

Research Paper

취약성 평가에 기반한 PM_{2.5} 취약지역 유형화에 관한 연구

문한솔 · 정주철
부산대학교 도시공학과

A Study on the Classification of Vulnerable Areas to PM_{2.5} according to Urban Characteristics based on Vulnerability Assessment

Hansol Mun · Juchul Jung

Department of Urban Planning and Engineering, Pusan National University

요약: PM_{2.5}는 건강에 심각한 영향을 미치는 미세먼지로, 기존의 오염 관리 정책 및 연구는 주로 고농도 지역에 기반하여 진행되어 왔다. 그러나 이러한 접근법은 지역별 특성과 취약성 수준을 충분히 고려하지 못해, 특정 지역의 실제 위험을 제대로 반영하지 못하는 한계가 있다. 본 연구는 229개 행정구역을 대상으로 PM_{2.5} 노출, 민감도, 그리고 적응 능력을 종합적으로 분석하여 취약성 지수를 도출하였다. 2019년 기준의 데이터를 활용하여 정규화와 엔트로피 가중치 방법을 통해 지수를 산출하였고, LISA 분석과 K-means 군집 분석을 통해 PM_{2.5} 취약 지역의 공간적 패턴을 분석하였다. 연구 결과, PM_{2.5} 취약 지역의 분포는 도시 내 특정 패턴을 보이며, 취약 지역은 네 가지 유형으로 분류되었다. 각 유형은 서로 다른 도시적 특성을 가지며, 이를 통해 지역별 맞춤형 미세먼지 저감 정책의 필요성을 제시하였다. 본 연구는 PM_{2.5} 취약성의 공간적 패턴을 이해하고, 보다 효과적인 정책 접근 방안을 모색하는 데 기여할 것으로 기대된다.

주요어: PM_{2.5}, 초미세먼지, 취약성 평가, LISA 분석, K-means 군집분석

Abstract: PM_{2.5}, a type of fine particulate matter, poses serious health risks. Existing pollution management policies and research have generally focused on high-concentration areas. However, this approach has limitations as it does not adequately account for regional characteristics and varying levels of vulnerability, leading to an incomplete reflection of actual risks in specific areas. This study analyzed 229 administrative districts to develop a vulnerability index by comprehensively evaluating PM_{2.5} exposure, sensitivity, and adaptive capacity. Using data from 2019, the index was calculated through normalization and entropy weighting methods, and spatial patterns of PM_{2.5} vulnerability were examined through LISA and K-means clustering analysis. The findings reveal that the distribution of PM_{2.5}-vulnerable areas shows distinct patterns within urban settings, which were classified into four distinct types, each characterized by different urban features. This suggests a need

for region-specific dust reduction policies. This study contributes to a better understanding of the spatial patterns of PM_{2.5} vulnerability and aims to support the development of more effective policy approaches.

Keywords : PM_{2.5}, Fine Particulate Matter, Vulnerability Assessment, LISA Analysis, K-means Clustering Analysis

I. 서론

미세먼지는 천식과 같은 호흡기 질환을 유발하고 폐 기능 저하를 초래하는 주요 환경 오염 물질로, 특히 PM_{2.5}(초미세먼지)는 그 크기가 매우 작아 인체에 더 큰 위해를 끼친다. PM_{2.5}는 호흡기와 심혈관계뿐만 아니라 신경계, 생식계 등 전신에 걸쳐 다양한 건강 문제를 유발하는 중대한 공중보건 문제로 다뤄지고 있다. 흡입된 PM_{2.5}는 폐포까지 직접 침투하거나, 혈류를 따라 체내로 이동해, 천식과 같은 호흡기 질환을 유발하고, 폐 기능의 저하를 초래한다. 특히 입자가 작을수록 인체에 미치는 위험성이 커져, PM_{2.5}는 PM₁₀보다 훨씬 더 큰 영향을 미치는 물질로 보고된다(Harrison et al. 2012; Ristovski et al. 2012; Jang 2014). 세계보건기구(WHO) 산하 국제암연구소(IARC)는 PM_{2.5}를 1군 발암물질로 지정하였다. 이처럼 미세먼지 문제는 공중 보건의 중대한 위협으로 인식되며, 지역사회와 환경에 미치는 부정적인 영향이 두드러지고 있다. 이러한 상황은 PM_{2.5} 문제를 해결하기 위한 체계적이고 적극적인 대응의 필요성을 더욱 강조한다. 따라서 PM_{2.5}로 인한 공중보건의 악영향을 최소화하기 위해 체계적이고 적극적인 관리가 필수적이다.

그러나 기존의 연구 및 정책 대응은 미세먼지 취약 지역의 도출에 있어 다소 소극적이었으며, 주로 고농

도 지역을 단순히 취약지역으로 간주하는 경향이 있었다. 고농도의 PM_{2.5} 지역을 취약한 지역으로 직접 인식하는 것은 한계가 있다. 이렇듯 취약성 평가의 핵심 개념인 적응능력이나 지역적 특수성 등이 충분히 고려되지 않고 있다. 또한, 미세먼지 감축을 위한 대책으로 주로 배출원 관리에 중점을 두어, 도시 특성이나 지역별 취약성에 대한 고려는 부족했다. 2019년 3월 정부는 「재난 및 안전관리 기본법」을 개정하여 미세먼지를 사회재난으로 규정하고, 2019년 2월부터 「미세먼지 저감 및 관리에 관한 특별법」에 근거하여 비상저감조치를 시행하는 등 대책을 강화해왔다. 그러나 이러한 정책들은 거시적 관점에서 전국적인 미세먼지 농도 감축에 중점을 두기 때문에 지역별 특수성을 충분히 반영하지 못하는 한계가 있다.

취약성의 사전적 정의는 ‘무르고 약한 성질’이며, IPCC에서는 취약성을 ‘기후 다양성과 극한 기후 상황을 포함한 기후변화의 역효과에 대한 한 시스템의 민감도, 또는 대처할 수 없는 정도’라고 정의하고 있다(IPCC 2001). 국내·외 선행연구에서는 IPCC에서 제시한 취약성의 개념적 틀(Figure 1)에 따라, 기후변화에 노출된 정도(Exposure)와 기후변화에 대한 민감도(Sensitivity), 그에 대한 적응능력(Adaptive Capacity)의 연산을 통해 취약성을 평가한다(Seok et al. 2024). 노출은 시스템이 기후와 관련된 자극에 노출되는 정도를 나

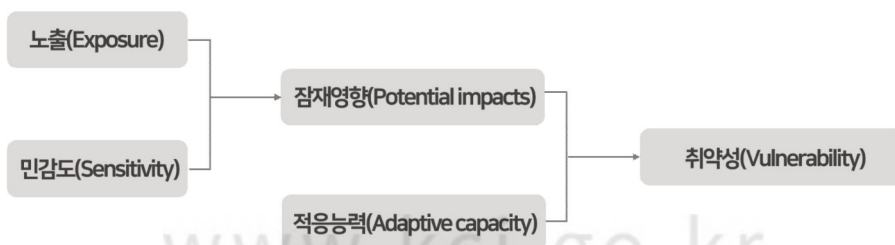


Figure 1. Conceptual framework of vulnerability (Source: IPCC(2001))

타내고, 민감도는 자극에 의하여 시스템이 긍정적 또는 부정적으로 영향을 받는 정도를 나타내며, 적응능력은 시스템이 기후변동과 극한 기상현상을 비롯한 기후변화를 조절하고 잠재적인 피해를 완화하며 이를 기회로 활용하거나 대처하는 정도를 나타낸다(Nam & Kim 2013). 그러나 기후변화가 미래 세대의 삶을 위협하는 주요 요인으로 논의됨에 따라 국내·외에서 홍수, 폭염, 도시열섬 등의 연구는 활발하게 진행되고 있으나 PM_{2.5}에 주목한 취약성 평가 연구는 부족한 실정이다(Lee et al. 2015; Choi et al. 2018; Kim et al. 2020). 게다가 미세먼지 오염 및 위험에 대한 취약성 평가는 다양한 환경적, 사회적, 경제적, 그리고 공간적 요인을 종합적으로 고려해야 하는 복합적인 과정이다. 그러나 선행연구들은 주로 GIS 및 원격탐지 기술을 활용해 공간적 분포만을 고려하여 고농도에 취약한 영역을 식별하거나, 특정 요인이 미세먼지에 미치는 영향을 분석하는데 중점을 두고 있다(Lee & Sohn 2015; Jeong & Lee 2018; Eum & Kim 2020).

그러나 앞서 제시된 취약성 평가의 개념적 틀에 따르면, 취약지역에 거주하는 주민들은 PM_{2.5}로 인한 건강 위험에 더욱 취약할 수 있다. 이는 이들 지역의 주민들이 PM_{2.5}에 대한 높은 노출도와 민감성, 그리고 부정적 영향을 완화하거나 관리할 수 있는 적응능력이 부족하기 때문이다. 그 결과, 취약 지역에서의 건강 피해가 더욱 심각하게 나타날 수 있으며, 이에 대한 보다 강화된 관리와 정책적 대응이 요구된다. 특히, 지역 특성을 반영한 맞춤형 관리 전략이 필요하며, 취약 지역에 대해서는 세분화된 접근과 강화된 기준을 적용해야 한다. 본 연구는 이러한 맥락에서, 취약 지역에 대한 보다 강화된 기준 적용의 필요성을 강조하며, 이를 위한 심층적이고 구체적인 평가가 필요함을 주장한다. 또한 각 유형별 특성에 맞춘 차별화된 대응 전략의 중요성도 함께 논의한다.

