



도시공간구조와 기상요인이 계절별 고농도 미세먼지 발생에 미치는 영향에 관한 연구^{*,**}

The Effects of Urban Spatial Structure and Meteorological Factors on the High Concentration of Fine Dust Pollution

허유경^{***} · 강민규^{****}

Hur, Yoo-Gyeong · Kang, Min-Gyu

Abstract

Despite various institutional efforts to reduce fine dust, high concentrations of particulate matter are becoming more frequent especially in winter and early spring. In this study, using data collected from 57 cities in the Seoul metropolitan area, we derived and analyzed meteorological and urban spatial structure factors that affect the high concentrations of fine dust. We conducted multiple regression analyses using seasonal average PM₁₀ concentration as the dependent variable. Also, we developed count data models with the number of seasonal PM₁₀ bad (or worse) days as the response variable. We found a strong correlation between these factors as follows: (1) the green areas in the city had a negative effect on the concentration of fine dust from both spring and winter regression models, whereas the number of construction permits had a positive effect and (2) the average temperature during the spring had a positive effect on the number of PM₁₀ bad (or worse) days from Poisson analysis and negative binomial models. Moreover, each rise in temperature by 1°C resulted in a 1.15 times increase in PM₁₀ bad (or worse) days. To the best of our knowledge, this is the first study comprehensively analyzing the interrelation between meteorological factors, urban spatial structure, and particulate matters using both multiple regression and count data analyses. In further studies, testing more fine-grained data may result in improved analytic models for estimating the factors affecting high concentrations of fine dust.

주제어 미세먼지, 기상요인, 도시공간구조, 다중회귀분석, 가산자료분석

Keywords PM₁₀, Meteorological Factors, Urban Spatial Structure, Multiple Regression Analysis, Count Data Analysis

1. 서론

1. 연구의 배경 및 목적

최근 미세먼지로 대표되는 심각한 대기오염 문제에 관해 각계에서 우려의 목소리가 높다. 국민 건강에 지대한 영향을 미치는

대기오염이라는 점에서 시민들을 비롯하여 언론, 정부, 각 지자체가 큰 위기의식을 가지고 이에 대처해 오고 있다(한혁 외, 2017; 황인창, 2018). 특히 서울시를 비롯한 여러 지자체들은 2000년대 이후 심각해진 미세먼지 문제에 대응하기 위해 다양한 정책을 펴 왔고, 이에 따라 미세먼지(PM₁₀), 초미세먼지(PM_{2.5}) 농도는 지속적으로 개선되고 있는 추세다(서울시 2002년 PM₁₀

* 이 논문은 2021년도 서울시립대학교 기초·보호학문 및 융복합 분야 R&D 기반조성사업에 의하여 지원되었음.

** 본 연구는 2021년도 한국도시행정학회 상반기 학술대회에서 발표한 내용을 수정·보완하여 작성하였음.

*** Doctorate Candidate, Department of Urban Administration, University of Seoul (First Author: ykhur21@gmail.com)

**** Assistant Professor, Department of Urban Administration, University of Seoul (Corresponding Author: mgkang23@uos.ac.kr)

농도 $76\mu\text{g}/\text{m}^3$, $\text{gPM}_{2.5}$ 농도 $40\mu\text{g}/\text{m}^3$, 2018년 PM_{10} 농도 $40\mu\text{g}/\text{m}^3$, $\text{PM}_{2.5}$ 농도 $23\mu\text{g}/\text{m}^3$). 그럼에도 미세먼지에 대한 국가적·사회적 위기감과 공포는 크게 해소되고 있지 않다. 이는 미세먼지 평균 농도가 꾸준히 개선되고 있음에도 ‘나쁨’ 일수는 오히려 증가하는 등 고농도 미세먼지의 발생이 빈번해졌기 때문이다. 서울시 (2019)에 의하면 특히 최근 5년 사이 미세먼지 농도 수준이 가장 나빴던 2016년의 경우 나쁨 일수가 73일에 달해 그 정점을 찍었고, 이후 그 수준이 점차 개선되고 있지만 여전히 나쁨 일수는 60일 내외에서 개선되지 않고 있다. 또한 2019년 1월에서 3월에는 비상저감조치 12회, 예비저감조치 3회가 시행될 정도로 대기질 여건이 크게 악화되기도 하였다(서울시, 2019). 이러한 서울시의 미세먼지 농도 및 좋음과 나쁨 일수 추세를 <그림 1>, <그림 2>를 통해 확인할 수 있다.^{1),2)} 평균적인 미세먼지 농도는 점진적으로 개선되고 있으나, 비상저감조치를 시행해야 할 만큼 고농도 미세먼지의 잦은 발생으로 인해 대기오염의 심각성은 크게 개선되지 않고 있는 것으로 나타난다.

고농도 미세먼지는 계절로 볼 때 주로 겨울과 초봄에 발생하고 있다. 여러 선행연구를 통해 고농도 미세먼지 발생에 영향을 미치는 계절적 요인들을 검토한 결과, 대기상태, 기온, 풍속, 습도 등의 기상요인을 확인할 수 있었다(박기형·이병규, 2013; 박일

수, 2016; 오혜련 외, 2014; 이승민·허창희, 2013; 이현주 외, 2018; Cho et al., 2021; Lee et al., 2011). 한편 미세먼지와 같은 심각한 대기오염 문제를 비롯해 도시에서 발생하는 여러 환경 문제를 분석한 연구 중 다수가 도시공간구조와 대기환경 문제를 연계하여 분석하고 있었다. 기존 연구들을 살펴보면, 이들 연구는 크게 대기오염(김승남 외, 2009; 김희재·전명진, 2014; 서원석·김리영, 2013; 오규식 외, 2005; 이연수·손동욱, 2015; 이원도 외, 2011; 최열 외, 2007; Clark et al., 2011; Jung et al., 2019; Rodriguez et al., 2016), 대기오염 중 특히 미세먼지(오규식·정희범, 2007; 최태영 외, 2018; Kim, 2020; Park and Ko, 2018), 온실가스 및 탄소배출(김인현 외, 2011; 유운진 외, 2012; 장명준 외, 2012; 정재형·권오열, 2015) 등에 주목하고, 각 변수 간의 영향 관계를 규명하고자 하였다. 미세먼지는 인구와 산업시설이 집중해 있는 도시 지역에서 농도가 높아 의료비 증가, 노동생산성 저하, 민간소비 위축과 같은 여러 사회경제적인 문제의 원인이 된다(이해춘 외, 2018). 선행연구들을 통해 확인해 본 바, 도시공간구조의 특성 역시 온실가스 및 탄소배출과 마찬가지로 도시의 미세먼지 수준에 영향을 미칠 것으로 판단된다.

본 연구에서는 그간 다양한 노력을 통해 미세먼지 농도가 개선되고 있음에도, 고농도 미세먼지 발생이 오히려 빈번해지는 상황에 주목하였다. 전술하였듯 고농도 미세먼지는 계절적으로 겨울과 초봄에 많이 발생하고 있으며, 미세먼지 ‘나쁨’과 ‘매우 나쁨’ 일수를 기준으로 측정되고 있다. 미세먼지에 관한 기존 연구들은 대부분 미세먼지 농도를 종속변수로 하는 다중회귀분석을 통해 수행되었고, 고농도 미세먼지 발생빈도를 대상으로 하는 연구는 거의 수행되지 않았다. 따라서 본 연구에서는 미세먼지 농도를 종속변수로 하는 다중회귀분석과 함께 미세먼지 ‘나쁨’과 ‘매우 나쁨’ 일수를 종속변수로 하는 가산자료분석을 진행하여 미세먼지 발생 메커니즘을 종합적으로 규명하고자 한다. 특히 본 연구는 고농도 미세먼지 발생이 주로 겨울과 초봄에 집중되어 있음을 감안하여, 계절별로 고농도 미세먼지 발생에 영향을 미치는 기상요인과 도시공간구조 요인을 실증적으로 분석하였다. 이를 통해 향후 도시계획 및 정책 수립에 있어 미세먼지 대응과 관련하여 고려해야 할 시사점을 제시하고자 한다.

2. 연구의 범위 및 방법

연구의 공간적 범위는 인구와 산업이 집중되어 있어 미세먼지 문제가 특히 심각한 수도권, 즉 서울시, 인천시, 경기도를 대상으로 하였다. 전국과 수도권 및 서울시의 미세먼지 농도 추이는 <그림 3>³⁾을 통해 확인할 수 있다. 시간적 범위는 최근 5년 내 미세먼지 농도 수준이 가장 나빴고, 미세먼지 나쁨 일수도 가장 많았던 2016년을 대상으로 하였다.

종속변수는 미세먼지 오염수준으로 PM_{10} 평균 농도와 PM_{10} 나

The annual trend of fine dust concentration in Seoul

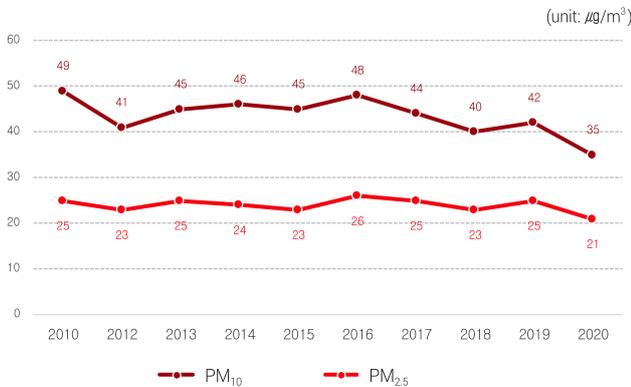


Figure 1. The annual trend of fine dust concentration

The annual trend of $\text{PM}_{2.5}$ good and bad days in Seoul



Figure 2. The annual trend of fine dust good and bad days

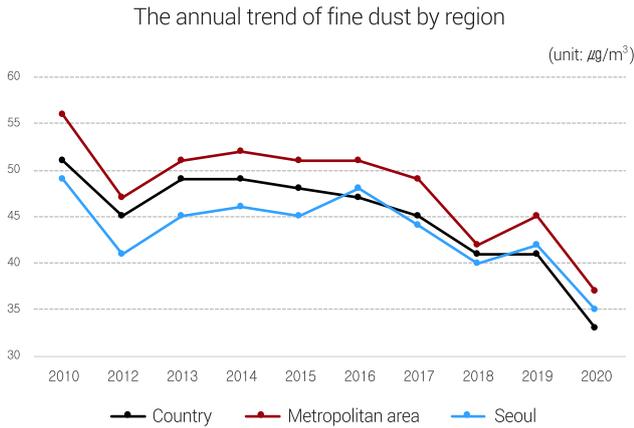


Figure 3. The annual trend of fine dust concentration across the country, metropolitan area, and Seoul

뽕 이상 일수를 활용하였다. PM₁₀ 계절별 평균 농도를 에어코리아(<http://www.airkorea.or.kr/>) 월별 확정자료를 통해 정리하였고, 문헌검토를 토대로 도출한 기상요인 독립변수인 풍속, 기온, 습도 정보는 기상청 기상자료개방포털 자료를 활용하였다. 도시공간구조 요인은 크게 인구, 토지이용·개발, 건축·주거, 교통으로 카테고리화하였으며, 통계청 자료 등을 사용하였다. 본 연구에서는 이러한 변수 구축을 바탕으로 다중회귀분석 및 가산 자료분석을 수행하였다.

