

Research Paper

경기도 지역 미세먼지 관리를 위한 권역 범주화 연구

이수민* · 이태정* · 오종민* · 김상철** · 조영민*

경희대학교 환경응용과학과*, 경기도 환경안전관리과**

Regional Categorization of Gyeonggi Province for Fine Dust Management

Su-Min Lee* · Tae-Jung Lee* · Jongmin Oh* · Sang-Cheol Kim** · Young-Min Jo*

Department of Environmental Science and Engineering, Kyung Hee University*
Environmental Safety Management Division, Gyenggi-do**

요약: 경기도 도시대기측정망의 시간별 PM₁₀과 PM_{2.5} 농도에 대하여 측정소별로 상관성을 분석하여 측정소별 미세먼지 농도자료의 유사성을 파악해보았다. 미세먼지 경보제를 위해 사용되고 있는 기존의 권역구분을 그대로 이용했을 때, 동일한 권역 내의 측정소들은 PM₁₀의 경우 0.68, PM_{2.5}는 0.70 이상의 피어슨 상관계수 값을 보였으나, 일부 측정소는 타 권역과 높은 상관성(예, 0.80 이상)을 보여주고 있었다. 또한, 현재 구분하고 있는 권역은 주로 고농도 사례 횟수에 따른 군집분석 결과와 지리적 요인 등을 복합적으로 고려하여 결정된 것이므로, 미세먼지 관리를 위해서는 농도 특성에 따라 권역을 재분류할 필요성이 있다. 따라서 본 연구에서는 다차원척도법을 이용하여 미세먼지의 시간별 농도변화와 지역별 배출 기여율을 고려한 재범주화를 진행할 수 있었고, 이를 시각적으로 도시화할 수 있었다. 그 결과, PM₁₀은 5개의 권역으로 분류되고, PM_{2.5}는 4개의 권역으로 구분되었다.

주요어: Local dust, PM₁₀, PM_{2.5}, 공간분포, 다차원척도법(MDS)

Abstract: The similarity of hourly PM₁₀ and PM_{2.5} concentration profiles of the atmospheric monitoring stations in Gyeonggi-do was evaluated through the multilateral analysis between stations. The existing category for most stations in the regions shows relatively low Pearson correlation values of 0.68 and 0.7 for PM₁₀ and PM_{2.5} on average respectively, and some monitoring stations revealed high relationships over 0.8 to other regions. Since the current regions are mainly categorized by cluster analysis based on the number of occurrence of high concentration events and geological factors, it is necessary to reclassify them by concentration characteristics for precise fine dust management. In accordance, multi-dimensional scaling being able to visualize could categorize

First Author: Su-Min Lee, Tel: +82-31-201-2485, E-mail: sumin023@khu.ac.kr, ORCID : 0000-0003-4527-7727

Corresponding Author: Young-Min Jo, Tel: +82-31-201-2485, E-mail: ymjo@khu.ac.kr, ORCID : 0000-0002-2882-032

Co-Authors: Tae-Jung Lee, Tel: +82-31-201-2466, E-mail: envi@khu.ac.kr, ORCID : 000-0002-4175-770X

Jongmin Oh, Tel: +82-31-201-2461, E-mail: jmoh@khu.ac.kr, ORCID : 0000-0002-1104-5867

Sang-Cheol Kim, Tel: +82-31-8008-3545, E-mail: kim070@gg.go.kr, ORCID : 0000-0001-9017-9232

Received: 4 August, 2021. Revised: 18 August, 2021. Accepted: 20 August, 2021.

the regions based on regional emission contribution rate and hourly fine dust concentration. As a result of the current analysis, PM₁₀ and PM_{2.5} could be reclassified into five regions and four regions, respectively.

Keywords : Local dust, PM₁₀, PM_{2.5}, Spatial distribution, Multi-Dimensional Scaling (MDS)

I. 서론

우리나라 북서부에 위치한 경기도는 2021년 기준 면적은 전 국토 면적의 10.2%에 불과하지만, 인구는 상대적으로 면적 비율의 2배가 넘는 26.1%를 차지하고 있다(KOSIS 2021). 수도권 지역의 도시화가 지속적으로 진행됨에 따라, 경기도의 인구집중과 도시팽창은 교통량과 공업시설, 상업지역, 산업공단 등을 포함한 불투수층 구조의 건조한 표면 면적을 증가시키면서 지역의 대기오염농도를 증가시키는 원인이 되고 있다. 현재 경기도는 도시특성에 따라 16개소의 도시지역과 12개소의 도농복합지역, 3개소의 농업지역으로 구성되어 있는 바(GRI 2020), 각 도시 특성에 맞는 대기질 관리계획이 필요하다.

경기도는 수도권 대기환경개선에 관한 특별대책이 시행되면서 대기환경질은 꾸준히 개선되고 있으나 초미세먼지로 분류되는 PM_{2.5}의 경우 2018년도에 대기환경기준이 24시간 평균 35 µg/m³, 연간평균 15 µg/m³로 변경된 이후, 전 지역 장·단기 대기환경기준을 모두 초과하고 있는 상황이다(MOE 2020). 이에 따라 현재 경기도는 도시대기측정망의 PM₁₀ 대기환경기준 초과 횟수에 대한 군집분석 결과를 토대로 전체 지역을 4개의 권역으로 구분하여 미세먼지 경보제를 운영하고 있다(Shim et al. 2015).

