

논문

# 장기간 지속되는 초고농도 PM<sub>2.5</sub> 발생의 지역적 차이와 연관된 종관패턴: 중부권을 중심으로

## Synoptic Patterns Associated with Regional Differences in Long-term Episodes of Extremely High PM<sub>2.5</sub> Concentrations: A Focus on the Central Region of South Korea

현지민<sup>1)</sup>, 김맹기<sup>1),2),\*</sup>, 김정훈<sup>2),3)</sup>, 상 정<sup>1)</sup>, 이상현<sup>1),2)</sup>

<sup>1)</sup>공주대학교 미세먼지관리센터, <sup>2)</sup>공주대학교 대기과학과,  
<sup>3)</sup>공주대학교 지구환경연구소

Jimin Hyun<sup>1)</sup>, Maeng-Ki Kim<sup>1),2),\*</sup>, Jeong-Hun Kim<sup>2),3)</sup>,  
Jeong Sang<sup>1)</sup>, Sang-Hyun Lee<sup>1),2)</sup>

<sup>1)</sup>Particle Pollution Research and Management Center, Kongju National University, Gongju,  
Republic of Korea

<sup>2)</sup>Department of Atmospheric Sciences, Kongju National University, Gongju, Republic of Korea

<sup>3)</sup>Earth Environment Research Center, Kongju National University, Gongju, Republic of Korea

접수일 2024년 8월 5일  
수정일 2024년 9월 1일  
채택일 2024년 9월 2일

Received 5 August 2024  
Revised 1 September 2024  
Accepted 2 September 2024

\*Corresponding author  
Tel: +82-(0)41-850-8531  
E-mail: mkkim@kongju.ac.kr

**Abstract** To investigate the synoptic patterns and spatial differences associated with extremely high PM<sub>2.5</sub> concentrations (EH), five representative cases lasting more than three days were selected from the central region of South Korea. This study utilized air quality monitoring data from 36 stations, maintained from 2018 to 2022, to analyze EH cases. In this study, days with PM<sub>2.5</sub> concentrations above the 90<sup>th</sup> percentile were defined as EH days. The central region was divided into five clusters using the K-means clustering method. For the regional analysis of EH cases, a comprehensive analysis was conducted by considering various influencing factors such as planetary boundary height, 10 m wind direction, 10 m wind speed, PM<sub>2.5</sub> concentration, geographic location, and topographical characteristics. The five representative EH cases in the central region exhibited anticyclonic anomalies in the upper troposphere over the Korean Peninsula, resulting in a weakened ventilation effect. EH cases can be broadly categorized into three groups: cases of Inflow First Stagnation Later (IFSL), Stagnation First Accumulation Later (SFAL), Stagnation First Inflow Later (SFIL). IFSL cases were associated with migratory anticyclone, and under these synoptic patterns, regional differences of EH day occurred. Although both SFAL and SFIL cases were commonly associated with high pressure stagnation in East Asia and the Korean Peninsula, SFAL cases led to regional differences, while SFIL did not. These results emphasize that regional differences in PM<sub>2.5</sub> are caused by variations in the position and intensity of the lower-layer anticyclone due to the upper-layer anticyclone deviation.

**Key words:** K-means clustering, PM<sub>2.5</sub> concentration, Regional classification, Synoptic patterns, Central Region of South Korea

### 1. 서론

미세먼지 중에서도 PM<sub>2.5</sub> (공기 역학적 지름이 2.5 μm 이하인 입자상 물질)는 호흡기를 통해 폐 깊숙이 침투할 수 있으며, 심혈관 질환, 호흡기 질환을 유발하는 등 건강에 미치는 영향이 크다(Adar *et al.*, 2014;

Martinelli *et al.*, 2013; Brook *et al.*, 2003). 산업혁명 이래로 급격한 도시화는 전 세계적으로 대기오염 문제를 심화시켜왔으며, 특히 미세먼지로 인한 대기질 저하는 사회·경제적으로 중요한 문제 중 하나로 평가된다. 우리나라에서는 범부처 차원에서 지속적인 저감 정책의 노력으로 2000년대 이후 미세먼지 농도가 소

폭 감소하였으나, 2010년대 이후부터는 그 감소 추세가 다소 정체되고 고농도 미세먼지 사례의 빈도와 지속 기간은 오히려 증가하는 추세이다(KEI, 2019; Yeo *et al.*, 2019). 이러한 현상은 기후변화로 인한 대기 정체 증가가 환기 효과를 약화시키고 대기오염물질의 축적을 증가시킴으로써, 지속적인 배출량 저감 정책의 효과를 상쇄시킨다는 점에서 중요한 문제이다(KEI, 2019; Lee *et al.*, 2018). 따라서 지속적으로 대기질을 개선하기 위해서는 배출량의 저감뿐만 아니라 기상·기후 영향 등 다양한 과학적 측면을 고려하는 것이 중요하다.

우리나라에서는 2010년대 이후부터 기후변화와 대기오염의 관련성을 주목하기 시작하였다(Bae *et al.*, 2023). Lee *et al.* (2011)은 2001년부터 2008년까지 서울 지역의 고농도 미세먼지 사례를 분석하였으며, 한반도 상층의 고기압성 편차가 지역 배출량의 축적에 중요한 역할을 하고, 외부 발원지의 저기압성 편차가 동반될 경우에는 외부 오염물질의 유입과도 관련이 있음을 분석하였다. Ghim *et al.* (2019)은 2013년부터 2016년까지의 기간 동안 전국 규모의 PM<sub>2.5</sub> 고농도 사례에서 종관기상에 의한 장거리 유입의 영향을 분석하였다. Kim *et al.* (2024, 2021a)은 북극 카라-바렌츠해 또는 북대서양 기원의 상대와도 강제력에 의해 단 4일 이내에 초고농도 미세먼지 오염을 유발할 수 있는 대기 순환 패턴이 한반도 상공에 형성됨을 확인하였다. 미세먼지 농도는 대규모 대기 순환 패턴, 북극 해빙, 기후 지수와 관련이 있고(Jeong *et al.*, 2021; Ku *et al.*, 2021; Lee and Kim, 2021; Kim *et al.*, 2019), 종관 패턴과도 관련이 있으며(Lee *et al.*, 2024; Jee *et al.*, 2022; Ghim *et al.*, 2019; Kim *et al.*, 2016), 이러한 기상 및 기후학적 접근 방법을 이용한 연구는 주로 한반도와 수도권을 중심으로 수행되어왔다.

한편, 우리나라 정부에서는 2020년 4월 3일부터 ‘대기관리권역의 대기환경개선에 관한 특별법’을 시행하여 대기관리권역을 수도권 외 중부권, 남부권, 동남권으로 확대하며, 지역별 맞춤형 진단의 필요성을 증가시켰다(Gong *et al.*, 2021). 이에 따라 지자체의 특

과 실태에 맞는 대기 환경 개선을 위해 지역 간 지형적 특성, 기상 상황, 배출원 영향 등 여러 요인을 종합적으로 고려한 고농도 미세먼지 발생 분석이 요구되고 있다. 미세먼지의 지역별 농도 특성 및 고농도 사례와 관련하여 부산(Chae and Lee, 2022; Kim *et al.*, 2020c; Han *et al.*, 2015; Son and Kim, 2009), 광주(Song *et al.*, 2017), 전북(Nam *et al.*, 2023; Park *et al.*, 2022), 충북(Son *et al.*, 2021), 충남(Hwang *et al.*, 2023; Hwang *et al.*, 2021; Shin *et al.*, 2021; Kim *et al.*, 2020b; Son *et al.*, 2020; Nam *et al.*, 2018; Kim *et al.*, 2017), 제주(Kim *et al.*, 2020a) 등 여러 지역을 대상으로 분석이 수행되었으나, 수도권 외 지역에 대한 장기간의 상세 분석 연구 및 자료는 상대적으로 여전히 부족한 상태이다. 특히, 중부권은 한반도 내에서 대부분의 고배출 지역과 수도권을 제외한 고농도 지역을 포함하며, 충청권의 대기질과 밀접한 관련이 있음에도 불구하고 충청권의 고농도 PM<sub>2.5</sub> 사례에 대한 지자체별 특징과 기상의 관련성에 관한 연구는 부족한 실정이다.

따라서 본 연구는 군집 분석을 통해 중부권 내 지역별 PM<sub>2.5</sub> 특성을 효율적으로 파악하고, 2018년부터 2022년 동안 발생한 초고농도 사례와 관련된 종관패턴과 이에 따른 초고농도 발생의 지역적 차이를 기상학적 및 지형학적 근거를 바탕으로 분석하고자 한다. 또한, 이 연구는 기상·기후학적 영향을 고려한 지자체별 대기 환경 개선 방안을 마련하는 데 참고 자료로 활용될 수 있도록 하는 것을 목표로 한다.

## 2. 자료 및 연구 방법

### 2.1 자료

본 연구는 중부권 대기관리 권역 내 PM<sub>2.5</sub> 농도 변화를 분석하기 위해 충청남도 14개 지역(천안시, 공주시, 보령시, 아산시, 서산시, 논산시, 계룡시, 당진시, 부여군, 서천군, 청양군, 홍성군, 예산군, 태안군), 충청북도 6개 지역(청주시, 충주시, 제천시, 진천군, 음성군, 단양군), 전라북도 3개 지역(전주시, 군산시, 익산

시), 대전광역시 전 지역, 세종특별자치도 전 지역을 포함한 총 25개 지역을 대상으로 하였다. 한국환경공단 단의 에어코리아(<https://www.airkorea.or.kr>)에서 제공하는 2018년부터 2022년까지의 PM<sub>2.5</sub> 관측 자료를 활용하여 이동 없이 유지되고, 유효 관측값이 80% 이상 확보된 관측소를 선별하였다. 그 결과, 중부권 36개 관측소를 중심으로 분석을 수행하였으며(그림 1, 표 1), 중부권의 PM<sub>2.5</sub> 농도 특성을 명확히 이해하기 위해 한반도 전체 208개 관측소의 자료를 추가로 비교 분석에 활용하였다. 분석에 사용된 PM<sub>2.5</sub> 농도 자료는 1월부터 2월(January to February; JF)까지 시간별 PM<sub>2.5</sub> 농도를 일 평균하여 사용하였으며, 분석의 일관성을 유지하기 위해서 윤년이 포함된 해의 2월 29일 자료는 분석에서 제외하였다. 또한, 기상청 날씨누리에서 제공하는 황사 관측 일수를 참고하여 전국에 한 곳이라도 황사가 발생하면 해당 일수를 황사 일로 간주하고 미세먼지 발생일에서 제외하였다.

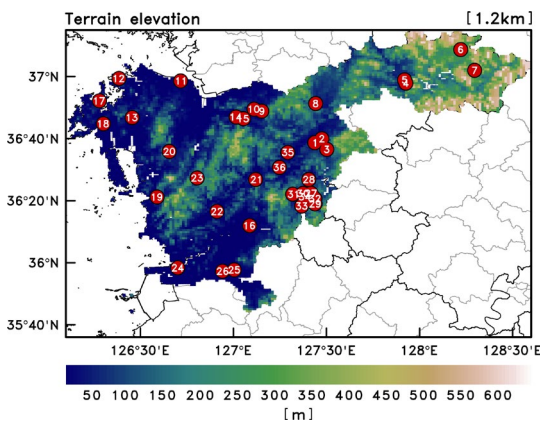
초고농도 사례에 대한 기상학적 영향을 분석하기 위해 미국 항공우주국(National Aeronautics and Space Administration; NASA) GMAO(Global Modeling and Assimilation Office)에서 제공하는 MERRA-2(Modern Era Retrospective Analysis for Research and Applications version 2) 재분석 기상자료와 PM<sub>2.5</sub> 산출 식(식

1)을 활용하였다(Buchard *et al.*, 2017; Provencal *et al.*, 2017). MERRA-2는 한반도 PM<sub>2.5</sub> 농도의 변동성을 잘 모의하지만, 농도가 실제 관측치보다 과소 모의되는 경향이 있다. 이러한 과소 추정 의 원인으로는 MERRA-2 자료가 질산염의 영향을 포함하지 않는 점 등이 있으므로 본 연구 결과를 해석할 때 이러한 점을 유의해야 한다. 사용한 기상 변수는 300 hPa 지위 고도(Geopotential height; GPH), 해면기압(Sea level pressure; SLP), 대기경계층 높이(Planetary boundary height; PBL height), 10 m 수평 바람 성분, PM<sub>2.5</sub> 산출에는 DUSTMASS25(Dust Surface Mass Concentration), OCSMASS(Organic Carbon Surface Mass Concentration), BCSMASS(Black Carbon Surface Mass Concentration), SSSMASS25(Sea Salt Surface Mass Concentration), SO4MASS(Sulfate Surface Mass Concentration) 자료를 이용하였다. 또한, PM<sub>2.5</sub> 농도의 이동 경로와 확산을 포함한 시공간적 변화를 분석하기 위해 PM<sub>2.5</sub> 수평 플럭스를 계산하였다(식 2). 여기서 C는 지표면 PM<sub>2.5</sub> 농도(Surface PM<sub>2.5</sub> Concentration)를 의미하며,  $\vec{V}$ 는 10 m 바람 속도(10 m wind)를 나타낸다.

$$PM_{2.5} (\mu g/m^3) = (DUSSMASS25 + OCSMASS + BCSMASS + SSSMASS25 + SO4SMAS) \times (132.14/96.06) \times 10^{-9} \quad (1)$$

$$\text{Horizontal } PM_{2.5} \text{ flux } (\mu g/m^2s) = C \cdot \vec{V} \quad (2)$$

이 연구에서는 중부권으로 유입되는 PM<sub>2.5</sub>의 이동 경로를 파악하기 위해서 라그랑지안 역궤적추적 방법을 수행하였다. 역궤적추적은 NCEP(National Centers for Environmental Prediction) GDAS(Global Data Assimilation System)에서 제공하는 GDAS1(<ftp://ftp.arl.noaa.gov/pub/archives/gdas1>) 기상자료를 HYSPLIT(Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory) 모델에 적용하여 수행하였다(Stein *et al.*, 2015). 이를 위해 중부권 중간 지점에 해당하는 천안 성황동 지역을 역궤적 분석의 시작 위치로 선정하였으며, 500 m 높이에서 궤적을 출발시켜 1시간 간격으로 48시간 전



**Fig. 1.** Spatial distribution of PM<sub>2.5</sub> observation stations in central region of South Korea. Shading indicates altitude (m) above sea level.