이와 같은 배경을 바탕으로, 본 연구는 PM_{2.5} 취약성 평가를 통해 보다 정밀하게 취약지역을 도출하고 도시 특성을 반영하여 취약지역을 유형화하는 것을 주요 목표로 한다. 특히 취약지역에 대한 강화된 기준 적용의 필요성을 인지하고, 기존 평가 방법보다 심층적이고 구체적인 평가가 이루어질 수 있도록 기초자료로 활용

할 것이다. 본 연구는 이러한 연구 결과를 바탕으로, 미세먼지 문제에 대한 보다 효과적이고 실질적인 관리방안을 제시하고, 각 유형별 특성에 맞춘 차별화된 대응 전략이 필요함을 강조함으로써, 궁극적으로 미세먼지로 인한 피해를 최소화하는 데 기여하고자 한다.

II. 연구방법

1. 연구의 범위 및 분석 지표

본 연구의 분석 단위는 행정구역 시·군·구로 설정하여 2019년 기준 전국 기초자치단체 226개와 세종특별자치시, 제주특별자치도의 제주시, 서귀포시를 포함한 총 229개 시·군·구를 대상으로 진행하였다. 시간적 범위는 대부분 2019년 기준 자료를 활용하였으나 자료의 구축 한계로 존재하지 않는 자료들은 가장 가까운 연도의 자료를 활용하였다.

취약지역 도출을 위한 취약성 및 도시공간 특성 지표는 선행연구를 바탕으로 선정되었다(Ha et al. 2014; Jung & Kwon 2015; Kim & Jun 2014; Lee et al. 2015; Yoo et al. 2017; Choi et al. 2018; Sin et al. 2021). 먼저 취약성 분석 지표는 PM_{2.5}에 주목하여, IPCC의 기후변화 취약성 평가 개념을 바탕으로 노출, 민감도, 적응능력으로 구분하여 조사 및 선별하였다(Table 1). 노출과 관련한 지표로는 환경부에서 제공하는 에어코리아의 자료를 활용하였고 2019년의 PM_{2.5} 연평균, 계절별 평균농도를 사용하였다. 이 때 수집된 자료는 포인트 기반의 특정 지점에 대한 농도 자료이므로 측정되지 않는 지역들의 현황 파악에는 한계가 있다. 또한 측정소의 위치와 개수가 지역별로 고르지 않기 때문에 한 지방자치단체를 대표할 수 있는 특정 농도 자료 선정에 어려움이 있다. 따라서 수집된 자료는 위치정보를 가지고 있는 점 중심의 공간 데이터이므로 ArcGIS 공간내삽법을 활용하여 1km×1km의 공간해상도로 농도값을 보간하였고(Jeong 2014), zonal 통계기법을 통해 본 연구의 공간적 범위인 시군구별 농도값을 산출하였다.

민감도는 선행연구를 바탕으로 취약대상과 취약한 경요인 등을 기반으로 선별하였으며, 여기서 유소년 부양비 및 노년부양비는 만 15~64세 인구에 대한 각각 만 0~14세 인구 또는 65세 이상 인구의 백분비를 나타

Table 1. Vulnerability index analysis indicators

Characteristic	Detailed Indicators	Data Year	Source
Exposure	Monthly PM _{2.5} concentration	2019	Ministry of Environment, Air Korea
	Population aged 14 and under	2019	Statistics Korea
Sensitivity	Population aged 65 and over	2019	Statistics Korea
	Proportion of National Basic Livelihood Security recipients	2017	Statistics Korea
	Proportion of elderly living alone	2019	Statistics Korea
	Youth dependency ratio	2019	Statistics Korea
	Elderly dependency ratio	2019	Statistics Korea
	Proportion of waste incineration in waste disposal methods	2018	Environmental Spatial Information Service
	Proportion of disabled population	2019	Statistics Korea
	Medical expenses for patients with malignant neoplasms of the bronchi and lungs	2019	Statistics Korea
	Number of air pollutant-emitting businesses	2019	Ministry of the Interior and Safety
	Proportion of health and social welfare businesses	2019	Statistics Korea
Adaptation	Number of hospital beds per 1,000 population	2019	Statistics Korea
	Number of doctors per 1,000 population	2019	Statistics Korea
	Proportion of general account spent on social welfare	2019	Statistics Korea
	Proportion of population covered by health insurance	2019	Statistics Korea
	Local financial independence rate	2019	Statistics Korea
	GRDP (Gross Regional Domestic Product)	2017	Statistics Korea
	Education level (high school graduate rate)	2015	Statistics Korea
	Environmental budget per capita	2019	Local Finance 365
	Proportion of population within the living area park zone	2019	National Land Information Platform

낸다. 또한 소각으로 인한 PM_{2.5} 발생 문제를 제기하는 선행연구를 바탕으로 생활폐기물처리방식 중 소각비율을 지표로 선정하였다(Oh et al. 2020). 적응능력은 사회·경제적 요소를 중심으로, 노출과 민감도로 인한 부정적인 영향을 완화할 수 있는 능력을 선별하였다. 이 때, 환경예산 지표로는 세부 예산항목들 중 PM_{2.5}와 관련이 있을 것으로 판단되는 대기, 환경보호, 자연 예산만을 추출하여 활용하였으며, 제주특별자치도는 본청의 자료만 존재하여 반으로 나눈 값을 제주시와 서귀포시 각각 자료로 사용하였다. 생활권 공원 권역 내 인구 비율 지표의 기준이 되는 서비스 권역은 1km² 자료를 활용하였다.

본 연구는 PM_{2.5} 취약 지역을 평가함에 있어 몇 가지 가정을 바탕으로 수행되었다. 첫째, PM_{2.5}의 건강 영향은 노출량에 비례한다는 가정을 두었으며, 성분별 차

이는 고려하지 않고 전체 농도를 기준으로 평가하였다. 둘째, PM_{2.5}에 영향을 미치는 도시 특성은 물리적 특성만을 고려하여 분석하였다. 이러한 가정에 기반하여 연구가 진행되었기 때문에, 연구 결과를 해석할 때 이 가정들이 미치는 영향을 배제한 후 해석한다.

PM_{2.5}에 영향을 미치는 도시의 물리적 환경특성은 6가지로 분류하였으며, 각 특성별 지표는 Table 2와 같이 선정하였다. 개발밀도 및 잠재력 특성에서 PM_{2.5} 취약지역과 도시 내 개발용량 및 개발밀도간의 관계성을 분석하고자 하였다. 기존의 연구들에서 오염원으로 흔히 지목되고 있는 자동차 또는 교통과의 관계성을 분석하기 위해 도로교통특성과 관련된 지표를 선정하였다. 산업경제특성은 1, 2, 3차 산업으로 구분한 후 각 산업활동이 어떤 영향을 미치는지 분석해보고자 하였고, 경제규모를 파악할 수 있는 고용률, 총사업체수,

Table 2. Urban characteristics analysis indicators

Characteristic	Detailed Indicators	Data Year	Source
Development Density and Potential	Floor Area Ratio	2019	National Land Information Platform
	Resident Population	2019	Statistics Korea
	Population Density	2019	Statistics Korea
	Land Use Compactness Index	2019	National Land Information Platform
	Total Number of Buildings	2019	National Land Information Platform
	Compact Spatial Structure	2019	Statistics Korea
	Total Floor Area	2019	National Land Information Platform
Road Traffic Characteristics	Number of Registered Vehicles	2019	Statistics Korea
	Road Area Ratio	2019	Statistics Korea
	Job-Housing Proximity Ratio	2016	National Transport Database
	Pedestrian Road Ratio	2019	Statistics Korea
Industrial and Economic Characteristics	Employment Rate	2021	Statistics Korea
	Total Number of Businesses	2019	Statistics Korea
	Local Taxes	2019	Statistics Korea
	Number of Employees in Manufacturing	2019	Statistics Korea
	Proportion of Workforce in Primary Industry	2019	Statistics Korea
	Proportion of Workforce in Secondary Industry	2019	Statistics Korea
	Proportion of Workforce in Tertiary Industry	2019	Statistics Korea
Land Use Characteristics	Green Area Ratio	2019	Environmental Spatial Information Service
	River Area Ratio	2019	National Land Information Platform
	Commercial Area Ratio	2019	Statistics Korea
	Industrial Area Ratio	2019	Statistics Korea
	Residential Area Ratio	2019	Statistics Korea
	Land Use Diversity Index	2019	National Land Information Platform

지방세, 제조업 종사자 수를 선정을 추가로 선정하였다. 자연환경특성으로 자연적 요소와 PM_{2.5} 취약지역 간의 관계를 분석하고자 하였으며, 토지이용특성을 통해 토지이용의 종류 및 복합도와의 관계를 분석하고자 하였다. 주택건설특성으로는 건축물 총 수, 연면적을 분석 지표로 선정하였다.

2. 취약성 평가

본 연구에서는 Moss et al. (2001)이 제안한 VRI (Vulnerability-Resilience Indicator) 지표의 개념적 틀을 확장하여 취약성을 평가하였다. 노출, 민감도, 그리고 적응능력 지표들을 계산한 후 연산하여 하나의 지수로 도출해내기 위해 표준화 및 가중치 산정 과정을 가진다.