II. 이론 및 선행연구 검토

1. 미세먼지 주요 발생원인

도시에서 나타나고 있는 미세먼지는 다양한 원인에 의해 생성된다. 미세먼지 발생 원인에 대한 선행연구 결과를 큰 틀에서 살펴보면 기상요인, 도시 외부의 오염물질 유입, 도시 내부 오염원에서의 배출 등으로 나누어볼 수 있다.

기상요인으로는 풍속, 기온, 습도 등이 주로 언급되는데, 우선 풍속은 음의 상관관계, 기온은 양의 상관관계를 보이고 있다(김운수·김정아, 2011). 다시 말해 풍속은 약하고 기온이 높을 때(박일수, 2016) 미세먼지 발생이 용이하다는 것이다. 습도는 미세먼지 고농도 일수가 많은 겨울철의 경우, 습도가 높을수록 미세먼지 농도가 높게 나타난다(김운수·김정아, 2011; 박일수, 2016). 도시 외부의 오염물질 유입 역시 미세먼지 발생의 원인 중 하나이다. 이것은 주로 중국 동북지역 공장에서 배출되는 오염물질과 몽골에서 발생하는 황사(김효진, 2019)가 편서풍에 의해 국내에 유입되는 경우를 말한다. 공기 중으로 배출되는 오염물질은 장거리 이동을 통해 국내로 유입되고(김운수·김정아, 2011; 최태영 외, 2018), 이렇게 유입된 오염물질의 영향과 비율은 계절 및 기상조건에 따라 다르게 나타난다(김운수·김정아, 2011; 김효진, 2019).

기본적으로 미세먼지는 도시 내부의 여러 오염원에서도 배출된다. 미세먼지는 1차적으로 자동차 배기가스, 산업시설 및 화력발전소 화석연료 연소, 공사 현장 및 비포장도로 분진(비산먼지) 등(김운수·김정아, 2011; 김효진, 2019; 최태영 외, 2018)에서 고체 상태로 직접 배출된다. 또한 이들 배출원에서 가스 상태로 나온 물질이 다른 물질과 화학반응을 일으켜 2차적으로 미세먼지가 되기도 한다(김운수·김정아, 2011; 문광주 외, 2011; 최태영 외, 2018). 2차 발생 미세먼지는 화석연료의 연소과정에서 배출된 SO_x가 대기 중의 수증기 등과 결합하거나 자동차 배기가스에서 배출된 NO_x가 마찬가지로 대기 중 수증기 및 O₃, NH₃ 등과 결합한 후 화학 반응에 의해 발생하는 경우 등을 포함한다(최태영 외, 2018).

2. 선행연구 검토

1) 고농도 미세먼지 발생 영향요인 관련 연구

고농도 미세먼지 발생에 영향을 미치는 요인에 관한 연구는 대부분 특정 지역, 특정 시기를 대상으로 미세먼지 발생 원인이나 이동패턴, 미세먼지 성분 등을 살펴보고 있었다. 고농도 미세먼지 발생에는 기상조건이 영향을 미치게 된다.

이현주 외(2018)의 연구에서는 고농도 PM₁₀ 발생 특성과 패턴을 조사하였고, 이에 따라 겨울철 한반도에서 나타나는 대기오염에 영향을 미치는 기상조건, 즉 기압 패턴, 풍향, 풍속은 기후변화에 따라 그 빈도와 지속성이 증가하는 것을 알 수 있었다. Cho et al.(2021)의 연구는 2001년에서 2002년 사이와 2017년에서 2018년 사이의 10월에서 3월까지의 급격한 한파 기간 동안 서울 지역의 PM₁₀ 농도 급변과 관련된 기상 상태를 연구하였다. 그 결과 한파 기간 중 급격한 PM₁₀ 농도 상승 시기에는 한반도 상하층 대기권에 고기압이 우세하다는 것을 밝혀내었다. 또한 남풍, 극심한 대기 정체 및 중국 동북 지역의 높은 에어로졸 농도를 PM₁₀ 농도 증가 원인으로 지목하였다.

박기형·이병규(2013)는 2013년 1월~4월 중 부산지역 고농도 미세먼지에 대해 분석하였고, 그 결과 정체성 고기압의 영향이 큰 것을 확인하였다. 특히 지상 풍속이 약하고 하층대기가 안정될 때, 고농도 미세먼지가 관측되었다. 박일수(2016)는 서울 지역에서 발생하는 고농도 미세먼지에 몇 가지 기상 조건이 관련되어 있음을 분석하였다. 약한 풍속, 따뜻한 기온, 낮은 혼합고도와 안정된 대기, 높은 습도로 인한 안개형성이 유리한 국지적인 기상조건이 그것이다. 한편 이승민·허창희(2013) 역시 5일 이상 지속된 서울의 고농도 미세먼지를 대상으로 관측 자료를 분석하고 대기확산 모델링을 통해 미세먼지 고농도 사례 발생과 그 유지 메커니즘을 검토하였다. 해당 기간 동안 발생한 한반도 상층의 저지 고기압과 하층의 열대성 저기압이 복합적으로 작용한 결과 한반도 지역에서는 고기압 정체가 나타나게 되었다. 이에 따라 한

반도 지역에서 발생한 대기오염 물질이 외부로 빠져나가지 못한 채 정체하는 것이다. Lee et al.(2011)의 연구도 서울을 대상으로 고농도 PM₁₀ 발생에 유리한 기상 조건을 분석하였다. 분석 결과 미세먼지가 발생하는 외부 지역의 저기압과 한국 상공의 고기압이 복합적으로 작용했을 때 고농도 PM₁₀ 발생이 용이함을 확인할 수 있었다.

이 외에 오혜련 외(2014) 연구에서는 고농도 미세먼지의 발생 원인 및 이동 패턴을 분석하였는데, 이승민·허창희(2013) 연구에서 나타난 기압 배치의 원인과 약한 바람이 함께 작용하여 고기압이 빠져나가는 것을 막고 고농도 미세먼지 현상이 발생한다는 것을 유추하였다. 한편 지리분석 기법을 활용하여 미세먼지(PM₁₀)의 공간적 이질성을 탐색한 연구도 있었다. 전창우 외(2018)는 OLS, GWR, GWRR 등의 GIS 기법을 활용, 미세먼지 농도의 분포 패턴과 그 영향요인을 탐색하였다. 미세먼지 농도에 영향을 미치는 자연요인 및 인문요소를 함께 고려하여 분석한 결과, 강수량 및 대기 정체일이 적을수록, 주변 고도가 낮을수록 고농도 미세먼지 발생 비율이 높았고, GWRR 분석결과 각 하위 지역별 미세먼지 분포에 영향을 주는 변수 및 그 영향 정도가 다르게 나타나는 점을 확인하였다.

2) 대기환경 및 도시공간구조의 관계에 관한 연구

도시의 대기환경 및 도시공간구조의 관계에 대한 기존 연구는 대체로 도시에서 나타나는 주된 환경문제인 대기오염, 대기오염 중 특히 미세먼지, 온실가스 및 탄소배출량 등을 분석대상으로 하고 있다.

이들 연구에서 살펴본 ‘도시공간구조’는 연구자에 따라 그 의미가 조금씩 다르며, 유사한 용어들을 활용하여 대상을 조금씩 달리 표현하고 있다(김승남 외, 2009; 서원석·김리영, 2013; 오규식 외, 2005). 일부 선행연구의 경우 용어의 정의 없이 기존 연구에서 도시공간구조와 관련해 도출한 변수를 사용하는 방법을 취하기도 했다(유운진 외, 2012; 이연수·손동욱, 2015; 정재영·권오열, 2015; 최열 외, 2007). 비록 용어의 통일은 이루어지지 않았지만, 기존 선행연구는 도시의 환경문제와 관련한 도시공간구조 세부 요인으로 인구, 토지이용·개발, 건축·주거, 교통 등을 제시하였다. 이에 따라 본 연구에서는 여러 선행연구들에서 도시의 환경문제와 연관된 도시공간구조 세부 요인으로 공통적으로 제시하고 있는 요인들이 도시공간구조를 반영하고 있다고 보고 이들을 중심으로 변수를 구성하여 연구를 진행하였다.

다음은 대기오염, 미세먼지, 온실가스 및 탄소배출량 등을 중심으로 도시의 환경과 도시공간구조를 분석한 선행연구들이다.

먼저 도시공간구조와 대기오염의 관계에 관한 연구로, 김승남 외(2009)는 에너지 절약과 대기오염 농도 개선 측면에서 바람직한 공간구조 특성을 파악하고, 도시기본계획 수립 시 고려할 정책적 시사점을 도출하였다. 경로모형을 토대로 독립변수인 인구

밀도, 고용밀도 및 도로교통 기반시설 등 공간구조, 매개변수인 통행특성, 종속변수인 교통에너지 소비 및 대기오염 간의 영향관계를 분석하였다. 그 결과 다핵집중형 도시가 교통에너지 효율면에서 가장 바람직하다는 것과 대중교통 중심의 도시 조성 및 가로의 우수한 연결성이 도시 혼잡을 완화하고 차량통행을 최소화한다는 것을 확인하였다.

한편 서원석·김리영(2013)의 연구에서는 도시의 공간적 집중 수준이 에너지소비, 대기질 및 자원소비를 중심으로 한 환경요소에 영향을 미치고 있는지를 규명하였다. 분석 결과 집중적 도시공간구조가 대기질에 부정적인 영향을 미치나 이러한 도시공간구조가 에너지 소비 및 CO₂ 배출 저감과 같은 전반적인 환경 개선에는 긍정적 영향을 미친다는 점을 밝혔다. 오규식 외(2005)는 서울시를 대상으로 대기오염의 공간적 분포와 인구, 토지이용, 교통 등 도시형태 구성요소와의 상관분석을 통해 각 요인이 대기오염에 미치는 영향을 분석하였다. 서울시 전체, 생활권별, 자치구별로 나누어 대기오염과 도시형태 구성요소와의 관계를 분석하였고, 그 결과 대기오염에 영향을 주는 도시형태 구성요소가 자치구 및 오염물질별로 특성이 다르다는 점을 확인할 수 있었다. 최열 외(2007)는 한국 22개 도시를 대상으로 15년간 도시특성 요소에 대한 시계열 패턴자료를 구축하고 대기오염과 도시특성 요소 간 관계를 분석하였는데, 대기오염에 영향을 미치는 도시특성요소로 인구특성, 토지이용특성, 주택 및 건설특성, 도로 및 교통특성, 산업 및 경제특성 인자를 활용하였다. 연구 결과 SO₂의 경우 주된 발생 요인이 건축허가건수, 상업지역면적, 공업지역면적 등 면오염원인 것으로 나타났고, NO₂는 교통연료에 의해 발생되기 때문에 시가화밀도에 의한 오염도가 가장 높고 녹지지역 면적에 의한 저감효과가 큰 것으로 분석되었다.