지역 대기오염 현황을 추적하기 위하여 농도별 분포에 따라 동일한 권역으로 분류하여 관리할 수 있도록 통계적으로 접근하는 방법 가운데 가장 빈번하게 사용되었던 모델이 군집분석(cluster analysis)이다(Han et al. 2008). 이러한 군집분석은 지역별로 설치되어 있는 국가 도시대기측정망의 데이터를 동질적인 집단으로 군집화하여 측정소 간의 상관성과 오염물질의 이동경로를 추적하기 위하여 활용된다(Flemming et al. 2005; Bae et al. 2013). 군집분석방법은 개별

자료에 대한 구체적인 정보를 분석하기 보다는 대용량 자료를 유사성을 기반으로 단계별로 병합하는 방식으로 구성되기 때문에 세부 지역에서의 실제 시계열 농도값을 세밀하게 반영하지 못할 수 있다.

한편, 공간개체 자료를 기하적으로 정량 표현하기 유용한 다변량 분석법의 일종인 다차원척도법(multidimensional scaling; MDS)이 있다(Cox & Cox 2000; Choi 2014; Shin et al. 2018). 즉, 측정소에서 얻어지는 농도값들의 비유사성(dissimilarity)을 탐색하여 저차원 공간분석을 통하여 형상화할 수 있는 방법이다. 이러한 통계적 기법은 지역 대기오염 현황을 분석하는데 사용된 적은 없지만, 측정소 간의 시간별 변화량을 추적하여 정량화할 수 있는 장점을 활용하고자 본 연구에서 적용해보았다.

이에 따라, 본 연구에서는 경기도 미세먼지의 권역별 관리를 위한 또 다른 참고자료로 활용할 수 있도록 경기도 전체의 미세먼지 오염특성과 농도분포를 파악하고, 기존의 대기오염 경보제 권역구분을 기준으로 했을 때, 같은 권역임에도 불구하고 미세먼지의 농도 분포가 다르게 나타날 수 있는 지역을 다차원척도법을 적용함으로써 재분류해야할 필요성을 도출해내고자 하였다.

II. 연구방법

1. 분석자료 선정

권역별 미세먼지 특성을 파악하기 위해 PM₁₀과 PM_{2.5}에 대한 시·군별 배출량 자료와 경기도 내에 설치되어 있는 73개의 국가 대기오염측정망으로부터 각각의 농도 값을 사용하였다. 배출량 자료는 대기정책지원시스템(Clean Air Policy Support System; CAPSS)에서 제공하는 2017년도 자료를 이용하였다(NIER 2020). 경기도 시·군별 미세먼지 농도 데이터

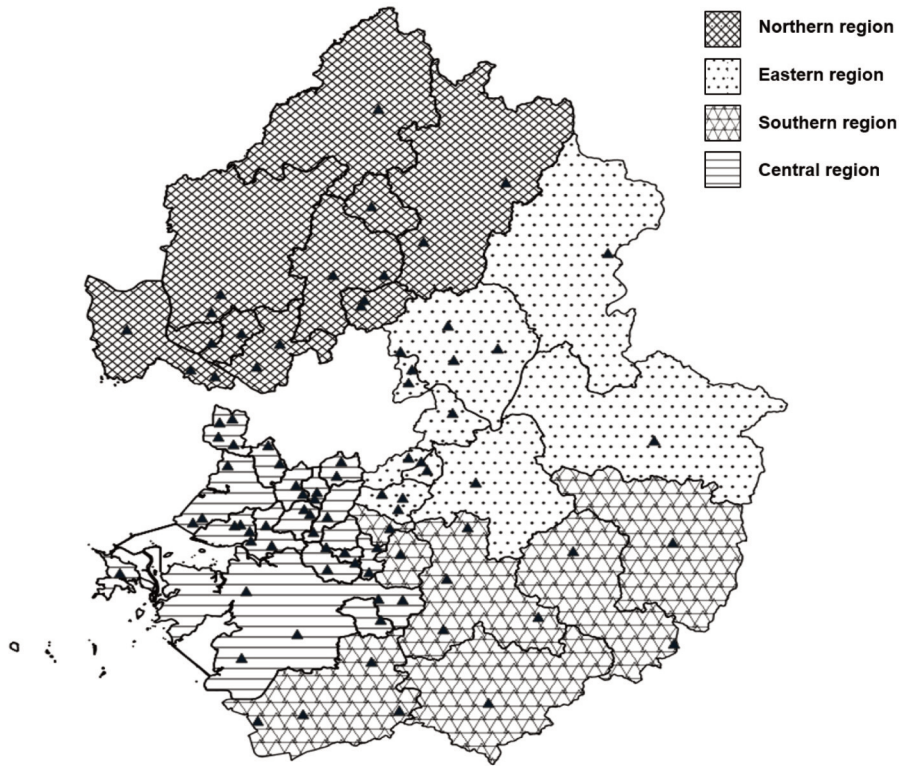


Figure 1. Local air pollution monitoring stations in Gyeonggi-do.

는 “에어코리아”사이트(Airkorea)에서 제공하는 국립환경과학원의 최종확정자료를 활용하였으며, 분석 기간은 2017년 1월 1일부터 2020년 12월 31일까지 4년간 자료를 분석하였다.

본 연구에서는 경기도 보건환경연구원에서 미세먼지 경보제에 사용하고 있는 경기도 권역 구분기준을 토대로 연구를 진행하였다(Shim et al., 2015). 남부권에는 5개(안성시, 여주시, 용인시, 이천시, 평택시), 중부권에는 11개(과천시, 광명시, 군포시, 부천시, 수원시, 시흥시, 안산시, 안양시, 오산시, 의왕시, 화성시), 북부권에는 8개(고양시, 김포시, 동두천시, 양주시, 연천군, 의정부시, 파주시, 포천시), 동부권에는 7개(가평군, 광주시, 구리시, 남양주시, 성남시, 양평군, 하남시)의 시군이 포함된다(Figure 1). 공간분포분석에는 경기도 내 모든 지역을 정확히 고찰하기 위하여 추가적으로 경기도와 인접한 지역인 충청남도(아산시, 태안군, 서산시, 당진시, 천안시), 충청북도(단양군, 제천시, 괴산군, 음성군, 진천군, 증평

군, 충주시), 강원도(양구군, 원주시, 횡성군) 자료를 포함하여 분석하였다.

