

취약계층을 고려한 미세먼지 쉼터 입지 효율성 평가

Evaluation of the Location Efficiency of Fine Dust Shelters Considering Vulnerable Population in Seoul

임재권¹⁾, 이해경²⁾

Lim, Jae Kwon¹⁾ · Lee, Hye Kyung²⁾

Received October 26, 2022; Received December 10, 2022 / Accepted December 17, 2022

ABSTRACT: Fine Dust in Korea has been classified as a social disaster since 2019 due to continuous increase in concentration of Particulate Matter 10(PM 10) and PM 2.5. The fine dust issue has negative physical and mental impacts, especially on vulnerable population including children and the elderly. Seoul metropolitan government have installed fine dust shelters since 2019. However, there is a lack of research that evaluates spatiotemporal distribution of these facilities. Therefore, the first aim of this study is to find the relationship between PM levels and dust scattering construction sites, or air pollutant emission sites through in depth spatial analyses. The second purpose is to analyze the spatial distribution of PM shelters in Seoul, and to evaluate the location efficiency of them. Kernel density, krigging, and network analyses were conducted, and floating population was considered instead of census data for this research. The results of network analysis based on the road system showed that Yangcheon-gu, Songpa-gu, Seongbuk-gu, and Dobong-gu were found to need additional fine dust shelters. Also, the results from analyzing the floating population that includes children and the elderly showed that Songpa-gu, Seodaemun-gu, Gangdong-gu, Seocho-gu, and Dongdaemun-gu need more placements of fine dust shelters. The results of this study are expected to provide implications for urban planners to enhance fine dust shelter placement in urban areas, and vulnerable population issues would be considered in many ways.

KEYWORDS: S-DoT, PM10, PM2.5, Scattering Dust Construction Site, Air Pollutant Emission Site

키 워 드: 스마트서울도시데이터복합센터, 미세먼지, 초미세먼지, 비산먼지 발생 공사장, 대기오염물질 배출 사업장

1. 서론

1.1 연구의 배경과 목적

미세먼지란 지름 10 μ g 이하의 먼지(이하 PM10)를 의미하며, 그 중에서도 초미세먼지는 지름 2.5 μ g 이하의 먼지(이하 PM2.5)를 의미한다. 일정한 배출구가 존재하지 않은 채로 대기 중에 직접 배출되는 먼지를 의미하는 비산먼지는 미세먼지 배출 요인의 38.9% 비중을 차지하고 있으며, 이는 도로 이용 오염원(28.8%), 비도로 오염원(19.9%)보다 약 10~20% 높은 수치이다(Kim et al., 2014). 또한 국립환경과학원에 따르면 비산먼지는 미세먼지 발생 비중의 47.02%를 차지하며, 이 중 특히 건설 과정에서 발생하는 비산

먼지는 전체 비산먼지 발생량의 34.85%를 차지하고 있다(Kim et al., 2015; Kim, 2019). 즉 PM2.5의 요인 중 비산먼지의 비율은 다른 요인들에 비하여 상당히 높은 편이며, 특히 건설 현장과 같은 사업장은 비산먼지를 포함한 대기오염물질의 농도를 가중시키고 있다.

세계가 PM2.5를 주목하는 이유는 신체에 미치는 부정적 영향 때문이다. 2013년 세계보건기구(WHO)는 PM2.5를 석면, 벤젠과 같은 1급 발암물질로 지정하였으며, 2.5 μ g 이하라는 PM10보다 작은 크기로 인하여 눈과 호흡기를 통하여 혈관으로 침투하여 다른 신체 기관으로 이동할 가능성이 농후하기 때문이다(Ministry of Environment, 2019).

¹⁾ 학생회원, 단국대학교 도시계획부동산학과 (limjk3796@dankook.ac.kr)

²⁾ 정회원, 단국대학교 도시계획부동산학과 조교수 (hklee@dankook.ac.kr) (교신저자)

우리나라는 PM2.5 기준 미세먼지에 노출된 인구가 OECD 국가 중 2019년 기준으로 가장 많았으며, OECD 가입국 대다수가 지난 2010년 대비 2019년에 미세먼지에 노출된 인구가 감소하는 추세를 보인 것에 반하여 우리나라는 가장 높은 증가율인 19% 이상의 증가폭을 보였다(OECD, 2022). 또한, 환경적 문제를 객관적으로 보여주는 지표는 미세먼지 주의보이다. 미세먼지 주의보가 발령되는 기준은 “기상조건 등을 고려하여, 해당 지역의 대기 자동측정소 PM10 시간 평균 농도가 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상 2시간 지속”이며, PM2.5의 경우 농도 값이 75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상 2시간 지속될 경우이다. PM10과 PM2.5 각각 주의보보다 2배 높은 수치인 300 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 과 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 값이 2시간 이상 지속될 때 발령된다(Air Korea, 2022). 2015년 서울시 기준 PM2.5와 PM10 주의보가 발령된 일자는 각각 6번, 3번이었으며, 2016년은 0번, 6번 2017년은 5번, 6번, 2018년은 8번, 5번 2019년은 15번, 8번 2020년은 5번, 4번 2021년은 11번, 8번으로 집계되었다. 또한 PM2.5 경보는 2019년에 2번, 2021년에 1번, PM10 경보는 2018년에 1번, 2021년에 2번 발령되었다. 즉, 코로나19로 인하여 사회 전체가 위축되었던 2020년을 제외한다면 미세먼지 주의보 발령 횟수는 점차 증가하고 있음을 알 수 있다.

미세먼지에 의한 인체에 미치는 부정적 영향과 지속적인 농도 증가 문제로 인하여 PM10과 PM2.5의 사회적 관심이 증가함에 따라 2019년 3월 미세먼지 저감 및 관리에 관한 특별법(이하, '미세먼지 법') 개정안이 통과되어 미세먼지는 개인 차원의 문제가 아닌 사회적 재난으로 분류되어 관리하고 있다. 정부는 취약계층의 보호를 다루는 미세먼지 법 제23조(취약계층 보호)에 의거하여 취약계층의 건강을 보호하기 위한 대책을 마련하고 있다. 취약계층에 대한 사회적 정의는 “일반적으로 경제적, 신체적 및 기타 조건으로 인하여 다른 계층에 비하여 상대적으로 사회 참여의 기회가 제한되고, 나아가 국가의 개입을 통하지 않고서는 한 사회의 구성원으로서 동등한 혜택을 제공받을 기회로부터 배제되기 쉬운 계층”을 의미한다(Ministry of Legislation, 2022). 취약계층은 미세먼지 대책의 사각지대에 위치할 가능성이 높으며, PM2.5가 미치는 신체적, 정신적 영향은 취약계층에게 더욱 심각하다. PM2.5는 환경성 질환에 속하는 허혈성 심장질환, 만성폐쇄성 폐 질환, 폐암, 뇌혈관질환을 유발하며, 취약계층에 속하는 만 65세 이상 고령자는 2015년 서울시에서만 환경성 질환으로 7,422명이 사망하였다(Hwang, 2018; NOAA, 2002; WHO, 2013; Cohen et al., 2017; Han et al., 2018). 또한 취약계층에 포함되는 아동은 미세먼지 농도가 높아질수록 신체적 건강뿐만 아니라 정신적으로도 부정적인 영향을 받을 가능성이 있다(Kim et al., 2019). 취약계층을 포함하여 시민들의 미세먼지 노출에 대한 문제를 극복하기 위하여 정부는 2019년 12월부터 '미세먼지 계절 관리제'를 도입하여 미세먼지 쉼터를 지정하고 있다. 미세먼지 쉼터는 서울시를 포함한 각

지자체가 시민 건강 피해를 감소시키기 위하여 미세먼지 고농도 기간인 매년 12월부터 다음 연도 3월까지 공기청정기 및 환기설비 등을 설치하여 운영하고 있다(Air Quality Information, 2022).

PM10과 PM2.5의 주된 원인인 비산먼지는 공사장과 사업장으로부터 일반적으로 발생된다. 비산먼지를 포함한 대기오염물질은 신체적, 정신적으로 영향을 미치고 있으며, 특히 노인과 아동을 포함한 취약계층에 큰 영향을 미치고 있다. 이에 본 연구는 다음의 목적으로 연구를 진행하고자 한다. 첫째, 미세먼지의 주된 원인인 비산먼지의 배출 요인인 '비산먼지 발생 공사장'과 '대기오염물질 배출 사업장'의 밀집 지역과 미세먼지 고농도 지역을 분석하여 비산먼지 발생시설과 미세먼지 간의 관계성을 확인함을 목적으로 한다. 둘째, 미세먼지 쉼터의 서비스 면적 분석과 미세먼지 쉼터 배치가 비산먼지 발생시설로부터 적절히 되어 있는지 실제 교통망을 활용하여 확인하며, 서울시 생활인구를 고려하여 배출 시설 근처 미세먼지 쉼터가 취약계층을 고려하여 설치되었는지에 대한 공간 분석을 목적으로 한다.

