

지자체의 대기환경정책수립 지원을 위한 미세먼지 위험지도 작성과 공간해석

Particulate Matter Hazard Mapping and Spatial Interpretation to Support Local Government Air Quality Policy Making

배민기* · 이태영** · 이채연***

Minki Bae · Taeyoung Lee · Chaeyeon Yi

요약: 본 연구의 목적은 미세먼지의 위험을 조작적으로 정의하고 공간분석을 기반으로 위험지도를 작성하는 것이다. 본 연구는 미세먼지를 대상으로 배출량 지수, 농도지수, 정체지수, 저감지수를 도출한 후, 4개의 지수를 통합하여 위험도를 산정한 후 100×100m 격자기반의 위험지도를 작성하였다. 분석결과, 청주시는 바람 유입지역이면서 도로 및 비도로 이동오염원이 많고 산업단지가 입지해 있는 지역의 위험도가 높은 것으로 나타났다. 본 연구결과, 위험지역으로 도출된 지역은 1) 미세먼지 집중관리구역을 지정을 위한 후보지로 검토될 수 있다. 2) 미세먼지 계절제 및 비상저감조치 시기에 교통 체계 개선정책을 시행할 수 있다. 3) 지자체의 환경계획 수립 시 공간환경계획에 적용할 수 있으며 국도환경통합관리의 근거 자료로 활용할 수 있다. 위험지역의 위험저감을 위해 대기 흐름을 고려한 녹지 및 수변공간 확충, 미세먼지 저감을 위한 다양한 시설 및 설비설치, 주민 건강영향 최소화를 위한 지원 등이 필요하다. 본 연구는 지자체 대기환경정책 수립에 기여할 수 있을 것이며, 연구방법은 여타 지자체에서도 활용할 수 있을 것이다.

핵심주제어: 미세먼지 배출량, 미세먼지 농도, 대기정체, 집중관리구역, 공간분석

Abstract: The purpose of this study was to operationally define the hazard of particulate matter (PM) and create a hazard map based on spatial analysis. To do so, the study derived the emission index, concentration index, stagnation index, and reduction index for PM and then calculated the hazard level by integrating the four indices, creating a 100×100m grid-based hazard map for Cheongju City. The analysis showed that downwind areas containing industrial complexes and with a high number of road and non-road mobile sources of pollution had higher risk levels. As a result of this study, the area identified as a hazardous area can be considered as 1) a candidate for designation as a PM intensive management area. 2) Various transport system improvement measures can be applied to the hazardous area during the implementation of the fine dust season system and emergency reduction measures. 3) It can be applied to spatial environmental planning when formulating a local government environmental plan and can be used as a basis for integrated national environmental management. Moreover, to reduce the risk of hazardous areas, it is necessary to expand green and water areas with consideration of airflow, install various facilities and equipment to reduce particulate matter, and provide appropriate support to minimize the health impact on residents. This study can contribute to the establishment of air environment policies in local governments, and the research method can be used by other local governments.

Key Words: Particulate Matter Emissions, Air Congestion, Particulate Matter Congestion, Intensive Management Area, Spatial Analyst

* 주저자, 충북연구원 수석연구위원

** 교신저자, 충청북도 재난안전연구센터 전문연구원

*** 공동저자, 한국외국어대학교 대기환경연구센터 책임연구원

I. 서론

미세먼지를 비롯한 대기오염물질은 세계보건기구가 인간건강에 가장 큰 환경 위협 중 하나로 지목한 대표적인 건강 위해요인이다(권은진·김환철·김영일, 2023). 우리 국민도 우리나라가 직면한 중요한 환경문제 중 하나로 인식하고 있으며(심창섭 등, 2022), 재난 및 안전관리 기본법에 황사는 자연재난, 미세먼지는 사회재난으로 지정되어있다.

근래 생활환경, 안전, 건강 등 삶의 질을 결정하는 여러 요인에 대한 국민의 가치 인식이 높아지면서 미세먼지 관리에 대한 중요성은 갈수록 커지고 있다. 더구나 최근 대기환경은 미세먼지 저감 뿐만 아니라 온실가스 감축 및 기후위기 적응과 연계되면서 관리의 필요성이 더욱 강조되고 있다(대기환경보전법 제11조; 기후위기 대응을 위한 탄소중립·녹색성장 기본법 제 8, 10, 38조).

이에 따라 국가에서는 대기환경개선 종합계획과 더불어 2020년 4월에 대기관리권역의 대기환경개선에 관한 특별법을 제정 및 시행했으며, 체계적·광역적 대기오염원 관리를 위한 권역별 대기환경개선 시행계획을 수립 및 추진하였다. 특히, 미세먼지의 경우 2019년 2월 미세먼지 저감 및 관리에 관한 특별법 시행과 국가 미세먼지 관리 종합계획 수립 및 시행을 위한 시·도별 세부 시행계획 수립 등을 통해 집중적으로 관리하고 있다. 하지만, 꾸준한 대기환경 개선 노력에도 불구하고 (초)미세먼지 및 대기오염물질 노출에 대한 국민의 불안감과 정책요구는 지속되고 있으며, 소각시설 및 유해화학물질 배출시설로 인한 주민건강영향 우려도 끊이지 않고, 체감도 개선을 위해 지역적인 특성을 반영하여야 한다는 지적도 계속되고 있는 실정이다.

상기한 대기환경 관련 계획 내 세부 시행사업들도 국가와 지자체 모두 제도적 기반 마련, 사업장 배출관리, 이동오염원 대책, 생활오염 대책, HAPs 관리라는 큰 틀에서 미세먼지 배출원별 배출량을 줄이는 유사 사업들로 이루어져 있다(환경부, 2022). 물론, 미세먼지 개선사업이 지자체마다 상이할 필요는 없으며, 전국 단위의 획일적인 사업이 더욱 효과가 클 수도 있지만, 지역

내 미세먼지 배출 사업체 및 배출량 특성, 미세먼지 농도특성, 바람 정체 특성, 취약계층 특성 등이 반영된다면 더욱 실효적인 맞춤형 대기환경 관리계획이 수립될 수 있을 것이다.

특히, 2022년 12월에 발표된 제3차 대기환경개선 종합계획에서 과거 대기오염물질별 배출량 관리 중심의 정책에서 벗어나 국민건강 보호를 최우선으로 한 건강위해성 개선이 핵심 목표로 제시되었다는 것은 향후 대기환경 관리정책 목표, 사업방향, 성과지표, 관련 평가 및 분석방법 등의 전환을 요구한다는 점에서 큰 의미가 있다.

즉, 기존에는 통계표와 그래프로 일정 기간의 대기오염물질별 배출량 변화추이를 분석하거나 특정 대기오염원 전체 배출량 중 상세 오염원별 배출량 비율을 파악하면 계획이나 정책 수립이 가능했지만, 이러한 방법은 향후 대기오염물질과 건강위해성 간의 관계를 해석하는데 활용하기에는 분명한 한계가 있다는 것이다.

이처럼 건강위해성을 고려한 대기환경 관리계획·정책 수립 및 사업발굴을 위해서는 미세먼지라는 위험과 영향을 받는 국민이라는 수용체와의 공간관계를 파악하는 것이 필수적이다. 하지만, 아직까지 건강위해성은 대부분 대기오염 사업체 수, 대기오염원별 발생량, 취약계층 수와 같은 단편적인 통계자료를 기반으로 이루어져 검토되어 왔을 뿐, 공간분석을 기반으로 한 접근은 부족한 실정이다.

향후 대기환경관리 정책방향이 국민의 건강위해성을 개선하는 것으로 전환되었다는 점을 고려할 때, 미세먼지 위험을 공간지도화하고 해석하는 방안을 모색하는 것은 중요한 연구주제라고 판단된다.

