)을 사용하였다. PM_{2.5}의 질량 농도는 시료 채취 전과 후에 베타선이 감쇠되는 양을 계산하여 산출되었다. 황산염, 질산염, 암모늄염, 그 밖의 이온 성분은 Ambient Ion Monitor (AIM, URG Corporation, 9000D)를 사용하여 측정되었으며, 탄소 성분인 유기탄소(organic carbon, OC)와 원소탄소는 NIOSH 분석법과 EPA STN 분석법에 기초한 열광학적 분석법(thermal/optical transmittance method)과 비분산적외선 분석법(non-dispersive infrared method)을 사용하여 측정되었다. 또한 대기

중 미량원소성분(Si, Ca, Fe, Ti, V, Cr, Mn, Ni, Pb 등)은 Online XRF (X-Ray Fluorescence Spectroscopy)를 사용하여 측정하였다. 그 외에 측정 조건과 환경은 대기환경연구소의 연간 운영결과보고서(NIER, 2022a)에서 확인할 수 있다.

PM_{2.5}를 구성하는 유기 에어로졸은 OC가 아닌 OM 형태로 존재한다. 따라서, OM 농도는 측정된 OC 농도에 OM 대 OC 무게비율을 곱하여 산출되었다. OC와 OM 사이의 무게비율 값은 지역에 따라 다른데(Turpin and Lim, 2001), 본 연구에서는 Park *et al.* (2023)의 대기질 모델링을 이용해서 추정된 1.8을 OM 대 OC 무게비율로 사용하였다.

본 연구의 대상 기간 중, 불광동 대기환경연구소의 NO₂ 측정자료가 2021년 2월과 11월에 결측되었고, SO₂ 측정자료가 2021년 11월 21일 오전 9시부터 11월 21일 24시까지 결측되어, 결측된 기간에 한하여 불광동 도시대기측정소의 NO₂ 및 SO₂ 자료를 사용하였다.

2.3 지시인자

본 연구에서는 고농도 사례 기간의 PM_{2.5} 화학 성분 간 관계를 파악하기 위해 질산염 대 황산염 몰 비([NO₃⁻]/[SO₄²⁻]), 암모늄염 대 황산염 몰 비([NH₄⁺]/[SO₄²⁻]), DSN (Degree of Sulfate Neutralization), SOR (Sulfur Oxidation Ratio), NOR (Nitrogen Oxidation Ratio)을 사용하였다. 5가지 인자 중, [NO₃⁻]/[SO₄²⁻], [NH₄⁺]/[SO₄²⁻], DSN 계산에는 황산염, 암모늄염, 질산염의 기간 평균 몰 농도를 사용하였다. DSN은 식 1과 같이 정의되며, 암모늄에 의한 황산염의 중화 정도를 평가하는 데 사용된다.

$$DSN = \frac{[NH_4^+] - [NO_3^-]}{[SO_4^{2-}]} \quad (\text{Eq. 1})$$

SOR과 NOR은 대기 중 SO₂와 NO₂가 산화되어 각각 2차 생성으로 인한 황산염, 질산염으로 전환되는 정도를 평가하는 데 사용되며, 정의는 식 2 및 식 3과 같다. 그리고 SOR과 NOR은 위에 언급된 3가지 인자

([NO₃⁻]/[SO₄²⁻], [NH₄⁺]/[SO₄²⁻], DSN)와는 달리 실시간 변화를 중요시하므로, 기간 평균이 아닌 시간 평균 농도를 사용하여 산출하였다.

$$SOR = \frac{[SO_4^{2-}]}{[SO_2] + [SO_4^{2-}]} \quad (\text{Eq. 2})$$

$$NOR = \frac{[NO_3^-]}{[NO_2] + [NO_3^-]} \quad (\text{Eq. 3})$$

또한 서울 지역 PM_{2.5} 고농도 사례 기간 전후, 백령도에서 발생한 PM_{2.5} 고농도 사례와의 유사성 검토를 위해 두 지역 간의 일치도(uniformity)를 발산계수(coefficient of divergence (CD), Wongphatarakul *et al.*, 1998) 값으로 평가하였다. 발산계수는 식 4와 같이 정의되는데, j와 k는 서로 다른 두 지역을 의미하고, x_{ij}는 j지역의 i번째 화학종의 평균 농도를, n은 화학종의 개수를 뜻한다. 발산계수 값은 PM_{2.5}를 구성하는 주된 화학 성분인 황산염, 질산염, 암모늄염, OM, EC, 미량 원소성분 측정치의 기간 평균 농도를 사용하여 산출하였다.

$$CD_{jk} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_{ij} - x_{ik}}{x_{ij} + x_{ik}} \right)^2} \quad (\text{Eq. 4})$$

3. 연구 결과

3.1 다중일 PM_{2.5} 고농도 사례 선정

다중일 PM_{2.5} 고농도 사례 기간 선정은 에어코리아

에서 제공하고 있는 권역별 주의보/경보 발령 내역을 기준으로 하였다. 2015년 1월부터 2021년 12월까지 PM_{2.5} 시간 평균 농도가 75 µg/m³를 초과하여 서울에 발령된 PM_{2.5} 주의보가 48시간 이상 지속된 사례는 총 6회였으며, 2018년 1월, 2019년 1월, 2019년 2~3월, 2020년 11월, 2021년 2월, 2021년 11월에 발생하였다. 단, 2020년 11월 사례의 경우, 초기 2시간만 PM_{2.5} 시간 평균 농도가 75 µg/m³를 초과하였고, 그 이후부터 35~56 µg/m³ 범위로 다른 고농도 사례에 비해 농도가 현저히 낮았기 때문에 본 연구에서는 제외하였다. 다중일 PM_{2.5} 고농도 사례의 대조 사례로 시간 평균 PM_{2.5} 농도가 35 µg/m³ 이하로 24시간 이상 지속되었을 때를 ‘저농도 사례’로 정의하였으며, 2018년 1월 23일 0시부터 1월 31일 23시까지의 기간을 ‘저농도 사례’로 선정하였다.

이상의 절차를 따라서, 2015년 1월~2021년 12월 사이에 선정된 총 5개의 다중일 PM_{2.5} 고농도 사례에 대하여 표 1에 지속 시간, PM_{2.5} 농도의 기간 평균값과 시간 평균 농도의 최대치를 나타내었다. 다중일 PM_{2.5} 고농도 사례는 2018년에 1회, 2019년과 2021년에 각각 2회씩 발생하였다. 다중일 PM_{2.5} 고농도 사례 기간 동안 PM_{2.5} 농도의 평균값은 71~101 µg/m³였으며, 1시간 평균 농도의 최대치는 모든 다중일 PM_{2.5} 고농도 사례에서 100 µg/m³를 초과하였다. 그중, 2019년 1월 PM_{2.5} 고농도 사례(Episode II)와 2019년 2~3월 PM_{2.5} 고농도 사례(Episode III)에서 150 µg/m³를 초과한 최대치가 관측되었다. 또한 Episode III은 5개의 다중일 PM_{2.5} 고농도 사례 중에서 총 158시간 동안 지

Table 1. Episode period, duration hour, and PM_{2.5} mass concentrations averaged over 25 urban monitoring stations located in Seoul during the five multi-day PM_{2.5} episodes from 2015 January to 2021 December.

