

미세먼지 배출원과 취약계층 분포 추정을 통한 미세먼지 저감 녹지 입지 선정 연구*

- 서울시 성동구를 대상으로 -

신예은¹⁾ · 박진실²⁾ · 김수연¹⁾ · 이상우³⁾ · 안경진³⁾

¹⁾ 건국대학교 대학원 산림조경학과 학생 · ²⁾ 건국대학교 산림조경학과 학생 · ³⁾ 건국대학교 산림조경학과 교수

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 -

Shin, Ye-Eun¹⁾ · Park, Jin-Sil²⁾ · Kim, Su-Yeon¹⁾ · Lee, Sang-Woo³⁾ and An, Kyung-Jin³⁾

¹⁾ Dept. of Forestry and Landscape Architecture, Graduate School of Konkuk University, Student,

²⁾ Dept. of Forestry and Landscape Architecture, Konkuk University, Student,

³⁾ Dept. of Forestry and Landscape Architecture, Konkuk University, Professor.

ABSTRACT

The study aims to propose a locating method of green space for reducing Particulate Matter (PM) in ambient air in conjunction with its source traces and vulnerable groups. In order to carry out the aims and purposes, a literature review was conducted to derive indicators of vulnerable area to PM. Based on the developed indicators, the vulnerable areas and green spaces creation strategies for each cluster were developed for the case of Seongdong-gu, Seoul. As a result, six indicators for vulnerability analysis were came out including the vulnerable groups (children's facilities, old people's facilities), emission sources (air pollutant emission workplaces, roads), and environmental indicators (particulate matter concentration, NDVI). According to the six selected indicators, the target area was divided into 39 hexagons and analyzed to result the most vulnerable areas to particulate matter. As a result of comprehensive vulnerability analysis, the Seongsu-dong area was found to be the most vulnerable to partic-

* 본 연구는 산림청(한국임업진흥원) 산림과학기술 연구개발사업(2019153B10-2021-0101)의 지원에 의하여 이루어진 것입니다.

First author : Shin, Ye-Eun, Dept. of Forestry and Landscape Architecture, Graduate School of Konkuk University, Student
Tel : +82-2-450-0444 , E-mail : julie9276@konkuk.ac.kr

Corresponding author : An, Kyung-Jin, Dept. of Forestry and Landscape Architecture, Konkuk University, Professor
Tel : +82-2-450-0444 , E-mail : dorian@konkuk.ac.kr

Received : 12 November, 2020. **Revised** : 14 January, 2021. **Accepted** : 10 January, 2021.

ulate matter, and 5 clusters were derived through k-means cluster analysis. Cluster 1 was analyzed as areas that most vulnerable to particulate matter as a result of the comprehensive analysis, therefore urgent need to create green spaces to reduce particulate matter. Cluster 2 was areas that mostly belonged to the Han River. Cluster 3 corresponds to the largest number of hexagons, and since many vulnerable groups are distributed, it was analyzed as a cluster that required the creation of a green spaces to reduce particulate matter, focusing on facilities for vulnerable groups. Three hexagons are included in cluster 4, and the cluster has many roads and lacks vegetation in common. Cluster 5 has a lot of green spaces and is generally distributed with fewer vulnerable groups and emission sources; however, it has a high level of particulate matter concentration. In a situation where various green spaces creation projects for reducing particulate are being implemented, it is necessary to consider the vulnerable groups and emission sources and to present green space creation strategies for each space characteristic in order to increase the effectiveness of such projects. Therefore, this study is regarded as meaningful in suggesting a method for selecting a green area for reducing PM.

Key Words : *Particulate Matter, Vulnerability, Urban Open Space, Green Infrastructure, Air Pollution*

I. 서 론

도시화 및 산업화는 대기오염을 야기하였으며 특히 미세먼지(PM₁₀) 농도는 2006년부터 증가하여 2013년 이후부터는 고농도 미세먼지 발생 빈도가 급격히 증가하였다(MOE, 2016). OECD에서는 한국의 대기오염은 심각한 수준으로 대기질 개선이 이루어지지 않을 시 2060년 조기 사망률의 증가와 경제적 피해가 큰 나라라고 예상하였다(<https://www.oecd.org>). 미세먼지는 쉽게 호흡기에 들어가 심혈관 질환, 천식, 폐 질환을 발병시키는 것으로 알려져 있다(Choi *et al.*, 2020). 미세먼지가 인체에 유해한 이유는 미세먼지의 성분 때문으로, 미세먼지를 구성하는 탄소, 유기탄화수소, 질산염, 황산염, 유해금속 성분 등의 성분이 인체에 침투하여 질병을 야기하며, 이러한 성분 대부분은 화석연료를 사용하는 제조업이나 자동차에서 발생하는 입자로 밝혀졌다(Jung, 2018a).

미세먼지의 인체위해성이 대두되면서 이에 대한 대응책을 마련하기 위한 다양한 정책과 연

구가 수행되고 있다(Song, 2013; Song, 2016; Kim, 2017; Lee, 2019; Lee *et al.*, 2019). 특히 어린이, 노인, 호흡기질환자 등 특정 계층은 이러한 미세먼지의 건강 유해성에 더욱 취약하므로 특별한 주의가 필요하다는 것이 여러 연구를 통해 밝혀졌다(Bae, 2014; Jung, 2018a; Lee, 2018; Hwang, 2019). 이에 따라 미세먼지 취약 계층에 대한 다양한 연구가 수행되고 있으며, Lee(2018)의 연구에서는 미세먼지 노출민감대상군의 호흡기영향 평가에 관한 연구를 통해 61세 이상 노인과 10세 미만 어린이가 미세먼지에 가장 취약한 것을 확인하였다. 또한 서울시 기준, 연평균 초미세먼지의 농도가 10 $\mu\text{m}/\text{m}^3$ 증가할 시 고령자의 사망 위험률은 13.9%로 증가할 것으로 전망되며(Hwang *et al.*, 2019), 15세 미만 연령의 경우 초미세먼지농도와 천식 입원환자의 상관관계 연구를 통해 영·유아 및 어린이의 취약성 또한 입증되었다(Bae *et al.*, 2104). 이와 같이 미세먼지는 취약계층의 건강에 직접적으로 영향을 미치는 것이 증명되었으며, 따라서 미세먼지 관련 대책 마련 시 취약계층의 건

강과 환경복지를 위한 우선적인 고려가 필요하다. 이에 정부는 미세먼지 저감 및 관리에 관한 특별법 (2020)에 미세먼지 노출에 특히 민감한 반응을 일으키는 미세먼지 취약계층을 어린이·영유아·노인·임산부·호흡기질환자·심장질환자로 정의하고 취약계층의 건강을 보호하기 위해 야외활동 제한과 미세먼지 교육 등과 같은 보호 대책 수립을 요구하고 있으며, 미세먼지의 농도가 높은 지역 중 취약계층이 이용하는 시설이 있을 경우 미세먼지 집중 관리지역으로 지정할 수 있도록 하였다.

미세먼지 저감을 위해서는 미세먼지 배출원에 대한 고려는 필수적이며, 정부의 미세먼지 저감 대책은 미세먼지 취약계층에 대한 특별한 보호와 함께 배출원을 관리의 필요성을 중점으로 수립되어 왔다(Lee, 2003; Kim *et al.*, 2012; Bae, 2014; Kim, 2016; Kwon *et al.*, 2017; Kim *et al.*, 2018; Jung, 2018; Lee, 2018; Hawng, 2019; Jung, 2020). 미세먼지는 주로 석탄·석유와 같은 화석 연료, 공장 및 자동차의 배출가스 등에서 발생하며 (NIFSO, 2019), 특히 미세먼지와 초미세먼지의 배출특성에 관한 서울연구원(2014)의 연구에 따르면 미세먼지의 총배출량은 비산먼지가 38.9%, 도로이동오염원이 28.8%, 비도로 이동오염원이 19.9%로, 대부분의 미세먼지는 제조업 및 가공업과 도로에서 배출되는 것으로 나타났다. 따라서 고가도로, 산업단지, 공장 등 여러 미세먼지 배출원의 영향권에 거주하고 있는 취약계층의 건강을 위한 대책을 마련해야 한다.

