

논문

충청권 PM_{2.5} 국지적 변동성의 공간상관성 분석

Spatial Correlation Analysis on PM_{2.5} Local Variability in the Chungcheong Area

서지훈, 권재은¹⁾, 김종범²⁾, 윤대옥³⁾, 김경환, 이광열⁴⁾, 김진영*

한국과학기술연구원 기후·환경연구소, ¹⁾서울과학기술대학교 안전공학과

²⁾충남연구원 서해안기후환경연구소, ³⁾충북대학교 지구과학교육과

⁴⁾국립환경과학원 대기환경연구과

접수일 2023년 12월 15일

수정일 2024년 1월 8일

채택일 2024년 1월 9일

Received 15 December 2023

Revised 8 January 2024

Accepted 9 January 2024

*Corresponding author

Tel : +82-(0)2-958-5826

E-mail : jykim@kist.re.kr

Jihoon Seo, Jaeun Gweon¹⁾, Jong Bum Kim²⁾, Daeok Youn³⁾, Kyung Hwan Kim, Kwangyul Lee⁴⁾, Jin Young Kim*

Climate and Environmental Research Institute, Korea Institute of Science and Technology, Seoul, Republic of Korea

¹⁾Department of Safety Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Seoul, Republic of Korea

²⁾Seohae Research Institute, ChungNam Institute, Hongseong, Republic of Korea

³⁾Department of Earth Science Education, Chungbuk National University, Cheongju, Republic of Korea

⁴⁾Climate & Air Research Department, National Institute of Environmental Research, Incheon, Republic of Korea

Abstract Particulate air quality in the Chungcheong Area, mainly covering Chungcheongnam-do, Chungcheongbuk-do, Daejeon, and Sejong, is intricately influenced by regional transport from the Seoul Metropolitan Area and long-range transport from China of particulate matter (PM) and precursors, as well as local emissions originating from coal-fired power plants, petrochemical and industrial complexes, steelworks, and livestock farms along its western coasts. Consequently, concerns arise regarding the impact of these local emissions on PM air quality in inland cities within the Chungcheong Area. However, the relationships within the area concerning the variability of PM between the western source area and the inland cities have not been revealed. This study investigates spatial ranges sharing local variability in PM_{2.5} at the five coastal near-source sites, including the Pyeongtaek-hang site adjacent to Dangjin, and the five inland cities in the Chungcheong Area for the years 2021~2022. To isolate local variability from regional fluctuations related to long-range transport, secondary production, accumulation, and ventilation driven by synoptic meteorology, spatial deviation from the spatial mean PM_{2.5} concentration was utilized. The results indicate that the local variability of PM_{2.5} in the northwestern coastal sites (Dangjin, Pyeongtaek, Seosan) does not show a significant correlation ($p < 0.01$) with that of the inland cities. On the other hand, the western coastal sites (Taeon, Boryeong) exhibit some degree of correlation ($R > 0.4$) with the southeastern inland cities. Inorganic and carbonaceous PM_{2.5} species at Seosan show little correlation with other sites in the Chungcheong Area, except for sulfate and nitrate at Dangjin. This study underscores the necessity to treat the western coastal area and inland area of the Chungcheong Area as distinct entities in future PM air quality management efforts.

Key words: Chungcheong Area, PM_{2.5}, Local variability, Air quality monitoring station, Spatial correlation analysis

1. 서론

대기 중에 부유하는 입자상 물질 (particulate matter; PM) 중 공기역학적 직경이 2.5 μm 이하인 초미세 먼지 (PM_{2.5})는 흡입 시 폐포를 통해 심혈관계로 직접 유입되어 체내에서 활성산소 생성, 산화스트레스 유

발 및 염증반응 증가로 인한 각종 호흡기 및 심혈관 질환을 야기하는 대표적인 대기오염물질이다 (Gangwar *et al.*, 2020; Pope and Dockery, 2006).

우리나라에서는 최근 PM_{2.5}에 대한 국민적 우려가 증대되어 왔으며, 이에 정부에서는 미세먼지관리 종합대책을 수립하여 추진해왔다 (Yeo and Kim, 2019).

이에 따라 2019년 3월부터 시행된 “미세먼지 저감 및 관리에 관한 특별법”을 통해 $PM_{2.5}$ 의 전구물질인 질소산화물(nitrogen oxides, NO_x), 황산화물(sulfur oxides, SO_x), 암모니아(NH_3), 휘발성유기화합물(volatile organic compounds; VOCs) 등의 배출을 저감하는 한편, 2020년 4월부터 시행된 “대기환경개선에 관한 특별법”을 통해서 기존에 수도권에 대해서만 적용했던 배출허용기준 강화, 대기오염물질 배출허용총량제 적용 및 5등급차량 운행제한 등을 신설된 중부권, 동남권, 남부권 대기관리권역으로 확대하였다.

이 중 중부권 대기관리권역은 대전, 세종, 충남(금산 제외), 충북(괴산, 보은, 옥천, 영동 제외)과 전북 일부지역(전주, 익산, 군산)을 포함하고 있으며, 전북 일부 도시지역을 제외하면 대체로 충청권(대전, 세종, 충남, 충북)과 영역이 중첩되어 있다. 충청권은 지리적으로는 한반도의 서쪽에 위치하여 중국과 몽골 등지로부터 유입되는 미세먼지 및 전구물질의 장거리수송 영향을 받는 한편, 북쪽으로 수도권 대기관리권역과 인접하여 경기 남부의 안산, 평택, 화성 등의 산업 및 에너지 시설, 항만 등으로부터 배출된 오염물질의 권역간 이동 영향이 상존하는 지역이다(Kim *et al.*, 2021; Oh, 2007).

그러나 충청권에서 대기질 악화의 주요 요인으로 주목받는 것은 충남 서해안을 따라 위치한 다수의 석탄화력발전소, 석유화학단지 및 제철소 등 대규모 점오염원(Kim *et al.*, 2021; Kim *et al.*, 2020; Son *et al.*, 2020)에서 배출되는 $PM_{2.5}$ 및 SO_x , NO_x , VOCs와 같은 전구물질들과 홍성, 예산, 공주, 천안 등 충남 내륙의 축사 밀집 지역(Choi *et al.*, 2018)에서 배출되는 NH_3 이다. 2020년 기준으로 산정된 대기정책지원시스템(clean air policy support system, CAPSS)에 따르면 충청권(대전, 세종, 충남, 충북)에서 배출되는 SO_x , NO_x , VOCs, NH_3 는 전국 배출량 대비 각각 23.6%, 14.9%, 13.1%, 22.9%를 차지하고 있으며, 이는 수도권(서울, 인천, 경기)의 SO_x , NO_x , VOCs, NH_3 배출량이 전국 배출량 대비 각각 7.9%, 28.2%, 29.9%, 17.8%임

을 감안하였을 때 상당히 높은 비율이라 할 수 있다(NAIR, 2023).

서풍 계열의 바람이 지배적인 한반도의 기상 조건을 감안할 때 주로 풍상측인 서해안 지역에 위치한 대규모 점오염원들은 충청권 내륙의 주요 인구 및 행정의 중심지인 대전, 세종, 천안, 아산, 청주 등의 미세먼지 오염에 상당부분 영향을 미치는 것으로 여겨지고 있다(Nam *et al.*, 2018). 충남 서해안의 화력발전시설에서 배출된 미세먼지 및 전구물질들이 풍향에 따라서는 수도권의 지표면 미세먼지 및 전구물질 농도 변화에도 영향을 미치고 있음에 비추어 봤을 때(Ju and Youn, 2019), 서해안의 주요 오염물질 배출시설들에 의한 충청권 내륙 도시의 대기질 악화에 대한 우려는 타당하다고 할 수 있다.

이러한 우려에도 불구하고, 충청권의 주요 미세먼지 및 전구물질 배출원과 내륙 도시의 미세먼지 대기질 사이의 인과관계에 대한 구체적인 근거는 연구가 부족한 실정이다. 그러나 최근 도시대기측정망(air quality monitoring station; AQMS)의 확대에 따라 각 시·군별 주요 환경기준물질(SO_2 , NO_2 , CO, O_3 , PM_{10} , $PM_{2.5}$) 자료가 생산되고 있어 이들 오염물질의 시공간분포 분석이 가능하게 되었다. 특히, 이러한 측정자료의 공간적 상관분석 및 군집분석을 통해 미세먼지 오염의 특징을 공유하는 권역을 분류하는 연구 역시 수행되고 있다. 그 예로, $PM_{2.5}$ 농도의 측정소 간 상관분석 및 다차원척도법을 사용하여 경기도의 측정망을 4개의 권역으로 분류하거나(Lee *et al.*, 2021), 수도권과 충남, 세종, 대전 지역의 PM_{10} 농도의 K-means 군집분석을 통해 이 지역을 각기 충남 서부, 아산만 일대 및 충남 내륙, 수도권 서부와 수도권 동부의 4개 권역으로 분류하는 등의 연구가 수행되었다(Choi *et al.*, 2023).

최근 충남지역을 대상으로 실시된 PM_{10} 및 $PM_{2.5}$ 의 공간상관분석 연구에서는 충남 지자체간 대기오염물질의 공간상관성이 매우 높은 것으로 조사되었으며($R=0.68\sim0.98$), 특히 충남 북부(당진, 아산, 천안)와 서부(예산, 홍성, 보령) 및 남부(공주, 논산) 사

이, 그리고 충남 서부(예산, 홍성, 보령, 서천)와 남부(공주, 논산) 사이에서 높은 상관성을 보였다(Kim *et al.*, 2020). 그러나 이 연구에서 도출한 지자체 간 미세먼지 농도의 높은 공간상관성은 한반도의 넓은 영역에 걸친 미세먼지 농도 변동성의 원인이 될 수 있는 중국으로부터의 장거리수송의 영향, 종관기상장의 변화에 따른 대기의 정체 및 확산, 이에 따른 고농도 미세먼지의 발생 또는 해소에 기인했을 가능성이 높다(Seo *et al.*, 2018, 2017). 따라서 각 지자체 간 미세먼지 농도의 공간상관분석에 있어, 대기오염물질과 미세먼지의 농도 변동에 대한 지역배출원 또는 다른 국지적 영향을 살펴보기 위해서는 장거리수송 또는 종관기상장의 변화에 기인하는 광역변동성을 먼저 배제할 필요가 있다. 관측자료로부터 국지적 변동성을 분리해내는 가장 간단한 방법은 배경농도를 정의하여 관측자료와의 차이를 구하는 것이며, 배경농도는 연구 목적에 따라 다양하게 정의된다(Hilker *et al.*, 2021; Wang *et al.*, 2020).