2. 공간분포분석

경기도의 시·군별 미세먼지 현황을 고찰하기 위하여 통상적으로 사용되는 공간분포분석(spatial analysis)을 실시하였다. 본 연구에서는 배출량 자료와 도시대기측정망의 측정소 자료를 공간분포도로 시각화하였으며, GIS 프로그램인 QGIS 3.16 버전을 사용하였다. 특히 대기오염농도의 경우, 특정지점에서 측정된 한정된 자료만을 제공하므로, 미측정지점의 농도를 예측하여 공간분포를 재해석할 필요가 있다. 이에 따라 측정소 자료는 SAGA GIS 2.3.2 버전을 사용하여 공간보간법으로 먼저 분석하였다. 공간보간법 중에서도 IDW (Inverse Distance Weighted) 기법을 사용하였으며, IDW 보간기법은 가까이 있는 실측값에 더 큰 가중값을 주어 보간하는 방법으로 거리가 가까울수록 높은 가중값이 적용된다. 반대로 실

측값으로부터 멀어질수록 가중되는 값의 영향력은 줄어든다. 식 (1)은 IDW의 기본적인 알고리즘을 나타낸다(Jeong, 2014).

$$Z_p = \frac{\sum_{i=1}^n Z_i W_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad (1)$$

Z_p = 예측지점의 예측값(보간 값)
 Z_i = 위치(x_i, y_i)의 참조 값
 W_i = 가중치
 n = 참조 값 개수

선형연구에서 시·공간적인 대기질 분석을 위해 IDW와 Kriging을 사용하여 실측값과 보간값을 비교했을 때 IDW가 보다 정확하다는 연구 결과가 도출된 적이 있다(Jha et al, 2011). 즉, Jha et al. (2011)는 인도의 항만에서 대기질 평가를 하는데 시공간적 분석을 위해 공간보간기법인 IDW와 Krigging을 사용하여 실측값과 보간값의 상관관계를 분석하였으며, IDW가 보다 정확하다는 것을 제시하였다. Yoon & Kim (1997)은 경기도 수원시의 강하분진을 이용한 금속원소의 공간분포 분석에서 다양한 방법론을 적용하여 불확실도를 평가하였으며, 전반적으로 IDW의 추정 능력이 우수함을 보였다. 따라서 본 연구에서는 IDW 법을 이용하여 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 의 연평균 농도를 환경부의 대기오염측정망 설치운영지침에서 권고에 따라 3 km의 격자별로 예측하여 공간적으로 도시하였다(Song & Kim, 2016).

3. 통계분석

경기도 내 73곳의 도시대기측정망의 2017년부터 2020년까지의 4년간 시간별 미세먼지 농도자료를 바탕으로 통계분석을 진행했다. 본 연구에서는 자료의

전처리 과정에서 이상치를 제거하지 않고 진행하였는데, 이는 이상치를 제거할 경우 고농도 현상을 고려하지 못할 것을 우려하였기 때문이다. 4년간 시간별 자료의 유효측정비율이 75% 이상인 측정소에 대해서만 측정소별 미세먼지 농도의 상관성을 분석하였다.

또한, 측정소별 미세먼지 농도분포의 유사성을 평가하여 범주화를 진행하기 위해 다차원척도법을 이용하였다. 다차원척도법은 저차원 공간에 개체 간의 비유사성을 최대한 유사하게 나타내기 위한 다변량 자료의 탐색적 분석기법으로서, 각각의 측정소의 농도 값 차이를 정량적으로 표현함으로써 오염도 기반의 군집화를 제시할 수 있다(Shin et al, 2018). 본 연구에서는 유효측정비율이 90% 이상인 측정소에 대해서만 다차원척도법을 실시하였다.

III. 결과 및 고찰

경기도 미세먼지 관리영역은 고농도 발생빈도에 따라 4개의 권역으로 구분하고 있으나, 본 연구에서는 보다 효과적으로 대기질을 관리하기 위해 측정소별 농도 특성을 세분화하여 다차원척도법을 적용함으로써 관리영역을 재설정해보고자 하였다.

1. 권역별 미세먼지 농도 공간분포 분석

경기도 내의 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 의 연평균 농도와 연간 배출량을 비교해보고자, 연평균 농도는 에어코리아에서 제공하는 2017년도 도시대기측정망의 시간별 데이터를 가공하여 측정소별로 계산하였고, 공간보간법을 이용하여 미측정지점에 대한 농도를 예측하여 공간에 도시하였다(Figure 2). 이때, 미세먼지 농도는 경기도와 서울, 인천 및 충청남도, 충청북도, 강원

Table 1. Annual average concentration and annual emissions of PM_{10} and $PM_{2.5}$ by four regions in Gyeonggi-do (2017)

Region	Area (km ²)	Conc. (µg/m ³)		Emissions (ton/yr)	
		PM_{10}	$PM_{2.5}$	PM_{10}	$PM_{2.5}$
Southern region	2,673	56.4 ± 34.8	28.2 ± 22.2	7,500	2,656
Eastern region	1,427	48.4 ± 30.2	26.6 ± 19.1	5,730	1,908
Northern region	3,208	55.2 ± 33.4	28.5 ± 22.9	8,015	2,619
Central region	2,878	49.6 ± 31.3	25.6 ± 18.8	10,385	3,963
Average	2,547	51.3 ± 32.5	26.8 ± 20.3	7,907	2,787

도 일부 지역의 측정소 자료를 적용하여 IDW 법으로 계산하였고, 3 km 간격의 해상도로 이루어졌다. 기존의 경기도 권역별 PM₁₀과 PM_{2.5}의 2017년 연평균 농도와 배출량을 Table 1에 요약하였고, 지역별로 단위면적당 미세먼지 배출량을 Figure 3에 표기하였다.