따라서, 본 연구는 미세먼지 위험을 조작적으로 정의하고 청주시를 대상으로 미세먼지 위험지도를 작성한 후 지자체에서 대기환경계획 및 정책수립 시 접목할 수 있는 방안을 제시하고자 한다. 본 연구에서 제시된 연구방법은 여타 지자체에서도 적용할 수 있을 것이다.

II. 이론 및 선행연구 고찰

1. 대기환경의 위험에 대한 고찰

미세먼지는 배출원으로부터 직접 발생되거나, 질소산화물이나 이산화황 등 가스상 물질로부터 2차적으로 발생된다. 2013년 세계보건기구는 미세먼지를 1군 발암물질로 규정하였다(WHO, 2013). 일반적으로 환경성질환이라고 지칭되는 비염, 천식 등 질환이 미세먼지가 초래하는 대표적인 질환으로, 소아 및 노약자들이 취약하며, 다양한 합병증을 야기하고, 건강한 성인이라도 오염물질이 오랜 기간 축적되면 만성적인 질환으로 이어질 수 있다(서형준·이형석, 2019). 미국과 유럽에서는 대기환경기준 초과지역에 거주하는 대기오염 노출위험인구를 주기적으로 산정하고 있으며, 노출위험인구 저감을 환경정책의 목표로 삼고 있다(EPA, 2014; EEA, 2015; 배현주·이승민·정다운·이종태·박주영, 2017). 이를 봤을 때, 대기환경이 중요한 건강위해요인 중 하나이며, 얼마나 노출되었는지가 위험수준을 결정하는 중요한 지표임을 알 수 있다.

한편, 황승식 등(2019)는 미세먼지 노출농도를 산정하기 위해 기상장 모델링, 배출량 모델링, 화학수송 모델링을 적용하였다. 정광륜(2000)은 울산지역의 대기환경 위험지역을 도출하기 위해 대기오염 배출량, 대기확산 모델링 및 인구수에 따른 배치 등을 활용하였고, Jeon, Cho, and Zhu (2018)은 미세먼지 농도 패턴과 이에 영향을 미치는 요인을 파악하기 위해서 미세먼지 농도자료를 연평균하여 미세먼지 농도를 산출하였다. Yoo and Park (2007)은 공간의사결정을 위해 배출량, 오염농도 등을 고려한 확산모델링을 통해 대기질 모니터링 분석을 수행한 바 있다. 특히, 농도에 영향을 주는 대기정체는 외부로부터 유입된 미세먼지가 쉽게 빠져나가지 못하게 하여 고농도의 미세먼지 현상을 유발하고 이는 호흡기 및 순환계 질환을 유발할 수 있다(Tai, Mickley, and Jacob, 2010). 상기한 연구들 볼 때, 대기오염 물질의 농도와 공기정체는 대기환경의 위험수준에 영향을 주는 요인으로 이해할 수 있다.

한편, 미세먼지와 녹지 공간과의 관계에 대한 연구도 이루어졌다. 도시 녹

지 공간은 나뭇잎의 먼지흡착 특성에 의해 미세먼지를 효과적으로 제거하여 미세먼지 농도가 감소하는 등 대기질을 개선할 수 있으며(Lei, Davies, Jin, Tian, and Kim, 2021; Chen, Liu, Zou, Yang, and Zhang, 2016; Zhang and Ma, 2022; 김원주·우수영·윤초롱·곽명자, 2018; 산림청, 2018). 녹지비율이 높은 곳에서 미세먼지의 위험도가 낮은 것으로 나타났다(김지태 등, 2023; 김평래·박찬열, 2021; 허유경·강민규, 2022). 국립산림과학원(2017)에 따르면, 수종과 산림형태에 따른 미세먼지 저감효과 등 각 수종의 미세먼지 흡수량은 침엽수가 활엽수보다 약 1.3배 많은 양의 미세먼지를 흡착하며, 여과능력이 높은 것으로 분석되었다. Chen et al.(2022)는 공간분석을 활용해 초미세먼지와 녹지 공간간에 유의미한 상관관계가 있다는 것을 규명하였다. 수종에 따라 미세먼지의 흡착량이 다르며, 활엽수보다는 침엽수에서 흡착량이 높았다(권선주·차승주·이주경·박진희, 2020; Liu et al., 2018; Chen et al., 2017). Liang et al.(2016)은 수목개체당 기준으로 침엽수가 활엽수보다 미세먼지 흡착능이 더 크다는 것을 규명하였다. 상기 연구결과를 볼 때, 녹지가 부족하면 미세먼지의 위험이 커지는 것으로 이해할 수 있다.

고찰결과, 대기환경의 위험은 오염물질에의 노출, 농도, 공기정체, 녹지면적 면적 등에 영향을 받는다는 것을 알 수 있었고, 노출이 심할수록, 농도가 높을수록, 정체가 되어 축적될수록, 녹지면적이 적을수록 위험 수준도 높다고 판단할 수 있었다. 다만, 기존의 연구에서는 연구대상지 별, 노출·농도·녹지·정체 등 각 요인별로 접근하였을 뿐 이를 동시에 고려한 연구는 거의 없었다.

2. 대기환경 정책과 공간분석

대기환경정책 수립의 과학적 근거가 되는 대기측정망 자료는 최근 개소가 대폭 늘어났음에도 아직 광역 단위의 상세 대기 정보를 산출하거나 대기질 개선을 위한 대기오염 방지대책 및 친환경적 도시계획 정책을 수립하는 근거로 활용하기에는 부족하여 이를 보완할 수 있는 효율적·과학적인 대기오염 지도 제작이 필요하다(신동훈·조상필·Moriyama·Takebayahi·이규석, 2011; 김대욱·손경수·백상훈, 2019). 대기환경정책 수립을 위해서는 대기오염물

질에 대한 시공간적 분석이 중요하지만 대부분의 연구들은 지점자료들을 평균화하여 해당 지역의 대푯값으로 활용하고 있다(이진욱·변종윤·황승현·전창현·백종진, 2022). 최근 공간분석 방법이 확대되고 있는데 정종철(2018)과 정예민·조수빈·윤유정·김서연·김근아(2021)은 보간법을 활용하여 미세먼지의 공간 분포를 분석한 바 있다. 또한, PM10의 시공간적 변동성 분석을 위해 역거리가중법을 활용하여 공간보간을 진행하고, 이를 통해 도출된 자료를 활용해 웨이블릿 분석을 통해 주기적 변동성을 진행한 연구(이진욱 등, 2022)가 있다. 김동영 등(2019)는 대기오염물질 배출이 미치는 영향력을 도출하기 위해 공간 모델링을 통해 대기오염물질의 상세한 공간적 배출 양상을 분석하였다. 이를 위해 연구대상지를 가로×세로 250m 크기의 격자체계를 설정하고, CAPSS 배출량을 사용하여 각 배출원별로 격자 단위 배출량을 분석한 바 있다. 한편, 대기오염물질과 농도와의 관계를 도출하기 위한 연구도 활발하게 진행되고 있다. 신영규·이종천·윤형두·김부경·이영기(2018)는 Kriging과 IDW 기법 등 공간보간법을 활용하여 대기오염물질의 공간환경정보지도를 구축하여, 대기오염물질의 공간분포 특성을 파악하였다. 김근한·강선아·한지현(2020)는 우리나라 전체 시군구를 대상으로 국토환경성평가지도의 환경생태적 평가 등급 결과와 대기오염물질 별 시군구 평균 농도의 상관분석을 통해 보전과 관리의 중요성을 강조하였다.

고찰 결과, 기존의 연구들은 다양한 공간 및 통계분석을 통해 대기오염 배출량과 농도의 공간 분포지도를 만들고 대기오염과 대기질 간의 관계분석 등을 시도하였음을 알 수 있었다. 하지만 아직까지 구체적으로 미세먼지의 위험을 어떻게 정의할 것인지? 어떻게 지도화할 것인지?에 대한 축적된 이론과 합의된 방법론은 미흡한 실정임을 알 수 있었다.