이 연구에서는 충청권의 PM_{2.5} 특성을 보다 잘 이해하기 위해 주요 배출원 및 도시지역을 중심으로 PM_{2.5} 농도의 국지적 변동에 있어 높은 상관성을 보이는 영역을 분석하였다. 이때 PM_{2.5} 농도의 공간평균 시계열을 통해 종관기상장의 변화 또는 장거리수송의 영향에 따른 PM_{2.5} 농도의 광역변동 성분을 정의하고, 각 지점별 PM_{2.5}의 공간평균에 대한 편차를 통해 해당 지점의 PM_{2.5} 농도의 국지적 변동성분을 정의하였다. 이렇게 구한 PM_{2.5} 국지적 변동성 간의 공간상관성 분석을 통해, 배출원 인근 또는 주요 도시지역의 국지적 PM_{2.5} 농도 변화와 서로 영향을 주고받는 실질적인 공간적 범위를 제시하고자 하였다.

2. 자료 및 방법

2.1 자료

2.1.1 도시대기 측정소 자료

이 연구에서는 충청권 내의 PM_{2.5} 농도의 공간상관

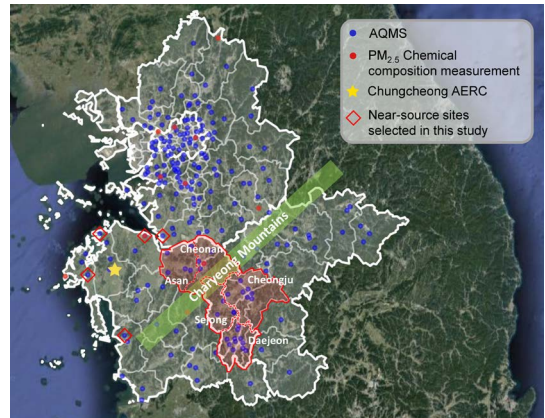


Fig. 1. Geographical locations of the air quality monitoring stations (AQMS), PM_{2.5} chemical composition measurement sites, Chungcheong Atmospheric Environment Research Center (AERC), and the five near-source sites selected in this study. The five major inland cities in the Chungcheong area analyzed in this study are shaded in light red (satellite images courtesy of Google Earth Pro).

분석을 수행하기 위해 한국환경공단의 에어코리아(www.airkorea.or.kr)에서 제공하는 2021년 1월 1일부터 2022년 12월 31일까지의 수도권(서울, 인천, 경기) 및 충청권(대전, 세종, 충북, 충남) 소재 총 235개 도시대기 측정소(AQMS)의 PM_{2.5}, NO₂, SO₂의 1시간 농도 자료를 주로 사용하였다(그림 1). 선행연구에서 우리나라 고농도 PM_{2.5} 현상은 남한 전역에 걸쳐 24시간 미만의 시간 차를 두고 발생하였음을 보인 바 있다(Han *et al.*, 2023). 이 연구는 이보다 작은 범위인 반경 약 100 km 내외의 충청권 내에서의 PM_{2.5} 공간상관성에 초점을 맞추고 있으므로, 일 단위 시간해상도에서 동시적 상관분석만을 수행하였으며, 이를 위해 PM_{2.5}, NO₂, SO₂의 일평균 농도를 구하여 사용하였다. 일평균 농도는 환경부 대기오염측정망 설치·운영지침(MOE and NIER, 2022)에 따라 하루 75% (18시간) 이상의 유효 자료가 존재하는 경우에 한해 계산하였다. 측정소별 일평균 농도는 다시 수도권 및 충청권의 113개 시·군·구별로 평균하여 각 지자체별 일평균 농도 시계열로 변환하였다. 전체 분석기간(2021~2022년)의 총 730일 중 수도권 및 충청권의 전체 시·군·구에서 결측일이 서로 겹치지 않는 유효측

Table 1. Annual average concentrations of daily PM_{2.5} and its chemical components at PM_{2.5} chemical composition measurement sites in the Seoul Metropolitan Area (Seoul and Gyeonggi-do) and the Chungcheong Area (Chungcheongnam-do) in 2021.

Province	City/County	Site	N	PM _{2.5} ($\mu\text{g m}^{-3}$)	SO ₄ ²⁻ ($\mu\text{g m}^{-3}$)	NO ₃ ⁻ ($\mu\text{g m}^{-3}$)	NH ₄ ⁺ ($\mu\text{g m}^{-3}$)	OC ($\mu\text{g m}^{-3}$)	EC ($\mu\text{g m}^{-3}$)
Seoul	Seoul	Gwangjin-gu	65	23.8	3.2	6.7	3.5	4.3	0.7
		Enpyeong-gu	60	23.7	3.4	7.0	3.5	4.9	0.7
		Banghwa-dong	57	22.2	3.2	5.2	2.8	4.3	0.8
Gyeonggi-do	Suwon	Sinpung-dong	50	25.8	3.3	7.5	3.7	5.1	0.8
	Ansan	Gojan-dong	62	22.9	3.4	6.2	3.3	5.1	0.9
	Icheon	Seolseong-myeon	61	23.7	3.2	6.8	3.6	4.7	0.7
	Pocheon	Gwanin-myeon	41	17.4	2.8	3.3	2.1	3.4	0.6
Chungcheongnam-do	Cheonan	Seonghwang-dong	42	17.8	2.4	2.6	1.6	4.6	0.5
	Gongju	Sagok-myeon	55	17.4	2.5	3.2	1.7	3.9	0.4
	Dangjin	Songsan-myeon	60	25.6	3.5	4.4	2.5	5.0	0.6
	Taeon	Pado-ri	59	16.7	2.1	2.0	1.3	3.2	0.4
	Seosan [†]	AERC	65 [†]	26.9	3.0	5.3	3.2	4.3	0.9

[†] Chungcheong Atmospheric Environment Research Center at Seosan

[‡] Daily averaged data, of which date were chosen as same as the Gwangjin-gu PM_{2.5} site

정일은 총 522일로, 공간상관분석은 해당 유효측정일에 한해 수행하였다. 각 계절별 공간상관분석에 사용된 유효측정일 수는 겨울(12~2월) 168일, 봄(3~5월) 117일, 여름(6~8월) 99일, 가을(9~11월) 138일이었다.

2. 1. 2 PM_{2.5} 성분 자료

PM_{2.5}의 개별 무기이온(NO₃⁻, SO₄²⁻, NH₄⁺ 등) 및 탄소성분(Organic carbon; OC, Elemental carbon; EC)에 대한 공간상관성 분석은 2021년 충남 서산시 소재 충청권 대기환경연구소에서 측정한 시간 자료와 PM_{2.5} 성분측정망 중 서울, 경기, 충남 소재 11개소에서 측정한 6일 간격의 일별 자료를 함께 활용하였다(그림 1). 상관성 분석을 위해 충청권 대기환경연구소의 시간 자료는 PM_{2.5} 성분측정망의 측정일과 동일한 날짜에 대한 일평균을 구하여 사용하였으며, 총 12개소의 측정소별로 41~65개의 자료가 활용되었다(표 1).

2. 1. 3 공간상관분석을 위한 측정소 및 지자체 선정

충청권 내에서 대기오염물질의 변동성이 배출원과 높은 상관성을 가지는 공간적 범위를 살펴보기 위해

충남 서해안에 위치한 주요 배출원과 인접한 AQMS 측정소 다섯 곳을 선정하였다(표 2). 충남 시·군별 대기오염물질의 배출량은 대체로 당진, 서산, 보령, 천안, 태안, 아산 등에서 높다(Kim *et al.*, 2020). 이들 지역 중 인구밀집지역에 해당하는 천안과 아산을 제외한 당진, 서산, 보령, 태안에는 충청권의 주요 산업 시설 및 에너지시설들이 위치해 있으므로 이들 배출원의 인근, 또는 배출원이 포함된 지자체 내에서 결측이 적은 측정소 네 곳을 선정하였다. 먼저 제철소가 위치한 당진에서는 송산면 측정소를, 국내 3대 석유화학단지의 한곳인 대산석유화학단지가 위치한 서산에서는 대산리 측정소를, 태안화력발전소(설비용량 6,451 MW)가 위치한 태안에서는 태안을 측정소를, 보령화력발전소(설비용량 5,360 MW)가 위치한 보령에서는 발전소 인근의 주교면 측정소를 각각 선정하였다. 한편, 수도권 대기관리권역에 속하지만 아산만을 사이에 두고 당진과 아산을 마주한 평택 소재 포승산업단지 및 항만의 영향을 고려하여 평택항 측정소를 추가 선정하였다.

또한 충청권 소재 주요 인구밀집지역의 대기오염물질 변동성이 높은 상관성을 가지는 공간적 범위를 살펴보기 위해 각 도시들의 인구를 고려하여 대전,

Table 2. List of five near-source sites and their average concentrations of PM_{2.5}, NO₂, and SO₂ for 2021~2022.

City/County	Site	Related emission source	PM _{2.5} (μg m ⁻³)	NO ₂ (ppb)	SO ₂ (ppb)
Dangjin	Songsan-myeon	Steel industrial complex	24.2	14.3	5.6
Seosan	Daesan-ri	Daesan petrochemical complex	17.4	14.1	3.5
Taeon	Taeon-eup	Coal-fired power station	17.5	12.4	3.1
Boryeong	Jugyo-myeon	Coal-fired power station	19.6	11.8	3.4
Pyeongtaek	Pyeongtaek-hang	Poseung industrial complex	23.6	18.4	3.0

Table 3. List of five major cities in the Chungcheong Area and their average concentrations of PM_{2.5}, NO₂, and SO₂ for 2021~2022.

City	Population (thousands, in 2022)	Number of sites	PM _{2.5} (μg m ⁻³)	NO ₂ (ppb)	SO ₂ (ppb)
Daejeon	1,441	11	16.7	17.4	3.2
Cheongju	847	7	20.7	16.2	2.2
Cheonan	655	4	22.8	17.4	3.3
Sejong	383	4	17.9	16.0	3.1
Asan	333	5	24.0	14.8	3.7

청주, 천안, 세종, 아산을 선정하였다(표 3). 이때, 측정소별 일평균 PM_{2.5} 농도를 먼저 구한 뒤, 이를 다시 도시별로 평균해 해당 도시의 PM_{2.5} 시계열로 사용하였다.