미세먼지 농도는 북부권과 남부권에서 높은 수준이며, 권역별 연간 총 배출량은 중부권에서 그 수치가 높게 나타났다(PM₁₀: 10,385 ton/yr, PM_{2.5}: 3,963 ton/yr). Figure 3에 표기한 지역별 단위면적당 배출량은 2017년도의 경우, 건설작업이 빈번했던 현상으로부터 비도로오염원이 산재하였던 수원시의 영통구가 연간 약 19 ton/km²로 가장 높은 수준이었고, 동

부지역에 위치한 시·군들에서는 낮은 수치를 보여주고 있으며, 가평군은 연간 약 0.5 ton/km²를 배출하고 있는 것으로 나타났다.

한편, 측정소가 있지 않은 지역들에 대하여 공간보간법을 이용하여 추정된 농도분포를 도시한 Figure 2를 보면, PM₁₀은 평택항 주변(66.6 µg/m³) - 김포시(65.7 µg/m³) - 화성시(61.6 µg/m³) - 구리시(61.5 µg/m³) - 평택시내(61.3 µg/m³) 부근이 상대적으로 고농도지역임을 시각적으로 판별할 수 있다. PM_{2.5} 또한 화성시 향남지역(38.5 µg/m³)으로부터 시작하여 시흥시 시화산단(36.4 µg/m³), 고양시, 성남시, 의정부시 등의 순서로 높게 발현하고 있음을 쉽

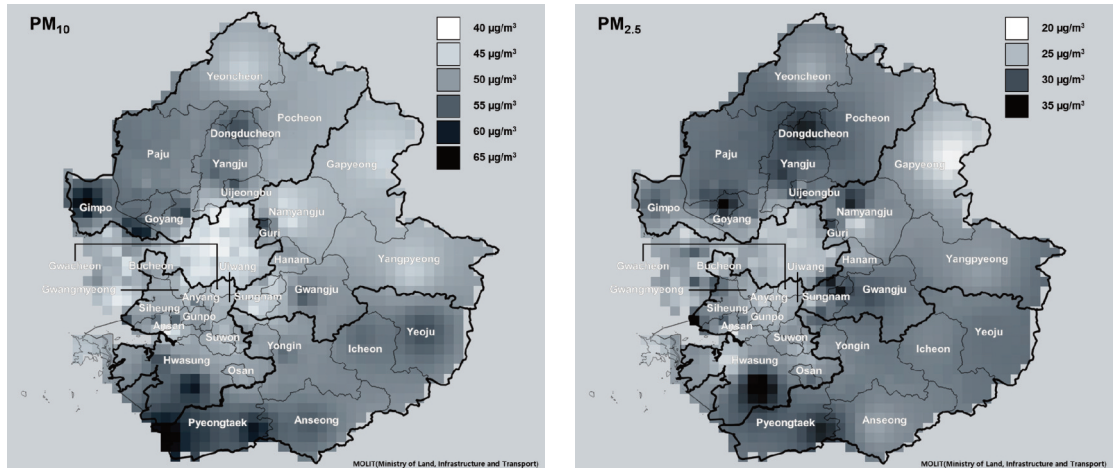


Figure 2. Annual average concentration profiles of PM₁₀ and PM_{2.5} in Gyeonggi-do (2017).

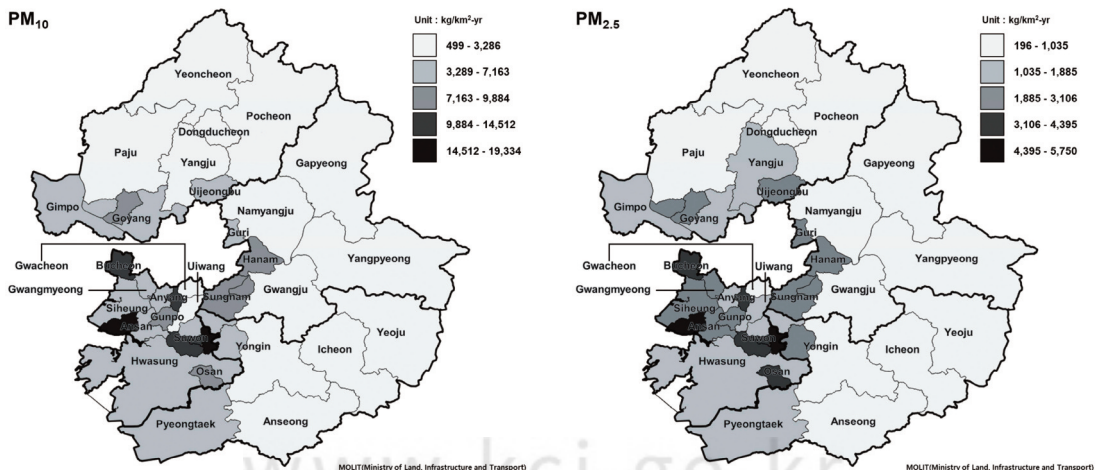


Figure 3. Areal emission amount of PM₁₀ and PM_{2.5} in Gyeonggi-do (2017).