1) 표준화

지수(Index)는 서로 다른 측정단위를 사용하거나 과

학적인 연관성이 없는 둘 이상의 지표를 집계하여 하나의 지수로 정의하는 방법이며(Baeck et al. 2011), 이러한 과정에는 표준화(Normalization), 가중치 부여(Weighting) 등의 방법이 있다. 표준화 방법으로는 Z-스코어(Z-score), 최대-최소를 이용한 스케일 재조정(Rescaling), 기준선과의 차이(Distance to reference country), 범주 스케일(Categorical scales), 순위산정(Ranking) 방법이 있다. 이 중, 가장 많이 사용되고 있는 방법은 Z-스코어 또는 최대-최소를 이용한 스케일 재조정 방법이다. Z-스코어 방법은 모든 자료들을 평균은 0, 표준편차는 1이 되도록 만드는 방법으로 자료의 수치가 평균으로부터 표준편차의 몇 배 정도 떨어져 있는지를 표준화된 확률변수인 Z값으로 나타낸다(Baeck et al. 2011). 그러나 평균치 이하의 점수는 음수 값으로 산정되는데 분석 목적에 의해 여러 개의 지표를 합산하는 과정이 필요한 경우, 음의 표준화 값을 합산함으로써

영향 정도가 왜곡될 가능성이 존재한다(Jun et al. 2020). 따라서 본 연구는 취약성 지수 산정 과정에서 부문별 지수를 합산해야 하므로, 최대-최소를 활용한 스케일 재조정 방법을 사용하였다. 이 방법은 지표의 범위에 기반을 둔 변환 방법으로 0~1의 범위의 값을 가지도록 하며, 산출식은 식(1)과 같다.

$$Index = \frac{X_i - X_{min}}{X_{max} - X_{min}} \quad \text{식(1)}$$

또한 본 연구는 취약지역 도출을 위해 취약성 지수를 산출하는 것이므로 적응능력의 지수 값은 노출, 민감도의 지수 값과 같은 방향을 의미하지 않는다. 예를 들면 적응능력의 긍정적인 값은 낮은 취약성을 견인하는데, 높은 노출, 민감도 값은 높은 취약성을 유도한다. 따라서 표준화한 지수들 중 적응능력 부문에 속하는 지수의 값들은 노출, 민감도 부문 지수와 취약성에 대한 영향의 방향이 같도록 변환하여 사용하였다.

2) 엔트로피 가중치 산정

가중치 산정은 중요도에 따른 각 지표별 영향력 크기를 규명하는 것으로 이는 분석 결과에 큰 영향을 미친다. 가중치 산정 방법에는 동일가중치법, 계층분석기법, 컨조인트 방법, 델파이 기법, 요인분석 방법, 엔트로피 방법, 점수할당법 등이 있다(Baek et al. 2011). 본 연구에서는 선행연구를 바탕으로 엔트로피 방법을 적용하여 가중치를 산정하였으며(Lee et al. 2015), 이 방법은 사용자의 주관이 고려되지 않고 지표의 속성 정

보만을 이용하여 가중치를 산정하는 방법으로 본 연구의 분석 목적에 적절하다고 판단하였다.

먼저 표준화된 지수들을 행렬 자료로 구성하여 정규화하며, 그 산출식은 식(2)와 같다. 다음으로 정규화한 지수들의 엔트로피 값을 식(3)에 근거하여 산정한다. 계산된 각 지수의 엔트로피의 다양성을 식(4)와 같이 고려한 후, 최종적으로 식(5)와 같이 엔트로피 가중치를 산정한다.

$$D = \begin{bmatrix} X_{11} & \cdots & X_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ X_{m1} & \cdots & X_{mn} \end{bmatrix}$$

(D: 행렬구성, m: 행정구역기수, n: 지수개수)

$$P_{ij} = \frac{X_{ij}}{\sum_{i=1}^m X_{ij}} \quad (i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n) \quad \text{식(2)}$$

$$E_j = -k \sum_{i=1}^m P_{ij} \log P_{ij} \quad (k = \frac{1}{\log n}; j = 1, 2, \dots, n) \quad \text{식(3)}$$

$$d_j = 1 - E_j \quad (d_j: \text{다양성 정도}) \quad \text{식(4)}$$

$$w_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^n d_j} \quad (j = 1, 2, \dots, n) \quad \text{식(5)}$$

3) 취약성 지수 계산

표준화된 값에 엔트로피 가중치가 적용된 지수들 중 노출, 민감도, 적응능력 부문에 속한 지수들은 취약성 지수 산출을 위해 각 특성끼리 합산한다. 합산 방법에

Table 3. Vulnerability index calculation process

No.	Index	Formula
1	Exposure Score, Sensitivity Score	$Exposure\ Score = \frac{\sum (w_j \times Rescaled\ Exposure\ Factors)}{N}$ $Sensitivity\ Score = \frac{\sum (w_j \times Rescaled\ Sensitivity\ Factors)}{N}$
2	Impact Score	$Impact\ Score = \frac{Exposure\ Score + Sensitivity\ Score}{2}$
3	Adaptation Score	$Adaptation\ Score = \frac{\sum (w_j \times Rescaled\ Adaptation\ Factors)}{N}$
4	Vulnerability Index	$Vulnerability\ Index = \frac{Adaptation\ Score + Impact\ Score}{2}$

는 다양한 합산 방법이 존재하는데, 본 연구에서는 VRI(취약성-탄력성 지표) 모형의 개념적 틀을 활용하였으며 계산 과정은 Table 3과 같다(Lee et al. 2015). 그러나 앞서 적응능력 부분의 지수들에 대해 노출, 민감도와 영향의 방향이 같도록 변환하는 과정을 거쳤으므로, 최종적으로 산정된 취약성 지수값은 PM_{2.5} 취약성과 정(+)의 관계를 가지는 것으로 해석할 수 있다. 즉, 취약성 지수가 클수록 취약하고 작을수록 적응능력이 비교적 우수하다. 도시공간 특성 지표들은 각 세부 지표들을 통해 관계를 해석하는데 목적이 있으므로 특성별로 합산하는 과정을 가지지 않았다.

3. LISA 공간분석

미세먼지는 공기 중에 존재하는 물질로써 완벽하게 고립되어 존재할 수 없고, 본 연구에서 사용된 공간을 기반으로 하는 모든 데이터들은 공간에 무작위로 분포하지 않으므로 서로 상호의존적인 특징을 가질 수밖에 없다. 이를 공간자기상관(Spatial Autocorrelation)이라고 하며, 전역적(global) 관점과 국지적(local) 관점에서 분석할 수 있다. PM_{2.5}에 대한 취약성의 공간적 연관 패턴을 파악하기 위하여 이를 활용한 탐색적 공간분석을 수행하였다.

전역적 공간자기상관은 변수와 위치 사이에 특정한 패턴이 존재하는지 혹은 특정 변수가 그 위치에서 높게 나타나고 주변의 값 또는 높은 값을 나타낼 때, 이러한 위치와 변수 간의 유사성을 의미한다. 대표적으로 이를 확인할 수 있는 Moran's I 계수는 -1인 음(-)의 공간자기상관에서 +1인 양(+)의 공간자기상관 범위를 가지는데, 1에 가까울수록 인접한 공간 단위들이 전체 대상지에 걸쳐 유사한 값을 보이는 양(+)의 공간자기상관을 보여준다고 볼 수 있다(Choi et al. 2018). 인접한 지역이 다를수록 -1에 가까우며 자기상관이 존재하지 않을 경우 0에 가깝게 나타난다.

그러나 Moran's I 지수는 전체 연구대상지의 관계를 하나의 값으로 보여주는 지수이므로 대상지가 넓을 경우 개별 분석 대상 지역의 공간적 연관관계에 관한 국지적 구조에 대해서는 설명하지 못한다(Kim & Lim 2010). LISA 분석을 통해 국지적 공간자기상관을 확인할 수 있는데 이는 인접지역 간 속성값의 수치적 유사

성을 근거로, 공간적 군집패턴을 탐색해 주는 기법이다(Yeom et al. 2020). 인접 지역간 상관관계를 나타내는 High-High (HH), Low-Low (LL)와 인접 지역과 유사하지 않음을 나타내는 Low-High (LH), High-Low (HL)의 4군집이 도출된다. HH군집은 해당 지역이 높은 값을 가지면서 주변 또한 높은 경향을 나타내는 지역이고, LL군집은 해당 지역은 낮은 값을 가지면서 주변 또한 낮은 경향을 나타내는 지역이다. LH군집은 해당 지역이 낮은 값을 가지는데 반해 주변 지역은 높은 경향을 나타내고, 반대로 HL군집은 해당 지역은 높으나 주변 지역은 낮은 경향을 나타내는 것을 말한다. 이 때 HH군집과 LL군집은 공간적으로 양의 연관성을 가지는 것을 확인할 수 있고, LH군집과 HL군집에서는 음의 연관성을 가지므로 공간적으로 고립되어 있는 지역으로 볼 수 있다(Ju et al. 2017).

따라서 이러한 방법론은 위치를 기반으로 한 데이터의 특이 지역을 파악하고 공간 분포의 패턴을 분석하는데 알맞은 도구이며, 본 연구에서는 취약지역의 공간자기상관 특성을 분석하기 위해 공간 분석 소프트웨어인 GeoDa를 활용하여 LISA 분석을 수행하였다.