따라서 본 연구에서는 기존 연구에서 활용했던 대기오염 배출량 및 측정망별 농도자료를 공간에 나타내는 연구방법을 활용하되 좀 더 상세한 격자로 처리하였고, 여러 위험 요인을 중첩하여 하나의 위험지도를 만들고자 하였다.

III. 연구방법론

1. 조작적 정의

앞서 고찰한 대기환경의 위험과 공간화에 대한 이론 및 선행연구 고찰 결과, 미세먼지의 위험은 단순히 발생량과 농도에 따라 결정되는 것이 아니라, 공기의 정체 수준과 녹지면적에 따라서 영향을 받는다는 것을 알 수 있었다. 물론 미세먼지 농도 수치가 수렴된다고 볼 수 있지만, 본 연구는 공간적인 측면에서 위험지도를 작성하고자 하였기 때문에 이를 하나의 독립된 변수로 선정하였다.

따라서, 본 연구에서는 미세먼지의 위험을 미세먼지의 배출량이 많은 곳일수록 위험하다, 미세먼지 농도가 높은 곳일수록 위험하다, 미세먼지가 정체된 곳일수록 위험하다, 미세먼지를 흡착할 수 있는 녹지가 적을수록 위험하다라고 결정하였고, 4개 기준을 중첩했을 때 가장 위험수준이 높게 나타난 곳일수록 위험하다고 정의하였다.

〈그림 1〉 연구의 흐름 및 분석 틀



2. 연구대상지

본 연구는 충청북도 청주시를 대상으로 분석을 진행하였다. 분지인 청주시는 공기와 바람의 흐름이 정체돼 도심 내 미세먼지의 배출이 어려우며, 중국을 비롯한 충남, 수도권, 개별입지가 대부분인 제조업체가 밀집된 음성군과 진천군 등 외부에서 다량의 대기오염물질이 유입되고 있다. 더불어 유해

화학물질 누출우려가 있는 오창산업단지를 비롯하여 산업단지가 지속적으로 늘어나고 있고, 전국 폐기물 소각량의 20%이상을 처리하는 소각장과 증가하는 생물성 연소 배출원 등 대기환경 관리 필요성이 높은 지역이다. 최근 충북지역 초미세먼지 평균 농도가 2019년 $28\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 21-23년 연속 $20\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 줄어들고 있으나 전국에서 최고 수준이며, 국립환경과학원(2023)에 따르면 2008년부터 2017년까지 청주시 미세먼지 농도는 전국에서 가장 높았다. 상기한 여건을 고려할 때, 미세먼지 위험성에 대한 공간적인 해석을 시도하는데 있어 연구대상지로 적합하다고 판단된다.

3. 자료의 수집 및 분석방법

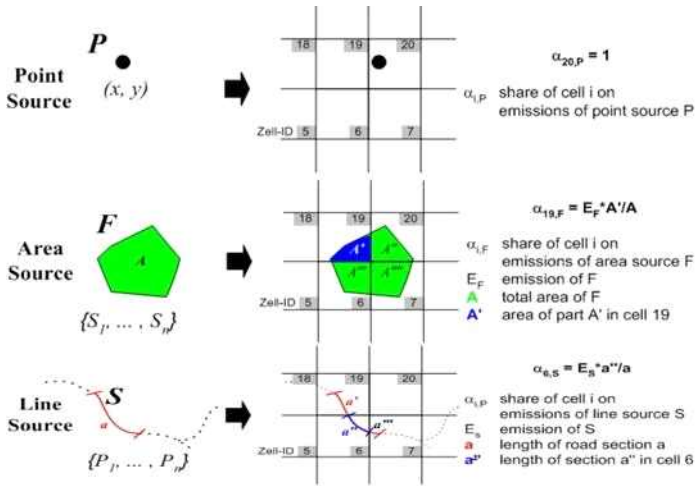
1) 미세먼지 배출지수

미세먼지 배출은 경제, 산업 활동 등 활동 지표의 취합 및 분석이 필요하며, 각 자료들의 증첩 및 계산 등과 같은 공간 분석을 통해 배출량의 공간적 분포를 파악할 필요가 있다. 미세먼지 배출 파악을 위해서 환경부에서 제공하는 대기정책지원시스템(Clean Air Policy Support System, CAPSS) 자료를 활용하였다. CAPSS 자료는 광역자치단체(시도별), 기초 자치단체(시군구별), 읍면동, 격자($1\text{km} \times 1\text{km}$) 단위로 점(Point)·선(Line)·면(Area) 오염원별로 구분하여 제공하고 있다. 미세먼지는 배출원 특성에 맞게 관련 공간정보를 활용하여 공간 DB를 구축할 수 있으며, GIS 모델링과 공간할당을 통해 기존 자료를 더 세분화할 수 있기 때문에 본 연구에서는 100m 격자망을 활용하였다(〈그림 2〉 참조). 배출량을 격자화하기 위해 공간적 특성 i 에 따른 배출량 $x(\text{emission}_x)$ 에 격자 내 공간적 값(value_x)에 대한 비율을 적용하여 산출하였다(EEA, 2016; 김동영 외, 2019)(수식 (1) 참조).

$$\text{emission}_{ix} = \text{emission}_t \times \frac{\text{value}_{ix}}{\sum_{jx} \text{value}} \quad (1)$$

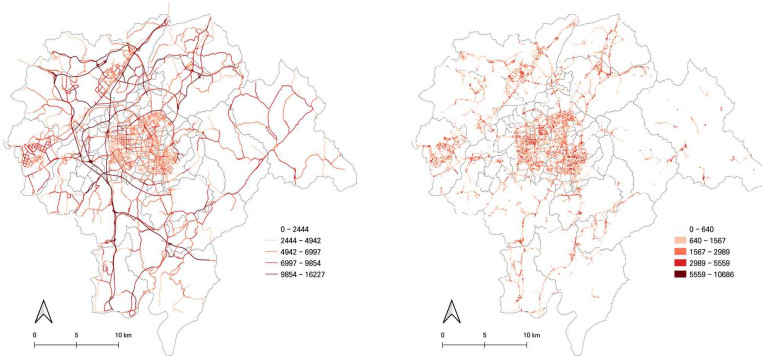
점배출원은 에너지산업 연소, 비산업 연소, 제조업 연소 등 주로 배출시설에서 배출되기 때문에, 환경부 국가미세먼지정보센터에서 제공하는 대기배출원 관리시스템(Stack Emission Management System, SEMS)을 활용하였다. SEMS 자료에서는 사업장의 배출시설 주소를 제공해주기 때문에 주소를 지오코딩(GeoCoding)하여 위치좌표로 변환하고, 변환된 좌표값을 격자에 직접 할당하였다.

〈그림 2〉 격자망 배분 개념도



자료: EEA(2016)

〈그림 3〉 청주시 연평균 교통량



〈청주시 연평균 교통량 현황〉

〈연평균 교통량 격자망 배분〉

선배출원은 도로이동오염원, 비도로이동오염원, 비산먼지 등 주로 도로망도에서 배출되어 교통량을 활용할 필요가 있기 때문에 청주시 교통 빅데이터 플랫폼에서 제공하는 노드(Node)와 링크(Link)를 활용하여 격자에 배분되는 도로 길이의 비율 및 도로에 할당된 교통량을 격자에 할당하였다(〈그림 3〉 참조).

면배출원은 농업, 생물성 연소 등 소규모 배출시설 및 토지이용 현황 등에서 생성되기 때문에 도시계획 또는 토지피복도를 격자에 배분되는 면적의 비율로 할당하였다.

