Check for updates

Journal of Korean Society for Atmospheric Environment
Vol. 39, No. 4, August 2023, pp. 478-491
https://doi.org/10.5572/KOSAE.2023.39.4.478
p-ISSN 1598-7132, e-ISSN 2383-5346

논 문

지리정보시스템과 통계기법을 이용한 고농도 미세먼지 오염특성 파악: 동남권과 남부권 우심지역 사례 연구

Identification of Pollution Characteristics of $PM_{2.5}$ Using a Geographic Information System and Statistical Tools: A Case Study of the Southeastern and Southern Regions of South Korea

주정태, 이상진, 최종혁[1)], 김성태[1)], 송인호[2)], 정해진[2)], 신혜정[2)], 박정민[2)], 최성득*

울산과학기술원 도시환경공학과, [1)]이투엠쓰리(주), [2)]국립환경과학원 대기환경연구과

접수일 2023년 6월 22일
수정일 2023년 7월 26일
채택일 2023년 7월 26일

Received 22 June 2023
Revised 26 July 2023
Accepted 26 July 2023

***Corresponding author**
Tel : +82-(0)52-217-2811
E-mail : sdchoi@unist.ac.kr

Jeong-Tae Ju, Sang-Jin Lee, Jong Hyuk Choi[1)], Sung Tae Kim[1)], In Ho Song[2)], Hae-Jin Jung[2)], Hye Jung Shin[2)], Jung Min Park[2)], Sung-Deuk Choi*

Department of Urban and Environmental Engineering, Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST), Ulsan, Republic of Korea
[1)]*E2M3, Anyang, Republic of Korea*
[2)]*Air Quality Research Division, National Institute of Environmental Research, Incheon, Republic of Korea*

Abstract In recent years, fine particles ($PM_{2.5}$) have become a major environmental issue in South Korea, making it necessary to investigate the regional pollution characteristics of $PM_{2.5}$ to establish effective $PM_{2.5}$ management policies. This study employed a geographic information system (GIS) and statistical methods, such as space-time cube analysis and principal component analysis (PCA), to identify the characteristics of high $PM_{2.5}$ events and the factors influencing $PM_{2.5}$ levels in the southeastern and southern regions of South Korea. The periods in which $PM_{2.5}$ levels exceeded the very unhealthy state, as defined by the air quality standard of South Korea, were designated as Pollution Episodes 1 and 2 in the southeastern and southern regions, respectively. The findings revealed that both Pollution Episode 1 and Pollution Episode 2 were influenced by long-range atmospheric transport (LRAT) from Asian continental outflow as well as atmospheric stagnation within South Korea. In addition, local industrial activities and the secondary formation of SO_4^{2-} and NO_3^- were identified as major sources of $PM_{2.5}$ in both episodes. However, the impact of industrial emissions was more pronounced in Pollution Episode 1, whereas the secondary formation of NH_4^+ and the influence of natural sources were predominant only in Pollution Episode 2. Therefore, reducing both industrial emissions in the southeastern region and the formation of secondary inorganic aerosols in the southern region would be practical approaches to improve air quality. The results of this study, which utilized GIS and statistical techniques to analyze regional pollution characteristics, can be further employed to visually and quantitatively identify $PM_{2.5}$ pollution sources.

Key words: $PM_{2.5}$, Haze event, GIS, Space-time cube, Source identification

1. 서 론

최근 우리나라의 미세먼지 농도는 전반적으로 감소 추세이지만, 미세먼지 고농도 사례는 여전히 빈번하게 발생하고 있다(Yeo and Kim, 2019). 세계보건기구 산하의 국제암연구소(International Agency for Res-

earch on Cancer: IARC)에서는 2013년에 미세먼지를 인체에서 발암이 확인된 1군 발암물질(Group 1)로 지정하였다(WHO, 2011). 특히, 미세먼지는 어린이, 노약자, 기저질환 환자들의 건강에 악영향을 미치며(Jo *et al.*, 2017), 시각적으로도 대중들에게 정신적인 스트레스를 주는 것으로 알려져 있다(Gu *et al.*, 2020). 이에 미세먼지 농도를 줄이고 대기질을 관리하기 위해 다양한 연구들이 진행되고 있으며, 최근에는 대기오염물질 배출량과 기상 조건 등 기존에 대기질을 악화시키는 요인들과 더불어 교통량과 GDP와 같은 사회 인자를 이용하여 고농도 미세먼지 오염을 해석하는 연구도 진행되었다(Song *et al.*, 2020; Kim *et al.*, 2019b).

우리나라는 산업화 및 도시화와 연관된 요인들과 기상 조건이 지역마다 다르므로 전국을 권역별로 나누어 미세먼지 오염특성을 파악할 필요가 있다. 선행연구에서는 전국 대기환경연구소별 미세먼지의 화학적 특성과 기상인자의 영향을 파악하였으며, 권역별 오염특성이 뚜렷하게 나타났다(Yu *et al.*, 2018). 이에 따라, 2019년 대기관리권역법이 제정되었고, 환경부는 전국을 수도권, 중부권, 남부권, 동남권 총 4개 권역으로 나누어 관리하고 있다(MOE, 2020). 환경부는 권역별로 대기질 개선 목표와 오염물질별 배출량 삭감률을 다르게 설정하여 각 권역의 특성에 맞게 대기오염물질 저감 계획을 구체화하는 등 권역별 맞춤형 대기질 관리 정책을 추진하고 있다.

미세먼지 농도를 효과적으로 저감하기 위해서는 주요 오염원을 특정할 필요가 있으므로, 오염원 추적과 기여도 산정에 관한 연구가 진행되고 있다(Ryou *et al.*, 2018). 선행 연구에서는 미세먼지 성분농도에 대해 주성분 분석(Principal Component Analysis: PCA)과 같은 통계분석을 적용하고 양행렬인자(Positive matrix factorization: PMF)와 같은 수용모델을 사용하여 오염원의 기여도를 정량적으로 파악하였다(Park *et al.*, 2022; Kim *et al.*, 2019a). 또한, 모니터링과 모델링 결과를 함께 해석하고 오염원을 특정하여 산업도시에서의 계절별 고농도 미세먼지 오염특성을 파악하였으며(Lee *et al.*, 2023), 배출량 저감 정책에 따른 2차 생성물질의 저감 효율을 연구하였다(Lee *et al.*, 2022). 기상자료, 교통량, 배출량 등 미세먼지 오염과 연관된 인자들을 이용하여 지역별 미세먼지 오염특성을 규명하는 연구도 진행되었다(Chen *et al.*, 2019). 그러나 미세먼지 농도 변화에 대해 시공간적 다차원 분석을 진행하고 미세먼지 관련 인자들을 분석하여 권역별 고농도 미세먼지 오염특성을 비교·분석한 연구는 아직 부족한 실정이다. 특히, 국내 관련 연구와 정책수립은 대부분 수도권 위주로 진행되었으나, 남부권은 장거리 이동 영향과 자체 배출 영향을 복합적으로 받고, 동남권에는 다수의 일반 및 국가 산업단지가 위치하여 고농도 미세먼지 오염의 심각성이 수도권에 못지않다. 따라서 남부권과 동남권의 미세먼지 오염특성을 규명하는 연구가 필요하다.

본 연구에서는 대기관리권역별 맞춤형 대기질 관리를 위해 전국의 미세먼지 질량 및 성분 농도, 배출량, 기상 조건, 교통량 등의 자료를 이용하여 동남권과 남부권의 고농도 미세먼지 오염특성을 파악하고 비교하였다. 지리정보시스템(Geographic Information System: GIS)을 이용하여 고농도 미세먼지 사례에서 미세먼지 농도의 증감을 시공간적으로 분석하였고, 미세먼지 관련 인자들의 공간 분포를 조사하여 미세먼지 오염특성을 파악하였다. 또한, 미세먼지 성분자료를 이용하여 오염원을 추정하였다. 이를 통해 동남권과 남부권의 고농도 미세먼지 오염특성과 미세먼지 관련 인자들의 영향을 파악하여 지역별 오염원 관리 정책 수립의 기초자료를 마련하였다.