이처럼 미세먼지의 위험성이 여러 연구에 의해 증명됨에 따라, 미세먼지 저감과 대기질 개선을 위한 정책과 사업이 증가하고 있다. 그러나 기존 연구와 정책은 위기관리 매뉴얼, 피해 감축 계획 등의 정책과 농도 측정, 발생원 분산 등에 초점을 맞추고 있어 이미 발생된 미세먼지를 저감시키는 데에 한계가 있으며, 이에 발생된 미세먼지를 저감시키기 위한 방안 중 하나로 도시 녹지에 대한 기대감이 증가하고 있다(Jo

and Ahn., 2001; Hu, 2017; Choi *et al.*, 2018; Hwang *et al.*, 2018; Hong *et al.*, 2018; Choi *et al.*, 2019; Yoo *et al.*, 2019). 가로수, 공원, 도시 숲과 같은 도시 녹지는 미세먼지의 확산을 차단하거나 공기의 흐름을 유도하고 앞에 미세먼지를 흡착시키는 등 다양한 메커니즘을 통해 미세먼지 농도를 저감시키며, 바람길을 형성하여 도심으로 깨끗한 공기를 유도하고 확산시키는 네트워크 구조를 가지고 있다(NIFS, 2019). 또한 미세먼지 배출원과 도심지 사이에 조성된 녹지는 배출된 미세먼지를 저감시키는 것에 효과적인 방안임이 여러 연구들을 통해 밝혀졌다(Hu, 2017; Choi *et al.*, 2018; Hwang *et al.*, 2018; Hong *et al.*, 2018; Choi *et al.*, 2019; Yoo *et al.*, 2019). 이에 따라 미세먼지를 저감하는 녹지의 메커니즘에 관한 다양한 선행 연구가 이루어졌으며, 이를 통해 녹지는 미세먼지를 포함한 다양한 대기오염물질을 저감하는 효과가 있으며, 이러한 효과는 녹지를 구성하는 수종, 수목의 밀도, 면적, 녹지 구조 등에 의해 차이가 있음이 밝혀졌다(Lee 2003; Kim *et al.*, 2014; Hong *et al.*, 2018; Hawng *et al.*, 2018; Choi *et al.*, 2018; Park, 2019; Yoo *et al.*, 2019). 미세먼지 배출원과 관련된 사례 연구로 국립산림과학원(2019)은 시화공단 주변 완충녹지의 미세먼지 저감효과를 파악하였는데, 연구결과 산업단지에서 발생한 미세먼지는 바람에 의해 완충녹지, 주거지를 거쳐 이동하며 농도가 저감된다는 것이 확인되었다. 또한 Yang and Kim(2007)의 연구에 따르면 녹지와 공장지대의 미세먼지의 농도는 250~1000배 차이를 나타내 사업장 주변 녹지의 효과를 입증되었으며, Hwang *et al.*(2018)은 미세먼지 평균배출량이 높은 송파구의 양재·송파대로 주변 완충녹지의 미세먼지농도를 측정하였는데, 보도, 녹지, 주거지 순으로 농도의 수치가 낮게 나왔고 이 또한 완충녹지가 미세먼지 농도저감에 영향을 미친 것으로 판단되었다.

한편 녹지의 미세먼지 저감효과에 관한 연구

중 몇몇 연구에서는 녹지의 피복정도, 면적, 지형 및 물리적 입지 특성 등 공간 특성과 관련하여 녹지의 미세먼지 저감에 미치는 영향 요소를 도출하고자 했다. Choi *et al.*(2018)는 토지피복 비율에 따른 미세먼지농도 비교 연구를 통해 산림 비율이 16.5%인 수목 중간값 그룹보다 산림비율이 34.6%인 산림 우세 그룹이 농도 저감에 더 효과적임을 밝혔다. 그러나 녹지는 단순히 토지피복 비율만이 아닌 밀도, 풍향, 주변환경 등 다른 요인에도 영향을 받는 것으로 밝혀졌다(Hong *et al.*, 2018; Kim *et al.*, 2015). 수목의 밀도가 너무 높을 시 난기류를 유발해 미세먼지의 농도를 더욱 증가시킬 수 있어 녹지가 미세먼지 여과기능을 하기 위해서는 수목 밀도를 적정수준으로 유지해야 할 필요가 있다(NIFOS, 2019). 미세먼지는 대기에 의해 이동하기 때문에 풍속 및 풍향의 영향을 많이 받으며(NIFOS, 2019; Choi *et al.*, 2018) 가로수 등 이미 녹지가 조성된 곳에 녹지를 조성할 경우, 미세먼지가 정체해 농도를 더욱 높일 위험이 따른다는 것이 밝혀졌다(Hong *et al.*, 2018). 이와 같이 미세먼지 저감을 위한 녹지의 입지 선정에는 도시 전체 차원의 세부적인 공간 정보를 요구한다(Jung, 2018a). 이에 따라 미세먼지의 농도 측정기 입지선정, 대기오염물질 우선순위 측정지역 선정, 녹지의 토지피복율 등의 연구가 지리정보시스템(GIS)과 접목시켜 진행되어지고 있다(Kim *et al.*, 2012; Kim, 2016; Kwon *et al.*, 2017; Kim *et al.*, 2018). GIS는 객관적인 자료에 근거할 수 있으며, 다른 변수들을 쉽게 결합하고 비교가 가능한 장점이 있다(Kim *et al.*, 2018). 그러나 대부분의 연구는 대단위로, Kwon *et al.*(2017)은 유해대기오염물질을 모니터링 하기 위해 수도권을 격자 7km×7km 단위, 총 225개로 나누어 분포지도를 작성하였고, Kim *et al.*(2018)은 서울시를 격자 2km×2km 단위, 총 270개로 나누어 분포지도를 작성하였다. 두 선행 연구는 GIS를 이용해 대도시에서의 측정을 쉽고 경제적으로 진행하였다는 것에 의의가 있지만,

격자의 단위가 너무 커, 해상도가 낮으며 여러 가지 중치를 고려하지 못했다는 한계가 있다. 한편, 상세한 공간 분석을 위해 반경 500m의 핵사곤 형태로 분석한 연구도 있는데, Kim(2016)은 GIS를 활용한 대기오염측정망 최적위치 선정에 관한 연구에서 도시민들의 생활권 범위를 고려하기 위해 핵사곤 분석을 사용했으며 Jung(2018a)은 영등포구에 신규 미세먼지 측정소의 위치를 선정하기 위해 세밀한 시·공간적 분석연구의 필요성을 인지하고 핵사곤 분석을 실시하였다. 해당연구들은 도로와 같은 도시요소를 대입해 공간데이터와 미세먼지의 특성, 그 외 다양한 변수들을 세밀하게 분석하고, 보다 체계적인 측정기 위치선정 방법을 제시하여 연구 신뢰성을 높였으며, 대단위 분석의 한계를 보완하였다.

선행연구를 고찰한 결과, 환경·의학·공학 등 여러 분야에서 미세먼지의 인체위해성과 함께 미세먼지 취약계층 고려 필요성, 녹지의 미세먼지 저감 효과 등이 증명되었지만, 구체적으로 미세먼지 저감 녹지의 입지를 선정하기 위한 연구는 미미한 현황이다. 그러나 미세먼지 저감에 대한 녹지의 효과가 입증됨에 따라 녹지의 중요성이 대두되는 가운데, 효과적인 미세먼지 저감 녹지를 조성하기 위해서는 공간의 특성에 따른 녹지 조성 전략이 동반되어야 한다. 이에 본 연구는 미세먼지 취약계층과 발생원 등 관련 지표들을 고려하여, 미세먼지를 저감시키는 녹지가 우선적으로 조성되어야 하는 장소 선정 방법 제안을 목표로 하였다. 향후 본 연구를 통해 제시된 방법을 활용하여 미세먼지 저감 녹지를 조성하거나 기존 녹지를 개선하는 등 미세먼지 저감 녹지 계획 및 사업 시행 시 적용할 수 있는 전략 제시를 최종 목적으로 한다.