계 관찰할 수 있다.

각 지역별 미세먼지 배출량이 연평균 농도분포와 상관성이 낮은 것으로 미루어 보아, 지역의 자체 배출량 외에 외부 유입이나 비점오염원, 그리고 2차 생성 미세먼지를 비롯한 또 다른 영향요인이 있는 것으로 판단된다. 관련 연구에 의하면 국외에서 배출된 대기오염물질이 국내 $PM_{2.5}$ 농도에 미치는 영향은 평균 40%~65%이며, $PM_{2.5}$ 고농도 사례 기간에 수도권 지역 $PM_{2.5}$ 농도에 30%~70% 이상 영향을 미치는 것으로 보고되었다(Jeong et al., 2011; Choi et al., 2019). You et al. (2020)의 연구에 따르면 경기도 북쪽과 서쪽에 위치한 지역의 경우, 국외 기여도가 타 지역에 비해 매우 높은 것을 알 수 있다.

이렇게 격자구조 단위로 미세먼지 농도분포를 한 눈에 비교해볼 수 있는 통계적 농도평가를 토대로, 권역별 대단위 지역을 보다 세밀하게 구분하여 대응할 수 있는 체계를 수립하는데 도움이 될 것으로 사료된다.

2. 미세먼지 농도의 측정소별 상관관계 분석

경기도 내에 설치되어 있는 도시대기측정망 내 측정소 73곳에 대해서 2017년부터 2020년까지 4년간 시간별 미세먼지 농도가 측정소별로 서로 상관성이 있는지 Pearson 상관계수를 산출하여 Figure 4에 도시하였다. 고찰 결과, 동일한 권역 내에서 매시간 구해지는 미세먼지의 모든 측정소에 대한 피어슨 상관

계수는 PM_{10} 의 경우 0.68, $PM_{2.5}$ 의 경우 0.70 이상의 평균값을 보였다. 같은 권역 내에 있는 측정소 간의 상관계수는 0.60 이상으로 산출되는 것으로 보아, 서로간의 상관성이 충분히 있는 것으로 판단된다(Cha et al., 2018). 전체 측정소 가운데 95% 이상이 권역 내에서 0.80 이상의 상관계수를 보이고 있고, 일부 측정소는 다른 권역 내의 측정소들과도 0.80 이상의 상관계수를 보여주었다. 예를 들면, 남부권의 측정소들은 동부권에 속하는 측정소들과 최대 0.95까지의 높은 상관관계를 나타냈다. 이렇게 지리적으로 떨어져 있을지라도 미세먼지 공간분포에 있어서 일정한 경향이 있을 수 있음을 알 수 있다.

한편, 중부권의 부천시, 북부권의 고양시, 동부권의 가평군과 양평군 등은 동일한 권역 내에 있으면서도 서로 간의 상관성이 낮은 것으로 파악되었다. 부천시는 경기도에서 인천시의 대기오염 영향을 가장 많이 받는 지자체로서, 중부권의 다른 지역들보다 약 두 배 이상 인천으로부터의 배출량 영향이 크기 때문에 관내 측정소별 차이가 일정하지 않을 수밖에 없다(You et al., 2020). 고양시의 경우, 토지피복 기준으로 경기도 내 농업지역이 많이 분포하고 있는 북부권에서 가장 도시화가 발전된 지역이다. 고양시의 도시대기측정망 중에서도 특히 일산동구에 위치한 식사동 측정소는 이웃해 있는 북부권의 측정소들과 비교적 낮은 상관성을 보였다. 식사동 측정소는 도심에 위치

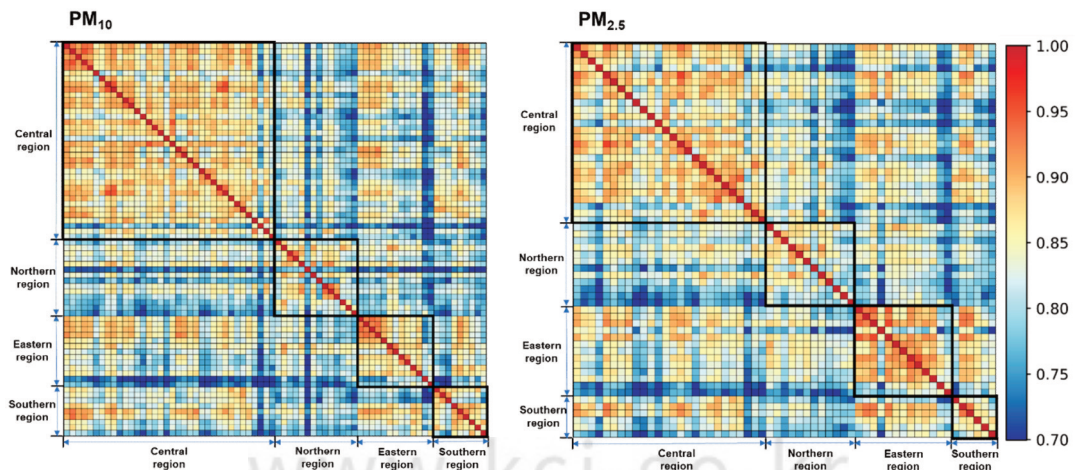


Figure 4. Correlation coefficient of PM_{10} and $PM_{2.5}$ between monitoring stations by region in Gyeonggi-do.