	Episode period	Duration hour	Average PM _{2.5} concentration (µg/m ³)	Peak hourly PM _{2.5} concentration (µg/m ³)
Episode I	2018-01-16 12:00~2018-01-18 15:00	51	83.9	105.7
Episode II	2019-01-12 12:00~2019-01-15 17:00	77	100.7	154.2
Episode III	2019-02-28 16:00~2019-03-07 06:00	158	96.5	159.8
Episode IV	2021-02-12 21:00~2021-02-15 09:00	60	71.1	100.4
Episode V	2021-11-19 19:00~2021-11-21 24:00	53	94.6	126.8

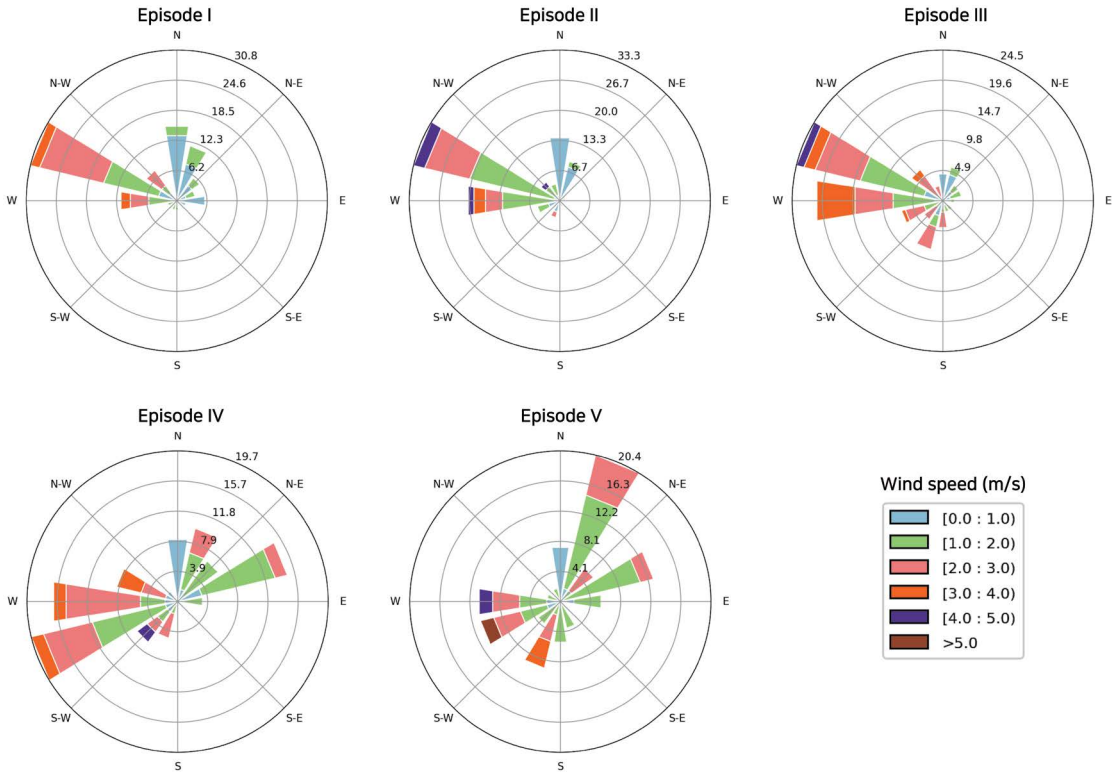


Fig. 1. Plots of wind rose during the five multi-day $PM_{2.5}$ episodes in Seoul.

속된 최장 기간 $PM_{2.5}$ 고농도 사례였다.

3.2 다중일 $PM_{2.5}$ 고농도 사례의 기상 특징

수도권 $PM_{2.5}$ 고농도 사례는 겨울과 봄에 주로 발생한다(NIER, 2022b). 우리나라의 겨울과 봄은 북서풍이 우세한 시기이며, 이로 인해 중국 등 풍상방향에 위치한 국외 지역의 오염물질이 국내로 유입되어 고농도 $PM_{2.5}$ 를 야기한다(You *et al.*, 2020). 그림 1은 5개 다중일 $PM_{2.5}$ 고농도 사례 기간 동안의 풍속과 풍향 정보를 보여주고 있다. Episode I, Episode II, Episode III은 고농도 사례 기간 동안 주로 중국과 몽골에 위치한 고기압의 영향을 받았다. 그 결과 그림 1과 같이 Episode I, Episode II, Episode III에서 서풍~북서풍이 각각 50%, 63%, 54% 비율로 나타났다.

2021년 사례인 Episode IV와 Episode V는 앞선 Episode I, Episode II, Episode III 사례와 다소 다른 현

상을 보였다. Episode IV의 경우, 2021년 2월 13일 오전 3시, 중부지방에 위치한 고기압과 동해에 위치한 저기압으로 인해 서풍이 발생했고, 13일 오후 6시에 중국 내륙에 위치한 고기압과 러시아 블라디보스토크 근처에 형성된 저기압으로 인해 서풍~남서풍이 발생하였다. 14일 오전 3시에는 일본에 위치한 고기압과 중국 동부 내륙에 위치한 저기압으로 인해 동풍의 영향을 받았다. Episode V의 경우, 2021년 11월 20일 자정에 동해상에 위치했던 저기압이 오후츠크해로 이동하고, 중국과 몽골에 존재했던 고기압이 사라지면서 동풍이 발생했다. 또한 21일 오전 6시에 서해와 동해에 형성된 저기압과 일본에 위치한 고기압으로 인해 동풍이 발생하였다. 따라서, 2021년 사례인 Episode IV와 Episode V의 동풍~북동풍 비율은 약 34%, 48%로 산출되었으며, 2018, 2019년 고농도 사례 시 발생한 동풍~북동풍의 비율(14~29%)보다 높았다.