이 연구에서 선정한 각 배출원 관련 AQMS 측정소와 주요 도시의 2021년~2022년 평균 PM_{2.5} 농도는 모두 대기환경 연평균 기준치인 15 μg m⁻³을 초과하고 있다(표 2, 3). 평균 PM_{2.5} 농도는 도시들 중에서는 천안과 아산에서 상대적으로 높았으며 (23~24 μg m⁻³), 배출원 관련 측정소들 중에서는 천안과 아산에 각각 서쪽과 북쪽으로 인접한 당진 송산면과 평택항에서 높았다(24 μg m⁻³). 시·군별 배출량 기준으로 천안과 아산은 비산먼지 및 연소에 의해 직접 배출되는 PM_{2.5} 배출량이 타 인구밀집지역에 비해 높지 않아(표 4), 이 지역의 상대적으로 높은 PM_{2.5} 농도는 인접 배출원에서의 수송 및 2차생성이 원인일 것으로 보인다. 당진 송산면 측정소는 PM_{2.5}와 함께 SO₂ 농도도 높은 것이 특징인데, 이는 단일사업장으로는 충남 내 PM_{2.5} 및 SO_x의 배출 기여가 가장 큰 당진제철소와 관련이 있으며(Kim *et al.*, 2020; Lee and Park, 2019), 이에 따라 서산의 SO_x 배출량은 타 지역에 비

해 월등히 높다(표 4). 평택항 측정소는 NO₂의 평균 농도가 다른 배출원 관련 측정소들 중 가장 높았으며 당진 송산면과 서산 대산리 측정소의 NO₂ 농도 역시 자동차에 의한 NO_x 배출이 많은 도심이 아님에도 상대적으로 높은 편으로, 이는 평택, 당진 및 서산에서 산업활동(생산공정, 에너지산업, 제조업)에 의한 NO_x의 배출량이 주로 이동오염원 및 비산업연소에 의해 배출되는 대전과 같은 인구밀집지역의 NO_x 배출량에 못지않게 많기 때문이다(표 4).

2.2 방법

국내 미세먼지 농도의 단기변동성은 지역오염원에서 배출되거나 2차생성된 미세먼지의 축적이 일어나기 쉬운 대기정체조건이나 국외로부터 미세먼지의 장거리수송을 유발할 수 있는, 이동성 고기압 또는 저기압의 이동과 관련된 종관기상장의 변화에 주로 기인한다(Seo *et al.*, 2018, 2017). 종관규모 기상장의 변화(수평규모 약 1,000 km, 시간규모 1일~수일)에 따른 미세먼지 농도의 증감은 공간적 규모가 상대적으로 작은 대기관리권역 및 인접지역의 미세먼지 농도변화를 동일한 방향으로 이끌어 결과적으로 각 지

Table 4. Air pollutant emissions at each city/county, listed in Tables 2 and 3, in 2021 (NAIR, 2023).

City/County	PM _{2.5} (ton yr ⁻¹)	PM ₁₀ (ton yr ⁻¹)	TSP (ton yr ⁻¹)	NO _x (ton yr ⁻¹)	SO _x (ton yr ⁻¹)	NH ₃ (ton yr ⁻¹)	VOC (ton yr ⁻¹)
Cities/counties that include the five near-source sites, listed in Table 2							
Dangjin	1,686	2,614	5,542	16,725	10,210	5,903	9,294
Seosan	458	938	2,606	16,453	15,909	5,542	28,129
Taeon	374	612	1,240	5,393	3,545	2,339	1,537
Boryeong	427	756	1,796	4,306	3,303	3,484	2,896
Pyeongtaek	634	1,882	4,998	11,608	182	3,186	11,012
Major inland cities listed in Table 3							
Daejeon	513	1,589	4,925	11,923	166	1,422	15,452
Cheongju	636	1,934	5,863	10,104	296	2,893	17,011
Cheonan	531	1,718	5,186	8,245	190	5,167	12,935
Sejong	288	825	2,450	3,956	65	2,493	5,569
Asan	380	1,250	3,515	5,789	322	2,159	10,875

점 간 미세먼지 농도의 공간상관성을 높이게 된다. 따라서 특정 지점의 미세먼지 농도 변동과 높은 상관성을 보이는 공간 범위를 각 지점별 특성 관점에서 살펴보기 위해서는, 각 지점별 미세먼지 농도의 시계열에서 해당 지점을 포함하는 넓은 영역에 걸쳐 함께 증감하는 광역변동성을 찾아 제거한 뒤, 잔여성분의 시계열을 구하여 이들의 지점 간 상관성을 분석할 필요가 있다.

각 지점별 미세먼지 농도의 시계열 $\chi(t, s)$ 는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\chi(t, s) = \bar{\chi}(t) + \varepsilon(t, s) \quad (1)$$

$\bar{\chi}(t)$ 는 전체 지점의 미세먼지 시계열들을 평균한 미세먼지의 공간평균 시계열을, $\varepsilon(t, s)$ 는 각 지점별 특성을 지닌 공간편차의 시계열을 나타낸다.

이 연구의 분석대상지역인 충청권은 북쪽에 인접한 수도권의 다양한 오염물질 배출원들로부터의 권역간 수송의 영향을 받을 가능성이 많은 지역이므로, 충청권(대전, 세종, 충남, 충북)과 수도권(서울, 인천, 경기)에 위치한 총 235개 측정소의 PM_{2.5} 농도 시계열의 공간평균을 통해 충청권 및 수도권을 포괄하는 PM_{2.5} 농도의 일평균 시계열($\bar{\chi}$)을 정의하고(그림 2), 이로부터 지점별 농도 편차의 시계열(ε)을 구하여 기

준 지점과 나머지 지점 간의 공간상관성 분석에 활용하였다. 충청권과 수도권의 235개 측정소를 사용한 PM_{2.5} 농도의 공간평균 시계열은 충청권의 80개 측정소만을 사용한 PM_{2.5} 농도의 공간평균 시계열과 높은 상관계수를 가지며($R=0.97$), 두 시계열의 분석기간 평균과 표준편차 역시 유사하여(충청권 + 수도권 평균: $19.4 \pm 12.7 \mu\text{g m}^{-3}$, 충청권 평균: $20.1 \pm 12.3 \mu\text{g m}^{-3}$), 수도권에 밀집된 측정소에 의한 공간평균 농도의 편향성은 이 연구에서 고려하지 않았다. 한편 PM_{2.5} 개별성분 농도의 공간평균은 서울, 경기, 충남의 12개 측정소(표 1)의 일 농도 시계열을 평균하여 구하였으며, 이에 대한 공간편차를 활용해 충청권 대기환경연구소와 나머지 지점들 간의 상관분석을 수행하였다.

그림 2에 나타난 충청권 및 수도권 평균 PM_{2.5} 농도의 2021년~2022년 평균은 $19.4 \mu\text{g m}^{-3}$ 으로 연평균 PM_{2.5} 농도에 대한 국내 대기환경기준인 $15 \mu\text{g m}^{-3}$ 를 초과한다. 해당 기간은 2021년 총 14일, 2022년 총 5일의 황사관측일을 포함하고 있다. 충청권 및 수도권 평균 PM_{2.5} 농도 시계열에서 보이는 PM_{2.5} 고농도 발생일 중 몇몇 사례는 황사의 영향임을 알 수 있으며, 이는 황사가 장거리수송의 영향으로 한반도의 넓은 영역에 걸쳐 영향을 미치기 때문이다(Choi *et al.*,

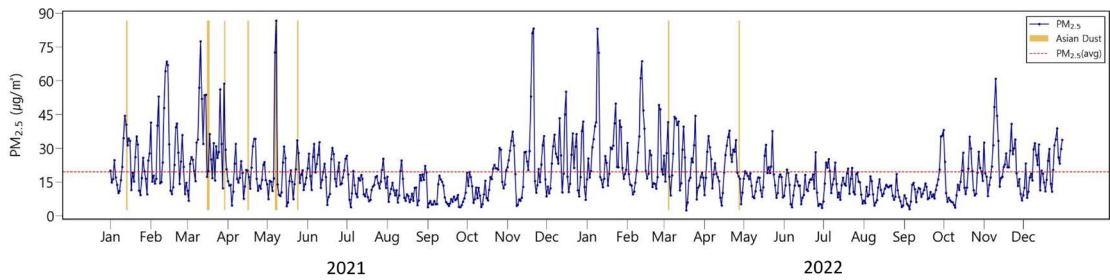


Fig. 2. Daily PM_{2.5} concentration averaged for 235 air quality monitoring stations (AQMS) in the Seoul Metropolitan Area and the Chungcheong Area. Yellow bars indicate the Asian dust events. Red horizontal line is the average PM_{2.5} concentration of the time series ($19.4 \mu\text{g m}^{-3}$).

2021). 충청권과 수도권을 포괄하는 전국 규모의 황사에 의한 PM_{2.5} 농도의 변동성은 그림 2에서 보이듯 주로 공간평균 농도의 시계열에 반영되므로, 이 연구에서 수행한 지점별 공간편차들 사이의 상관성에는 큰 영향을 미치지 않는다.

대기오염물질 농도의 공간평균에 대한 기준 지점에서의 편차와 나머지 지점들에서의 편차 간 차이는 지점 간 거리가 멀어질수록 커지며, 기준 지점과 반대 부호의 편차를 가지는 지점이 해당 공간 내에서 기준 지점과 먼 곳에 반드시 존재한다. 따라서 이러한 공간편차들 사이의 상관관계는 대체로 기준 지점에서 가까운 지역에서는 양의 상관성을, 먼 지역에서는 음의 상관성을 가지는데, 양의 상관성이 나타나는 지역은 기준 지점과 배출원-수용지 관계이거나 상호간 유사한 환경 및 배출특성으로 인해 대기오염물질의 국지적 변동성을 공유하는 지역을, 음의 상관성이 나타나는 지역은 기준 지점과 대기오염물질의 국지적 변동성을 전혀 공유하지 않는 지점을 나타낸다. 따라서 상관계수가 양이면서도 일정 기준의 통계적 유의성(e.g., $p < 0.01$)을 가질 경우, 두 지점의 PM_{2.5} 농도 공간편차 간에 의미있는 상관성이 존재한다고 할 수 있다. 그러나 2년간의 일평균 자료를 사용한 이 연구에서 각 지점별 시계열에는 500개 이상의 자료가 사용되어, 두 지점의 PM_{2.5} 농도 변동성 간 설명력이 매우 작은 $R = 0.2$ 정도의 상관계수라도 $p < 0.001$ 이하의 통계적 유의성을 갖는다. 따라서 여기에서는 두 지점 간 상관계수의 유의성과 설명력을 모두 고려

하여 $R > 0.4$ 인 경우 어느 정도 의미 있는 상관성을 보인다고 간주하고, $R > 0.6$ 인 경우에는 높은 상관성을 보이는 것으로 해석하였다.