2. 연구 방법

2.1 우심지역과 고농도 사례 선정

고농도 지역을 선정하기 위해 동남권과 남부권의 최근 5년(2016~2020) 미세먼지($PM_{2.5}$) 일평균 농도의 99백분위수 값과 대기환경기준 초과 횟수를 연도별로 분석하였다. 동남권에서 99백분위수 농도가 높은 상위 세 도시는 2019년 칠곡군(76 μg/m^3), 2019년

경주시 (73 μg/m^3), 2018년 경산시 (71 μg/m^3)였지만, 2020년에는 농도가 감소하여 칠곡군 (52 μg/m^3), 대구시 (52 μg/m^3), 구미시 (51 μg/m^3)였다. 연도별 초과 횟수가 많은 상위 세 도시는 2016년 부산시 (77회), 양산시 (75회), 진주시 (71회) 순이었으나, 2020년에는 초과 횟수가 감소하여 경산시 (38회), 칠곡군 (36회), 대구시 (32회) 순이었다. 인구밀도와 $PM_{2.5}$ 오염도를 종합적으로 검토하여 대구시, 구미시, 칠곡군, 경산시를 동남권 우심지역으로 선정하였다. 남부권에서 99백분위수 농도가 높은 상위 세 도시는 2019년에 목포시 (86 μg/m^3), 광주시 (85 μg/m^3), 나주시 (85 μg/m^3)였으며, 최근에는 농도가 감소하여 2020년에는 영암군 (57 μg/m^3), 목포시 (52 μg/m^3), 광주시 (49 μg/m^3) 순이었다. 연도별 초과 횟수가 많은 도시 상위 세 곳은 2016년 영암군 (96회), 2017년 광주시 (62회), 2018년 광주시 (61회) 순이었지만, 2020년에는 초과 횟수가 감소하여 영암군 (37회), 나주시 (21회), 광주시 (18회) 순이었다. 남부권에서는 광주시, 나주시, 영암군, 목포시를 우심지역으로 선정하였다.

동남권과 남부권 모두 권역별로 고농도일이 가장 오래 지속된 기간을 대표 기간으로 선정하였다. 고농도일 기준은 $PM_{2.5}$ 일평균 농도가 매우 나쁨 (75 μg/m^3 이상)인 날로 설정하였으며, 권역에 포함된 도시 중 한 도시라도 고농도일이 지속되면 해당 권역의 고농도일로 간주하였다. 동남권에서 고농도 현상이 8일간 지속된 2018년 1월 14일부터 1월 22일까지를 동남권 고농도 기간 (Pollution Episode 1)으로 선정하였고, 남부권에서 고농도 현상이 15일간 지속된 2019년 2월 21일부터 3월 6일까지를 남부권 고농도 기간 (Pollution Episode 2)으로 선정하였다.

2.2 자료 수집

환경부는 전국적인 대기오염 실태, 변화추이, 대기환경기준 달성 여부 등을 파악하기 위하여 다양한 대기오염측정망을 운영하고 있다. 일반대기오염측정망에 속한 도시대기측정소는 2021년 기준으로 전국에 504개가 설치되어 있으며, 기준성대기오염물질 (PM_{10}, $PM_{2.5}$, SO_2, NO_2, CO, O_3)을 자동으로 측정한다. 시간별 최종 확정자료는 에어코리아 (www.airkorea.or.kr)에서 제공한다. 본 연구에서는 2016~2021년 자료를 수집하였으며, 그중 동남권과 남부권의 측정소 자료를 활용하였다. 우심지역의 자체 배출 효과를 파악하기 위해서 대기정책지원시스템 (Clean Air Policy Support System: CAPSS) 배출량 자료를 수집하였다 (www.air.go.kr). CAPSS는 연도별로 TSP, PM_{10}, $PM_{2.5}$, SO_X, NO_X, VOC, NH_3의 점, 선, 면오염원 배출량을 제공하며, 본 연구에서는 2019년의 $PM_{2.5}$ 배출량 자료를 이용하였다.

기상청은 국지적인 기상 현상을 파악하기 위해 전국 510개 지점에 자동기상관측장비 (Automatic Weather System: AWS)를 설치하여 기상을 자동으로 관측하며, 방재기상관측자료로 제공하고 있다. 본 연구에서는 2016~2021년의 기온, 강수, 바람, 습도, 기압 자료를 기상자료개방포털 (data.kma.go.kr)에서 수집하였다. 한편, 도시지역에서는 차량 배출이 미세먼지와 미세먼지 원인물질의 주요 배출원이므로, 차량 통행량과 도로망 자료를 교통량정보제공시스템 (www.road.re.kr)에서 수집하였다. 지역별 통행량과 도로망 자료는 연도별 자료로 제공되고 있으며, 본 연구에서는 2021년 연평균 자료를 사용하였다.

미세먼지 성분자료로는 권역별 대기환경연구소에서 실시간으로 측정하는 $PM_{2.5}$ 성분자료를 수집하였다. 대기환경연구소에서는 $PM_{2.5}$ 질량농도와 $PM_{2.5}$에 함유된 이온 (SO_4^{2-}, NO_3^-, NH_4^+, Na^+, K^+, Mg^{2+}, Ca^{2+}, Cl^-), 탄소 (OC, EC), 금속 (Ti, V, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, As, Se, Pb) 성분을 실시간으로 측정한다. 자세한 분석방법은 국립환경과학원 대기오염측정망 설치·운영지침에 제시되었다 (NIER, 2021). 동남권과 남부권 자료로서 각각 울산시와 광주시에 있는 영남권 대기환경연구소 (35.581°N, 129.324°E)와 호남권 대기환경연구소 (35.226°N, 126.849°E) 자료를 사용하였다. 그러나 영남권 대기환경연구소는 울산시 중구 성안동에 위치하여 본 연구에서 선정한 동남권 고농도 우심지역 (대구·경북)에 포함되지 않는다. 영남권

대기환경연구소 자료의 권역 대표성을 파악하기 위해 2018년 동남권 도시대기측정소의 $PM_{2.5}$ 농도와 영남권 대기환경연구소의 $PM_{2.5}$ 농도에 대해 상관분석을 실시하였다. 동남권에 포함된 대구시, 구미시, 경산시의 $PM_{2.5}$ 농도와 영남권 대기환경연구소 $PM_{2.5}$ 농도의 스피어만(Spearman) 상관계수는 0.77~0.96으로 높은 수준을 보였다. 이 결과를 바탕으로 본 연구에서는 동남권 고농도 사례의 오염특성을 파악하기 위해 영남권 대기환경연구소 자료를 이용하였다. 호남권 대기환경연구소는 광주시 북구 오룡동에 위치하며, 남부권 우심지역에 포함되어 있다.

2.3 지리정보시스템 활용과 통계 분석

GIS 분석을 위해 ArcGIS Pro (3.0.3 version, Esri, USA)를 이용하여 풍속과 교통량 등 대기오염 관련 인자들을 시각적이고 통계적인 방법으로 처리해 대기오염 현황을 파악하였다. 추가로 오염원을 추적하기 위해 풍향, 풍속, $PM_{2.5}$ 농도 자료를 결합하여 표출하는 극좌표 그림(polar plot)을 작성하였으며, 이를 위해 R (4.2.2 version, R core team, Austria) openair 패키지(2.8.6 version)를 이용하였다.

$PM_{2.5}$ 농도를 시공간 다차원적으로 분석하기 위해 ArcGIS Pro의 시공간 큐브(space-time cube) 도구를 이용하였다. 시공간 큐브는 시간의 경과에 따라 시공간상에서 데이터의 변동 경향을 분석하여 이상치나 핫스팟을 파악할 수 있다(Purwanto *et al.*, 2021). 본 연구에서는 도시대기측정소에서 측정한 일평균 $PM_{2.5}$ 시계열 자료의 시공간 큐브를 생성하였다. 시공간 큐브 생성 기간은 고농도 사례일과 그 이전 7일로 설정하였다. 시간에 따른 $PM_{2.5}$ 농도의 증감을 확인하기 위해 시공간 큐브의 2차원 시각화 분석 방법의 하나인 추세 분석을 하였고, 공간적 변화를 확인하기 위해 시공간 자료가 통계적으로 유의미한 군집성향을 보이는지 파악하는 발생 핫스팟 분석(emerging hot spot analysis)을 하였다. 이 분석을 통해 전국 도시대기측정소의 $PM_{2.5}$ 농도 변동 경향을 하나의 지도로 표현할 수 있다. 시공간 큐브의 추세 분석에서는 고농도 발생 전후 기간의 공간분포와 고농도 기간의 공간분포를 비교하여 지역별로 고농도 기간의 농도 증감 경향을 파악한다. 발생 핫스팟 분석은 시간의 변화에 따른 핫스팟 변화를 3차원으로 표출하는 일반적인 핫스팟 분석(hot spot analysis)을 2차원으로 표현하는 분석 방법이다. 고농도 발생 전후 기간과 주변의 농도들을 함께 고려하여 고농도 기간에 고농도인 핫스팟(hot spot)과 저농도인 콜드스팟(cold spot) 지역을 결정하고, 해당 지점에서 시간에 따라 핫스팟과 콜드스팟이 생성되고 소멸되는 경향에 따라 신규(new), 연속(consecutive), 강화(intensifying), 지속(persistent), 감소(diminishing), 산발(sporadic), 진동(oscillating), 과거(historical) 핫스팟과 콜드스팟으로 나눈다(Kim, 2019).