4. 군집분석

본 연구는 PM_{2.5}에 취약한 지역과 그렇지 않은 지역에 대한 물리적인 도시 특성을 분석하기 위해, K-means 군집분석 방법에 기반한 유형화 분석을 실시하였다. 군집분석을 실시할 때, 군집의 개수(K)를 정하는 것은 다분히 주관적인 편이다. 이에 선행연구를 바탕으로 계량적인 수치의 도움을 받기 위해 Elbow법을 활용하였다. 군집 사이 거리의 제곱 평균(Within Cluster Sum of Square; WCSS)을 바탕으로 결정하는 방법이다. WCSS값이 급격하게 변화하다 거의 변화가 없는 구간으로 전환되는 지점을 파악하여 최적 군집 수를 선택한다(Thorndlike, 1953; Koinariya & Makwana, 2013). 해당 지점을 기준으로 군집의 개수를 늘려도 더 이상 변화가 거의 없으므로 의미가 없기 때문이다. Figure 2는 Python 버전 3.8에서 Elbow 메트릭을 이용하여, 우리나라 도시의 특성을 고려한 최적의 군집 수를 결정하는 분석 결과를 보여준다. 이 그래프는 군집 수가 5개 이상 일 때 기울기가 완만해지는 것을 보여준다. 따라서 본

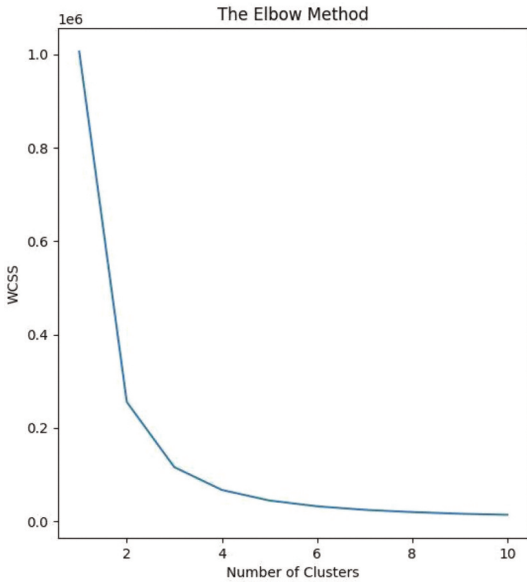


Figure 2. Elbow method result

논문에서는 특성 유형의 수를 4개로 설정하였다. 군집 분석 수행 후, 군집 내 변수의 평균값을 해석하여 카테고리 특징(유형)을 제시하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 취약성 평가 결과

1) 엔트로피 가중치 산정 결과

취약성 지수 산정을 위한 엔트로피 가중치 결과는 Table 4와 같다. 먼저 노출 특성에서는 겨울과 봄의 가중치가 각각 0.3을 초과하면서 높게 나타났고, 여름과 가을의 가중치는 낮게 나타났다. 다음으로 민감도 특성에서는 대기오염물질 배출사업장 수가 0.2483으로 가장 높게 나타났으며 선행연구와 일치하는 결과를 보였다(Lee et al. 2015). 14세 이하 인구, 기관지 및 폐의 약

Table 4. Entropy weighting results by characteristic

Characteristic	Detailed Indicators	Weight
Exposure	Winter	0.3016
	Spring	0.3298
	Summer	0.2018
	Autumn	0.1668
Sensitivity	Proportion of Disabled Population	0.0552
	Proportion of Elderly Living Alone	0.0915
	Youth Dependency Ratio	0.0339
	Elderly Dependency Ratio	0.0808
	Population Aged 14 and Under	0.1767
	Population Aged 65 and Over	0.0948
	Number of Air Pollutant-Emitting Businesses	0.2483
	Proportion of waste incineration in waste disposal methods	0.0579
	Medical Expenses for Patients with Malignant Neoplasms of the Bronchi and Lungs	0.1174
Proportion of National Basic Livelihood Security Recipients	0.0434	
Adaptation	GRDP	0.0269
	Local Financial Independence Rate	0.0696
	Environmental Budget Per Capita	0.0137
	Proportion of General Account Spent on Social Welfare	0.1829
	Proportion of Population Covered by Health Insurance	0.0092
	Education Level (High School Graduate Rate)	0.2142
	Proportion of Health and Social Welfare Businesses	0.1103
	Proportion of Population Within the Living Area Park Zone	0.3263
	Number of Hospital Beds per 1,000 Population	0.0280
	Number of Doctors per 1,000 Population	0.0188

성신생물 진료비가 그 뒤를 이어 높게 나타났고, 유소년부양비는 가장 낮았다. 마지막으로 적응능력에서는 큰 차이로 생활권 공원 내 인구 비율이 가장 높았으며, 0.3263의 가중치가 산정되었다. 교육수준, 일반회계 중 사회복지 예산 비중, 보건 및 사회복지 사업체 비율 순으로 높게 나타나고, 1인당 환경예산은 가장 낮은 가중치를 보였다. 인구 천명당 의료기관 종사 의사 수는 2번째로 낮게 나타났는데 이 또한 선행연구와 같은 결과를 보였다(Lee et al. 2015).

2) 취약성 평가 결과

전국 시·군·구를 대상으로 분석한 취약성 평가 결과는 Figure 3과 같다. 취약성 지수가 높을수록 PM_{2.5}에 취약한 지역임을 의미하며, 적응능력 지수는 높을수록 적응능력 수준이 낮은 지역인 것으로 해석한다. 먼저 전체적으로 노출 특성에서는 충청남·북도 지역을 중심으로 수도권 일부 지역과 전라북도 일부 지역에서 높은 값을 나타내는 것을 확인하였으며, 동쪽과 남쪽으로 갈수록 낮은 것으로 나타났다. 행정구역별로 살펴