Table 1. Station information.

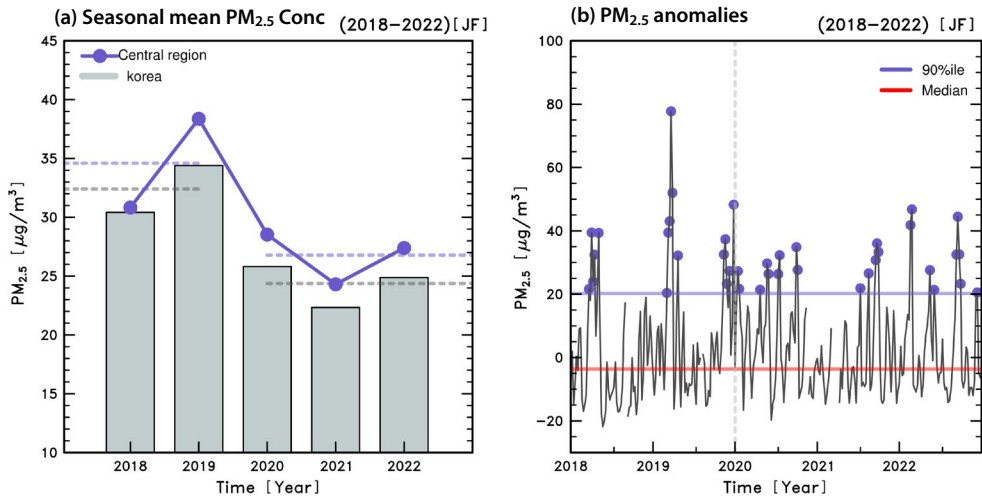
Number	Station number	Province	City	State	
1	533112	Chungcheongbuk-do	Cheongju-si	Songjeong-dong	
2	533113			Sacheon-dong	
3	533115			Yongam-dong	
4	633122		Chunju-si	Hoam-dong	
5	633123			Chilgeum-dong	
6	633131		Jechen-si	Jangnak-dong	
7	633311		Danyang-gun	Maepo-eup	
8	633411		Jincheon-gun	Jincheon-eup	
9	534111	Chungchengnam-do	Cheonan-si	Seonghwang-dong	
10	534112			Baekseok-dong	
11	534433		Dangjin-si	Songsan-myeon	
12	534421		Seosan-si	Daesan-eup	
13	534422			Dongmun-dong	
14	534441		Asan-si	Mojong-dong	
15	534442			Baebang-eup	
16	534451		Nonsan-si	Buchang-dong	
17	534462		Taeon-gun	Iwon-myeon	
18	534463			Taeon-eup	
19	534481		Boryeong-si	Daecheon-dong	
20	534491		Hongseong-gun	Hongseong-eup	
21	534342		Gongju-si	Bonghwang-dong	
22	534411		Buyeo-gun	Buyeo-eup	
23	534502		Cheongyang-gun	Cheongyang-eup	
24	735121	Jeollabuk-do	Gunsan-si	Sinpung-dong	
25	735133		Iksan-si	Palbong-dong	
26	735134			Mohyeon-dong	
27	525111	Daejeon		Eumnae-dong	
28	525112			Munpyeong-dong	
29	525121			Munchang-dong	
30	525141			Guseong-dong	
31	525142			Noeun-dong	
32	525161			Seongnam-dong	
33	525171			Jeongnim-dong	
34	525172			Dunsan-dong	
35	541111		Sejong		Sinheung-dong
36	541112				Areum-dong

위치를 역추적하였다.

## 2.2 연구 방법

초미세먼지가 가장 높은 1~2월(JF) 기간을 대상으로 2018년부터 2022년까지 중부권 PM<sub>2.5</sub> 농도의 특징을 파악하고 초고농도 사례를 선정하여 분석하였다. 그림 2a는 분석 기간 동안 한반도와 중부권 PM<sub>2.5</sub> 농도의 경년 변동성을 나타낸다. 2020년을 기준으로 이

전과 이후 기간을 비교했을 때, PM<sub>2.5</sub> 농도가 급격히 감소한 것을 확인할 수 있었으며, 이러한 변화는 2019년 12월 COVID-19 발생과 관련한 인위적 배출량의 급격한 감소와 밀접한 연관이 있는 것으로 판단하였다(Choi and Cheong, 2021; Chu *et al.*, 2021; Kim *et al.*, 2021b; Park, 2021). 따라서 PM<sub>2.5</sub>의 일일 농도를 분류하기 전, COVID-19 발생으로 인한 인위적 배출량의 감축 효과를 제거하기 위해 2020년 1월 1일을



**Fig. 2.** Seasonal mean time-series (a) and daily time-series of PM<sub>2.5</sub> concentration anomalies (b) over 5 years (2018~2022) during JF period. In (a), gray bar and purple dot line indicates PM<sub>2.5</sub> concentration in Korea and central region of South Korea. Gray and purple dash line indicate climatological mean of PM<sub>2.5</sub> concentration during the before period (2018~2019) and after period (2020~2022) for Korea and central region of South Korea. In (b), purple circles indicate EH days. Purple and red lines indicate 90<sup>th</sup> percentile and median, respectively.

기준으로 이전과 이후 기간 동안의 각 기후 평균을 제거하였다. 초고농도 (Extremely high PM<sub>2.5</sub> concentrations; EH)일은 한반도 PM<sub>2.5</sub> 농도의 90 백분위수를 기준으로 정의하였다. 중부권 EH일은 이전 기간에 16회, 이후 기간에 23회 발생하였으며, 전체 기간 동안에 총 39일 발생하여 연간 약 7.8% 발생하였다(그림 2b).

선행 연구에서는 K-means 군집화 방법(Choi *et al.*, 2023), Spectral 군집화 방법(Wang *et al.*, 2018), 계층적 군집화 방법(Kim and Choi, 2022) 등을 이용하여 지역을 분류한 바 있다. 본 연구에서는 K-means 군집화 방법을 채택하여 PM<sub>2.5</sub> 농도의 특성이 유사한 지역을 세분화하였다. K-means 군집화는 최적의 군집 수 K를 설정하면 평균적으로 유사한 K개의 군집으로 데이터를 분류하므로(MacQueen, 1967), 군집 내 PM<sub>2.5</sub> 농도가 평균적으로 유사하다는 특징은 분석 결과를 직관적으로 해석하는 데 용이하다. 이때 최적의 군집 수 K는 Elbow 방법을 활용하였으며(Kodinariya and Makwana, 2013), 분류된 군집별 EH일을 이용하여 EH일이 3일 이상 지속하는 대표적인 사례 5가지를 선

**Table 2.** Five representative cases of EH-PM<sub>2.5</sub> in central region of South Korea.

	Period
Case 1	Jan.12.2018~Jan.19.2018
Case 2	Jan.09.2019~Jan.16.2019
Case 3	Feb.19.2019~Feb.26.2019
Case 4	Feb.09.2021~Feb.15.2021
Case 5	Feb.09.2022~Feb.15.2022

정하였다(표 2). 사례의 시작일과 종료일은 EH일의 발달, 발생, 해소 과정을 모두 분석하기 위하여 발생일 이전 2일 전부터 종료일 이후 1일까지로 정의하였다.

이 연구에서는 PM<sub>2.5</sub> 농도 및 수평 플렉스의 시공간적 변화와 상·하층 기압계의 종관패턴을 기준으로 사례들의 유형을 분류하였다. 분류의 효율성을 위해서 우선 EH 발생의 시공간적 변화를 크게 국외 유입과 국내 축적으로 나누었다. 여기서 국외 유입은 대기 오염물질이 기상 조건에 따라 국외에서 국내로 유입되는 경로가 뚜렷한 경우를 의미하고, 국내 축적은 대기 오염물질이 국내에서 축적되며 순환되는 경로가 뚜렷한 경우를 의미한다. 또한 EH 사례들은 3일 이상 장

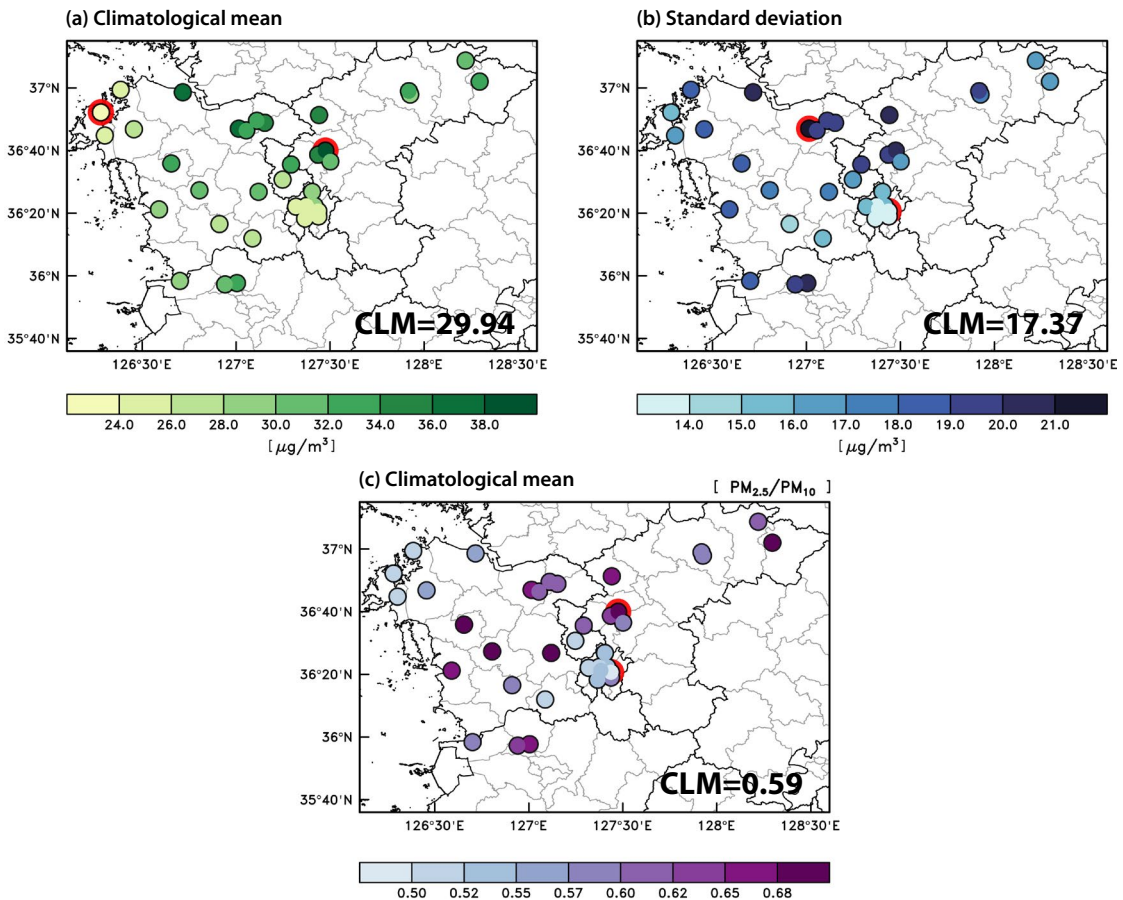
기간 지속하는 사례이기 때문에 국외 유입과 국내 축적의 발생 시기가 사례마다 다르게 나타난다. 이 연구에서는 이를 반영하여 EH의 최고농도 이전에 대기 정체를 유도하기 좋은 종관패턴이 발생한 경우는 선 정체(Stagnation First), 그 이후에 발생한 경우는 후 정체(Stagnation Later)로 정의하였다. 마찬가지로 국외 유입의 시기에 따라 선 유입(Inflow First)과 후 유입(Inflow Later)으로 분류하였다. 이를 기준으로 중부권의 대표적인 EH 사례들을 분류한 결과 크게 3가지 패턴, 즉, 선 국외 유입 후 정체(Inflow First Stagnation Later: IFSL), 선 정체 후 국외 유입(Stagnation First Inflow Later: SFIL), 선 정체 후 국내 축적(Stagnation

First Accumulation Later: SFAL) 유형이 나타났다. 참고로 SFAL 유형은 선 정체 후에 대기오염물질의 국외 영향보다 국내 축적의 영향이 우세하게 작용하는 유형에 해당한다.