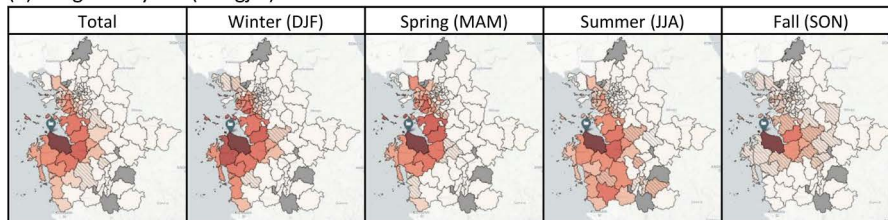
3. 결과 및 고찰

3.1 서해안 주요 배출원 기준 PM_{2.5}의 공간상관성 분석

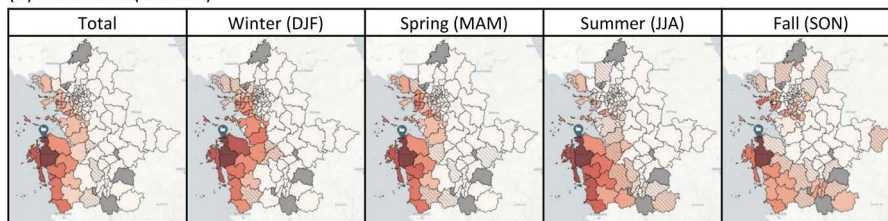
그림 3은 이 연구에서 선정한 다섯 곳의 주요 대기오염물질 배출원 관련 측정소들을 기준으로 전체 분석기간 및 각 계절별 기간(겨울 12~2월; 봄 3~5월; 여름 6~8월; 가을 9~11월)에 대한 해당 측정소의 PM_{2.5} 농도의 공간편차와 수도권 및 충청권의 각 지자체 평균 PM_{2.5} 농도의 공간편차 간 상관계수를 지도상에 시각화한 것이다.

제철소 인근에 위치한 당진 송산면 측정소의 PM_{2.5} 농도 공간편차는 당진, 아산과 높은 상관성을 보였으며($R > 0.6$), 충남 서부의 서산, 홍성, 예산, 수도권 서남부의 평택, 화성, 안산, 시흥과도 상관성을 보였다($R > 0.4$) (그림 3a). 계절별로는 겨울 및 봄에는 전체 기간에 대한 분석결과와 유사한 공간상관분포를 보였으며, 여름에는 공간상관성이 높은 영역이 충남 동남부까지 확장되는 반면 가을에는 타지역과의 공간상관성이 대체로 낮았다. 송산면 측정소와 공간상관성이 높은 지자체들은 반경 약 50 km 범위 내에서 차령산맥 산지 북서쪽에 위치하고 있으며, 차령산맥 산

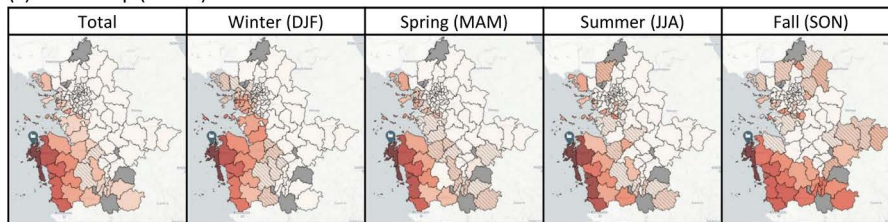
(a) Songsan-myeon (Dangjin)



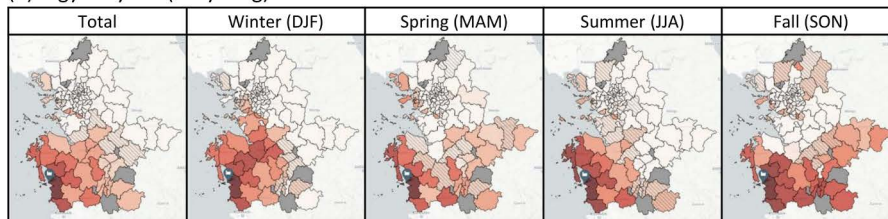
(b) Daesan-ri (Seosan)



(c) Taeon-eup (Taeon)



(d) Jugyo-myeon (Boryeong)



(e) Pyeongtaek-hang (Pyeongtaek)

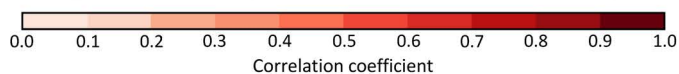
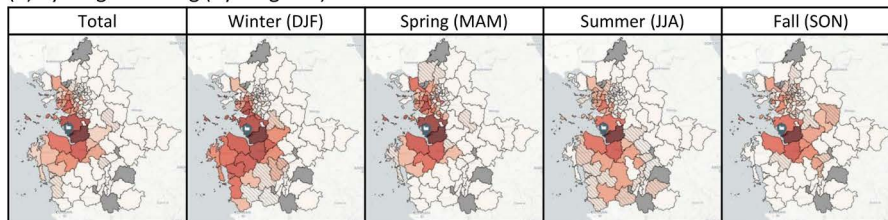


Fig. 3. Correlation coefficient map of the spatial $PM_{2.5}$ deviation for five near-source sites of (a) Songsan-myeon site in Dangjin, (b) Daesan-ri site in Seosan, (c) Taeon-eup site in Taeon, (d) Jugyo-myeon site in Boryeong, and (e) Pyeongtaek-hang site in Pyeongtaek. Area of city/county, of which positive correlation is statistically significant at the 99% confidence level, are unhatched in the map. Areas of the city/county with a negative correlation are not shaded, and data are unavailable in the gray-colored city/county.

지의 남쪽 및 동쪽인 공주, 세종, 청주, 진천 등과는 상관성을 보이지 않았다. 이는 충청권 PM_{2.5} 농도의 국지적 변동성에 있어 충남 서북부와 동남부가 차령 산맥 산지를 기준으로 분리되어 있음을 보여준다.

석유화학단지 인근에 위치한 서산 대산리 측정소의 PM_{2.5} 농도 공간편차는 서산, 태안과 높은 상관성을 보였으며 ($R > 0.6$), 충남 서해안의 당진, 예산, 홍성, 보령, 서천과도 상관성을 보였다 ($R > 0.4$) (그림 3b). 서쪽에 위치한 당진 송산면 측정소와 비교했을 때 공간상관성이 높은 영역이 전체적으로 남서쪽으로 이동하였으나, 서해안의 보령, 서천을 제외하면 차령산맥 산지를 기준으로 남쪽 및 동쪽의 충청권 내륙 지역에서 상관성을 보이지 않는 특징은 송산면 측정소와 동일했다. 계절별 공간상관분포 역시 송산면 측정소와 대체로 유사한 특징을 보이는데, 겨울 및 봄에는 전체기간에 대한 분석결과와 유사했으며, 여름에는 상관성이 높은 영역이 충남 동남부까지 확장된 반면 가을에는 그 영역이 다소 축소되었다.

태안을 측정소 기준 PM_{2.5} 농도 공간편차는 서해안 지자체들인 태안, 서산, 홍성, 보령, 서천과 높은 상관성을 보였으며 ($R > 0.6$), 인접한 내륙의 예산, 청양과도 상관성을 보였다 ($R > 0.4$) (그림 3c). 북동쪽에 위치한 송산면, 대산리 측정소에 비해 태안을 측정소의 경우 상관성을 가지는 영역이 대전, 세종과 충남 동남 내륙지역까지 확장된 반면, 수도권 남부와는 공간상관성은 다소 떨어졌다. 계절별로는 겨울 및 봄의 경우 전체기간에 대한 분석결과와 유사하나 겨울에는 수도권 남서부와, 봄에는 남쪽의 서해안에 접한 지자체들과 상관계수가 높았다. 여름에는 서산, 보령과 매우 높은 상관성 ($R > 0.8$)이 나타나는 한편 가을에는 앞서 보인 송산면, 대산리 측정소의 경우와 달리 상관성을 보이는 영역이 충청권 내륙까지 확장되었다.

석탄화력발전소와 인접한 보령 주교면 측정소를 기준으로 한 PM_{2.5} 농도 공간편차는 보령, 태안, 홍성, 청양, 서천과 높은 상관성을 보였으며 ($R > 0.6$), 충남 서북부의 서산, 예산뿐 아니라 논산, 세종과 같은 충청

권 내륙과도 상관성을 보였다 ($R > 0.4$) (그림 3d). 그러나 수도권 남부와는 뚜렷한 공간상관성은 거의 나타나지 않았다. 계절별로는 태안을 측정소와 유사하게 겨울에 예산, 아산, 천안 방면으로 높은 상관성을 보이는 반면, 봄에는 주로 서천, 논산 등 남쪽의 상대적으로 좁은 영역에서 상관성을 보였다. 여름에는 태안, 서천에서 매우 높은 공간상관성을 보였으며 ($R > 0.8$), 가을에는 높은 공간상관성을 보이는 영역이 대전, 세종, 논산을 넘어 옥천, 영동 등 충북 내륙 지역까지 넓게 확장되어 충청권 전체에 걸쳐 높은 공간상관성을 보였다.

수도권 남서부에 위치해 아산만을 사이에 두고 당진과 마주보고 있는 평택항 측정소를 기준으로 한 PM_{2.5} 농도 공간편차는 평택, 화성, 시흥, 아산과 높은 상관성을 보였으며 ($R > 0.6$), 당진, 예산과도 상관성을 보여 ($R > 0.4$), 전체적으로 송산면 측정소와 유사한 공간상관분포를 보였다 (그림 3e). 계절별 공간상관분포 역시 수도권 남부인 화성, 충청권 북부의 천안, 아산에서 더 높은 상관성을 갖는다는 점을 제외하면 송산면 측정소와 유사한 분포를 보였으나, 봄보다는 겨울에 충남 서부 및 북부 지자체들의 더 넓은 영역에서 상관성을 보였다.