2) 미세먼지 농도지수

농도지수 산출을 위해 한국환경공단에서 제공하고 있는 에어코리아(Air Korea)를 통해 측정데이터를 활용하였으며, 청주시 내의 측정소가 균일하게 분포되어 있지 않아 타 지자체(대전광역시, 세종특별자치시, 충청남도, 경상북도)에 설치된 측정망을 포함해 총 48개를 활용하였다.

농도지수 지도화를 위해 지형통계적 기법 중 하나인 GIS 보간법을 활용하여 지도를 작성하였다. 보간법은 일반적으로 결정론적 방법(Deterministic Methods)과 지형통계적 방법(Geostatistical Methods)로 구분된다. 결정론적 방법은 확률 이론을 사용하지 않고, 각 셀 주변 값의 평균을 이용하여 값을 추정하며, 지형통계적 방법은 자기 상관을 포함하는 통계 모델로 주변 값과의 거리뿐만 아니라 주변에 이웃한 각 측정 값 사이의 상관강도를 반영하여 전체적인 경향을 파악하는데 유리하다.

결정론적 방법과 지형통계적 방법 모두를 활용하기 위해 역거리 가중 보간법(Inverse Distance Weighted, IDW)와 크리깅 보간법(Kriging)을 실시하였다. 보간법 분석 결과 IDW 보간법보다 Kriging 보간법이 더 낮은 값을 나타내었고, 대기분야에 보간법을 적용한 연구 결과(김준현 등, 2010; 조홍래·정종철, 2007; 김효정·조완근, 2012)에서 Kriging 보간법이 IDW 보간법보다 상대적으로 정밀한 것으로 나타나 Kriging 보간법을 활용하여 격자망으로 배분하였다.

3) 미세먼지 정체지수

대기의 흐름과 확산을 모의하기 위해, WRF-Chem(Weather Research and Forecasting Model coupled with Chemistry)모델과 PALM(Parallelized Large eddy simulation Model)모델을 이용하여 다중규모 모델링 체계를 구축하였다. WRF-Chem 모델은 중규모 기상모델인 WRF 모델에 대기질 모델링이 가능한 화학과정을 포함시킨 모델이며, 대기질 예측과 모의를 위한 배출량 산정과정, 물질의 수송과 확산, 에어로졸 화학, 기체상 화학과정 등을 포함하고 있다. 기상 변수와 화학종 변수를 동시에 계산이 가능하기 때문에 기상과 화학 상호 작용의 모의가 가능하다. 에어로졸 화학 메커니즘으로는 GOCART(Global Ozone Chemistry Aerosol Radiation and Transport model)을 사용하였으며(Chin et al., 2000), 기체상 화학 메커니즘은 RACM(Regional Atmospheric Chemistry Mechanism)을 사용하여 18개 화학종(SO₂, NO₂, NO, O₃, HNO₃, H₂O₂, NH₃, N₂O₅, NO₃, CO, CO₂, CH₄, HO, HO₂, Hydrophobic Black Carbon, Hydrophilic Black Carbon, Hydrophobic Organic Carbon, Hydrophilic Organic Carbon)을 적용하였다(Stockwell et al., 1997).

PALM 모델은 Radiation, Land Surface, Urban surface, Chemistry, Aerosol model 들을 내장하고 있어 다양한 규모의 기상, 기후 현상, 복사, 도시지역 에너지, 식생, 토양 에너지, 대기화학적 수송 반응 등의 다양한 현상에 대한 복합적인 조사와 분석이 가능하다. 버전 6.0을 이용하였으며, 대기화학반응, 식생의 증산작용, 대기복사, 지면 및 건물벽면의 에너지교환 등의 모듈을 적용하였다.

모델을 적용하는 첫 번째 영역으로는 한반도 영역, 두 번째 남한을 포함하는 영역, 세 번째 충북·충남·대전·세종을 포함하는 영역, 네 번째 청주시를 포함하는 영역으로 구성하여 순차적으로 모의하였다. 첫 번째 영역부터 세 번째 영역까지는 WRF-Chem 모델을 이용하였고, 네 번째 영역은 PALM 모델을 접합하여 이용하였다. 이 다중규모 수치모델 체계를 활용하여 최종적으로 100m 해상도의 청주시 일대 대기 흐름과 미세먼지 확산 모델링을 실시

하였다. 청주시를 포함하는 네 번째 영역을 상세 모의하기 위해서는 보다 실제와 유사한 지표면 조건 반영이 필요한데, 이를 위해 수치표고모형, 토지피복도, 3차원 가시화모델 및 건물통합정보, 임상도를 활용하여 지형고도, 토지유형, 건물높이, 식생밀도 등의 모델 입력자료를 생성하였다. 이 다중규모 수치모델 체계를 활용하여 연중 평균적인 기상상황 적용, 대기의 흐름 현황을 파악하여 대기 정체지역을 도출하였다.

4) 미세먼지 저감지수

본 연구에서는 그린 인프라 구성에 따른 대기오염 저감지수를 분석하였다. 각 수종별 흡수량을 고려하기 위해, 국립산림과학원(2017)에서 도출된 분석결과를 활용하여, 침엽수 1.3, 활엽수 1, 침엽수와 활엽수가 혼합되어있는 혼효림은 1.15의 가중치를 고려하였다. 도출된 가중치를 활용하기 위해 격자망에 배분된 산림의 면적을 계산하고, 가중치를 곱해 대기오염 저감지수를 각 격자망에 배분하였다.

5) 미세먼지 위험지수

미세먼지 위험지도 작성을 위해 앞서 분석을 통해 도출된 각 배출량, 농도, 정체, 저감지수를 중첩하였다. 본 연구는 정확한 배출량, 흡착량을 선정하는 것이 목표가 아니라 위험한 정도를 구분하는 것이 중요하다. 따라서 배출량이 많을수록, 농도가 높을수록, 공기가 정체될수록, 녹지가 적을수록 위험하도록 방향성을 고려하여 최소-최대 정규화(Min-Max Normalization) 과정을 거쳐 0~1까지의 값으로 단위를 통일하였다. 그 후 각 지수별 결과를 모두 동일한 가중치 1로 가정하고 중첩하여 미세먼지 위험지도를 작성하였으며, 값이 클수록 미세먼지 위험이 높다고 판단할 수 있다(수식 (2) 참조).

$$\text{미세먼지 위험지수} = \sum X_{\text{Normalization}} (em + con + sta + eco) \quad (2)$$

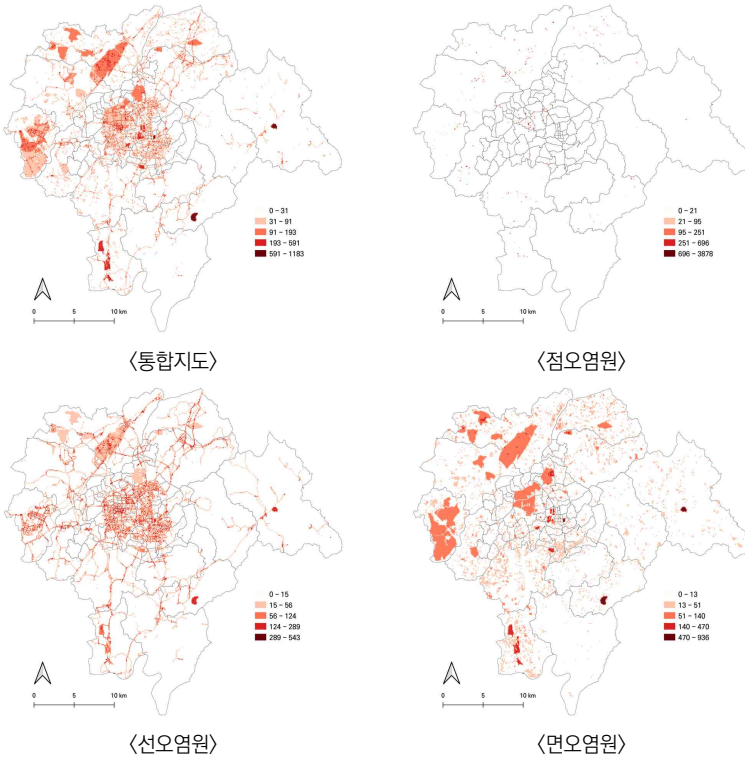
여기서, em: 배출지수, con: 농도지수, sta: 정체지수, eco: 저감지수