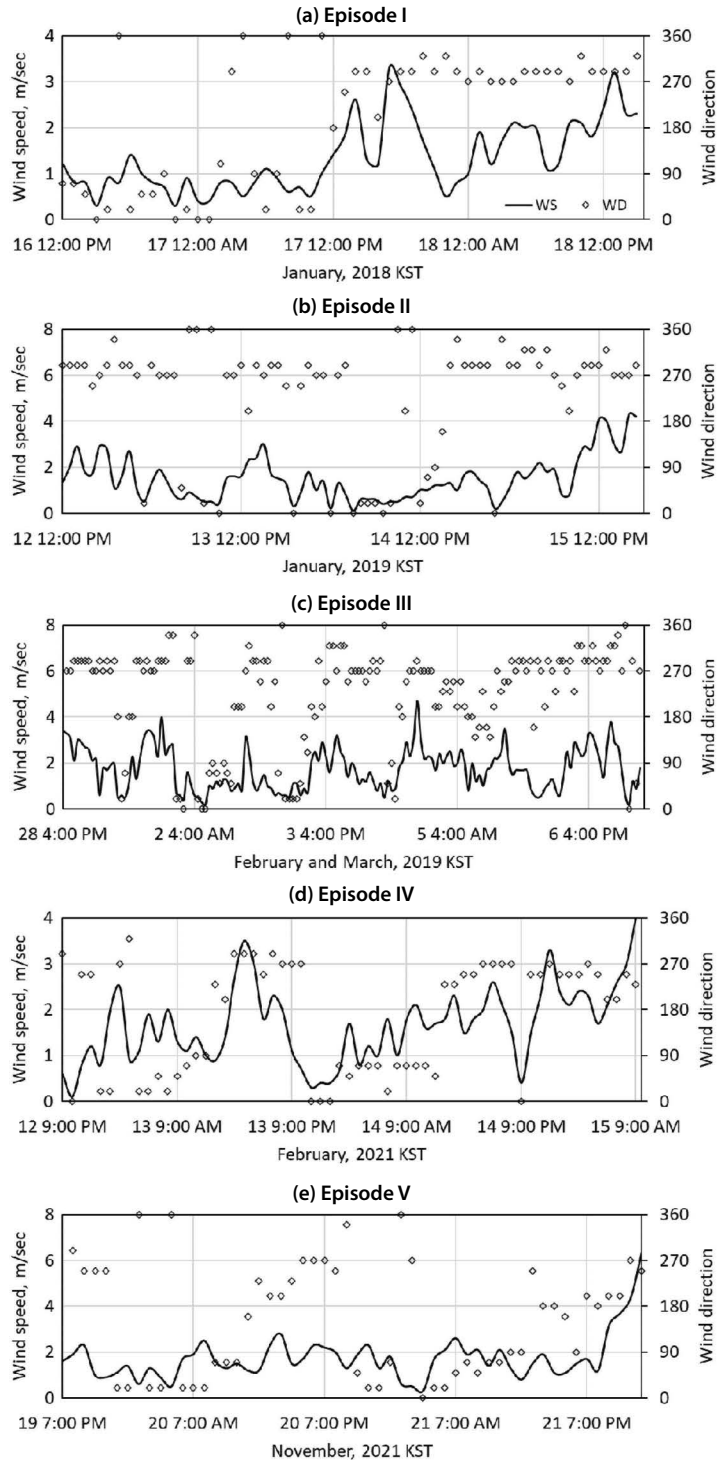


Fig. 2. Time series of wind speed and wind direction during the five multi-day PM_{2.5} episodes in Seoul. 'WS' and 'WD' denote wind speed and wind direction, respectively.

Table 2. Average temperature, relative humidity, and wind speed during the five multi-day PM_{2.5} episodes in Seoul.

	Temperature (°C)	Relative humidity (%)	Wind speed (m/sec)
Episode I	4.1	63.7	1.3
Episode II	1.5	59.4	1.5
Episode III	8.2	47.7	1.8
Episode IV	7.9	53.9	1.7
Episode V	10.6	77.4	1.8

모든 다중일 PM_{2.5} 고농도 사례 기간 동안 풍속은 대부분 1~3 m/sec 범위로 나타났으며, 표 2에 기술되었듯이 평균 풍속은 모든 사례에서 2 m/sec 이하로 나타났다. 그리고 평균 기온은 1.5~10.6°C로 낮았고, 상대 습도는 48~77%의 범위를 보였다.

그림 2는 5개 다중일 고농도 사례 기간에서의 풍속, 풍향의 시간별 변화를 나타내고 있다. 2018년 1월 사례인 Episode I에서는 1월 16일 오후 12시부터 17일 오전 11시까지 0.3~1.4 m/sec 범위의 느린 북풍~동풍이 주로 불었으며, 17일 오후 12시부터 풍속 1 m/sec 이상의 북서풍이 발생하였다. 2019년 1월 사례인 Episode II에서는 1월 12일 오후 12시~13일 오전 3시, 13일 오전 10시~14일 오전 2시, 14일 오후 4시~15일 오후 5시까지 평균 풍속 1.8 m/sec의 서풍~북서풍이 불었고, 13일 오전 4시~13일 오전 9시, 14일 오전 3시~14일 오후 3시까지 평균 풍속 0.7 m/sec의 느린 북풍이 불었다. 즉, 고농도 사례에서 풍속이 느릴 때, 주로 북풍~동풍 계열 바람이 발생했고, 풍속이 빨라질 때, 서풍 계열 바람이 발생했으며, 2019년 2~3월 사례인 Episode III과 2021년 2월과 11월 사례인 Episode IV, Episode V에서도 이와 유사하게 풍속과 풍향 간의 상관성이 나타났다. 특히 풍속이 빠를 때, 서풍 계열 바람이 발생하는 것은 Jee *et al.* (2022a)의 결과와 일치한다.

3.3 PM_{2.5} 화학 성분 특징

3.3.1 시간별 농도 변화

그림 3은 다중일 PM_{2.5} 고농도 사례가 발생한 달에 불광동 대기환경연구소에서 측정된 PM_{2.5} 질량 농도와 PM_{2.5} 화학 성분 농도의 시간별 변화를 보여주고

있다. Episode I, Episode III, Episode IV, Episode V 기간 동안 질산염, OM, 암모늄염, 황산염 순으로 높은 농도를 보였으며, Episode II 기간에는 질산염, OM, 황산염, 암모늄염 순으로 높은 농도를 보였다. 모든 고농도 사례에서 EC와 미량원소성분 농도의 변화는 미미하였다. 특히 공통적으로 고농도 기간의 PM_{2.5} 농도와 질산염 농도의 시간별 거동이 유사하였다.

고농도 사례가 발생한 달을 대상으로, PM_{2.5}와 주 화학 성분들(황산염, 질산염, 암모늄염, OM) 간의 R² 값을 계산하였는데(그림 3), 암모늄염의 R² 값이 0.95 이상으로 가장 높았고, 질산염 또한 0.93~0.96 사이의 R² 값을 보여 PM_{2.5}와의 상관성이 높음을 보였다. 3.3.2절에 기술한 바와 같이, 암모늄염과 평형을 이루는 암모니아(NH₃) 가스는 과잉 상태로 존재하므로, 질산염의 높은 R² 값이 암모늄염의 높은 R² 값을 초래하였다. PM_{2.5}와 황산염은 질산염과 암모늄염보다 낮은 0.8~0.87의 R² 값을 보였으며, OM은 황산염보다 낮은 0.63~0.87 사이의 R² 값을 보였다. 따라서, 서울에서 발생한 다중일 PM_{2.5} 고농도 사례의 주원인 물질은 질산염으로 판단된다.

3.3.2 입자상 조성

그림 4에 5개 다중일 PM_{2.5} 고농도 사례 및 저농도 사례 기간 동안의 PM_{2.5} 화학 성분 간의 질량 비율을 나타내었다. 모든 고농도 사례에서 SIA (Secondary Inorganic Aerosol) 화학종(질산염, 암모늄염, 황산염) 비율의 합은 70% 이상이었고, 그중에서 질산염이 33~45%로 가장 높은 비율을 차지하였다. OM은 20% 내외의 비율을 보였고, 암모늄염은 17~19%, 황산염은 12~19%의 질량 비율을 차지하였다. 반면, 저농도 사