이연수·손동욱(2015)의 연구는 대기환경 기준물질 중 NO₂, SO₂, O₃을 중심으로 도시의 물리적 환경요소와 도시 내 특정 지역의 대기오염도 사이의 연관성을 분석하였다. 분석 결과 도시의 물리적 환경 요인 중 교통 관련 요인, 녹지 및 하천 등 자연환경요인, 토지이용 등이 대기오염에 영향을 미치는 주요 요인임을 확인하였다. Jung et al.(2019)은 서울을 대상으로 도시구조와 NO_x, SO_x, PM₁₀, PM_{2.5}의 네 가지 대기오염물질 배출 사이의 관계를 분석하였다. 도시구조 요인으로 인구, 상업지역, 공업지역, 공원지역, 도로 길이, 총 토지면적, 1인당 GRDP를 활용하였고, 연구 결과 공원지역과 도로 길이를 제외한 대부분의 변수가 대기오염물질 배출에 유의미한 양의 관계가 있음을 밝혔다.

김희재·전명진(2014)은 공간예측 기법 중 하나인 크리깅(Kriging) 보간 기법을 활용하여 수도권 전체의 대기오염 정도를 추정하고, 대기오염 물질별 오염 수준과 도시개발 패턴 간의 관계를 분석하였다. 이에 따라 추정된 오염물질별 대기오염 수준을 종속변수로 하고, 도시개발 특성을 나타내는 개발밀도, 산업입지 요소, 교통시설 요소 등을 설명변수로 하여 다중 회귀모형을 구

측, 분석하였다.

이외에 해외 연구로, Clark et al.(2011)은 111개 미국 도시 지역을 대상으로 대기오염과 도시형태 사이의 관계를 분석하였고, Rodriguez et al.(2016)은 유럽의 249개 대도시권을 대상으로 각 지역에서 NO_2 , PM_{10} , SO_2 농도에 영향을 미치는 요인을 검토하였다. 먼저 Clark et al.(2011)의 연구에서는 도시형태 요소로 도로밀도, 일자리·주택 불균형, 인구밀도, 인구 중심성 등을 제시하고 이를 이용해 분석하였는데, 그 결과 인구밀도가 $\text{PM}_{2.5}$ 농도와 관련성이 있음을 확인할 수 있었다. 한편 Rodriguez et al.(2016)의 연구 결과, 도시구조가 대기오염 농도에 상당한 영향을 미치며 특히 파편화되고 고도로 도시화된 도시의 경우 NO_2 와 PM_{10} 농도가 높고, 인구 밀집도가 높은 도시는 SO_2 농도가 높음을 밝혀내었다.

한편 미세먼지를 분석대상으로 살펴본 연구들도 많았다. 최태영 외(2018) 연구에서는 도시의 미세먼지 배출 및 저감에 관련된 토지피복 유형인 산림과 시가지지역의 영향에 의한 계절별 미세먼지 농도 특성을 파악하고자 하였다. 서울시 23개 측정소의 2016년 PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$ 농도자료를 수집해 측정소 주변 반경 3km 내 시가지지역과 산림 비율을 기준으로 3개 그룹으로 구분해 그룹 간 미세먼지 농도 차이를 계절별로 분석하였다. 분석 결과 산림 비율이 미세먼지 저감에 미치는 효과가 입증되었다. 오규식·정희범(2007)은 서울시를 대상으로 인구, 고용, 토지이용, 교통 등 도시의 개발밀도 변화가 지역적으로 대기오염 변화에 어떠한 영향을 미치는지 분석하였다. NO_2 와 PM_{10} 을 대상으로 대기오염과 개발밀도의 상관성을 분석하였는데, 그 결과 서울시 전체 PM_{10} 은 주거용 토지이용 연면적 및 주거상업업무 건축물수, 교통량 및 자동차 등록대수와 높은 양의 상관관계가 있음을 확인하였다.

그 외에 Park and Ko(2018)는 2014년 서울시를 대상으로 건조환경과 미세먼지 사이의 관계를 분석하였다. 연구 결과, PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$ 모두 상업지역과 다가구주택이 많은 지역에서 농도가 높게 나타났고, 버스노선과 버스정류장이 높은 PM_{10} 농도와 관련성이 있다는 것을 확인할 수 있었다. Kim(2020)의 연구도 위의 연구들과 유사하게 서울시를 대상으로 토지이용이 미세먼지 농도 수준에 미치는 영향을 검토하였고 그 결과 산업용 토지이용이 미세먼지 농도 수준을 증가시키는 것을 알 수 있었다.

마지막으로 도시공간구조와 온실가스 및 탄소배출량을 연계한 연구를 살펴보면, 유윤진 외(2012)는 사회경제적 요인, 교통 요인, 경제적 요인 등과 탄소배출량의 상관관계를 분석하여 서울시가 가지고 있는 대기오염 문제를 파악하고, 이를 토대로 한 시사점을 제시하였다. 연구 결과 서울시에서 탄소배출량에 영향을 미치는 요인은 사업체수와 같은 지역특성, 산림 및 녹지로 표현되는 환경수준, 개발밀도수준, 교통수준으로 나타났고, 이 중 교통과 개발밀도수준이 탄소배출량에 중요한 요인임을 확인하였다.

한편 유윤진 외(2013)는 경기도 전체 시·군을 대상으로 대기질 내 탄소량 분석을 통해 기후변화에 영향을 미치는 오염원을 도출하고자 하였다. 분석 결과, 도로교통에 의한 오염원이 경기도 전체 탄소배출에 가장 큰 영향을 미쳤고, 그다음은 도시생활에 의한 오염원인 것으로 나타났다. 이 외, 정재형·권오열(2015)은 2010년 서울시를 대상으로 서울시 도시공간구조와 온실가스 및 대기오염 통합 배출 특성을 분석하였다. 분석 결과, 행정구역별 도시공간구조의 차이가 온실가스 및 대기오염 통합 배출량에 영향을 미치는 것으로 나타났고, 서울시 도시공간구조에 따른 온실가스 배출량에 가장 큰 영향을 미치는 요인은 교통인자인 자동차 등록대수, 대기오염 배출량에 가장 큰 영향을 미치는 요인은 환경인자인 산림면적인 것으로 분석되었다.

김인현 외(2011)는 이산화탄소 배출량을 종속변수로 하고 도시공간 계획요소를 독립변수로 한 회귀분석을 수행하였다. 분석 결과 이산화탄소 배출량에 유의한 영향을 주는 도시공간 계획요소로 총 자동차 등록대수, 상업 및 업무지역 면적, 주거지역 면적, 교통시설지역 면적, 인구밀도 등이 확인되었다. 장명준 외(2012)의 연구에서는 탄소배출에 영향을 미치는 요인으로 도시적 특성, 환경적 특성, 사회경제적 특성, 교통 특성 등을 고려하고, 도시규모에 따른 지역특성과 탄소배출량의 관계를 분석하였다. PLS 구조방정식을 활용하여 탄소배출량과 도시규모 분석을 통해 유형별 차이가 있는지, 차이가 있다면 어떤 요인이 탄소배출량에 영향을 미치는지 분석하였으며, 도시규모별로 탄소배출에 영향을 미치는 요인과 그 영향 정도가 다름을 확인하였다.

위와 같이 고농도 미세먼지로 인한 국민 건강 위해 및 사회경제적 위기 상황에 대한 문제의식을 바탕으로 그 발생 원인에 관한 다양한 연구들이 수행되어 왔다. 관련 선행연구들은 고농도 미세먼지 발생에 영향을 미치는 계절적인 특성과 기상요인 및 도시공간구조 요인들을 폭넓게 밝혀냈다는 점에서 그 의의가 있다. 그러나 아쉽게도 고농도 미세먼지 발생에 관한 계절적인 특성과 관련된 기상요인, 상대적으로 미세먼지 농도가 높은 도시지역 특유의 구조적 요인을 여러 연구에서 확인하였음에도 불구하고 이들 요인들을 종합적으로 활용한 연구는 거의 진행되지 않았다. 또한 미세먼지를 비롯한 대기오염과 도시공간구조를 연계하여 분석한 연구들은 대체로 오염 '농도'를 종속변수로 한 다중회귀분석을 통해 수행되었는데, 이는 고농도 미세먼지 발생 '빈도'가 문제시되는 최근의 경향을 반영하지 못하는 한계가 있다. 따라서 본 연구는 기존의 연구들과는 달리, 고농도 미세먼지 발생과 관련된 기상요인과 도시공간구조를 함께 활용하고, 미세먼지 농도뿐만 아니라 그 발생 빈도를 종속변수로 하여 종합적으로 분석하였다는 점에서 차별점을 갖는다.

III. 연구 설계

1. 연구의 범위 및 변수구성

본 연구는 계절별 고농도 미세먼지 발생에 영향을 미칠 수 있는 기상요인 및 도시공간구조 요인을 도출하여 분석하는 것을 목적으로 한다. 이와 관련한 선행연구 검토를 통해 연구 방법, 범위 및 변수를 다음과 같이 구성하였다. 연구의 공간적 범위는 서울시, 인천시, 경기도의 시·구로, 인구와 산업의 집중에 따라 미세먼지에 의한 피해가 가장 심각한 곳이 수도권이라는 점을 감안하였다. 시간적 범위는 2016년으로 최근 5년 내 미세먼지 농도 수준이 가장 나빴고, 나쁨 일수도 많았던 연도임을 고려하였다.

종속변수인 미세먼지 오염수준은 수도권 내에 설치된 미세먼지 측정소를 통해 수집되어 확정된 에어코리아 자료를 사용하였다. 수도권 미세먼지 측정소는 서울시 25개 자치구, 인천시 8개 자치구, 경기도의 28개 시에 설치되어 있다. 종속변수로는 다수의 선행연구(최태영 외, 2018) 및 보고 결과와 최근 고농도 미세먼지 발생 추세를 살펴보았을 때 고농도 미세먼지는 계절적으로 겨울과 초봄에 집중되어 있다는 것을 감안하되 계절적인 차이를 살펴보기 위하여 사계절의 계절별 PM₁₀ 평균 농도와 계절별 PM₁₀ 나쁨 이상 일수(PM₁₀ 농도 81µg/m³ 이상)를 이용하였다. 본 연구에서 봄은 3~5월, 여름은 6~8월, 가을은 9~11월, 겨울은 1, 2, 12월을 말한다.

독립변수 중 하나인 기상요인(풍속, 기온, 습도)은 수도권 내 시·구에 설치된 기상청 자동기상관측장비(Automatic Weather System, AWS)를 통해 수집한 것으로, 미세먼지 측정소와 달리 인천시에는 4개 자치구에 설치되어 수도권에서는 총 57개 시·구에 분포되어 있다. 이에 따라 분석의 공간적 범위는 수도권으로 하되 미세먼지 농도 자료와 기상요인 자료를 모두 구득할 수 있는 수도권 총 57개 시·구로 한다. 다만 기상청에서 수집할 수 있는 2016년의 기상자료에서 경기도 9개 시의 자료가 누락되어 있었고, 기상요인 중 '습도'의 경우 수도권 18개 시·구의 자료를 확인할 수 없었다. 기상자료 모두가 없는 경기도 9개 시를 빼면 표본수가 48개로 줄어들고, 여기에서 추가적으로 습도 자료가 없는 수도권 18개 시·구를 빼면 표본수가 최종적으로 30개로 줄어들게 된다. 이 경우, 표본수가 현저히 줄어들어 분석에 문제가 발생할 수 있다. 따라서 57개 표본수를 유지하기 위해 누락되는 자료의 대체 방법을 검토하였고, 그중 Dixon(1979)과 Troyanskaya(2001)에 의해 고안된 k-최근접 이웃(k-Nearest Neighbors, KNN) 대체법(박소현 외, 2011; Yum and Kim, 2018)을 활용하여 누락 자료를 대체한 후 분석을 진행하였다. 이 대체법은 결측이 발생한 개체와 가장 가까운 거리에 있는 k개의 이웃 개체들을 활용하여 결측값을 대체하는 비모수적 방법으로, 다변량 정규성 등의 모수적 모형이 만족되지 않을 경우에도 강건성(robustness)을 지니며

그 계산 알고리즘이 간단하다는 장점을 가지고 있다(박소현 외, 2011; Yum and Kim, 2018).