종합하면, 당진, 서산, 평택 등 충남 북부 및 수도권 남부를 기준으로 한 PM_{2.5} 농도 공간편차의 공간상관성은 대체로 차령산맥 산지의 북서쪽, 기준 지점을 중심으로 반경 약 50 km 내외의 영역에 대해 높았으며, 계절별로는 이러한 공간상관성이 높은 영역이 여름에 넓고 가을에 좁았으나, 미세먼지 계절관리제 측면에서 중요한 겨울 및 봄에는 전체기간에 대한 공간상관분포와 유사하였다. 그러나 태안, 보령 등 서해안을 따라 남쪽으로 기준 지점이 내려갈수록 공간상관성이 높은 영역이 서해안 및 충청권 내륙으로 확장되었으며, 이러한 높은 공간상관성을 보이는 영역은 겨울에는 전체기간에 대한 공간상관분포와 유사하였으나, 봄에는 다소 축소되고, 가을에는 넓게 확장되었다. 서해안의 주요 대기오염물질 배출 지역인 서산, 당진, 평택 등 차령산맥 산지의 북서쪽 지역과 대전,

세종, 청주 등 충청권 내륙의 주요 도시들은 $PM_{2.5}$ 농도의 국지적 변동성 관점에서 서로 뚜렷한 상관성을 보이지 않았으나, 보령은 대전, 세종 등 충청권 내륙 일부와 $PM_{2.5}$ 농도의 국지적 변동성을 공유하는 것으로 나타났다.

3.2 충청권 주요 도시 기준 $PM_{2.5}$ 의 공간상관성 분석

그림 4에 이 연구에서 선정한 다섯 곳의 충청권 주요 도시들을 기준으로 전체 분석기간 및 각 계절별 기간에 대한 해당 도시의 $PM_{2.5}$ 농도의 공간편차와 수도권 및 충청권의 각 지자체 평균 $PM_{2.5}$ 농도의 공간편차 간 상관계수를 지도상에 시각화하였다.

대전의 $PM_{2.5}$ 농도 공간편차는 논산, 옥천, 영동, 청주, 괴산, 충주, 단양 등 인접 지자체 및 충북 내륙지역과 높은 상관성($R>0.6$)을 보였으며, 서쪽의 세종, 공주, 청양, 부여와도 상관성($R>0.4$)을 나타냈다(그림 4a). 그러나 차령산맥 산지의 북서쪽에 위치한 천안, 아산, 당진, 예산, 서산과는 의미있는 상관성을 보이지 않았다. 대전을 기준으로 높은 상관성을 보이는 지자체들은 주로 충북의 소백산맥 산지의 분지에 위치해 있는데, 이는 마찬가지로 분지에 위치한 대전의 지형 특성을 고려했을 때 이들 지역의 국지적 기상조건이 $PM_{2.5}$ 농도의 국지적 변동에 유사한 영향을 주었기 때문으로 생각된다. 계절별로 겨울과 봄의 공간상관분포는 전체기간의 분석 결과와 유사하나, 봄에 더 높은 상관계수를 나타냈으며, 가을에는 상관성이 높은 영역이 충남 서해안에 인접한 홍성, 보령, 서천, 청양, 부여까지 확장되었다. 이는 앞서 보령의 주교면 측정소를 기준으로 한 $PM_{2.5}$ 농도 공간편차의 상관성이 높은 영역이 가을에 대전을 포함한 충청권 내륙지역까지 확장되었던 점과 일치한다(그림 3d).

대전과 북쪽으로 인접한 청주의 $PM_{2.5}$ 농도 공간편차는 바로 인접한 세종, 천안, 진천과 높은 상관성($R>0.6$)을 보였으며, 청주를 둘러싸고 반경 약 50 km 내외의 영역에 해당하는 아산, 청양, 공주, 대전, 옥천, 영동, 괴산, 음성과도 상관성($R>0.4$)을 보였다

(그림 4b). 대전과 마찬가지로 청주의 $PM_{2.5}$ 농도의 국지적 변동 역시 충남 서해안의 주요 배출원 소재 지자체들과 의미있는 공간상관성을 보이지 않았으나, 충북 내륙지역과의 상관성은 대전에 비해 다소 떨어졌다. 계절별로는 겨울 및 봄에 대체로 높은 공간상관성을 보였다.

천안의 $PM_{2.5}$ 농도 공간편차는 서쪽의 아산, 북쪽의 안성과 높은 상관성($R>0.6$)을 보였으며, 그 외에 예산, 용인, 세종, 청주와 상관성($R>0.4$)을 보였다(그림 4c). 천안은 대전이나 청주에 비해 높은 상관성을 가지는 영역이 비교적 좁았으며, 차령산맥 산지의 남동쪽 너머에 위치한 대전, 청주와 달리 충북 내륙지역과의 공간상관성은 나타나지 않아, 이들 두 도시와 $PM_{2.5}$ 농도의 국지적 변동성을 공유하는 영역의 차이를 뚜렷하게 보여주었다. 계절별로는 겨울에는 충남 서부 및 수도권 남부와, 여름에는 충남 전역에 걸쳐 상관성을 보여주고 있으나, 가을에는 충청권보다는 주로 수도권 남부인 화성, 평택, 안성, 용인, 이천, 여주 등과 높은 상관성을 가졌다.

세종을 기준으로 한 $PM_{2.5}$ 농도 공간편차의 공간상관분포 패턴은 청주를 기준으로 한 공간상관분포 패턴(그림 4b)과 유사하며, 세종을 중심으로 반경 약 70 km 영역 내에 해당하는 대전, 청주, 청양과 높은 상관성($R>0.6$)을, 천안, 진천, 음성, 괴산, 옥천, 영동, 보령, 서천, 논산, 공주와 상관성($R>0.4$)을 보였다($R>0.4$) (그림 4d). 그러나 세종시와 충남 북부 서해안의 주요 배출원 소재지역인 서산, 당진 사이에는 $PM_{2.5}$ 농도의 국지적 변동성 간 의미있는 상관성이 나타나지 않았으며, 이는 계절별 공간상관분포에서도 동일하여, 세종과 이들 지역 간 $PM_{2.5}$ 변동 간 상호 관련성이 적음을 알 수 있다.

아산의 $PM_{2.5}$ 농도 공간편차의 공간상관분포 패턴은 천안을 기준으로 한 공간상관분포 패턴(그림 4c)과 유사하나, 충남 서부 및 북부의 주요 배출원 지역에 대해 더 높은 공간상관성을 보였다. 아산을 둘러싼 당진, 예산, 천안, 평택과 높은 상관성($R>0.6$)을, 이들 지역보다 약간 떨어진 홍성, 화성, 안성, 과도 상

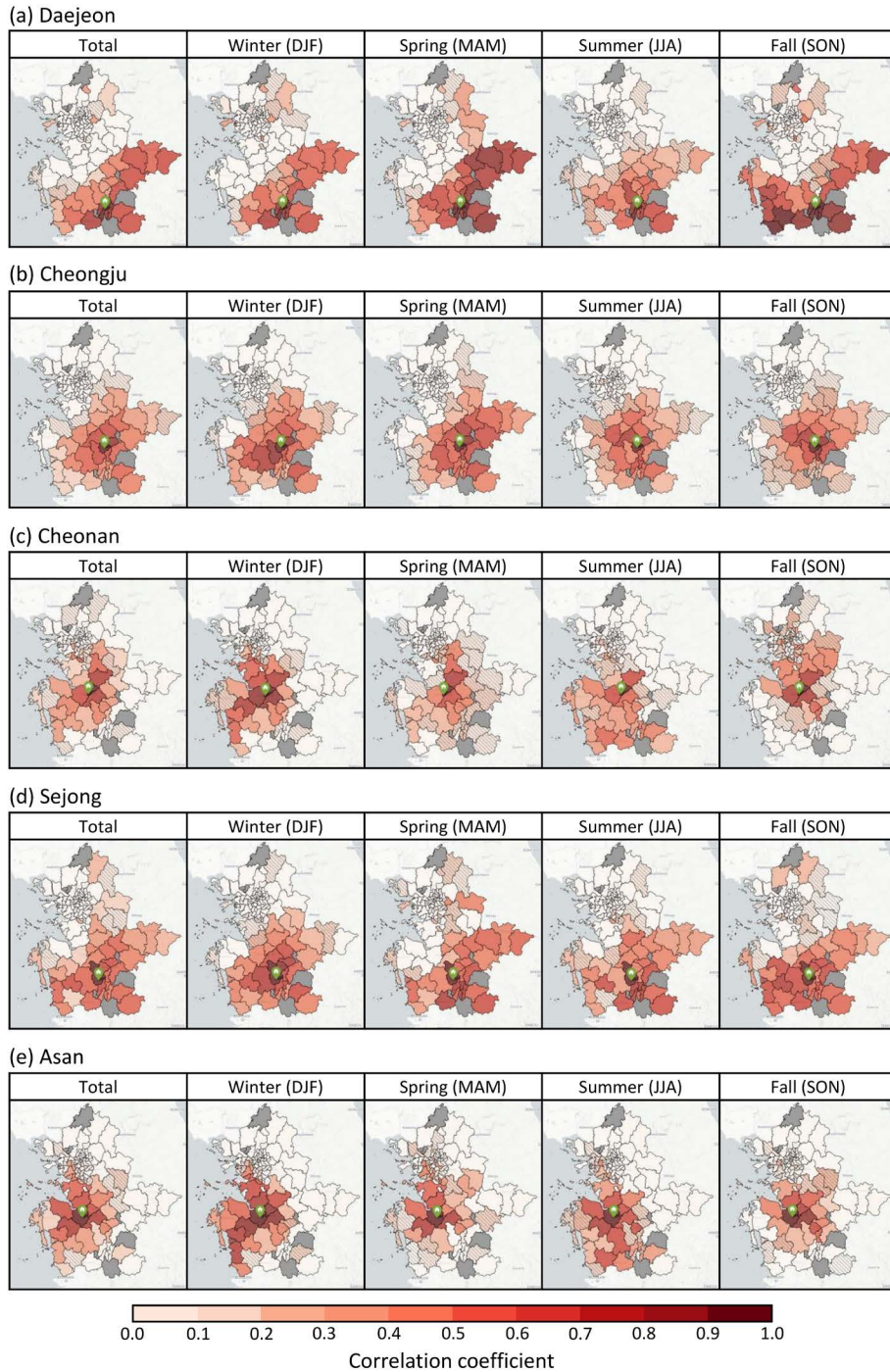


Fig. 4. Correlation coefficient map of the spatial PM_{2.5} deviation for five major cities in the Chungcheong Area of (a) Daejeon, (b) Cheongju, (c) Cheonan, (d) Sejong, and (e) Asan. Area of city/county, of which positive correlation is statistically significant at the 99% confidence level, are unhatched in the map. Areas of the city/county with a negative correlation are not shaded, and data are unavailable in the gray-colored city/county.