2. 선행연구 검토 및 연구 차별성

2.1 선행연구 검토

2.1.1 미세먼지 영향성 및 S-DoT 선행연구

Hwang(2018)은 취약계층인 노인이 미세먼지로 인한 질병에 취약하며, 그 영향력이 고령화가 증가되는 한국 사회에 더 클 것으로 예측하였다. 또한, 환경성 질환과 고령자 그리고 초미세먼지 농도 간의 관계를 통하여 미세먼지 고농도가 지속될 경우 2030년에 2,133명의 노인이 조기 사망할 것으로 분석하였다. Kim et al.(2020)는 취약계층인 아동은 미세먼지로 인하여 신체, 정신에 부정적 영향을 받으며, 녹지의 여부가 정서적 건강과 관계가 있는 것을 분석하였다.

미세먼지를 주제로 하는 기존 연구들에서 주로 사용된 대기 측정소의 한계점을 극복하기 위한 '스마트서울 도시데이터 센서' 즉, S-DoT 데이터를 활용한 연구는 최근 몇 년 사이에 증가하고 있다. S-DoT는 서울시의 행정 수립 기반을 마련하기 위하여 미세먼지, 온도, 습도 등의 항목들을 측정하여 도시 현상을 수집, 분석하는 관측기구이며, 2022년 3월 기준으로 1,198개의 측정망이 설치되어 있다. Park and Kim(2020)는 S-DoT를 활용하여 2020년 8월부터 당해 연도 9월까지의 미세먼지 데이터를 분석하였다. 이에 대한 결과로 많은 양의 관측기구를 가진 S-DoT의 관측값은 대기 측정소의 관측값들에 비하여 지역성을 가지고 있으며, 이는 대기 측정소가 행정구 내 모든 지역의 환경을 대표하지 못한다는 한계성을 보완한다.

2.1.2 도시 내 시설에 따른 미세먼지 선행연구

도시 내 시설에 따른 미세먼지 농도 연구는 미세먼지의 요인을 밝혀내는 데 있어서 중요한 연구 부문이다. Eum and Kim(2020)는 PLS(Partial Least Squares) 회귀분석을 통하여 도시의 산업적 특성에 따른 미세먼지 농도 차이를 연구하였다. 그 결과 PM10의 경우 교육 서비스업, 운수업, 보건 및 사회복지서비스업, 기타 기계 및 장비 제조업, 전자부품·컴퓨터·영상·음향 및 통신장비 제조업, 숙박 및 음식점업, 건설업, 도매 및 소매업이 미세먼지 농도 증가에 부정적인 영향이 있으며, PM2.5의 경우 보건 및 사회복지 서비스업, 숙박 및 음식점업, 교육서비스, 건설업, 도매 및 소매업이 초미세먼지 농도 증가에 양의 영향을 미침을 알 수 있었다. Hur and Kang(2022)는 2016년 봄, 겨울의 수도권을 대상으로 다중회귀분석을 통한 토지이용, 건축, 주거 등 공간구조 등이 PM10에 미치는 영향력 연구를 진행하였다. 그 결과 토지이용이 혼합된 경우와 건축 허가 건수가 PM10 증가에 양의 영향을 미치는 것으로 확인되었으며, 그린 인프라스트럭처에 해당하는 녹지 면적은 음의 영향을 미치는 것으로 확인되었다. (Kim et al., 2019)는 CAPSS (Clean Air Policy Support System, 대기정책지원 시스템)을 활용하여 수도권 지역을 격자로 나누어 차량등록, 배출원 등을 기준으로 오염물질의 비중을 연구하였다. 그 결과 공업지역이 밀집된 인천시와 안산시 등에서 미세먼지 농도가 높은 것을 확인할 수 있었으며, 특히 대기오염물질에서 비산먼지가 주된 원인인 것을 알 수 있었다.

특히 Yu et al.(2004)는 건설 요인에 따른 비산먼지 발생 연구를 통하여 비산먼지의 신체적 영향성 연구를 진행하였다. 또한 건설 현장 근로자를 대상으로 설문조사를 진행하여 비산먼지의 신체적 피해 정도를 구체화하였으며, 조사 결과 호흡기와 안구 부문이 비산먼지로 인하여 건설 현장 근로자가 체감하는 신체적 피해 중 가장 큰 것으로 조사되었다.

2.1.3 취약계층을 고려한 시설 설치 관련 선행연구

Shin et al.(2021)는 3월부터 5월까지의 성동구를 대상으로 K-means 군집 분석을 통하여 어린이 이용시설과 노인 이용시설이 밀집된 '취약계층 밀집 지역' 군집의 특성을 분석하였으며, 미세먼지 배출시설을 고려하지 않은 미세먼지 저감 사업의 배치 전략의 문제점을 구체화하였다.

Bae et al.(2018)는 부산에 설치되어 있는 긴급 대피장소의 입지가 14세 미만과 65세 이상인 안전 취약계층을 대상을 고려하여 설치되었는지 입지 적정성을 평가하였다. 그 결과 기장군, 해운대구, 사하구의 대피소가 안전 취약계층이 10분 내 접근 가능 범위 밖에 있음을 알 수 있었으며, 시설 배치의 형평성 부문에 있어서 역시 안전 취약계층이 많이 거주하는 기장군, 수영구, 해운대구 지역에 대피시설이 부족함을 알 수 있었다.

Sim et al.(2020)는 서울시를 대상으로 복지시설 밀도가 높을수록 노인·장애인의 밀집이 높으며, 복지시설로부터의 이동 거리가 멀 것으로 가정하였다. 총 4가지의 시나리오 중 형평성이 강조된 시나리오를 채택하여 서울역과 강서구청 부근이 폭염에 취약함을 알 수 있었으며, 서울역 '버스종합환승센터' 정류장에 폭염 취약계층을 위한 쿨링 포그를 설치하여야 함을 강조하였다.

2.2 연구의 차별성

기존의 미세먼지 연구는 주로 미세먼지 발생시설이 아닌 미세먼지 측정값을 통하여 환경 현황을 분석하고 측정값을 이용한 전략 제시를 목적으로 연구를 진행하였다. 또한 주된 발생 원인으로 고려된 '도로로 인한 비산먼지 발생'은 많은 연구가 진행되었지만, 그 외의 원인은 고려되지 않고 있다. 미세먼지 발생 사업장의 경우 미세먼지의 농도에 부정적인 영향을 미치지만, 해당 발생 사업장 부근에 취약계층 시설이 존재하는 등의 토지이용 상 문제점이 존재한다. 또한, 미세먼지 발생 사업장의 비산먼지의 농도 감축의 효과를 나타내는 그린 인프라스트럭처가 구성되어 있지 않은 실정이다(Shin et al., 2021). 또한 건설 현장에서의 비산먼지로 인한 피해는 그 주변에 생활하는 이들의 호흡기 및 안구에 상당한 피해를 끼치고 있지만 이를 대처하는 방안 역시 미흡하다(Yu et al., 2004). 기존 연구들에서 주로 주목하였던 도로로 인한 비산먼지 뿐만 아니라 미세먼지 발생 사업장과 건설 현장으로 인한 비산먼지의 영향을 분석하기 위하여 사업장과 공사장 데이터를 본 연구의 주요 변수로 활용하고자 한다.

기존 연구에서 환경 변수로 사용된 대기 측정소 데이터는 측정의 편의성을 위하여 건물 높이에 설치되어 있기에 도시민의 생활에서 체감하는 기후환경과는 차이가 있다(Park and Kim, 2020). 무엇보다 행정구별 1개소로 운영되고 있는 대기 측정소의 관측값은 행정구 전체를 대표하기에는 한계가 있고, 이 문제점을 극복하기 위하여 최근 S-DoT를 활용한 연구가 진행되고 있다. S-DoT는 행정구당 1개 수준으로 설치되어 있는 대기 측정소와 달리 2022년 현재 이동형 센서를 포함하여 총 1,198개의 관측센서로 구성되어 있어 행정구 단위뿐만 아니라 더욱 세부적인 분석에 해당하는 동 단위의 지역 분석이 가능하다. 본 연구에서는 S-DoT 데이터로 측정된 행정구들의 PM10, PM2.5 평균값을 환경적 변수로 연구를 진행하고자 한다.