### 3. 연구 결과

#### 3.1 중부권 $PM_{2.5}$ 농도의 지역성 파악 및 군집 분류

그림 3은 2018년부터 2022년까지 JF 기간 동안 중부권  $PM_{2.5}$  농도의 36개 관측소별 기간 평균, 표준편



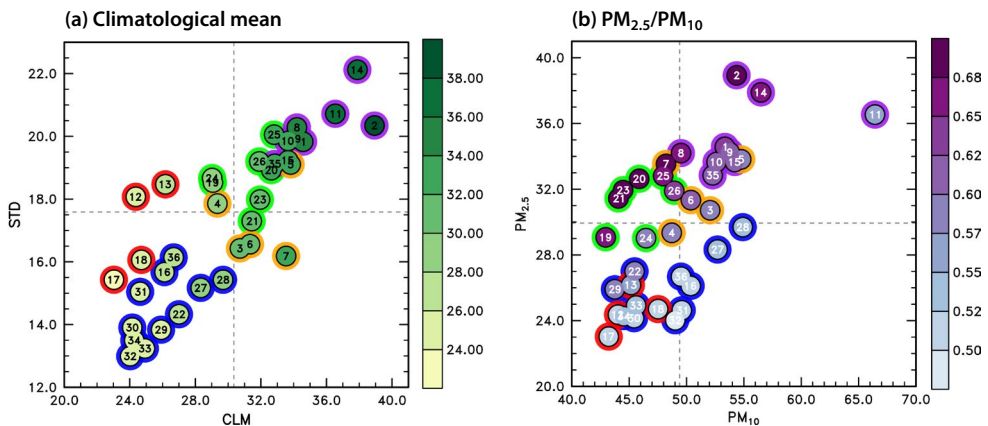
**Fig. 3.** Spatial distribution of climatological mean (CLM) of  $PM_{2.5}$  concentration (a), standard deviation (STD) of  $PM_{2.5}$  concentration (b), climatological mean  $PM_{2.5}/PM_{10}$  (c) over 5 years (2018~2022) during JF period. The closed circle outlines in red indicate minimum and maximum stations.

차, 그리고 PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub>을 나타낸다. 중부권 36개 관측소의 평균 PM<sub>2.5</sub> 농도는 29.94 µg/m<sup>3</sup>로, 한반도 전체 208개 관측소의 평균 PM<sub>2.5</sub> 농도인 27.59 µg/m<sup>3</sup>보다 약 8% 높다. 중부권 내에서는 주로 충남 북부와 충북 중부지역이 고농도 지역으로 나타났다(그림 3a). 분석기간 동안 가장 낮은 평균 농도는 충남 태안의 이원면(23.03 µg/m<sup>3</sup>)에서, 가장 높은 평균 농도는 충북 청주시 청원구 사천동(38.93 µg/m<sup>3</sup>)에서 관측되었으며, 표준편차는 대전 동구 성남동(12.99 µg/m<sup>3</sup>)에서 가장 낮고 충남 아산 모종동(22.12 µg/m<sup>3</sup>)에서 가장 높았다(그림 3a, b). PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub>의 비율은 2차 생성의 영향을 간접적으로 알아볼 수 있는 지표로서 사용된다(Han and Um, 2023; Yeo *et al.*, 2019). 따라서 중부권에서 2차 생성의 영향이 가장 적은 지역은 대전 동구 성남동(0.49)이었으며, 가장 큰 지역은 충북 청주 청원구 사천동(0.71)으로 확인되었다(그림 3c).

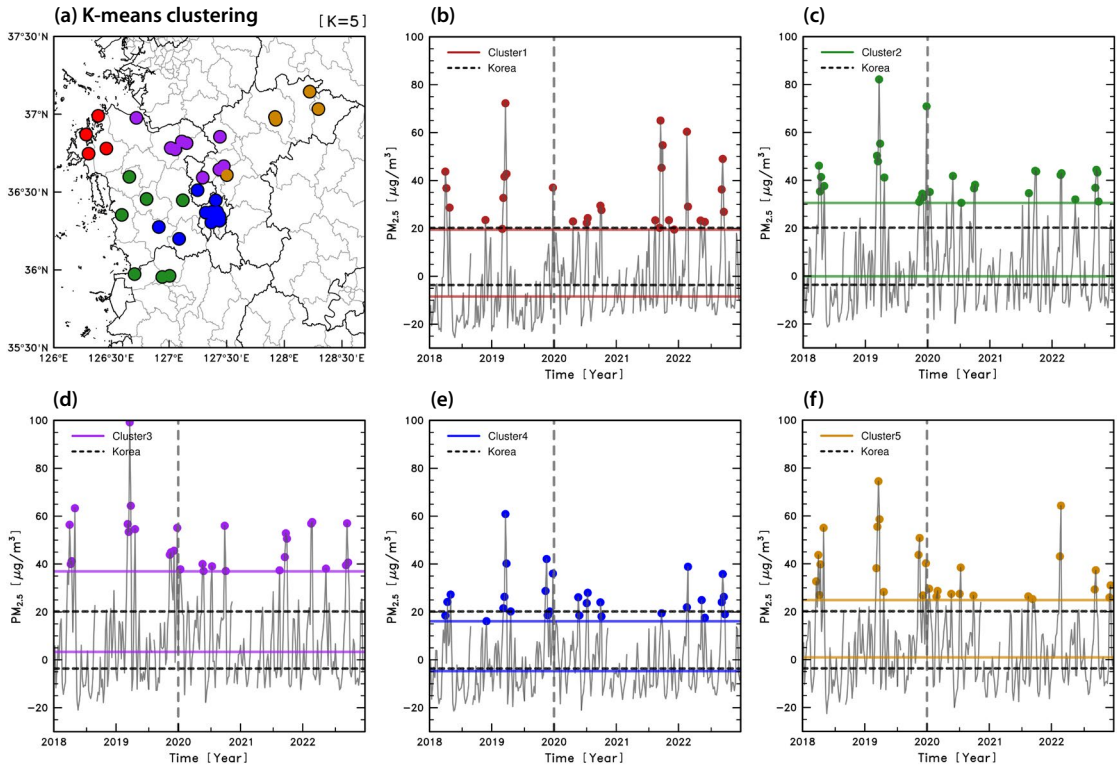
그림 4a와 4b는 각각 중부권 관측소 지점별 PM<sub>2.5</sub>의 평균 농도 및 표준편차에 대한 산점도와 지점별 PM<sub>2.5</sub>의 평균 농도 및 PM<sub>10</sub>의 평균 농도에 대한 산점도이다. 그림 4a에서 제1사분면에 있는 지역은 대체로 그림 4b에서 2차 생성의 영향이 큰 지역에 해당한다. 이는 천안(9, 10번째 관측소), 아산(14, 15번째 관측소), 청주(1, 2번째 관측소) 등과 같이 평균적인 농

도가 큰 지역에서는 변동성도 크게 나타나며, 2차 생성의 영향 또한 높음을 의미한다. 반면에 당지의 경우(11번째 관측소), PM<sub>2.5</sub>의 평균 농도와 변동성이 크게 나타남에도 불구하고 PM<sub>10</sub>/PM<sub>2.5</sub> 비율은 0.5로 2차 생성의 영향이 상대적으로 적게 나타났다(그림 4b). 이는 PM<sub>10</sub>의 농도가 특히 높은 것이 주요 원인으로 보인다.

중부권 PM<sub>2.5</sub> 농도 특성은 크게 4가지로 분류할 수 있다. 그림 4에서 1) 붉은색 원으로 표시된 곳(예: 12, 13, 17, 18번째 관측소), 평균 농도 대비 변동성이 크지만 2차 생성의 영향은 적은 경향이 나타나는 해안가 부근, 또는 주변에 주요 배출원이 있는 지역(예: 태안, 서산). 2) 초록색 원으로 표시된 곳(예: 20, 21, 23번째 관측소), 평균 농도 대비 2차 생성의 영향이 크게 나타나면서 주요 배출원이 적고, 주변에 산맥이 위치한 지역(예: 홍성, 청양, 공주). 3) 보라색 원으로 표시된 곳(예: 1, 2, 8, 9, 10, 14, 15번째 관측소), 평균 농도와 변동성, 2차 생성의 영향이 모두 크게 나타나는 중부권 내륙지역 중 생활 또는 산업 부문의 배출량이 많은 지역(예: 천안, 아산, 충북지역). 4) 파란색 원으로 표시된 곳, 평균 농도와 변동성, 2차 생성의 영향이 낮은 경향이 나타나는, 산업 부문의 적은 배출량과 분지 지형의 특성이 반영된 지역(예: 대전). 이와 같은 분석



**Fig. 4.** Scatter plots of central region for (a) climatological mean (CLM) and standard deviation (STD) of PM<sub>2.5</sub> (shading: CLM; units: µg/m<sup>3</sup>), (b) PM<sub>2.5</sub> concentration and PM<sub>10</sub> concentration (shading: PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub>). The closed circle outlines in red, green, purple, blue and orange represent each group of the K-means cluster, respectively.



**Fig. 5.** Cluster distribution of K-means clustering for (a) and daily anomalies time-series of Cluster 1 (b), Cluster 2 (c), Cluster 3 (d), Cluster 4 (e), Cluster 5 (f). Dashed and other lines indicate Korea 90<sup>th</sup> percentile and median, cluster 90<sup>th</sup> percentile and median, respectively. Circles indicate EH days.

결과를 통해 중부권 PM<sub>2.5</sub> 농도는 지역별로 다양한 특성을 보이며, 각 지역의 지리적 및 산업적 요인에 따라 농도와 변동성, 2차 생성의 영향 등이 달라지는 것을 확인하였다.

다음으로, 중부권의 모든 지역을 보다 객관적으로 세분화하기 위해 K-means 군집화 방법을 수행하였다. 그 결과, 36개 관측소를 5개의 군집으로 분류하였으며(그림 5a), 그림 5b~f는 각 군집에 속하는 지역의 일 변동 아노말리 시계열과 EH일을 나타낸다. 5개의 군집 분석 결과는 앞선 그림 3과 4에서 분석한 4가지 특성이 반영됨과 동시에 지리적 근접성도 고려되어, 보다 상세하게 분류되었음을 확인할 수 있다. 각 군집별로 EH일의 농도 수준과 90 백분위 수, 중앙값이 다르게 나타남을 확인할 수 있으며, 표 3과 함께 군집별

로 COVID-19 이전과 이후의 90 백분위 수, 중앙값을 비교하여 각 군집의 특성을 상세히 분석하였다.

군집 1(태안, 서산)은 충남 서북부지역이 분류되었으며, 서해안과 가장 인접하고 충남 주요 배출원이 밀집되어 있다. 평균 농도 대비 변동성이 크게 나타나며, 중하위 농도 수준은 낮다(그림 5b). 이는 주요 배출원이 있으면서도 해안과 근접해 미세먼지의 빠른 해소가 가능함을 의미한다. 해안선, 기류, 해풍의 침입 정도, 그리고 지형의 복잡성은 미세먼지 농도의 변동성을 증가시킨다(Han *et al.*, 2015). 또한, 연안 부근에 밀집된 공단 지역은 일반적으로 공단 지역이 위치한 지점에서 대기오염물질의 영향을 많이 받는 것으로 보이나, 오염원으로부터 배출된 공기는 해륙풍에 의해 해상과 육상으로 이루어지는 경향이 있다(Shin *et al.*,



**Table 3.** The 90<sup>th</sup> percentile (90<sup>th</sup>ile) and median of PM<sub>2.5</sub> concentration (units:  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) during the before period (2018~2019) and the after period (2020~2022).

