

수도권 환경계획을 위한 초미세먼지 농도의 공간 군집특성과 고농도지역 분석*

임철희¹⁾ · 박득희¹⁾

¹⁾ 국민대학교 교양대학 교수

Spatial clustering of PM2.5 concentration and their characteristics in the Seoul Metropolitan Area for regional environmental planning*

Lim, Chul-Hee¹⁾ and Park, Deuk-Hee¹⁾

¹⁾ College of General Education, Kookmin University, Professor.

ABSTRACT

Social interest in the fine particulate matter has increased significantly since the 2010s, and various efforts have been made to reduce it through environmental plans and policies. To support such environmental planning, in this study, spatial cluster characteristics of fine particulate matter (PM2.5) concentrations were analyzed in the metropolitan area to identify high-risk areas spatially, and the correlation with local environmental characteristics was also confirmed. The PM2.5 concentration for the recent 5 years (2016-2020) was targeted, and representative spatial statistical methods Getis - Ord Gi* and Local Moran's I were applied. As a result of the analysis, the cluster form was different in Getis - Ord Gi* and Local Moran's I, but they show high similarity in direction, therefore complementary results could be obtained. In the high concentration period, the hotspot concentration of the Getis - Ord Gi* method increased, but in Local Moran's I, the HH region, the high concentration cluster, showed a decreasing trend. Hotspots of the Getis - Ord Gi* technique were prominent in the Pyeongtaek-Hwaseong and Yeosu-Icheon regions, and the HH cluster of Local Moran's I was located in the southwest, and

*본 연구는 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 지원(과제번호: 2021R1F1A1063809)과 국민대학교의 학술지원을 받아 수행되었습니다.

First author : Lim, Chul-Hee, College of General Education, Kookmin University, Professor,
Tel : +82-2-910-6569, E-mail : clim@kookmin.ac.kr

Corresponding author : Park, Deuk-Hee, College of General Education, Kookmin University, Professor,
Tel : +82-2-910-6644, E-mail : parkdh@kookmin.ac.kr

Received : 18 January, 2022. **Revised** : 22 February, 2022. **Accepted** : 22 February, 2022.

the LL cluster was located in the northeast. As in the case of the metropolitan area, in the results of Seoul, there was a phenomenon of division between the northeast and southwest regions. The PM2.5 concentration showed a high correlation with the elevation, vegetation greenness and the industrial area ratio. During the high concentration period, the relation with vegetation greenness increased, and the elevation and industrial area ratio increased in the case of the annual average. This suggests that the function of vegetation can be maximized at a high concentration period, and the influence of topography and industrial areas is large on average. This characteristic was also confirmed in the basic statistics for each major cluster. The spatial clustering characteristics of PM2.5 can be considered in the national land and environmental plan at the metropolitan level. In particular, it will be effective to utilize the clustering characteristics based on the annual average concentration, which contributes to domestic emissions.

Key Words : *fine particulate matter, spatial cluster, spatial statistics, environmental planning, Seoul metropolitan area*

I. 서 론

2013년 세계보건기구(WHO) 산하 국제암연구소에서 미세먼지를 1급 발암물질로 지정하면서, 국내는 물론이고, 전 세계적으로 미세먼지와 초미세먼지에 대한 관심이 크게 증가하였다(WHO, 2017; Zhang et al., 2017; Apte et al., 2018). 우리나라를 비롯한 선진국들의 경우, 관측된 미세먼지 농도에서 2000년대 이후 증가하는 추세는 아니지만, 주변 개발도상국들의 영향으로 지속적인 위험성은 안고 있다(Yeo and Kim, 2019; Lim et al., 2020). 현재 추세에 대한 미래전망에서도 미세먼지의 농도나 건강영향은 증가할 것으로 예견되고 있다(Park et al., 2020). 특히, 관측되는 농도 변화와 관계없이 건강영향에 대한 입증과 미세먼지 예보의 등장 등으로 사회적 관심이 크게 증가되었다(Ryu and Min, 2020).

우리나라의 미세먼지 농도의 경우 국내배출과 국외유입으로 분류되며, 미세먼지에 대한 범국민적 관심 증대에 따라 국외유입에 대한 민감성이 크게 증가하였다(Park and Shin, 2017; Park et al., 2020; Oh, 2021). 중국의 농도가 매우 높은 것은 사실이며, 계절에 따라 국내로 유입되는 것이 밝

혀진 바 있으나, 국내배출 또한 세계 평균치를 상회하는 수준이다(Moon et al., 2018; Lim et al., 2020). 특히, 북서풍이 지배적인 겨울-봄철 외에도 고농도 미세먼지가 발생하는 것은 국외유입뿐 아니라, 국내배출에 대한 관리가 필요함을 시사한다. 중국 등 국외유입의 경우 국내정책과 활동으로 저감시킬 수 있는 영향은 미미하나, 국내배출의 경우 다양한 정책활동을 통해 저감 잠재성이 크다.

미세먼지 농도의 국민적 민감성이 높아지고 건강 영향이 지속적으로 제시됨에 따라, 중앙정부와 지방자치단체에서 다양한 저감노력이 이어지고 있다(Kim et al., 2018). 고농도 시기에 노후 발전소의 가동을 중단하거나, 사업장 배출기준을 강화하고, 저공해차량 보급을 촉진하는 등 국내배출을 관리 및 제어하고자 하는 노력은 범부처 차원에서 이루어지고 있다(관계부처합동, 2019). 그럼에도 고농도 현상은 지속되고 있으며, 국민들의 눈높이에 맞는 저감대책이 필요한 현실이다.

특히, 국내 인구 50% 이상이 거주하는 수도권 지역의 경우 미세먼지 농도도 상위권이며, 민감성이나 취약계층으로의 노출도 높아 미세먼지 저감과 관리의 중요성이 매우 크다(GRI, 2019;

Table 1. Monthly PM2.5 concentration of Seoul in the recent five years (Source: Air Korea)

Year	Jan	Feb	Mar	Apr	May	June	July	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	ave
2020	29	28	25	21	19	21	13	14	11	17	24	27	21
2019	38	35	45	21	29	20	19	16	12	15	20	28	25
2018	32	30	34	26	23	24	16	14	10	15	28	24	23
2017	32	28	39	26	24	22	22	13	19	15	22	32	25
2016	27	23	32	30	29	28	21	22	23	20	28	30	26
ave	32.25	29	37.5	25.75	26.25	23.5	19.5	16.25	16	16.25	24.5	28.5	24.75

Statistics of Korea, 2021). 도시비율이 높고 지역별로 특화산업단지가 위치한 특성상 공간계획의 관점에서 미세먼지 관리가 이루어질 필요가 있다(Sung, 2020; Yoon, 2020). 또한, 미세먼지에 대한 노출 저감을 위해 그린인프라 계획의 중요성이 제시되고 있다(Seok et al., 2021). 기존에도 미세먼지에 관한 연구들이 수도권을 대상으로 다수 수행되었으나, 배출량이나, 농도 변화 및 원인, 저감대책 등에 대한 내용에 집중되었다(Kim et al., 2018; Kim et al., 2019; Kang et al., 2021). 장기적인 공간계획과 그린인프라 조성 등을 위해서는 수도권 미세먼지 농도의 공간특성을 규명하는 연구가 필요한 실정이다.