마지막으로 인구를 고려한 시설 배치의 효율성 및 적정성을 분석하기 위하여 생활인구 변수를 추가하고자 한다. 기존의 연구에서는 미세먼지 농도와 시설물 배치를 통한 인프라 개선을 주목하였다. 하지만 이는 신설 및 개선된 시설물을 실질적으로 활용하는 시민의 이동은 충분히 고려하지 못한 개선 방안이다. 따라서 연령별 데이터가 존재한 생활인구를 변수에 추가하여 취약계층에 해당하는 아동, 노인 생활인구의 추세를 활용하여 미세먼지 쉼터 배

치의 적정성 분석과 시설 배치 미흡 지역의 대처 방안을 제시하고자 한다.

3. 연구 변수 및 연구 방법

3.1 연구 변수

본 연구의 대상지는 서울시이며, '스마트 서울 도시 데이터 복합센터(S-DoT)', '비산먼지 발생 공사장', '대기오염물질 배출 사업장', '서울시 미세먼지 쉼터'의 공간데이터를 활용하여 연구를 진행하였다. 연구의 시간적 범위 최신의 공간 빅데이터를 활용하기 위해 2020년 1월 4일부터 2022년 3월 13일로 구성하였다.

S-DoT는 기존 연구에 사용된 행정구 별로 1개소씩 설치된 대기 측정소와 달리 1,198개의 측정망을 통하여 대기 환경정보를 측정하고 있으며, 그 위치 정보와 측정값을 서울 열린 데이터 광장을 통하여 1주일 단위로 CSV 형식으로 제공하고 있다. 이동형 센서 등 행정구 분석에 불필요한 S-DoT 데이터를 선처리하였다. 연구의 시간적 범위인 2020년 1월 4일부터 2022년 3월 13일에 해당하는 데이터를 Google Colaboratory를 활용하여 null 값을 제거한 후 기온, PM10, PM2.5 데이터의 이상치를 IQR(Inter Quartile Range) 25%, 75% 기준으로 제거하였다. 이후 시간대별 미세먼지 측정값을 일별 평균으로 변환하였으며, 행정구별 평균값을 분석하였다. 생활인구 자료는 서울 열린 데이터 광장이 제공하는 각 연도별, 인구별, 지역별 주민등록인구를 활용하여 구축하였다. 서울시 미세먼지 쉼터 자료는 서울 열린 데이터 광장이 제공하는 총 166개의 미세먼지 쉼터의 명칭, 좌표, 상세주소 등의 정보를 활용하였다. 대기오염물질 배출 업소는 '대기오염물질 배출시설을 설치하여 조업 중인 사업장으로 대기배출시설 설치 허가(신고)를 득한 사업장'을 의미하며, 대기오염물질 배출시설은 '먼지, SOx(황산화물), NOx(질소산화물) 등 대기오염물질을 대기 중으로 배출하는 시설로서 환경부령으로 정한 일정한 규모 이상의 시설'로 정의된다. 위 기준에 부합하는 대기오염물질 배출 사업장 데이터는 행정안전부가 제공하는 데이터를 활용하였으며, 비산먼지 발생 공사장의 경우 서울특별시 건설 알림이 데이터를 활용하였다. 이후 본 연구의 시간적 범위에 맞추어 공사 기간과 사업 운영 기간이 2020년 1월부터 2022년 3월인 비산먼지 발생 공사장 4,396개, 대기오염물질 배출 사업장 2,764개의 데이터를 취합하였다. 도로망 데이터는 행정안전부가 제공하는 도로의 시점과 종점, 도로명주소의 기본 정보를 포함한 데이터를 활용하였다.

3.2 연구 방법

첫 번째 연구 목적인 '비산먼지 발생 공사장'과 '대기오염물질 배출 사업장'의 밀집 지역과 미세먼지 고농도 지역의 관계를 분

Table 1. Data

Variables	Description	Time of Measurement	Sources
PM10 & PM2.5	S-DoT Daily Average PM10, PM2.5 Data	2022.03.01	Seoul Open Data Plaza
Vulnerable Population	Living population over 65 and under 10 years of age	2020.01.01. ~ 2021.12.31	Seoul Open Data Plaza
Fine Dust Shelter	Number of Shelters	2022.03.01	Seoul Open Data Plaza
Fine Dust Pollution Sites	Construction Site	2020.01.01. ~ 2022.03.01	Construction Allimi
Fine Dust Pollution Sites	Air Pollutant Emission Site	2020.01.01. ~ 2022.03.01	Ministry of Public Administration and Security
Network of Road	Seoul Road Network Data	2022.06.10	National Spatial Information Portal

Table 2. Descriptive statistics of variables table

Variables	Count	Mean	Std	Min	Max
Daily Average PM2.5	1,065	15.92	2.01	3.56	21.87
Daily Average PM10	1,065	22.02	2.69	4.15	29.64
2020 Vulnerable Population	219,600	93,002.82	29,693.07	29,680.15	180,994.38
2021 Vulnerable Population	219,000	90,066.88	29,482.74	29,386.06	168,536.14
Air Pollutant Emission Site	2,144	-	-	-	-
Construction Site	4,395	-	-	-	-
PM Shelter	165	-	-	-	-

석하기 위하여 커널 밀도(Kernel density)를 활용, 비산먼지 발생 공사장과 대기오염물질 배출 사업장의 밀집된 지역을 확인하였다. 본 연구는 ArcGIS의 Kernel Density tool을 활용하여 비산먼지 발생 공사장과 대기오염물질 배출 사업장의 밀집 여부를 공간 분석하였다. 이후 비산먼지 발생시설과 미세먼지 간의 관계성을 확인하기 위하여 S-DoT 데이터를 활용한 미세먼지 농도 공간 분포 분석을 Kriging 분석법을 통하여 진행하였다. Kriging 분석법이란 측정지점의 측정값을 통계적 추론을 통하여 상관도가 반영된 값을 추론하는 보간법이다. 본 연구의 Kriging 분석은 ArcGIS의 Kriging tool을 활용하여 S-DoT 설치 지역의 PM10과 PM2.5 데이터를 기준으로 S-DoT 미설치 지역의 PM10과 PM2.5 수치를 추정하여 미세먼지 농도 밀집 지역을 시각화하였다.

두 번째 목적인 배출시설 근처 미세먼지 쉼터가 취약계층을 고려하여 설치되었는지에 대한 현황을 고찰하기 위하여 미세먼지 쉼터에 대한 공간 분석을 진행하였다. 행정구에 설치 운영 중인 미세먼지 쉼터의 개수만을 고려하여 미세먼지 공급의 효율성을 판단하는 것은 행정구의 면적 특성을 고려하지 않은 접근 방법이다. 따라서 미세먼지 쉼터 1개소의 서비스 면적 분석을 통하여 미세먼지 쉼터 공급이 취약한 행정구를 분석하였다. 또한, 비

산먼지 발생 공사장과 대기오염물질 배출 사업장을 미세먼지 취약계층인 노인의 보행속도 2.64km/h를 기준으로 (Yun et al., 2020) 도보 5분, 10분, 15분 거리를 측정하였다. 기존 연구에서 주된 방식으로 사용한 Buffer 분석의 경우 직선거리만을 고려하였기에 보행 교통망을 이용한 시민의 실제 이동 반경과는 상이한 결과가 도출된다. 따라서 본 연구에서는 Network Service Area Analysis를 통하여 보행속도를 고려한 분석을 진행하였다. Network Service Area Analysis 기법은 시설물을 기준으로 속도를 입력하여 그 시설물이 입력된 도로망을 통하여 서비스할 수 있는 영역을 계산하는 기법이다. 이를 통하여 비산먼지 발생 공사장과 대기오염물질 배출 사업장을 기준으로 쉼터가 노인의 보행거리를 고려하여 적절하게 설치되었는지 확인할 수 있다.