권역별 $PM_{2.5}$ 오염원을 파악하기 위해 스피어만 상관분석과 PCA를 이용하였다. 남부권에서는 호남권 대기환경연구소 자료로, 동남권에서는 영남권 대기환경연구소 자료로 고농도 기간의 주요 오염원을 파악하였다. SPSS Statistics 20.0 (IBM, USA)을 사용하여 PCA를 수행하였다. PCA 입력을 위해서 호남권과 영남권 대기환경연구소에서 측정한 시간별 $PM_{2.5}$ 성분자료(이온, 탄소, 금속)를 농도합으로 표준화하였다. 각 주성분의 변수 개수를 최소화하기 위해 직교 회전 방법을 이용하였으며, 고윳값이 1보다 큰 주성분을 선정하여 점수 그림(score plot)과 적재 그림(loading plot)으로 나타내었다. 각 그림에서 성분자료를 군집화하여 결과를 해석하기 위해 시료별 주성분의 적재값을 이용해 계층적 군집화를 진행하고 계통도를 작성하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 미세먼지 고농도 시공간 분석

동남권 고농도 기간(Pollution Episode 1)을 대상으로 수집한 $PM_{2.5}$ 농도 자료에 역거리 가중(Inverse Distance Weighted: IDW) 보간법을 적용하여 공간적

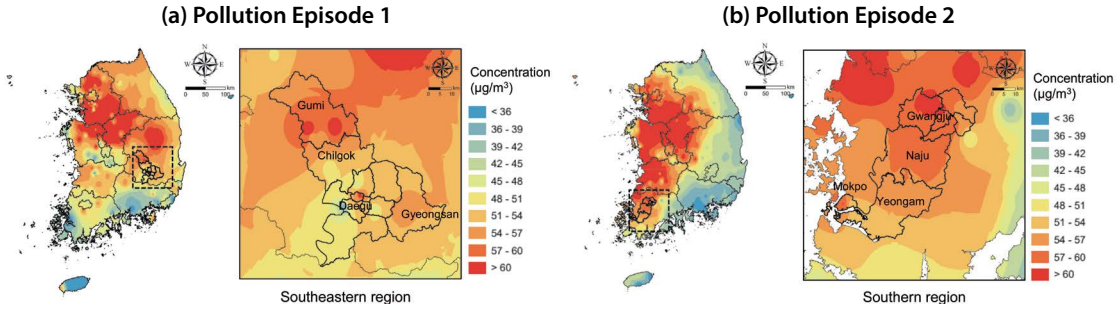

Fig. 1. Spatial distribution of $PM_{2.5}$ in the southeastern and southern regions during (a) Pollution Episode 1 and (b) Pollution Episode 2.

인 오염현황을 파악하였다. 해당 기간에는 한반도 중부와 동부권 지역에서 고농도 현상이 발생하였으며, 동남권 우심지역에서는 구미시와 대구시에서 $PM_{2.5}$ 농도가 상대적으로 높았다(그림 1a). 해당 기간의 전국 평균 $PM_{2.5}$ 농도는 53.2 μg/m^{3}이었으며, 동남권 우심지역의 평균 $PM_{2.5}$ 농도는 53.4 μg/m^{3}으로, 우심지역의 평균 농도는 전국 평균과 유사하였다. 남부권 고농도 기간(Pollution Episode 2)에는 한반도 서부지역 전체와 중부지역에서 고농도 현상이 발생하였으며, 남부권 우심지역에서는 광주시에서 상대적으로 $PM_{2.5}$ 농도가 높았다(그림 1b). 해당 기간의 전국 평균 $PM_{2.5}$ 농도는 64.5 μg/m^{3}이었으며, 남부권의 평균 $PM_{2.5}$ 농도는 71.6 μg/m^{3}으로, 우심지역의 평균농도가 전국 평균보다 높았다.

동남권과 남부권의 $PM_{2.5}$ 고농도 기간에 대한 시공간 큐브의 추세 분석과 발생 핫스팟 분석 결과를 2차원으로 표시하였다(그림 2). 시공간 큐브의 추세 분석 결과, 동남권 고농도 기간에는 전국 대부분 지역에서 $PM_{2.5}$ 농도의 상승 경향(uptrend)이 나타났다(그림 2a). 특히, 경기 북부와 부산 지역은 90% 신뢰수준으로, 동남권과 중부권 지역에서는 99% 신뢰수준으로 $PM_{2.5}$의 상승 경향이 보였다. 이는 고농도 발생 이전 기간에 비해 전국적인 농도 상승 경향이 통계적으로 유의했음을 의미한다. 발생 핫스팟 분석에서는 전국 대부분이 고농도 지역으로 표출되었으며, 진동 핫스팟(oscillating hot spot)이 동남권을 포함한 전국 대부분 지역에서 나타났다(그림 2a). 진동 핫스팟은 이전 기간에 통계적으로 유의한 콜드스팟이 다음 기간에서는 핫스팟인 지점을 의미한다. 본 연구에서는 고농도 기간과 고농도 기간 전 7일 자료로 시공간 큐브를 생성하였으므로, 고농도 기간이 시작되기 전에는 전국적으로 농도가 감소하다가 후반에는 전국적으로 농도가 증가했음을 의미한다. 즉, 해당 고농도 사례는 동남권만의 현상이 아닌 전국적인 고농도 현상이므로, 전국 규모 관점에서 오염원을 파악해야 한다. 다만, 동남권에서는 지역 내 배출 영향이 뚜렷한 사례가 보고되고 있기 때문에(Lee *et al.*, 2023), 지역 배출에 의한 고농도 현상도 고려해야 한다.

남부권 고농도 기간에 대한 시공간 큐브의 추세 분석 결과, 남부권을 포함한 전국 대부분 지역에서 $PM_{2.5}$ 농도의 상승 경향(uptrend)이 나타났다(그림 2b). 동남권 고농도 기간과 비교하여 남부권을 포함한 더 많은 지역에서 99% 신뢰수준으로 $PM_{2.5}$의 상승 경향이 나타났으며, 이는 고농도 발생 이전 기간과 비교하여 전국적으로 농도 상승 경향이 뚜렷함을 의미한다. 발생 핫스팟 분석에서는 전국 대부분이 고농도 지역으로 표출되었으며, 남부권을 포함한 대부분 지역에서 진동 핫스팟이 나타났다. 동남권 고농도 기간과는 달리, 영동과 경남 지역에서는 신규 핫스팟(new hot spot)이 발생하였다(그림 2b). 신규 핫스팟은 이전 기간에는 핫스팟이 아니었으나 이후 기간에는 통계적으로 유의한 핫스팟이 된 지점이다. 따라서 수도