독립변수는 선행연구 검토를 통해 크게 기상요인과 도시공간구조 요인으로 나누어 정리하였다. 미세먼지 농도에 영향을 미칠 수 있는 기상요인으로 풍속, 기온, 습도를 도출하였는데, 이들 기상요인은 종속변수인 미세먼지 오염수준과 마찬가지로 각 계절별 평균값을 사용한다.

도시공간구조 요인은 대기오염, 대기오염 중 특히 미세먼지, 온실가스 및 탄소배출량 등 환경문제와 도시공간구조의 관계를 다룬 선행연구를 종합적으로 검토하여 도출하였다. 선행연구들은 도시환경문제와 연관된 도시공간구조의 세부 요소로 인구, 토지이용·개발, 건축·주거, 교통 등을 공통적으로 제시하고 있다. 이에 따라 본 연구에서도 선행연구들의 공통적인 도시공간구조 요소를 중심으로 변수를 구성하였다. 우선 인구 요인으로 총인구, 인구밀도 변수를 활용하였다. 그다음으로 토지이용·개발 요소로 상업지역면적, 공업지역면적 및 공업지역면적과 엔트로피 지수, 총사업체수와 광업·제조업·건설업 사업체수, 고용밀도를 변수에 추가하였다. 특히 대기오염물질 발생 가능성이 높은 업종인 광업·제조업·건설업 사업체수도 총사업체수와 함께 변수로 사용하였다. 상업지역면적과 공업지역면적 및 녹지지역면적은 통계청에서 공개하고 있는 수도권 각 시·구 용도지역별 면적을 말한다. 엔트로피 지수는 토지이용의 혼합 정도를 측정하는 변수로 주거, 상업 및 업무 면적의 혼합도를 나타낸다. 이 지수는 0에서 1 사이의 값을 가지며, 1에 가까울수록 토지이용의 혼합 정도가 높음을 뜻한다. 총사업체수는 수도권 각 시·구의 총사업체수를, 광업·제조업·건설업 사업체수 역시 수도권 각 시·구의 해당 사업체수를 말하고, 고용밀도는 각 시·구의 총고용자수를 지역면적으로 나눈 값이다. 건축·주거 요소로 총주택수와 총가구수, 주택보급률, 건축허가건수를 변수에 포함하였는데, 총주택수는 수도권 각 시·구의 총주택수이고, 주택보급률은 각 시·구별로 총주택수를 총가구수로 나눈 값이다. 총가구수도 함께 건축·주거 요소 변수로 고려하였다. 건축허가건수는 미세먼지의 주된 배출원으로 건설현장 등에서 발생하는 비산먼지가 지목되고 있으며 서울시를 비롯한 여러 자치단체에서 이에 대한 정책적 노력을 기울이고 있음을 감안하였다. 마지막으로 교통 요소로 도로밀도와 자동차 등록대수를 변수에 추가하였다. 도로밀도는 수도권 각 시·구의 도로연장(km)을 해당 행정구역의 총면적(km²)으로 나눈 값이며, 자동차등록대수는 수도권 각 시·구에 등록된 자동차 대수를 말한다.

위와 같은 도시공간구조 요인은 통계청 자료를 기본으로 서울시 열린데이터광장, 경기통계, 인천통계의 자료를 보완하였고, 본 연구의 시간적 범위인 2016년 자료를 활용하였다. 변수의 구성과 기초통계량은 각각 <표 1>, <표 2>에 제시하였다. 변수들의 기초통계량을 간략하게 살펴보면 우선, PM₁₀ 계절별 평균농도의

표 1. 변수 구성 Table 1. Definition of variables

구분 Category		변수 Variables	정의 Definitions	
종속변수 Dependent variables	미세먼지 오염수준 Fine dust pollution level	PM ₁₀ 계절별 평균 농도 PM ₁₀ seasonal average concentration	PM ₁₀ 계절별 평균 농도($\mu\text{g}/\text{m}^3$) PM ₁₀ seasonal average concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	
		PM ₁₀ 계절별 '나쁨' 이상 일수 (PM ₁₀ 농도 $81\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상) PM ₁₀ seasonal over 'bad' days (PM ₁₀ concentration $81\mu\text{g}/\text{m}^3$ over)	PM ₁₀ 계절별 나쁨 이상 일수(일) PM ₁₀ seasonal over 'bad' days (days)	
	기상요인 Meteorological factors	계절별 평균 풍속 Seasonal average wind speed	계절별 평균 풍속(m/s) Seasonal average wind speed (m/s)	
		계절별 평균 기온 Seasonal average temperature	계절별 평균 기온($^{\circ}\text{C}$) Seasonal average temperature ($^{\circ}\text{C}$)	
		계절별 평균 습도 Seasonal average humidity	계절별 평균 습도(%) Seasonal average humidity (%)	
독립변수 Independent variables	인구 Population	총인구 Total population	총인구(천 명) Total population (one thousand peoples)	
		인구밀도 Population density	인구/총면적(인/km ²) Population/total area (number of people/km ²)	
	상업지역면적 Business area	상업지역면적 Business area	상업지역면적(km ²) Business area (km ²)	
		공업지역면적 Industrial area	공업지역면적(km ²) Industrial area (km ²)	
		녹지지역면적 Green area	녹지지역면적(km ²) Green area (km ²)	
		엔트로피 지수 Entropy index	엔트로피 지수 Entropy index	주거·상업·업무(공업) 용도 건축물 연면적 혼합 수준을 보여주는 지수(지수) Index for the total area of buildings for housing, business, industry use (index)
			토지이용·개발 Land use·development	총사업체수 Total number of companies
	광업·제조업·건설업사업체수 Number of mining, manufacturing, construction companies	광업·제조업·건설업 사업체수(개소) Number of mining, manufacturing, construction companies (number of places)		
	도시공간구조 요인 Urban spatial structure factors	고용밀도 Employment density	총고용자수/총면적(인/km ²) Total number of employers/total area (people/km ²)	
		건축·주거 Construction·housing	총주택수 Total housing	총주택수(천 호) Total housing (one thousand houses)
			총가구수 Total households	총가구수(천 가구) Total households (one thousand households)
			주택보급률 Housing supply ratio	총주택수/총가구수(%) Total housing/total households (%)
			건축허가건수 Construction permission	건축허가건수(동) Construction permission (number)
	교통 Traffic	도로밀도 Road density	도로면적/총면적(km/km ²) Road area/total area (km/km ²)	
자동차등록대수 Car registration		자동차등록대수(천 대) Car registration (one thousand cars)		

경우 봄철 평균농도가 65.72, 겨울철 평균 농도가 51.72로 사계절 중 봄철과 겨울철 미세먼지 농도가 높은 경향을 확인할 수 있었다. 또한 PM₁₀ 계절별 나쁨 이상 일수에서도 봄철 나쁨 이상 일수

평균이 21일, 겨울철 나쁨 이상 일수 평균이 6일 정도이며, 봄철의 경우 나쁨 이상 일수가 최대 44일까지 발생함을 알 수 있었다. PM₁₀ '나쁨' 기준은 PM₁₀ 농도가 81~150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이고, '매우 나쁨'

표 2. 변수의 기초통계량 Table 2. Descriptive statistics

변수 Variables		평균 Mean	표준편차 S.D	최소값 Min	최대값 Max	
종속변수 Dependent variables	미세먼지 오염수준 Fine dust pollution level	PM ₁₀ 봄 평균 농도($\mu\text{g}/\text{m}^3$) Average PM ₁₀ concentration in spring ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	65.72	6.41	51.58	81.66
		PM ₁₀ 겨울 평균 농도($\mu\text{g}/\text{m}^3$) Average PM ₁₀ concentration in winter ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	51.72	6.71	40.6	65.7
		PM ₁₀ 봄 나쁨 이상 일수(일) PM ₁₀ over 'bad' days in spring (days)	21	8.71	6	44
		PM ₁₀ 겨울 나쁨 이상 일수(일) PM ₁₀ over 'bad' days in winter (days)	6.16	4.74	0	19
기상요인 Weather factors		봄 평균 풍속(m/s) Average wind speed in spring (m/s)	1.79	0.51	0.67	3.87
		겨울 평균 풍속(m/s) Average wind speed in winter (m/s)	1.67	0.6	0.65	4.17
		봄 평균 기온($^{\circ}\text{C}$) Average temperature in spring ($^{\circ}\text{C}$)	13.04	0.94	11.15	14.7
		겨울 평균 기온($^{\circ}\text{C}$) Average temperature in winter ($^{\circ}\text{C}$)	-0.43	0.99	-3.24	1.28
		봄 평균 습도(%) Average humidity in spring (%)	59.79	5.34	51.06	79.83
		겨울 평균 습도(%) Average humidity in winter (%)	60.39	4.69	51.09	75.6
독립변수 Independent variables	인구 Population	총인구(천 명) Total population (one thousand peoples)	431.75	249.73	64	1,231
		인구밀도(인/km ²) Population density (number of people/km ²)	10,163.81	8,192.68	188.41	27,681.39
	토지이용·개발 Land use-development	상업지역면적(km ²) Business area (km ²)	1.8	1.77	0.15	6.16
		공업지역면적(km ²) Industry area (km ²)	3.31	5.64	0	30
		녹지지역면적(km ²) Green area (km ²)	50.92	66.22	0.03	343.26
		엔트로피 지수(지수) Entropy index (index)	0.73	0.13	0.5	0.96
	도시공간 구조 요인 Urban spatial structure factors	총사업체수(개소) Total number of companies (number of places)	30,728.58	16,806.43	3,740	72,281
		광업·제조업·건설업 사업체수(개소) Number of mining, manufacturing, construction companies (number of places)	4,377.42	3,549.86	240	18,772
		고용밀도(인/km ²) Employment ensity (people/km ²)	4,859.36	6,471.22	66.41	40,447.23
		총주택수(천 호) Total housing (one thousand houses)	124.47	71.3	16	339
	건축·주거 Construction-housing	총가구수(천 가구) Total households (one thousand households)	153.3	86.9	21	436
		주택보급률(%) Housing supply ratio (%)	0.82	0.11	0.54	1.03
		건축허가건수(동) Construction permission (number)	1,323.82	1,443.79	190	7,158
	교통 Traffic	도로밀도(km/km ²) Road density (km/km ²)	8.47	6.93	0.64	25.53
자동차등록대수(천 대) Car registration (one thousand cars)		154.19	96.57	22	476	

기준은 PM₁₀ 농도가 151 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상인 경우를 말하는데(환경부, 2014), 일반적으로 농도가 81 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상이면 건강생활수칙 미세먼지 예보 등급상 고농도 미세먼지로 불린다(환경부, 2014). 이를 감안하면 PM₁₀ 계절별 나쁨 이상 일수에서도 특히 봄철, 겨울철에 고농도 미세먼지가 집중적으로 발생하였음을 확인할 수 있다. 한편 기상요인인 풍속, 기온, 습도는 각 계절의 일반적인 특성을 보여주고 있다. 도시공간구조 요인 중 토지이용의 혼합 정도를 나타내는 엔트로피 지수는 평균이 0.73으로 나타나 수도권 시·구의 토지이용 혼합 정도가 다소 높은 수준임을 알 수 있다. 건축 및 주거 변수 중 건축허가건수는 평균적으로 1,323건으로 나타났다.