Before period (2018~2019)							
Percent	Korea	Central region	Cluster 1	Cluster 2	Cluster 3	Cluster 4	Cluster 5
90 <sup>th</sup> ile	52.6	58.04	51.88	62.95	69.33	48.52	57.28
Median	28.75	31.11	23.96	32.33	35.7	27.7	33.35
After period (2020~2022)							
90 <sup>th</sup> ile	44.57	50.01	43.85	54.92	61.3	40.49	49.25
Median	20.72	23.08	15.93	24.3	27.67	19.67	25.32

2007). 군집 2(보령, 홍성, 청양, 공주, 군산, 익산)는 충남 서남부지역 및 인근 충남 동남부지역이 분류되었다. PM<sub>2.5</sub> 농도의 수준은 한반도 평균보다 약 16~18% 높은 고농도 지역이며(그림 5c), 중부권 평균과는 가장 유사하다. 지리적으로 충남 북부지역에서 배출되는 대기오염물질이 산맥에 의해 축적되기 좋은 위치에 있다. 홍성, 청양, 공주, 익산은 지리적으로 근접해 있는 연안 부근에 밀집된 공단 지역(보령, 군산)에서 배출되는 대기오염물질과 밀접한 관련이 있다(Park *et al.*, 2022; Nam *et al.*, 2018; Shin *et al.*, 2007). 군집 3(당진, 아산, 천안, 세종, 진천, 청주)은 충남 북부권역 및 인근 세종지역과 충북의 중부지역이 분류되었으며, 중부권 내에 평균 농도와 변동성이 가장 크게 나타나는 고농도 지역이다(그림 5d). 서해안 또는 수도권에서 기원하는 국내외 대기오염물질이 유입되기 좋은 평야 지형 및 경로가 갖추어져 있다. 군집 4(대전, 세종, 논산, 부여)는 충남 동남부의 저농도 지역과 인근 세종지역, 대전 전 지역이 분류되었다. 평균적인 농도와 변동성이 가장 적은 저농도 저배출 지역이며(그림 5e), 대전 전체 지역이 분류되어 대전의 농도 특성이 우세하게 반영된 것으로 보인다. 대전과 같은 분지 지형은 기상장에 의한 차이가 크지 않고 상대적으로 폐쇄적인 순규모 순환이 형성되기 때문에 미세먼지의 변동성이 크지 않다(Han *et al.*, 2015). 군집 5(청주, 충주, 제천, 단양)는 충북 북부지역이 분류되었으며, 중부권의 가장 내륙에 위치하는 고농도 지역으로 변동성은 상대적으로 낮다(그림 5f). 본 연구의 분석 결

과는 관측소별 PM<sub>2.5</sub> 농도의 평균, 표준편차, 2차 생성의 영향, 배출 특성, 그리고 지리적 근접성 등 PM<sub>2.5</sub> 농도에 영향을 미치는 다양한 요소들이 종합적으로 고려되어 분류되었다는 점에서 의미가 있다.

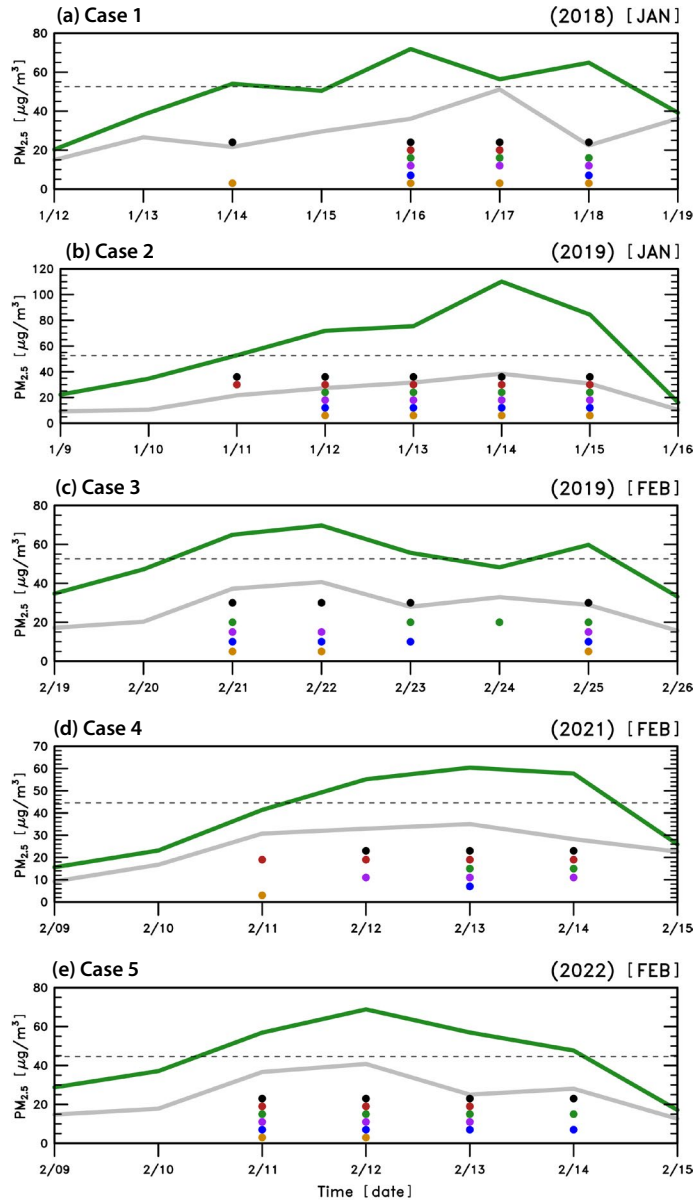
### 3.2 중부권 대표적인 초고농도 사례 선정

중부권은 지자체별로 장기간에 걸쳐 확보된 관측자료가 충분하지 않아 지역 간 차이를 진단하기에 어려움이 있을 수 있으나, 고농도 미세먼지 발생의 지역적 차이를 일으키는 요인을 상세하게 살펴보는 것은 중요하다. 따라서 본 연구에서는 중부권과 군집별 EH일을 확인하였다(그림 6). 36개 관측소에 대한 EH일은 군집별로 차이가 분명히 나타난다. 검은색 원이 표시된 날짜를 통해 일반적으로 중부권이 EH가 유발하기 좋은 기상 조건을 갖추고 있는 날임을 알 수 있고, 각 군집을 대표하는 색상 원을 통해 EH 발생의 지역 간 차이를 확인할 수 있다. 따라서 크게 사례 1, 3, 4는 지역 간 차이가 나타나고, 사례 2, 5는 지역 간 차이가 거의 나타나지 않은 사례로 분류된다.

### 3.3 사례별 특성

#### 3.3.1 사례 1 (2018년 1월 12일~2018년 1월 19일)

사례 1은 2018년 1월 12일부터 2018년 1월 19일, 총 8일로 군집 1, 군집 4, 군집 5에서 EH 발생의 차이가 나타났다(그림 6a). 그림 7은 사례 1의 상·하층 지위 고도 편차, PM<sub>2.5</sub> flux, 경계층 높이, 10 m 풍향 풍속 및 PM<sub>2.5</sub> 관측 농도의 시공간적 변화를 나타낸다.

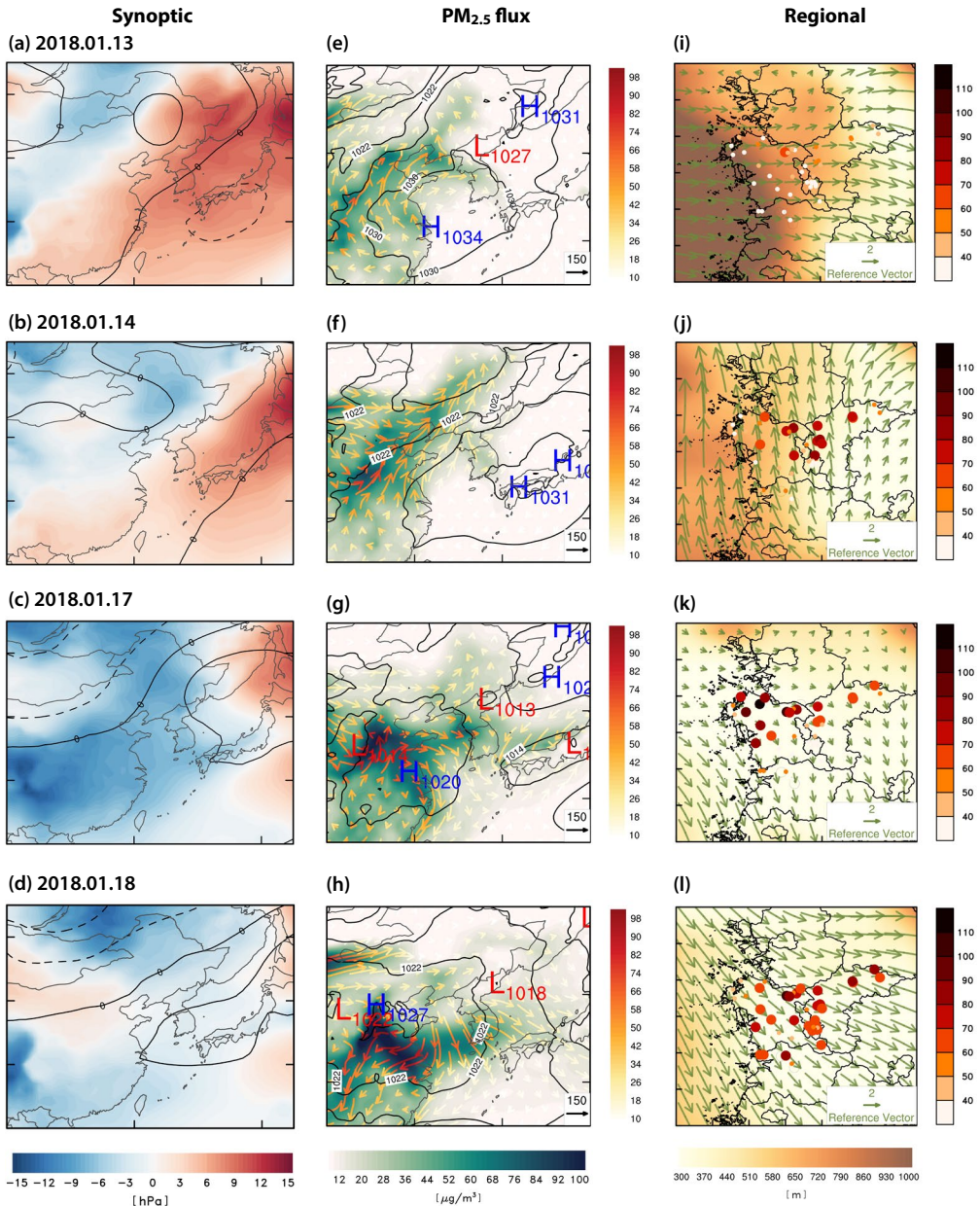


**Fig. 6.** Daily time-series of EH case (a) Case 1, (b) Case 2, (c) Case 3, (d) Case 4, (e) Case 5. Green line is daily  $PM_{2.5}$  observation concentration, gray line is daily average MERRA-2 surface  $PM_{2.5}$  concentration for the central region of South Korea. Black, red, green, purple, blue, orange circles indicate Central region of South Korea, and Cluster 1 to 5 EH days respectively.

13일 이후부터 하층 기압계가 약화하는 패턴이 타남에 따라 16일을 시작으로 EH일이 3일 이상 지속 되었다(그림 6a, 7a~d). 13일부터 이동성 고기압이 중국 북동부부터 우리나라 상공을 통과하면서 고기압성

흐름에 따라 국내로 오염물질을 유입하기 시작하여 (그림 7e), 14일에는 이동성 고기압이 일본 규슈 및 오키나와 부근에 위치하여 우리나라에 남풍 기류가 우세한 상태이다(그림 7f). 또한, 중부권 내에서 경계층

Case 1: IFSL (Inflow First Stagnation Later)



**Fig. 7.** Spatial distribution of 300 hPa GPH (units: m; contour interval of 120 m) and SLP (units: hPa; shading) anomalies for (a~d), PM<sub>2.5</sub> flux (units: μg/m<sup>3</sup>; shading: PM<sub>2.5</sub> concentration; vector: horizontal PM<sub>2.5</sub> flux) and SLP (units: hPa; contour) for (e~h), PBL height (units: m; shading), 10 m wind (units: m/s; vector) and observation PM<sub>2.5</sub> concentration (units: μg/m<sup>3</sup>; circle) for (i~l) during Case 1.

높이와 풍속은 충북 내륙지역에서 가장 낮다(그림 7i). 따라서 14일은 편서풍의 영향으로 유입되는 국내

및 국외의 오염물질의 영향은 적은 상태이나, 가장 내륙에 있는 군집 5는 다른 군집과 비교하여 기상학적 지

형학적으로 EH가 먼저 발생하기 좋은 조건을 갖추었다(그림 7j). 이후 16일부터 18일까지는 하층 기압계의 약화로 풍속과 대기경계층 높이가 급격하게 낮아지며(그림 7k~l), EH 발생이 3일 이상 유지된다. 이때, 17일은 풍속이 약한 북서풍으로 기류가 변화하면서 군집 4에서 가장 먼저 EH가 해소되었다(그림 7g, k). 군집 4는 평균 농도와 변동성이 가장 작은 분지 지형이며, 지리적으로 중부권 내에서도 외부 지역의 영향이 적어 기류가 변화함에 따라 가장 먼저 EH가 해소된 것으로 보인다. 18일은 북서풍이 다시 강화하기 시작하고 대기 정체로 잔류하고 있었던 국외 오염물질이 유입되어 일시적으로 농도가 증가한 후 해소되기 시작하는 날이며(그림 7h), 서해안과 가장 인접한 군집 1에서 EH가 먼저 해소된다(그림 7i).

따라서 사례 1은 중국 북동부 부근에서부터 동진하는 이동성 고기압의 영향으로 국외 오염물질이 유입된 후, 대기 정체가 지속함에 따라 국외 및 국내 대기 오염물질이 축적되어 EH일이 3일 이상 발생하였다. 본 연구에서는 이러한 사례를 선 국외 유입 후 정체 사례(IFSL)로 정의하였으며, 대기 정체가 지속하고 있을 때, 기류가 변화함에 따라 EH 발생이 먼저 발생하거나 뒤늦게 해소되는 군집이 있는 등 시공간적 차이가 나타남을 확인하였다.