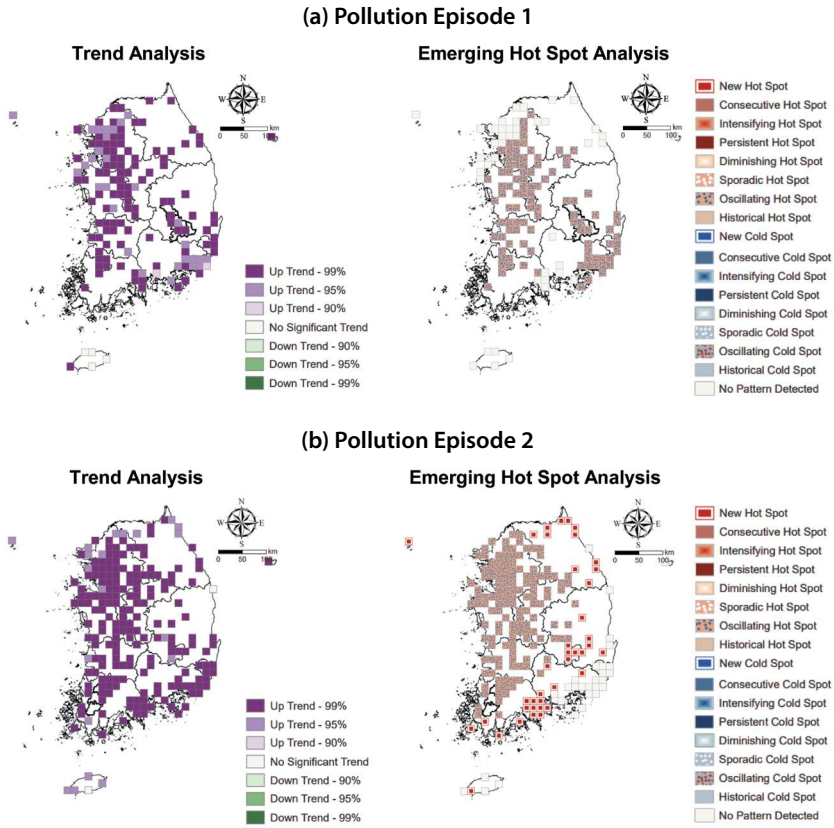

Fig. 2. Result of space-time cube analysis to identify trends and emerging hot spots of $PM_{2.5}$ during (a) Pollution Episode 1 and (b) Pollution Episode 2.

권과 남부권에 영향을 주는 오염원은 영동과 경남 지역에는 큰 영향을 주지 않은 것으로 판단되며, 이 지역에서는 지역 자체 배출원에 의한 오염 현상이 복합적으로 발생한 것으로 보인다. 또한, 영동과 경남 지방에서 신규 핫스팟이 관찰되는 것으로 보아 $PM_{2.5}$가 한반도의 동남쪽으로 이동한 것으로 추정되지만, 타 권역과 달리 급격한 농도 증가 현상이 발생하지 않았다.

3. 2 대기질 관련 인자를 활용한 오염원 파악

고농도 $PM_{2.5}$의 시공간 분석과 더불어 배출량, 기상자료, 교통량과 같은 대기질 관련 인자들을 이용하여 오염원을 파악하였다. 지역 배출의 영향을 확인하기 위해 풍향, 풍속, $PM_{2.5}$ 농도를 결합한 극좌표 그림을 작성하고, $PM_{2.5}$ 배출량 지도와 비교하였다. 구미시 남부 지역과 대구시 서구와 중구에서는 $PM_{2.5}$ 배출량이 많았다(그림 3a). 구미시 남부 지역에는 구미국가산업단지가 위치하여 산업활동의 배출 영향을 많이 받고(Hwang *et al.*, 2008), 대구시에는 차량에 의한 배출이 많다(NIER, 2021). 구미시의 극좌표 그림에서는 $PM_{2.5}$ 배출량이 많은 구미국가산업단지 지역이 주요 오염원으로 나타났으며, 대구시에서는 시내 중심지와 외부 지역(북풍과 동풍)이 주요 오염원이었다. 이를 통해, 동남권 고농도 기간에는 지역 배출(산업활동과 차량 배출)과 외부 유입의 영향을 동시에 받았을 것으로 판단된다. 광주시 중심지에서 $PM_{2.5}$ 배출량이 많았으며(그림 3b), 차량 배출의 비율이 높았다(NIER, 2021). 광주시의 극좌표 그림에서는 $PM_{2.5}$ 배출량이

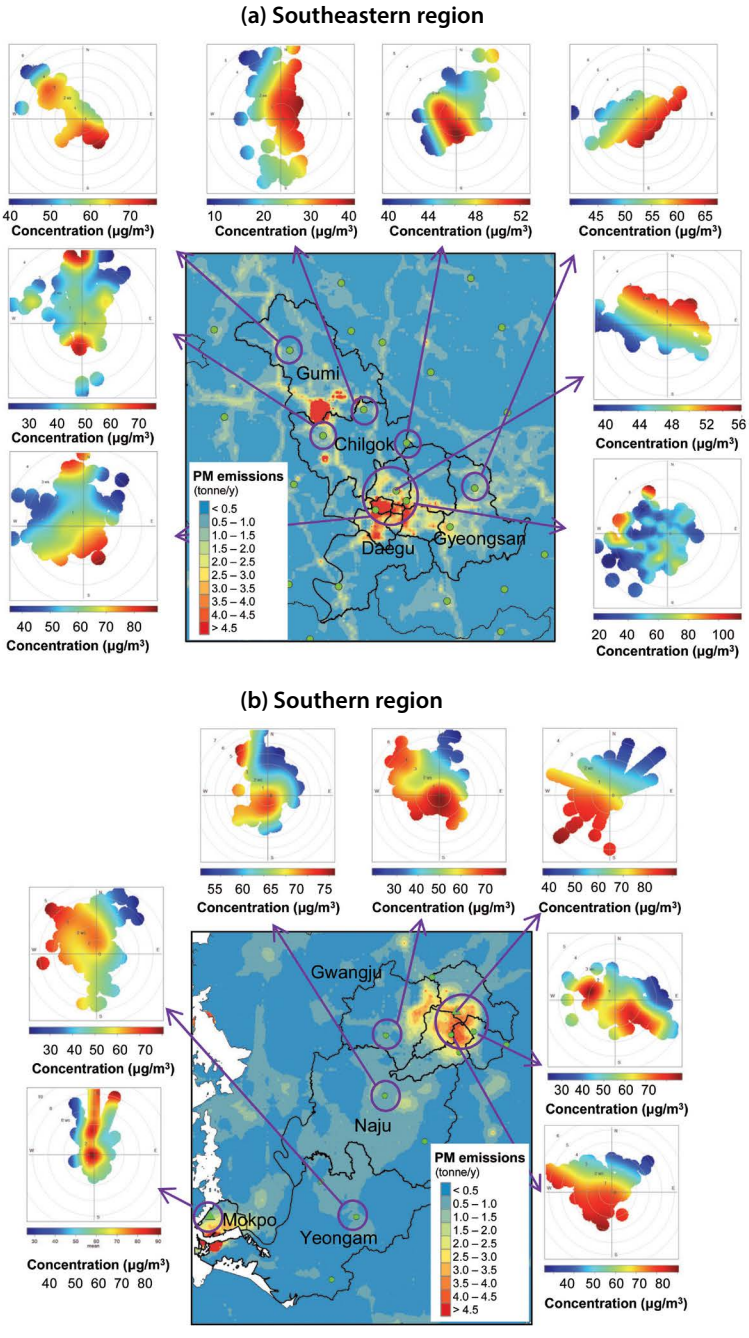

Fig. 3. Spatial distribution of $PM_{2.5}$ emissions and polar plots of $PM_{2.5}$ in (a) the southeastern region and (b) the southern region.