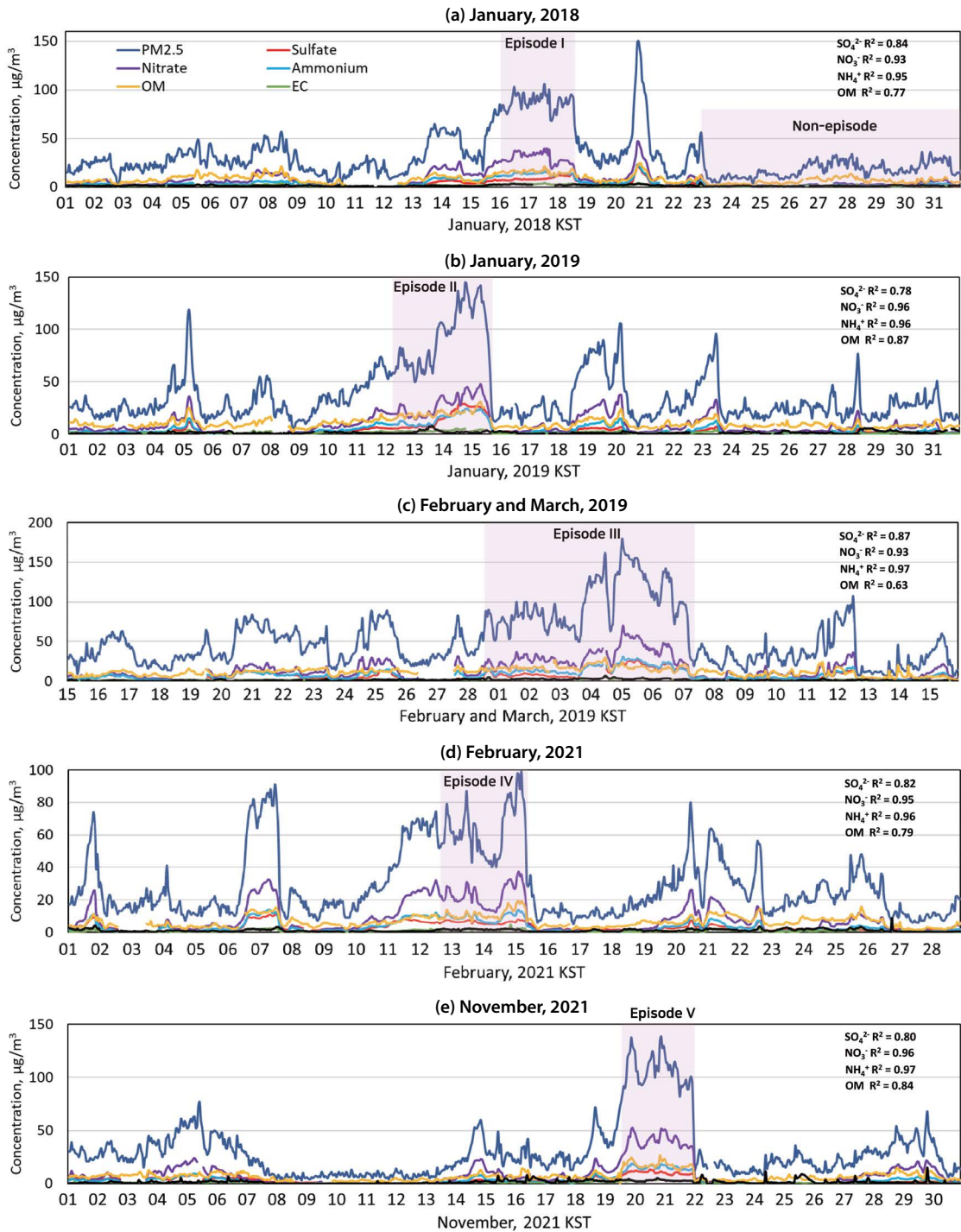


Fig. 3. Temporal variations of concentrations of PM_{2.5} and PM_{2.5} chemical compositions in the SU site. The purple shade means the multi-day PM_{2.5} episode periods.

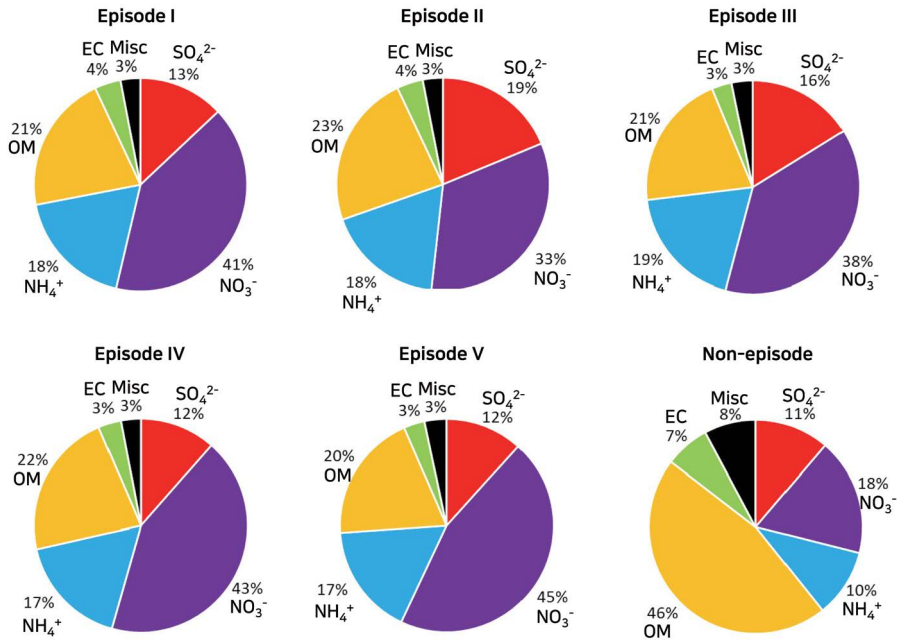


Fig. 4. Percentages of PM_{2.5} chemical compositions in the SU site during the five multi-day PM_{2.5} episodes and non-episode.

Table 3. Nitrate to sulfate molar ratio, ammonium to sulfate molar ratio, and DSN in the SU site during the five multi-day PM_{2.5} episodes and non-episode.

	$[\text{NO}_3^-]/[\text{SO}_4^{2-}]$	$[\text{NH}_4^+]/[\text{SO}_4^{2-}]$	$([\text{NH}_4^+]-[\text{NO}_3^-])/[\text{SO}_4^{2-}]$
Episode I	4.9	7.5	2.7
Episode II	2.7	5.1	2.4
Episode III	3.6	6.2	2.6
Episode IV	5.8	7.9	2.1
Episode V	6.0	7.7	1.7
Non-episode	2.4	4.9	2.5

레 기간 동안 질산염의 비율은 18%로 감소했으며, OM의 질량 비율이 고농도 사례의 경우보다 약 2배 높은 46%로 증가하였다. 이는 그림 3의 결과와 마찬가지로 질산염이 PM_{2.5} 고농도 사례의 주된 원인 물질임을 시사하며, 동북아시아 지역을 대상으로 한 PM_{2.5} 관측 연구 결과와 일치한다(Nirmalkar *et al.*, 2023; Wang *et al.*, 2022; Kang *et al.*, 2004).

표 3에 기술된 다중일 PM_{2.5} 고농도 사례 기간 동안의 $[\text{NO}_3^-]/[\text{SO}_4^{2-}]$ 와 $[\text{NH}_4^+]/[\text{SO}_4^{2-}]$ 를 살펴보면, 고농도 사례 기간 동안 $[\text{NO}_3^-]/[\text{SO}_4^{2-}]$ 는 2.7~6.0의 범

위를 보였다. Episode II는 황산염 비중이 상대적으로 높았기에 낮은 $[\text{NO}_3^-]/[\text{SO}_4^{2-}]$ 값이 산출되었으나 Episode I, Episode III, Episode IV, Episode V에서는 $[\text{NO}_3^-]/[\text{SO}_4^{2-}]$ 값이 저농도 사례의 경우와 비교하였을 때 1.5~2.5배 더 높았다. 특히 2021년 사례인 Episode IV와 Episode V의 $[\text{NO}_3^-]/[\text{SO}_4^{2-}]$ 값은 6에 가까웠다.

다중일 PM_{2.5} 고농도 사례 기간의 $[\text{NH}_4^+]/[\text{SO}_4^{2-}]$ 은 5.1~7.9 범위의 값을 보였다. 이는 암모니아 과잉 조건인 2(Tao *et al.*, 2016)를 크게 넘어선 값이며, 대

기 중 암모니아가 황산염과 질산(HNO₃)을 중화(neutralization)하여 황산암모늄((NH₄)₂SO₄)과 질산암모늄(NH₄NO₃)을 생성하는 데 충분히 존재하고 있음을 의미한다(Squizzato *et al.*, 2013; Ye *et al.*, 2011). 또한 저농도 사례의 [NH₄⁺]/[SO₄²⁻] 값은 황산염 중화에 필요한 몰 비인 2보다 약 2.5배 높은 4.9로 산출되었다. 고농도 및 저농도 사례에서의 DSN (([NH₄⁺]-[NO₃⁻])/[SO₄²⁻]) 값은 1.7~2.7로 산출되었다. DSN이 2일 때, 황산염을 모두 중화할 수 있는 충분한 암모늄염이 대기 중에 존재하는 것으로 판단한다. 우리나라는 암모니아 과잉 지역에 해당되고(Sung *et al.*, 2020), 대부분 다중일 고농도 사례 및 저농도 사례에서 DSN 값이 2를 초과하였기 때문에, 산성 성분인 황산염과 질산 가스를 중화하는 데 충분한 암모니아가 공급이 되었던 것으로 판단된다.