IV. 분석 및 고찰

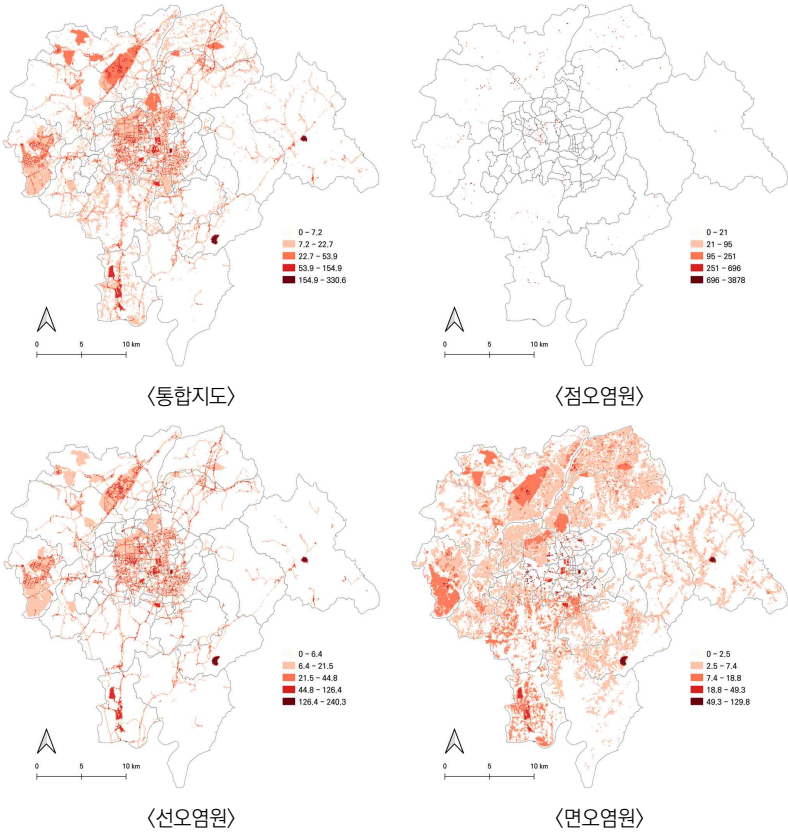
1. 미세먼지 배출지수 분석

청주시의 점오염원 분석결과 대부분 1~5종 대기오염 배출시설로서 청주에서 발전소 및 산업시설 등이 밀집된 송정동과 대규모 산업단지가 위치해 있는 오창읍과 옥산면에서 상대적으로 높게 도출되었다.

〈그림 4〉 미세먼지 배출지수 분석결과(PM10)



〈그림 5〉 미세먼지 배출지수 분석결과(PM2.5)



선오염원은 주로 도로의 비산먼지에 의해 인위적으로 발생하기 때문에 이 동오염원 특성상 도로 위주에서 도출되었으며, 특히 교통량이 많은 청주시 흥덕구 일원 및 각 도로의 교차로와 최근 인구 및 교통량이 증가하고 있는 오송읍과 오창읍 등에서 미세먼지 배출이 많은 것으로 나타났다.

면오염원으로 발생하는 미세먼지는 현재 산업단지가 위치해있거나 향후 산업단지가 계획되어있는 곳 위주로 배출되었으며, 송정동과 복대동 등에 위치한 청주산업단지와 생명과학단지로 계획된 오송읍, 과학산업단지로 계획된 오창읍에서 집중되어 있는 것으로 나타났다(〈그림 4〉, 〈그림 5〉 참조).

배출지수 분석결과, 점·면오염원은 산업단지에 의한 영향이 상대적으로

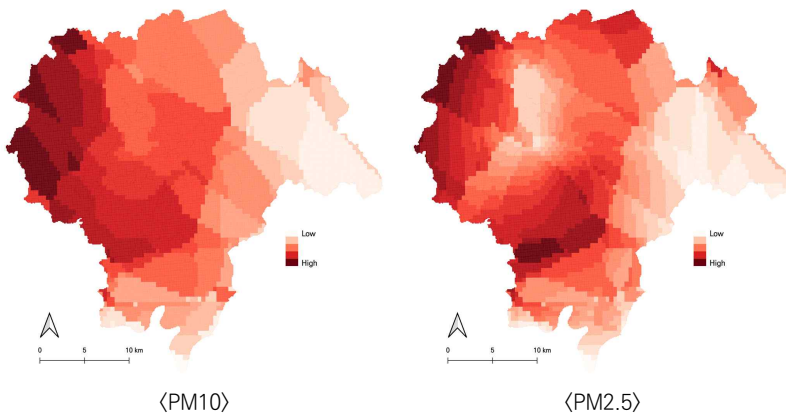
크며, 선오염원은 이동오염원 배출이 많은 도로와 비산먼지 발생률이 높은 산업단지에서 배출량이 높았다. 대기환경계획 수립시 각 오염원 배출특성과 도시계획시설의 입지와의 관계를 고려할 필요가 있다고 판단된다.

2. 미세먼지 농도지수 분석

미세먼지 농도지수는 산업단지가 위치한 북대동과 송정동 등에서 높게 나타났다. 또한, 충청남도 천안시의 산업단지와 인접해 있는 청주시 북서쪽 지역, 산업단지 및 화물정차역이 있는 세종시 부강면에 인접한 남서쪽 지역, 공장이 많이 입지해 있는 옥산면 근처에 미세먼지 농도가 높게 도출되었다(〈그림 6〉 참조).

다만, 농도지수는 측정소의 개수와 위치에 직접적으로 영향을 받기 때문에 향후 주요 배출원인 산업단지 근처, 인구 밀집과 이동이 많은 상업시설 및 주거지역 등에 추가 측정소 설치가 필요하다고 판단된다.

〈그림 6〉 미세먼지 농도지수 분석결과

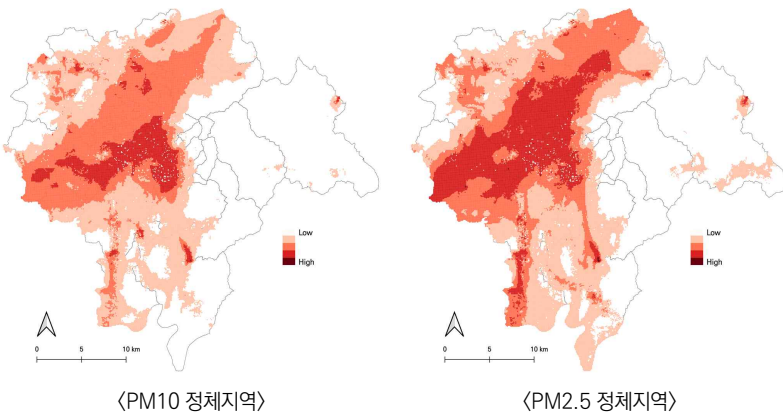


3. 미세먼지 정체지수 분석

정체지수는 청주시 지형적인 특성에 상대적으로 영향을 많이 받아 고도가

낮은 청주시 도심과 서쪽이 상대적으로 미세먼지 정체가 심한 것으로 나타났다(〈그림 7〉 참조). 청주시는 우암산을 비롯한 동쪽이 서쪽보다 높은 동고서저의 지형을 가지고 있기 때문에 미세먼지 외부 유입 시 지형이 낮은 서쪽에 정체가 되는 특성을 가지고 있다. 또한, 청주시 중심지역은 용도지역 상 주거지역 및 상업지역으로서 건물의 높이와 밀집도가 높아 바람이 빠져나가기 어렵기 때문에 미세먼지 정체지수가 높게 도출되었다고 판단된다. 따라서 대기 확산에 도움이 되는 바람길 숲의 도입이 필요하며, 도심으로 미세먼지가 유입되어 정체가 되지 않도록 청주시 북서쪽에는 산업단지를 비롯한 대기오염물질 배출원은 추가하지 않는 것이 바람직하다고 판단된다.