많은 지역이 주요 오염원이었으며, 나주시와 영암군에서는 서부와 북서부 지역이 주요 오염원으로 나타났다. 이를 통해, 남부권 고농도 기간에는 지역 배출(특히, 차량 배출)과 외부 유입의 영향을 동시에 받은

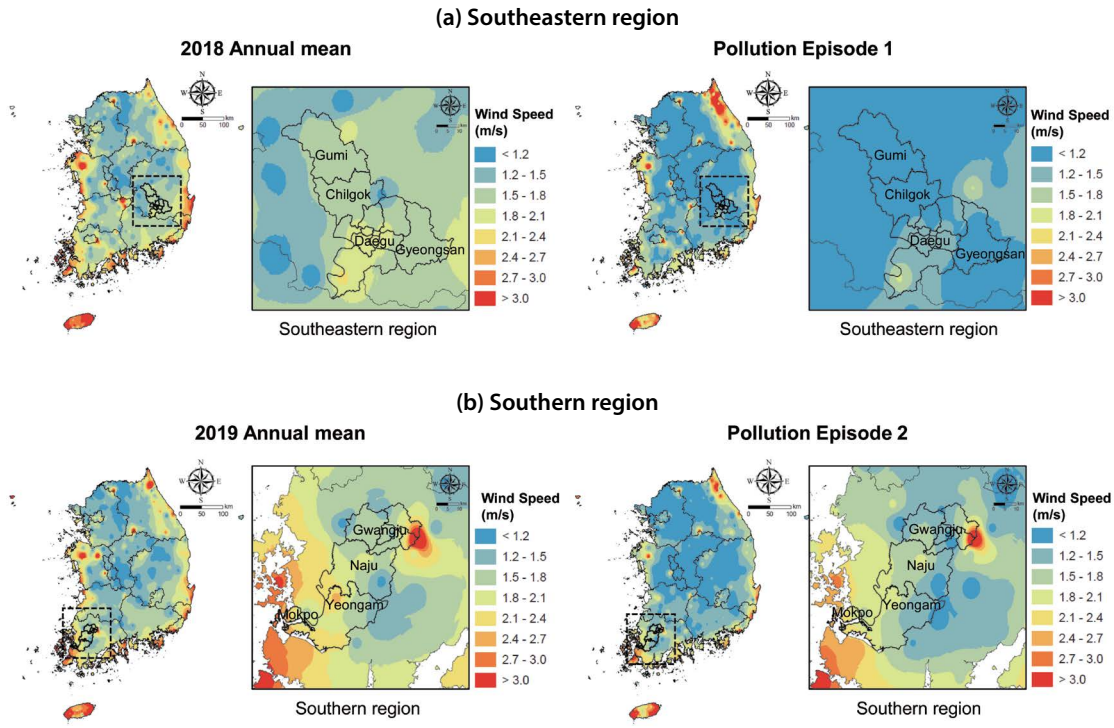

Fig. 4. Spatial distribution of mean wind speed throughout the year and during pollution episodes in (a) the southeastern region and (b) the southern region.

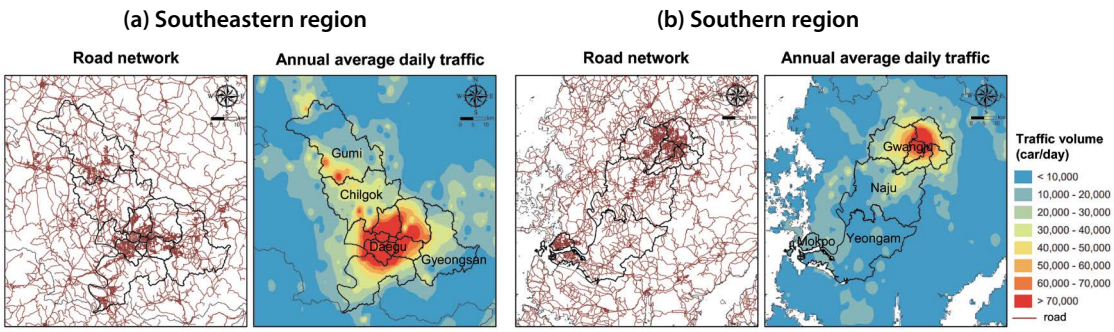

Fig. 5. Road network and annual average daily traffic in (a) the southeastern region and (b) the southern region.

것으로 추정된다.

대기정체에 의한 고농도 사례 발생 여부를 판단하기 위해 연평균 풍속과 각 고농도 기간의 지역별 평균 풍속을 비교하였다(그림 4). 고농도 기간의 풍속(동남권: 1.18 m/s, 남부권: 1.42 m/s)이 연평균 풍속(동남권: 1.66 m/s, 남부권: 1.65 m/s)보다 낮았으므로, 대기정체가 $PM_{2.5}$ 고농도 현상에 영향을 준 것으로 판단된다. 남부권보다 동남권 고농도 기간에 풍속이 더 많이 감소하고 풍속도 낮았다. 그러나 남부권 고농도 기간에 $PM_{2.5}$ 농도가 더 높았기 때문에 남부권은 대기정체뿐만 아니라 외부 영향을 많이 받았다고 판단된다. 그럼에도 불구하고 남부권에서는 고농도 기간에

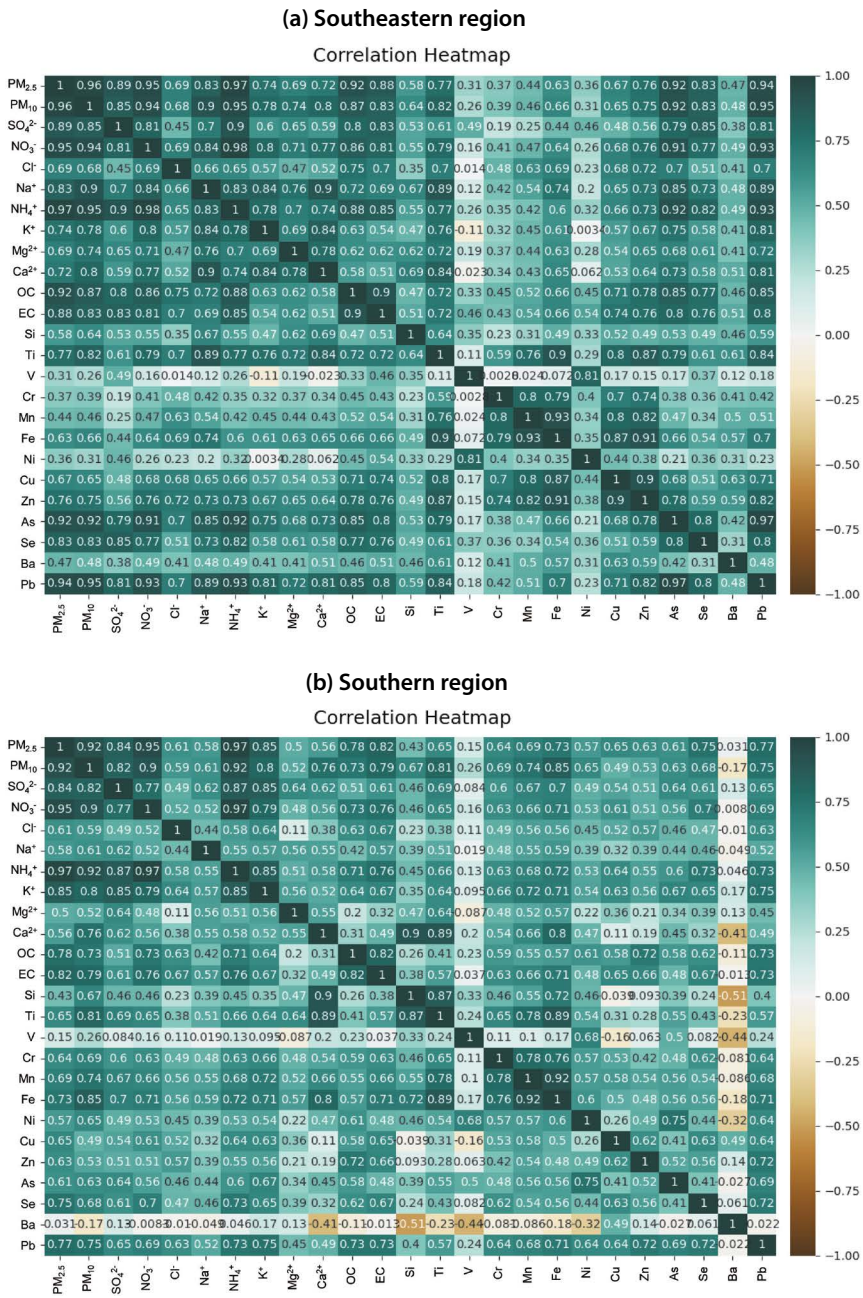

Fig. 6. Spearman's correlation heatmaps for $PM_{2.5}$ and its components in (a) the southeastern region (data obtained from the Yeongnam intensive air monitoring station) and (b) the southern region (data obtained from the Honam intensive air monitoring station).

해안과 산악 지대와 같이 상대적으로 풍속이 높은 지역에서 $PM_{2.5}$ 농도가 주변 지역보다 낮았으므로, 해당 지역의 적은 배출량과 더불어 대기정체가 $PM_{2.5}$ 오염에 영향을 준 것으로 보인다(Seo *et al.*, 2018).