3.3.3. SOR과 NOR

표 4에 5개 다중일 PM_{2.5} 고농도 사례 및 저농도 사례에서의 SOR과 NOR의 평균값과 표준편차를 나타내었다. SOR과 NOR은 1차 대기오염물질인 SO₂와 NO₂가 화학반응을 통해 산화되어 각각 2차 대기오염물질인 황산염과 질산염으로 전환되는 비율을 나타내는 인자이다. 겨울철 NOR과 SOR 값은 0.1 이하로 알려졌다(Jiang *et al.*, 2019; Park *et al.*, 2018; Ohta and Okita, 1990). 그리고 SOR과 NOR이 크면 2차 대기오염물질인 황산염과 질산염으로의 전환이 활발하였음을 의미한다. 본 연구에서 고농도 사례에서의 SOR과 NOR 값은 저농도 사례의 SOR, NOR 값보다 약 4~

9배 높았으며, 이는 황산염과 질산염이 고농도 사례 시 전구물질에 비하여 높은 비율로 존재했음을 의미한다.

4. 중장거리 이동 영향 평가

고농도 사례 기간 중에 PM_{2.5}는 2차 PM_{2.5}인 SIA가 주 성분이다. SIA는 중장거리 이동의 영향을 많이 받는 2차 대기오염물질이며, 광역(regional) 대기오염물질이다. 본 절에서는 시계열 분석, 발산계수, NOR과 온도 간의 상관관계를 사용하여 중장거리 이동 영향을 평가하였다.

4.1 시계열 분석에 의한 중장거리 이동 영향 평가

백령도는 국내 서북단에 위치해 있으며, PM_{2.5}의 중장거리 이동을 모니터링하기 위한 배경 지역 중 하나이다. 백령도는 서울을 비롯한 수도권 지역의 풍상 방향에 위치하기 때문에, 수도권 PM_{2.5} 고농도 사례에 관하여 중장거리 이동 규명에 중요한 역할을 하고 있다. 본 절에서는 그림 5와 같이 백령도와 서울에서 발생한 PM_{2.5} 고농도 기간의 시간별 거동을 통해 다중일 고농도 사례에서의 PM_{2.5} 중장거리 이동 여부를 평가하였다.

그림 5는 5개 다중일 PM_{2.5} 고농도 사례가 발생한 시기에 불광동과 백령도 대기환경연구소에서 측정된 PM_{2.5} 농도의 시간별 변화를 보여주고 있다. 그림 5-(a), 5-(c), 5-(d), 5-(e)와 같이 백령도의 PM_{2.5} 고농도 현상은 불광동보다 몇 시간 앞서 발생하였다. 예를 들어, 그림 5-(a)에 나타났듯이 Episode I이 발생한 2018년 1월에 불광동의 PM_{2.5} 농도는 1월 15일 오후 7시에 75 µg/m³를 초과했으나, 백령도의 PM_{2.5} 농도는 14시간 전인 1월 15일 오전 5시에 75 µg/m³를 초과하였다. 이를 고려하여 표 5에 백령도에서 발생한 PM_{2.5} 고농도 사례 기간, 기간 평균 PM_{2.5} 농도, 최대 PM_{2.5} 농도, 백령도와 불광동 PM_{2.5} 농도 사이에 나타난 시차(time lag)를 정리하였다. 여기서 시차는 불광동 대기환경연구소에서 PM_{2.5}의 농도가 75 µg/m³를 초과한

Table 4. SOR and NOR values estimated for the SU site during the five multi-day PM_{2.5} episodes.

	SOR	NOR
Episode I	0.30*±0.07**	0.13±0.02
Episode II	0.35±0.13	0.19±0.06
Episode III	0.32±0.11	0.23±0.08
Episode IV	0.53±0.16	0.18±0.06
Episode V	0.55±0.14	0.27±0.05
Non-episode	0.07±0.03	0.03±0.02

*: average, **: standard deviation

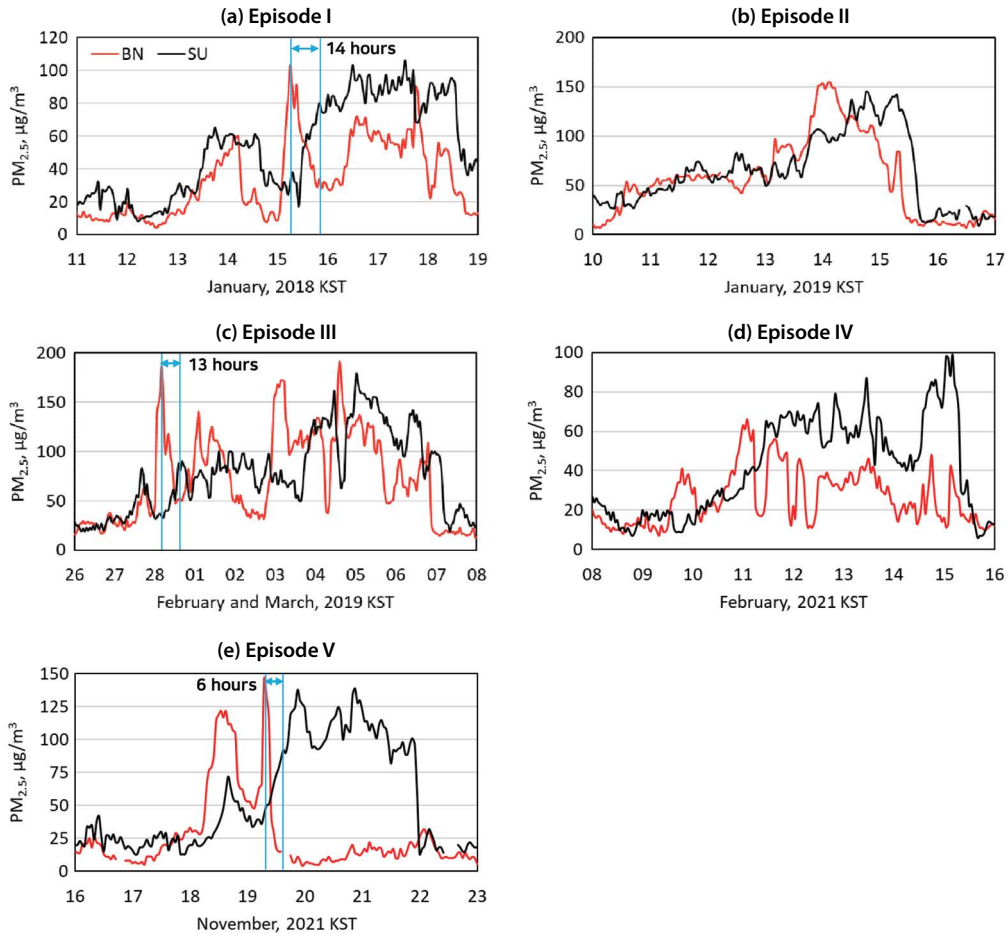


Fig. 5. Temporal variations of $PM_{2.5}$ mass concentrations in the BN and SU sites during the five multi-day $PM_{2.5}$ episodes. The blue lines mean the time lag between the peak $PM_{2.5}$ concentration in the BN site and $PM_{2.5}$ concentration over $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ in the SU site.