### 3.3.2 사례 2(2019년 1월 9일~2019년 1월 16일)

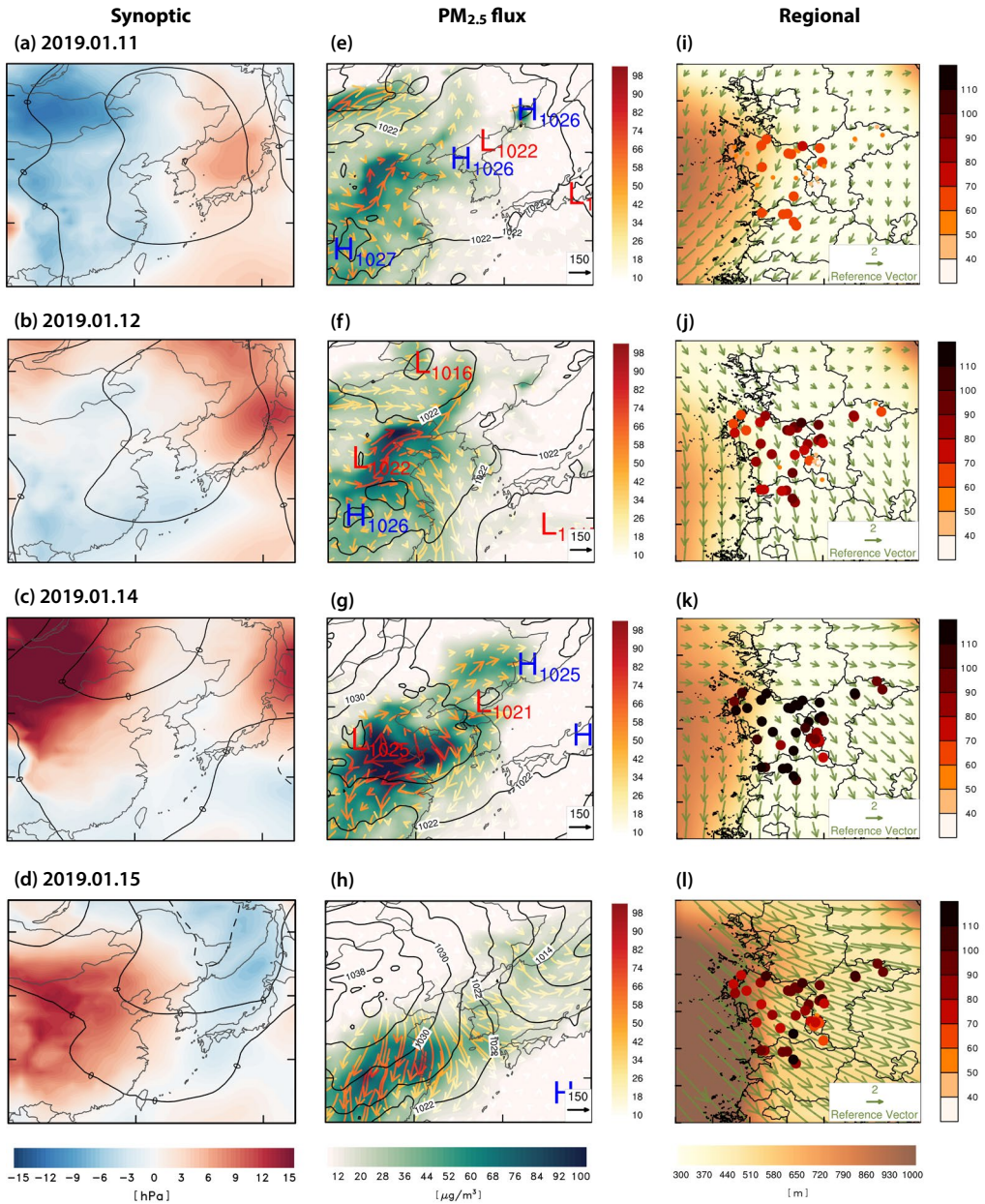
사례 2는 2019년 1월 9일부터 2019년 1월 16일, 총 8일로 EH 발생의 지역 간 차이가 거의 나타나지 않아 이러한 원인을 분석할 필요가 있는 사례이다(그림 6b). EH 시작일 11일부터 하층 기압계가 약화되어 있으며(그림 8a, b), 동아시아 및 한반도 상공, 그리고 일본까지 정체 고기압이 자리 잡고 있다(그림 8e, f). 이는 동아시아의 대기오염물질이 축적되기 좋은 기상 조건을 갖추고 있는 것을 의미하며, 실제로 국외 및 국내 PM<sub>2.5</sub> 농도는 꾸준히 증가하여 14일에 최고농도를 달성하였다. 또한, 14일부터는 시베리아 고기압이 강화하기 시작하여(그림 8c, d) 주 풍향이 북서풍이며(그림 8g, h), 이는 전날 축적되어 있던 국외 오염물질

이 국내로 유입하기 좋은 기상 조건이 갖추어졌음을 의미한다. 모든 군집에서 동시에 농도가 높아져 14일에 최고농도를 달성하였으며(그림 8i~k), 15일부터 시베리아 고기압 강화의 지속적인 영향 및 북서풍의 강화로 모든 군집에서 농도가 해소됨을 확인하였다(그림 8k, l). 즉 사례 2는 동아시아 전반을 걸쳐 한반도를 지나 일본 남해상까지 확장된 정체 고기압으로 대기 정체가 지속함에 따라 국내와 국외의 대기오염물질이 축적되기 시작한다. 이때 시베리아 고기압이 강화함에 따라 북서풍이 증가하기 시작하면 국내로 유입되는 대규모의 국외 오염물질의 영향을 받기 쉬운 조건이 갖추어진다. 따라서 국내 오염물질 축적과 지역 규모의 차이를 일으키는 요인보다 국외에서 축적되어 유입되는 대규모 대기오염물질의 영향이 우세하여 모든 군집에서 동시에 EH가 발생하고 해소되는 경향이 나타난다. 단, 군집 1은 서해안과 가장 인접하고 있어 북서풍으로 인한 대기오염물질의 외부 영향을 가장 먼저 받는 지역이기에 EH일이 먼저 발생하는 경향도 나타났다(그림 8i). 이를 통해 사례 2는 선 정체 후 국외 유입 사례(SFIL)로 정의하였으며, 지역적 차이가 거의 발생하지 않는 사례임을 확인하였다.

### 3.3.3 사례 3(2019년 2월 19일~2019년 2월 26일)

사례 3은 2019년 2월 19일부터 2019년 2월 26일, 총 8일로 모든 군집에서 EH 발생일의 차이가 나타났다(그림 6c). EH 최고농도일을 기준으로 22일까지 하층 기압계 약화로 인한 환기 효과의 약화로 대기 정체가 먼저 발생하고(그림 9a, b), 24일 이후부터 하층 기압계 약화가 회복된다(그림 9c, d). 또한, 동아시아 전반으로 대기오염물질이 축적되어 있는 것을 확인할 수 있으나, 국내로 유입되는 대규모 오염물질의 경로가 뚜렷하지 않다(그림 9e~h). 19일부터 22일, 24일, 25일까지 고기압성 흐름을 띠며 풍향이 변화함에 따라 EH가 발생하는 지역도 함께 변화하고 있다. 동시에 국내에서는 고기압성 흐름으로 기류가 재순환됨에 따라 EH가 발생하는 군집의 시공간적 차이가 나타난다(그림 9i~l). 따라서 사례 3을 선 정체 후 국내 축적

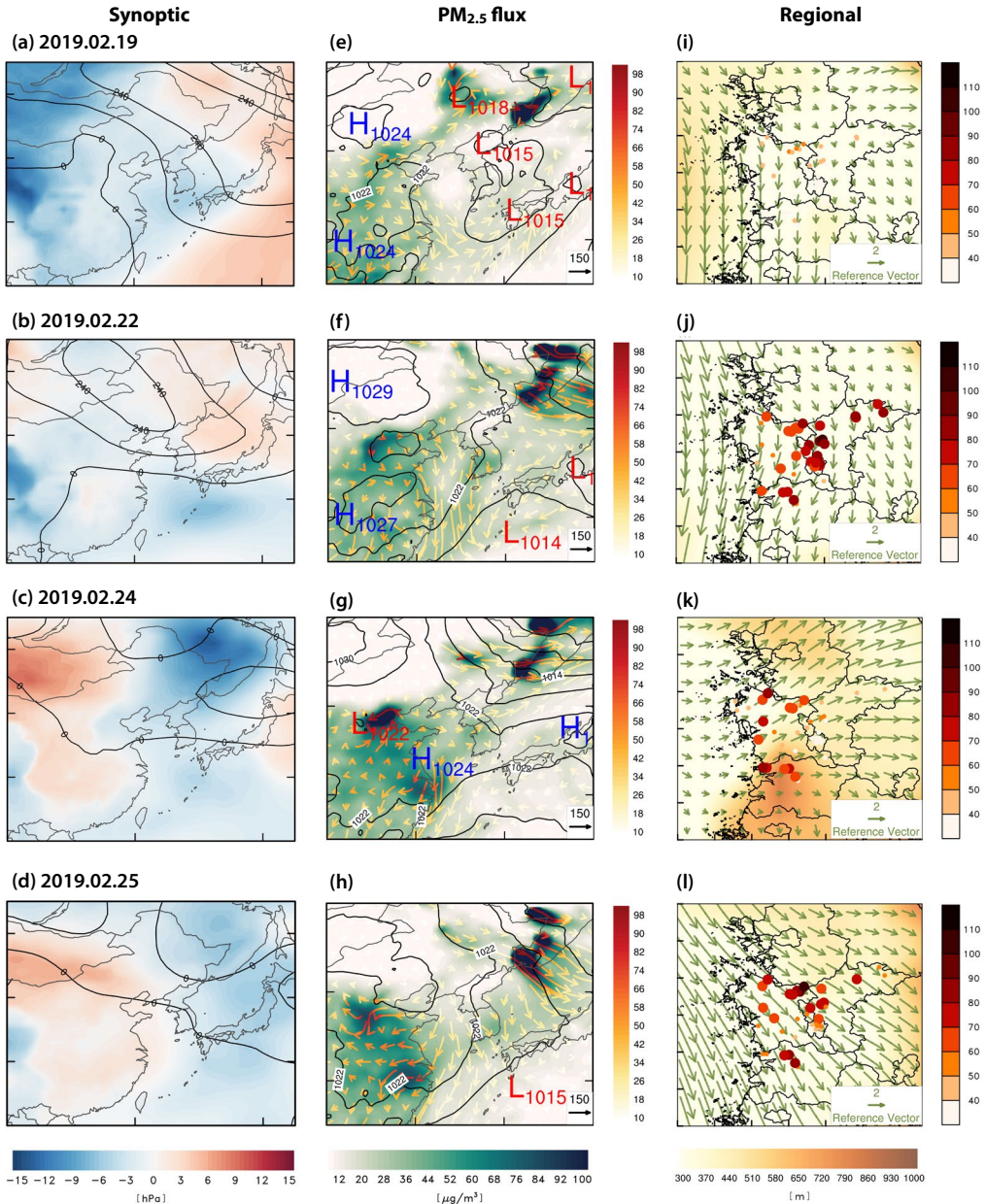
Case 2: SFIL (Stagnation First Inflow Later)



**Fig. 8.** Spatial distribution of 300hPa GPH (units: m; contour interval of 120 m) and SLP (units: hPa; shading) anomalies for (a~d), PM<sub>2.5</sub> flux (units: µg/m<sup>3</sup>; shading: PM<sub>2.5</sub> concentration; vector: horizontal PM<sub>2.5</sub> flux) and SLP (units: hPa; contour) for (e~h), PBL height (units: m; shading), 10 m wind (units: m/s; vector) and observation PM<sub>2.5</sub> concentration (units: µg/m<sup>3</sup>; circle) for (i~l) during Case 2.