2. 분석 방법

본 연구에서는 미세먼지 발생에 영향을 미칠 수 있는 기상요인 및 도시공간구조 요인 변수를 추출한 후, 다중회귀모형과 가산자료분석인 포아송 회귀모형 및 음이항 회귀모형을 구축하여 기상요인과 도시공간구조 요인이 미세먼지 발생에 미치는 영향을 살펴보았다. 모형은 통계 분석 및 그래픽 작업을 위한 오픈소스 프로그램인 R을 활용하여 추정하였다.

다중회귀모형에서는 우선 계절별로 모든 변수가 전부 포함된 모형을 구축한 후, 다중공선성을 고려하여 단계별로 독립변수를 투입시켜 최종적인 모형을 구축하는 stepwise 방식을 이용해 1차적으로 적합한 모형을 추정하였다. 이 모형을 바탕으로 본 연구의 관심 변수 및 선행연구 검토를 통해 주요하게 살펴보아야 할 변수들을 반영한 새로운 모형들을 구축하고 본 연구에서 활용할 최종적인 모형을 도출하였다.

본 연구에서는 연속자료인 PM₁₀ 계절별 평균 농도를 종속변수로 하는 다중회귀분석과 함께 가산자료(count data)인 PM₁₀ 계절별 나쁨 이상 일수(PM₁₀ 농도 81 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상)를 종속변수로 하는 분석을 시행하였다. 가산자료는 음(-)의 값을 가질 수 없는 정수로 나타나고, 이산변수(discrete variable)이며 한쪽으로 치우친 비대칭적 분포를 보인다. 이러한 자료는 일반적인 최소자승법(Ordinary Least Squares, OLS)에 근거한 선형회귀모형에 적합하지 않고, 가산자료에 적합한 비선형모형을 적용하는 것이 바람직하다(이수미 외, 2019). 대표적인 가산자료 모형으로 포아송 회귀모형과 음이항 회귀모형이 있다.

포아송 분포는 일정 시간 또는 공간 내에서 사건이 무작위로 발생할 때의 발생 횟수와 그에 대응하는 확률 분포를 의미한다. 포아송 분포는 종속변수의 평균과 분산이 같다는 강한 가정을 전제로 가지고 있는데, 현실의 자료의 경우 변수들 간 양의 상관관계가 존재할 때 평균보다 분산이 큰 과대산포(over dispersion) 문제가 발생할 가능성이 높다(Alwani et al., 2021; Ardiles et al., 2018). 과대산포가 존재하면 회귀계수 추정량의 표준오차가 편향되는(biased) 현상이 발생하여 통계적 검정의 신뢰성이 저하된다

(Alwani et al., 2021). 포아송 모형의 이러한 문제는 가산자료 분석에 활용되는 음이항 회귀모형을 통해 해결할 수 있다(Ardiles et al., 2018). 따라서 본 연구에서는 포아송 회귀모형과 음이항 회귀모형을 함께 활용하여 어느 모형이 더 적합한지 검토한 후 분석을 수행하였다. 또한 다중공선성을 검토하여 VIF 값이 10 이상이고, 피어슨 상관계수 분석을 통해 상관관계가 높은 변수들을 제거한 모델을 구축하여 분석을 수행하였다.

IV. 분석 결과

1. 다중회귀분석

본 연구에서는 고농도 미세먼지가 계절적으로 겨울과 초봄에 집중되어 있음을 감안하는 동시에, 계절적 차이를 확인하기 위해 계절별 PM₁₀ 평균 농도를 종속변수로 하는 다중회귀분석을 시행하였다. 각 계절별 분석모형을 구축하였으며, 최종적으로 고농도 미세먼지 발생이 집중되는 봄철, 겨울철 모형을 제시하였다.

PM₁₀ 봄철과 겨울철 평균 농도를 종속변수로 하는 다중회귀모형의 추정결과는 <표 3>과 같다. 분석결과 봄철의 경우 토지이용 혼합 수준을 보여주는 엔트로피 지수, 건축허가건수가 양의 영향을 미치는 것으로 나타났고, 녹지지역면적이 음의 영향을 미치는 것으로 나타났다. 토지이용 관련 변수인 엔트로피 지수와 녹지지역면적이 유의한 변수로 나타난 것은 도시공간의 형성과 그 위에서 일어나는 사람들의 활동이 미세먼지 발생과 같은 환경 문제에 영향을 미친다는 선행연구의 분석과 유사한 결과이다(김철수, 2006). 특히 녹지지역면적의 경우 여러 선행연구들(이연수·손동욱, 2015; 최열 외, 2007; 최태영 외, 2018)의 분석결과와 마찬가지로 봄철 미세먼지 농도에 음의 영향을 미친다는 결과가 나타나 녹지가 미세먼지 저감에 긍정적인 효과를 준다는 점을 다시 한번 입증하였다.

한편 토지이용 혼합 정도를 나타내는 엔트로피 지수의 경우, 봄철 미세먼지 농도에 양의 영향을 미치는 것으로 분석되었는데, 이는 혼합적 토지이용이 압축적 도시공간을 형성해 도시 내 교통이나 오염원 발생을 감소시킨다(김태형·고준호, 2016; 서원석·김리영, 2013)는 선행연구 및 대기오염 물질 중 하나인 아황산가스(SO₂)의 배출과 엔트로피 지수가 음의 상관성을 보였다는 이연수·손동욱(2015)의 연구와는 상반되는 결과이다. 본 연구에서 활용한 엔트로피 지수는 주거·상업·공업 용도 건축물 연면적 혼합 정도를 보여주는 값이며, 수도권 시·구를 분석단위로 하고 있어 이러한 차이가 발생한 것으로 판단된다. 추후 미시적 분석단위에서 압축도가 높은 CBD 등을 대상으로 엔트로피 지수를 산정하여 분석할 필요가 있으며, 엔트로피 지수 외 토지이용 혼합도 및 다양성을 보여줄 수 있는 기법에 대한 추가적인 검토도 필요하다.

한편 비산먼지 유발과 직접적으로 관계되어 있는 건축허가건

표 3. PM₁₀ 봄, 겨울 평균 농도 다중회귀모형

Table 3. Multiple regression models for estimating average PM₁₀ concentration in spring and winter

변수 Variables	봄 다중회귀모형 Spring model			겨울 다중회귀모형 Winter model		
	Coefficient			Coefficient		
	Estimate	t-value	Std. Err	Estimate	t-value	Std. Err
절편 Intercept	36.51*	2.632	13.87	56.4989***	4.523	12.4919
봄 평균 기온 Average temperature in spring	1.057	1.15	0.90	-	-	-
겨울 평균 기온 Average temperature in winter	-	-	-	-0.7577	-0.923	0.8206
겨울 평균 습도 Average humidity in winter	-	-	-	-0.0232	-0.139	0.1669
총인구 Total population	-	-	-	0.0014	0.415	0.0034
인구밀도 Population density	-	-	-	-0.0004*	-2.531	0.0001
녹지지역면적 Green area	-0.04*	-2.024	0.02	-0.0501*	-2.560	0.0195
엔트로피 지수 Entropy index	17.74**	2.79	6.359	6.4615	1.015	6.3691
총사업체수 Total number of companies	0.00008	1.451	0.00006	-	-	-
고용밀도 Employment density	-0.0002	-1.356	0.0002	-	-	-
주택보급률 Housing supply ratio	-	-	-	-7.6631	-0.899	8.523
건축허가건수 Construction permission	0.0002**	2.709	0.0008	0.0029***	3.567***	0.0008
F		4.696			6.269	
R-squared		0.3604			0.511	
Adj R-squared		0.2837			0.4295	

*p<0.05, **p<0.01, ***p<0.001

수가 미세먼지 발생에 유의한 양의 영향력을 미치고 있다는 점에서, 이를 줄이기 위해 여러 지자체가 기울이고 있는 정책적 노력은 적절하다고 볼 수 있다. 그러나 서울시 및 수도권 지자체들이 추진하고 있는 미세먼지 정책들을 살펴보면 수송, 난방 분야에 대한 미세먼지 저감 정책에 그 역량이 집중되어 있고, 건축을 포함한 비산먼지 유발 배출원에 대한 정책은 다소 미흡한 것을 확인할 수 있다(서울시, 2021). 특히 서울시의 경우, 노후건설기계 저공해 사업 및 사용 제한 등 관련 정책을 추진하고 있으나(서울시, 2021), 비산먼지 저감을 위한 좀 더 적극적인 정책대안 마련이 필요하다.

PM₁₀ 겨울철 평균 농도를 종속변수로 하는 다중회귀모형의 결과를 살펴보면 봄철 평균 농도 모델에 비해 설명력이 다소 높게 나타난 것을 알 수 있다. PM₁₀ 겨울철 평균 농도에 유의하게 영향을 미치는 변수로는 건축허가건수가 양의 영향을, 녹지지역면적과 인구밀도가 음의 영향을 미치는 것으로 나타났다. 봄철 평균

농도 모델과 마찬가지로 토지이용변수인 녹지지역면적과 건축 및 주거변수인 건축허가건수가 유의하게 나타난 것을 확인할 수 있다. 녹지지역면적의 경우 미세먼지 농도가 높은 계절인 겨울철에도 녹지가 미세먼지 저감에 긍정적인 효과를 미친다는 것으로 이해할 수 있다. 건축허가건수는 비산먼지를 유발할 수 있다는 점에서 미세먼지 발생에 영향을 미치는 것으로 판단할 수 있겠다.

인구밀도의 경우 겨울철 미세먼지 농도에 음의 영향을 미치는 것으로 나타났는데, 이는 인구밀도가 높을수록 미세먼지 농도가 낮아진다는 의미이다. 밀도는 엔트로피 지수와 마찬가지로 압축도시 특성 파악에 중요한 변수(김승남 외, 2009)이다. 인구밀도가 높아지면 미세먼지를 포함한 대기오염 유발원이라 할 수 있는 교통 에너지 소비가 줄어들고 그 결과 대기오염 물질 배출량이 감소하는 것(김승남 외, 2009; Newman and Kenworthy, 1989)으로 이해할 수 있다. 본 연구의 결과 역시 위와 같은 선행연구의 분석결과와도 일맥상통하는 것으로 볼 수 있다.