시각과 백령도에서 해당 사례와 관련하여 농도 피크 (peak)가 관찰된 시각과의 차이이다. 백령도의 $PM_{2.5}$ 고농도 사례 기간 선정은 $PM_{2.5}$ 주의보 발령 기준에 맞추어 백령도 대기환경연구소에서 측정된 $PM_{2.5}$ 농도가 $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상 2시간 연속 지속되었을 때를 기준으로 하였다. 단, 2021년 2월 사례의 경우, 백령도의 $PM_{2.5}$ 농도 최고치가 $66 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 다소 낮았기 때문에, $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상으로 기준을 낮추어 고농도 사례 기간을 선정하였다. 백령도 지역 $PM_{2.5}$ 저농도 사례 기간은 서울의 저농도 사례와 동일하게 선정하였다.

백령도 $PM_{2.5}$ 고농도 사례인 Episode II-B, Episode III-B, Episode V-B에서 $PM_{2.5}$ 기간 평균 농도는 $87 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 초과하였다. 또한 Episode IV-B를 제외한 $PM_{2.5}$ 고농도 사례에서 $PM_{2.5}$ 농도의 최대치는 $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 초과하였다. 백령도에는 고정 배출원이 없기 때문에, 백령도에서 발생한 $PM_{2.5}$ 고농도 사례는 대부분 국외 유입으로 인한 것이다. 백령도로 유입된 $PM_{2.5}$ 는 서풍을 타고 수도권으로 유입될 수 있는데, 이때 두 지역 간의 거리로 인해 몇 시간의 간격을 두고 $PM_{2.5}$ 농도 피크가 관측된다. 그림 6과 같이 24시

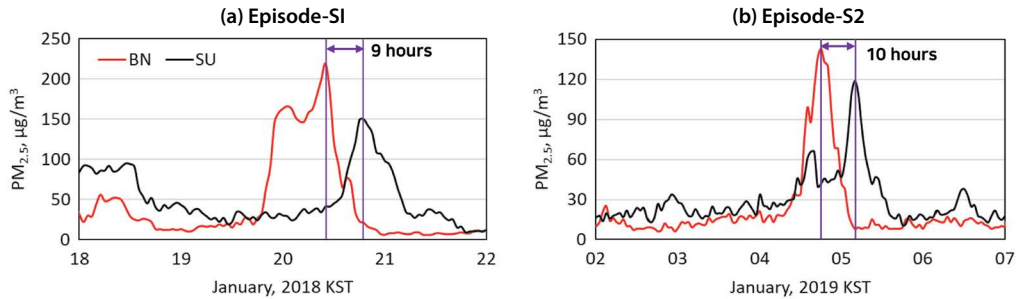


Fig. 6. Temporal variations of PM_{2.5} mass concentrations in the BN and SU sites during the two short-term PM_{2.5} episodes. The purple lines mean a time lag between the peak PM_{2.5} concentrations in the BN and SU sites.

Table 5. Periods, average PM_{2.5} concentration, peak PM_{2.5} concentration of PM_{2.5} episodes in the BN site, and the time lag between the peak PM_{2.5} concentration in the BN site and PM_{2.5} concentration over 75 µg/m³ in the SU site.

	Period	Average PM _{2.5} concentration (µg/m ³)	Peak PM _{2.5} concentration (µg/m ³)	Time lag
Episode I-B	2018-01-15 05:00~2018-01-15 17:00	67.2	103	14 hours
Episode II-B	2019-01-13 4:00~2019-01-15 9:00	103.6	155	None
Episode III-B	2019-02-28 1:00~2019-03-06 20:00	94.8	191	13 hours
Episode IV-B	2021-02-11 2:00~2021-02-15 4:00	31.4	66	None
Episode V-B	2021-11-18 8:00~2021-11-19 10:00	87.0	146	6 hours
Non-episode	2018-01-23 01:00~2018-01-31 23:00	10.7	31	None

간 이하의 단기 고농도 사례(Episode-S1, Episode-S2)에서 백령도와 불광동의 PM_{2.5} 농도 피크는 9~10시간 간격을 두고 나타났으며, 백령도에서 먼저 농도 피크가 발생하고, 그 농도가 감소하면서 불광동의 PM_{2.5} 농도가 올라가는 현상이 관찰되었다. 그리고 두 지역의 PM_{2.5} 농도의 증감 추세가 10시간 내외의 간격을 두고 유사하게 나타났는데, 이는 백령도를 통해 서울로 향한 PM_{2.5} 증장거리 이동을 암시한다.

그러나 다중일 고농도 사례의 경우, 두 지역 간 농도 피크가 명확하게 나타나지 않았기 때문에, 위에 언급되었듯이 본 연구에서는 시차를 두 지역에서 농도 피크가 나타난 시각의 차이로 정의하지 않았다. 본 연구에서 시차를 정의한 것을 토대로 그림 5와 표 5에 두 지역 간 PM_{2.5} 농도 사이의 시차를 표현하였는데, Episode II와 Episode IV는 본 연구에서 정의한 시차에 부합되는 구간이 없었기 때문에 제외하였다. Episode I, Episode III, Episode V에서 두 지역 사이에 각

각 14, 13, 6시간의 시차가 나타났다. 또한 해당 다중일 고농도 사례에서 단기 고농도 사례와 유사한 두 지역 사이의 PM_{2.5} 증감 추세가 나타났다. 따라서, 시차만으로 판단하였을 때, Episode I, Episode III, Episode V에서 백령도를 거쳐 서울로 이동한 PM_{2.5} 증장거리 이동이 발생했을 것으로 추정된다.

4.2 발산계수를 이용한 증장거리 이동 판단

표 6에 백령도와 서울 PM_{2.5} 고농도 사례 간의 발산계수(CD) 값을 나타내었다. CD 계산에 고려된 백령도 PM_{2.5} 고농도 사례의 기간은 표 5와 같다. CD 값은 0에 가까울수록 두 지역 간의 일치도가 높고, 1에 가까울수록 두 지역 간의 일치도가 낮다고 평가된다. 일치도가 높을수록 두 지역의 PM_{2.5} 화학 성분 구성의 유사성이 높아지기 때문에(Niu *et al.*, 2016), 백령도와 서울에서 발생한 고농도 사례에서의 일치도가 높을수록 백령도를 거쳐 서울로 유입된 PM_{2.5} 증장거리 이

Table 6. Coefficient of divergence between the SU and BN sites during the five multi-day PM_{2.5} episodes in Baengnyeong and Seoul.

	CD
Episode I	0.16
Episode II	0.15
Episode III	0.19
Episode IV	0.47
Episode V	0.20
Non-episode	0.34

동이 발생했다고 판단할 수 있다.

두 지역 간의 일치도는 Episode I, Episode II, Episode III, Episode V에서 높았고, Episode IV에서는 낮았다. 4.1절에 서술했듯이 백령도에는 고정 배출원이 존재하지 않기 때문에 북서풍의 영향이 강했던 Episode I, Episode II, Episode III의 경우, 국외에서 유입된 PM_{2.5}가 백령도를 거쳐 서울로 중장거리 이동을 했을 것으로 추정된다. Episode V에서도 두 지역 사이의 높은 일치도가 산출되었다. 4.1절의 결과와 Episode V의 기간을 고려하면, Episode V의 경우, 서울에서 고농도 사례가 시작되기 수 시간 전에 PM_{2.5} 중장거리 이동이 발생했을 것으로 추정된다.