본 연구에서는 국내 인구의 50% 이상이 밀집되어 있는 수도권을 대상으로 초미세먼지(PM2.5) 농도의 공간적 군집특성들을 분석하여 공간통계적인 고위험 혹은 취약지역을 규명하고자 하며, 해당지역의 지역특성과의 연관성도 확인하고자 한다. 이를 위해 최근 5년(2016-2020)간의 초미세먼지 농도를 대상으로 하며, 두 가지 대표적인 공간통계 기법을 통해 군집화를 수행한다. 또한, 생활력도, 지형, 도시화 등 지역 토지이용환경 특성에 따른 영향을 함께 분석하여 군집지역 형성의 원인과 해결에 대한 이해를 높이고자 하며, 궁극적으로 수도권의 광역적인 환경계획과 국토계획 등에 기여하고자 한다.

II. 자료 및 방법

1. 연구대상지

본 연구에서는 서울특별시, 인천광역시, 경기도를 포함하는 수도권 전 지역을 대상으로 연구를 수행하였다. 공간단위는 읍면동의 행정단위로 수행되었다. 수도권은 약 11,865km²의 면적으로, 전 국토의 약 11%에 해당한다(Statistics of Korea, 2021). 서울에는 25개 자치구, 인천에는 8개 자치구와 2개의 군, 경기도에는 28개의 자치시와 3개의 군으로 구성되어 있다. 본 연구에서 사용된 기초 행정단위로, 서울은 426개의 동, 인천은 1개의 읍, 19개의 면, 135개의 동, 경기도는 38개의 읍, 98개의 면, 414개의 동으로 이루어져 있다. 총 1,131개의 행정단위가 본 연구의 연구대상지로 활용되었다. 수도권은 우리나라 인구의 50.4%를 차지하고 있으며, 약 2,602만명이 거주하고 있다. 광역자치단체별로는 서울은 약 950만명, 인천은 약 294만명, 경기도는 약 1,356만명으로, 11%의 국토에 50%가 넘는 국민이 거주하며 높은 밀도를 나타내고 있다.

연평균 초미세먼지 농도로는 COVID-19의 영향이 없었던 2019년을 기준으로, 서울은 약 25 μg/m³, 인천은 23 μg/m³, 경기도는 25.5 μg/m³ 수준이었다(MOE, 2020). 이는 부산(21 μg/m³), 대구(22 μg/m³), 강원(21 μg/m³) 등과 비교하면 상대적으로 높은 수준임을 알 수 있다. 지리적으로는 중국과 인접한 서해안을 포함하고 있으며, 북쪽으로는 북한, 동쪽으로는 강원도, 남쪽으로는 충청남·북도과 접하고 있다.

대상 시기는 각 데이터의 확정자료 활용 및

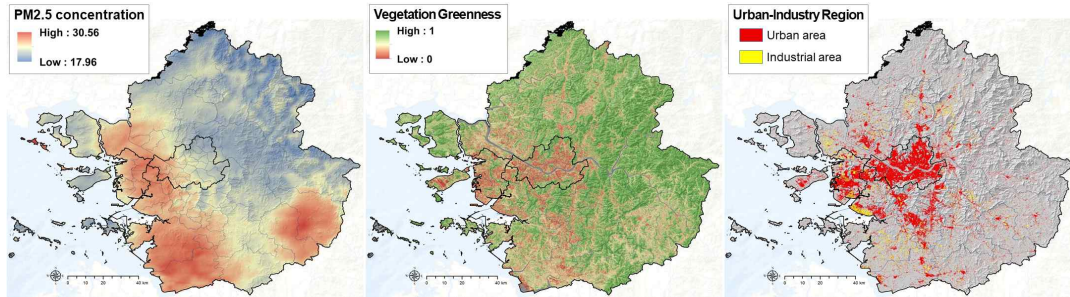


Figure 1. Spatial information of PM2.5 concentration, vegetation greenness and urban-industry region used in this study

구축이 가능하면서 최근의 특성을 확인할 수 있도록, 2016년부터 2020년까지 5년을 대상으로 하였다. 또한, 연평균 농도와 고농도 시기 평균 농도를 함께 분석하였는데, 최근 5년 간 월별 초미세먼지 농도에서 상위 3개 월로 나타난 1월, 2월 3월을 고농도 시기로 정의하였다(Table 1).

2. 연구자료

연구수행에 가장 기본이 되는 초미세먼지 농도 자료는 van Donkelaar 등(2021)에 의해 제작된 상세화된 초미세먼지 공간자료를 활용하였다. van Donkelaar 등(2021)은 전 세계에서 관측된 초미세먼지 농도자료와 MODIS(MODerate resolution Imaging Spectroradiometer), MISR (Multiangle Imaging SpectroRadiometer), SeaWiFS (Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor) 등의 대기 관측 다중위성영상, GEOS-Chem 대기화학 모델 출력자료를 융합활용하고, 지리가중회귀모델로 공간단위 상세화를 수행하여 연평균 및 월평균 초미세먼지 농도자료를 제작하였다. 특히, 회귀모델 변수로 지형인자를 포함하여 지형에 따른 초미세먼지 농도 차이를 상세하고 모사하고 있다. 전 세계를 대상으로 자료를 제작하였으며, 대륙별로 분할하여 제공하고 있다. 최대 공간해상도는 0.01 decimal degree로 약 1km²이다. 이 자료는 초미세먼지 연구에 다양하게 활용되고 있으며(Lim et al., 2020; Yue et al., 2020), 구체적인 방법론은 제작방법을 중심으로 기술한 논문에서 상세히 수록되어 있다(van Donkelaar et al., 2016; van Donkelaar et al., 2021).

초미세먼지의 군집특성을 지역환경과 분석하기 위해 본 연구에서는 토지피복도의 도시지역, 공업지역, 그리고 정규화식생지수를 기반으로 한 식생활력도를 활용하였다. 먼저, 토지피복도는 2018년 환경부에서 제작한 중분류 토지피복도를 활용하였다. 22개 항목으로 분류된 토지피복을 도시지역(주거, 상업, 공업, 교통, 공공 등)과 공업지역을 별도로 분리하였다. 이를 읍면동의 행정단위에서 면적당 도시비율과 공업지역 비율로 환산하여 연구에 활용하였다(Figure 1).

식생자료의 경우 Sentinel-2위성을 활용하여 수도권 전지역의 10m²급 정규화식생지수를 구축하여 활용하였다. Google Earth Engine에서 2019년 1월부터 2020년 12월까지 월별 정규화식생지수를 산정한 후 Maximum Value Composition을 통해 2019년과 2020년의 정규화식생지수를 구축하였으며, 두 해의 정규화식생지수 평균 값을 산출하여 지역 식생활력도 산정에 활용하였다(Figure 1). 식생의 경우 시계열적 변화가 관측될 수 있으므로, 가급적 최근 데이터를 활용하였고, 단일연도로는 영상에 따른 오차가 발생할 수 있으므로, 2개 연도의 평균 값을 활용하였다. 최종적으로 읍면동 행정단위에서 식생활력도 평균값을 산출하여 분석에 활용하였다. 지형인자의 경우 국토지리정보원에서 제작한 수치표고모델(Digital Elevation Model) 자료를 활용하였으며, 30m 해상도의 고도정보를 수도권지역으로 추출하고, 읍면동 행정단위에서 평균값을 산출하여 분석에 활용하였다.

3. 연구방법

공간적 군집특성을 규명하기 위해 Hotspot을 찾아내는 Getis-Ord G_i^* 와 Local Moran's I 두 가지 대표적인 공간통계기법을 활용하였다. 두 기법은 군집화 개념이 다르므로, 함께 사용하였을 때, 공간군집에 대한 규명에 용이하다(Ko and Cho, 2020). 이 기법들은 공간데이터가 갖는 공간적 자기상관성을 통해 특정 현상이 집중 혹은 분산되는 경향을 찾아낸다(Shin and Lee, 2019). 이러한 공간적 군집을 Hotspot으로 설명하며, 다양한 환경인자를 통해 공간특성을 규명하는 데 폭넓게 활용되고 있다(Kim et al., 2016; Kim et al., 2019).