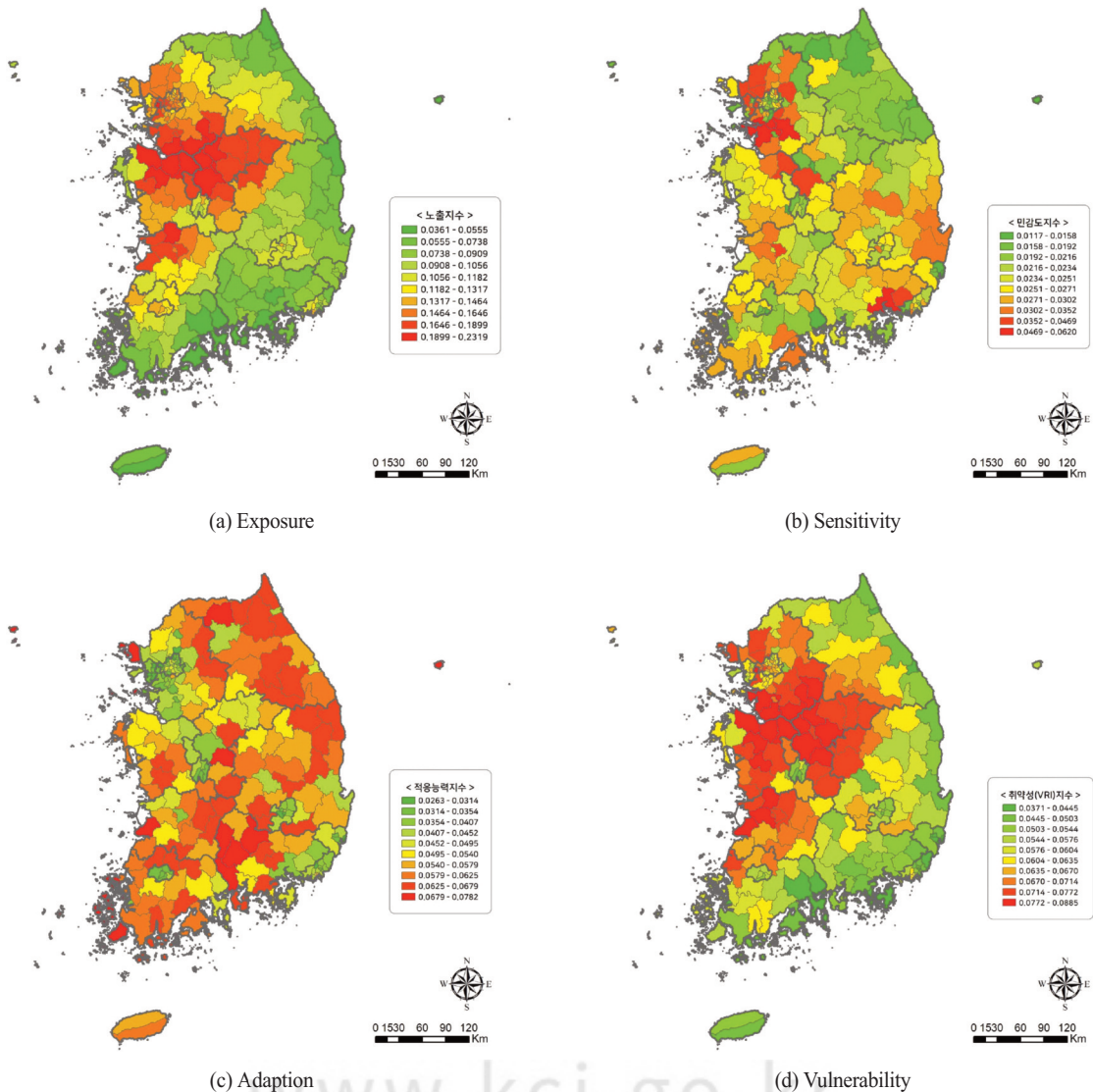


Figure 3. Result of vulnerability assessment

Table 5. Top and bottom regions by index

	Exposure			Sensitivity			Adaptation		
	Top	Bottom	Top	Bottom	Top	Bottom	Top	Bottom	
1	Bucheon-si, yconggi-do Chungcheongnam-do	Goseong-gun, Gangwon-do	Hwaseong-si, Gyeonggi-do	Gyeryong-si, Chungcheongnam-do	Ulleung-gun, Gyeongsangbuk-do	Michuhol-gu, Incheon			
2	Asan-si, Chungcheongnam-do Pyeongtaek-si, Gyeonggi-do	Goheung-gun, Jeollanam-do	Changwon-si, Gyeongsangnam-do	Gwacheon-si, Gyeonggi-do	Ongjin-gun, Incheon	Dong-gu, Ulsan			
3	Cheonan-si, Chungcheongnam-do	Goseong-gun, Gyeongsangnam-do	Yongin-si, Gyeonggi-do	Jeungpyeong-gun, Chungcheongbuk-do	Hamyang-gun, Gyeongsangnam-do	Namdong-gu, Incheon			
4	Chungcheongnam-do	Yeosu-si, Jeollanam-do	Ansan-si, Gyeonggi-do	Inje-gun, Gangwon-do	Jindo-gun, Jeollanam-do	Buk-gu, Busan			
5	Jincheon-gun, Chungcheongbuk-do	Tongyeong-si, Gyeongsangnam-do	Suwon-si, Gyeonggi-do	Jung-gu, Daegu	Sinan-gun, Jeollanam-do	Gangbuk-gu, Seoul			
6	Eumseong-gun, Chungcheongbuk-do	Gwangyang-si, Jeollanam-do	Cheongju-si, Chungcheongbuk-do	Gwangyang-si, Jeollanam-do	Hapcheon-gun, Gyeongsangnam-do	Gyeongyang-gu, Incheon			
7	Anseong-si, Gyeonggi-do	Uijin-gun, Gyeongsangbuk-do	Gimhae-si, Gyeongsangnam-do	Dong-gu, Ulsan	Hadong-gun, Gyeongsangnam-do	Eunpyeong-gu, Seoul			
8	Dangjin-si, Chungcheongnam-do	Wando-gun, Jeollanam-do	Goyang-si, Gyeonggi-do	Ulleung-gun, Gyeongsangbuk-do	Boeun-gun, Chungcheongbuk-do	Nam-gu, Daegu			
9	Jeungpyeong-gun, Chungcheongbuk-do	Seogwipo-si, Jeju	Gimpo-si, Gyeonggi-do	Buk-gu, Ulsan	Hwacheon-gun, Gangwon-do	Dalseo-gu, Daegu			
10	Icheon-si, Gyeonggi-do	Jindo-gun, Jeollanam-do	Seongnam-si, Gyeonggi-do	Hwacheon-gun, Gangwon-do	Sancheong-gun, Gyeongsangnam-do	Gangseo-gu, Seoul			
11	Cheongju-si, Chungcheongbuk-do	Sokcho-si, Gangwon-do	Namdong-gu, Incheon	Uiwang-si, Gyeonggi-do	Buan-gun, Jeollabuk-do	Uijeongbu-si, Gyeonggi-do			
12	Iksan-si, Jeollabuk-do	Ulleung-gun, Gyeongsangbuk-do	Namyangju-si, Gyeonggi-do	Jongno-gu, Seoul	Ganghwa-gun, Incheon	Jungnang-gu, Seoul			
13	Yesan-gun, Chungcheongnam-do	Suncheon-si, Jeollanam-do	Bucheon-si, Gyeonggi-do	Donghae-si, Gangwon-do	Namhae-gun, Gyeongsangnam-do	Nowon-gu, Seoul			
14	Jeonju-si, Jeollabuk-do	Haman-gun, Gyeongsangnam-do	Seo-gu, Incheon	Dong-gu, Gwangju	Pyeongchang-gun, Gangwon-do	Seo-gu, Daegu			
15	Osan-si, Gyeonggi-do	Namhae-gun, Gyeongsangnam-do	Cheonan-si, Chungcheongnam-do	Cheorwon-gun, Gangwon-do	Cheongsong-gun, Gyeongsangbuk-do	Jung-gu, Daejeon			
16	Chungju-si, Chungcheongbuk-do	Jinju-si, Gyeongsangnam-do	Paju-si, Gyeonggi-do	Geumcheon-gu, Seoul	Jeongseon-gun, Gangwon-do	Nam-gu, Ulsan			
17	Gangseo-gu, Seoul	Geoje-si, Gyeongsangnam-do	Jeonju-si, Jeollabuk-do	Jung-gu, Seoul	Bonghwa-gun, Gyeongsangbuk-do	Bupyeong-gu, Incheon			
18	Goosan-gun, Chungcheongbuk-do	Hadong-gun, Gyeongsangnam-do	Pyeongtaek-si, Gyeonggi-do	Jung-gu, Ulsan	Gangjin-gun, Jeollanam-do	Dongdaemun-gu, Seoul			
19	Gimje-si, Jeollabuk-do	Sancheong-gun, Gyeongsangnam-do	Gimje-si, Jeollabuk-do	Yanggu-gun, Gangwon-do	Goseong-gun, Gangwon-do	Gangdong-gu, Seoul			
20	Yangcheon-gu, Seoul	Uiryong-gun, Gyeongsangnam-do	Pocheon-si, Gyeonggi-do	Yongsan-gu, Seoul	Gunwi-gun, Gyeongsangbuk-do	Bucheon-si, Gyeonggi-do			

보면, 경기도 부천시, 충청남도 아산시, 경기도 평택시, 충청남도 천안시, 충청북도 진천군, 충청북도 음성군 등이 가장 높게 나타났으며 이들 지역에서는 0.2062~0.2319 수준의 노출지수가 산출되었다. 반대로 가장 낮은 지역으로는 강원도 고성군, 전라남도 고흥군, 경상남도 고성군, 전라남도 여수시, 경상남도 통영시, 전라남도 광양시 순으로 분석되었고 이들 지역은 0.0361~0.0449의 노출지수가 산출되어 PM_{2.5} 노출에 대한 위험이 가장 적은 곳으로 확인되었다(Table 5).

다음으로 민감도 특성에서는 대체로 강원도 전역이 타 지역보다 낮게 나타났고, 경기도와 영남지역 일부에서 가장 높은 지역들이 확인되었다. 행정구역별로는 경기도 화성시, 경상남도 창원시, 경기도 용인시, 경기도 안산시, 경기도 수원시, 충청북도 청주시에서 가장 높게 나타났으며, 이들 지역에서는 0.0469~0.0620 수준의 민감도지수가 산출되었다. 해당지역들은 우리나라의 대표적인 기계산업 중심의 산업도시인 것으로 확인되었고, 특히 가장 높은 민감도지수를 보이는 경기도 화성시는 선행연구와 일치하는 결과를 보였다(Lee et

al. 2015). 반대로 충청남도 계룡시, 경기도 과천시, 충청북도 증평군, 강원도 인제군, 대구광역시 중구, 전라남도 광양시 순으로 가장 낮은 지역으로 나타났으며, 이들 지역에서는 0.0117~0.0139의 낮은 민감도지수가 산출되었다(Table 5).

적응능력지수는 분석 과정에서 노출, 민감도와 취약성에 대한 영향의 방향이 같도록 역방향으로 변환했으므로 지수값이 높을수록 적응능력 수준이 좋지 않은 것으로 해석한다. 수도권 지역과 부산 및 동남권 지역들에서는 적응능력 지수가 낮게 도출되어 적응능력 수준이 우수한 것을 확인하였고, 대체적으로 강원도 지역과 경상북도 일부 지역의 적응능력 지수가 높게 나타나 적응능력 수준이 낮은 것으로 판단되었다. 행정구역별로는 인천광역시 미추홀구, 울산광역시 동구, 인천광역시 남동구, 부산광역시 북구, 서울특별시 강북구, 인천광역시 계양구, 서울특별시 은평구 순으로 적응능력 지수가 높게 나타났으며, 상위 47위까지 특별·광역시 및 경기도지역으로만 도출되어 이러한 대도시들의 적응능력 수준이 높은 것을 확인하였다. 반대로 경상북

Table 6. Top and bottom regions of vulnerability index

	Top	Bottom
1	Asan-si, Chungcheongnam-do	Dong-gu, Ulsan
2	Anseong-si, Gyeonggi-do	Sokcho-si, Gangwon-do
3	Eumseong-gun, Chungcheongbuk-do	Gwangyang-si, Jeollanam-do
4	Cheonan-si, Chungcheongnam-do	Yeosu-si, Jeollanam-do
5	Bucheon-si, Gyeonggi-do	Jung-gu, Busan
6	Jincheon-gun, Chungcheongbuk-do	Gijang-gun, Busan
7	Boeun-gun, Chungcheongbuk-do	Tongyeong-si, Gyeongsangnam-do
8	Goesan-gun, Chungcheongbuk-do	Nam-gu, Ulsan
9	Yesan-gun, Chungcheongnam-do	Suncheon-si, Jeollanam-do
10	Dangjin-si, Chungcheongnam-do	Yeonje-gu, Busan
11	Pyeongtaek-si, Gyeonggi-do	Mokpo-si, Jeollanam-do
12	Buan-gun, Jeollabuk-do	Geoje-si, Gyeongsangnam-do
13	Gimje-si, Jeollabuk-do	Donghae-si, Gangwon-do
14	Hwaseong-si, Gyeonggi-do	Jinju-si, Gyeongsangnam-do
15	Icheon-si, Gyeonggi-do	Nam-gu, Busan
16	Cheongju-si, Chungcheongbuk-do	Seo-gu, Daejeon
17	Iksan-si, Jeollabuk-do	Yangsan-si, Gyeongsangnam-do
18	Cheongyang-gun, Chungcheongnam-do	Seogwipo-si, Jeju
19	Yeosu-si, Gyeonggi-do	Goseong-gun, Gangwon-do
20	Jeonju-si, Jeollabuk-do	Geumjeong-gu, Busan

도 울릉군, 인천광역시 옹진군, 경상남도 함양군, 전라남도 진도군, 전라남도 신안군, 경상남도 합천군, 경상남도 하동군, 충청북도 보은군, 강원도 화천군 순으로 적응능력 지수가 높게 도출되었고, 규모가 작은 기초지방자치단체 지역들에서는 적응능력 수준이 낮은 것을 확인하였다(Table 5).