관성($R > 0.4$)을 보였다(그림 4e). 계절별로도 천안과 유사하게 겨울에는 충남 서부 및 수도권 남부, 여름에는 충남 전역에 걸쳐 상관성을 보였지만, 충남 서부 및 북부의 주요 배출원 지역에 대해 천안을 기준으로 할 때보다 더 높은 공간상관성을 가지는 것이 특징이다.

3.3 전구물질과 주요 도시지역 PM_{2.5} 간의 공간상관성 분석

앞서 보인 PM_{2.5} 농도의 공간편차 간 상관성은 PM_{2.5}의 국지적 변동성을 공유하는 공간적 영역과 설명력을 보여주는 것으로, 기준 지점과 나머지 지점 간 PM_{2.5} 농도 변동의 인과관계를 보여주지 않는다. 여기에서는 충청권의 주요 화력발전소, 산업 및 에너지 시설에서 배출되어 대기중 2차생성 과정을 통해 PM_{2.5}의 농도를 증가시킬 수 있는 주요 전구물질인 NO₂와 SO₂의 국지적 변동성과 충청권 주요 지자체의 PM_{2.5}의 국지적 변동성 간 상관관계를 통해 이러한 인과관계를 일부 추정해보고자 하였다. 표 5에 다섯 곳의 주요 대기오염물질 배출원 관련 측정소들(송산면, 대산리, 태안읍, 주교면, 평택항)을 기준으로 한 NO₂와 SO₂의 공간편차와 충청권에서 인구가 10만명 이상인 주요 지자체들의 PM_{2.5} 공간편차 간 상관계수를 정리했다.

다섯 곳의 배출원 관련 측정소들의 NO₂ 공간편차는 충남 서부의 보령과 서산의 PM_{2.5} 공간편차와 상관성을 보였으며, 특히 다섯 곳의 측정소 중 평균 NO₂ 농도가 18.4 ppb로 가장 높은 평택항 측정소의 경우(표 2), 보령, 홍성, 당진, 아산 등 충남 서부와 함께 북부에서도 PM_{2.5} 공간편차와 상관성을 보였다. 한편, 당진 송산면, 태안 태안읍, 보령 주교면 측정소의 NO₂ 공간편차가 충남 북부의 PM_{2.5} 공간편차와는 상관성을 보이지 않는 반면, 충남 동남부의 논산, 충북 내륙인 충주, 제천의 PM_{2.5} 공간편차와 상관성을 보였으며, 특히 대전과의 상관성은 충남 서부보다도 더 높았다. 배출원 관련 측정소의 NO₂ 공간편차와 이들 측정소에 인접한 충남 서부 및 북부 지자체의

Table 5. Correlation coefficients of spatial deviations of NO₂ and SO₂ of the fourteen cities/counties for the spatial PM_{2.5} deviation at five near-source sites in the Chungcheong Area. Negative correlation coefficients are not shown in the table.

	West (Chungcheongnam-do)				North (Chungcheongnam-do)				Southeast (Chungcheongnam-do)				Inland (Chungcheongbuk-do)			
	Boryeong	Hongseong	Seosan	Dangjin	Asan	Cheonan	Nonsan	Sejong	Gongju	Daejeon	Cheongju	Eumseong	Chungju	Jecheon		
NO ₂																
Pyeongtaek-hang	0.169*	0.159*	0.088	0.156*	0.172*		0.150*			0.352*			0.152*	0.128*		
Songsan-myeon (Dangjin)	0.154*	0.170*	0.170*				0.010			0.150*						
Daesan-ri (Seosan)	0.255*	0.090	0.355*	0.054			0.206*			0.330*			0.139*	0.116*		
Taeon-eup (Taeon)	0.268*	0.007	0.203*				0.227*			0.327*			0.118*	0.117*		
Jugyo-myeon (Boryeong)	0.272*		0.233*													
SO ₂																
Pyeongtaek-hang	0.017		0.074	0.028	0.117		0.013			0.035	0.055					
Songsan-myeon (Dangjin)	0.037						0.117	0.030	0.004	0.137*	0.020	0.177*	0.162*	0.097		
Daesan-ri (Seosan)	0.100	0.126*	0.148*	0.176*	0.220*	0.132*			0.051							
Taeon-eup (Taeon)	0.098	0.105	0.102	0.107	0.073											
Jugyo-myeon (Boryeong)	0.148*	0.029	0.166*	0.122*	0.062											

*The correlation coefficient is statistically significant at the 99% level or higher ($p < 0.01$).

PM_{2.5} 공간편차 간 상관성이 높은 것은 국지적 기상 조건의 공유에 따른 대기오염물질의 축적 또는 확산이 지역에서 생성, 배출된 NO₂와 PM_{2.5}의 농도 변동에 동시에 영향을 미쳤거나, 지역에서 배출된 NO_x의 산화 및 가스-입자 분배에 따른 질산염 에어로졸의 2차생성이 PM_{2.5}의 농도 증가에 영향을 주었을 수 있다. 그러나 대전, 충주와 같은 멀리 떨어진 내륙 분지 도시의 PM_{2.5} 농도 변동에 있어서, 서해안의 배출원 지역의 NO₂ 농도 변동의 역할을 추정하기는 쉽지 않으며, 앞으로 추가적인 연구가 필요하다.

SO₂ 공간편차의 경우 다섯 곳의 배출원 관련 측정소들 중 충남 서부 및 북부 지자체들의 PM_{2.5} 공간편차와 의미있는 상관성을 보이는 곳은 홍성, 서산, 당진, 아산, 천안과 상관성을 보인 서산 대산리 측정소와 보령, 서산, 당진과 상관성을 보인 보령 주교면 측정소의 두 지점이었다. 이 두 지점은 평균 SO₂ 농도가 다른 지점들인 태안읍 측정소, 평택항 측정소에 비해 다소 높은 곳이며(표 2), NO₂의 경우와 마찬가지로 국지적 기상조건 공유와 함께 이 지역에서 배출된 SO₂의 산화에 따른 황산염 에어로졸의 2차생성이 함께 영향을 미쳤을 것으로 생각된다. 다만 다섯 곳의 측정소 중 평균 SO₂ 농도가 5.6 ppb로 가장 높았던 당진 송산면 측정소의 경우(표 2), 인접 지역의 PM_{2.5} 공간편차와는 상관성을 보이지 않았으나, 대전, 음성, 충주와 같은 내륙 도시들의 PM_{2.5} 공간편차와는 상관성을 보였다. 이러한 내륙 도시의 PM_{2.5} 변동성에 대한 당진의 SO₂ 농도 변동의 역할에 대해서는 추가적인 연구가 필요하다.

3.4 충청권 대기환경연구소 PM_{2.5} 개별 성분의 공간상관성

충청권의 주요 배출원이 밀집된 충남 서북부에 위치한 서산 소재 충청권 대기환경연구소의 PM_{2.5} 개별 무기이온 및 탄소성분과 서울, 경기 및 충남 소재 PM_{2.5} 성분측정망에서 측정된 PM_{2.5} 개별성분 사이의 공간상관성을 분석하였다. 그림 5와 그림 6에 각 충청권 대기환경연구소를 기준으로 하여 계산한

PM_{2.5} 개별성분 농도의 상관계수와, 각 성분별로 공간평균을 제거한 PM_{2.5} 개별성분 농도 공간편차의 상관계수를 나타내었다.

충청권에 해당하는 측정지점들 중 충청권 대기환경연구소와 당진 송산면 측정소는 PM_{2.5} 질량농도와 개별성분의 농도 모두 천안 성황동, 공주 사곡면, 태안 파도리 측정소에 비해 현저히 높았으며, 이 두 지점은 NO_x 배출량이 큰 수도권에 비해서 상대적으로 농도가 낮은 질산염(NO₃⁻)과 암모늄(NH₄⁺)을 제외하면 개별성분들의 농도가 수도권 측정소들과 유사한 수준을 보였다(표 1).

PM_{2.5} 질량농도는 충청권 대기환경연구소와 가까운 당진 송산면 측정소에서 가장 큰 상관계수를 보였으나, 무기이온 성분을 살펴보면 기준 지점 인근인 충남보다는 서울 인근에서 오히려 상관계수가 크다(그림 5). 이는 중국으로부터 황산염(SO₄²⁻)이 풍부한 흡습성 입자의 장거리수송을 유발하거나 전구물질들이 축적될 수 있는 대기정체조건을 만들 수 있는 종관기상패턴에 의한 NO₃⁻와 NH₄⁺의 증가(Seo et al., 2020)가 이들 성분의 전구물질인 NO_x와 NH₃가 풍부한 수도권 환경에서 더욱 선명하게 드러난 결과로 보인다.