(SFAL) 사례로 정의하였다. 이러한 사례는 풍향에 요소로 작용하게 된다. 다른 변화가 지역적 차이를 발생시킴에 있어 중요한

## Case 3: SFAL (Stagnation First Accumulate Later)

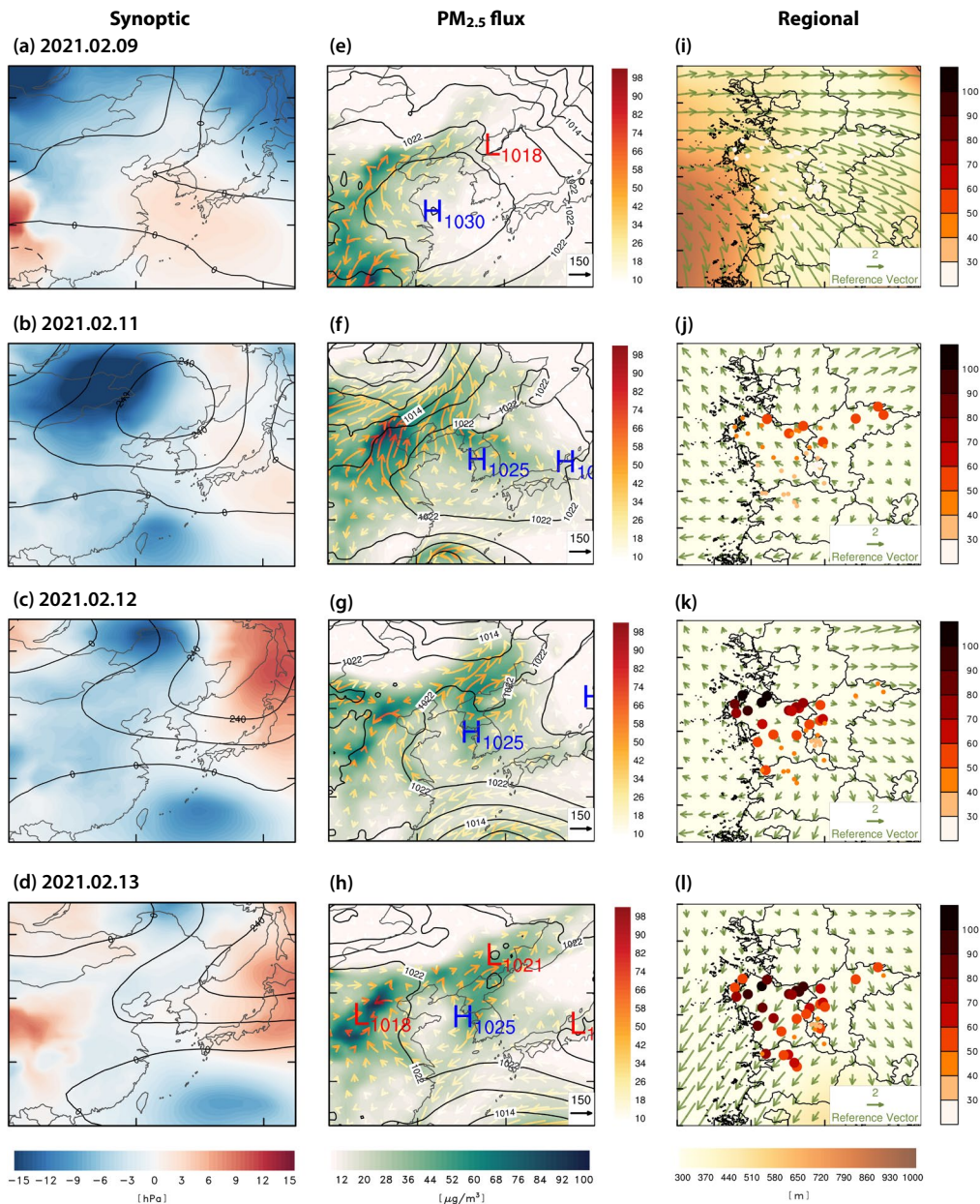


**Fig. 9.** Spatial distribution of 300 hPa GPH (units: m; contour interval of 120 m) and SLP (units: hPa; shading) anomalies for (a~d), PM<sub>2.5</sub> flux (units:  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ; shading: PM<sub>2.5</sub> concentration; vector: horizontal PM<sub>2.5</sub> flux) and SLP (units: hPa; contour) for (e~h), PBL height (units: m; shading), 10 m wind (units: m/s; vector) and observation PM<sub>2.5</sub> concentration (units:  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ; circle) for (i~l) during Case 3.

3.3.4 사례 4 (2021년 2월 9일~2021년 2월 15일)  
 사례 4는 2021년 2월 9일부터 2021년 2월 15일, 총

7일로 군집 5와 나머지 군집 간 EH 발생의 분리가 나타나났다(그림 6d). 사례 1과 유사하게 하층에 이동성

Case 4: IFSL (Inflow First Stagnation Later)

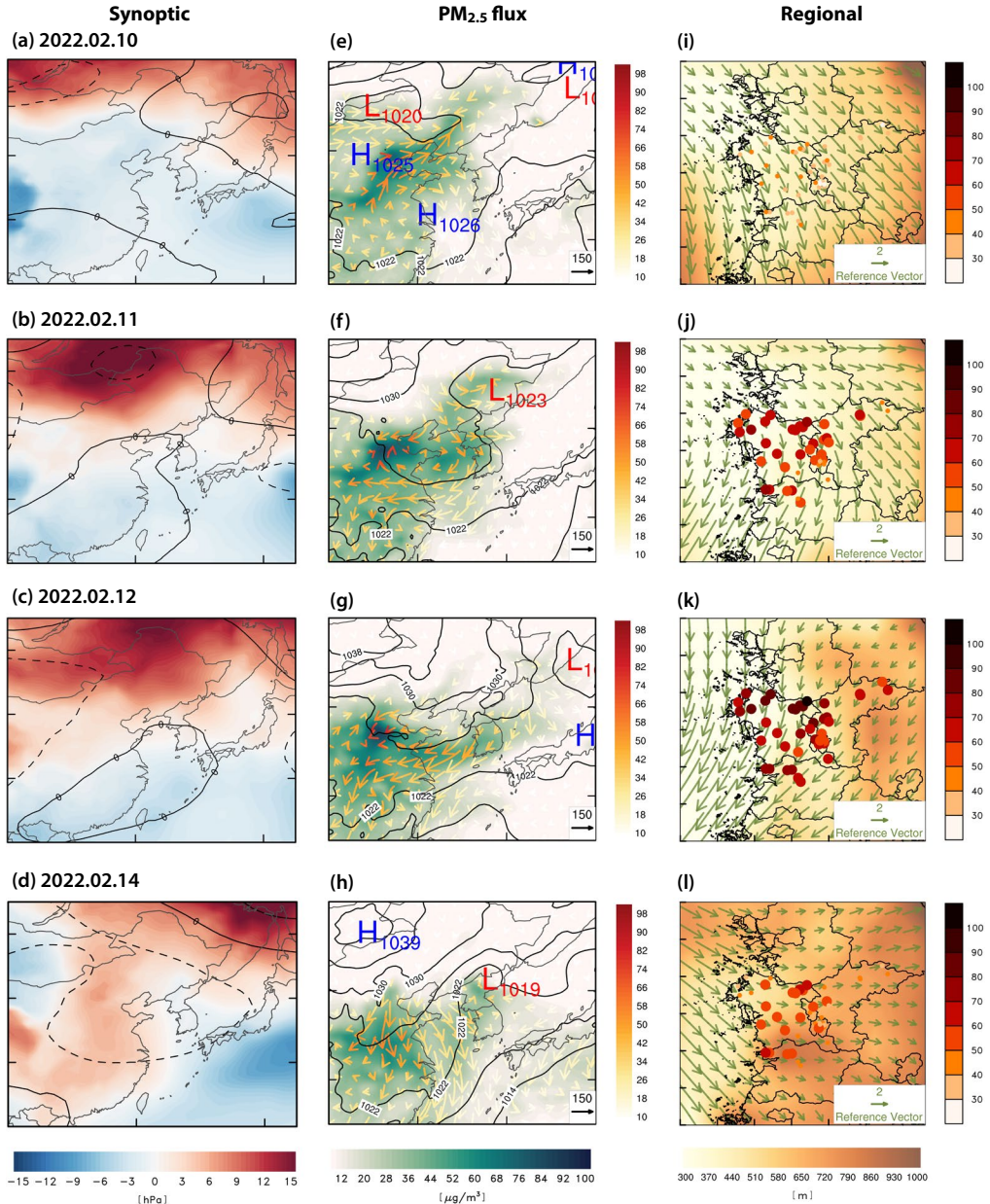


**Fig. 10.** Spatial distribution of 300 hPa GPH (units: m; contour interval of 120 m) and SLP (units: hPa; shading) anomalies for (a~d), PM<sub>2.5</sub> flux (units: µg/m<sup>3</sup>; shading: PM<sub>2.5</sub> concentration; vector: horizontal PM<sub>2.5</sub> flux) and SLP (units: hPa; contour) for (e~h), PBL height (units: m; shading), 10 m wind (units: m/s; vector) and observation PM<sub>2.5</sub> concentration (units: µg/m<sup>3</sup>, circle) for (i~l) during Case 4.

고기압이 동진하고 있었으나, 분리된 이동성 고기압 중 하나가 한반도와 인접한 서해상에 3일 이상 장기

간 위치하면서(그림 10e~h), 하층 기압계의 약화패턴이 지속되고 있다(그림 10a~d). 이는 EH일이 장기간

## Case 5: SFIL (Stagnation First Inflow Later)



**Fig. 11.** Spatial distribution of 300 hPa GPH (units: m; contour interval of 120 m) and SLP (units: hPa; shading) anomalies for (a~d), PM<sub>2.5</sub> flux (units:  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ; shading: PM<sub>2.5</sub> concentration; vector: horizontal PM<sub>2.5</sub> flux) and SLP (units: hPa; contour) for (e~h), PBL height (units: m; shading), 10 m wind (units: m/s; vector) and observation PM<sub>2.5</sub> concentration (units:  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ; circle) for (i~l) during Case 5.

지속되기 좋은 대기 정체 조건을 갖추고 있음을 의미한다. 또한, 이동성 고기압이 접근함에 따라 사례 1과

유사하게 군집 5에서 먼저 EHI일이 발생하였다(그림 10i~j).



사례 4는 사례 1과 같이 선 국외 유입 후 정체 (IFSL) 사례로 정의하였으며, 이를 통해 이동성 고기압의 영향이 있는 유형은 EH 발생의 지역적 차이와 관련이 있음을 확인하였다. 그 밖에도 사례 4는 이동성 고기압과 함께 서해안 인근에 약한 고기압이 장기간 정체되었던 영향으로 내륙에 있는 충북과 충남에 풍향의 분리가 발생하였다. 따라서 군집 5와 나머지 군집에서 EH 발생의 분리가 나타났다(그림 10k~l).

3.3.5 사례 5 (2022년 2월 9일~2022년 2월 15일)

사례 5는 2022년 2월 9일부터 2022년 2월 15일, 총 7일로 사례 2와 유사하게 EH 발생의 지역적 차이가 거의 나타나지 않았다(그림 6e, 11i~k). 실제로 사례 5 또한 EH의 최고농도일이 발생한 12일 이전부터 정체 대기 조건이 갖추어져 있으며(그림 11a, b), 국내외의 PM<sub>2.5</sub> 농도가 증가한다(그림 11e, f). 12일 이후부터는 시베리아 고기압의 영향이 강화되기 시작하며(그림 11c, d), 북풍 및 북서풍이 강화된다(그림 11g, h). 또

한, 14일에 EH 발생의 지역적 차이가 일시적으로 일어나고 있는 것을 확인할 수 있는데, 이는 저기압의 통과로 저기압 전면을 따라 잔류하고 있었던 대기오염물질이 수 시간 이내로 국내로 유입되고 해소되어 미세먼지의 수송이 빠르게 진행되었을 것으로 보인다(그림 11h). 사례 5는 사례 2와 같이 선 정체 후 국외 유입(SFIL) 사례로 정의하였다. 이러한 유형은 EH 발생의 지역적 차이가 거의 발생하지 않고 대기 정체로 인해 축적된 대기오염물질의 대규모 유입 영향이 크게 작용하는 사례이다.

3.4 중부권 초고농도 사례의 발생 유형

대기 정체, 국외 유입, 국내 축적의 기준으로 분류한 3가지 유형을 역궤적 분석을 통해 검증하고자 하였다. 그림 12는 각 사례를 대표할 수 있는 EH 발생일의 48시간 역궤적 결과를 나타낸다. 앞서 분류한 선 국외 유입 후 정체 사례(사례 1, 4)와 선 정체 후 국외 유입 사례(사례 2, 5)는 역궤적 분석 결과에서도 동일한 특

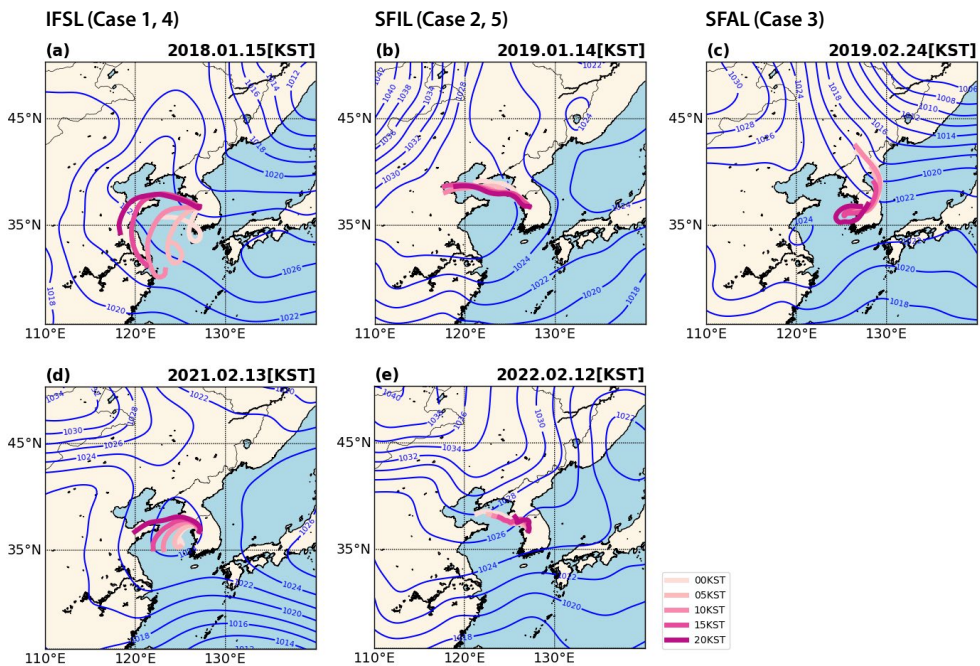


Fig. 12. Backward trajectories related to EH cases in the central region of South Korea, (a) Case 1, (b) Case 2, (c) Case 3, (d) Case 4, (e) Case 5. Contour is SLP (units: hPa). Green line is backward trajectories (interval 5 hours).