II. 재료 및 방법

1. 지표 선정

본 연구는 미세먼지 배출원과 취약계층 근접

Table 1. Analysis Indicators and Data Sources

Category	Computed Indicator	Data	Source	Data collection period
vulnerable groups	Facilities for children	Daycare center spatial data in Seoul and school (kindergarden, elementary, middle, high school) spatial data in Seoul	Seoul Metropolitan Government Big Data Campus (https://bigdata.seoul.go.kr/main.do)	2017
	Facilities for old people	Senior welfare facility spatial data in Seoul	Seoul Metropolitan Government Big Data Campus (https://bigdata.seoul.go.kr/main.do)	2018
emission source	Air pollutant emission workplaces	List of air pollutants emission workplace	Ministry of the Interior and Safety (https://www.data.go.kr/data/15044957/fileData.do)	2020
	Roads	10m unit road spatial data in Seoul	Seoul Metropolitan Government Big Data Campus (https://bigdata.seoul.go.kr/main.do)	2016
environmental indicators	NDVI	2019.04.07 Landsat 8 data	USGS EarthExplorer (EE) (https://earthexplorer.usgs.gov/)	2019
	PM concentration	Monthly averaged air pollution information in Seoul	Seoul Metropolitan Government (https://data.seoul.go.kr)	2019.3-5

도를 이용하여 미세먼지 저감 녹지의 입지를 선정하고자 하였다. 이를 위해 선행연구 고찰을 통해 분석 지표를 선정하였으며, 최종적으로 취약계층(어린이, 노인 이용시설), 발생원(대기오염물질 배출 사업장, 도로), 환경 지표(미세먼지 농도, NDVI)의 3가지 카테고리에 대해 각 2가지 지표를 선정하여 총 6가지 분석 지표를 선정하였다 (Table 1).

취약계층 지표는 선행연구를 통해 미세먼지에 특히 취약하다고 입증된 어린이와 노인이 주로 이용하는 이용시설을 지표로 선정하였다. 대상지 내의 취약계층 이용시설의 분포를 파악하였으며, 해당 지표의 평가를 위하여 어린이 이용시설 지표는 서울시 빅데이터 캠퍼스(<https://bigdata.seoul.go.kr/main.do>)에서 제공하는 서울시 어린이집 공간 데이터, 서울시 학교(유치원, 초중고교) 공간 데이터 중 유치원과 초등학교 데이터를 종합하였다. 노인 이용시설 지표는 서울시에서 제공하고 있는 노인복지시설 공간데이터를 활용하였다. 발생원 중 대기오염물질 발생원은 행정안전부에서 제공하는 대기오염물질

배출시설 설치사업장 데이터(<https://www.data.go.kr/data/15044957/fileData.do>) 중 폐업, 위치 정보 누락 등의 데이터를 제외한 후 활용하였다. 도로 지표의 경우 성동구 전체의 교통량 지표로 도로의 구조, 시설 기준에 관한 규칙에 의해 교통량이 반영되는 도로의 폭을 기준으로 하였으며, 본 연구에서는 도로의 폭이 넓을수록 교통량이 많아 미세먼지 발생량이 크다는 가정 하에 25m 이상의 대로와 광로로 범위를 제한하여 분석하였다. 도로 데이터는 서울시 빅데이터 캠퍼스에서 제공하는 서울시 10m 단위 도로구간 공간데이터를 활용하였으며 1m 간격을 점으로 변환하여 분석을 실시하였다.

환경 지표에 해당하는 정규 식생 지수(NDVI)는 성동구 내의 식생 분포를 측정하기 위하여 사용되었다. Wu et al. (2017)의 연구에 따르면 NDVI 값과 미세먼지 농도는 음의 상관관계를 나타내며, 미세먼지, 열섬효과 등 다양한 환경 문제를 저감하는 녹지의 효과 규명을 주제로 하는 다양한 연구에서 NDVI를 활용하고 있음을 확인할 수 있었다(Kim et al., 2015; Lee and

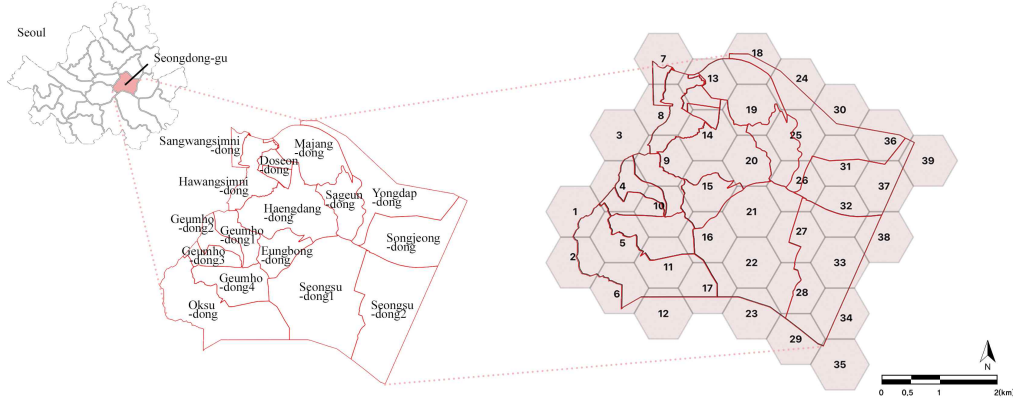


Figure 1. Location of the Research Site and Numbers of Hexagon

Jang, 2017; Jeon et al., 2018; Ko and Cho., 2020). 이에 따라 본 연구에서도 토지 피복상 녹지의 면적이 아닌 hexagon 별 NDVI 평균값을 지표로 선정하였다. NDVI는 계절에 따른 식생 피복의 변화로 인하여 월별로 NDVI 값의 차이가 존재한다(Jin et al., 2017). 따라서 본 연구에서는 미세먼지의 농도가 높으며 NDVI에서 식생 피복에 의한 영향을 파악할 수 있는 봄철(3~5월)을 시간적 배경으로 설정하였다(Choi et al., 2018). 이에 따라 NDVI 지표는 2019년 4월 7일의 Landsat 8 데이터를 활용하였으며, 성동구 내 식생 분포를 분석하여 미세먼지 저감을 위한 녹지의 조성이 우선적으로 필요한 곳을 도출하였다. 미세먼지 농도 지표의 자료는 서울 열린데이터 광장(<https://data.seoul.go.kr>)에서 제공하는 서울시 월별 평균 대기오염도 정보 중 도시 대기 측정소와 도로변 대기 측정소의 2019년 3월에서 5월까지의 미세먼지 농도를 평균 내어 활용하였다. 미세먼지 농도 지도와 관련하여 Jung (2018b)의 연구에서는 서울시 내에 위치한 미세먼지 측정소의 데이터를 통해 미세먼지 보간 분포도를 도출하였다. 본 연구에서도 대상지와 인접한 구의 측정소 미세먼지 농도 값을 공간 데이터로 전환하였으며, IDW 보간법을 실시하여 측정되지 않은 장소의 부족한 데이터를 보완하

여 분석하였다.