도로망과 연평균 일일 통행량 자료를 지도에 표출하였다(그림 5). 동남권에서는 도로망이 대구시에 집중되어 연평균 일일 통행량도 많았다. 그러나 동남권 고농도 기간 중 $PM_{2.5}$ 농도는 대구시보다 구미시에서 더 높았다. 통행량과 $PM_{2.5}$ 배출량을 함께 고려하면, 구미시의 $PM_{2.5}$ 오염은 차량에 의한 영향보다 산업 배출에 의한 영향이 더 큰 것으로 판단된다. 반면, 대구시의 $PM_{2.5}$ 오염은 차량에 의한 영향이 큰 것으로 판단된다. 남부권의 도로망은 광주시에 집중되어 있으며, 연평균 일일 통행량도 광주시에서 많았다(그림 5b). 이와 같은 분포는 고농도 기간 $PM_{2.5}$ 농도 분포와 유사하였으며, 일반 대도시의 $PM_{2.5}$ 오염은 차량 배출의 영향을 많이 받는다고 해석할 수 있다(Kim *et al.*, 2019b).

3.3 통계 분석을 통한 오염원 파악

고농도 기간의 $PM_{2.5}$ 질량농도와 구성 성분 간의 상관성을 파악하였다(그림 6). 영남권 대기환경연구소에서 측정한 $PM_{2.5}$ 성분 중 NH_4^+, Pb, NO_3^-, SO_4^{2-}, OC, As와 $PM_{2.5}$ 질량농도의 상관계수(r)가 모두 0.9 이상으로 매우 높았다(그림 6a). NH_4^+, NO_3^-, SO_4^{2-}는 2차 무기 이온으로써 SO_4^{2-}와 NO_3^-는 NH_4^+와 결합하여 2차 황산암모늄($(NH_4)_2SO_4$)과 질산암모늄(NH_4NO_3)을 생성하며(Pan *et al.*, 2016), Pb는 주로 산업활동에 의해 배출된다(Dai *et al.*, 2015). 또한, OC는 화석연료 연소에서 배출되며 2차 생성으로도 생성될 수 있다(Zhang *et al.*, 2018). $PM_{2.5}$와 금속(Pb, Se, As, Zn 등)의 상관성도 전반적으로 높았으므로 동남권 고농도 기간에는 2차 무기 입자 및 유기 입자 생성,

Table 1. Variances for the five PCs and loadings for each variable in (a) the southeastern region (data obtained from the Yeongnam intensive air monitoring station) and (b) the southern region (data obtained from the Honam intensive air monitoring station).

	Southeastern region					Southern region				
PC	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5
Variance	34.2%	19.0%	9.1%	5.5%	4.5%	31.9%	15.3%	9.9%	9.1%	5.6%
SO_4^{2-}	−0.27	0.82	−0.07	0.05	0.02	−0.09	0.18	0.09	−0.01	0.89
NO_3^-	−0.36	−0.77	0.24	−0.05	0.05	−0.66	−0.15	−0.30	−0.31	−0.50
Cl^-	0.74	−0.19	−0.03	0.05	−0.04	0.78	−0.03	0.02	0.18	0.07
Na^+	−0.04	−0.12	0.78	0.08	0.19	0.22	0.21	0.54	0.27	0.22
NH_4^+	−0.84	−0.20	0.09	0.04	0.13	−0.52	−0.26	−0.27	−0.35	0.50
K^+	0.20	−0.41	0.23	−0.72	−0.22	0.28	−0.08	0.61	0.42	0.20
Mg^{2+}	−0.22	−0.12	0.85	−0.05	0.08	−0.17	0.30	0.76	0.18	0.15
Ca^{2+}	−0.19	−0.24	0.77	−0.30	0.02	−0.10	0.89	−0.07	−0.10	0.24
OC	0.65	0.34	−0.44	0.15	−0.05	0.65	−0.02	0.25	0.43	−0.43
EC	0.36	0.24	−0.09	0.70	0.00	0.79	0.05	0.11	−0.10	−0.27
Si	0.34	0.73	−0.04	−0.11	−0.12	−0.09	0.92	−0.07	0.03	0.07
Ti	0.75	−0.08	0.47	0.04	0.08	0.15	0.81	0.35	0.19	0.03
V	−0.09	0.76	−0.18	0.37	−0.14	0.05	0.04	−0.10	0.90	0.01
Cr	0.79	0.14	−0.28	0.05	0.07	0.22	0.32	0.49	−0.01	−0.33
Mn	0.88	0.00	−0.01	0.19	0.03	0.41	0.46	0.48	0.07	−0.21
Fe	0.92	0.05	0.01	0.14	0.11	0.41	0.66	0.47	0.13	−0.17
Ni	0.28	0.67	−0.28	0.36	−0.15	0.28	0.11	0.11	0.84	−0.11
Cu	0.82	0.37	−0.28	−0.05	−0.03	0.49	−0.27	0.70	0.05	−0.09
Zn	0.90	0.04	−0.16	0.00	0.17	0.64	−0.14	0.14	0.29	−0.01
As	0.01	−0.17	0.12	0.09	0.80	0.25	0.01	0.24	0.75	0.04
Se	0.01	0.50	−0.04	0.29	0.40	0.23	0.00	0.58	−0.09	−0.28
Ba	0.24	−0.13	0.24	0.50	−0.43	0.06	−0.56	0.62	−0.09	0.30
Pb	0.27	−0.06	0.31	−0.12	0.71	0.46	0.15	0.18	0.17	−0.03

화석연료 연소, 산업단지 배출이 주요 오염원으로 추정된다. 호남권 대기환경연구소에서는 $PM_{2.5}$ 질량농도와 NH_4^+와 NO_3^- 농도의 상관성이 각각 0.96과 0.95로 가장 높았다(그림 6b). 동남권과 비교하여 남부권에서는 Pb와 As 등 금속과의 상관성이 낮은 편이었다.

영남권 대기환경연구소 자료로 PCA를 실시한 결과, 고윳값(Eigenvalue)이 1 이상인 주성분(Principal Component: PC)은 총 5개였으며, Fe, Zn, Mn, Cu, Cr, Ti이 PC1의 주요 성분으로 나타났다(표 1). Fe, Mn, Ti는 지각기원 원소로, 겨울철 낮은 상대습도에서 비산먼지에 의해 농도가 높아질 수 있다고 알려져 있다(Wang *et al.*, 2018). 또한, Fe, Zn, Mn은 금속산업에서 주로 배출되므로(Querol *et al.*, 2006), PC1은 금속산업의 배출과 지각기원 원소의 영향을 복합적으로 보여준다. PC2의 주요 성분은 SO_4^{2-}, Si, V, Ni이었다. SO_4^{2-}, V, Ni은 석유화학산업 관련 배출 영향과 선박 배출의 영향을 복합적으로 나타낸다(Rodrıguez *et al.*, 2004). PC3는 Mg^{2+}, Ca^{2+}, Na^+이 주요 성분이었으며, 해염 입자의 영향을 받은 것으로 추정된다. PC4는 EC가 주요 성분이었으며, 이는 1차 배출의 지시자이다. PC5는 As과 Pb이 주요 성분이었으며, 이는 석탄 연소의 영향을 나타낸다(Dai *et al.*, 2015). 실제로 미세먼지 고농도 기간에는 울산을 비롯한 동남권 주요 오염원의 영향을 복합적으로 받는다. $PM_{2.5}$ 성분자료의 군집분석 결과(계통도)와 PCA 결과(PC1과 PC2의 적재 그림과 점수 그림)를 이용하여 주요 오염원을 판별