에너지 절약 및 오염물질 배출 저감을 통해 친환경적인 도시를 추구하는 압축도시 논의의 주된 특성으로 고밀개발 및 혼합적 토지이용이 거론되어왔다(김병석·문태훈, 2011; 김승남 외, 2009; 서원석·김리영, 2013). 본 연구에서 활용한 인구밀도는 밀도와 관련한 변수이고, 엔트로피 지수는 혼합적 토지이용을 보여주는 변수이다. 이 두 변수가 계절별 미세먼지 농도와 관련해 각각 유의하면서 상반되는 결과가 나타난 것은 압축도시와 대기오염에 관한 여러 선행연구들에서 나타난 변수별로 비일관적인 결과와 유사하다. 이는 도시공간구조 요인 중 도시의 압축성을 반영하고 있는 요인들 간에도 미세먼지 및 대기오염에 미치는 영향이 상충될 수 있고, 그 요인들의 강도에 따라 영향이 다를 수 있음을 시사하는 결과라고 볼 수 있겠다. 따라서 미세먼지를 비롯한 도시의 대기오염과 관련한 압축도시 논의에 있어서는 신중한 접근이 필요하고 각 요인들의 강도를 고려해 정책을 추진해 나가야 할 것이다.

이 외에도 본 연구에서는 고농도 미세먼지가 계절적으로 겨울과 봄에 많이 발생한다는 점에 주목하고, 그 영향요인으로 기상요인인 풍속, 기온, 습도를 독립변수로 활용하였다. 그러나 다중회귀분석 결과, 이들 기상요인은 봄철, 겨울철 분석 모형에서 모두 유의하지 않은 변수인 것으로 분석되었다. 본 연구에서 활용한 기상요인들은 계절적인 특성을 보여주기 위해 계절별로 그 평균값을 산출하여 분석하였다. 다만 각 계절이 약 3개월가량이므로 다소 긴 기간의 평균값이 도출되었고, 이러한 기간의 문제로 다중회귀분석 결과 통계적인 유의성을 보이지 않은 것으로 사료된다. 추후의 연구에서는 기상요인을 변수로 활용함에 있어 보다 미시적인 기간의 대푯값을 활용할 필요성이 있을 것이다.

2. 가산자료분석

본 연구에서는 고농도 미세먼지가 계절적으로 겨울과 초봄에 집중되어 있음을 감안하고, 그 계절적인 차이를 확인하고자 계절별 PM₁₀ 나쁨 이상 일수를 종속변수로 하는 가산자료(count data)에 대한 분석 역시 진행하였다. 본 연구에서 사용한 가산자료 분석모형인 포아송 회귀모형(poisson regression model)의 적합성을 판단하기 위해 먼저 통계 패키지 R을 통해 과대산포(over-dispersion) 검정을 수행하였다. 그 결과 계절별 PM₁₀ 나쁨 이상 일수 데이터 모두 과대산포가 있는 것으로 나타났다. 즉 모든 계절별 모형에서 유의수준이 0.05보다 작게 나타나 과대산포가 있는 것으로 판단하였다. 이에 따라 대안 모형인 음이항 회귀모형(negative binomial model)을 구축하고 각각의 AIC 값을 확인해 본 바, 여름 모형을 제외한 다른 계절 모형 모두에서 음이항 회귀모형의 AIC 값이 낮게 나타났다. Akaike Information Criterion(AIC) 값은 우도비를 통해 도출한 값으로 모형의 적합도를 평가하는 데 두루 쓰이고 있으며, 그 값이 낮을수록 더 좋은 모델로 평가된다(배현주 외, 2011). 이 두 가지 사항을 종합했을

때, 포아송 회귀모형에 비해 음이항 회귀모형이 보다 적합한 것으로 판단할 수 있다. 분석결과 두 모형이 큰 차이를 보이는 것은 아니므로, 과대산포로 인한 영향이 크지 않은 것으로 볼 수 있다. 따라서 본 연구에서는 포아송 회귀모형과 음이항 회귀모형 결과를 모두 제시하고 그 결과를 종합적으로 살펴보았다.

종속변수가 계절별 PM₁₀ 나쁨 이상 일수이기 때문에 포아송 회귀모형과 음이항 회귀모형 분석을 각각 4차례에 걸쳐 수행하였다. 다중회귀분석 결과와 마찬가지로 고농도 미세먼지의 계절적 집중을 봄철과 겨울철 모델에서 확인할 수 있으므로, 두 계절에 대한 분석 결과를 중심으로 논의를 진행하였다. 분석에 앞서 분산팽창요인(VIF)을 통해 다중공선성을 살펴보고, 총인구, 인구밀도, 총사업체수, 총주택수, 총가구수, 주택보급률, 자동차등록대수의 값이 10 이상으로 도출되어 공선성을 확인하였다. 이에 따라 상관관계가 높은 변수들을 확인하여 이들 변수들을 제거한 계절별 포아송 회귀모형과 음이항 회귀모형을 구축하였다.

PM₁₀ 봄철 나쁨 이상 일수를 종속변수로 하는 가산자료분석의 결과는 <표 4>와 같다. 가산자료 모형의 추정은 최우추정법을 이용하므로 로그우도 함수값에 근거한 유사 R-Squared 값으로 모형의 설명력을 판단한다. 본 연구에서는 R 프로그램에서 포아송 회귀모형과 음이항 회귀모형을 추정했을 때 도출되는 R² Nagelkerke 값으로 각 모형의 설명력을 판단하였다. 이 값은 Nagelkerke(1991)가 제안한 것으로 Cox & Snell R²를 조정한 값이다. PM₁₀ 봄철 나쁨 이상 일수를 종속변수로 하는 포아송 회귀모형의 R² Nagelkerke 값은 0.791이고, 음이항 회귀모형의 R² Nagelkerke 값은 0.614이다.

PM₁₀ 봄철 나쁨 이상 일수에 유의한 영향을 미치는 변수로는 포아송 회귀모형에서 봄 평균 기온, 봄 평균 습도, 상업지역면적, 공업지역면적, 녹지지역면적, 엔트로피 지수, 건축허가건수가 나타났다. 음이항 회귀모형에서는 봄 평균 기온, 녹지지역면적, 엔트로피 지수, 건축허가건수가 나타났다. 포아송 회귀모형에 비해 음이항 회귀모형에서 봄 평균 습도, 상업지역면적, 공업지역면적이 유의하지 않은 것으로 나타났다. 두 모형 모두에서 유의한 변수들은 봄 평균 기온(양의 영향), 녹지지역면적(음의 영향), 엔트로피 지수(양의 영향) 및 건축허가건수(양의 영향)인데, 그 영향력의 크기는 크지 않은 것으로 분석되었다.

엔트로피 지수의 경우, 다중회귀분석에서 전술한 바와 같이 혼합적 토지이용을 보여주는 변수로 혼합도가 높으면 압축적인 도시공간구조를 가짐을 알 수 있다. 혼합적인 토지 이용이 고도화되면 도시의 혼잡성이 높아지게 되어 오염원 배출이 늘어 미세먼지 농도 역시 더 높아질 가능성이 있다. 이는 다중회귀분석에서 나타난 인구밀도와 엔트로피 지수의 상반되는 결과와 마찬가지로 의미를 담고 있다. 압축도시와 대기오염 논의에 관한 여러 선행연구들의 비일관적인 결과에 따른 논쟁을 재확인할 수 있는 것이다. 즉, 압축도시 공간구조가 교통에너지 소비를 줄이고 그에

표 4. PM₁₀ 봄, 겨울 포아송 회귀모형과 음이항 회귀모형

Table 4. Poisson and negative binomial (NB) models for estimating PM₁₀ in spring and winter

변수 Variables	봄 (Spring model)		겨울 (Winter model)	
	포아송 회귀모형 Poisson model	음이항 회귀모형 NB model	포아송 회귀모형 Poisson model	음이항 회귀모형 NB model
	Coefficient (Std. Err)	Coefficient (Std. Err)	Coefficient (Std. Err)	Coefficient (Std. Err)
절편 Intercept	-0.70 (0.90)	-0.80 (1.25)	0.70 (0.90)	0.50 (1.199)
봄, 겨울 평균 풍속 Average wind speed in spring, winter	0.03 (0.07)	0.05 (0.10)	-0.10 (0.10)	-0.09 (0.20)
봄, 겨울 평균 기온 Average temperature in spring, winter	0.10** (0.04)	0.10* (0.06)	-0.03 (0.08)	-0.03 (0.10)
봄, 겨울 평균 습도 Average humidity in spring, winter	0.02* (0.007)	0.02 (0.01)	0.005 (0.01)	0.007 (0.02)
상업지역면적 Business area	0.05* (0.02)	0.05 (0.04)	-0.02 (0.05)	-0.02 (0.06)
공업지역면적 Industrial area	-0.02* (0.008)	-0.02 (0.01)	-0.005 (0.01)	-0.01 (0.02)
녹지지역면적 Green area	-0.004*** (0.0009)	-0.004** (0.001)	-0.004** (0.001)	-0.005** (0.002)
엔트로피 지수 Entropy index	1.176*** (0.30)	1.199* (0.50)	1.46* (0.70)	1.554 (0.80)
광업·제조업·건설업 사업체수 Number of mining, manufacturing, construction companies	0.000004 (0.00001)	0.000004 (0.00002)	-0.000005 (0.00002)	0.000002 (0.00003)
고용밀도 Employment density	-0.00001 (0.000007)	-0.00001 (0.000009)	-0.00001 (0.00002)	-0.00001 (0.00002)
건축허가건수 Construction permission	0.0001*** (0.00004)	0.0002** (0.00005)	0.0003*** (0.00006)	0.0003*** (0.00009)
도로밀도 Road density	-0.004 (0.007)	-0.004 (0.010)	-0.03 (0.02)	-0.03 (0.02)
Deviance	115.78	58.113	96.587	62.861
R ² Nagelkerke	0.791	0.614	0.855	0.731
Theta	-	20.11	-	9.54
AIC	413.62	397.72	311.11	305.81

*p<0.05, **p<0.01, ***p<0.001

따라 대기오염 물질 배출 감소에도 기여할 수 있지만, 동시에 도시의 혼잡성을 높이고 사람, 교통, 산업 활동 등을 증가시켜 미세먼지 등 대기오염 농도 수준을 악화시킬 수도 있다(김승남 외, 2009; 이갑정·윤갑식, 2013). 또한 미세먼지 등 대기오염 농도에는 토지이용, 산업 활동 및 도시공간구조 등 다양한 도시 특성이 영향을 미치고 이들 요인들은 상호복합적으로 작용할 수 있다(김승남 외, 2009). 도시의 압축성을 담고 있는 요인 중 본 연구에서 확인할 수 있었던 엔트로피 지수의 결과는 여러 도시적 요인이 대기오염에 복합적으로 영향을 미치는 가운데, 이미 고밀화된 한국의 대도시에서는 혼잡성으로 인한 활동 증가가 미세먼지 농도에 보다 더 악영향을 준 것으로 해석할 수 있다.

포아송 회귀모형 및 음이항 회귀모형과 같은 가산자료 모형에

서는 지수함수 $\exp(\beta)$ 에 추정된 회귀계수를 대입하여 계산한 사건발생비율(Incidence Rate Ratio, IRR)을 통해 분석결과를 설명할 수 있다. 여기서 IRR은 독립변수 1단위 증가 시 종속변수가 $\exp(\beta)$ 배만큼 증가한다는 것으로 해석한다. 예컨대 <표 4> 분석 결과에서 봄 평균 기온의 경우, 기온 1°C 상승 시 PM₁₀ 봄철 나쁨 이상 일수가 1.15배 정도 증가한다는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 다중회귀분석모형에서는 확인할 수 없었던 것으로, 기온이 높을 때 미세먼지 발생이 용이하다는 선행연구(김운수·김정아, 2011; 박일수, 2016)의 결과와 일치하는 것으로 이해할 수 있다.