먼저, Getis-Ord G_i^* 기법은 일정 범위 내에서 인접 데이터들과의 개별적 군집경향을 검정하는 공간통계기법이다. Getis-Ord G_i^* 는 각각의 군집 정도를 보여주며, 객체의 z-score를 산출한다. 여기서 통계적으로 높은 값으로 분류되기 위해서는 해당 지역의 특정 값이 높을 뿐 아니라, 주변부에 값이 높은 지역이 분포해야 한다. 즉, 초미세먼지 농도가 높은 지역에서 인접지역까지 농도가 높은 지역은 Hotspot으로, 반대로 농도가 낮은 군집은 Coldspot으로 나타나게 된다(Getis and Ord, 1992; Ko and Cho, 2020).

$$G_i^* = \frac{\sum_{j=1}^n w_{i,j} - \bar{X} \sum_{j=1}^n w_{j,j}}{s \sqrt{\frac{n \sum_{j=1}^n w_{i,j}^2 - \left(\sum_{j=1}^n w_{j,j} \right)^2}{n-1}}}$$

(식 1)

$$\bar{X} = \frac{\sum_{j=1}^n x_j}{n} \quad (\text{식 2})$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n x_j^2}{n} - (\bar{X})^2} \quad (\text{식 3})$$

여기서, i, j 는 분석의 공간단위를 말하며, 겹개,와 겹개는 i 와 j 의 속성 데이터, 겹개, 갯는 i 와 j 지역간 공간적 가중치, n 은 공간단위의 분석 수이다(식 1~3). 일반적으로 Getis-Ord G_i^* 의 Z-score가 -1.65보다 작거나 +1.65보다 큰 값을 나타낼 때는 90%의 신뢰구간을 의미하고, -1.96보다 작거나 +1.96보다 큰 값을 보일 때는 95%의 신뢰구간을 의미하며, -2.58보다 작거나 +2.58보다 큰 값은 99%의 신뢰구간을 의미한다(Peeters et al., 2015).

Local Moran's I 는 대표적인 LISA(Local Indicator of Spatial Association)기법으로써, 특정지역과 그 주변을 비교하여 주변부와 뚜렷한 차이가 확인되는 지역을 찾아낸다. 공간자기상관성을 측정하는 데 폭넓게 활용되고 있으며, 본 연구에서는 초미세먼지 농도를 활용하여 Local Moran's I 를 측정 한 후, 네 가지 경우에 대한 군집을 도출하였다. 공간적 연관성이 존재하는 높은 지수끼리 인접하는 HH(High-High), 낮은 지수끼리 인접하는 LL(Low-Low), 높고 낮은 지수들이 인접한 HL(High-Low), LH(Low-High) 등 네 가지로 구분된다(Anselin, 1995; Ko and Cho, 2020). HL은 해당지역 값이 높는데, 인근 지역 값이 낮음을 의미하고, LH는 해당지역 값이 낮고 인근지역 값이 높음을 의미한다. Local Moran's I 는 다음과 같은 식을 통해 산정된다.

$$I = \frac{(Z_i - \bar{Z})}{S_z^2} \sum_{j=1}^n [w_{ij}(Z_j - \bar{Z})] \quad (\text{식 4})$$

여기에서, S_z^2 는 분산, 겹개갯는 해당 지역의 속성 변수, Z 는 공간가중치 행렬을 설명한다.

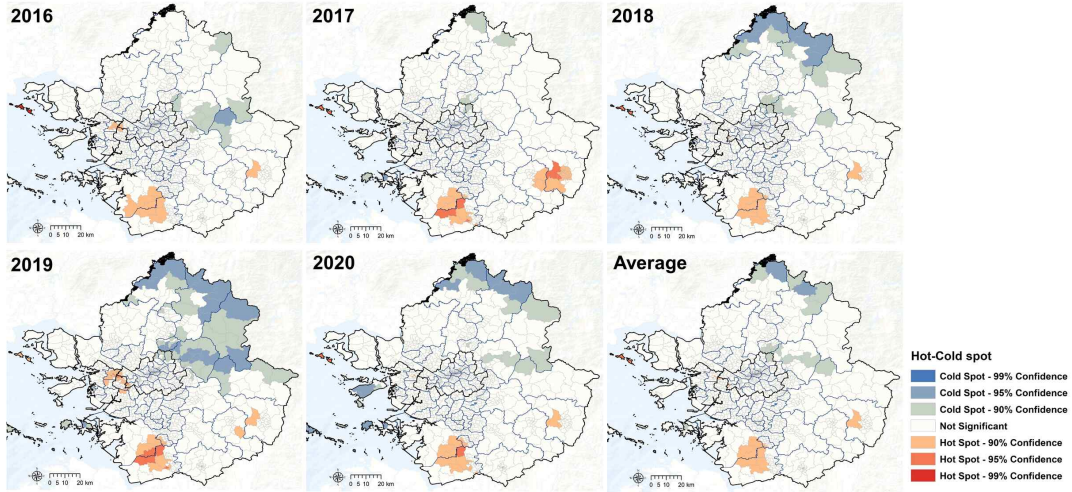


Figure 2. Annual Hotspot Analysis using Getis - Ord G_i^* for Seoul Metropolitan Region

Local Moran's I 지수를 의미하는 I 값은 인접 지역(Z 값)과 해당 지역(Z 값)의 차이에 대한 표준화 값이며, 그 크기는 인접 지역과 해당 지역의 유사성 혹은 차별성을 의미한다.

초미세먼지 농도와 지역환경특성과의 관계 분석을 위해서는 상관관계 분석과 기초통계량 분석을 시행했다. Pearson 상관관계분석을 통해 변수 간 상관계수를 도출하였고, 각 대표 군집에 대한 기초통계량을 비교하여 군집별 환경특성을 확인하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 수도권 연평균 초미세먼지의 공간적 군집특성

두 가지 기법을 통해 수도권 전역의 초미세먼지 공간 군집특성을 분석한 결과, 유사한 방향성을 보였지만, 방법론에 따른 특성 차이가 두드러졌다. Getis - Ord G_i^* 기법에서는 초미세먼지 농도가 두드러지는 지역 일부를 중심으로 Hotspot과 Coldspot이 도출되는 특성이 나타났다(Figure 2). 최근 5년 간의 변화가 두드러진 방향성을 갖지는 않았으나, 2016-2017년에 비해 2018-2020년에 Coldspot이 증가하는 경향이 확인되었다. 연

도별로 Coldspot의 범위는 상이하였으나 전반적으로 수도권 북동부 지역에서 두드러졌다. 특히, 연천군, 포천시, 가평군 등 서울에서 먼 지역에서 가장 많은 빈도의 Coldspot이 나타났으며, 남양주시, 양평군, 의정부시 등 비교적 서울에 인접한 시군과 서울 도봉구, 노원구에서도 1회 이상 확인되었다. Hotspot의 경우 특정 지역에 반복해서 나타났다. 특히 모든 시기에 평택시와 화성시에 걸친 지역이 두드러졌으며, 이천시와 여주군에 걸친 지역도 뒤를 이었다. 그 외에는 서울-부천-인천이 인접한 지역에서 낮은 빈도로 Hotpost이 분포하였다. 또한, 자체 대기오염물질 배출이 매우 제한적인 강화군의 도서지역인 서도면에서 매우 높은 confidence의 Hotspot이 나타난 것은 주목할 만한 부분이다. 2019년의 경우 Coldspot이 가장 많은 지자체에서 나타났으나, Hotspot 또한 많은 지역에서 분포하는 현상도 관찰되었다. 5년 평균 값을 통한 결과에서는, 연도별 평가에서 두드러진 평택-화성, 여주군, 강화 서도면, 서울 구로, 부천, 인천 계양구에서 Hotspot이 확인되었고, 연천군, 포천시, 의정부시, 남양주시, 서울 노원구 등에서 Coldspot이 확인되었다.