세 지수들의 특성을 종합하여 취약성 지수를 산정한 후 전국의 취약성 수준을 분석하였다. 행정구역별로 살펴보면, 취약성 지수가 높아 가장 취약한 지역으로는 충청남도 아산시, 경기도 안성시, 충청북도 음성군, 충청남도 천안시, 경기도 부천시, 충청북도 진천군, 충청북도 보은군 순으로 나타났다. 해당 지역들은 노출지수 특성 분석 결과에서도 가장 높은 지역들로 도출되었다. 또한 Table 6의 결과와 같이 상위 20개의 취약한 지역은 모두 경기도, 충청남·북도, 전라북도에서만 나타났는데, 이는 노출지수 분석 결과와 동일한 패턴을 나타내는 것으로 보여진다. 따라서 전체적으로 노출지수가 높은 지역일수록 취약성 지수가 높은 것으로 나타나므로 상위의 취약지역에서는 노출요인이 취약성 자체에 크게 영향을 미치는 것으로 판단된다.

가장 취약하지 않은 지역은 울산광역시 동구, 강원도 속초시, 전라남도 광양시, 전라남도 여수시, 울산광역시 중구, 부산광역시 기장군, 경상남도 통영시 순으로 나타났다(Table 6). 이 중 울산광역시 동구는 앞서 적응능력 수준이 가장 우수한 지역으로 분석되었다. 그리고 전라남도 광양시, 전라남도 여수시, 경상남도 통영시 등은 노출에 대한 위험이 적은 지역으로 나타났으므로 상대적인 노출 정도가 낮은 지역은 취약성이 낮게 결정되는 것으로 판단된다.

2. 공간분석을 통한 취약지역 도출

지역별 취약성을 분석한 후 PM_{2.5} 취약성의 공간적 연관 패턴을 파악하기 위하여 탐색적 공간분석을 수행하였다. 분석에 앞서 Moran's I 검정을 통해 지수의 공간적 자기상관을 확인한 후, LISA 분석을 실시하여 국지적 수준에서 취약성 지수에 대한 공간적 군집 패턴을 확인하였다.

공간적 자기상관을 확인할 수 있는 Moran's I 계수는 -1인 음(-)의 공간자기상관에서 +1인 양(+)의 공간자

기상관 범위를 가지는데, 1에 가까울수록 인접한 인접한 공간 단위들이 전체 대상지에 걸쳐 유사한 값을 보이는 양(+)의 공간자기상관을 보여준다고 볼 수 있다(Choi et al. 2018). 본 연구에서는 통계적으로 유의한 0.263의 값을 보이는 것으로 나타났다. 선행연구에 따르면 Moran's I 계수가 0.267인 경우에 공간자기상관성이 있다고 판단되고(Hu & Rao, 2009), Choi et al. (2018)은 0.2857의 계수 값에 대해 상당 수준 양(+)의 공간자기상관을 보이고 있다고 판단하였다. 이를 통해 전국의 PM_{2.5} 취약성이 양(+)의 공간자기상관을 가지고 있음을 확인하였다.

나아가 LISA 분석의 Local Moran's I를 사용하여 Figure 5와 같이 국지적 연관성을 파악하였다. HH유형 군집은 주로 충청남도 및 충청북도를 중심으로 관찰되고 있으며, 경상남도, 전라남도, 제주도를 제외한 지역에서 관찰되었다. LL유형 군집은 부산광역시, 대구광역시, 울산광역시, 경상남도, 그리고 경상북도 및 전라남도 일부지역을 중심으로 관찰되었다. 전자의 경우 노출과 민감도가 높게 측정되는 지역들이고, 주로 인구 밀도가 높은 도시 지역과 산업화가 진행된 지역에서 집중적으로 나타났다. 후자의 경우에는 노출이 높지 않은 지역이 주를 이룬다. 따라서 PM_{2.5}에 취약한 지역들은 농도가 높을 뿐만 아니라, 노출된 인구의 민감도가 높고 적응능력이 낮아 추가적인 관리와 대응이 필

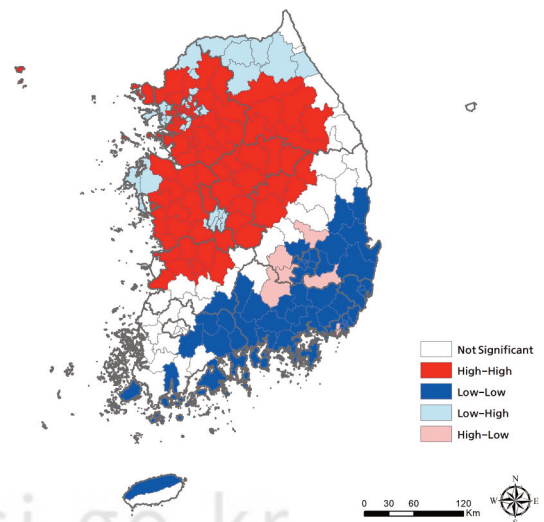


Figure 4. LISA analysis result

요함을 확인하였다. 마지막으로 서울에 인접한 경기도 및 인천광역시 일부 지역과 서울특별시 내 일부 지역에서 LH유형이 발견되었다.

3. 군집분석을 통한 유형화

군집분석 결과 내 최종군집중심값을 바탕으로 군집 간의 상대적인 비교 분석 및 특성 해석이 가능하여 해당 결과를 통해 유형화를 하였다. 또한 각 군집들 간의 차별성을 검증하기 위하여 분산분석을 실시한 결과, 컴팩트 수준과 공업지역 비율을 제외한 나머지 지표에 대해서 모두 95% 이상의 유의수준 내에서 유의미한 결과를 확인하였으므로 두 변수를 제외하여 각 군집의 특성을 파악하였다. 군집별로 구성되는 도시를 분석한 결과는 Figure 5와 Table 7과 같이 나타났다.

군집 1의 경우, 경상북도 경주시, 강원도 속초시, 전라남도 순천시, 여주시, 부산광역시 기장군 등의 57개 도시가 해당되며, 이들 군집은 가장 취약하지 않은 지역이다. 개발밀도 및 잠재력, 도로교통 특성을 나타내는 변수들에 대해서는 뚜렷하게 낮거나 높은 지표는 나타나지 않았다. 그러나 1차산업비율은 타 군집에 비해 가장 낮게 나타났으며 3차 산업비율이 높은 수준임을 확인하였다. 따라서 군집 1의 경우 ‘가장 취약하지 않고, 서비스업이 발달한 도시’로 명명하였다.

다음으로 군집 2는 경기도 성남시, 부천시, 안산시, 경상남도 김해시, 창원시, 경상북도 구미시, 포항시 등의 24개 도시가 해당되고 강원도는 포함되지 않았으며, 네 군집 중 가장 PM_{2.5}에 취약한 지역이다. 개발밀도 특성에서는 인구밀도가 타 군집대비 큰 차이로 가장

Table 7. K-means analysis result

Cluster Factor		Cluster				F	p-value
		1 (n=57)	2 (n=24)	3 (n=105)	4 (n=43)		
Vulnerability		-0.6625	0.6704	0.2832	-0.1875	18.820	0.000
Development Density and Potential	Floor Area Ratio	0.2919	0.3230	-0.8574	1.5265	320.491	0.000
	Population Density	0.0991	2.0289	-0.7193	0.4927	192.701	0.000
	Land Use Compactness Index	-0.1057	0.0249	-0.6788	1.7838	330.761	0.000
	Total Number of Buildings	-0.0339	1.7551	-0.2166	-0.4059	45.421	0.000
	Total Floor Area	0.3359	0.8329	-0.7223	0.8536	68.925	0.000
	Compact Spatial Structure	-0.1681	0.2419	0.0177	0.0445	1.045	0.374
Road Traffic Characteristics	Number of Registered Vehicles	0.1351	2.2256	-0.6509	0.1681	199.126	0.000
	Road Area Ratio	-0.0163	0.0078	-0.5593	1.3830	76.463	0.000
	Pedestrian Road Ratio	0.3601	0.7709	-0.4346	0.1536	17.183	0.000
	Job-Housing Proximity Ratio	-0.5519	-0.4185	0.9021	-1.2376	235.155	0.000
Industrial and Economic Characteristics	Proportion of Workforce in Primary Industry	-0.5746	-0.5707	0.6641	-0.5414	45.043	0.000
	Proportion of Workforce in Secondary Industry	-0.0709	0.4312	0.4081	-1.1431	39.321	0.000
	Proportion of Workforce in Tertiary Industry	0.1133	-0.3833	-0.4534	1.1709	44.417	0.000
	Local Taxes	-0.0523	1.5849	-0.5507	0.5294	63.271	0.000
	Employment Rate	-0.6412	-0.3061	0.8415	-1.0340	133.576	0.000
	Number of Employees in Manufacturing	0.0766	2.0562	-0.3901	-0.2966	85.667	0.000
	Total Number of Enterprises	0.0413	1.8729	-0.6963	0.6002	146.160	0.000
Land Use Characteristics	Green Area Ratio	0.0770	-0.4732	0.5619	-1.2101	60.534	0.000
	River Area Ratio	0.2226	-0.1063	-0.1884	0.2244	3.078	0.028
	Residential Area Ratio	-0.3968	-0.0914	-0.4336	1.6357	128.471	0.000
	Industrial Area Ratio	-0.2317	-0.0958	-0.2249	0.9099	18.033	0.000
	Commercial Area Ratio	0.0358	0.1703	0.0399	-0.2399	1.139	0.334
	Land Use Diversity Index	0.1027	0.1373	-0.7597	1.6424	264.605	0.000