〈그림 7〉 미세먼지 정체지수 분석결과

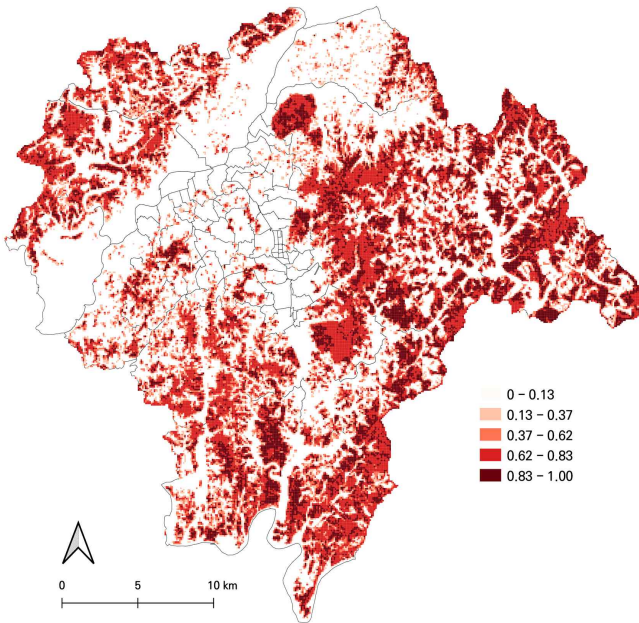


4. 미세먼지 저감지수 분석

저감지수 분석에 사용된 수종별 분포현황은 토지피복도에 영향을 받기 때문에 녹지비율이 높은 외곽이 중심지역보다 상대적으로 저감지수가 높게 도출되었다(〈그림 8〉 참조). 이는 청주시가 2014년 통합된 도농복합도시로서 과거 청원군이었던 외곽에 산림지역이 많았기 때문이다. 최근 청주시는 도시공원 일몰제 시행에 대비해 25개 공원을 개발하는 등 도심 내 344만3천78㎡에 달하는 공원과 녹지를 확보 중이기 때문에 도심내 미세먼지 저감여건은

좋아질 것으로 판단된다. 추후 공원녹지 계획을 통해 미세먼지 차단과 저감을 할 수 있도록 주요 발생원과 인접하여 공원과 녹지가 조성되도록 유도할 필요가 있다.

〈그림 8〉 미세먼지 저감지수 분석결과

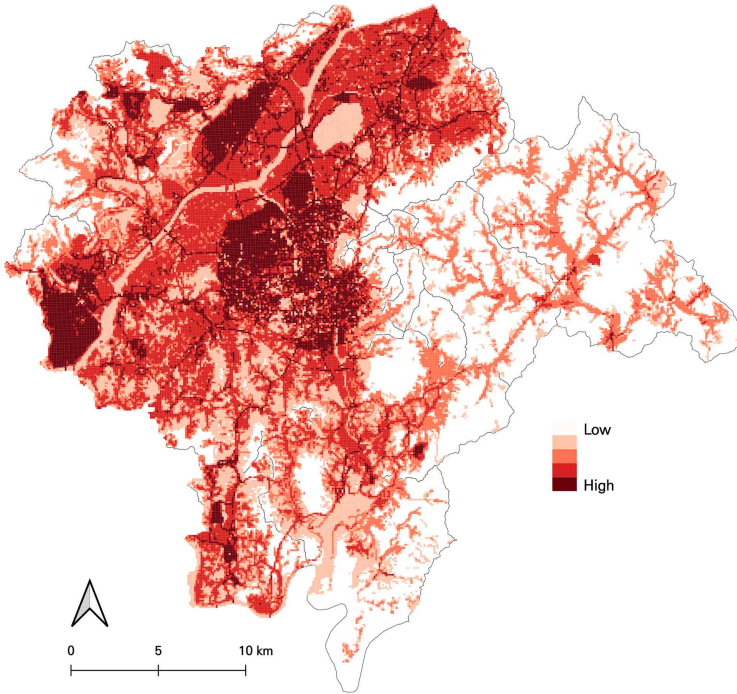


5. 미세먼지 위험지도 및 분석

앞서 배출, 농도, 정체, 저감지수를 종합한 위험지도를 분석한 결과, 청주시 중에서 산업단지 및 신규 도시개발지역인 흥덕구의 미세먼지 위험도가 높은 것으로 나타났다. 청주시의 주 풍향이 남서풍임을 고려할 때, 흥덕구는 도심으로 오염물질을 확산시킬 수 있는 길목에 위치하고 있어 더욱 집중권리가 필요한 지역이다. 세부적으로 보면, 청주시 사천동, 복대동, 오송읍의 위험도가 상대적으로 높았다. 또한, 경부·중부 고속도로가 지나가는 청주시 북부와 오창읍도 위험한 지역으로 도출되었다. 반대로 용암동 일대는 대기 흐름이

원활하며, 녹지면적이 넓어 위험도가 낮게 나타났다.

〈그림 9〉 청주시 미세먼지 위험지도



V. 결론

1. 연구의 의의

5년마다 수립하는 광역도 단위의 대기환경개선 관련 계획에서는 현실적으로 기초지자체의 지역 특성을 충분히 반영할 수 없다. 하지만, 미세먼지에 대한 주민들의 관심이 높기 때문에 기초지자체에서는 해마다 미세먼지 대응 정책을 수립하고 관련 사업을 발굴·시행하고 있다.

합리적인 미세먼지의 대응정책 수립을 위해서는 여러 가지 과학적 근거들이 필요하지만 대부분의 기초지자체에서는 담당 공무원을 중심으로 CAPSS를 비롯한 행정구역 단위의 오염원별 배출량 자료와 측정망 농도자료만을 근거로 정책을 수립하고 있다. 해당 년도에 해당 지자체의 배출원별 발생량이 얼마이며, 여타 지자체에 비해 얼마나 많고 적은지, 최근 얼마나 변하고 있는지 하는 것이 정책 수립 근거의 전부라고 해도 과언이 아니다. 현실적으로 매년 많은 비용과 시간을 들여 전문가들을 활용한 미세먼지 모의와 같은 과학적 근거 마련이 어렵기 때문이다. 여러 대기과학 모델을 활용한 모의들 시도하더라도 대부분 해당 지자체의 미세먼지 발생량이 어디에서 유입되었는지를 분석하는데 주로 활용될 뿐 기초지자체의 미세먼지 대응 정책 및 사업시행에 직접적인 도움이 된다고 보기는 어렵다. 특히, 대기환경정책은 오염물질이 얼마나 발생했는가?도 중요하지만, 어디서 발생한 것인가?와 같은 라는 공간적인 분석을 통한 시사점 도출이 반드시 필요하다.

이에, 본 연구는 기초지자체의 합리적인 대기환경정책 수립에 도움이 될 수 있는 과학적 근거자료를 구축함에 있어 가능한 비용과 시간을 아끼면서 언제든지 수집이 가능한 기존의 통계 및 측정망 자료를 기반으로 공간적인 측면에서 미세먼지의 발생 실태와 문제점을 파악하고 좀 더 실효성 있는 정책 수립 및 사업 추진에 도움을 줄 수 있는 위험지도를 만들고자 하였다는데 의의가 있다고 할 수 있다.