2. 취약지역 분석

사례 연구 대상지로는 서울시 내 행정구역 중 공업, 상업, 녹지 등 토지이용 및 토지피복의 분포가 다양한 성동구를 공간적 범위로 설정하였다. 이후 분석 범위를 축소하여 분석 결과의 현장 적용성을 높이고자 일반적인 블록 단위인 반경 500m hexagon으로(Chun and Kim., 2010; Bae and Kim., 2013) 성동구를 구획하였으며, 총 39개의 hexagon으로 구획되었다 (Figure 1).

hexagon 별로 6개 지표 값에 대한 등급을 도출하였으며, 분석한 결과 값을 바탕으로 종합 공간 분석 통해 미세먼지 저감이 우선적으로 적용되어야 하는 공간을 도출하였다. 미세먼지 취약성 분석은 QGIS version 3.14.를 이용하였으며 격자 별로 분석 지표의 값을 도출하여 natural break로 5개 등급으로 구분, 지도로 표현하였다. 등급 평가 시 hexagon 내에 취약계층 이용시설 분포가 많을수록, 도로 및 대기오염물질 배출사업장의 분포가 많을수록, NDVI 값의 평균이 낮을수록, 미세먼지 농도가 높을수록 미세먼지에 취약한 지역으로 판단하였다. 등급은 1에서 5등급으로 나뉘며 1등급일수록 미세먼지에 취약한 것으로 설정하였다. 따라서 지표별 등급 합산

점수가 가장 낮은 hexagon이 미세먼지에 가장 취약한 지역으로 도출되었다. 이후 미세먼지 저감 녹지 설치에 있어서 빠른 의사 결정 및 조성을 위하여 취약 지역의 유형화를 진행하였으며, 유형 구분을 위해 R-studio (Version 1.1.456)를 이용하여 K-means 군집 분석을 수행하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 미세먼지 취약지역 지표 분석

미세먼지 취약 계층 분포도를 이용하여 취약 지역을 도출한 결과는 다음과 같다. 어린이 이용시설 분석 결과, 하왕십리동, 금호동 일부, 행당동 일부, 옥수동 일부가 1등급으로 성동구 내 어린이 이용시설이 가장 많이 밀집해 있는 것으로 나타났다 (Appendix 2-a). 노인복지시설 분포 분석 결과, 하왕십리동과 도선동, 행당동 일부에서 노인 복지시설이 1등급으로 많이 분포되어 있으며 (Appendix 2-b), hexagon 8번에 해당하는 행당동 일부 구역은 어린이와 노인 이용 시설 모두 높은 분포를 보여, 미세먼지 취약 계층에 대한 우선적인 대책이 필요한 것으로 보인다. 이어 홍익동, 마장동, 용답동 일부 지역이 2등급으로 어린이 이용시설의 분포가 높게 나타났으며, 마장동, 금호동, 옥수동 일부 지역에서도 2등급으로 노인 복지시설의 분포가 많은 것으로 나타났다.

미세먼지 발생원 지표에 따라 도출된 취약 지역은 다음과 같다. 대기오염물질 배출 사업장 지표의 분석 결과 성수동 지역이 1, 2등급으로 높게 도출되었는데, 이는 성수동에 위치한 공장 지대로 인하여 대부분의 대기오염물질 배출시설 설치사업장이 밀집되어 미세먼지에 취약한 것으로 확인된다 (Appendix 2-c). 이어 송정동과 용답동 지역에서도 대기오염물질 배출 사업장이 일부 분포하여 2등급으로 도출되었다. 도로 지표의 분석 결과 상왕십리동과 하왕십리동에서 도로에 의한 미세먼지 취약 정도가 1등급

로 가장 높은 것으로 나타났다(Appendix 2-d). 이는 청계천로와 왕십리로, 난계로 등 상왕십리동과 하왕십리동을 통과하는 큰 도로의 영향임을 확인할 수 있다. 이어서 홍익동, 마장동, 옥수동, 성수동 일부 지역에서도 2등급으로 큰 도로의 분포가 높게 나타났다.

환경 지표에 의한 미세먼지 취약 지역 도출 결과는 다음과 같다. NDVI의 값은 -1에서 1 사이에 위치하여 잔디, 초화류의 경우 값이 0.2 정도이며 나무가 많을수록 값이 커진다. 또한 물이 위치한 지역의 경우 점수가 낮게 도출되는데, 이러한 특성으로 인해 본 연구에서도 한강에 인접한 지역의 점수가 1등급으로 도출된 것으로 보인다 (Appendix 2-e). 한강에 인접한 지역 외에도 송정동과 성수동2가 일부 지역에서 1등급으로 식생이 부족한 것으로 나타났다. 이어 성수동 2가, 용답동 일부, 도선동 및 행당동 일부 지역에서 NDVI 지표가 2등급으로 높게 나타났다. IDW 보간법을 통하여 도출된 미세먼지 농도 지도에 따라 성수동이 1등급으로 미세먼지 농도가 제일 높은 것으로 나타났다(Appendix 2-f). 이어 성수동과 인접한 송정동, 용답동, 사근동, 응봉동, 옥수동 일부에서도 2등급으로 미세먼지 농도가 높은 경향을 보인다.

2. 미세먼지 취약지역 종합분석

6개의 지표 분석 결과를 바탕으로 성동구 내에 미세먼지에 가장 취약한 지역을 도출하기 위하여 종합 분석을 실시하였다. 6개의 지표를 종합한 점수를 바탕으로 natural break를 실시한 결과 총 12등급으로 분류되었으며, 다음과 같이 hexagon 27번, 성수동 지역에서 미세먼지에 가장 취약한 것으로 도출되었다(Figure 2). 대체로 성수동2가에서 미세먼지에 취약한 것으로 나타났는데 이는 대기오염 배출 사업장이 밀집하여 분포하고 기존 미세먼지 농도가 높으며, 식생이 부족한 지역적 특징이 크게 영향을 미친 것으로 확인된다. 이외에도 행당동 일부 지역(hexagon

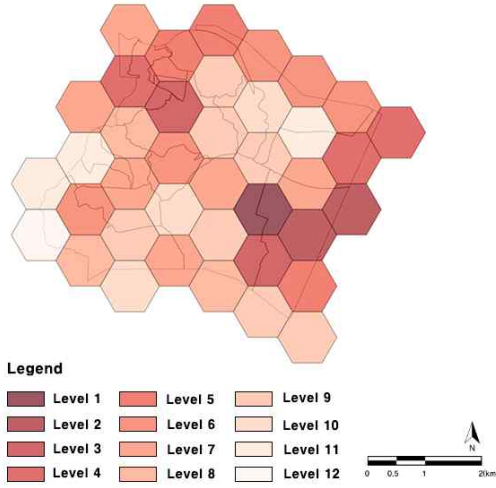


Figure 2. Analysis result of Seongdong-gu

14번)과 인근에서 성수동2가 다음으로 미세먼지 취약 정도가 높은 것으로 나타났는데, 이는 취약계층 이용시설, 도로가 많이 분포하며 기존 식생이 부족한 것이 크게 영향을 미친 것으로 보인다. 성동구 취약지역 종합분석 결과에 따라 취약지역의 유형 구분을 위해 통계 프로그램 R-studio를 이용하여 K-means 군집 분석을 수행하였다. K-means 군집분석의 경우 군집을 나누는 기준이 되는 초기값에 따라 결과가 크게 달라질 수 있기 때문에 초기값을 설정하여 실행하는 것이 결과에 대한 설명력이 높다(Kwon *et al.*, 2017). 따라서 본 연구에서는 군집 분석 이전에 R-studio에서 군집 수에 따른 집단 내 제곱합 (within-groups sum of squares) 그래프를 사용하여 적절한 초기값을 도출하였으며 군집의 개수를 5개로 설정하였다. 이후 군집 분석을 실시하여 39개의 hexagon을 5개의 군집으로 분류하였으며, 도출된 5개의 군집별 분포는 Figure 3와 같다.