4. 분석 결과

4.1 Kernel Density를 통한 비산먼지 발생 공사장, 대기오염물질 배출 사업장 밀집지역 분석

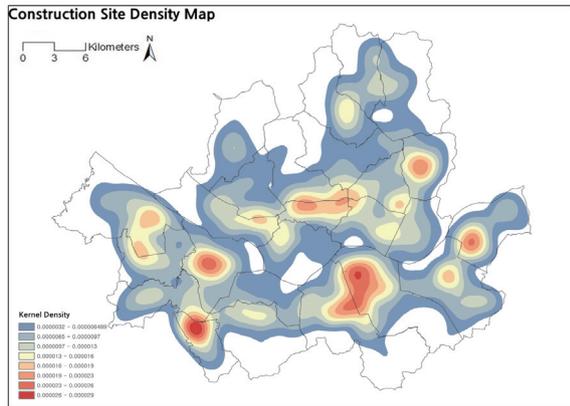


Figure 1. Kernel density analysis of distribution of construction sites

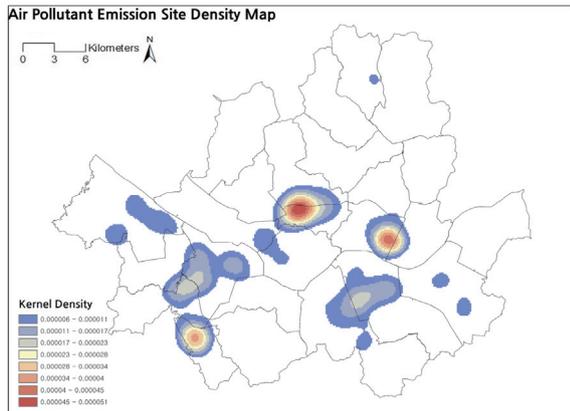


Figure 2. Kernel density analysis of air pollutant emission sites distribution

미세먼지 발생시설인 비산먼지 발생 공사장과 대기오염물질 배출 사업장이 밀집된 행정구를 분석하기 위하여 ArcGIS의 Kernel Density를 활용하여 비산먼지 발생 공사장, 대기오염물질 배출 사업장 데이터를 각각 8개의 Class로 분류하였다. 비산먼지 발생 공사장의 경우 전체적으로 모든 행정구들에 배치되어 있으며, 특히 강남구, 강동구, 강서구, 금천구, 영등포구, 중구, 중랑구 등에서 높은 시설 밀집도를 보이고 있다 (Figure 1). 또한 대기오염물질 배출 사업장의 경우 공사장 데이터가 전체 행정구에 분포하여 있던 것과 달리 특정 행정구에 밀집되어 있는 양상을 보이며, 금천구, 성동구, 중구를 중심으로 강남구, 영등포구, 강서구 등에 분포되어 있는 결과를 확인할 수 있었다 (Figure 2). 두 시설 배치 분석 결과의 지역적 유사성을 가지고 있는 행정구는 중구, 성동구, 금천구, 강남구, 영등포구, 강서구였으며, 주로 중심상업지역과 공업지역이 위치하고 있는 지역임을 알 수 있다.

4.2 Kriging 기법을 통한 미세먼지 고농도 지역 분석

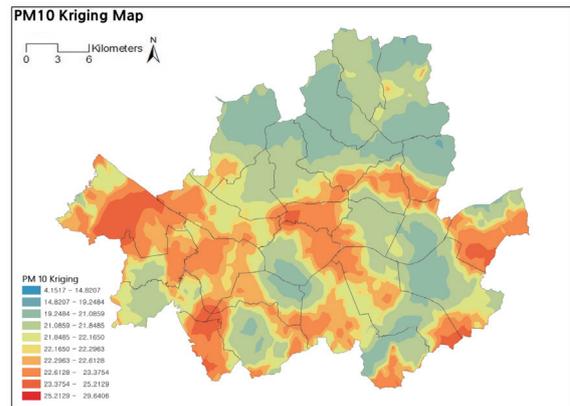


Figure 3. Kriging interpolation for PM10

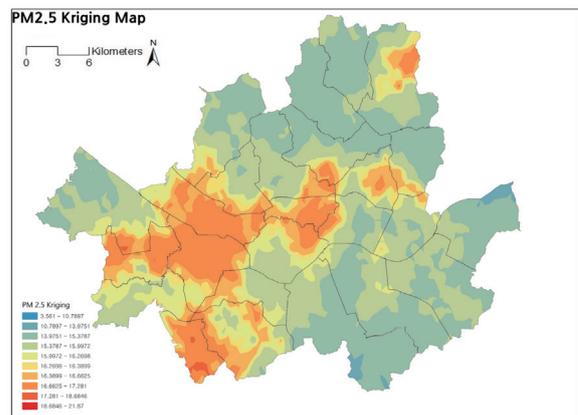


Figure 4. Kriging interpolation for PM2.5

PM10과 PM2.5 고농도 지역 분석을 통하여 미세먼지 취약지역을 알아내기 위하여 ArcGIS의 Kriging 기법을 활용하여 PM10과 PM2.5의 값

을 각각 10개의 class로 분류하여 공간분석을 진행하였다. 강동구, 강서구, 금천구, 중구의 평균 PM10 농도가 $25\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상인 값이 측정되었다(Figure 3). 이 행정구들 외 동대문구, 동작구, 서초구, 양천구, 영등포구, 용산구가 평균적으로 높은 농도를 나타내고 있다. PM2.5의 경우 금천구, 노원구, 동대문구, 마포구, 양천구, 영등포구, 중구가 높게 나타났으며, 특히 금천구와 영등포구를 중심으로 한 여의도권역(YBD) 지역을 중심으로 PM2.5 농도가 높은 것으로 분석되었다(Figure 4).

PM10과 PM2.5의 Kriging 결과 비산먼지 발생 공사장, 대기오염물질 배출 사업장의 밀집 지역으로 분석된 중구, 성동구, 금천구, 강남구, 영등포구, 강서구에서 높은 PM10과 PM2.5 농도가 확인되었음을 알 수 있다. 하지만 노원구, 마포구, 양천구, 서초구 등 미세먼지 농도는 높지만 배출사업장과 공사장이 밀집되어 분포하고 있지 않은 행정구가 존재하였다. 이는 공사장과 사업장으로부터 발생하는 비산먼지의 요인 외에도 인구밀도, 도로율 등과 같은 요인으로 미세먼지 농도의 차이가 발생한 것으로 해석된다.

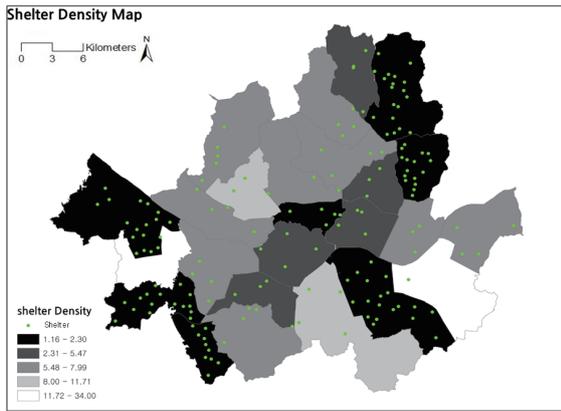


Figure 5. Service areas of fine dust shelters (Km^2 / number of shelters)

서울시 내 미세먼지 쉼터는 2022년 6월 기준으로 165개소가 운영 중에 있다. 가장 많은 미세먼지 쉼터가 운영 중인 행정구는 강남구로 총 20개소의 쉼터가 위치하고 있으며, 노원구 19개소, 강서구 18개소, 중랑구와 구로구 각각 16개소가 위치하고 있다. 25개 행정구 중 양천구는 미세먼지 쉼터가 전무한 실정이며, 송파구 1개소, 서대문구 2개소, 광진구 3개소가 위치하고 있다(Figure 5).

미세먼지 쉼터 배치를 분석한 Table 3의 'Density of Shelter(Km^2/N)'는 행정구의 면적을 미세먼지 쉼터 개수로 나눈 값을 의미한다. 'Density of Shelter(Km^2/N)' 값이 클수록 쉼터 1개소가 서비스하는 지역 면적이 크음을 의미하며, 이는 단위 면적당 취약계층이 이용할 수 있는 시설의 분포가 불충분한 것으로 해석될 수 있다. 미세먼지 쉼터가 없는 양천구를 제외하고 개별 미세먼지 쉼터 1개소가 처리하는 면적을 나타내는 'Density of Shelter(Km^2/N)' 값들을 분석한 결과는 다음과 같다. 중랑구(1.16 Km^2), 구로구(1.26

Table 3. Fine dust shelter density analysis

Gu	Number of Shelters	Area of GU (km^2)	Density of Shelter (km^2/N)
Gangnam-gu	20	39.47	1.97
Gangdong-gu	4	24.54	6.13
Gangbuk-gu	4	23.62	5.9
Gangseo-gu	18	41.39	2.29
Gwanak-gu	4	29.54	7.38
Gwangjin-gu	3	17.05	5.68
Guro-gu	16	20.11	1.25
Geumcheon-gu	10	13	1.3
Nowon-gu	19	35.56	1.87
Dobong-gu	4	20.66	5.16
Dongdaemun-gu	3	14.23	4.74
Dongjak-gu	4	16.38	4.09
Mapo-gu	4	23.85	5.96
Seodaemun-gu	2	17.68	8.83
Seocho-gu	4	46.85	11.7
Seongdong-gu	4	16.79	4.19
Seongbuk-gu	4	24.6	6.14
Songpa-gu	1	33.83	33.8
Yangcheon-gu	0	17.45	0
Yeongdeungpo-gu	4	24.52	6.13
Yongsan-gu	4	21.88	5.47
Eunpyeong-gu	5	29.77	5.95
Jongno-gu	3	23.98	7.99
Jung-gu	5	9.96	1.99
Jungnang-gu	16	18.54	1.15

Km^2), 금천구(1.30 Km^2), 노원구(1.87 Km^2), 강남구(1.97 Km^2)는 미세먼지 쉼터의 서비스 면적이 낮은 행정구이며, 송파구(33.83 Km^2), 서초구(11.71 Km^2), 서대문구(8.84 Km^2), 종로구(7.99 Km^2), 관악구(7.39 Km^2)는 서비스 면적이 높은 행정구로 분석되었다. 즉, 중랑구, 구로구, 금천구 순으로 미세먼지 쉼터 배치가 잘 계획되었음을 알 수 있으며, 송파구, 서초구, 서대문구 순으로 미세먼지 쉼터 배치가 미흡함을 알 수 있다.