이러한 PM_{2.5} 개별성분의 광역변동성을 배제하기 위해 각 성분의 서울, 경기, 충남지역 측정소 평균농도를 구하고, 이로부터 성분별 농도의 공간편차를 구하여 계산한 상관계수의 분포를 살펴보면, PM_{2.5} 질량농도의 경우 서산과 인접한 당진 송산면, 천안 성황동, 안산 고잔동과 같이 그림 5에 비해 좁은 풍하측(서쪽) 영역에서만 상관성을 보이고 있음을 알 수 있다(그림 6a). 개별성분 중 SO₄²⁻은 당진제철소 인근의 송산면 측정소만 상관성을 보여, 충청권 대기환경연구소에서 측정한 SO₄²⁻의 국지적 변동성에 제철소에서 다량 배출되는 SO_x의 영향이 있을 것으로 생각된다(그림 6b). NO₃⁻의 경우 태안 파도리, 당진 송산면과 같은 인접 지역 외에도 경기 남부 내륙인 이천 설성면에서도 상관성을 보였는데, 이는 앞에서 전구물질, 특히 NO₂의 공간편차가 충청권 내륙의 PM_{2.5}

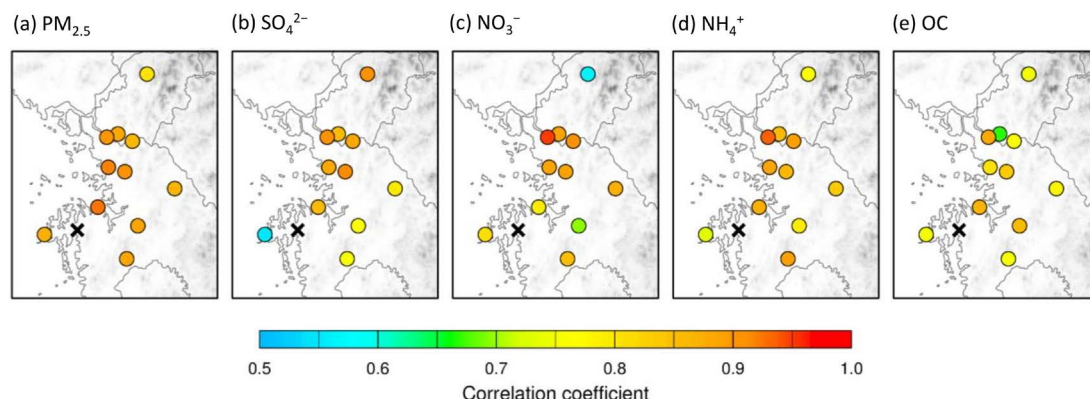


Fig. 5. Correlation coefficients of (a) $PM_{2.5}$ mass concentration, (b) sulfate (SO_4^{2-}), (c) nitrate (NO_3^-), (d) ammonium (NH_4^+), and (e) organic carbon (OC) between Chungcheong Atmospheric Environment Research Center (AERC) at Seosan (denoted by X) and eleven $PM_{2.5}$ measurement sites.

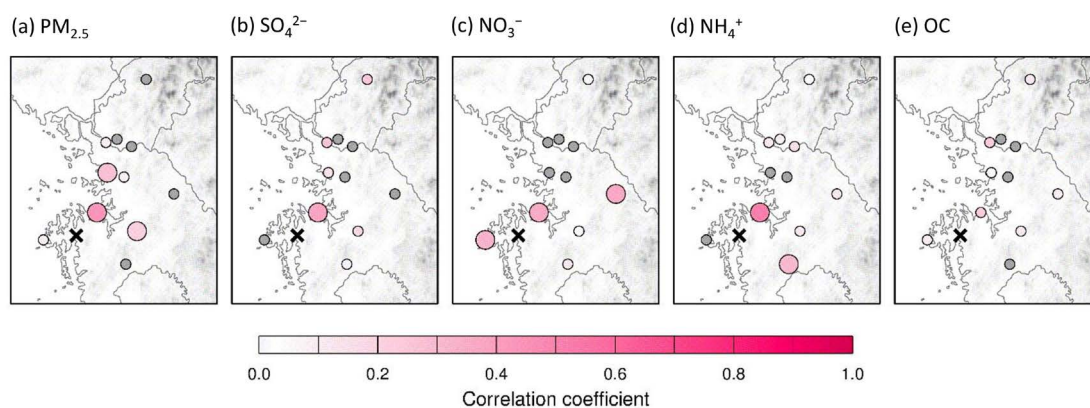


Fig. 6. Correlation coefficients of spatial deviations of (a) $PM_{2.5}$ mass concentration, (b) sulfate (SO_4^{2-}), (c) nitrate (NO_3^-), (d) ammonium (NH_4^+), and (e) organic carbon (OC) between Chungcheong Atmospheric Environment Research Center (AERC) at Seosan (denoted by X) and eleven $PM_{2.5}$ measurement sites. Large circles represent the sites, of which positive correlation is statistically significant at the 95% confidence level. Sites with negative correlation are shaded in gray.

의 공간편차와 상관성을 가지는 것과 유사하게 국지적 기상조건의 공유와 이에 따른 NO_3^- 의 2차생성이 영향을 주었을 가능성이 있으나, 이와 관련해서는 추가적인 조사가 필요하다(그림 6c). NH_4^+ 의 경우 당진 송산면과 함께 공주 사곡면에서도 상관성을 보였는데, 서산과 공주 사이에 위치한 홍성, 예산 등은 충남에서도 축사가 밀집된 지역으로 NH_3 의 배출량이 많으며, 이것이 서산과 공주가 NH_4^+ 농도의 국지적 변동성을 공유하는 요인이 되었을 가능성이 있다(그

림 6d). 탄소성분의 경우 OC, EC 모두 서산과 인근 지역의 국지적 변동성 간 상관관계가 전혀 나타나지 않았다(그림 6e).

종합하면, 서산의 충청권 대기환경연구소에서 측정된 $PM_{2.5}$ 의 개별 무기이온 성분은 주로 당진 송산면 측정소의 무기이온 성분과 국지적 변동성을 공유하고 있었으며, 이는 이곳에 위치한 제철소의 배출 영향과 관련이 있는 것으로 보인다. 그러나 송산면을 제외한 다른 측정 지점에서는 NO_3^- 와 NH_4^+ 에 대해

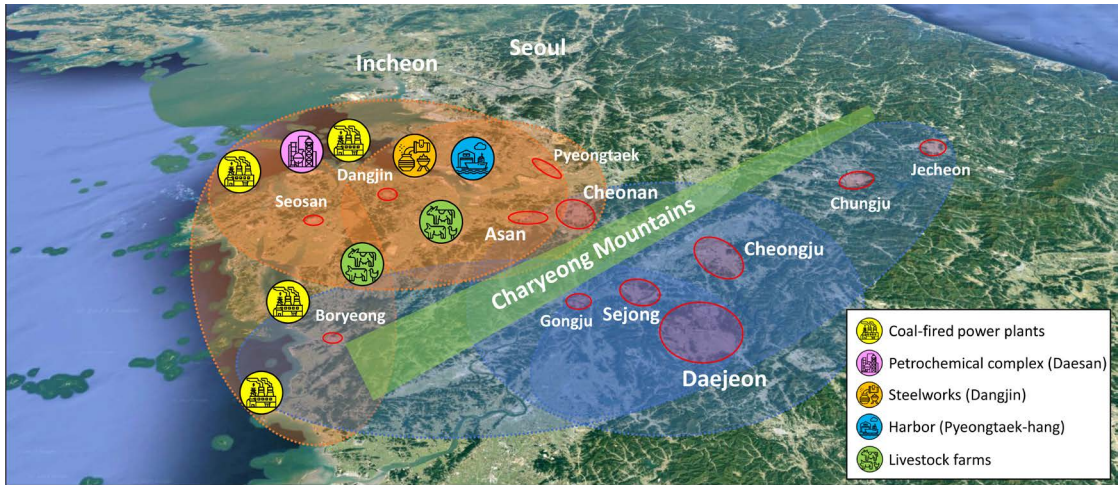


Fig. 7. Schematic map of the two individual regions in the Chungcheong Area: the emission-related area northwest of the Charyeong Mountains (orange-color shaded area) and the inland cities southeast of the Charyeong Mountains (blue-color shaded area) (satellite images courtesy of Google Earth Pro). PM_{2.5} concentrations in each region are highly correlated within the region but not very correlated with the other region.

서로 다른 지점에서 상관성을 보였을 뿐으로, 이는 충청권 대기환경연구소에서 측정된 PM_{2.5}의 개별성분 특성이 당진 송산면 인근을 제외한 충청권 내에서 제한적인 대표성을 가지고 있음을 보여준다.

4. 결 론

이 연구에서는 충청권에서 주요 대기오염물질 배출원이 위치하고 있는 충남 서해안 지역과 주요 인구 밀집지역인 내륙 도시들을 중심으로, 중국으로부터의 오염물질의 장거리수송이나 종관기상장의 변화에 따른 대기정체, 2차생성 등에 의한 광역변동성을 배제한 PM_{2.5} 농도의 국지적 변동성을 공유하는 공간적 범위를 분석하기 위해 공간상관분석을 수행하였으며, 이를 통해 충청권의 미세먼지 대기질에 대한 이해를 높이고자 하였다. 또한 충남 서북부의 주요 배출원 지역에 위치한 서산 소재 충청권 대기환경관측소에서 측정된 PM_{2.5}의 개별성분들이 국지적 변동성 측면에서 영향을 주고받는 지점들을 PM_{2.5} 성분측정망의 PM_{2.5} 개별성분들과의 상관성 분석을 통해 살펴

보았다.

당진, 서산, 평택 등의 서해안의 주요 배출원 인근의 PM_{2.5} 농도는 차령산맥 산지를 기준으로 너머에 위치한 대전, 세종, 청주 등 내륙 도시들의 PM_{2.5} 농도와 국지적 변동성을 공유하지 않았다(그림 7). 따라서 서해안 지역의 배출원 지역과 충청권 내륙의 인구 밀집지역은 PM_{2.5}의 국지적 변동성 측면에서 서로간에 의미있는 공간상관성을 가지지 않는 별개의 권역으로 파악된다. 다만 충남 서해안에서도 비교적 남쪽에 위치한 보령은 대전, 세종 및 충남 내륙지역과 PM_{2.5}의 국지적 변동성에 있어 상대적으로 높은 상관성을 보였다. 또한 평택항과 충남 북부 도시들 간 PM_{2.5}의 국지적 변동성이 갖는 높은 상관성은 중부권 대기관리권역의 일부 지역에 대한 수도권 대기관리권역의 권역간 영향력을 보여준다. 이러한 PM_{2.5} 농도의 국지적 변동성이 갖는 지역간 공간상관분포는 계절별로도 다소간의 차이를 보였다. 미세먼지 계절관리제 시행기간(12~3월)인 겨울과 봄을 중심으로 살펴보았을 때, 서해안 주요 배출원 인근의 PM_{2.5} 농도의 국지적 변동과의 공간상관성 분포는 전체기간에 대한 분석결과와 크게 다르지 않았으나 전체적

으로 봄보다는 겨울에 더 넓은 영역에 대해 더 높은 상관성을 보였다.