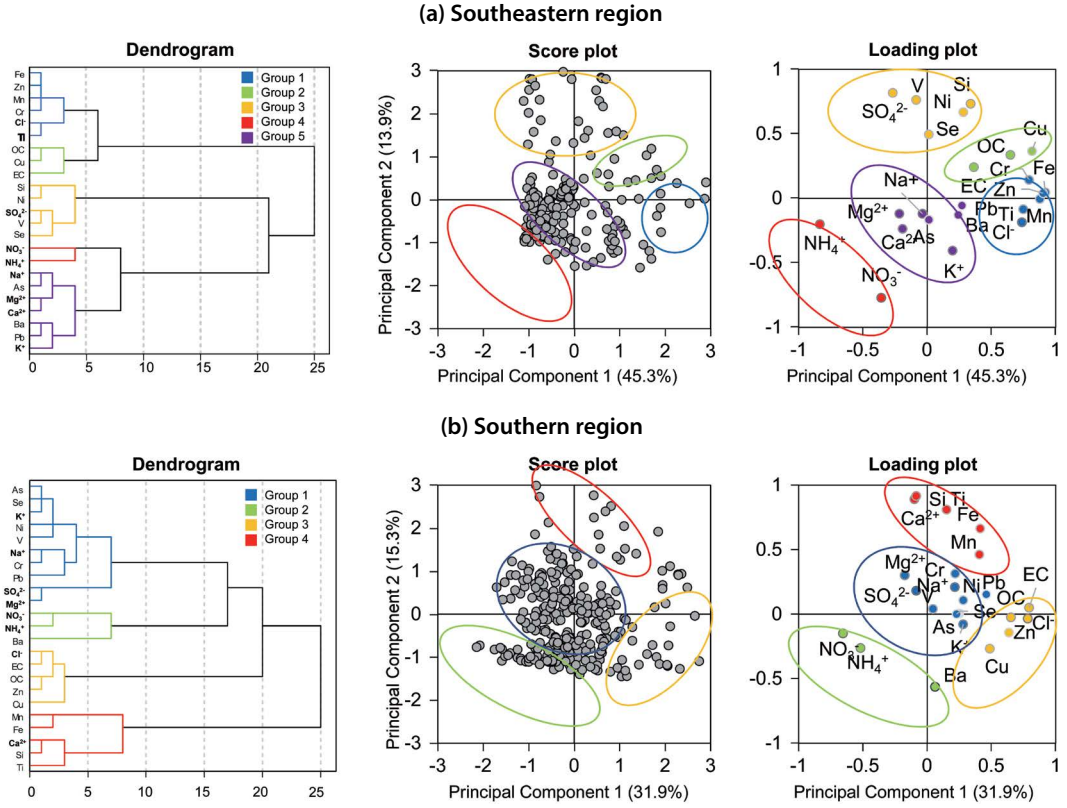

Fig. 7. Groups of $PM_{2.5}$ components classified using hierarchical cluster analysis and PCA score and loading plots for (a) the southeastern region (data obtained from the Yeongnam intensive air monitoring station) and (b) the southern region (data obtained from the Honam intensive air monitoring station).

하였다(그림 7a). $PM_{2.5}$ 성분자료의 계통도에서는 총 다섯 개의 군집이 나타났다. 그룹 1 (Fe, Zn, Mn, Cr, Cl^-)은 산업 배출 영향을 나타내며, 그룹 2 (OC, Cu, EC)는 화석 연료 연소 영향을 나타낸다. 그룹 3 (Si, Ni, SO_4^{2-}, V, Se)은 중유 연소 영향으로 해석된다. 그룹 4 (NO_3^-, NH_4^+)는 질산암모늄(NH_4NO_3)의 전구물질로 2차 생성의 영향을 나타낸다. 그룹 5 (Na^+, As, Mg^{2+}, Ca^{2+}, Ba, Pb, K^+)는 해염 입자의 영향과 지각기원 원소의 영향을 복합적으로 나타낸다. 이를 점수 그림과 적재 그림과 비교하면 동남권 고농도 기간에는 SO_4^{2-}와 NO_3^-의 2차 생성, 해염 입자, 차량과 선박의 연소, 산업 배출의 영향이 복합적으로 나타났다.

호남권 대기환경연구소 자료를 대상으로 PCA를 실시한 결과, PC는 총 5개로 확인되었다. PC1은 Cl^-, EC, Zn가 주요 성분이었다(표 1). Cl^-의 높은 기여도는 해염 입자 영향으로 해석할 수도 있지만, PC1에서는 Na^+의 기여도가 낮았고 Na^+와 Cl^-의 상관성($r=0.4$)도 상대적으로 낮았기 때문에 해염 입자 영향으로 해석하기는 어렵다. Cl^-, EC, Zn는 연소 기원의 인자로 해석 가능하므로 PC1은 화석연료 연소의 영향으로 해석된다(Sharma *et al.*, 2014). PC2의 주요 성분은 Ca^{2+}, Si, Ti, Fe이었으며, 지각 기원의 영향을 나타낸다(Wang *et al.*, 2018). PC3는 Na^+, K^+, Mg^{2+}, Cu가 주요 성분이므로 해양 기원의 영향으로 해석되며(Cai *et al.*, 2020), PC4는 V과 Ni이 주요 성분으로 중유 연소 영향을 나타낸다(Corbin *et al.*, 2018). 마지막으로 PC5는 SO_4^{2-}와 NH_4^+가 주요 성분이므로 SO_4^{2-}의 2차 생성 효과로 해석된다. PC1과 PC2의 적재 그림과 점수 그림을 작성하고 계통도를 작성하여 주요 오염원을 파악한 결과, 총 네 개의 군집이 나타났다(그림 7b). 그룹 1 (As, Se, K^+, Ni, V, Na^+, Cr, Pb, SO_4^{2-}, Mg^{2+})은 차량 배출과 화석연료 연소 등의 영향이 복합적으로 나타났다. 그룹 2 (NO_3^-, NH_4^+, Ba)는 2차 생성의 영향을 나타내었고, 그룹 3 (Cl^-, EC, OC, Zn, Cu)는 화석연료 연소의 영향을 의미한다. 그룹 4 (Mn, Fe, Ca^{2+}, Si, Ti)는 지각기원 원소의 영향을 나타낸다. 이를 점수 그림과 적재 그림과 비교하면 남부권 고농도 기간에는 SO_4^{2-}, NO_3^-, NH_4^+의 2차 생성, 화석연료 연소, 지각 기원 성분의 영향이 복합적으로 나타났다.

4. 결 론

본 연구에서는 동남권과 남부권 우심지역의 고농도 미세먼지 오염특성과 미세먼지 관련 인자의 영향을 파악하고 비교하였다. 동남권 고농도 기간은 한반도 중부와 동부권 지역 위주의 고농도 사례였으며, 국외 유입과 대기정체의 영향을 받았다. 지역 내 차량과 산업 배출의 영향을 확인하였으며, SO_4^{2-}와 NO_3^-의 2차 생성 영향이 나타났다. 그 외 화석연료 연소, 생물성 연소, 산업 배출의 복합적인 영향을 확인하였다. 남부권 고농도 기간은 한반도 서부지역 위주의 고농도 사례였으며, 동남권과 마찬가지로 국외 유입과 대기정체의 영향을 받았다. 또한, 지역 내 차량 배출과 SO_4^{2-}, NH_4^+, NO_3^-의 2차 생성 영향이 나타났다. 그 외 화석연료 연소, 중유 연소, 자연 기원(해양 및 지각 기원)성분의 복합적인 영향을 확인하였다. 결론적으로, 동남권과 남부권 모두 고농도 기간에는 국외 유입 영향을 받았으며, SO_4^{2-}와 NO_3^-의 2차 생성과 산업 배출의 영향이 나타났다. 그러나 지역 내 산업 배출에 의한 영향은 동남권에서 더 우세하게 나타났으며, NH_4^+의 2차 생성과 자연 기원 성분의 영향은 남부권에서만 우세하게 나타났다. 이러한 결과를 종합하면, 미세먼지 관리를 위해 동남권에서는 산업 배출을 줄이고, 남부권에서는 미세먼지 생성 기작을 고려하여 2차 무기입자의 생성을 저감해야 한다. 본 연구에서 제시한 지리정보시스템과 통계기법을 전국 권역에 적용하여 고농도 미세먼지 오염특성을 파악할 수 있으며, 이 연구기법을 고도화하여 실시간 미세먼지 고농도 사례 분석이 가능한 자료처리 시스템을 개발할 수 있을 것으로 기대한다.

감사의 글

본 연구는 국립환경과학원 연구용역사업(NIER-2022-04-02-032)의 지원으로 수행되었습니다.

References

Cai, Q.-L., Dai, X.-R., Li, J.-R., Tong, L., Hui, Y., Cao, M.-Y., Li, M., Xiao, H. (2020) The characteristics and mixing states of $PM_{2.5}$ during a winter dust storm in Ningbo of the Yangtze River Delta, China, Science of The Total Environment 709, 136146.