성이 나타남을 확인하였다. 선 국외 유입 후 정체 사례는 이동성 고기압의 영향으로 고기압성 흐름이 나타나고 있으며, 주로 서해상 및 중국 남동부 쪽에서 유입되는 경로를 확인할 수 있다(그림 12a, d). 선 정체 후 국외 유입 사례는 다른 사례와 비교하여 궤적의 경로가 짧은 것을 확인할 수 있고 북서 경로의 유입이 나타난다(그림 12b, e). 마지막으로 선 정체 후 국내 축적 사례는 국외 유입 경로와 국내에서 재순환되는 경로가 동시에 나타나고 있는 것이 특징이다(그림 12c).

#### 4. 결과 및 토의

본 연구는 중부권 EH 발생의 지역적 차이를 파악하고, 이와 관련된 종관패턴을 분석하였다. 또한, 중부권 EH 발생에 대하여 행정구역의 구분이 아닌 지역별 지형적 특성과 배출 특성을 고려하여 5개의 군집으로 지역을 구분하고 그 특성을 분석하였다. 이를 바탕으로 EH일이 3일 이상 지속하는 날을 중심으로 5가지의 대표적인 사례를 선정하였으며, 심층 사례분석을 진행하였다. 5가지 사례들은 모두 한반도 상공에 고기압성 편차의 영향으로 대기오염물질이 고농도로 축적하기 좋은 조건을 갖추고 있으며, 사례는 크게 IFSL, SFIL, SFAL, 3가지 형태로 유형화할 수 있다(그림 13).

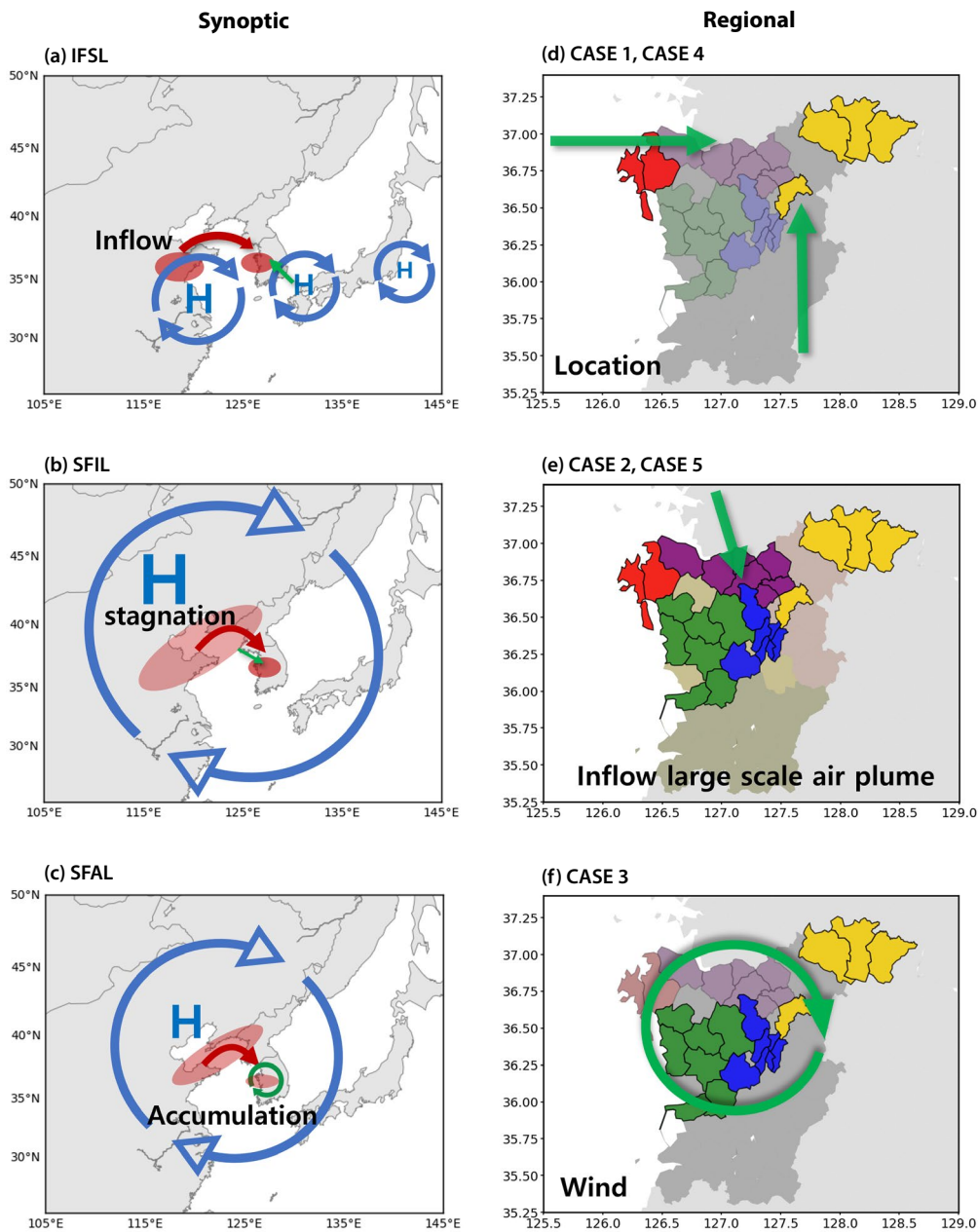
1. 선 국외 유입 후 정체(IFSL) 유형은 이동성 고기압이 한반도를 향해 접근할 때, 고기압성 흐름을 따라 대기오염물질이 유입된다(그림 13a). 이동성 고기압이 한반도 상공 부근을 통과할 때는 남풍에 의해 군집 5에서 EH가 먼저 발생한다. 또한, 이동성 고기압이 통과 후 동풍 및 대기 정체로 국내 대기오염물질이 축적되면 EH일이 3일 이상 지속된다. EH의 해소는 북서풍이 강해지면서 서해안과 가장 인접한 군집 1에서 먼저 해소되는 경향이 있다. 이러한 유형은 지리적 위치에 따라 EH의 시공간적 차이를 발생한다(그림 13d).

2. 선 정체 후 국외 유입(SFIL) 유형은 EH의 최고농도 일 전날부터 대기 정체 조건이 갖추어져 있으며, 최고농도일 이후부터는 북서풍의 강화로 축적되어 있던 대기오염물질이 유입되기 시작한다. 동아시아 전반을 걸쳐 자리 잡고 있는 정체 고기압의 강도 및 확장 정도에 따라 국내 축적이 더 우세하거나 국외 유입이 더 우세한 사례로 분류된다. 두 유형 모두 약한 북서풍에 의해 국외 유입의 영향이 있으나, 국외 유입이 더 우세한 경우에는 대기 정체 강도와 고기압의 확장 정도가 크고(그림 13b) 국외에서 축적되어 유입되는 대규모 대기오염물질의 양에 따라 국내 EH 농도 수준에는 차이가 있으나 지역적인 차이는 크지 않다(그림 13e).

3. 선 정체 후 국내 축적(SFAL) 유형은 선 정체가 나타나는 것은 같지만, 국내 기류에 따라 EH 발생의 지역 간 차이가 나타난다. SFAL은 SFIL과 비교하여 대기 정체 강도와 고기압의 확장 정도가 크지 않고(그림 13c), 국외에서 유입되는 대기오염물질의 영향이 모든 지역에 지배적이지 않다. 이러한 유형은 풍향에 따른 변화가 EH의 지역적 차이를 발생시킴에 있어 중요한 요소로 작용한다(그림 13f).

중부권을 기준으로 한 연구 결과를 찾아보기 어렵지만, 서울 및 한반도를 중심으로 한 기존의 연구들은 고농도 PM<sub>2.5</sub>와 관련된 종관 특성을 이해하는 데 중요한 통찰을 제공한다(Choi *et al.*, 2024; Oh *et al.*, 2024; Jeong *et al.*, 2023; Jee *et al.*, 2022; Chang *et al.*, 2021; Ghim *et al.*, 2019; Kim *et al.*, 2016). 이 연구에서는 이동성 고기압 및 상·하층의 정체 고기압이 중부권 EH 사례에서도 주요 종관패턴임을 확인할 수 있었으며, 종관패턴의 차이에 따라 중부권 내 EH 발생의 시공간적 특성도 다르게 분류될 수 있음을 제시하였다.

결론적으로 이 연구의 결과는 한반도 상공에 있는 고기압성 편차가 장기간 지속되는 중부권 EH 사례에 큰 영향을 미치며, 하층 고기압의 위치와 강도의 차이가 지역 순환의 다양성을 유발하여 EH의 지역 간 시공간적 차이를 발생시키고 있음을 시사한다. 사례분석은 주로 정성적인 방법을 통해 분석하였으나, 향후



**Fig. 13.** Schematic diagram of the IFSL, SFIL, SFAL for synoptic patterns (a~c), and regional difference (d~f) related to EH cases in the central region of the Korean Peninsula. Blue line is lower high pressure, red line is inflow path of PM<sub>2.5</sub> and green line is main wind direction.

연구 방향으로는 이러한 종관기상 패턴이 어떤 대규모 강제력과 관련이 있는지 (Kim *et al.*, 2024)를 보다

정량적으로 검토하는 것이 필요하다. 또한, 군집별 PM<sub>2.5</sub>와 2차 생성 물질과의 화학적 상관관계를 탐구

하는 연구도 지역별 EH 오염 사례의 원인 규명에 대한 중요한 과제로 제기될 것으로 보인다. 그럼에도 불구하고 본 연구의 결과는 종관규모의 대기 패턴을 유형화하고 지역 규모에서 EH 발생의 시공간적 차이를 이해하는 데 중요한 의미가 있다. 이는 중부권의 대기 오염 문제를 보다 깊이 이해하고 해결하기 위한 기초 자료로 활용될 수 있을 것이며, 분석 영역과 기간에 상관없이 고농도 미세먼지 사례에 대한 기상·기후 및 지형학적 연구 방향도 함께 제시하고 있으므로 대기 질 개선을 위한 지자체별 정책 설정에도 유용한 정보를 제공할 것으로 기대된다.

## 감사의 글

본 연구는 환경부의 재원으로 국립환경과학원의 지원(NIER-2021-03-03-007)을 받아 수행하였습니다.

## References

- Adar, S.D., Filigrana, P.A., Clements, N., Peel, J.L. (2014) Ambient Coarse Particulate Matter and Human Health: A Systematic Review and Meta-Analysis, *Current Environmental Health Reports*, 1, 258-274. <https://doi.org/10.1007/s40572-014-0022-z>
- Bae, M.-S., Kim, J.-C., Kim, K.-H., Lee, T., Han, Y.-J., Oh, S.-H., Baek, S.-O. (2023) Research Trend Analysis of Atmospheric Science in Korea Based on Keywords Used in the Journal of the Korean Society for Atmospheric Environment (KOSAE) during 1985-2022, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 39(5), 905-912, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2023.39.5.905>
- Brook, R.D., Brook, J.R., Rajagopalan, S. (2003) Air pollution: The "heart" of the problem, *Current Hypertension Reports*, 5, 32-39. <https://doi.org/10.1007/s11906-003-0008-y>
- Buchard, V., Randles, C.A., Da Silva, A.M., Darmenov, A., Colarco, P.R., Govindaraju, R., Ferrare, R., Hair, J., Beyersdorf, A.J., Ziemba, L.D., Yu, H. (2017) The MERRA-2 aerosol reanalysis, 1980 onward. Part II: Evaluation and case studies, *Journal of Climate*, 30(17), 6851-6872. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0613.1>
- Chae, D.E., Lee, S.-H. (2022) A Study on Spatial Differences in PM<sub>2.5</sub> Concentrations According to Synoptic Meteorological Distribution, *Journal of Environmental Science International*, 31(12), 999-1012, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5322/JESI.2022.31.12.999>
- Chang, L.-S., Lee, G., Im, H., Kim, D., Park, S.-M., Choi, W.J., Lee, Y., Lee, D.-W., Kim, D.-G., Lee, D., Kim, Y.-W., Kim, J., Ho, C.-H. (2021) Quantifying the impact of synoptic weather systems on high PM<sub>2.5</sub> episodes in the Seoul metropolitan area, Korea, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 126(10). <https://doi.org/10.1029/2020JD034085>
- Choi, D., Ham, J., Heo, G., Lee, S.-H., Yoo, J.-W., Yang, G.-H., Jeon, S., Kim, C.-H. (2024) Mesoscale wind field patterns conducive to the high-PM<sub>2.5</sub> episodes over South Korea: Cluster analysis, *Atmospheric Environment*, 333, 120653. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2024.120653>
- Choi, W., Song, M.Y., Kim, J.B., Kim, K., Cho, C. (2023) Regional classification of high PM<sub>10</sub> concentrations in the Seoul metropolitan and Chungcheongnam-do areas, Republic of Korea, *Environmental Monitoring and Assessment*, 195(9), 1075. <https://doi.org/10.1007/s10661-023-11732-6>
- Choi, W.-C., Cheong, K.-S. (2021) Analysis of the Factors Affecting Fine Dust Concentration Before and After COVID-19, *Journal of the Korean Society for Hazard Mitigation*, 21(6), 395-402, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.9798/KOSHAM.2021.21.6.395>
- Chu, B., Zhang, S., Liu, J., Ma, Q., He, H. (2021) Significant concurrent decrease in PM<sub>2.5</sub> and NO<sub>2</sub> concentrations in China during COVID-19 epidemic, *Journal of Environmental Sciences*, 99, 346-353. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2020.06.031>
- 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>
- Gong, J., Shim, C., Choi, K.-C., Gong, S. (2021) The Characteristics of PM<sub>2.5</sub> Pollution and Policy Implications in Chungcheong Region, *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, 43(6), 407-418, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.4491/KSEE.2021.43.6.407>