한편 PM₁₀ 봄철 평균 농도를 종속변수로 하는 다중회귀모형의 결과에서 유의하게 나타나는 변수 중 녹지지역면적(음의 영향), 엔트로피 지수(양의 영향), 건축허가건수(양의 영향)가 공통적으

로 유의하면서 그 방향성도 같다는 점을 확인할 수 있었다. 연속형 변수인 미세먼지 평균농도를 종속변수로 하는 다중회귀분석과 가산자료인 미세먼지 나쁨 이상 일수를 종속변수로 하는 분석 모두에서 봄철 고농도 미세먼지 발생에 영향을 미치는 변수들이 공통적으로 나타났으므로, 이들 요인에 대한 특별한 관심과 정책적인 개선 노력이 필요하다.

PM₁₀ 겨울철 나쁨 이상 일수를 종속변수로 하는 가산자료분석의 결과는 <표 4>와 같다. 포아송 회귀모형의 R² Nagelkerke 값은 0.855이고, 음이항 회귀모형의 R² Nagelkerke 값은 0.731이다. PM₁₀ 겨울철 나쁨 이상 일수에 유의한 영향을 미치는 변수로는 포아송 회귀모형에서 녹지지역면적, 엔트로피 지수, 건축허가건수가 나타났고, 음이항 회귀모형에서는 녹지지역면적, 건축허가건수가 나타났다. 포아송 회귀모형과 음이항 회귀모형 모두에서 유의한 변수로 녹지지역면적(음의 영향)과 건축허가건수(양의 영향)가 나타났다. 이는 PM₁₀ 겨울철 평균 농도를 종속변수로 하는 다중회귀모형의 결과에서 유의하게 나타나는 변수 중 인구밀도(음의 영향)를 제외한 같은 결과이다. 이러한 결과는 다중회귀분석의 봄철, 겨울철 모형 및 가산자료분석의 봄철 포아송, 음이항 모형과 겨울철 포아송, 음이항 모형 모두에서 동일하게 나타나는 것으로 고농도 미세먼지 발생에 녹지지역면적이 음의 영향을 미치고, 건축허가건수가 양의 영향을 미친다는 것으로 정리할 수 있다.

V. 결론 및 정책적 시사점

본 연구는 그동안 미세먼지 저감을 위한 다양한 정책적 노력에도 불구하고 고농도 미세먼지 발생이 빈번해지고 있는 상황에서, 미세먼지 발생이 계절적으로 겨울과 초봄에 집중되어 있음에 주목하여 연구를 진행하였다. 이에 따라 계절별 고농도 미세먼지 발생에 영향을 미치는 기상요인 및 도시공간구조 요인을 실증적으로 분석하였다. 이를 위해 PM₁₀ 계절별 평균 농도를 종속변수로 하는 다중회귀분석과 PM₁₀ 계절별 나쁨 이상 일수를 종속변수로 하는 가산자료분석을 수행하였다. 본 연구에서 확인된 각 모형의 분석 결과로부터 다음과 같은 정책적 시사점을 도출하였다.

첫째, 다중회귀분석의 봄철, 겨울철 모형 및 가산자료분석의 봄철 포아송, 음이항 모형, 겨울철 포아송, 음이항 모형 모두에서 공통적으로 토지이용·개발 변수인 녹지지역 면적이 PM₁₀ 농도 및 나쁨 이상 일수에 음의 영향을 미치고, 건축·주거 변수인 건축허가 건수가 양의 영향을 미친다는 점을 확인하였다. 녹지가 미세먼지 저감에 긍정적인 영향을 미친다는 점은 다수의 선행연구에서 확인할 수 있는 바로, 본 연구 역시 이러한 사실을 재확인하였다. 한정된 도시공간 속에서, 토지는 각 지자체의 필요에 따라 경쟁적으로 배분되고 있다. 녹지는 본 연구의 분석 결과와 같이 미세먼지 저감을 비롯한 대기오염 물질 감소 외에도 탄소배출 경감 및 지표면 온도 저감 등 도시환경 개선에 긍정적 영향을 미친

다는 점에서 그 확충 노력이 지속되어야 할 것이다. 한편 건축허가건수의 경우, 미세먼지 발생원 중 하나인 비산먼지 유발과 직접적으로 관계된 변수이다. 기존에 수송, 난방 분야를 중심으로 추진되던 미세먼지 저감 정책 외에, 건축 시 발생할 수 있는 비산먼지 대책에 대한 적극적 정책 대안 마련이 필요하다.

둘째, 다중회귀분석의 봄철 모형 및 가산자료분석의 봄철 포아송, 음이항 모형에서 엔트로피 지수가 PM₁₀ 농도에 양의 영향을 미치는 결과가 나타났다. 엔트로피 지수는 토지이용의 혼합 정도를 나타내는 변수로, 본 연구의 결과는 혼합된 토지이용이 압축적인 도시공간을 구성하고 이에 따라 도시 내 교통 및 오염원 발생을 감소시킨다(김태형·고준호, 2016; 서원석·김리영, 2013)는 기존의 논의와는 상반되는 결과이다. 압축도시와 대기오염의 관계에 관한 여러 선행연구에서 압축도시 전략의 실효성에 대한 찬반 논쟁이 있어 왔다. 그러나 혼합적 토지이용, 밀도, 도시공간구조 등 요인들이 교통에너지 소비에 직간접적인 영향을 미치고(송기욱·남진, 2009) 나아가 미세먼지를 비롯한 대기오염 농도에도 영향을 미칠 가능성이 있다는 점에 대해서는 견해가 공통적이었다. 이러한 점을 반영하여 관련 요인들이 미세먼지에 미칠 영향관계를 종합적으로 고려해 후속 연구를 발전시킬 필요가 있다. 특히 후속 연구에서는 본 연구에서 활용한 공간 단위보다 좁은 분석단위 혹은 압축도가 높은 CBD 중심의 엔트로피 지수를 도출하여 추가적인 분석을 수행할 필요가 있다. 엔트로피 지수 이외의 토지이용 혼합도나 다양성을 설명할 수 있는 지표에 대한 검토도 필요하다.

셋째, 가산자료분석의 봄철 포아송, 음이항 모형에서 공통적으로 봄철 평균 기온이 PM₁₀ 나쁨 이상 일수에 양의 영향을 미치는 것으로 분석되었다. 이는 미세먼지 농도를 종속변수로 하는 다중회귀분석에서는 나타나지 않은 결과이나, 기온이 높을 때 미세먼지 발생이 용이하다는 선행연구(김운수·김정아, 2011; 박일수, 2016)들의 결과와 일맥상통한 결과이다. 봄철 기온상승은 호흡기 질환 등을 유발할 수 있는 미세먼지 발생 수준과 관계되어 있으므로, 세심한 기상요인 모니터링 정보를 바탕으로 한 미세먼지 대응방안에 대한 검토와 준비가 필요하다.

넷째, 고농도 미세먼지 발생에 영향을 미칠 수 있는 기상요인 및 도시공간구조 요인들을 감안한 종합적인 도시계획을 추진할 필요가 있다. 미세먼지 발생에는 본 연구에서 다룬 기상요인, 도시공간구조 요인을 비롯해 배출원, 도시형태 등 다양한 요인들이 복합적으로 작용한다. 각각의 요인에 대한 세부적인 정책이 필요한 만큼 미세먼지 문제 개선을 위한 통합적인 접근 역시 중요한 이유이다. 그렇기 때문에 미세먼지 발생과 관련이 있는 토지이용, 주택 및 주거, 교통, 대기 및 환경 등 여러 분야의 계획 간에 상호 조화가 이루어져야 할 것이다. 동시에 이들 계획들을 아우르는 상위 계획 차원에서 상호 관련성이 높은 하위 계획 간의 연계를 통한 통합적인 미세먼지 문제 대응 정책이 입안·추진되어야 한다.

본 연구는 미세먼지 농도를 종속변수로 하는 다중회귀분석과

더불어 기존 선행연구에서 고려하지 못한 미세먼지 나쁨 이상 일수라는 가산자료를 활용한 모형을 통해 미세먼지 발생에 영향을 미치는 도시환경 요인에 대한 종합적 분석을 시도하였다. 이를 통해 2000년대 이후 미세먼지 농도가 개선되고 있음에도 불구하고, 나쁨 일수가 증가하여 고농도 미세먼지 발생이 빈번해지는 현상을 설명하고자 하였다. 분석 결과, 다중회귀분석과 가산자료 분석에서 공통적으로 유의한 변수인 녹지지역면적, 건축허가건수를 도출할 수 있었고, 기존 다중회귀분석 결과만으로는 확인할 수 없었던 기상요인 중 하나인 기온 변수가 가산자료분석인 봄철 포아송, 음이항 회귀모형 모두에서 유의한 양의 영향을 미친다는 점을 확인하였다.

본 연구는 미세먼지와 관련한 기존 선행연구들이 고려하지 못한 계절적 측면에서의 기상요인을 변수로 활용하고, 계절별, 종속변수 유형별 다양한 모형 구축을 통해 다각적인 분석을 수행하였다. 특히 여러 분석 모형에서 공통적으로 도출된 녹지지역면적, 건축허가건수 등 변수들에 대한 엄밀한 해석 및 이들 변수들과 관련된 미세먼지 대응책 등 정책적 시사점을 제시하였다는 데 그 의의가 있다. 그러나 수도권 시·구를 분석의 공간적 범위로 하는 과정에서 누락된 기상자료가 있었으며, 이를 대체하는 과정에서 데이터 구축에 한계가 있었다. 또한 토지이용혼합 수준이나 다양성을 보여줄 수 있는 변수와 기법들에 대한 추가적 검토도 필요하다. 후속 연구에서는 보다 미시적으로 세분화된 공간 단위에서 대표성 있는 정밀한 자료를 활용한 분석모형 구축과 시사점 검토가 필요할 것이다.

주1. 국립환경과학원(2021), 「대기환경연보(2020)」 자료를 토대로 저자 재구성.
 주2. 미세먼지 좋음 및 나쁨 일수는 현재 환경부, 서울시 및 수도권 지자체 등에서 주로 초미세먼지(PM_{2.5}) 자료를 토대로 발표하고 있음.
 주3. 국립환경과학원(2021), 「대기환경연보(2020)」 토대로 저자 재구성.