군집별 특성을 알아보기 위해 취약지역 지표 등급의 소수점 넷째자리에서 반올림 해 구한 평균값은 Table 2와 같다. 군집별 특성을 살펴보면, 군집 1은 ‘종합적 취약 지역(Multiple Vulnerable Area)’으로, 군집 1에 해당하는 hexagon은 대기오

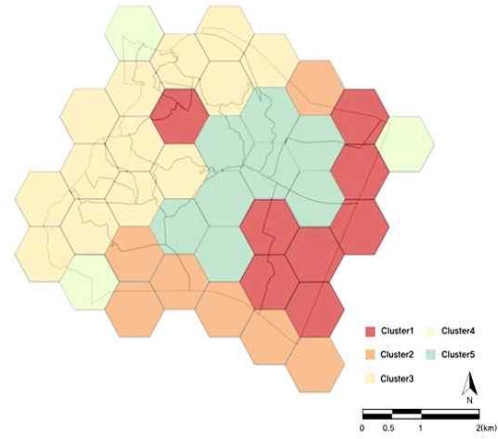


Figure 3. Result of Clustering analysis

염물질 배출 사업장 지표, NDVI 지표, 미세먼지 농도 지표의 등급이 대부분 3등급 이내로 분석되었다. 지표별 도출된 등급의 평균값을 살펴보면 어린이 이용시설이 3.125, 노인 이용시설이 3.250, 대기오염물질 배출 사업장이 2.250, 도로가 3.125, NDVI가 2.000, 미세먼지 농도가 1.750으로 모두 3점대 혹은 이내로 도출된 것을 확인할 수 있다. 군집 2는 ‘한강 인접 및 고농도 미세먼지 지역(Low Vegetation-High PM level Area)’으로, 대부분 hexagon이 한강에 해당하여 NDVI 지표 등급이 평균 1,429로 식생이 부족한 것으로 나타났으며, 미세먼지 농도의 등급 또한 평균 1.857로 높게 나타났으나, 취약계층 지표와 발생원 지표는 모두 평균 4.857로 대체로 5등급으로 도출되었다. 군집 3은 ‘취약계층 밀집 지역(High Density of Vulnerable group Area)’으로, 발생원 지표, 환경 지표는 각각 평균 4.769, 3.462로 대체로 낮은 등급에 분포하여 있으나, 취약계층 이용시설 지표의 평균이 어린이 이용시설이 1.923, 노인 이용시설이 2.769로 취약 계층이 많이 분포하는 것으로 분석되었다. 군집 4는 ‘도로 밀집 및 식생 부족 지역(High Density of Road-Low Vegetation Area)’으로, 도로 지표 등급 평균이 1.667로 도로가 많이 분포하여 있고, NDVI 지표 등급 평균이 1.333으로 식생이 부족한 특징

Table 2. Mean value of vulnerability levels by cluster

Cluster Name	Children's facilities	Old people's facilities	Air pollutant emission workplaces	Roads	NDVI	Particulate matter concentration
MV	3.125	3.250	2.250	3.125	2.000	1.750
LVHP	4.857	4.857	4.857	3.429	1.429	1.857
HV	1.923	2.769	4.769	3.462	4.154	3.462
HRLV	4.000	3.667	4.667	1.667	1.333	3.667
HP	4.125	4.750	3.750	3.875	4.125	1.375

i)MV: Multiple Vulnerable Area ii)LVHP: Low Vegetation-High PM Level Area iii)HV: High Density of Vulnerable group Area iv)HRLV: High Density of Road-Low Vegetation Area v)HP: High PM Level Area

을 가지고 있다. 군집 5는 ‘고농도 미세먼지 지역(High PM level Area)’으로, NDVI 등급과 취약 계층이 4, 5등급으로 높고, 발생원 지표 또한 대체로 3, 4 등급으로 높은 편이나, 미세먼지 농도가 높은 특징을 갖는 것으로 나타났다.

군집별 세부적인 특성을 살펴보면, ‘종합적 취약 지역(MV)’인 군집 1은 종합 분석 결과 점수가 낮아 미세먼지에 취약한 곳으로 도출된 지역이 많이 해당하며, 성동구 내에 도선동, 행당동 일부, 성수동 2가, 용답동, 송정동 외곽이 군집 1에 해당한다. 군집 1에 해당하는 hexagon은 해당 지역 내 대기오염물질 배출 사업장이 많이 분포하여 있고, 식생이 적으며 미세먼지 농도가 높은 특징을 가지고 있다. Figure 4는 군집 1 가운데 종합 점수가 14점으로 성동구 전체 지역 중에서도 미세먼지에 취약한 것으로 나타난 성수동 2가 내 성수동 공장 지대의 항공 뷰 사진이다. 자동차 정비소 및 공장 등 대기오염물질 배출 사업장이 밀집하여 있으며 녹지가 매우 부족한 것을 확인할 수 있다. 또한 해당 지역은 미세먼지 농도가 1등급으로 높으며 바로 아래 초등학교와 같은 취약 계층 이용 시설 위치하여 있어 미세먼지 저감 녹지를 새로 조성하여 우선적인 미세먼지 저감이 필요한 것으로 나타났다. 이렇듯 군집 1과 같은 ‘종합적 취약 지역’에는 대기오염물질 배출 사업장을 중심으로 추가적인 미세먼지 저

감 녹지의 조성이 필요한 것으로 판단된다. 산림청에서는 미세먼지 발생원으로부터 미세먼지 확산을 방지하기 위하여 미세먼지 발생원과 생활권의 공간적 분리를 위한 미세먼지 차단숲을 조성하는 것을 제시하고 있다. Xu and Kim (2017)의 연구에서는 공업 지역에 설치하는 녹지의 식재 구조를 제안하고 있는데, 앞으로 인한 흡착 효과가 뛰어난 교목 중심의 총면적이 넓은 녹지를 조성해야 함을 제시하고 있다. 미세먼지의 흡착량 분석 시 느티나무, 양버즘나무, 소나무 순으로 흡착량이 뛰어난 것으로 확인되었으며 (Kim *et al.*, 2018), 향후 군집 1과 같은 ‘종합적 취약 지역(MV)’에 녹지 조성 시 이와 같은 식재 구조 및 수종의 고려가 필요하다.

한강 인접 및 고농도 미세먼지 지역(LVHP)’인 군집 2는 용답동 일부 지역(hexagon 30번)을 제외하고는 hexagon 대부분의 면적이 한강에 위치하여 있으며, 30번 hexagon을 포함한 모든 hexagon이 성동구 경계지역으로 나타났다 (Figure 5). 한강이 위치한 지역 특성상 NDVI의 점수가 낮게 도출되었으며, 다른 지표의 경우 미세먼지 농도의 등급이 높게 나타났다. 취약계층 지표와 발생원 지표는 대체로 4, 5등급에 분포하고 있다.

‘취약계층 밀집 지역(HV)’인 군집 3은 가장 많은 hexagon이 해당하며, 대부분의 hexagon이 지도 상에서 성동구의 북서쪽에 위치하여 있다.



Figure 4. Representative area for MV: Lots of air pollutant emission workplaces are located near to children's facilities. (<https://map.kakao.com/>)

미세먼지 발생원과 환경 지표는 대체로 적게 분포하고 있으나, 지역 내 취약 계층이 많이 분포하고 있어 취약 계층 이용 시설을 중심으로 한 생활권의 미세먼지 저감 녹지의 조성이 필요한 것으로 판단된다(Appendix 1-a, b). Figure 6는 군집3 가운데 종합 분석 결과 군집 3 중에서 가장 미세먼지에 취약한 것으로 나타난 hexagon 13번의 도선동 일부 지역이다. hexagon 13번은 어린이 이용시설 지표가 2등급으로 높게 도출되었으며, 항공뷰 사진에서도 6개의 어린이 이용시설을 확인할 수 있다. 하지만 인근에 도선 어린이공원 외에 생활권 녹지가 없으며 건물이 밀집되어 있고, 소규모 녹지 또한 부족한 것으로 확인되었다. 따라서 이러한 '취약계층 밀집 지역' 내에는 취약계층 이용시설을 중심으로 띠녹지 등 소규모의 녹지 조성을 통하여 생활권 녹지의량을 증가시키는 것이 요구된다. 군집 4에는 3개의 hexagon이 해당하며 모두 지도 상에서 성동구 외곽에 위치하고 있다. 공통적으로 hexagon 내에 도로가 많이 위치하고 있으며 NDVI의 값이 낮아 식생이 부족한 특징을 갖는, '도로 밀집 및 식생 부족 지역(HRLV)'으로 분석되었다. Figure 7은 군집 4에 해당하는 지역 중에서도 종합 분석 결과 미세먼지에 취약한 것으로 나타난 hexagon 39번 및 인근 용담동 지역의 항공 뷰