하여 외곽에서 일어나는 생물성 연소의 영향이 지배적인 북부권보다는 도로이동오염원의 영향을 크게 받으므로 서로 간의 발생원이 차이가 나기 때문에 상호 간의 상관성도 낮은 것으로 판단된다. 또한, 고양시 전체의 미세먼지 배출량도 생물성 연소(PM_{10} 3%, $PM_{2.5}$ 9%)보다 비도로이동오염원(PM_{10} 8%, $PM_{2.5}$ 24%)과 도로이동오염원(PM_{10} 7%, $PM_{2.5}$ 21%)에 의한 배출량이 각각 두 배 이상으로, 북부권의 배출량 기여율과 차이가 있음을 확인할 수 있었다. 동부권의 가평군과 양평군의 경우, 도시화가 비교적 덜 진행된 농업지역으로 구성되어 있으므로 서울과 인접한 동부권의 다른 도시들과 미세먼지 상관성이 비교적 낮은 것으로 판단된다.

3. 다차원척도법을 이용한 경기도 지역별 미세먼지 농도의 유사성 분석

미세먼지 농도분포에 따라 새로운 범주화를 시도해보기 위하여 2017년부터 2020년까지 4년간의 시간별 도시대기측정망 자료 가운데 결측치가 10% 미만인 측정소에 해당하는, 즉, 유효측정비율이 90% 이상인 측정소에서 얻어진 데이터를 대상으로 다차원척도법을 적용해보았다. 군집분석이 개체(측정소) 간의 유사성을 이용하여 동일한 그룹들로 분류하는 것이 목적인 반면, 다차원척도법은 각 개체별로 얻어지는 변수(농도값) 간의 거리를 행렬로 구하여 개체 간의 유사성이나 비유사성을 평가한다. 이렇게 구한 행렬

을 2차원 공간상에 점으로 표기하여 간편하게 경향성이나 상관성을 알아볼 수 있게 한다(Shin et al, 2018). 본 연구에서 측정소별로 측정되는 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 의 농도 값에 대하여 계산한 결과, Figure 5에 도시한 바와 같이 PM_{10} 은 총 5개의 권역으로 분류될 수 있는 것으로 나타났고, $PM_{2.5}$ 는 4개 권역으로 분류되었다.

보다 구체적으로 각 집단을 시각적으로 Figure 6에 표기하였으며, 안양시, 의왕시, 수원시, 성남시, 군포시는 동일한 권역(■)으로 포함되었다. 도시화가 진행된 도시들로서 생물성 연소나 산업시설에 의한 배출량이 적은 반면, 출퇴근 시간에 집중되어있는 도로이동오염원에 의한 영향이 크게 좌우하는 유사한 특성을 보이기 때문이다. 성남시의 경우, 기존의 지리적인 분류 기반에 따라 동부권에 속해 있지만, PM_{10} 특성은 중부권의 도시들과 비슷함을 알 수 있다. 도시화가 진행된 고양시의 일산신도시(■)와 용인시 수지구(■)도 같은 범주로 구분됨을 확인할 수 있었다. 고양시와 용인시 관내 다른 지점(●)들은 자연녹지가 많은 동부권과 북부권의 일부 지역에 해당함을 알 수 있다. 중소형 산업단지와 제조업체들이 밀집해 있어서 대기배출시설이 많은 화성시와 평택시, 김포시가 같은 범주(x)에 포함되고 있다. 특히 화성시와 김포시는 경기도에서 대기배출시설이 가장 많이 위치해 있는 도시에 해당하며, 2017년 기준으로 화성시와 김포시에는 각각 2천여 개가 넘는 배출시설이 위치해 있다(Kim, 2017).

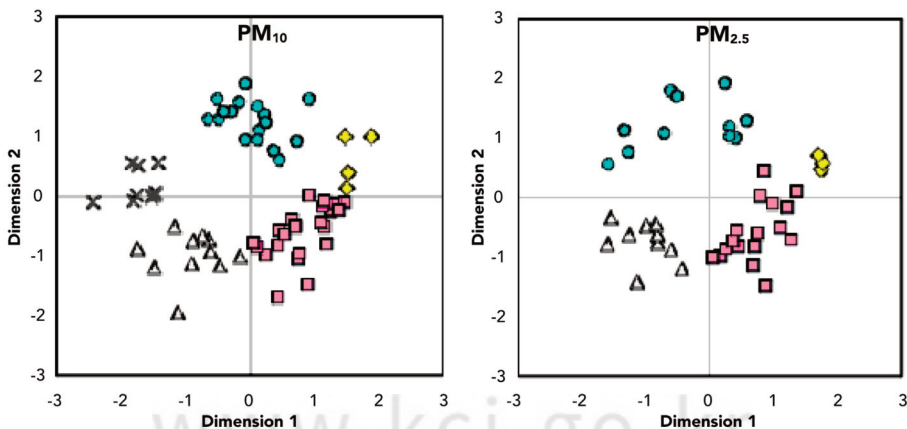


Figure 5. Categorization of local regions based on PM concentration distribution evaluated by MDS.