Episode IV-B 기간 동안 백령도 지역에 PM_{2.5} 농도 피크가 발생했음에도 PM_{2.5} 평균 농도, 최대 농도가 다른 고농도 사례에 비해 현저히 낮았다(표 5). 이는 Episode IV-B 기간에 타 고농도 사례에 비해 적은 양의 PM_{2.5}가 백령도로 유입되었음을 시사한다. 이로 인해 Episode IV의 CD 값이 저농도 사례일 때보다 0.13 더 높게 산출되어 두 지역 간 일치도는 매우 낮았다. 3.2절에 기술했듯이, Episode IV는 북서풍이 아닌 서풍~남서풍의 영향을 받은 고농도 사례이다. 따라서, 바람 방향으로 인해 서해안 등 풍상 방향에서 이동해 온 오염물질이 남서 방향을 따라 수도권으로 유입되었을 것으로 추정되며, 백령도를 통해서 수도권으로 유입된 양은 적었을 것으로 추정된다.

4.3 NOR에 의한 중장거리 이동 영향 평가

NOR은 화학반응 및 평형상수 값에 영향을 받는다.

Table 7. Correlation coefficients between NOR and temperature in Seoul.

	NOR-temperature
Episode I	0.20
Episode II	0.18
Episode III	0.29
Episode IV	0.26
Episode V	-0.17
Non-episode	0.58

질산염은 암모니아 gas와 질산 gas 사이의 열역학적 평형 관계에 의해 생성된다. 질산 gas는 주간과 야간에 각각 NO₂ + OH 반응, 비균질 N₂O₅ 액상 반응을 통해 주로 생성된다(Seinfeld and Pandis, 2006). 야간에 질산염을 생성하는 N₂O₅는 온도가 낮아질수록 NO₂ + NO₃와의 평형농도가 증가하고 질산염은 낮은 온도에서 입자상으로 존재하므로(Chang *et al.*, 2011), NOR은 온도와 음의 상관관계를 가진다. 표 7과 같이 NOR은 Episode V를 제외한 고농도 사례에서 음의 상관관계가 아닌 양의 상관관계를 보였다. 이는 Kim *et al.* (2018)의 결과와 같이, 질산염은 중장거리 이동 영향이 지대하여 국지적 생성이 무시할 만큼 작았기 때문으로 추정한다.

5. 요약

본 연구에서는 2015년 1월부터 2021년 12월 사이에 서울에서 발생한 다중일 PM_{2.5} 고농도 사례에 대해 서울 불광동 대기환경연구소 자료를 활용하여 그 특징을 조사하였다. 2018년 1월, 2019년 1월, 2019년 2~3월에 발생한 Episode I, Episode II, Episode III은 서풍~북서풍이, 2021년 2월 사례인 Episode IV는 서풍~남서풍이, 2021년 11월에 발생한 Episode V는 동풍~북동풍이 주로 불었다. PM_{2.5} 화학 성분 중에서 질산염의 비율이 다중일 PM_{2.5} 고농도 사례 동안 가장 높았고, 높은 SOR과 NOR 값은 황산염과 질산염이 고농도 사례 시 전구물질에 비하여 높은 비율로 존재함을 의미했다.

서울에서 다중일 PM_{2.5} 고농도 사례 (Episode I, Episode III, Episode V)가 발생하기 수 시간 전, 백령도에 서 PM_{2.5} 고농도 사례가 발생하였는데, 백령도의 PM_{2.5} 농도 피크와 불광동에서 75 µg/m³를 초과한 PM_{2.5} 농도 사이에 시차가 발생하여 PM_{2.5} 증장거리 이동을 암시하였다. 발산계수인 CD를 사용하여 백령도와 서울 사이의 PM_{2.5} 증장거리 이동 여부를 평가하였을 때, 북서풍의 영향이 강했던 Episode I, Episode II, Episode III에서 두 지역 간 PM_{2.5} 조성의 높은 일치도가 산출되어 오염물질이 백령도를 거쳐 서울로 이동하였음을 추정하였다. 또한 NOR과 온도 사이의 양의 상관관계는 질산염의 증장거리 이동을 시사하였다. 따라서, 본 연구의 대상인 다중일 PM_{2.5} 고농도 사례의 질산염 농도 증가는 주로 증장거리 이동으로 인한 것으로 판단되며, 향후 연구에서 대기질 모델을 사용하여 PM_{2.5} 고농도 기간을 대상으로 한 질산염 생성과 증장거리 이동에 대해 규명할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 환경부의 재원으로 국립환경과학원의 지원을 받아 수행하였습니다 (NIER-2021-03-03-007, NIER-2023-01-02-112).

References

- Chang, W.L., Bhawe, P.V., Brown, S.S., Riemer, N., Stutz, J., Dabdub, D. (2011) Heterogeneous atmospheric chemistry, ambient measurements, and model calculations of N₂O₅: A review, *Aerosol Science and Technology*, 45(6), 665-695. <https://doi.org/10.1080/02786826.2010.551672>
- Cho, S., Park, H., Son, J., Chang, L. (2021a) Development of the Global to Mesoscale Air Quality Forecast and Analysis System (GMAF) and Its Application to PM_{2.5} Forecast in Korea, *Atmosphere*, 12(3), 411. <https://doi.org/10.3390/atmos12030411>
- Cho, S.-B., Song, S.-K., Moon, S.-H. (2021b) Effect of Analysis Nudging Data Assimilation on the PM_{2.5} Concentration Simulation during a Haze Event in the Seoul Metropolitan Area in 2019, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 37(2), 231-247, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2021.37.2.231>
- Choi, J.-K., Heo, J.-B., Ban, S.-J., Yi, S.-M., Zoh, K.-D. (2012) Chemical characteristics of PM_{2.5} aerosol in Incheon, Korea, *Atmospheric Environment*, 60, 583-592. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.06.078>
- Jee, J.-B., Cho, C.-R., Kim, Y.-J., Park, S.-S. (2022a) Analysis of Meteorological Characteristics by Fine Dust Classification on the Korean Peninsula, 2015-2021, *Atmosphere, Korean Meteorological Society*, 32(2), 119-133, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.14191/Atmos.2022.32.2.119>
- Jee, J.-B., Cho, C.-R., Kim, S.-H., Song, M. (2022b) An Analysis of Meteorological Characteristics for Fine Particles on the Korean Peninsula during Wintertime, 2015-2021, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 38(3), 394-413, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2022.38.3.394>
- Jiang, F., Liu, F., Lin, Q., Fu, Y., Yang, Y., Peng, L., Lian, X., Zhang, G., Bi, X., Wang, X., Sheng, G. (2019) Characteristics and formation mechanisms of sulfate and nitrate in size-segregated atmospheric particles from urban Guangzhou, China, *Aerosol and Air Quality Research*, 19(6), 1284-1293. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2018.07.0251>
- Jo, H.-Y., Lee, H.-J., Jo, Y.-J., Heo, G., Lee, M., Kim, J.-A., Park, M.-S., Lee, T., Kim, S.-W., Lee, Y.-H., Kim, C.-H. (2022) A case study of heavy PM_{2.5} secondary formation by N₂O₅ nocturnal chemistry in Seoul, Korea in January 2018: Model performance and error analysis, *Atmospheric Research*, 266, 105951. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2021.105951>
- Kang, C.-M., Lee, H.-S., Kang, B.-W., Lee, S.-K., Sunwoo, Y. (2004) Chemical characteristics of acidic gas pollutants and PM_{2.5} species during hazy episodes in Seoul, South Korea, *Atmospheric Environment*, 38(28), 4749-4760. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2004.05.007>
- Kim, Y., Seo, J., Kim, J.-Y., Lee, J.-Y., Kim, H., Kim, B.-M. (2018) Characterization of PM_{2.5} and identification of transported secondary and biomass burning contribution in Seoul, Korea, *Environmental Science and Pollution Research*, 25, 4330-4343. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-0772-x>
- Lee, D., Choi, J.-Y., Myoung, J., Kim, O., Park, J., Shin, H.-J., Ban, S.-J., Park, H.-J., Nam, K.-P. (2019) Analysis of a severe PM_{2.5}