Chen, S., Cui, K., Yu, T.-Y., Chao, H.-R., Hsu, Y.-C., Lu, I.-C., Arcega, R.D., Tsai, M.-H., Lin, S.-L., Chao, W.-C. (2019) A big data analysis of $PM_{2.5}$ and PM_{10} from low cost air quality sensors near traffic areas, Aerosol and Air Quality Research, 19, 1721-1733.

Corbin, J.C., Mensah, A.A., Pieber, S.M., Orasche, J., Michalke, B., Zanatta, M., Czech, H., Massabò, D., Buatier de Mongeot, F., Mennucci, C. (2018) Trace metals in soot and $PM_{2.5}$ from heavy-fuel-oil combustion in a marine engine, Environmental Science & Technology, 52, 6714-6722.

Dai, Q.-L., Bi, X.-H., Wu, J.-H., Zhang, Y.-F., Wang, J., Xu, H., Yao, L., Jiao, L., Feng, Y.-C. (2015) Characterization and Source Identification of Heavy Metals in Ambient PM_{10} and $PM_{2.5}$ in an Integrated Iron and Steel Industry Zone Compared with a Background Site, Aerosol and Air Quality Research, 15, 875-887.

Gu, H., Yan, W., Elahi, E., Cao, Y. (2020) Air pollution risks human mental health: an implication of two-stages least squares estimation of interaction effects, Environmental Science and Pollution Research, 27, 2036-2043.

Hwang, I.-J., Cho, Y.-H., Choi, W.-G., Lee, H.-M., Kim, T.-O. (2008) Quantitative estimation of PM-10 source contribution in Gumi city by the positive matrix factorization model, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 24, 100-107.

Jo, E.-J., Lee, W.-S., Jo, H.-Y., Kim, C.-H., Eom, J.-S., Mok, J.-H., Kim, M.-H., Lee, K., Kim, K.-U., Lee, M.-K. (2017) Effects of particulate matter on respiratory disease and the impact of meteorological factors in Busan, Korea, Respiratory Medicine, 124, 79-87.

Kim, I., Lee, K., Lee, S., Kim, S.D. (2019a) Characteristics and health effects of $PM_{2.5}$ emissions from various sources in Gwangju, South Korea, Science of The Total Environment, 696, 133890.

Kim, J.H. (2019) Exploratory Analysis and Visualization of Spatio-Temporal Data Using Data Mining, Journal of the Association of Korean Photo-Geographers, 29, 143-158.

Kim, S.-J., Park, M.-K., Lee, S.-E., Go, H.-J., Cho, B.-C., Lee, Y.-S., Choi, S.-D. (2019b) Impact of traffic volumes on levels, patterns, and toxicity of polycyclic aromatic hydrocarbons in roadside soils, Environmental Science: Processes & Impacts, 21, 174-182.

Lee, S.-J., Lee, B.-K., Kim, S.-J., Kim, D.-G., Lee, G., Kang, H.-J., Kim, H.-S., Park, D.-Y., Choi, S.-D. (2022) Reduction efficiency of secondary organic aerosols by emission reduction scenarios of volatile organic compounds in Ulsan, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 38, 919-932.

Lee, S.-J., Lee, H.-Y., Kim, S.-J., Kang, H.-J., Kim, H., Seo, Y.-K., Shin, H.-J., Ghim, Y.S., Song, C.-K., Choi, S.-D. (2023) Pollution characteristics of $PM_{2.5}$ during high concentration periods in summer and winter in Ulsan, the largest industrial city in South Korea, Atmospheric Environment, 292, 119418.

Ministry of Environment (MOE) (2020) Special act about improvement of atmospheric environment in air quality control area. Ministry of Environment.

National Institute of Environmental Research (NIER) (2021) Air pollution monitoring network insallationand operation guidelines. National Institute of Environmental Research.

Pan, Y., Wang, Y., Zhang, J., Liu, Z., Wang, L., Tian, S., Tang, G., Gao, W., Ji, D., Song, T., Wang, Y. (2016) Redefining the importance of nitrate during haze pollution to help optimize an emission control strategy, Atmospheric Environment, 141, 197-202.

Park, J., Kim, H., Kim, Y., Heo, J., Kim, S.-W., Jeon, K., Yi, S.-M., Hopke, P.K. (2022) Source apportionment of $PM_{2.5}$ in Seoul, South Korea and Beijing, China using dispersion normalized PMF, Science of The Total Environment, 833, 155056.

Purwanto, P., Utaya, S., Handoyo, B., Bachri, S., Astuti, I.S., Utomo, K.S.B., Aldianto, Y.E. (2021) Spatiotemporal analysis of COVID-19 spread with emerging hotspot analysis and space-time cube models in East Java, Indonesia, ISPRS International Journal of Geo-Information, 10, 133.

Querol, X., Zhuang, X., Alastuey, A., Viana, M., Lv, W., Wang, Y., López, A., Zhu, Z., Wei, H., Xu, S. (2006) Speciation and sources of atmospheric aerosols in a highly industri-

alised emerging mega-city in Central China, Journal of Environmental Monitoring, 8, 1049-1059.

Rodrıguez, S., Querol, X., Alastuey, A., Viana, M.-M., Alarcon, M., Mantilla, E., Ruiz, C. (2004) Comparative PM_{10}-$PM_{2.5}$ source contribution study at rural, urban and industrial sites during PM episodes in Eastern Spain, Science of The Total Environment, 328, 95-113.

Ryou, H.g., Heo, J., Kim, S.-Y. (2018) Source apportionment of PM_{10} and $PM_{2.5}$ air pollution, and possible impacts of study characteristics in South Korea, Environmental Pollution, 240, 963-972.

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.

Sharma, S.K., Mandal, T., Saxena, M., Sharma, A., Datta, A., Saud, T. (2014) Variation of OC, EC, WSIC and trace metals of PM_{10} in Delhi, India, Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 113, 10-22.

Song, W., Wang, C., Chen, W., Zhang, X., Li, H., Li, J. (2020) Unlocking the spatial heterogeneous relationship between Per Capita GDP and nearby air quality using bivariate local indicator of spatial association, Resources, Conservation and Recycling, 160, 104880.

Wang, H., Qiao, B., Zhang, L., Yang, F., Jiang, X. (2018) Characteristics and sources of trace elements in $PM_{2.5}$ in two megacities in Sichuan Basin of southwest China, Environmental Pollution, 242, 1577-1586.

World Health Organization (WHO) (2011) Health effects of particulate matter. World Health Organization.

Yeo, M.J., Kim, Y.P. (2019) Trends of the PM_{10} concentrations and high PM_{10} concentration cases in Korea, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 35, 249-264.

Yu, G.H., Park, S.S., Ghim, Y.S., Shin, H.J., Lim, C.S., Ban, S.J., Yu, J.A., Kang, H.J., Seo, Y.K., Kang, K.S. (2018) Difference in chemical composition of $PM_{2.5}$ and investigation of its causing factors between 2013 and 2015 in air pollution intensive monitoring stations, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 34, 16-37.

Zhang, Y.L., El-Haddad, I., Huang, R.J., Ho, K.F., Cao, J.J., Han, Y., Zotter, P., Bozzetti, C., Daellenbach, K.R., Slowik, J.G., Salazar, G., Prévôt, A.S.H., Szidat, S. (2018) Large contribution of fossil fuel derived secondary organic carbon to water soluble organic aerosols in winter haze in China, Atmospheric Chemistry and Physics, 18, 4005-4017.

Authors Information

주정태 (울산과학기술원 도시환경공학과 석박사통합과정)
(jeongtae@unist.ac.kr)

이상진 (울산과학기술원 도시환경공학과 박사과정)
(lsjin1347@unist.ac.kr)

최종혁 (이투엠쓰리(주) 기술이사)
(bigdream@e2m3.com)

김성태 (이투엠쓰리(주) 대표이사)
(kst7579@e2m3.com)

송인호 (국립환경과학원 대기환경연구과 전문위원)
(onepeace00@korea.kr)

정해진 (국립환경과학원 대기환경연구과 연구사)
(haejin13@korea.kr)

신혜정 (국립환경과학원 대기환경연구과 연구관)
(shjoung@korea.kr)

박정민 (국립환경과학원 대기환경연구과 과장)
(ilikepaul@korea.kr)

최성득 (울산과학기술원 도시환경공학과 교수)
(sdchoi@unist.ac.kr)