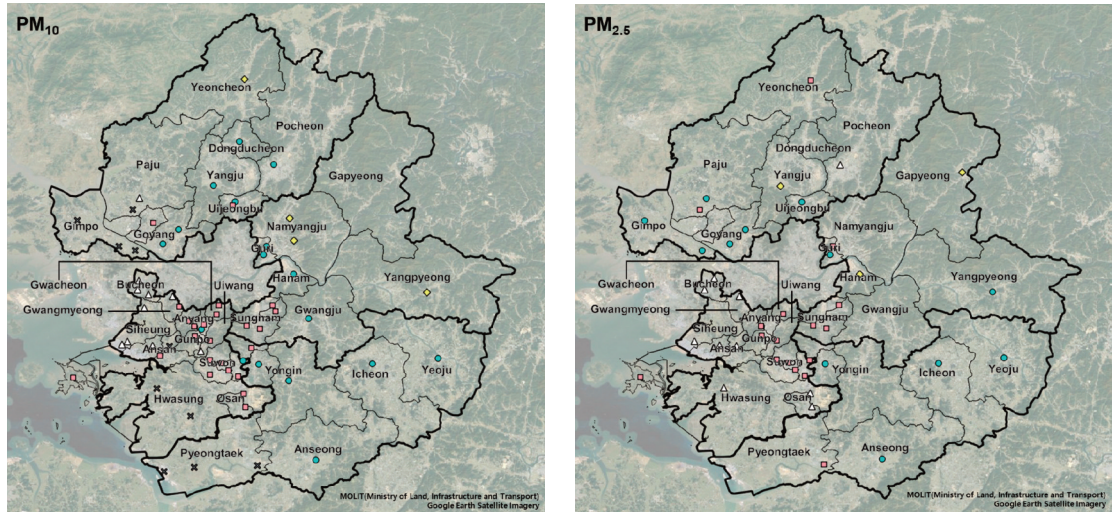


Figure 6. MDS analysis for PM₁₀ and PM_{2.5} concentration in Gyeonggi-do.

한편, 중부권의 서쪽에 위치하고 있는 도시들인 부천시, 시흥시, 안산시도 도시화 및 산업화가 진전된 지역들로서 거주자 및 유동 인구가 많고, 제조업 중심의 산업체가 형성되어 있어서 대기배출시설이 밀집된 특성을 가지고 있다. 동시에 인천시와 지리적으로 인접하여 인천시의 배출량 영향을 직접적으로 받는 특징이 있으므로(You et al., 2020), 본 연구에서 실시한 다차원적도법의 분석 결과에 따라 다른 권역으로 포함된 것으로 판단된다. 경기도 북부의 연천군, 중동부의 양평군과 남양주시는 연평균 미세먼지 농도 분포에서도 볼 수 있듯이 PM₁₀ 농도가 35-43 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 40-45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 수준으로 비교적 청정한 지역에 해당하여 또 다른 범주로 구분될 수 있다.

PM_{2.5}는 PM₁₀에 비해 결측률이 10% 이상인 측정소에 해당하는 남양주시, 광주시, 동두천시는 본 연구의 통계분석에서 제외하였다. PM_{2.5}는 비산먼지의 배출원 기여율이 낮고, 도로와 비도로이동오염원과 같은 이동오염원의 기여율이 높은 특징을 가지며, 대기 중 화학반응으로부터 생성되는 2차 PM_{2.5}의 비율이 꽤 높은 것이 특징이다. 통계분석 결과, PM_{2.5}는 4개의 권역으로 구분되었고, PM₁₀과 마찬가지로 도시화가 진행된 안양시, 의왕시, 수원시, 성남시가 동일한 권역으로 평가되었다. 또한, 부천시, 시흥시, 안산시, 화성시, 오산시, 포천시가 또 다른 하나의 권역으로

포함되었는데, 제조업 배출시설이 밀집되어 있다는 공통점을 보인다. 경기도 중부권의 경우, 다른 권역에 비해 제조업 시설에 의한 PM_{2.5} 기여율이 높고, 북부권에 위치한 포천시에도 1천여 개가 넘는 제조업 대기배출시설이 위치해 있는 것으로 알려져 있다. PM₁₀과 비교했을 때, PM_{2.5}의 경우 비산먼지 이외의 배출원들에 의한 기여율이 높아지면서, 제조업 시설 배출량의 영향이 더 크게 작용한 것으로 판단된다. 양주시, 하남시, 가평군은 상대적으로 낮은 PM_{2.5} 농도를 보이며 한 권역으로 포함되었다.

IV. 결론

본 연구는 경기도의 지역별로 다양한 미세먼지 특성을 파악하여, 새로운 범주화를 통해 효율적으로 미세먼지를 관리하고자 연구를 수행하였다. 경기도 내 도시대기측정소에서 측정된 PM₁₀과 PM_{2.5} 농도와 배출량의 공간분포가 전체적으로 유사하지 않은 사실로부터 지역 내의 자체 배출량 외에 2차 생성 미세먼지, 비점오염원, 외부 유입과 같은 다른 영향요인이 있는 것으로 판단된다. 경기도 지역 내 배출량은 중부권역이 가장 많았으나 미세먼지 오염도는 남부권역과 북부권역이 높은 것으로 분석되었다. 이러한 차이는 경기도의 경우 남북 방향으로 넓게 펼쳐져 있으며, 지

리적으로 경기도 남부지역인 평택시 및 화성시는 근접한 충청도의 대형발전소와 산업단지의 영향을 쉽게 받을 수 있으며, 경기도 북부지역의 경우 중국뿐만 아니라 북한 등 국외 배출영향을 쉽게 받기 때문에 판단된다.

현재 미세먼지 경보제에 사용되는 권역별로 측정소 간 PM_{10} · $PM_{2.5}$ 농도의 상관성 분석을 진행해보았을 때, 동일 권역 내 타 측정소와 다소 상관성이 떨어지거나 다른 권역의 측정소와 높은 상관성을 보이는 지역들이 존재했다. 이를 보완하고자 본 연구에서는 다차원척도법을 이용하여 미세먼지 농도 특성에 따라 경기도 범주화를 진행하였고, PM_{10} 은 5개, $PM_{2.5}$ 는 4개의 범주로 분류되었다.