Local Moran's I 기법을 통한 군집특성 분석결과에서는 수도권 지역을 초미세먼지 농도 특성으

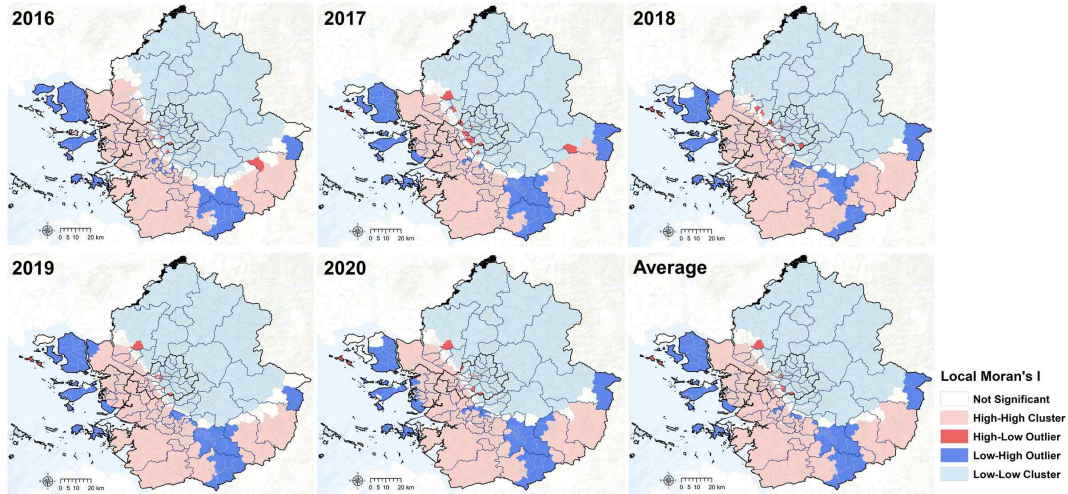


Figure 3. Annual Hotspot Analysis using Local Moran's I for Seoul Metropolitan Region

로 유형화 할 수 있는 방향이 나타났다. 초미세먼지 농도가 높은 지역이 인접하는 HH지역이 수도권 서남부를 중심으로 군집을 이루었고, 농도가 낮은 지역이 인접하는 LL지역은 수도권 북동부를 중심으로 나타났다(Figure 3). 유의하지 않은 지역(Not Significant)은 HH와 LL지역 사이에서 분포하였고, HL과 LH 이상치(Outlier) 지역은 서해안과 양평군 동부, 그리고 서부와 남부 HH지역 사이에서 형성되었다. 연도별 특성은 크게 두드러지지 않았으나, 각 군집영역에서의 범위가 소폭 변화하는 형태로 나타났다. 5개 연도와 평균에서 모두 연천군, 포천시, 가평군, 남양주시, 의정부시 등은 전 지역이 LL군집지역에 포함되었고, 반면에 평택시, 화성시, 부천시, 안산시, 시흥시 등은 모든 지역이 HH 군집지역으로, 여주군, 이천시, 인천광역시 등은 대부분의 지역이 HH군집지역으로 포함된 것으로 확인되었다. Getis - Ord Gi*기법에서도 Hotspot으로 나타난 평택-화성과 여주-이천 지역을 중심으로 HH 군집지역이 특징적으로 나타났으며, 인천 대부분 지역과 서울-경기 서부지역이 HH에 포함된 것이 Getis - Ord Gi* 결과와의 차이점으로 볼 수 있다.

2. 수도권 고농도 시기 초미세먼지의 공간적

군집특성

초미세먼지 고농도 시기의 평균 농도를 활용한 군집특성 분석에서는 연평균 결과와 유사한 형태를 보였으나, Getis - Ord Gi*에서는 Hotspot 지역이 보다 두드러지고, Coldspot이 감소하였으며, Local Moran's I에서는 유의하지 않은 지역이 증가하였다. 고농도시기의 연도별 Getis - Ord Gi*기법 적용 결과 2016년도에는 유일하게 평택-화성 지역이 Hotspot에서 제외되었으며, 2017년에 급격히 넓은 Hotspot이 나타났다. 2020년에는 평택시 대부분이 Hotspot이 된 반면, 수도권 동부에서는 Coldspot이 크게 증가하였다. 평균적으로는 연평균 결과에서도 가장 두드러졌던, 평택-화성지역과 여주-이천 지역의 Hotspot이 강조되었고, 포천과 양평 등의 제한된 지역에서 낮은 Confidence의 Coldspot이 나타났다(Figure 4).

Local Moran's I의 고농도 시기 적용 결과에서는 2017-2018년도에는 LL 군집지역이 확장되었으나, 2019-2020년에 HH 군집지역이 확장되는 결과를 보였다. 이러한 현상은 서울 내에서 동-서로 군집지역이 수평이동하는 현상으로 확인 가능했다. 강화군과 김포시에서 유의하지 않은 지역이 증가하였고, 한강 이북지역에서 HH

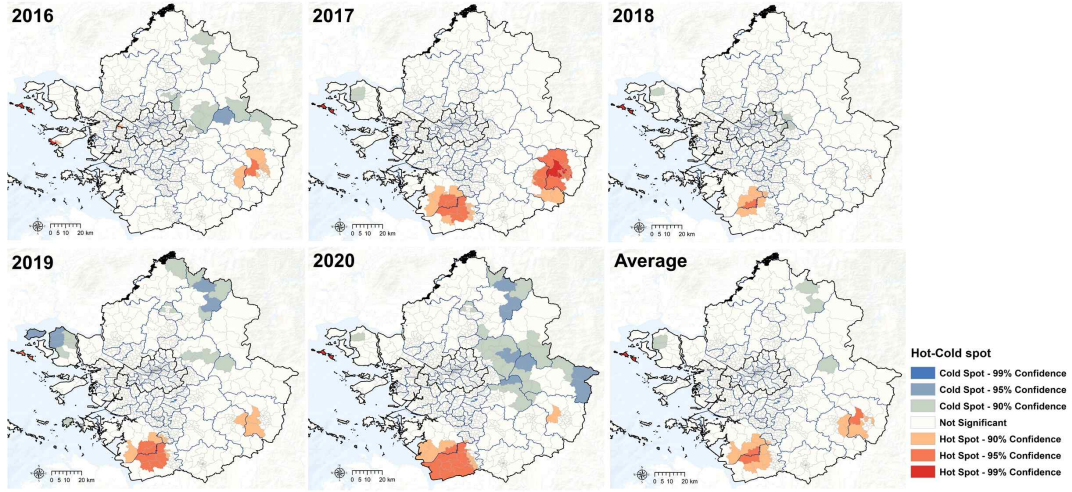


Figure 4. Seasonal Hotspot Analysis using Getis - Ord G_i^* for Seoul Metropolitan Region