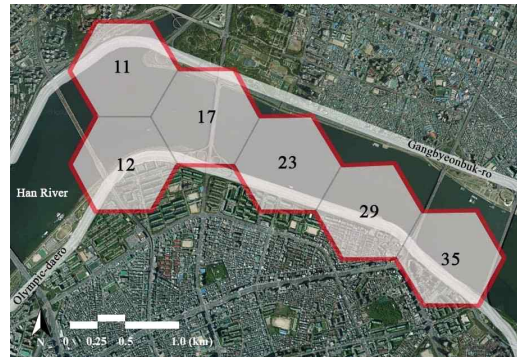


Figure 5. Representative area for LVHP: Most hexagons are located near to Han-river. (<https://map.kakao.com/>)



Figure 6. Representative area for HV: Facilities for children are densely located, and green space is insufficient. (<https://map.kakao.com/>)

사진이다. 천호대로와 동부간선도로가 인접하여 있으며, 자동차 정비소가 다수 위치하여 있다. 또한 도로와 인접하여 요양병원 및 오피스텔이 위치하여 있어 도로에서 발생하는 미세먼지를 저감하기 위한 녹지의 조성이 필요하다. 따라서 이러한 지역에는 도로를 중심으로 한 추가적인 녹지 조성을 통해 미세먼지 저감이 필요한 것으로 판단된다. 군집 4와 같이 도로와 인접한 공간에 녹지 조성의 필요성 및 녹지의 식재 구조를 제안한 Xu and Kim (2017)의 연구에서는 도로의 규모에 따른 도로 녹지 식재 구조를 제안하였는데, 도로의 폭이 증가할수록 더 넓은 폭의 완충 녹지를 필요로 하며, 도로의 방향과 풍향을 고려한 복합적인 식재가 이루어져야 함을 제시하고 있다. 또한 LH 연구에 의하면 도로변 완

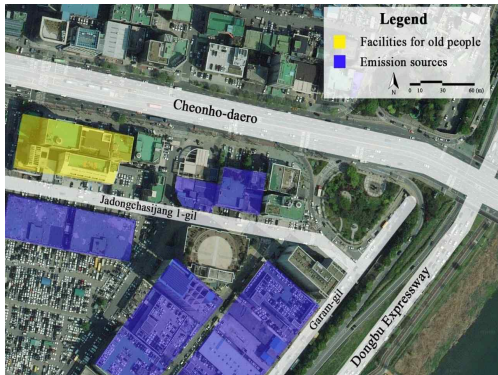


Figure 7. Representative area for HRLV: Roads and Emission sources are near to residences and facilities for old people. (<https://map.kakao.com/>)

충녹지 설치 시 미세먼지 저감을 위해서는 적절한 폭 이상의 식재가 필요하며, 20m 이상의 폭이 미세먼지 저감의 효과가 높으며 최소 10m 이상의 폭을 권장하고 있다. 또한 수직 구조의 다층 식재의 형태가 미세먼지 농도 저감 효과적 인 것으로 나타났다. 따라서 도로를 중심으로 한 녹지 조성 시 이와 같은 고려가 필요하다.

군집 5는 ‘고농도 미세먼지 지역(HP)’으로, 지도 상에서 성수동 1가, 행당동 일부, 사근동과 송정동 일부 지역에 위치하여 있다. 군집 5는 기존 녹지가 많으며 취약 계층이 4, 5등급으로 적게 분포하여 있고, 발생원 지표 또한 대체로 4, 5등급으로 적게 분포하여 있으나 미세먼지 농도가 높은 특징을 가지고 있다. Figure 8은 군집 5에 해당하는 지역 가운데 종합 분석 결과 미세먼지에 취약한 것으로 나타난 hexagon 32번의 송정동과 성수동 2가 일부 지역이다. 해당 지역은 군집 5 내의 다른 지역들과 마찬가지로 중랑천을 따라 띠녹지가 형성되어 있으며, 아파트 단지 내 조경 지역 등 기존 녹지가 비교적 많이 분포하고 있음을 확인 할 수 있다. 그러나 해당 지역은 미세먼지 농도가 높은 지역으로, 기존에 조성된 녹지의 조사를 통하여 기존 녹지가 미세먼지 저감에 적합한지, 추가적인 개선이 필요한지에 대한 고려가 필요하다. 특히 동부간선도로

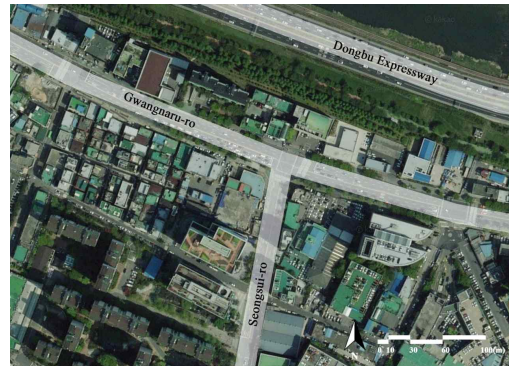


Figure 8. Representative area for HP: Vegetations are located near to Dongbu Expressway and residences. (<https://map.kakao.com/>)

와 주거지역 사이에 띠 녹지가 조성되어 있으나 미세먼지 저감에 알맞은 수종 도입 및 추가적인 개선을 통해 미세먼지 농도를 저감하기 위한 노력이 필요할 것이다.

V. 결 론

본 연구에서는 미세먼지 취약 지역을 도출하고, 취약 지역의 유형별 미세먼지 저감 녹지 조성 방안을 제시하고자 하였다. 이를 위해 선행연구 고찰을 통해 미세먼지 취약지역 분석 지표를 선정하고, 이를 기반으로 서울시 성동구를 대상으로 QGIS를 활용하여 미세먼지 취약지역을 도출하고 군집별 녹지 조성방안을 도출하였다.

연구 결과 미세먼지 취약 지역 분석 지표는 총 6가지로, 취약계층(어린이이용시설, 노인이용시설), 배출원(대기오염물질 배출 사업장, 도로), 환경 지표(미세먼지 농도, NDVI)가 선정되었다. 선정된 6개의 지표를 바탕으로 성동구 내에 미세먼지에 가장 취약한 지역을 도출하기 위하여 대상지를 39개의 hexagon으로 나눈 후 분석을 실시하였다. 취약 지역 종합 분석결과 성수동 지역이 미세먼지에 가장 취약한 것으로 나타났다. 이후 군집 분석을 통해 5개의 군집을 도출하였다. 군집 분석 결과 취약 지역을 취약 계층, 대기오염물질 배출 사업장, 도로에 따른

유형별 저감 방안이 필요한 것으로 나타났다. 또한 분석 결과 및 유형별 저감 방안을 실제 지역에서 적용하기 위하여 군집 별 대표 사례 지역을 선정하여 분석을 실시하였다.

미세먼지 저감 녹지 조성 사업이 다양하게 이루어지고 있는 상황에서, 사업의 효과를 높이기 위해서는 취약계층과 배출원을 고려하고, 공간의 특성별 녹지 조성 전략이 제시되어야 할 필요가 있다. 본 연구는 기존의 입지 선정 연구와 달리 연구의 범위를 구 단위로 축소하여 현장의 적용성을 높였다는 점에서 의미를 가진다. 또한 본 연구에서는 군집 분석을 통하여 미세먼지 저감 녹지 조성 공간의 유형을 구분, 군집 별 대표 사례 지역을 제시하였다. 이를 통해 앞으로의 녹지 공간별 전략 수립에 있어서 본 연구의 녹지 조성 공간 유형이 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 하지만 본 연구에서는 바람과 같이 미세먼지에 영향을 미칠 수 있는 기상 조건에 대한 고려가 부족하여 향후 추가적인 연구를 통해 미세먼지와 밀접한 기상 조건 지표를 반영할 필요가 있다. 또한 향후 연구에 있어서는 미세먼지 저감과 관련된 추가적인 공간 특성 지표를 반영하여 보다 구체적인 공간 특성별 유형 구분에 관한 연구가 이루어져야 할 것으로 사료된다.