4.4 실제 교통망을 고려한 미세먼지 쉼터 배치 분석

비산먼지 발생 공사장의 경우 대기오염물질 배출 사업장과 달리 공사기간이 정해져 있기에 공사기간 동안 일시적으로 농도가 증가할 수 있다. 하지만 Kernel Density를 통한 비산먼지 발생 공사장 밀집 지역이 Kriging 기법을 통한 미세먼지 고농도 지역과 다수 중첩되는 것으로 분석되었다. 따라서 공사장 주변의 생활인구 중 취약계층을 고려한 임시 쉼터의 추가 배치가 필요할 것

으로 판단된다. 추가 쉼터 배치가 필요한 지역을 파악하기 위하여 Network Service Area Analysis를 활용하여 미세먼지 취약계층 대응 대책이 미흡한 지역을 분석하였다. 기존의 연구 방법으로 주로 활용한 Buffer 분석을 할 경우 단순 직선거리로 측정하기에 도시의 건조 환경에 따라 상반되는 결과값을 가져올 수 있다. 따라서 본 연구는 실제 교통망을 고려한 측정 방식인 Network Service Area Analysis를 통하여 미세먼지 쉼터로의 실제 보행 이동 반경을 분석하였으며, 취약계층의 도보 이용을 고려하여 배출 시설물부터 노인의 보행속도에 따른 도보 5분, 10분, 15분 이동 가능 범위를 측정하였다.

4.4.1 비산먼지 발생 공사장 교통망 분석

Network Service Area Analysis를 미세먼지 취약계층인 노인의 보행 속도를 기준으로 5분, 10분, 15분 이동 기준으로 분석했다 (Figure 6). Network Service Area Analysis를 행정구 단위로 분석한 결과로 각 행정구별 도보 N 분 거리 내에 위치한 미세먼지 쉼터의 개수와 비율을 계산했다(Table 4).

비산먼지 발생 공사장을 기준으로 실제 교통망을 통한 N 분 거리 내 쉼터 배치 현황 분석 결과 5분 거리 내 쉼터가 많이 배치된 행정구는 중랑구(7개소)였으며, 강서구(6개소), 구로구(6개소) 강남구(5개소), 노원구(5개소) 순으로 배치되었다. 이와 달리 강북구, 관악구, 광진구, 도봉구, 동작구, 서대문구, 서초구, 성북구, 송파구, 은평구는 5분 내에 이용할 수 있는 미세먼지 쉼터가 존재하지 않았다. 10분 거리 내 가장 많은 쉼터가 배치된 행정구는 중랑구(13개소), 구로구(10개소), 강서구(9개소), 노원구(9개소), 강남구(7개소)이며, 도봉구, 성북구, 송파구, 강북구, 서대문구, 서초구는 10분 거리 내 쉼터가 존재하지 않았다. 또한, 15분 거리 내 가장 많은 쉼터가 배치된 행정구는 강남구(17개소), 중랑구(15개소), 강서구(13개소), 구로구(11개소), 노원구(10개소) 순이며, 도봉구, 성북구, 송파구는 15분 거리 내 미세먼지 쉼터가 존재하지 않았다.

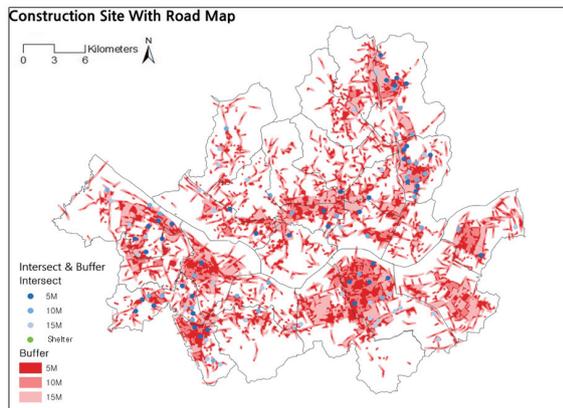


Figure 6. Network service area analysis of construction sites with road map

Table 4. Results of network service area analysis of construction sites

Gu	Number of shelters	Number of Shelters in 5 Min Distance(%)	Number of Shelters in 10 Min Distance(%)	Number of Shelters in 15 Min Distance(%)
Gangnam-gu	20	5 (25%)	7 (35%)	17 (85%)
Gangdong-gu	4	1 (25%)	2 (50%)	3 (75%)
Gangbuk-gu	4	0 (0%)	0 (0%)	1 (25%)
Gangseo-gu	18	6 (33%)	9 (50%)	13 (72%)
Gwanak-gu	4	0 (0%)	1 (25%)	2 (50%)
Gwangjin-gu	3	0 (0%)	1 (33%)	1 (33%)
Guro-gu	16	6 (38%)	10 (63%)	11 (69%)
Geumcheon-gu	10	3 (30%)	4 (40%)	7 (70%)
Nowon-gu	19	5 (26%)	9 (47%)	10 (53%)
Dobong-gu	4	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)
Dongdaemun-gu	3	1 (33%)	1 (33%)	2 (67%)
Dongjak-gu	4	0 (0%)	2 (50%)	4 (100%)
Mapo-gu	4	2 (50%)	2 (50%)	4 (100%)
Seodaemun-gu	2	0 (0%)	0 (0%)	1 (50%)
Seocho-gu	4	0 (0%)	0 (0%)	2 (50%)
Seongdong-gu	4	1 (25%)	2 (50%)	3 (75%)
Seongbuk-gu	4	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)
Songpa-gu	1	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)
Yangcheon-gu	0	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)
Yeongdeungpo-gu	4	1 (25%)	2 (50%)	3 (75%)
Yongsan-gu	4	1 (25%)	1 (25%)	1 (25%)
Eunpyeong-gu	5	0 (0%)	1 (20%)	3 (60%)
Jongno-gu	3	1 (33%)	2 (67%)	2 (67%)
Jung-gu	5	2 (40%)	4 (80%)	4 (80%)
Jungnang-gu	16	7 (44%)	13 (81%)	15 (94%)



Figure 7. Accessible shelters from construction sites (number of shelters)

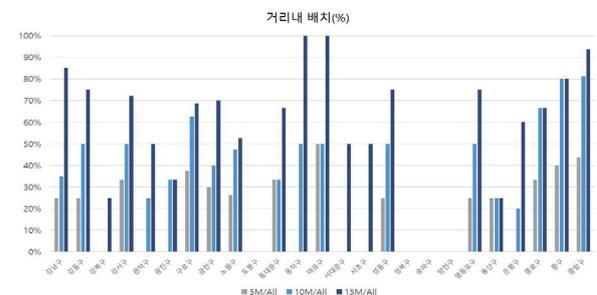


Figure 8. Accessible shelters from construction sites (%)

Figure 7은 행정구 내 비산먼지 발생 공사장으로부터 이동 가능한 미세먼지 쉼터 개소를 나타내며, Figure 8은 단순 미세먼지 쉼터 개소가 아닌 전체 쉼터 중 이동 가능한 쉼터의 비율을 설명한다.

이동 가능한 행정구별 미세먼지 쉼터의 배치는 5분 보행 기준으로 마포구(50%), 중랑구(44%), 중구(40%), 구로구(38%), 강서구(33%) 순으로 높게 나타났으며, 10분 기준으로는 중랑구(81%), 중구(80%), 종로구(67%), 구로구(63%)와 마포구(50%) 순으로 분석되었다. 15분 기준으로는 마포구(100%)와 동작구(100%)가 가장 높았으며, 중랑구(94%), 강남구(85%), 중구(80%) 순으로 미세먼지 대피소가 위치하는 것으로 분석되었다. 즉, 비산먼지 발생 공사장을 고려한 Network Service Area Analysis 분석 결과 중랑구, 강서구, 구로구, 마포구, 중구 순으로 미세먼지 쉼터가 효율적으로 배치되었음을 알 수 있으며, 행정구 내 미세먼지 쉼터가 존재하지 않는 양천구를 포함하여 송파구, 성북구, 도봉구, 강북구, 서대문구 순으로 미세먼지 쉼터 계획이 미흡한 것으로 판단된다.