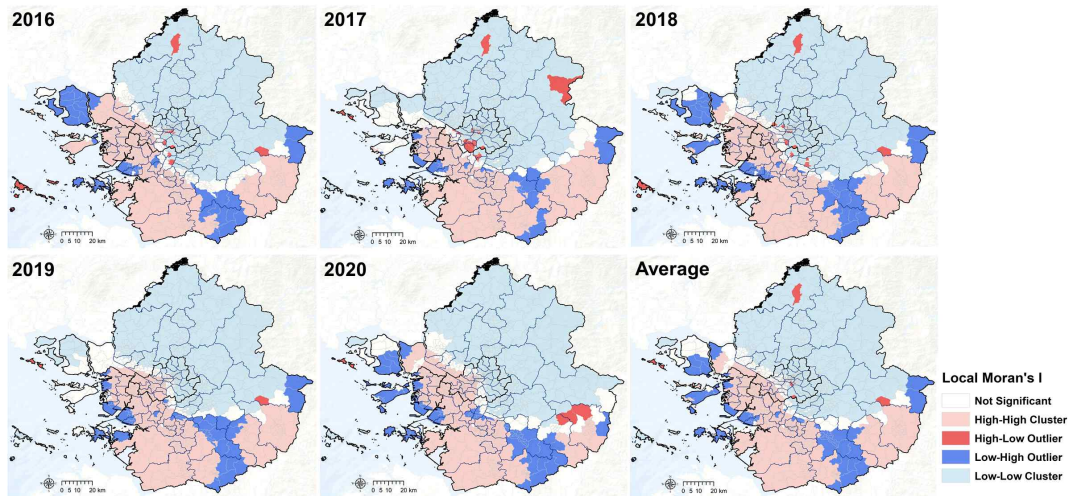


Figure 5. Seasonal Hotspot Analysis using Local Moran's I for Seoul Metropolitan Region

군집지역이 매우 제한적으로 확인되었다. 종합적으로는 HH 군집지역이 감소하고, LL 군집지역이 증가한 것으로 나타났다(Figure 5).

3. 서울의 초미세먼지 공간적 군집특성

수도권 전 지역을 분석한 결과에서 서울을 중심으로 주요 군집들이 분리되는 현상이 나타나므로, 본 연구에서는 서울지역만 추출하여 두 가지 기법을 적용한 별도의 결과를 제시하였다. 먼저, Getis - Ord G_i^* 분석에 따른 결과에서, 서울 내 Hotspot

과 Coldspot이 분명하게 분리된 것을 확인할 수 있었다. 연평균 결과에서는 강서구 전지역, 구로구 전지역, 양천구, 금천구, 마포구 등이 Hotspot 지역으로 나타났다. Coldspot은 강북구, 도봉구, 노원구 전 지역과 강동구에서 넓게 분포하였다. 고농도 시기에서도 유사한 경향을 보였으나, 공간적 범위에서 소폭 변동이 있었다. Hotspot 지역이 감소하여 강서구, 양천구, 구로구에 집중되었고, 노원구가 매우 높은 Confidence로 전 지역이 Coldspot이 됨과 함께, 기존 강북구, 도봉구, 강동

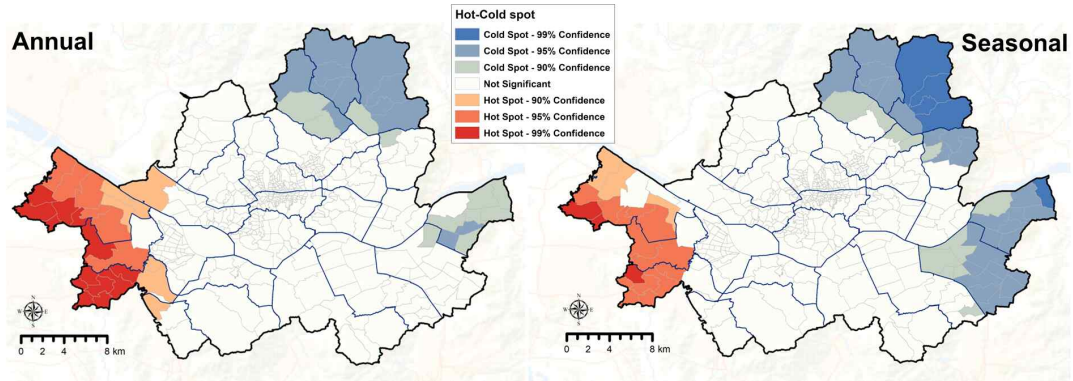


Figure 6. Hotspot Analysis using Getis - Ord G_i^* for Seoul City

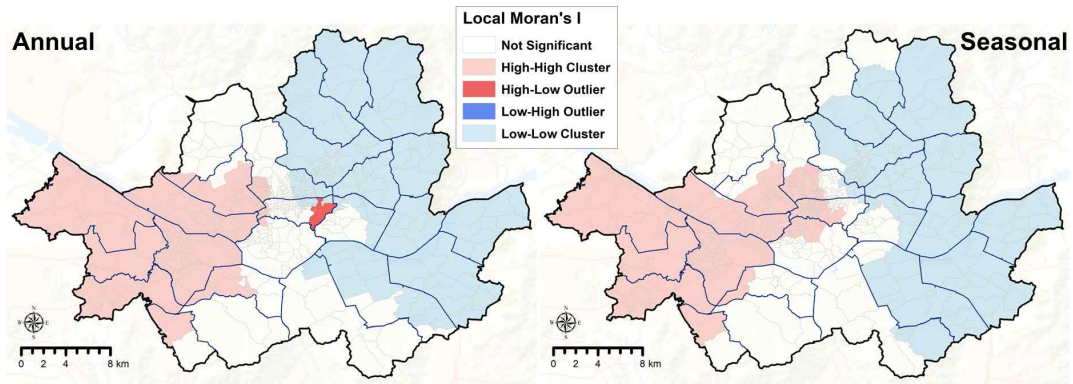


Figure 7. Hotspot Analysis using Local Moran's I for Seoul City

구와 함께, 중랑구 북부 지역과 송파구 전지역이 추가적으로 Coldspot이 되었다. 성북구와 서초구 일부지역도 포함되었다(Figure 6).

Local Moran's I 결과에서는 서울이 서부의 HH 군집과 동부의 LL군집으로 명확히 분리되었다. 강서구, 양천구, 영등포구, 구로구 등은 전지역이 HH 군집지역이었으며, 강북의 마포, 서대문구도 대부분 지역이 HH 군집으로 나타났다. 고농도 시기에서는 HH 군집지역이 보다 확장되어, 종로구, 중구, 용산구에서도 넓은 지역이 HH 군집으로 확인되었다. LL 군집지역은 서울 동부의 대부분 기초지자체가 포함되었으며, 상업지역이 밀집된 강남구도 상당지역 해당되었다. 노원구, 동대문구, 중랑구, 광진구, 강동구, 송파구 등은 연평균 및 고농도 시기 모두에서 전 지역 LL 군집으로 나타나, 초미세먼지로부터

터 상대적으로 안전한 지역임이 확인되었다. 서울만을 대상으로 한 Local Moran's I 결과는 수도권 전역 분석과 유사한 군집형태를 보였다(Figure 7).

서울지역만 별도로 분리하여 군집특성을 확인한 결과, Local Moran's I의 경우 수도권 결과와 유사하였으나, Getis - Ord G_i^* 에서는 지역 내 군집특성이 별도로 나타나는 것이 확인되었다. 서울 내에서는 초미세먼지 농도의 차이가 상대적으로 적으므로, 농도 값의 편차가 큰 수도권과 다른 개별적인 군집지역이 도출된 것이다.