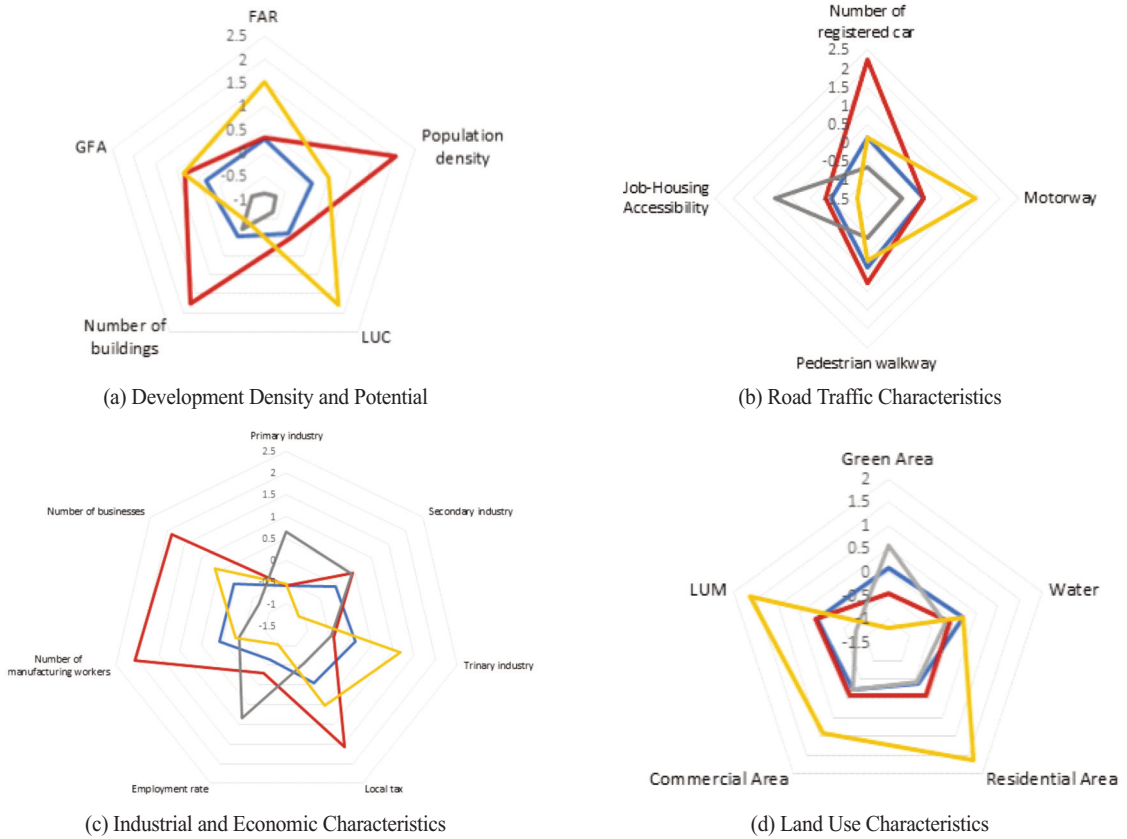


Figure 5. Radial chart of results by characteristic (Blue: Cluster 1, Orange: Cluster 2, Gray: Cluster 3, Yellow: Cluster 4)

높게 나타났으며, 건축물 수에 대해 높은 것을 확인하였다. 또한 자동차등록대수가 큰 차이로 높게 나타났지만 보행자도로비율 또한 높은 것을 확인하였다. 군집 2는 2차 산업이 발달한 것으로 확인되어 제조업 총 종사자 수 및 총 사업체 수 모두 높은 것으로 나타났고, 지방세도 네 군집 중 가장 높은 수준인 것으로 나타났다. 이러한 결과를 종합하여 군집 2의 경우, '가장 취약하고, 제조업이 발달한 대도시'로 명명하였다.

군집 3의 경우, 강원도 삼척시, 양양시, 영월시, 인제시, 경기도 가평시, 여주시, 연천시, 경상남도 산청시, 사천시 등의 105개 도시가 해당되었고, 네 군집 중 두 번째로 PM_{2.5}에 취약한 지역이다. 개발밀도 특성에서 건축물 수를 제외한 모든 지표에서 가장 낮은 수준인 것을 확인하였다. 또한 자동차등록대수, 자동차도로비율 등이 가장 낮아 자동차 이용이 적고 직주근접비가 높은 특성을 확인하였다. 3차 산업 비율이 가장 낮고 1차 산

업이 발달하였으며, 지방세나 총 사업체 수 등의 경제 지표에 대해서는 매우 낮은 수준임을 확인하였다. 개발밀도가 매우 낮으므로 녹지 비율 또한 가장 높게 나타났다. 이와 같은 특성을 종합하여 군집 3은 '두 번째로 취약한 군집으로, 개발밀도가 매우 낮고 농·어업 중심의 인구가 작은 중소도시'로 명명하였다.

마지막으로 군집 4은 서울광역시 강남구, 마포구, 서초구, 송파구, 부산광역시 해운대구, 동래구, 부산진구 등의 43개 도시가 해당되며, 해당 군집은 취약성이 비교적 낮은 것으로 나타났다. 그러나 개발밀도를 나타내는 용적률, 토지이용압축도, 연면적 등이 가장 높게 나타났고, 도로비율, 주거 및 상업지역 비율 등은 높지만 녹지 면적은 매우 작은 전형적인 도시개발 수준이 매우 높은 대도시들이 속한다. 또한 3차 산업이 가장 발달되어 있고, 직주근접비가 낮고 지방세가 높은 특징을 가지는 것을 확인하였다. 따라서 군집 4에 대해 '취

약성이 낮으며, 특별광역시외의 중심 도시지역'으로 명명하였다.

IV. 결론

본 연구는 PM_{2.5}가 인체 및 환경에 미치는 위해성에 대응하기 위해, 취약성 분석을 기반으로 한 취약지역 도출 및 유형화를 목적으로 수행되었다. 단순한 고농도 지역 분석을 넘어, 지역의 특수성과 다양한 환경적, 사회적 요인을 고려한 다차원적 접근에 기반한 취약지역 분석이 필요하며, 이를 통해 PM_{2.5} 문제에 대한 효과적이고 실질적인 관리 방안을 제시하고자 하였다. 2019년 기준 전국 229개 시군구를 대상으로, IPCC의 개념적 틀을 바탕으로 노출, 민감도, 적응능력 지표를 선정하여 취약성 평가를 수행하였다. 다음으로 LISA 공간 분석과 군집분석을 통해 취약지역 도출 및 유형화를 실시하였다.

전국 시·군·구의 PM_{2.5} 취약성 평가 결과, 노출지수가 높은 지역들은 대체로 취약성이 큰 것으로 나타났으며, 이는 노출 요인이 취약성에 직접적인 영향을 미친다는 점을 시사한다. 반면, 노출 위험이 적고 적응능력이 우수한 지역들은 상대적으로 취약성이 낮게 평가되었다. 또한 분석 결과는 해당 지역의 인구 구성, 산업 구조, 자연환경 등 복합적인 요인이 지역의 취약성에 영향을 미쳤음을 시사한다.

공간분석 결과, PM_{2.5}에 취약한 지역은 주로 인구 밀도가 높은 도시 지역과 산업화가 진행된 지역에서 집중적으로 나타났다. 이러한 지역들은 PM_{2.5}의 농도가 높을 뿐만 아니라, 노출된 인구의 민감도가 높고 적응능력이 낮아 추가적인 관리와 대응이 필요함을 확인하였다. 또한 군집분석 결과, 57개 도시가 포함된 군집 1은 서비스업이 발달하고 PM_{2.5}에 가장 덜 취약한 지역으로 나타났으며, 군집 2는 인구밀도가 높고 제조업이 발달하여 PM_{2.5}에 가장 취약한 지역으로 분석되었다. 군집 3은 개발밀도가 낮고 농·어업 중심의 중소도시로 PM_{2.5}에 두 번째로 취약한 반면, 군집 4는 대도시 중에서도 개발 밀도가 매우 높은 특별광역시의 중심 지역으로 취약성이 낮은 것으로 평가되었다.