4.4.2 대기오염물질 배출 사업장 분석

대기오염물질 배출 사업장의 Network Service Area Analysis 결과 비산먼지 발생 공사장과 달리 다수의 미세먼지 쉼터들이 도보 5분, 10분, 15분 이동 가능 범위 외부에 위치함을 확인할 수 있다(Figure 9).

Table 5는 대기오염물질 배출 사업장을 기준으로 노인 보행 속도 기준으로 N 분내 이동 가능 거리에 쉼터가 설치된 현황을 나타낸다. 5분 거리 내 쉼터가 많이 설치된 행정구는 강서구(3개소)였으며, 강남구(2개소), 구로구(2개소), 노원구(2개소), 성동구(2개소), 금천구(1개소), 종로구(1개소) 순으로 결과가 도출되었다. 이외의 행정구에서는 5분 거리 내에 미세먼지 쉼터가 미설치되어 있다. 10분 거리 내 가장 많은 미세먼지 쉼터가 배치된 곳은 강서구(3개소), 금천구(3개소), 노원구(3개소), 강남구(2개소), 구로구(2개소), 성동구(2개소), 중구(2개소) 순으로 배치되었고, 마포구, 서초구, 종로구에

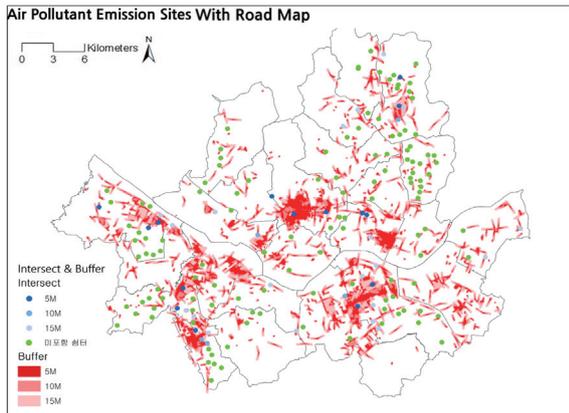


Figure 9. Network service area analysis of air pollutant emission sites

Table 5. Results of network service area analysis of air pollutant emission sites

Gu	Number of shelters	Number of Shelters in 5 Min Distance(%)	Number of Shelters in 10 Min Distance(%)	Number of Shelters in 15 Min Distance(%)
Gangnam-gu	20	2 (10%)	2 (10%)	7 (35%)
Gangdong-gu	4	0 (0%)	0 (0%)	2 (50%)
Gangbuk-gu	4	0 (0%)	0 (0%)	2 (50%)
Gangseo-gu	18	3 (17%)	3 (17%)	5 (28%)
Gwanak-gu	4	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)
Gwangjin-gu	3	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)
Guro-gu	16	2 (13%)	2 (13%)	4 (25%)
Geumcheon-gu	10	1 (10%)	3 (30%)	4 (40%)
Nowon-gu	19	2 (11%)	3 (16%)	5 (26%)
Dobong-gu	4	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)
Dongdaemun-gu	3	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)
Dongjak-gu	4	0 (0%)	0 (0%)	2 (50%)
Mapo-gu	4	0 (0%)	1 (25%)	2 (50%)
Seodaemun-gu	2	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)
Seocho-gu	4	0 (0%)	1 (25%)	1 (25%)
Seongdong-gu	4	2 (50%)	2 (50%)	3 (75%)
Seongbuk-gu	4	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)
Songpa-gu	1	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)
Yangcheon-gu	0	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)
Yeongdeungpo-gu	4	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)
Yongsan-gu	4	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)
Eunpyeong-gu	5	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)
Jongno-gu	3	1 (33%)	1 (33%)	1 (33%)
Jung-gu	5	2 (40%)	2 (40%)	2 (40%)
Jungnang-gu	16	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)

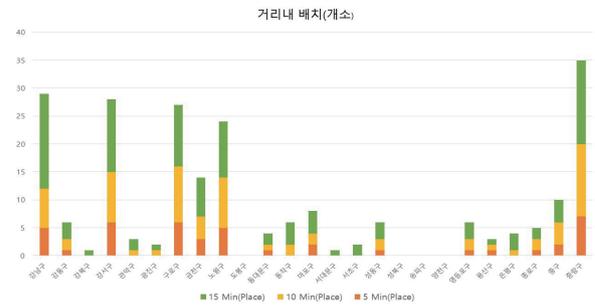


Figure 10. Accessible shelters from air pollutant emission sites (number of shelters)

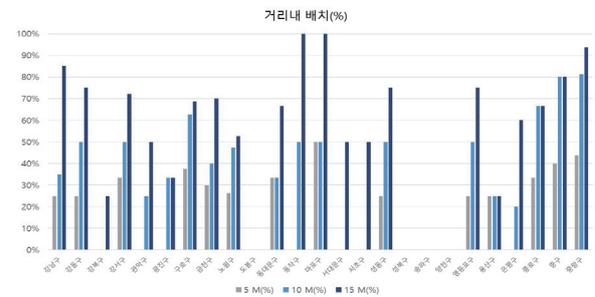


Figure 11. Accessible shelters from air pollutant emission sites (%)

각각 1개소씩 배치되었으며, 그 외의 행정구에는 위치하고 있지 않다. 15분 거리 내 가장 많은 미세먼지 쉼터가 배치된 곳은 강남구(7개소), 강서구(5개소), 노원구(5개소), 구로구(4개소), 금천구(4개소) 순으로 나타났다.

Figure 10은 행정구 내 대기오염물질 배출 사업장으로부터 이동 가능한 미세먼지 쉼터 개소를 나타내며, Figure 11은 전체 쉼터 중 이동 가능한 쉼터의 비율을 설명한다.

분석 결과 도보 5분 보행 가능 거리 기준은 성동구(50%), 중구(40%), 종로구(33%), 강서구(17%), 구로구(13%) 순으로 비중이 높았으며, 10분 기준은 성동구(50%), 중구(40%), 종로구(33%), 금천구(30%), 마포구(25%) 순으로 분석되었다. 15분 기준은 성동구(75%), 강동구(50%), 강북구(50%), 동작구(50%), 마포구(50%)가 순으로 비중이 높게 나타났다. 즉, 대기오염물질 배출 사업장 기준 성동구, 중구, 강서구, 금천구, 노원구 순으로 미세먼지 쉼터가 효율적으로 배치되었음을 알 수 있으며, 행정구 내 미세먼지 쉼터가 존재하지 않는 양천구를 포함하여 송파구, 성북구, 도봉구, 서대문구, 광진구 순으로 미세먼지 쉼터 배치가 미흡한 것으로 판단된다.

Table 6. Analysis of shelter distribution considering living population

Gu	Number of shelters	Vulnerable Living Population (person)			the living population per Shelter (person)		
		AM5-PM12	PM13-PM20	PM21-AM4	AM5-PM12	PM13-PM20	PM21-AM4
Gangnam-gu	20	144,175	143,904	131,882	7,209	7,195	6,594
Gangdong-gu	4	122,720	121,243	125,618	30,680	30,311	31,405
Gangbuk-gu	4	81,491	81,163	85,589	20,373	20,291	21,397
Gangseo-gu	18	125,016	123,743	127,998	6,945	6,875	7,111
Gwanak-gu	4	94,582	94,888	98,676	23,645	23,722	24,669
Gwangjin-gu	3	71,315	72,369	72,058	23,772	24,123	24,019
Guro-gu	16	89,074	88,734	90,983	5,567	5,546	5,686
Geumcheon-gu	10	43,122	43,740	42,991	4,312	4,374	4,299
Nowon-gu	19	128,581	127,307	132,305	6,767	6,700	6,963
Dobong-gu	4	75,348	76,146	77,274	18,837	19,037	19,318
Dongdaemun-gu	3	83,041	83,991	81,031	27,680	27,997	27,010
Dongjak-gu	4	88,356	87,464	91,314	22,089	21,866	22,829
Mapo-gu	4	81,807	82,008	80,296	20,452	20,502	20,074
Seodaemun-gu	2	76,835	75,960	76,390	38,417	37,980	38,195
Seocho-gu	4	115,552	116,094	106,490	28,888	29,024	26,622
Seongdong-gu	4	72,284	72,082	70,876	18,071	18,020	17,719
Seongbuk-gu	4	102,369	101,837	106,051	25,592	25,459	26,513
Songpa-gu	1	162,567	161,674	162,259	162,567	161,674	162,259
Yangcheon-gu	0	91,299	92,065	93,982	-	-	-
Yeongdeungpo-gu	4	89,576	90,738	84,847	22,394	22,684	21,212
Yongsan-gu	4	55,062	54,681	52,027	13,765	13,670	13,007
Eunpyeong-gu	5	110,854	110,154	116,187	22,171	22,031	23,237
Jongno-gu	3	54,158	57,079	45,254	18,053	19,026	15,085
Jung-gu	5	43,746	45,627	32,799	8,749	9,125	6,560

4.5 생활인구를 고려한 미세먼지 쉼터 배치

고농도 미세먼지 분포와 미세먼지 쉼터 분포, 비산먼지 발생시설과 대기오염물질 배출 사업장 분석을 통하여 미세먼지 쉼터의 공간 배치의 형평성 문제 지역을 도출하였다. 하지만 이를 통하여 선정된 지역은 시설의 공간적 분포만을 분석하였으며, 실제 그 주변지역에 생활하는 인구에 대한 분석이 고려하지 않았다. 따라서 보다 현실적이며, 실효성 있는 미세먼지 쉼터 배치를 위해선 취약계층에 대한 고려가 필요하여, 본 연구는 생활인구 중 미세먼지 취약계층에 해당하는 '10세 이하', '65세 이상' 인구를 고려하여 분석을 진행하였다.