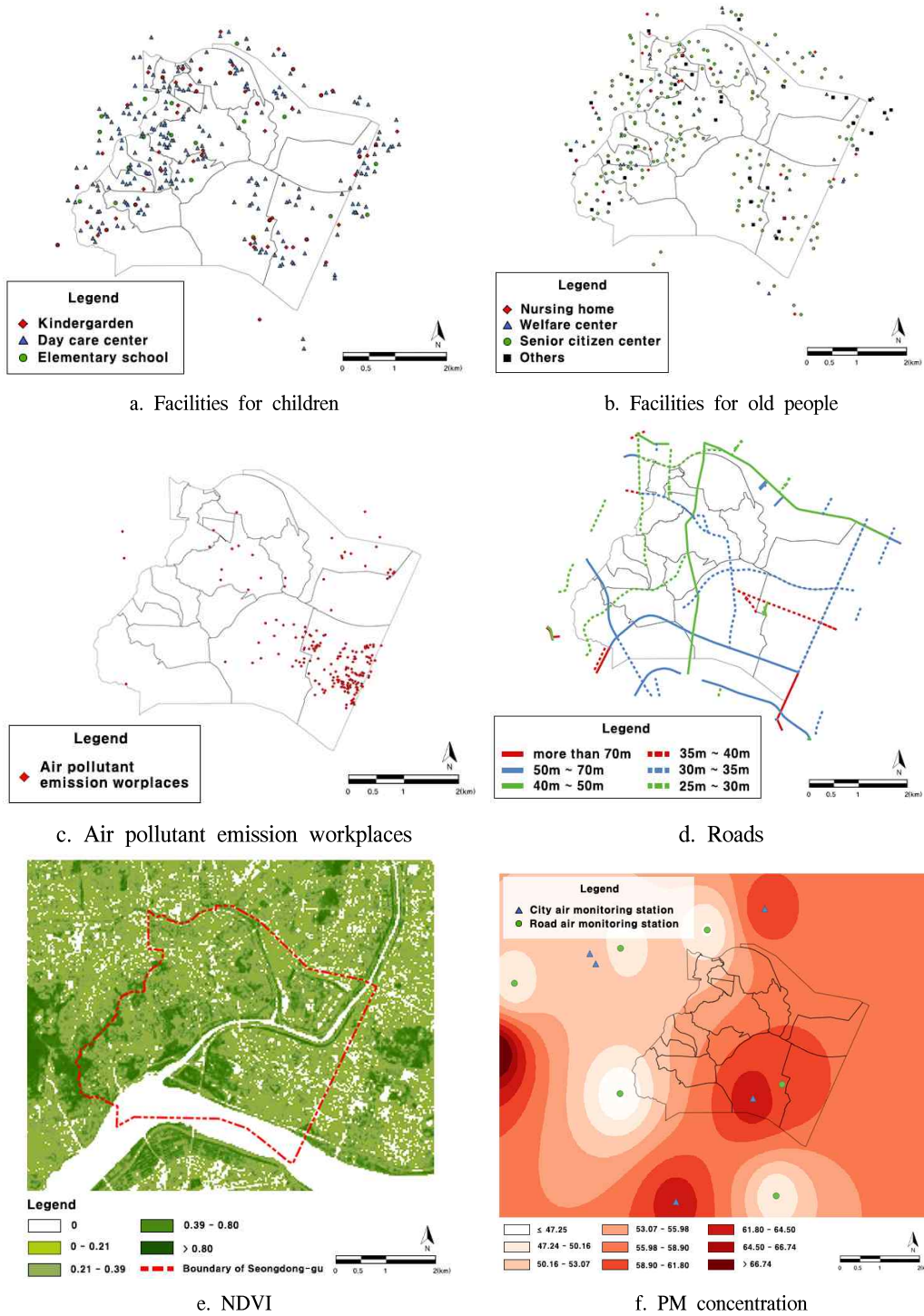
References

- Bae H. J., Im Y. R., Kan S. Y., Lee J. T. 2014. Association between PM2.5 and Children's Environmental Disease. Research Report to Korea environment Institute.
- Bae H. J. 2014. Study on Children's Environmental Disease due to PM2.5. Research Report to Korea Environment Institute.
- Bae M. K., Kim Y. R. 2013. Development of Urban Park Supply Alternatives Considering the Equity Evaluation of Urban Park Service: Focused on Cheongju City. *The Korea Spatial Planning Review* 77(2013.6): 49-66.
- Choi J. K., Choi I. S., Cho K. K., Lee S. H. 2020. Harmfulness of Particulate Matter in Disease Progression. *Journal of Life Science* 30(2) : 191-201.
- Choi T. Y., Kang D. I., Ca J. K. 2019. Study on the effect of green space and wind speed on the concentration of fine dust along the road. *Korean Society of Environment and Ecology* 2019(2): 67-68.
- Choi T. Y., Moon H. K., Kang D. I., Ca J. K. 2018. Analysis of the difference in the concentration of fine dust according to the land cover of Seoul. *Korean Society of Environment and Ecology* 2018(2):107-108.
- Chun B. S., Kim H. Y. 2010. Analysis of Urban Heat Island Effect Using Information from 3-Dimensional City Model (3DCM). *Spatial Information Research* 18(4): 1-11.
- Hawng I. C. 2019. Aging and ultra particulate matter health effects. Research Report to The Seoul Institute.
- Hong S. H., Kang L. Y., An M. Y., Kim J. S., Jung E. S. 2018. Study on the Impact of Roadside Forests on Particulate Matter between Road and Public Open space in front of Building Site -Case of Open space of Busan City hall in Korea. *Korean Society of Environment and Ecology* 2018(3): 323-331.
- Hu H. Y. and Kim J. O. 2017. Planting Design Strategies and Green Space Planning to Mitigate Respirable Particulate Matters- Case Studies in Beijing, China -. *Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture* 45(6): 40-49.

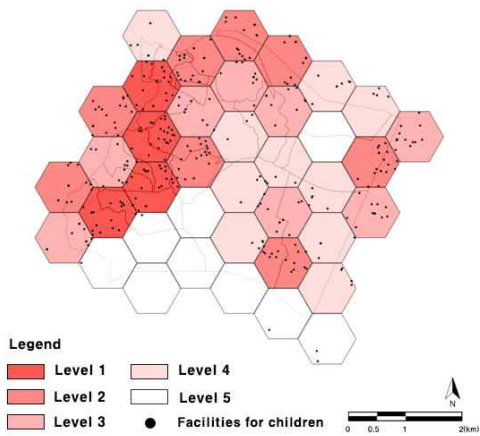
- Hwng K. I., Han B. H., Kwark J. I., Park S. C. 2018. Study on Decreasing Effects of Ultra-fine Particles (PM_{2.5}) by Structures in a Roadside Buffer Green - A Buffer Green in Songpa-gu, Seoul. *Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture* 46(4): 61-75.
- Jeon C. W., Cho D. H., Zhu L. 2018, Exploring the Spatial Heterogeneity of Particular Matter (PM₁₀) using Geographically Weighted Ridge Regression (GWRR). *The Korean Cartographic Association* 18(3): 91-104.
- Jin Y. H., Zhu J., Sung S. Y., Lee D. K. 2017. Application of Satellite Data Spatiotemporal Fusion in Predicting Seasonal NDVI. *Korean journal of remote sensing* 33(2): 149-158.
- Jo H. K. and Ahn T. W. 2001. Role of atmospheric purification by trees in urban ecosystem. *Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture* 29(3): 38-45.
- Jung J. C. 2018a. The effect of micro dust generation on the exercise habits of the elderly. Masters thesis. Inha University.
- Jung J. C. 2018b. Study on the Spatial Analysis for the Selection of a New Monitoring station in Yeongdeungpo-gu. *Seoul Studies* 19(4): 61-73
- Jung S. Y. 2020. A Study on the Perception of Sasang-gu Residents on the Policy to Reduce particulate matter. Masters thesis. Dongeui University.
- Kim H. J., Jo E. K. 2012. Assessment of PM-10 Monitoring Stations in Daegu using GIS Interpolation. *Journal of Korean Society for Geospatial Information System* 20(2): 3-13.
- Kim I. Y. 2016. Study on the Optimal Location of Air Pollution Monitoring Network Using GIS. Ph. D. Dissertation. Hansei University.
- Kim M. K., Kim S. P., Kim N. H., Sohn H. G. 2014. Urbanization and Urban Heat Island Analysis Using LANDSAT Imagery: Sejong City As a Case Study. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers* 34(3): 1033-1041.
- Kim S. J., Park H. J., Lee S. J., Kim C. H., Lee S. B., Choi S. D. 2018. Selection of Priority Monitoring Areas for Hazardous Air Pollutants (HAPs) in Seoul using Geographic Information System. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment* 34(2): 223-232.
- Kim W. J., Woo S. Y., Yoon C. R., Kwak M. J. 2018. Evaluation on the Reduction Effects of Particular Matter through Green Infrastructure and Its Expansion Plans. *The Seoul Institute* 1-107.
- Kim W. S., Km J. A., Hong J. S., Jung J. H., Lee J. B. 2014. A Study on Establishing PM_{2.5} Advisory Criteria with Source Management System in Seoul. Research Report to The Seoul Institute.
- Ko Y. J., Cho K. H. 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.
- Kwon S. J., Kim S. H., Tak O. S., Jeong H. H. 2017. A Study on the Clustering Method of Row and Multiplex Housing in Seoul Using K-Means Clustering Algorithm and Hedonic Model. *Journal of Intelligence and Information Systems* 23(3): 95-118.
- Kwon H. Y., Kim S. J., Kim Y. P., Kim S. K., Hong J. H., Choi S. D. 2017. Suggestions