4. 초미세먼지 공간 군집특성과 지역환경 관계 분석

초미세먼지의 농도와 군집특성을 해당 지역

Table 2. Relationship between PM2.5 and regional environmental characteristics

	Vegetation Greenness	Urban Ratio	Industrial Ratio	Elevation
Annual PM2.5	-0.136	-0.037	0.206	-0.429
Seasonal PM2.5	-0.244	0.095	0.121	-0.386

의 토지이용과 식생 현황에 따른 상관관계를 확인하였다(Table 2). 먼저, 연평균 농도와 식생활력도의 관계는 음의 상관관계가 확인되었으며, 상관계수가 높지는 않지만, 상관성의 경향이 확인된 것으로 사료된다. 고농도시기 농도와 식생활력도는 -0.244 의 상관계수를 보이며, 더욱 분명한 음의 상관관계가 확인되었다. 이는 고농도시기의 경우 식생활력도가 낮은 지역에서 고농도 발생 가능성이 높음을 시사한다. 도시비율과 초미세먼지 농도 간 상관관계의 경우 상관계수가 상당히 낮은 것으로 나타났으며, 이는 도시화 자체만으로 초미세먼지 농도와 관계성이 분명하지 않음을 의미한다. 공업지역과 초미세먼지 농도의 관계는 양의 상관관계가 확인되었다. 특히, 연평균 농도에서 더 높은 상관관계가 나타난 것은, 지역 내 대기오염 배출의 영향력이 큰 연평균 농도가 공업지역과 연관성이 높음을 시사한다. 특히, 주요 고농도 핫스팟으로 나타난 평택-화성지역과 여주-이천지역, 수도권 서남부지역 등은 산업단지가 밀집된 지역이었으며, 고농도시기와 연평균에 관계없이 핫스팟으로 확인되었다. 고도와 초미세먼지 농도는 가장 두드러지는 음의 상관관계를 보였다. 고도가 낮은 지역에서 초미세먼지 농도가 높았으며, 고도가 높은 지역에서는 상대적으로 농도가 낮았던 것이다. 특히 연평균농도에서 더 높은 상관성(-0.429)을 보이며, 지역 내 배출 및 대기정체 등과 높은 관계를 갖는 것으로 해석할 수 있다. 다만, 통계적인 유의성이 높은 수준은 아니었던 한계가 있으므로, 개략적인 방향으로 인식할 필요가 있다.

두 가지 분석에서 주요 군집으로 나타난 지역들의 식생활력, 도시비율, 공업비율, 고도를 수

치적으로 비교하였다(Table 3). 먼저, 주요 군집 지역이 적은 범위로 나타난 Getis-Ord G_i^* 의 경우 식생활력에서 큰 차이를 보였다. 즉, 초미세먼지 농도의 Hotspot 지역은 평균 식생지수가 0.46 수준이었으나, Coldspot 지역은 평균 식생지수가 0.65 이상으로 유의미한 차이가 확인되었다. 도시비율의 경우 Hotspot 지역이 더 높지만, 큰 수준의 차이는 아니었다. 공업비율에서 두드러진 차이가 나타났는데, Hotspot 지역에서는 전체 토지 중 3.48% 이상이 공업지역으로 활용되고 있었으나, Coldspot에서는 0.4% 가 되지 않는 적은 토지가 공업지역으로 활용되고 있었다. 가장 큰 차이를 보인 것은 고도였다. Hotspot에서는 약 $34m$ 의 평균고도를 보인 반면, Coldspot에서는 약 $167m$ 의 평균고도를 나타냈다. 군집 지역이 넓게 나타난 Local Moran's I 의 경우 식생활력도에서는 거의 유사한 수준으로 나타났다. 다만, 도시비율의 경우 초미세먼지 농도가 높은 HH에서 더 낮은 것으로 확인되었는데, 이는 서울과 경기동부의 도시화된 지역이 다수 포함되었기 때문으로 사료된다. 공업지역에서는 Getis-Ord G_i^* 와 마찬가지로, HH가 3.47% , LL가 0.56% 로 큰 수치적 차이를 보이며 두 군집 간 특성이 확인되었다. Moran's I 에서도 고도 특성은 두드러지게 나타났으며, HH지역의 고도는 LL의 약 52% 수준이었다. 상대적으로 넓은 범위의 군집지역의 평균 값을 비교하므로, 식생활력도에 대한 차이는 상쇄되었지만, 공업지역과 고도에서는 동일한 특성을 나타낸 것이다. 즉, 상관관계 분석과 유사하게, 기초통계량에서도 고도, 식생활력도, 공업비율이 유의미한 차이를 보였다.

서울만을 대상으로도 군집별 기초통계 비교

Table 3. Statistics of regional environmental characteristics for each cluster region in the Seoul Metropolitan Area

		Vegetation Greenness		Urban Ratio		Industrial Ratio		Elevation	
		ave	Std	ave	Std	ave	Std	ave	Std
Getis-Ord Gi*	Hotspot	0.4653	0.0857	15.45	15.44	3.48	5.16	34.78	93.16
	Coldspot	0.6530	0.0747	14.36	15.08	0.39	0.98	167.85	21.18
Local Moran's I	HH	0.4607	0.1204	37.56	29.12	3.47	7.86	45.34	34.00
	LL	0.4617	0.1839	48.53	36.08	0.56	1.59	86.88	74.34

Table 4. Statistics of regional environmental characteristics for each cluster region in the Seoul City

		Vegetation Greenness		Urban Ratio		Industrial Ratio		Elevation	
		ave	Std	ave	Std	ave	Std	ave	Std
Getis-Ord Gi*	Hotspot	0.3913	0.8895	53.99	24.96	2.17	5.23	26.04	12.36
	Coldspot	0.4592	0.1184	55.70	21.55	0.03	0.08	67.36	58.91
Local Moran's I	HH	0.3258	0.0867	76.66	23.01	0.70	2.71	36.91	26.33
	LL	0.3626	0.1157	70.85	22.40	0.04	0.30	45.13	31.42

를 수행하였다(Table 4). 서울에서는 식생이 두드러지게 많거나, 도시비율이 낮은 지역이 매우 적으므로, 수도권 전체로 비교하였을 때와 통계적으로는 값의 차이가 있지만 유사한 양상을 보였다. Getis-Ord Gi*의 Hotspot에서 분명하게 더 낮은 식생활력을 보였으며, 이는 Local Moran's I의 HH지역에서도 동일하게 나타났다. 도시비율에서는 Getis-Ord Gi*의 Hotspot에서는 Coldspot보다 낮은 도시비율이 나타났는데, 이는 한강수계와 김포공항 농경지 및 초지가 면적에 반영된 것이 원인으로 사료된다. 반대로 Local Moran's I에서는 HH지역에서 더 높은 도시비율이 확인되었다. 도시숲이 부족한 서울 서부권역의 특성이 드러난 것이다. 공업비율에서 수도권과 동일하게 Hotspot과 HH지역에서 유의미하게 높은 공업비율이 나타났으나, 2000년대 이후 서울에서 공업지역이 크게 감소하였기 때문에 그 비율은 수도권 전체와 비교하였을 때는 적은 수준이었다. 고도에서는 수도권 전체 통계 특성과 유사하게 Hotspot과 HH지역에서 큰 폭으로 낮은 고도 값을 보였으나, 서울의 지형적 특성상 격

차는 줄어드는 경향이 나타났다.