본 연구 결과를 통해 다음과 같은 시사점을 제시할

수 있다. 첫째, 취약성 평가를 통해 밝혀진 지역적 특성은 단순히 PM_{2.5} 농도 관리뿐만 아니라, 노출된 인구의 민감도와 지역의 적응능력 향상에 초점을 맞춘 맞춤형 정책 수립이 필요함을 시사한다. 이는 고농도 지역에서의 모니터링 강화와 더불어, 사회적 취약계층을 위한 건강 보호 대책 및 지역 환경 개선을 위한 투자 확대가 필요함을 강조한다. 둘째, 공간분석을 통해 도출된 취약지역은 인구 밀도가 높고 산업화된 지역에서 집중된다는 점에서, 이러한 지역들을 대상으로 하는 보다 세밀한 규제와 노출 관리가 필요하다. 특히, 산업체의 배출 관리, 교통량 조절, 녹지 공간 확대 등을 통해 노출을 유발할 수 있는 오염원들을 줄일 수 있는 방안이 요구된다. 셋째, 군집분석을 통해 식별된 취약지역의 유형화 결과는 취약 지역들은 각기 다른 취약성 요인을 가지며, 각 유형별 특성에 맞춘 차별화된 대응 전략이 필요함을 시사한다. 예를 들어, 대도시의 경우 대규모 교통 및 산업 활동에 따른 대기오염 문제가 두드러지므로, 대중교통 인프라 개선 및 친환경 산업 전환을 유도해야 할 것이다. 반면, 개발 밀도가 높고 제조업이 발달한 도시에서는 산업과 유동 인구가 결합된 오염 문제가 더 중요할 수 있으며, 이들 지역에 적합한 보호 대책이 마련되어야 한다. 넷째, 향후 환경영향평가를 실시할 때, 본 연구에서 사용한 방법을 기반으로 해당 지역의 취약성을 평가하는 것이 중요하다. 특히, PM_{2.5}와 같은 대기오염 물질이 보건학적으로 미치는 영향을 고려하여 취약 지역으로 분류된 경우, 기존의 환경영향평가 항목인 대기질 조사, 환경 보호 대책, 사후 모니터링 등에 대해 더욱 강화된 기준을 적용해야 한다. 이를 통해 취약 지역에 거주하는 주민들의 건강을 보호하고, 환경 보건의 형평성을 제고할 수 있을 것이다.

이러한 시사점은 궁극적으로 PM_{2.5} 문제 해결을 위한 종합적이고 다차원적인 접근이 필요함을 강조하며, 지역별 특성과 사회적 맥락을 고려한 정책적 대응이 효과적인 미세먼지 관리의 핵심임을 보여준다. 본 연구는 다차원적 접근을 통해 보다 정교한 취약성 평가와 유형화를 시도하였으나, 다음과 같은 한계점이 존재한다. 첫째, 데이터의 시계열적 변화와 같은 시간적 요소를 충분히 고려하지 못하였다. 둘째, 더 다양한 지표를 통해 환경적, 사회적, 경제적, 그리고 공간적 요인

을 더 풍부하게 고려할 필요가 있다. 특히 연구 설계를 위한 가정과 같이, PM_{2.5}의 다양한 성분에 따른 건강 위험성은 충분히 고려하지 못한 한계가 있다. PM_{2.5}는 다양한 화학적 성분으로 구성되어 있으며, 그 성분에 따라 독성 및 인체에 미치는 영향이 상이할 수 있다. 예를 들어, 동일 농도의 PM_{2.5}에 노출되더라도 독성이 높은 성분에 소수의 인구가 노출되는 경우와 독성이 낮은 성분에 다수의 인구가 노출되는 경우, 건강에 미치는 전체 위험성이 다를 수 있다. 따라서 향후 연구에서는 PM_{2.5}의 성분 분석 및 성분에 따른 건강 위험성을 반영한 평가가 필요할 것으로 판단된다. 셋째, 데이터 확보의 한계로 인해 부득이하게 2019년 전후의 데이터를 활용하였으므로, 향후 최신성을 반영한 연구 결과를 제시할 필요가 있다. 이러한 한계점은 향후 연구에서 보완되어야 할 필요가 있다.

사사

이 과제는 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었음.

References

- Baeck SH, Choi SJ, Hong SJ, Kim DP. 2011. A study on comparison of normalization and weighting method for constructing index about flood. *Journal of Wetlands Research*, 13(3): 411-426. [Korean Literature]
- Choi YS, Kim JW, Lim U. 2018. An analysis on the spatial patterns of heat wave vulnerable areas and adaptive capacity vulnerable areas in Seoul. *Journal of Korea Planning Association*, 53(7): 87-107. [Korean Literature]
- Eum JI, Kim HK. 2020. The impacts of industrial characteristics of cities on fine dust levels. *Journal of Environmental Science International*, 29(5): 445-455. [Korean Literature]
- Ha SJ, Nam KC, Min SH, Jun SJ, Park JS. 2014. A study on the examination and application of the regional resilience for sustainable development. Korea Research Institute for Human Settlements. [Korean Literature]
- Harrison RM, Laxen D, Moorcroft S, Laxen K. 2012. Processes affecting concentrations of fine particulate matter (PM_{2.5}) in the UK atmosphere. *Atmospheric Environment*, 46: 115-124.
- Hu Z, Rao KR. 2009. Particulate air pollution and chronic ischemic heart disease in the eastern United States: A county level ecological study using satellite aerosol data. *Environmental Health*, 8(1): 1-10.
- IPCC. 2001. *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Third Assessment Report.* McCarthy et al. (Eds). Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Jang AS. 2014. Impact of particulate matter on health. *Journal of the Korean Medical Association*, 57(9): 763-768. [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 JC, Lee SH. 2018. Spatial distribution of particulate matters in comparison with land-use and traffic volume in Seoul, Republic of Korea. *Journal of Cadastre & Land InformatiX*, 48(1): 123-138. [Korean Literature]
- Ju SH, No JH, Kim CS, Heo J. 2017. Local spatial autocorrelation analysis of 3 disease prevalence: A case study of Korea. *Journal of Health Informatics and Statistics*, 42(4): 301-308. [Korean Literature]
- Jung JH, Kwon OY. 2015. Statistical model analysis of urban spatial structures and greenhouse gas (GHG) – air pollution (AP) integrated emissions in Seoul. *Journal of Environmental Science International*, 24(3): 303-316. [Korean Literature]

- Jun SM, Park HJ, Yeom JW, Kim JH, Jung JC. 2020. Analysis of livability in coastal areas. *Journal of Environmental Policy and Administration*, 28(2): 21-48. [Korean Literature]
- Kim DH, Lim U. 2010. An empirical analysis of spatial concentration of producer services in Seoul. *Journal of Korea Planning Association*, 45(5): 217-227. [Korean Literature]
- Kim HJ, Jun MJ. 2014. Analysis on relationship between urban development characteristics and air pollution level – A case of Seoul Metropolitan Region. *Journal of Korea Planning Association*, 49(7): 151-167. [Korean Literature]
- Kim KW, Park BC, Heo JB, Kang JY, Lee IJ. 2020. Assessment of heat wave vulnerability in Busan using the IPCC climate change vulnerability assessment framework. *The Korea Spatial Planning Review*; 23-38. [Korean Literature]
- Kodinariya TM, Makwana PR. 2013. Review on determining number of cluster in K-means clustering. *International Journal of Advance Research in Computer Science and Management Studies*, 1(6): 90-95.
- Lee SH, Kang JE, Bae HJ, Yoon DK. 2015. Vulnerability assessment of the air pollution using entropy weights: Focused on ozone. *Journal of the Korean Association of Regional Geographers*, 21(4): 751-763. [Korean Literature]
- Lee YS, Sohn DW. 2015. An analysis of the relationships between the characteristics of urban physical environment and air pollution in Seoul. *Journal of the Urban Design Institute of Korea*, 16(3): 5-19. [Korean Literature]
- Moss RH, Brenkert EL, Malone AL. 2001. Vulnerability to climate change: A quantitative approach. Prepared for the US Department of Energy.
- Nam KP, Kim CH. 2013. Study on Sensitivity of different Standardization Methods to Climate Change Vulnerability Index. *Journal of Environmental Impact Assessment*, 22(6): 677-693. [Korean Literature]
- Oh HS, Lee SH, Choi DW, Kwak KH. 2020. Comparison of the vertical PM_{2.5} distributions according to atmosphere stability using a drone during open burning events. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 36(1): 108-118. [Korean Literature]
- Ristovski ZD, Miljevic B, Surawski NC, Morawska L, Fong KM, Goh F, Yang IA. 2012. Respiratory health effects of diesel particulate matter. *Respirology*, 17(2): 201-212.
- Seok Y, Ji E, Lee J. 2024. How to manage urban disturbances: Focused on social-ecological vulnerability to fine dust pollution. *Environmental Impact Assessment Review*, 104; 107317.
- Sin 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 the Korea Society of Environmental Restoration Technology*, 24(1): 53-68. [Korean Literature]
- Thorndike RL. 1953. Who belongs in the family? *Psychometrika*, 18(4): 267-276.
- Yeom JW, Kang SW, Jung PS, Jung JC. 2020. Spatial scope of the regional hazard mitigation plan. *Journal of Korean Society Hazard Mitigation*, 20(1): 61-70. [Korean Literature]
- Yoo HJ, Kim JK, Shin JW, Kim YJ, Min SE, Jegal DS, Bang KI, Lee SM. 2017. Health vulnerability assessment for PM₁₀ due to climate change in Incheon. *Journal of Environmental Health Sciences*, 43(3): 240-246. [Korean Literature]