- on the Selection Method of Priority Monitoring Sites for Hazardous Air Pollutants in Mega cities. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment* 22(6): 544-553.
- Lee D. Y. 2018. Risk Assessment of Hazardous Chemicals Originated from Fine Dust for Sensitive Population. Masters thesis. Hoseo University.
- Lee S. C. 2003. study on estimation of the air-pollutant emissions for reduction of the air pollution in the affected areas :focused on Shihwa/Ansan region. Masters thesis. Yonsei University.
- Lee S. M., Sin D. Y., Jung W. H., Choi K. C., Jung Y. M., Kim Y. S. 2019. A Study on the Establishment of Emergency Management Measures for High Concentration Particulate Matter in Local Government. Research Report to Korea Environment Institute.
- Lee W. S., Jang G. S. 2017. Classification of Neighborhood Parks Considering Environmental Characteristics for Effective Urban Park Management. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* 20(1): 26-41.
- Lee Y. G. 2019. A Study on the Problems and Improvement Measures of the particulate matter Management Measures in Korea. Masters thesis. Suncheon National University.
- Ministry of environment. 2016, It looks if you know right away. What is particulate matter? seoul: Ministry of environment.
- National Institute of Forest Science. 2019. Guidelines for the creation and management of urban forests to reduce particulate matter for new projects in 2019. Research Report to National Institute of Forest Science.
- Park H. Y. 2019. Characteristics of particulate matter(PM10,PM25) emission of air pollution emission facilities. Masters thesis. Kunsan National University.
- Song H. Y. 2013. Analysis of particulate matter(PM10) concentration by city and province in Korea and measures to reduce. Measures in Korea. Yonsei University.
- Wu C. D., Chen Y. C., Pan W. C., Zeng Y. T., Chen M. J., Guo L., Lung S. C. 2017. Land-use regression with long-term satellite-based greenness index and culture-specific sources to model PM2.5 spatial-temporal variability. *Environmental Pollution* 224: 148-157.
- Yang K. C. and Kim J. K. 2007. The role of trees on road contaminants. *Journal of the Korean Society of Road Engineers* 9(2): 37-40.
- Yoo S. Y., Kim T. H., Ham S. H., Choi S. M., Park C. Y. 2019. A Study on the Characteristics of Particulate Matters Reduction at the Green Buffer Zone of Sihwa Industrial Complex. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment* 2019(11): 77-77.
- <https://www.law.go.kr/>
- <https://www.oecd.org>
- <https://bigdata.seoul.go.kr/main.do>
- <https://www.data.go.kr/data/15044957/fileData.do>
- <https://earthexplorer.usgs.gov/>
- <https://data.seoul.go.kr>
- <https://map.kakao.com/>

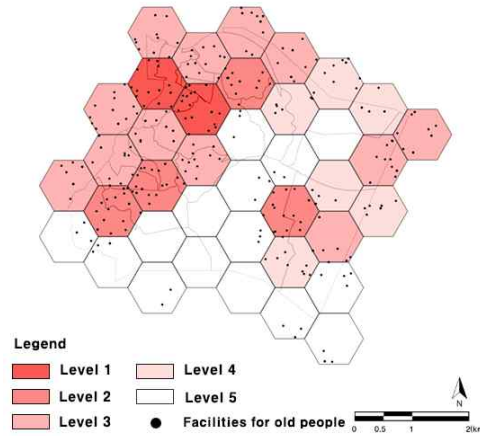
Appendix 1. Analysis results of Individual indicators



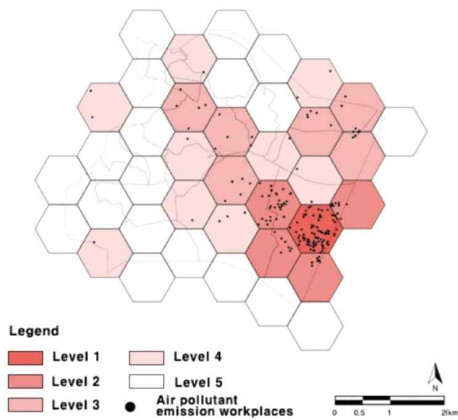
Appendix 2. The Vulnerability levels of Individual indicators



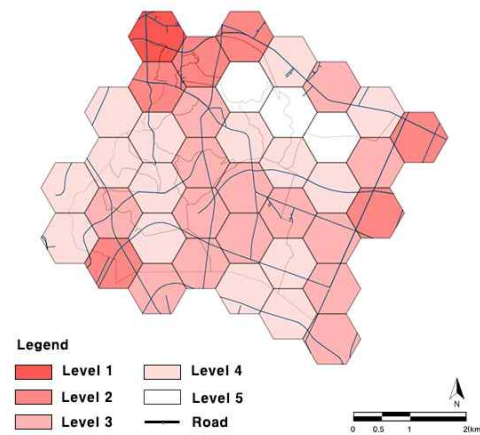
a. Facilities for children



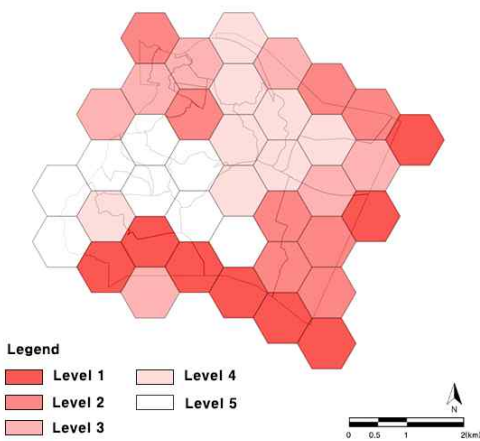
b. Facilities for old people



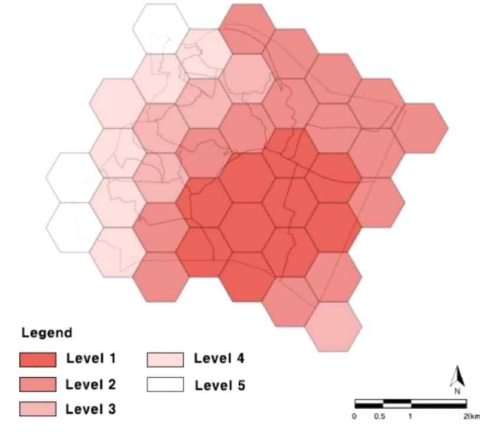
c. Air pollutant emission workplaces



d. Roads



e. NDVI



f. PM concentration