2. 정책적 시사점 및 한계

현재 지자체의 대기환경 정책은 대부분 행정구역 단위로 집계되어 있는 대기오염 배출업소별 배출량, 오염원별 배출량, 측정망의 농도자료를 기반으로 수립되고 있다. 하지만 건강영향 최소화를 목표로 하는 대기환경정책 기조로 전환되었음을 고려할 때 대기환경의 위험을 지도화하는 방안에 대한 논의가 반드시 필요하다. 따라서 본 연구는 미세먼지를 대상으로 배출지수, 농도지수, 정체지수, 저감지수를 도출하여 위험을 조작적으로 정의하고 청주시를 대상으로 100×100m 격자 기반의 위험지도를 작성하였다. 위험지도

분석결과, 청주시는 바람 유입지역이면서 도로 및 비도로 이동오염원이 상대적으로 많은 산업단지 및 도시개발계획 지역인 흥덕구, 사천동, 복대동, 오송읍, 오창읍의 미세먼지 위험도가 높은 것으로 나타났다. 여기서 위험도가 높다는 것은 해당 지역이 연구대상지인 청주시내에서 상대적으로 미세먼지 발생량이 많고, 농도가 높으며, 공기 정체가 발생하며, 녹지가 부족한 공간이라는 의미이다. 기본적으로 본 연구결과 위험성이 높은 지역을 도출된 지역은 지자체의 미세먼지 대응 정책 수립 및 사업 시행에 있어 우선지역으로 고려될 필요가 있다.

본 연구결과는 다음과 같이 활용될 수 있다. 먼저, 위험지역으로 도출된 지역은 미세먼지 저감 및 관리에 관한 특별법 제 22조에 명시된 집중관리구역을 지정을 위한 후보지로 검토될 수 있다. 추가로, 위험지역 중에서 지역내 어린이·노인 등이 이용하는 시설이 집중된 지역은 오송읍과 복대동 지역이다. 집중관리구역으로 선정된 지역을 대상으로는 대기환경보전법 제3조에 따른 대기오염도의 상시 모니터링, 살수차·진공청소차의 집중 운영, 어린이 등 통학차량의 친환경차 전환, 수목 식재 및 공원 조성 등을 우선적으로 시행할 필요가 있다. 더불어, 해당 지역내 입지한 배출량이 많은 시설이나 기업에 대해 배출 저감 노력에 따라 경제지원이나 기술지원과 같은 인센티브 제공을 검토할 필요가 있다.

둘째, 질소산화물(NOx)과 초미세먼지 등 유해 대기오염물질의 배출량을 감소시키는 것을 목표로 초저배출구역(Ultra Low Emission Zone) 구역을 설정할 때 활용할 수 있으며, 미세먼지 계절제 및 비상저감조치 시기에 노후차량 운행 제한이나 요금부과 등 교통 체계 개선정책을 시도할 수 있다.

셋째, 본 연구에서 활용한 연구방법은 지자체의 환경계획 수립 시 공간환경계획에 적용할 수 있으며 국토환경통합관리의 근거 자료로 활용할 수 있다. 기존의 지자체 환경계획내 대기분야의 공간자료는 대부분 대기측정망 및 대기오염물질 배출업소의 위치지도 정도에만 국한되어 있었으나 본 연구에서 제시된 배출량 지도, 농도 지도, 대기 정체지도, 위험지도 등을 추가로 공간환경계획 수립 시 활용할 수 있을 것이다.

본 연구에서 위험지역으로 도출된 지역의 위험저감을 위해 추가적으로 시도해 볼만 사업들로는 첫째, 위험지역은 공기정체로 인한 위험이 높은 공간이기 때문에 다양한 녹지공간 확보를 위한 도시계획적 접근이 필요하다. 우선적으로 청주시내의 건물높이과 배치형태를 감안한 바람길 분석을 통해 깨끗한 공기가 유입될 수 있도록 바람길 숲을 조성할 필요가 있다. 또한, 주요 배출원으로부터의 미세먼지 차단 기능 강화를 위해 벽면 및 옥상녹화, 공원 녹지 등 미세먼지 흡수·흡착 지역을 확대할 필요가 있다. 더불어, 대기오염 물질인 황산화물(SO_x)과 질소산화물(NO_x) 저감에 효과적인 도심내 수변공간의 확대를 위해서 자연기반해법 중 하나인 저영향 개발(LID) 사례를 적극적으로 늘일 필요가 있다.

둘째, 지자체는 위험지역을 중심으로 미세먼지 여과·집진을 위한 CMA(Calcium Magnesium Acetate)와 광촉매 도료도포, 스모그 프리타워, 습식 스크리버, 창호부착형 환기시스템, 미세먼지 쉼터 등 적재적소에 미세먼지 저감을 위한 다양한 시설 및 설비설치를 지원할 필요가 있다.

셋째, 위험지역 주민들을 대상으로 실제 미세먼지 체감도 파악, 실시간 일상 생활속 미세먼지 정보제공을 위한 측정망 및 안내판 추가, 주요 배출원에 대한 감시, 특화 사업발굴, 건강 행동실천 교육을 위한 거버넌스 구축 지원 등이 필요하다.

본 연구는 사례지역을 대상으로 한 것이기 때문에 결론의 일반화에 한계가 있으며, 청주시 내 측정소가 균일하게 분포되어 있지 않고, 타 지자체의 측정값을 보간법으로 사용하였다 하더라도 결과의 신뢰성에 영향을 줄 가능성이 있다.

향후 연구에서 위험의 개념을 확장해 볼 수 있으며, 이때 대기오염의 유입과 확산정보를 추가하는 방안을 찾아볼 필요가 있다. 또한, 미세먼지 위험도와 민감·취약집단과의 공간적 분석을 통해 수용체 중심의 대기환경정책으로의 전환에 필요한 시사점들을 도출할 필요가 있다. 더불어 미세먼지 외에 여타 대기오염물질에 대한 위험도 평가 및 지도화를 시도하고 통합하는 과정도 논의될 필요가 있다.