- Han, S., Um, J. (2023) Scavenging Efficiency Based on Long-Term Characteristics of Precipitation and Particulate Matters in Seoul, Korea, *Atmosphere*, 33(4), 367-385, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.14191/Atmos.2023.33.4.367>
- Han, S.-W., Lee, S.-H., Lee, H.-w. (2015) Study on the Characteristics of PM Distribution in Coastal and Inland Cities Correlation and Its Correlation, *Journal of Environmental Science International*, 24(11), 1513-1523. <https://doi.org/10.5322/JESI.2015.24.11.1513>
- Hwang, K., Park, S., Lee, G., Noh, S., Kim, J., Lee, J.Y., Park, J.-S., Kim, J.B. (2023) Analysis of Chemical Characteristics of PM<sub>2.5</sub> by Region in Chungnam, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 39(6), 1007-1021, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2023.39.6.1007>
- Hwang, K.-W., Kim, J., Kwon, Y.-J. (2021) A Study on the Factors Affecting the Air Environment in Chungnam Province - Focusing on Cheonan, Dangjin, and Seosan, *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, 22(5), 118-127, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5762/KAIS.2021.22.5.118>
- Jee, J.-B., Cho, C.-R., Kim, S.-H., Song, M. (2022) An Analysis of Meteorological Characteristics for Fine Particles on the Korean Peninsula during Wintertime, *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>
- Jeong, J.I., Park, R.J., Yeh, S.-W., Roh, J.-W. (2021) Statistical predictability of wintertime PM<sub>2.5</sub> concentrations over East Asia using simple linear regression, *Science of The Total Environment*, 776. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146059>
- Jeong, Y.-C., Yeh, S.-W., Jeong, J.I., Park, R.J., Yoo, C., Yoon, J.-H. (2023) Intrinsic atmospheric circulation patterns associated with high PM<sub>2.5</sub> concentration days in South Korea during the cold season, *Science of The Total Environment*, 863. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160878>
- Kim, H.C., Kim, S., Son, S.-W., Lee, P., Jin, C.-S., Kim, E., Kim, B.-U., Ngan, F., Bae, C., Song, C.-K., Stein, A. (2016) Synoptic perspectives on pollutant transport patterns observed by satellites over East Asia: Case studies with a conceptual model, *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, [preprint]. <https://doi.org/10.5194/acp-2016-673>
- Kim, J.-A., Lim, S., Shang, X., Lee, M., Kang, K.-S., Ghim, Y.S. (2020a) 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, J.B., Yoon, S.H., Lee, S.S., Kim, K.H., Noh, S., Bae, G.-N. (2020b) Spatial and Temporal Distributions of PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> Concentrations in Chungcheongnam-do, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 36(4), 464-481, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2020.36.4.464>
- Kim, J.-H., Kim, M.-K., Ho, C.-H., Park, R.J., Kim, M.J., Lim, J., Kim, S.-J., Song, C.-K. (2019) Possible link between arctic sea ice and January PM<sub>10</sub> concentrations in South Korea, *Atmosphere*, 10(10), 619. <https://doi.org/10.3390/atmos10100619>
- Kim, J.-H., Kim, M.-K., Kim, S.-J., Kim, J.-H., Yea, S.-W., Lee, S.H., Lee, Y. (2024) Arctic/North Atlantic atmospheric variability causes Severe PM<sub>10</sub> events in South Korea, *Science of The Total Environment*, 914. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169714>
- Kim, J.-H., Kim, S.-J., Youn, D., Kim, M.K., Kim, J.H., Kim, J., Noh, E. (2021a) Impact of North Atlantic-East Asian teleconnections on extremely high January PM<sub>10</sub> cases in Korea, *Environmental Pollution*, 290. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118051>
- Kim, J.-M., Jo, Y.-J., Yang, G.-H., Heo, G., Kim, C.-H. (2020c) Analysis of Recent Trends of Particulate Matter Observed in Busan - Comparative Study on Busan vs. Seoul Metropolitan Area (I), *Journal of Environmental Science International*, 29(2), 177-189, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5322/JESI.2020.29.2.177>
- Kim, M., Choi, J. (2022) A Study on the Establishment of Fine Dust Management Zone, *Journal of the Korean Geographical Society*, 57(4), 401-409. <https://doi.org/10.22776/kgs.2022.57.4.401>
- Kim, S., Kim, O., Kim, B.-U., Kim, H.C. (2017) Impact of Emissions from Major Point Sources in Chungcheongnam-do on Surface Fine Particulate Matter Concentration in the Surrounding Area, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 33(2), 159-173, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2017.33.2.159>
- Kim, Y.-K., Cho, J.-H., Kim, H.-S. (2021b) Analysis of Concentration Variations of Long-Range Transport PM<sub>10</sub>, NO<sub>2</sub>, and O<sub>3</sub> due to COVID-19 Shutdown in East Asia in 2020, *Journal of the Korean Earth Science Society*, 42(3), 278-295. <https://doi.org/10.5467/jkess.2021.42.3.278>
- Kodinariya, T.M., Makwana, P.R. (2013) Review on determining number of Cluster in K-Means Clustering, *International*

- Journal, 1(6), 90-95.
- 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).
- Ku, H.-Y., Noh, N., Jeong, J.-H., Koo, J.-H., Choi, W., Kim, B.-M., Lee, D., Ban, S.-J. (2021) Classification of large-scale circulation patterns and their spatio-temporal variability during High-PM<sub>10</sub> events over the Korean Peninsula, *Atmospheric Environment*, 262. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2021.118632>
- 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. <https://doi.org/10.15531/KSCCR.2018.9.4.423>
- Lee, N.-M., Kim, C.-H. (2021) Long-term Variations of Aerosol Optical Depth and their Associations with Climate Change over East Asia, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 37 (6), 956-971, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2021.37.6.956>
- Lee, S., Ho, C.-H., Choi, Y.-S. (2011) High-PM<sub>10</sub> concentration episodes in Seoul, Korea: Background sources and related meteorological conditions, *Atmospheric Environment*, 45(39), 7240-7247. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.08.071>
- Lee, S.J., Lee, S.-H., Choi, H.-J., Kim, J., Kim, M.-K. (2024) Influence of Local Circulation on Short-term Variations in Ground-level PM<sub>2.5</sub> Concentrations, *Aerosol and Air Quality Research*, 24(10). <https://doi.org/10.4209/aaqr.240042>
- MacQueen, J. (1967) Some methods for classification and analysis of multivariate observations. In: *Proceedings of the fifth Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability*, 1(14), 281-297.
- Martinelli, N., Olivieri, O., Girelli, D. (2013) Air particulate matter and cardiovascular disease: a narrative review, *European Journal of Internal Medicine*, 24(4), 295-302. <https://doi-org.libproxy.kongju.ac.kr/10.1016/j.ejim.2013.04.001>
- Nam, K.-P., Lee, D.-G., Lee, J.-B., Choi, K.-C., Jang, L.-S., Choi, K.-H. (2018) A Study on the Utilization of Air Quality Model to Establish Efficient Air Policies: Focusing on the Improvement Effect of PM<sub>2.5</sub> in Chungcheongnam-do due to Coal-fired Power Plants Shutdown, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 34(5), 687-696, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2018.34.5.687>
- Nam, T.-C., Ryoo, J.-Y., Ryoo, J.-W., Kim, H.-H., Park, J.-Y., Kang, H.-J., Kim, H.-Y., Kang, K.-S., Mun, D.-H., Choi, J.-h., Kim, H.-J. (2023) A Study on the Characteristics of PM<sub>2.5</sub> and Estimation of Source Identification in Jeollabuk-do: Focused on Iksan City, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 39(6), 985-1006, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2023.39.6.985>
- Oh, H.-R., Park, D.-S. R., Kim, D., Ho, C.-H., Lee, S. (2024) Synoptic circulation factors associated with wintertime high-PM<sub>2.5</sub> concentrations in seoul, Republic of Korea: Their interpretations and applications, *Atmospheric Environment*, 325. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2024.120444>
- Park, N.-B. (2021) Decomposition Analysis of Greenhouse Gas Emissions in the Power Industry in Korea Since the COVID-19 Outbreak, *Journal of Energy Engineering*, 30(2), 30-42. <https://doi.org/10.5855/ENERGY.2021.30.2.030>
- Park, S.-H., Kim, S.-C., Kim, D.-S. (2022) A Study on the Characteristics of Local Air Pollutants According to the Analysis of Gunsan Air Pollutants Network Data (2017-2019), *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 38(3), 421-436, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2022.38.3.421>
- Provencal, S., Buchard, V., da Silva, A.M., Leduc, R., Barrette, N., Elhacham, E., Wang, S.H. (2017) Evaluation of PM<sub>2.5</sub> surface concentration simulated by Version 1 of the NASA's MERRA Aerosol Reanalysis over Israel and Taiwan, *Aerosol and Air Quality Research*, 17(1), 253. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2016.04.0145>
- Shin, J.-h., Kim, Y.-m., Park, C.-w., Ahn, J.-j., Yu, H.-n., Kim, J.-s., Jeong, G.-h., Choi, J.-h. (2021) Study on the Characteristics of PM<sub>2.5</sub> Components from Emission Sources in Chungcheongnam-do, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 24(1), 26-34, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.36278/jeaht.24.1.26>
- Shin, M.-K., Lee, C.-D., Ha, H.-S., Choe, C.-S., Kim, Y.-H. (2007) The Influence of Meteorological Factors on PM<sub>10</sub> Concentration in Incheon, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 23(3), 322-331.
- Son, H.-Y., Kim, C.-H. (2009) Interpreting the Spectral Characteristics of Measured Particle Concentrations in Busan, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 25(2), 133-140, (in Korean with English abstract).
- Son, K., Kang, Y.-H., You, S., Kim, E., Bae, M., Kim, S. (2021) Municipi-

- quality-Level Source Apportionment of PM<sub>2.5</sub> Concentrations based on the CAPSS 2016: (VI) Chungcheongbuk-do, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 37(3), 429-455, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2021.37.3.429>
- Son, S.-C., 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, H.-m., Lee, D.-h., Lee, K.-s., An, S.-s., Lee, S.-h., Yang, Y.-c., Kim, S.-j., Juen, H.-d., Seo, G.-y., Do, W.-g., Cho, Y.-g. (2017) Characterization of PM<sub>10</sub> Concentration in Urban Gwangju and Its Source Identification Based on Cluster Analysis of Air Mass Trajectory, *Journal of the Korean Society for Environmental Analysis*, 20(4), 239-251.
- Stein, A.F., Draxler, R.R., Rolph, G.D., Stunder, B.J., 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>
- Wang, Y., Wang, H., Chang, S., Avram, A. (2018) Prediction of daily PM<sub>2.5</sub> concentration in China using partial differential equations, *PLoS One*, 13(6). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0197666>
- Yeo, M.J., Im, Y.S., Yoo, S.S., Jeon, E.M., Kim, Y.P. (2019) Long-term Trend of PM<sub>2.5</sub> Concentration in Seoul, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 35(4), 438-450. <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2019.35.4.438>

### Authors Information

- 현지민 (공주대학교 미세먼지관리센터 석사 후 연구원)  
(jm.hyun1008@gmail.com)
- 김맹기 (공주대학교 대기과학과 교수)  
(mkkim@kongju.ac.kr)
- 김정훈 (공주대학교 지구환경연구소 박사 후 연구원)  
(j.khun1209@gmail.com)
- 상 정 (공주대학교 미세먼지관리센터 연구교수)  
(j.sang0226@gmail.com)
- 이상현 (공주대학교 대기과학과 교수)  
(sanghyun@kongju.ac.kr)