- episode in the Seoul Metropolitan area in South Korea from 27 February to 7 March 2019: Focused on estimation of domestic and foreign contribution, *Atmosphere*, 10(12), 756. <https://doi.org/10.3390/atmos10120756>
- Lim, J., Park, H., Cho, S. (2022) Evaluation of the ammonia emission sensitivity of secondary inorganic aerosol concentrations measured by the national reference method, *Atmospheric Environment*, 270, 118903. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2021.118903>
- National Institute for Environmental Research (NIER) (2012) 2011 Annual Report of Air Quality in Korea. https://www.airkorea.or.kr/web/detailViewDown?pMENU_NO=125
- National Institute for Environmental Research (NIER) (2022a) 2021 Annual Report of Intensive Air Quality Monitoring Station. <https://library.me.go.kr/#/search/detail/5880599>
- National Institute for Environmental Research (NIER) (2022b) 2021 Annual Report of Air Quality in Korea. https://www.airkorea.or.kr/web/detailViewDown?pMENU_NO=125
- Niu, X., Cao, J., Shen, Z., Ho, S.S.H., Tie, X., Zhao, S., Xu, H., Zhang, T., Huang, R. (2016) PM_{2.5} from the Guanzhong Plain: Chemical composition and implications for emission reductions, *Atmospheric Environment*, 147, 458-469. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.10.029>
- Nirmalkar, J., Jung, J., Han, S., Dong, Z., Xu, Z., Fu, P., Pavulari, C.M. (2023) Chemistry of PM_{2.5} in haze events in two East Asian cities during winter-spring 2019, *Atmospheric Environment*, 293, 119457. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2022.119457>
- Oh, H.-R., Ho, C.-H., Koo, Y.-S., Baek, K.-G., Yun, H.-Y., Hur, S.-K., Choi, D.-R., Jhun, J.-G., Shim, J.-S. (2020) Impact of Chinese air pollutants on a record-breaking PMs episode in the Republic of Korea for 11-15 January 2019, *Atmospheric Environment*, 223, 117262. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117262>
- Ohta, S., Okita, T. (1990) A chemical characterization of atmospheric aerosol in Sapporo, *Atmospheric Environment. Part A. General Topics*, 24(4), 815-822, [https://doi.org/10.1016/0960-1686\(90\)90282-R](https://doi.org/10.1016/0960-1686(90)90282-R)
- Park, E.-H., Heo, J., Kim, H., Yi, S.-M. (2020) Long term trends of chemical constituents and source contributions of PM_{2.5} in Seoul, *Chemosphere*, 251, 126371. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126371>
- Park, H.-Y., Hong, S.-C., Lee, J.-B., Cho, S.-Y. (2023) Modeling of Organic Aerosol in Seoul Using CMAQ with AERO7, *Atmosphere*, 14(5), 874. <https://doi.org/10.3390/atmos14050874>
- Park, J., Choi, J., Kim, H., Oh, J., Seong, M., Ahn, J., Lee, S., Kim, J. (2018) A Study on the Characteristics of PM_{1.0} Chemical Components Using a Real-time Aerosol Mass Spectrometer, *Journal of the Korean Society of Urban Environment*, 18(4), 485-494, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.33768/ksue.2018.18.4.485>
- Park, S.-S., Jung, S.-A., Gong, B.-J., Cho, S.-Y., Lee, S.-J. (2013) Characteristics of PM_{2.5} Haze Episodes Revealed by Highly Time-Resolved Measurements at an Air Pollution Monitoring Supersite in Korea, *Aerosol and Air Quality Research*, 13(3), 957-976. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2012.07.0184>
- Seinfeld, J.H., Pandis, S.N. (2006) *Atmospheric Chemistry and physics*, 2nd. ed, John Wiley, U.S., pp. 224-226.
- Shim, K., Kim, M.-H., Lee, H.-J., Nishizawa, T., Shimizu, A., Kobayashi, H., Kim, C.-H., Kim, S.-W. (2022) Exacerbation of PM_{2.5} concentration due to unpredictable weak Asian dust storm: A case study of an extraordinarily long-lasting spring haze episode in Seoul, Korea, *Atmospheric Environment*, 287, 119261. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2022.119261>
- Son, S.-C., Yu, G.-H., Park, S., Lee, S. (2021) Comprehensive characterization of PM_{2.5} using chemical, optical, and spectroscopic methods during pollution episodes at an urban site in Gwangju, Korea, *Atmospheric Pollution Research*, 12(10), 101199. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2021.101199>
- Sung, M.-Y., Park, J.-S., Lim, J.-H., Park, H.-Y., Cho, S.-Y. (2020) A Long Term Trend of Gaseous and Particulate Acid/Base Species and Effects of Ammonia Reduction on Nitrate Contained in PM_{2.5}, 2009-2018, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 36(2), 249-261, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2020.36.2.249>
- Squizzato, S., Masiol, M., Brunelli, A., Pistollato, S., Tarabotti, E., Rampazzo, G., Pavoni, B. (2013) Factors determining the formation of secondary inorganic aerosol: a case study in the Po Valley (Italy), *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13(4), 1927-1939. <https://doi.org/10.5194/acp-13-1927-2013>
- Tao, Y., Ye, X., Ma, Z., Xie, Y., Wang, R., Chen, J., Yang, X., Jiang, S. (2016) Insights into different nitrate formation mechanisms from seasonal variations of secondary inorganic aerosols in Shanghai, *Atmospheric Environment*, 145, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.09.012>
- Turpin, B.J., Lim, H.-J. (2001) Species Contributions to PM_{2.5} Mass

- Concentrations: Revisiting Common Assumptions for Estimating Organic Mass, *Aerosol Science & Technology*, 35(1), 602-610. <https://doi.org/10.1080/02786820119445>
- Wang, J., Gao, J., Che, F., Wang, Y., Lin, P., Zhang, Y. (2022) Decade-long trends in chemical component properties of PM_{2.5} in Beijing, China (2011-2020), *Science of The Total Environment*, 832, 154664. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154664>
- Wongphatarakul, V., Friedlander, S.K., Pinto, J.P. (1998) A Comparative Study of PM_{2.5} Ambient Aerosol Chemical Databases, *Environmental Science & Technology*, 32(24), 3926-3934. <https://doi.org/10.1021/es9800582>
- Ye, X., Ma, Z., Zhang, J., Du, H., Chen, J., Chen, H., Yang, X., Gao, W., Geng, F. (2011) Important role of ammonia on haze formation in Shanghai, *Environmental Research Letters*, 6(2), 024019. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/6/2/024019>
- You, S., Bae, C., Kim, H., Yoo, C., Kim, S. (2020) Municipality-Level Source Apportionment of PM_{2.5} Concentrations based on the CAPSS 2016: (I) Gyeonggi Province, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 36(6), 785-805, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2020.36.6.785>

Authors Information

박현영 (인하대학교 환경공학과 박사과정) (hypark@inha.edu)

안준영 (국립환경과학원 기후대기연구부 대기환경연구과 연구관) (nierair@korea.kr)

박진수 (국립환경과학원 기후대기연구부 대기환경연구과 연구관) (airchemi@korea.kr)

조석연 (인하대학교 환경공학과 교수) (sycho@inha.ac.kr)