■ 참고문헌 ■

- 국립산림과학원, 2017, “산림의 공익기능 계량화 연구.”
- 국립환경과학원, 2023, “2022 대기환경연보.”
- 권선주·차승주·이주경·박진희, 2020, “가로수 수종별 잎의 미세먼지 축적량 및 금속 원소 함량 평가,” 『응용생명화학회지』, 63(2), pp.161-168.
- 권은진·김환철·김영열, 2023, “미세먼지로 인한 건강영향 저감을 위한 중재연구 동향,” 『주간 건강과 질병』, 16(21), pp.652-664.
- 김근한·강선아·한지현, 2020, “환경생태적 평가 등급과 대기오염물질 농도와의 상관관계 분석,” 『한국지도학회지』, 20(1), pp.107-115.
- 김대욱·손경수·백상훈, 2019, “GIS 기반 대구시 대기오염지도 구축에 관한 연구,” 『대구 경북연구』, 18(3), pp.25-47.
- 김동영·최민애·윤보미, 2019, “수도권 미세먼지 집중배출지역 분석,” 『한국대기환경학회지』, 35(4), pp.476-501.
- 김원주·우수영·윤초롱·곽명자, 2018, “그린인프라의 미세먼지 저감효과 분석과 확대 방안,” 『서울연구원』.
- 김준현·최진호·김충실, 2010, “GIS를 활용한 이산화탄소 농도 보간 정확도 비교평가,” 『환경영향평가』, 19(6), pp.1-10.
- 김지태·엄권욱·여상구·조희지·우수영·이종규·동종인, 2023, “도시지역 공원 수목 분포에 따른 초미세먼지(PM-2.5) 오염도 특성 변화 분석,” 『한국대기환경학회지』, 39(3), pp.283-293.
- 김평래·박찬열, 2021, “서울 청량리 교통섬과 홍릉숲의 미세먼지 특성과 저감효과 평가,” 『한국환경생태학회지』, 35(5), pp.569-575.
- 김효정·조완근, 2012, “배출량 분포에 따른 대구시 일산화탄소 측정망 위치의 적절성 평가,” 『한국공간정보학회지』, 20(2), pp.25-34.
- 배현주·이승민·정다운·이종태·박주영, 2017, “수용체 중심의 환경정책 활용을 위한 대기오염의 노출위험인구 산정 연구,” 『한국환경연구원 정책보고서』.
- 산림청, 2018, “미세먼지 저감 및 품격 있는 도시를 위한 그린 인프라 구축방안.”
- 서형준·이형석, 2019, “대기오염물질이 환경성질환에 미치는 영향: 수도권 지역의 자치구 및 시·군을 중심으로,” 『서울도시연구』, 20(3), pp.39-59.
- 신동훈·조상필·M.Moriyama·H.Takebayashi·이규석, 2011, “친환경 도시계획을 위한 도시기후지도 작성에 관한 연구,” 『서울도시연구』, 12(1), pp.1-16.
- 신영규·이종천·윤형두·김부경·이영기, 2018, “국토환경연동제 지원을 위한 정밀공간 환경정보지도 작성 기법 연구(VI),” 『국립환경과학원』.
- 심창섭·공성용·이승민·최기철·한진석·정은혜·공지영·정예민·나건수·강연석·조승희, 2022, “미세먼지 통합관리 전략 수립 연구,” 『한국환경연구원 사업보고서』.

- 이진욱·변종윤·황승현·전창현·백종진, 2022, “격자 기반 공간보간 기법을 활용한 국내 PM10 자료의 시공간적 변동성 분석,” 『한국방재학회논문집』, 22(1), pp.7-19.
- 정광륜, 2000, “울산지역의 대기환경 측정망 배치기법 연구,” 『울산대학교 대학원 석사 학위 논문』.
- 정예민·조수빈·윤유정·김서연·김근아, 2021, “베리오그램 최적화 기반의 정규크리깅을 이용한 전국 에어코리아 PM10 자료의 일평균 격자지도화 및 내삽정확도 검증,” 『대한원격탐사학회지』, 37(3), pp.379-394.
- 정종철, 2018, “서울시 PM10과 PM2.5의 공간적 분포 변이분석,” 『환경영향평가』, 27(6), pp.717-726.
- 조홍래·정종철, 2007, “공간보간기법을 이용한 환경자료의 지도화,” 『한국공간정보시스템학술회의 논문집』, pp.273-279.
- 허유경·강민규, 2022, “도시공간구조와 기상요인이 계절별 고농도 미세먼지 발생에 미치는 영향에 관한 연구,” 『국토계획』, 57(1), pp.145-160.
- 환경부, 2022, “제3차 대기환경개선 종합계획.”
- 황승식·구운서·정해관·김선영·최정순·노주환·윤희영·이정범·김종현·황명재·반경훈·송인상·장대일·강다연·최현호·장유진·강성찬·정소화·김난이·이영복, 2019, “우리나라 미세먼지 등 대기오염 건강영향 연구 및 건강영향 지도 구축 최종보고서”, 『서울대학교 산학협력단』.
- Chen. L., Liu. C., Zou. R., Yang. M., and Zhang. Z., 2016, “Experimental examination of effectiveness of vegetation as bio-filter of particulate matters in the urban environment,” 『Environmental Pollution』, 208, pp.198-208.
- Chen. L., Liu. C., Zhang. L., Zou. R., and Zhang. Z., 2017, “Variation in Tree Species Ability to Capture and Retain Airborne Fine Particulate Matter (PM2.5),” 『Scientific Reports』, 7(1), pp.1-11.
- Chen. Y., Ke. X., Min. M., Zhang. Y., Dai. Y., and Tang. L., 2022, “Do We Need More Urban Green Space to Alleviate PM2.5 Pollution? A Case Study in Wuhan, China,” 『Land』, 11(6), DOI:10.3390/land11060776.
- Chin. M., B. Rood. R., Lin. S.J., Müller. J.F., and Thompson. A., 2000, “Atmospheric sulfur cycle simulated in the global model GOCART: Model description and global properties,” *Journal of Geophysical Research*, 105, pp.24671-24687.
- EEA, 2015, “Air Quality in Europe,”
- EEA, 2016, “Spatial Mapping of Emissions,”
- EPA, 2014, “Health Risk and Exposure Assessment for Ozone,”
- Jeon, C. W., Cho, D., and Zhu, L., 2018, “Exploring the Spatial Heterogeneity of Particulate Matter (PM10) using Geographically Weighted Ridge Regression (GWRR),” 『Korean Cartographic Association』, 18(3), pp.91-104.

- Lei. Y., Davies. G.M., H. Jin, G. Tian., and Kim. G. W., 2021, "Scale-dependent effects of urban greenspace on particulate matter air pollution," 『Urban Forestry & Urban Greening』, 61, DOI:10.1016/j.ufug.2021.127089.
- Liang D., Ma. C., Wang. Y., and Chen-Xi. Z., 2016, "quantifying pm2.5 caputer capability of greening trees based on leaf factors analyzing," 『Enviromental Science and Pollution Research』, 23, pp.21176-21186.
- Liu. J., Zhang. R., Liu. H., Duan. J., Kang. J., Guo. Z., Xi. B., and Cao. Z., 2018, "Assessing the particulate matter removal abilities of tree leaves," 『Journal of Visualized Experiments』, 140, DOI:10.3791/58026.
- Stockwell. W., Kirchner. F., Kuhn. M., and Seefeld. S., 1997, "A new mechanism for regional atmospheric chemistry modeling," Journal of Geophysical Research, 102, pp.25847-25879.
- Tai, A. P., Mickley, L. J., and Jacob, D.J., 2010, "Correlations between fine particulate matter (PM_{2.5}) and meteorological variables in the United States: Implications for the sensitivity of PM_{2.5} to climate change," 『Atmospheric Environment』, 44, pp.3976-3984.
- WHO, 2013, "IARC: Outdoor Air Pollution a Leading Environmental Cause of Cancer Deaths."
- Yoo, E. C. and Park, O.H., 2007, "Optimization of Air Quality Monitoring Network in Busan using a GIS-based Decision Support System," 『Journal of Korean Society for Atmospheric Environment』, 23(5), pp.526-538.
- Zhang. R. and Ma. K., 2022, "New Prospects to Systematically Improve the Particulate Matter Removal Efficiency of Urban Green Spaces at Multi-Scales," 『Forests』, 14(2), DOI:10.3390/f14020175.

배민기: 충북연구원 문화산업연구부 수석연구위원으로 근무하고 있다. 주요 연구분야로는 기후변화, 도시안전, 기후변화적응 등이다(mkbae@cri.re.kr).

이태영: 충청북도 재난안전연구센터 전문연구원으로 근무하고 있다. 주요 연구분야로는 공간분석, 공간불평등, 재난 취약지 분석 등이다(young@cri.re.kr).

이채연: 한국외국어대학교 대기환경연구센터 책임연구원으로 근무하고 있다. 주요 연구분야로는 도시 미기상 미기후 관측과 모델 개발을 기반으로 하여, 도시 상세 열 바람, 도로살얼음 예측, 폭염 및 한파 건강영향 등의 융합 정보 개발이다(prpr2222@hufs.ac.kr).

투 고 일: 2024년 04월 29일
심 사 일: 2024년 06월 01일
게재확정일: 2024년 12월 08일