5. 국토-환경계획에 대한 함의

환경계획과 정책을 통해 미세먼지 및 대기오염 저감을 추진하는 것은 중국 등의 국외유입이 아닌 국내배출량을 조절하고 관리하는 방향이다. 본 연구의 결과는 초미세먼지 농도가 국외유입이 집중되는 고농도시기 외에도 충분히 위협적이며, 지역환경특성과 관계성이 높은 것으로 제시되었다. 이는 국내 계획과 정책을 통해 조절되고 관리되어야 할 필요성을 다시 한 번 시사하는 결과였다.

공간군집에서 계절에 관계없이 평택-화성지역, 여주-이천지역의 초미세먼지 Hotspot이 가장 두드러졌다. 모든 시기, 두 가지 방법론에서 공통적으로 위험군집으로 형성됨은 장기적인 관리 필요성을 시사한다. 특히, 해당지역에서 관광 등과 같은 야외활동 시 유의할 필요성이 있으며, 지역관측정보도 고도화하여 세밀한 모니터링이 될 필요가 있다(Park and Lim, 2021). 해당지역을 포함하여, 서울에서 강서지역이나, 수

도권차원에서 서남부 지역에 대한 광역·도시계획 수립 시 초미세먼지 배출저감과 그린인프라 조성 등의 다양한 계획 요소가 필요할 것으로 사료된다(Kim et al., 2021; Seok et al., 2021).

이번 연구에서는 고농도 시기와 연평균 농도를 분리하여 분석하므로, 계절성에 따른 공간군 집특성 차이를 확인하고자 하였다. 다만, 초기 예상과는 달리, 고농도 시기에 Hotspot 및 HH가 감소하는 현상이 확인되었는데, 이는 고농도 시기에는 평균적인 농도가 증가하므로, 고농도 군집지역의 개념이 감소하는 현상으로 이해할 수 있다. 국내 배출 저감을 지향하는 공간환경계획에서는 평균농도를 기반으로 한 군집특성을 활용하는 것이 유효할 것으로 사료된다.

고위험지역에서 지형적 특성이 가장 두드러진 것은 초미세먼지의 배출원의 분포나 대기 중 이동, 확산 등에 지형적 요소가 영향을 주고 있음을 시사한다. 산업단지와 같은 초미세먼지 주요 배출시설들이 평야에 위치하는 경우가 많고, 산지가 초미세먼지 이동 경로에 영향을 주므로 분지 지형에서 대기가 정체하는 사례가 많이 나타난다(Ryoo et al., 2019). 다만, 지형적 요인은 국토계획 및 정책을 통해 개선하는 것이 현실적으로 불가능하므로, 계획적 측면에서는 영향력이 낮아질 것이다.

이번 결과에서 식생활력도와의 관계성(음의 상관관계)이 높은 수준을 보인 것은, 앞으로의 개발계획에서 도시숲과 그린인프라 조성 등을 지지하는 역할을 할 수 있다(Seok et al., 2021; Shin et al., 2021). 특히 고농도 시기에 더 높은 상관성을 나타낸, 식생이 오염물질 배출 자체를 억제하는 것 외에도, 차단, 침강, 흡착, 흡수 등 도시숲의 기능이 고농도 시기에 강화됨을 의미한다. 반대로, 공업지역비율의 경우 관계성이 나타났지만, 연평균 농도에서 더 높은 상관계수를 보였다. 이는 국내 및 지역배출에 영향을 많이 받을 수 있는 연평균 농도는 공업지역에서 배출되는 오염물질 관리가 중요할 수 있음을 시

사하며, 산업단지가 집중된 지역을 중심으로 대응방안 마련이 필요함을 제시할 수 있다(Sung, 2020; Yoon, 2020).

미세먼지의 배출원을 중심으로 한 공간특성 연구(Kim et al., 2019)와 비교하였을 때, Hotpost에서 상이한 특성이 확인되기도 하였다. 배출원을 중심으로 분석한 사례에서는 도시밀집지역과 매우 높은 상관성을 보이는 반면, 본 연구와 같이 농도를 중심으로 분석한 결과에서는 산업유형이나 식생활력 등에 따른 영향이 더 큰 것으로 나타났다. 미세먼지가 배출 및 생성되는 공간특성과 확산, 이동, 정체하여 만들어진 농도의 공간특성이 상이할 수 있음을 시사한 것이다.

다만, 이번 연구의 공간단위에 대한 다양한 시각은 존재할 수 있다. 초미세먼지 관측은 지점단위로 이루어지고, 다양한 기법으로 상세화할 경우 격자단위로 구축되나, 본 연구에서는 상세화된 초미세먼지 정보를 활용하여 최소단위 행정구역의 평균값을 산정하고 연구에 활용하였다. 격자나 지점단위에서 동일한 분석이 이루어질 경우 지역특성과의 연계가 감소할 가능성이 크다. 즉, 행정구역은 산지사면이나 유역, 하천 등으로 구분되는 경우가 많아 자연환경이나 사회적 등질지역이 될 수 있으나, 결국 지역환경계획 관점에서 초미세먼지 문제를 다루기 위해서는 행정구역 단위에서 평가 및 이행이 이루어져야하므로, 본 연구에서는 최소단위 행정구역을 공간단위로 활용하였다.

VI. 결 론

본 연구는 사회적 관심이 높은 수도권의 초미세먼지 문제에 기여하기 위해 초미세먼지의 공간 군집특성을 분석하고, 지역환경특성과의 관계성을 확인하였다. 특히, 고농도시기와 연평균 기간 간 차이를 분석하였고, Getis - Ord G_i^* 와 Local Moran's I 라는 두 가지 대표적인 공간통계기법을 활용하였다. 분석결과 Getis - Ord G_i^*

와 Local Moran's I에서 군집의 형태는 달랐으나, 방향성에서는 유사성이 높아 상호보완적 결과를 얻을 수 있었다. 고농도 시기와 연평균 농도 간 차이는 크기 않았다. 고농도 시기에서 Getis - Ord Gi*기법의 Hotspot 집중도는 증가하였으나, Local Moran's I에서는 고농도 군집인 HH지역이 감소하는 경향을 보였다. 종합적으로 Getis - Ord Gi*기법의 Hotspot은 평택-화성, 여주-이천 지역에서 두드러졌으며, Local Moran's I의 HH군집은 서남부, LL 군집은 동북부에 위치하며 명확한 구획화가 이루어졌다. 서울을 중심으로 한 결과에서도 수도권 사례와 같이, 동북-서남 지역의 구획화 현상이 나타났다. 시기에 관계 없이 서울 강서지역은 Hotspot 및 HH군집이 형성되고, 노원구·강북구·강동구 등 동북지역은 Coldspot와 LL지역이 넓게 나타났다. 지역환경특성과의 관계는 고도, 식생활력도 및 공업지역비율에서 높게 나타났는데, 고농도 시기에는 식생활력도가 높아지고, 연평균에서는 고도와 공업지역비율의 상관성이 증가하였다. 이는 고농도 시기 식생의 기능이 최대화 될 수 있으며, 평균적으로는 지형과 공업지역의 영향력이 큰 것을 시사한다. 이러한 특성은 주요 군집(Hotspot, Coldspot, HH, LL)별 기초통계량에서도 확인되었다. Coldspot은 Hotspot에 비해 매우 높은 식생활력도를 보였고, 고농도 군집에서 고도가 낮고, 공업비율이 높은 특성은 공통적으로 나타났다. 초미세먼지의 공간군집특성은 수도권 차원의 광역단위 국토·환경계획에서 고려할 수 있으며, 해당 고농도 군집에 대해 다양한 계획요소가 필요할 것으로 예상된다. 특히, 고농도 시기에 국민적 민감성은 높으나, 국내 배출에 대한 기여가 높은 계획·정책에서는 연평균 농도를 기반으로 한 군집특성을 활용하는 것이 유효할 것이다.