2020년과 2021년 시간대별 생활인구 평균값을 아침 시간대인 'AM5 ~ PM12', 낮 시간대인 'PM12 ~ PM20', 밤 시간대인 'PM21 ~ AM4'로 분류하여 분석했으며, 해당 행정구에 위치한 미세먼지 쉼터가 서비스할 수 있는 시간대별 생활인구를 계산하였다(표 6).

분석 결과 송파구, 강남구, 노원구, 강서구에 생활인구가 밀집된 양상을 보이며, 금천구, 중구, 종로구, 용산구, 광진구에서 상대적으로 낮은 밀집도를 보인다. 즉 생활인구 측면에 있어 취약계층이 밀집된 송파구, 강남구에 미세먼지 쉼터가 우선적으로 추가 배치되어야 함을 알 수 있다. 하지만 단순 인구 값만을 통한 접근은 '적은 인구가 인한 서비스 미지원'과 같은 형평성 문제를 야기할 수도 있다. 따라서 본 연구에서는 절대적인 인구가 아닌 상대적 지표인 '개소당 생활인구(명)'를 최종 분석에 활용하였다. '개소당 생활인구(명)' 분석 결과 미세먼지 쉼터가 존재하지 않는 양천구와 송파구, 서대문구, 강동구, 서초구, 동대문구 등에서 개소당 생활인구가 많았으며, 금천구, 구로구, 중랑구, 노원구, 강서구, 중구가 개소당 생활인구가 적음을 알 수 있다. 즉 취약계층에 대한 형평성을 고려한 미세먼지 쉼터를 위해서는 송파구, 서대문구, 강동구, 서초구, 동대문구 등 개소당 생활인구가 높은 행정구에 우선적으로 미세먼지 쉼터를 추가 계획 및 배치하여야 할 것으로 판단된다.

5. 결론

5.1 결론

본 연구는 비산먼지 발생시설과 미세먼지 분포의 관계성을 확인함과 미세먼지 쉼터가 취약계층을 고려하여 비산먼지 발생시설과 대기오염물질 배출 사업장 인근에 공간적으로 적절하게 설치되었는지를 분석하였다. 먼저 Kernel Density를 통한 비산먼지 발생공사장, 대기오염물질 배출 사업장 밀집 지역과 Kriging 기법을 통한 미세먼지 고농도 지역 분석을 분석한 결과 비산먼지 발생시설이 밀집되어 있는 중구, 성동구, 금천구, 강남구, 영등포구, 강서구의 평균적인 미세먼지 농도가 높음을 알 수 있었다. 즉, 비산먼지 발생공사장, 대기오염물질 배출 사업장과 PM10과 PM2.5이 영향

이 있다는 것을 알 수 있었다. 하지만 노원구, 마포구, 양천구, 서초구 등 배출사업장과 공사장이 밀집되지는 않았지만 미세먼지 농도가 높게 나타나는 지역 분석 결과는 다양한 미세먼지의 원인과 비산먼지 발생 요인에 근거한 것으로 판단되었다. 본 연구의 결과는 2007년 기준 미세먼지 고농도 행정구로 주목된 종로구, 노원구, 도봉구, 강서구, 관악구, 송파구, 강동구 보다 많은 행정구가 미세먼지 고농도 지역으로 분석되었다(Hwang, 2018). 이는 도시 내 미세먼지의 영향성이 더 심각해지고 있으며, 효율적인 미세먼지 쉼터의 추가 배치 필요성을 시사한다.

본 연구는 미세먼지 쉼터가 취약계층을 고려하여 설치되었는지에 대한 공간 분석을 통하여 미세먼지 1개소의 서비스 면적 결과를 도출하였다. 그 결과 송파구, 서초구, 서대문구 등의 행정구에서 개소당 서비스 면적이 높게 분석되어 미세먼지 쉼터 배치 및 계획이 잘 이행되지 않았음을 알 수 있었다.

Network Service Area Analysis를 통한 비산먼지 발생시설 주변 미세먼지 쉼터 배치 분석을 통하여 '비산먼지 발생 공사장'의 경우 양천구, 송파구, 성북구, 도봉구, 강북구, 서대문구 등이 미세먼지 쉼터 배치가 미흡한 것으로 분석되었다. 또한 '대기오염물질 배출 사업장' 기준으로는 양천구, 송파구, 성북구, 도봉구, 서대문구, 광진구 등이 쉼터 배치가 미흡한 것으로 분석되어 이는 '비산먼지 발생 공사장'을 기준으로 한 결과와 비슷한 양상을 보였다.

마지막으로 본 연구는 도시에서 시공간적으로 이동하고 있는 생활인구를 고려하여 취약계층 밀집 지역 분석하여 미세먼지 쉼터 계획 및 배치의 효율성을 고찰하였다. 행정구별 취약계층 생활인구를 미세먼지 쉼터의 개소로 나눈 값인 '개소당 생활인구(명)'를 활용한 분석 결과 양천구, 송파구, 서대문구, 강동구, 서초구, 동대문구 등에서 개소당 취약계층 생활인구가 높게 분석되어 미세먼지 쉼터 배치의 형평성 문제가 개선되어야 할 지역으로 판단되었다. 본 연구의 분석 결과를 통하여 취약계층을 위한 미세먼지 쉼터 배치의 공간적 형평성과 효율성을 개선하기 위한 대처 방안은 다음과 같다.

먼저 양천구는 PM10, PM2.5 농도와 배출 시설 밀집의 정도는 양호하지만 미세먼지 쉼터 공급에서 서울시 모든 행정구들 중 가장 미흡하기에 쉼터의 양적 공급 자체를 늘리는 것이 중요하다. 따라서 시공간적 분석을 기반한 미세먼지 농도가 높은 지역과 비산먼지 배출시설이 밀집된 지역에 우선적으로 미세먼지 쉼터를 배치하는 정책이 필요하다. 서초구의 경우 비산먼지 배출 시설 근처에 미세먼지 쉼터가 배치되었지만 PM10, PM2.5의 농도 대비 미세먼지 쉼터의 공급이 부족한 것으로 확인된다. 따라서 PM10, PM2.5 농도가 높은 지역에 추가적인 미세먼지 쉼터가 배치되어야 할 것이다. 서대문구와 송파구의 경우 개소당 취약계층 생활인구가 많은 행정구이며, 특히 인구 밀집 지역인 역사, 공공기관과 같은 지역 주변에 미세먼지 쉼터의 추가 배치가 필요하다. 종로구, 영등포

구의 경우 비산먼지 배출 시설과 관련된 지표는 양호하나 PM10, PM2.5 농도가 높은 것에 비하여 미세먼지 쉼터가 상대적으로 적게 배치되었다. 따라서 서초구와 같이 미세먼지 농도가 높은 지역에 우선적으로 미세먼지 쉼터가 설치되어야 할 것이다. 마지막으로 관악구는 PM10, PM2.5의 농도가 높게 나타났으며, 비산먼지 배출 시설이 밀집되었으나 미세먼지 쉼터 공급 부분에서 개선이 필요할 것으로 판단된다. 따라서 도시계획을 고려한 시설 배치와 미세먼지가 많이 배출되는 시설물 인근에 우선적으로 미세먼지 쉼터를 추가 배치하여야 할 것으로 판단된다.