충청권 대기환경연구소는 태안, 서산, 당진의 해안 지역에 위치한 발전소 및 산업시설들에서 멀리 않은 곳에 위치하여 있으나, $PM_{2.5}$ 의 개별성분들의 국지적 변동성이 영향을 미치는 범위는 인근의 당진, 공주, 태안 정도로 한정되었으며, 탄소성분을 제외한 무기 이온성분에 대해서만 상관성을 보였다. 특히 당진의 경우 $PM_{2.5}$ 의 질량농도 및 무기이온성분이 모두 상관성을 보여 서산과의 밀접한 관련성을 잘 보여주었다. 그러나 $PM_{2.5}$ 개별성분의 국지적 변동성 측면에서, 충청권 대기환경연구소는 충청권에서도 서산 인근 지역에 대한 제한적인 대표성을 가진다.

이 연구에서는 공간상관분석을 통해 지역적 특성이 반영된 $PM_{2.5}$ 농도의 국지적 변동성이 상관성을 가지는 공간적 범위를 충청권의 주요 배출원과 인구 밀집지역에 대해 분석하였다. 그 결과 충청권 내에서도 각 지점의 지리적 특성과 계절에 따라 $PM_{2.5}$ 농도의 변동성이 서로 다르게 나타나고 있음을 보였다. 특히 차령산맥 산지를 기준으로 북서쪽의 배출원 지역과 남동쪽의 내륙 도시지역은 $PM_{2.5}$ 농도의 국지적 변동성 측면에서 서로 영향을 미치지 않는 다른 권역으로 보이는데, 이는 수도권과 충남지역을 대상으로 PM_{10} 농도의 변동성을 이용한 군집분석을 수행한 선행연구(Choi *et al.*, 2023)에서 충남 서부와 동부를 서로 다른 권역으로 분류한 것과 일부 유사한 것이다.

이 연구는 현재 설정된 대기관리권역 내에서도 지리적, 계절적 특성을 고려해 지자체별로 세분화한 미세먼지 저감대책이 필요함을 보여준다. 그러나, 상관분석의 특성상, 높은 상관성을 가지는 지역간의 배출과 $PM_{2.5}$ 농도 사이의 인과관계를 정확히 파악할 수 없다는 점은 이 연구의 한계점이다. 특히, 권역 내 오염원으로부터 직접 배출, 수송된 미세먼지뿐만 아니라, 전구물질의 배출, 수송 및 2차생성에 의한 풍하층의 국지적 $PM_{2.5}$ 변동성과의 공간상관분석을 위해서는 풍향, 풍속과 시간지연(time-lag)이 함께 고려되어야 한다. 그러나 이 연구에서 수행한 일 평균 자료를

활용한 시간지연 상관분석에서는 분석대상지역의 상대적으로 작은 시공간 규모로 인해 시간지연에 따른 상관성이 드러나지 않아 배출원-수용지 관계를 구별하기 어려웠다. 이러한 한계를 극복하기 위해 향후에는 시간별 농도자료와 풍향, 풍속 등의 기상자료를 함께 활용한 시간지연 상관분석을 수행할 필요가 있다. 이에 더하여 지역별 배출량 및 대기질 모형을 종합적으로 활용한 후속연구를 통해 주요 인구밀집지역의 미세먼지 농도의 변동성에 영향을 미치는 요인과 공간적 범위에 대한 이해를 넓히고, 지역별로 세분화된 대기정책을 수립하는 데에 기여할 수 있을 것으로 보인다.

감사의 글

이 논문은 2023년도 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단-동북아-지역 연계 초미세먼지 대응 기술개발 사업의 지원을 받아 수행한 연구입니다 (2023M3G1A1090658).

References

- Choi, D.-J., Kang, M., Kim, K.-H. (2018) Chungnam Policy Map No. 21: Livestock numbers and area by livestock type in Chungnam, (in Korean). <https://www.cni.re.kr/main/search/down.do?gcd=AC0000064546&seq=1>
- Choi, W., Song, M.Y., Kim, J.B., Kim, K., Cho, C. (2023) Regional classification of high PM_{10} concentrations in the Seoul metropolitan and Chungcheongnam-do areas, Republic of Korea. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195, 1075. <https://doi.org/10.1007/s10661-023-11732-6>
- Choi, Y., Ghim, Y.S., Segal Rozenhaimer, M., Redemann, J., LeBlanc, S.E., Flynn, C.J., Johnson, R.J., Lee, Y., Lee, T., Park, T., Schwarz, J.P., Lamb, K.D., Perring, A.E. (2021) Temporal and spatial variations of aerosol optical properties over the Korean peninsula during KORUS-AQ, *Atmospheric Environment*, 254, 118301. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2021.118301>

- Gangwar, R.S., Bevan, G.H., Palanivel, R., Das, L., Rajagopalan, S. (2020) Oxidative stress pathways of air pollution mediated toxicity: Recent insights, *Redox Biology*, 34, 101545. <https://doi.org/10.1016/j.redox.2020.101545>
- Han, S., Park, Y., Noh, N., Kim, J.-H., Kim, J.-J., Kim, B.-M., Choi, W. (2023) Spatiotemporal variability of the PM_{2.5} distribution and weather anomalies during severe pollution events: Observations from 462 air quality monitoring stations across South Korea, *Atmospheric Pollution Research*, 14, 101676. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2023.101676>
- Hilker, N., Jeong, C.-H., Wang, J.M., Evans, G.J. (2021) Elucidating long-term trends, seasonal variability, and local impacts from thirteen years of near-road particle size data (2006-2019), *Science of the Total Environment*, 774, 145028. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145028>
- Ju, J., Youn, D. (2019) Statistically analyzed effects of coal-fired power plants in west coast on the surface air pollutants over Seoul metropolitan area, *Journal of the Korean Earth Science Society*, 40(6), 549-560, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5467/JKESS.2019.40.6.549>
- Kim, C.H., Kim, J., Noh, S., Lee, S., Yoon, S.H., Lee, S.S., Park, J.-S., Kim, J.B. (2021) A study on temporal-spatial characteristics of volatile organic compounds distributed near petrochemical industrial complex using PTR-ToF-MS, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 37(5), 812-828, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2021.37.5.812>
- Kim, J.B., Yoon, S.H., Lee, S.S., Kim, K.H., Noh, S., Bae, G.-N. (2020) Spatial and temporal distributions of PM₁₀ and PM_{2.5} 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>
- Lee, B.-J., Park, S.-S. (2019) Temporal and spatial variabilities of concentrations of criteria air pollutants during early summer in 2018 in South Chungcheong province, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 35(2), 265-281, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2019.35.2.265>
- Lee, S.-M., Lee, T.-J., Oh, J., Kim, S.-C. (2021) Regional Categorization of Gyeonggi Province for Fine Dust Management, *Journal of Environmental Impact Assessment*, 30(4), 237-246, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.14249/eia.2021.30.4.237>
- Ministry of Environment (MOE), National Institute of Environmental Research (NIER) (2022) Guidelines for air pollution monitoring network installation and operation, (in Korean).
- 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_{2.5} in Chungcheongnam-do due to coal-fired power plants shutdown, *Journal of the Korean Earth Science Society*, 34(5), 687-696, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2018.34.5.687>
- National Air Emission Inventory and Research Center (NAIR) (2023) National Air Pollutants Emission Service, (in Korean). <http://air.go.kr/main.do> (accessed on Nov. 2, 2023).
- Oh, S. (2007) Concentrations of atmospheric fine particles measured during 2005 in Chungnam, Korea, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 23(1), 132-140, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2007.23.1.132>
- Pope, C.A., Dockery, D.W. (2006) Health effects of fine particulate air pollution: lines that connect, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 56, 709-742. <https://doi.org/10.1080/10473289.2006.10464485>
- Seo, J., Kim, J.Y., Youn, D., Lee, J.Y., Kim, H., Lim, Y.B., Kim, Y., Jin, H.C. (2017) On the multiday haze in the Asian continental outflow: the important role of synoptic conditions combined with regional and local sources, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17, 9311-9332. <https://doi.org/10.5194/acp-17-9311-2017>
- Seo, J., Park, D.-S.R., Kim, J.Y., Youn, D., Lim, Y.B., Kim, Y. (2018) Effects of meteorology and emissions on urban air quality: a quantitative statistical approach to long-term records (1999-2016) in Seoul, South Korea, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18, 16121-16137. <https://doi.org/10.5194/acp-18-16121-2018>
- Seo, J., Lim, Y.B., Youn, D., Kim, J.Y., Jin, H.C. (2020) Synergistic enhancement of urban haze by nitrate uptake into transported hygroscopic particles in the Asian continental outflow, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 20, 7575-7594. <https://doi.org/10.5194/acp-20-7575-2020>
- Son, S.-C., Park, S., Bae, M., Kim, S. (2020) A study on characteristics of high PM_{2.5} 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>

Wang, Y., Bechle, M.J., Kim, S.-Y., Adams, P.J., Pandis, S.N., Pope III, C.A., Robinson, A.L., Sheppard, L., Szpiro, A.A., Marshall, J.D. (2020) Spatial decomposition analysis of NO₂ and PM_{2.5} air pollution in the United States, Atmospheric Environment, 241, 117470. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117470>

Yeo, M.J., Kim, Y.P. (2019) Trends of the PM₁₀ concentrations and high PM₁₀ concentration cases in Korea, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 35(2), 249-262, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2019.35.2.249>

Authors Information

서지훈 (한국과학기술연구원 기후·환경연구소 박사후연구원)
(jseo@kist.re.kr)

권재은 (서울과학기술대학교 안전공학과 학부생)
(wodwod1025@gmail.com)

김종범 (충남연구원 서해안기후환경연구소 책임연구원)
(kjb0810@cni.re.kr)

윤대옥 (충북대학교 지구과학교육과 교수)
(dyoun@chungbuk.ac.kr)

김경환 (한국과학기술연구원 기후·환경연구소 선임연구원)
(khkim@kist.re.kr)

이광열 (국립환경과학원 대기환경연구과 환경연구사)
(kylee21@korea.kr)

김진영 (한국과학기술연구원 기후·환경연구소 책임연구원)
(jykim@kist.re.kr)