References

- Anselin L. 1995 Local indicators of spatial association - LISA -. *Geographical Analysis* 27(2): 93-115.
- Apte JS, Brauer M, Cohen AJ, Ezzati M, Pope III CA. 2018. Ambient PM2.5 reduces global and regional life expectancy. *Environ. Sci. Technol. Lett.* 5 (9), 546 - 551.
- Getis A & Ord JK. 1992. The analysis of spatial association by use of distance statistics. *Geographical Analysis* 24(3): 189-206.
- Gyeonggi Research Institute(GRI). 2019. Assessment and Mapping of PM High-risk Region in Seoul Metropolitan Area. Policy Research. 2019-51. [Korean Literature]
- Kim DY, Choi M, Yoon B. 2019. Analysis of PM Hot-spot Emission Zone in Seoul Metropolitan Area. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 35(4), 476-501. [Korean Literature]
- Kim E, Bae C, Yoo C, Kim BU, Kim HC, Kim S. 2018. Evaluation of the Effectiveness of Emission Control Measures to Improve PM2.5 Concentration in South Korea. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 34(3), 469-485. [Korean Literature]
- Kim S, Lim CH, Lim YJ, Moon J, Song C, Lee WK. 2016. Analyzing Climate Zones Using Hydro-Meteorological Observation Data in Andong Dam Watershed, South Korea. *Journal of Climate Change Research* 7(3), 269-282. [Korean Literature]
- Kim SW, Lee DK, Bae CY. 2021. Analysis of the effect of street green structure on PM2.5 in the walk space -Using microclimate simulation-. *Journal of Korean Environ-*

- mental Restoration Technology, 24(4), 61-75. [Korean Literature]
- Ko YJ, Cho KH. 2020. Analysis of Areas Vulnerable to Urban Heat Island Using Hotspot Analysis -A Case Study in Jeonju City, Jeollabuk-do-. *Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture*. 48(5), 67-79. [Korean Literature]
- Lim CH, Ryu J, Choi Y, Jeon SW, Lee WK. 2020. Understanding global PM_{2.5} concentrations and their drivers in recent decades (1998 - 2016). *Environment International*, 144, 106011.
- Ministry of Environment (MOE). 2019. Management Master Plan of Fine Particulate Matter (2020-2024). Sejong. Korea.
- Ministry of Environment (MOE). 2020. Annual Report of Atmospheric Environment 2020. Sejong. Korea
- Moon KJ, Cheo H, Jeon K, Yang X, Meng F, Kim D, Park HJ, Kim J. 2018. Review on the Current Status and Policy on PM_{2.5} in China. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 34(3), 373-392. [Korean Literature]
- Oh KS. 2021. A Study on the Governance of SDGs Projects and Environmental Policy between Korea and China: Focusing on Transboundary Fine dust from China. *THE JOURNAL OF INTERNATIONAL RELATIONS* 24(1), 129-152. [Korean Literature]
- Park DH, & Lim CH. 2021. A social network analysis of tourism activity patterns among domestic tourists influenced by fine particulate matter (PM_{2.5}) concentration. *Korean Journal of Hospitality and Tourism*. 30(7), 237-252. [Korean Literature]
- Park S, Allen RJ, Lim CH. 2020. A likely increase in fine particulate matter and premature mortality under future climate change. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 13(2), 143-151.
- Park S, Kim SJ, Yu H, Lim CH, Park E, Kim J, Lee WK. 2020. Developing an adaptive pathway to mitigate air pollution risk for vulnerable groups in South Korea. *Sustainability*, 12(5), 1790.
- Park S, & Shin H. 2017. Analysis of the Factors Influencing PM_{2.5} in Korea: Focusing on Seasonal Factors. *Environmental Policy*. 25(1), 227-248. [Korean Literature]
- Peeters A, Zude M, Käthner J, Ünlü M, Kanber R, Hetzroni A, Gebbers R, Ben-Gal A. 2015. Getis - Ord's hot-and cold-spot statistics as a basis for multivariate spatial clustering of orchard tree data. *Computers and Electronics in Agriculture*, 111, 140-150.
- Ryoo JY, Kwon TH, Kang IS, Lee KS, Jo CW, Kim JS, Kim HH, Jang W, Park JJ, Yoo TS. 2019. A Study for Characteristics of Fine Particulate Matter and Atmospheric Stagnation Considering Elevation and Backward Trajectory. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 35(6), 701-712. [Korean Literature]
- Ryu YH & Min SK. 2020. What matters in public perception and awareness of air quality? Quantitative assessment using internet search volume data. *Environmental Research Letters*, 15(9), 0940b4.
- Seok Y, Song K, Han H, Lee J. 2021. Derivation of Green Infrastructure Planning Factors for Reducing Particulate Matter -Using Text Mining-. *Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture*. 49(5), 79-96. [Korean Literature]
- Shin, YE, Park JS, Kim SY, LEE SW, An KJ.

2021. A Study on Green Space Location Selection to Reduce Particulate Matter by Projecting Distributions of Emission Source and Vulnerable Groups -focusing on Seongdong-gu, Seoul-. *Journal of Korean Environmental Restoration Technology*, 24(1), 53-68. [Korean Literature]
- Sung SY. 2020. Environmental Planning Countermeasures Considering Spatial Distribution and Potential Factors of Particulate Matters Concentration. *Journal of Korean Environmental Restoration Technology*, 23(1), 89-96. [Korean Literature]
- Statistics of Korea. 2021. Korean Statistics Information Service (<https://kosis.kr/index/index.do>), Daejeon. Korea.
- van Donkelaar A, Martin RV, Brauer M, Hsu NC, Kahn RA, Levy RC, Lyapustin A, Sayer AM, Winker DM. 2016 Global estimates of fine particulate matter using a combined geophysical-statistical method with information from satellites, models, and monitors. *Environmental Science & Technology* 50(7), 3762-3772.
- van Donkelaar A, Hammer MS, Bindle L, Brauer M, Brook JR, Garay MJ, Martin RV. 2021. Monthly Global Estimates of Fine Particulate Matter and Their Uncertainty. *Environmental Science & Technology*, 55(22), 15287-15300.
- World Health Organization (WHO), 2017. Evolution of WHO air quality guidelines: past, present and future. WHO Regional Office for Europe, Copenhagen.
- Yeo MJ & Kim YP. 2019. Trends of the PM10 Concentrations and High PM10 Concentration Cases in Korea. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 35(2), 249-264. [Korean Literature]
- Yoon EJ. 2020. Application of Environmental Planning Considering the Trend of PM10 in Ambient Air. *Journal of Environmental Impact Assessment*, 29(3), 210~218. [Korean Literature]
- Yue H, Huang Q, He C, Zhang X, Fang Z. 2020. Spatiotemporal patterns of global air pollution: A multi-scale landscape analysis based on dust and sea-salt removed PM2.5 data. *Journal of Cleaner Production* 252, 119887.
- Zhang Q, Jiang X, Tong D, Davis SJ, Zhao H, Geng G, Feng T, Zheng B, Lu Z, Streets DG, Ni R, Brauer M, van Donkelaar A, Martin RB, Huo H, Liu Z, Pan D, Kan H, Yan Y, Lin J, He K, Guan D. 2017. Transboundary health impacts of transported global air pollution and international trade. *Nature* 543 (7647), 705 - 709.