2017년도 이전부터 존재하던 측정소를 기준으로 유효측정비율이 90% 이상인 곳에 대해서만 분석이 진행되어 일부 지역이 누락된 경우가 존재하고, 지역 내 도시대기측정소가 한두 곳만 존재하는 경우는 그 측정소가 지역의 대표성을 만족하는지 고려해 보아야 한다. 추후 범주화 결과를 토대로 범주별 요인 분석을 진행하여 미세먼지 농도에 영향을 주는 원인을 파악하여 정량화해볼 필요성이 있다.

공간보간법을 이용한 미세먼지 농도의 대기 중 공간분포를 분석하여 경기도의 지역별 농도 추이를 파악할 수 있었으며, 권역별 측정소들의 미세먼지 농도 상관분석 결과를 통해 경기도 미세먼지 관리권역을 새롭게 구성해 볼 필요성이 있다고 판단하였다. 다차원척도법은 지역별 미세먼지의 연평균 농도만을 고려할 뿐 아니라, 시간별 미세먼지 농도의 지역별 유사성을 정량화하여 범주를 나누어볼 수 있었다.

사사

이 논문은 경기녹색환경지원센터의 「경기도 다중이용시설 실내공기질 빅데이터 분석 및 IAQ 지수 개발(21-05-01-40-41)」의 일환으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

- AirKorea. 2021. <https://www.airkorea.or.kr/>. Korea Environment Corporation.
- Bac MS, Jung CH, Ghim YS, Kim KH. 2013. A Proposal for the Upgrade of the Current Operating System of the Seoul's Atmospheric Monitoring Network Based on Statistical Analysis. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment* 29(4): 447-458. [Korean Literature]
- Cha JW, Kim JY. 2018. Analysis of fine dust correlation between air quality and meteorological factors using SPSS. *Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering* 22(5): 722-727. [Korean Literature]
- Choi J, Park RJ, Lee HM, Lee S, Jo DS, Jeong JI, Henze DK, Woo JH, Ban SJ, Lee MD, Lim CS, Park MK, Shin HJ, Cho S, Peterson D, Song CK. 2019. Impacts of local vs. trans-boundary emissions from different sectors on $PM_{2.5}$ exposure in South Korea during the KORUS-AQ campaign. *Atmospheric Environment* 203: 196-205.
- Choi YS. 2014. *Walk in Multidimensional Scaling*, Free Academy, Seoul. [Korean Literature]
- Cox TF, Cox MAA. 2000. *Multidimensional Scaling* (2nd ed), Chapman & Hall, London.
- Flemming J, Stern R, Yamartino RJ. 2005. A new air quality regime classification scheme for O_3 , NO_2 , SO_2 , and PM_{10} observations sites. *Atmospheric Environment* 39: 6121-6129.
- Gyeonggi Research Institute (GRI). 2020. Establishment of Gyeonggi-do fine dust inventory and management system. [Korean Literature]
- Han JH, Lee MH, Ghim YS. 2008. Cluster Analysis of PM_{10} Concentrations from Urban Air Monitoring Network in Korea during 2000

- to 2005. Journal of Korean Society for Atmospheric Environment 24(3): 300-309. [Korean Literature]
- Jeong JC. 2014. A Spatial Distribution Analysis and Time Series Change of PM₁₀ in Seoul City. Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies 17(1): 61-69. [Korean Literature]
- Jeong U, Kim J, Lee H, Jung J, Kim YJ, Song CH, Koo JH. 2011. Estimation of the contributions of long range transported aerosol in East Asia to carbonaceous aerosol and PM concentrations in Seoul, Korea using highly time resolved measurements: a PSCF model approach. Journal of Environmental Monitoring 13: 1905-1918.
- Jha DK, Sabesan M, Das A, Vinithkumar NV, Kirubakaran R. 2011. Evaluation of Interpolation Technique for Air Quality Parameters in Port Blair, India. Universal Journal of Environmental Research and Technology. 1(3): 301-310.
- Kim DY. 2017. Establishment of Investigation System on Air Pollutants Emission Facilities in Gyeonggi-Do, Research Report of Gyeonggi Research Institute. [Korean Literature]
- Korean Statistical Information Service (KOSIS). 2021. Korea Statistical Information Service. <https://kosis.kr/>
- Ministry of Environment (MOE). 2020. Annual Report of Air Quality in Korea, 2019. [Korean Literature]
- National Institute of Environmental Research (NIER). 2020. 2017 National Air Pollutants Emission. [Korean Literature]
- Shim KS, Woo JS, Kim BJ, Kim SK, Hong SM. 2015. A Study on the Establishment of Air Pollution Alert Zones in Gyeonggi-do, Research Report (2015) by Ambient Air Research Team. Research Institute of Health and Environment of Gyeong Gi Do. [Korean Literature]
- Shin MS, Chun SK, Choi YS. 2018. Multidimensional scaling of categorical data using the partition method, The Korean Journal of Applied Statistics. 31(1): 67-75. [Korean Literature]
- Song IS, Kim SY. 2016. Estimation of Representative Area-Level Concentrations of Particulate Matter (PM₁₀) in Seoul, Korea. Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies 19(4): 118-129. [Korean Literature]
- Yoon HJ, Kim DS. 1997. Spatial distribution analysis of metallic elements in dustfall using GIS. Journal of the Korea Air Pollution Research Association 13(6): 463-474. [Korean Literature]
- You S, Bae C, Kim H, Yoo C, Kim S. 2020. Municipality-Level Source Apportionment of PM_{2.5} Concentrations based on the CAPSS 2016: (I) Gyeonggi Province. Journal of Korean Society for Atmospheric Environment 36(6): 785-805. [Korean Literature]