또한 시공간적 데이터 기반의 미세먼지 쉼터의 계획과 공급뿐만 아니라 '비산먼지 발생 공사장', '대기오염물질 배출 사업장'과 같은 시민들에게 건강상의 피해를 줄 수 있는 비산먼지 배출 시설과 취약계층이 주로 이용하는 복지시설, 어린이집 주변의 미세먼지 완화를 위한 실질적인 대책이 함께 이루어져야 할 것이다. 가로수 식재 같은 그린 인프라스트럭처 계획은 미세먼지 농도 완화에 뚜렷한 효과를 보여주고 있기에 비산먼지 배출 시설과 취약계층 이용 시설 주변에 띠녹지와 같은 소규모의 녹지계획을 통한 미세먼지의 포집과 배출량 감축이 필요하다(Shin et al., 2021). 또한 토지주택공사가 제한한 폭 20m 이상 도로 주변 10m 이상의 녹지 형태와 같은 그린 인프라스트럭처를 도로에 배치하여 도로와 자동차로 인한 비산먼지 발생을 최소화시키는 녹지 정책 역시 필요할 것이다(Lee et al., 2019). 또한 도시 행정적 측면에서의 접근 또한 필요하며, 도시 내 취약계층의 이용 시설인 어린이집, 학교, 노인 요양 시설이 위치한 지역의 비산먼지 배출시설 추가 계획 및 설치 시 행정구와의 미세먼지 배출 완화에 대한 대책 마련과 협력이 필요할 것이다. 효과적인 미세먼지 쉼터의 홍보와 이용을 위하여 행정적 차원에서 '미세먼지 쉼터'에 대한 명칭의 통일성이 필요하다. 미세먼지 쉼터는 각 지자체마다 '미세먼지 쉼터', '미세먼지 대피소', '미세먼지 프리존', '에코쉼터', '그린쉼터' 등으로 홍보되고 있으며, 이러한 통일되지 않은 명칭은 시민들의 시설 이용에 있어 혼란을 불러올 수 있다. 또한 독거노인, 영유아, 어린이 등 취약계층이 밀집된 노인 요양 시설, 어린이집, 학교 주변에서 나타나는 미세먼지로 인한 건강상 악영향과 이에 대한 대처 방법을 포함하는 효율적인 미세먼지 쉼터에 대한 홍보가 이루어져야 할 것이다.

5.2 한계 및 후속연구

본 연구는 미세먼지의 공간적 분석을 위하여 S-Dot 데이터를 사용하였다. 그러나, 연구의 시간적 범위에 해당하는 2년 동안의 평균값을 활용하였기에 행정구별 미세먼지의 농도 차이가 크게 나타나지 않았다. 또한 초기 S-Dot 데이터의 경우 결측치 및 이상치가 다수 발견되었으며, 분석을 위한 이상치를 제거하는 과정이 결과에 영향을 준 부분이 발생하였다. S-Dot 데이터의 경우 대기 측정소 데이터와 달리 행정동 단위의 보다 세밀한 분석이 가능한

장점이 있다. 추후 행정동 단위의 공간 데이터 분석을 통하여 미세먼지 쉼터 분포의 효율성과 형평성에 대한 후속 연구가 이어져야 할 것이다. 마지막으로 생활인구 추정 과정에 있어서의 한계가 추후에 보완되어야 할 것이다. 10세 미만과 65세 이상 인구의 경우 핸드폰을 소지하지 않은 경우가 존재하므로 본 연구에 고려된 생활인구 데이터의 경우 편향적인 분석 결과가 일부 도출된 것으로 판단된다.

이러한 한계점들을 바탕으로 후속 연구에서는 S-DoT 데이터의 이상치 등의 문제점이 개선된 통계분석과 행정구 단위가 아닌 동 단위 이하의 도시 공간 구조 연구를 통하여 도시 내 취약계층에게 필요한 미세먼지 쉼터의 효율적인 계획이 이어져야 할 것이다.

References

- Air Quality Information. <https://cleanair.seoul.go.kr/> (May, 15, 2022).
- AIRKOREA, <https://www.airkorea.or.kr/index> (Aug. 13, 2022).
- Bae, K. W., Park, H. J., Jun, S. M., Jung, J. C. (2018). Evaluating the Location of Tsunami Emergency Shelters for the Children and the Old, *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, 18(1), pp.113–123.
- Cohen, A., Brauer, M., Burnett, R., Anderson, H., Frostad, J., Estep, K., Balakrishnan, K., Brunekreef, B., Dandona, L., Dandona, R., Feigin, V., Freedman, G., Hubbell, B., Jobling, A., Kan, H., Knibbs, L., Liu, Y., Martin, R., Morawska, L., Pope, C., Shin, H., Straif, K., Shaddick, G., Thomas, M., Dingenen, R. A., Donkelaar, A. V., Vos, T., Murray, C. J. L., Forouzanfar, M. H. (2017). Estimates and 25-year trends of the global burden of disease attributable to ambient air pollution: an analysis of data from the Global Burden of Diseases Study 2015, *Lancet* (389), pp. 1907–1918.
- e-index. https://www.index.go.kr/potal/main/EachDtlPageDetail.do?idx_cd=1466. (Aug, 13, 2022).
- Eum, J. I., Kim, H. K. (2020). The Impacts of Industrial Characteristics of Cities on Fine Dust Levels, *Journal of Environmental Science International*, 29(5), pp. 445–455.
- Han, C. W., Kim, S. T., Lim, Y. H., Bae, H. J., Hong, Y. C. (2018). Spatial and Temporal Trends of Number of Deaths Attributable to Ambient PM2.5 in the Korea, *Journal of Korean Medical Science*, 33(30), e193.
- Hur, Y. G., Kang, M. G. (2022). The Effects of Urban Spatial Structure and Meteorological Factors on the High Concentration of Fine Dust Pollution, *Journal of Korea Planning Association*, 57(1), pp. 145–160.
- Hwang, I. C. (2018). Particulate Matter Management Policy of Seoul: Achievements and Limitations, *The Korea Association for Policy Studies*, 27(2), pp. 27–50.
- Kim, D. Y., Choi, M. A., Yoon, B. M. (2019). Analysis of PM Hot-spot Emission Zone in Seoul Metropolitan Area, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 35(4), pp. 476–501.
- Kim, J. S., Kim, S. K., Jin, H. A., Yeo, S. Y., Choi, S. W., Lee, K. M., Lee, H. K., Sul, S. H. (2018). National Air Pollutants Emission, National Institute of Environmental Research.
- Kim, K. T. (2019). Fine Dust Measurement and Control System for Construction Sites Based on IoT-Technologies, *Proceedings of KICEM Annual Conference*, pp. 111–112.
- Kim, W. S., KIM, J. A., Hong, J. S., Jung, J. H., Lee, J.B. (2014). A Study on Establishing PM2.5 Advisory Criteria with Emission Source Management System in Seoul, The Seoul Institute.
- Kim, S. A., Park, J. H., Han, D. Y., Chung, I. J. (2020). The Effects of Fine Dust on Children's Health: The Moderating Effects of Poverty and Green Area Ratio. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, 20(1), pp. 163–171.
- Lee, E. Y., Yun, E. J., Kim, M. N., Lee, E. Y. (2019). Improvement of Green Buffer Zone Function for Reduction of Particulate Matters in Urban Area, Land and Housing Institute.
- Ministry of Environment, (2019). Fine Dust Fact Check: Fine Dust! Ask me anything.
- Ministry of Legislation, <https://www.law.go.kr/> (Aug. 13, 2022).
- NOAA. (2002). Strategic Research Plan for Particulate Matter, Air Quality Research Subcommittee of the Committee on Environment and Natural Resources.
- OECD. Stat, https://stats.oecd.org/Index.aspx?DataSetCode=EXP_PM2_5. (Mar, 15, 2022).
- Park, G. C., Kim, Y. S. (2020). A Study on the Characteristics and Utilization of Collected Smart Seoul Data of Things(S-DoT), Seoul Digital Foundation.
- Shin, Y. E., Park, J. S., Kim, S. Y., Lee, S. W., An, K. J. (2021). A Study on Green Space Location Selection to Reduce Particulate Matter by Projecting Distributions of Emission Source and Vulnerable Groups, *Journal of the Korean Society of Environmental Restoration Technology*, 24(1), pp. 53–68.

Sim, H. Y., Ju, B. L., Yun, S. J. (2020). A Study on Heat Wave Vulnerability Mapping Based on Efficiency and Equity: Focusing on an Optimum Location Choice for Coolingfog in Seoul, *Seoul Studies*, 21(4), pp. 41–63.

WHO. (2013). Health Risks of Air Pollution in Europe: HRAPIE project.

Yu, H. J., Han, K. Y., Kwak, K. S., Kim, J. S., Yang, K. Y. (2004). A Study on the Actual Condition and Effect of Dust Scattering in Construction Field, *Journal of the Korea Institute of Building Construction*, 4(4), pp. 109–115.

Yun, S. B, Kim, S., Ju, S., Noh, J., Kim, C., Wong, M. S., Heo, J. (2020). Analysis of Accessibility to Emergency Rooms by Dynamic Population from Mobile Phone Data: Geography of Social Inequity in South Korea, *PLoS ONE*, 15(4), pp. e0231079.