인용문헌
References

- 국립환경과학원, 2021, 「대기환경연보(2020)」, 인천. National Institute of Environmental Research, 2021. *Annual Report of Air Quality in Korea 2020*, Incheon.
- 김병석·문태훈, 2011. "압축도시의 토지이용 특성이 이산화탄소 배출에 미치는 영향", 「환경정책」, 19(2): 101-115. Kim, B.S. and Moon, T.H., 2011. "A Study on the Effects of Land Use Characteristics of Compact City on CO₂ Emission", *Journal of Environmental Policy and Administration*, 19(2): 101-115.
- 김승남·이경환·안건혁, 2009. "압축도시 공간구조 특성이 교통 에너지 소비와 대기오염 농도에 미치는 영향", 「국토계획」, 44(2): 231-246. Kim, S.N., Lee, K.H., and Ahn, K.H., 2009. "The Effects of Compact City Characteristics on Transportation Energy Consumption and Air Quality", *Journal of Korea Planning Association*, 44(2): 231-246.
- 김운수·김정아, 2011. 「서울시 고농도 미세먼지 오염현상의 원 인분석 및 지역별 맞춤형 관리대책」, 서울연구원 정책과제연구 보고서. Kim, W.S. and Kim, J.A., 2011. *A Study of Building Customized Management Strategies Based on Local PM₁₀ Emission Inventory in Seoul*, The Seoul Institute Policy Research Project Research Report.
- 김인현·오규식·정승현, 2011. "도시공간 계획요소를 이용한 이산화탄소 배출량 산정 모델 개발 -서울시를 사례로", 「한국공간정보학회지」, 19(6): 11-18. Kim, I.H., Oh, K.S., and Jung, S.H., 2011. "Carbon Emission Model Development using Urban Planning Criteria -Focusing on the Case of Seoul", *Journal of Korea Spatial Information Society*, 19(6): 11-18.
- 김철수, 2006. 「도시공간의 이해」, 서울: 기문당. Kim, C.S., 2006. *Understanding Urban Space*, Seoul: Kimoon-dang.
- 김태형·고준호, 2016. "대도시 토지이용 압축도 지표의 개발 및 적용: 서울시를 대상으로", 「서울도시연구」, 17(1): 1-21. Gim, T.H. and Ko, J.H., 2016. "Developing a Land Use Compactness Index for a Large City: A Case of Seoul, Korea", *Seoul Studies*, 17(1): 1-21.
- 김효진, 2019. "기후변화, 그로 인한 도시폭염과 미세먼지에 대응한 안전사회 구축방안", 「법연」, 63: 23-27. Kim, H.J., 2019. "A Plan to Establish a Safe Society in Response to Climate Change, Resulting in Urban Heat Waves and Fine Dust", *Beobyeon*, 63: 23-27.
- 김희재·전명진, 2014. "도시 특성과 대기 오염 수준과의 관계 분석 연구 -수도권을 사례로-", 「국토계획」, 49(7): 151-167. Kim, H.J. and Jun, M.J., 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.
- 문광주·반수진·박지훈·박승명·박종성·장성기·김종춘, 2011. "서울지역 고농도 미세먼지 사례의 발생 경향 분석 및 미세먼지 성분특성에 관한 연구", 「한국대기환경학회 추계학술대회논문집」, 104-104. Moon, K.J., Ban, S.J., Park, J.H., Park, S.M., Park, J.S., Jang, S.K., and Kim, J.C., 2011. "Trend Analysis of High PM Outbreaks and Characteristics of Fine Aerosol during the Events in Seoul", *Proceedings of the Korean Society for Atmospheric Environment Conference*, 104-104.
- 박기형·이병규, 2013. "부산지역 미세먼지 고농도 사례 분석 연구", 「한국대기환경학회 학술대회논문집」, 32-32. Park, K.H. and Lee, B.G., 2013. "Analysis on the Fine PM Episodes in Busan", *Proceedings of the Korean Society for Atmospheric Environment Conference*, 32-32.
- 박소현·방성완·전명식, 2011. "순차 적응 최근접 이웃을 활용한 결측값 대체법", 「응용통계연구」, 24(6): 1249-1257. Park, S.H., Bang, S.W., and Jhun, M.S., 2011. "General

- Applied Statistics: On the Use of Sequential Adaptive Nearest Neighbors for Missing Value Imputation”, *The Korean Journal of Applied Statistics*, 24(6): 1249-1257.
13. 박일수, 2016. “서울 수도권지역에서 미세먼지 고농도 발생의 근본 원인은 무엇인가?”, 『한국대기환경학회지』, 32(3): 352-353.
Park, I.S., 2016. “What is the Root Cause of the High Concentration of Fine Dust in the Seoul Metropolitan Area?”, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 32(3): 352-353.
 14. 배현주·하종식·임유라, 2011. 「기후변화와 대기오염으로 인한 건강영향 연구: 사회경제적 변수에 따른 사망영향」, 한국환경정책·평가연구원 기본연구보고서.
Bae, H.J., Ha, J.S., and Im, Y.R., 2011. *Health Impacts of Climate Change and Air Pollution: Effects of Socioeconomic Factors on Mortality*, Korea Environment Institute Research Report.
 15. 서울시, 2019. 「미세먼지 시즈제(계절관리제) 추진계획」, 서울: 기후환경본부.
Seoul Metropolitan Government, 2019. *Plan to Promote the Fine Dust Season System (Seasonal Management System)*, Seoul: Climate & Environment Headquarters.
 16. 서울시, 2021. 「2021 주요업무 계획」, 서울: 기후환경본부.
Seoul Metropolitan Government, 2021. *2021 Key Task Plan*, Seoul: Climate & Environment Headquarters.
 17. 서원석·김리영, 2013. “도시공간구조 유형과 환경요소의 관계에 대한 실증연구”, 『지역연구』, 29(4): 3-19.
Seo, W.S. and Kim, L.Y., 2013. “Empirical Analysis of Relationship Between Urban Spatial Forms and Environmental Factors”, *Journal of the Korean Regional Science Association*, 29(4): 3-19.
 18. 송기욱·남진, 2009. “압축형 도시특성요소가 교통에너지 소비에 미치는 영향에 관한 실증분석”, 『국토계획』, 44(5): 193-206.
Song, K.W. and Nam, J., 2009. “An Analysis on the Effects of Compact City Characteristics on Transportation Energy Consumption”, *Journal of Korea Planning Association*, 44(5): 193-206.
 19. 오규식·구자훈·조창제, 2005. “도시형태 구성요소가 지역별 대기오염에 미치는 영향”, 『국토계획』, 40(3): 159-170.
Oh, K.S., Koo, J.H., and Cho, C.J., 2005. “The Effects of Urban Spatial Elements on Local Air Pollution”, *Journal of Korea Planning Association*, 40(3): 159-170.
 20. 오규식·정희범, 2007. “도시의 개발밀도 변화가 대기오염에 미치는 영향”, 『국토계획』, 42(5): 197-210.
Oh, K.S. and Chung, H.B., 2007. “The Influence of Urban Development Density on Air Pollution”, *Journal of Korea Planning Association*, 42(5): 197-210.
 21. 오혜련·허창회·김진원·이승민·최용상·장임석·송창근, 2014. “서울에서 4일 이상 지속되는 미세먼지 고농도 현상의 발생 원인과 이동 패턴 분석”, 『한국기상학회 학술대회논문집』, 978-979.
Oh, H.R., Heo, C.H., Kim, J.W., Lee, S.M., Choi, Y.S., Jang, I.S., and Song, C.G., 2014. “Analysis of the Causes and Movement Patterns of High Concentrations of Fine Dust Lasting More Than Four Days in Seoul”, *Proceedings of the Korean Meteorological Society Conference*, 978-979.
 22. 유윤진·김도년·손세형, 2013. “저탄소 녹색도시 구현을 위한 탄
 - 소배출영향요인 분석 - 경기도 탄소배출량을 중심으로”, 『한국 도시설계학회지 도시설계』, 14(2): 149-159.
 - Ryu, Y.J., Kim, D.N., and Sohn, S.H., 2013. “An Analysis of Factors, Influencing Carbon Emissions to Realize a Low-carbon Green City - A Case Study Based on the Carbon Emissions of Gyeonggi-do Province”, *Journal of The Urban Design Institute of Korea Urban Design*, 14(2): 149-159.
 23. 유윤진·손세형·김도년, 2012. “도시공간구조와 탄소배출량간 상관관계 실증 분석”, 『한국대기환경학회지』, 28(3): 273-281.
 - Ryu, Y.J., Sohn, S.H., and Kim, D.N., 2012. “An Empirical Analysis on Correlation between Carbon Emission and Urban Spatial Structure”, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 28(3): 273-281.
 24. 이갑정·윤갑식, 2013. “도시공간구조와 교통에너지 소비의 상관성 분석”, 『도시행정학보』, 26(3): 121-142.
Lee, G.J. and Yun, K.S., 2013. “An Analysis of the Interrelationship between Urban Spatial Structure and Transportation Energy Consumption”, *Journal of the Korean Urban Management Association*, 26(3): 121-142.
 25. 이수미·권일·김용진, 2019. “도시 환경이 온열질환 발생에 미치는 영향에 관한 연구”, 『한국콘텐츠학회논문지』, 19(12): 84-92.
Lee, S.M., Kweon, I., and Kim, Y.J., 2019. “A Study on the Influence of Urban Environment on the Generation of Thermal Diseases”, *Journal of The Korea Contents Association*, 19(12): 84-92.
 26. 이승민·허창회, 2013. “장기간(5일 이상) 지속된 서울 지역 미세먼지 고농도 사례 연구”, 『한국기상학회 학술대회 논문집』, 556-557.
Lee, S.M. and Heo, C.H., 2013. “A Case Study on the High Concentration of Fine Dust in Seoul that Lasted for a Long Time (More Than 5 Days)”, *Proceedings of the Korean Meteorological Society Conference*, 556-557.
 27. 이연수·손동욱, 2015. “도시의 물리적 환경특성과 서울시 대기오염과의 연관성 분석”, 『한국도시설계학회지 도시설계』, 16(3): 5-19.
Lee, Y.S. and Sohn, D.W., 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 Urban Design*, 16(3): 5-19.
 28. 이원도·원종서·조창현, 2011. “대기오염지수와 도시공간구조 특성에 관한 연구: 서울시 토지이용과 교통자료를 바탕으로”, 『한국경제지리학회지』, 14(2): 143-156.
Lee, W.D., Won, J.S., and Joh, C.H., 2011. “Correlation between Air Environment Index and Urban Spatial Structure: Based On Land Use and Traffic Data In Seoul”, *Journal of the Economic Geographical Society of Korea*, 14(2): 143-156.
 29. 이해춘·안경애·김태영, 2018. “미세먼지로 인한 호흡기 질환 발생의 사회경제적 손실가치 분석: Panel VAR 모형을 중심으로”, 『경영컨설팅연구』, 18(4), 173-186.
Rhee, H.C., Ahn, K.A., and Kim, T.Y., 2018. “A Socio-economic Loss of Respiratory Disease Caused by Particulate Matter Pollution: Focusing on Panel VAR Model”, *Korean Management Consulting Review*, 18(4), 173-186.
 30. 이현주·정여민·김선태·이우섭, 2018. “기후변화에 따른 한반도 미세먼지 발생과 연관된 대기패턴”, 『한국기상학회 학술대회논

- 문집], 549-549.
 Lee, H.J., Jung, Y.M., Kim, S.T., and Lee, W.S., 2018. "Atmospheric Patterns Related to the Generation of Fine Dust on the Korean Peninsula due to Climate Change", *Proceedings of the Korean Meteorological Society Conference*, 549-549.
31. 장명준·신예철·최형선·김태호, 2012. "도시규모를 고려한 탄소 배출량과 도시특성요소와의 관계 연구", 「도시행정학보」, 25(4): 57-87.
 Jang, M.J., Shin, Y.C., Choi, H.S., and Kim, T.H., 2012. "The Analysis of Relationship Between Urban Size and CO₂ Emissions Considering Urban Characteristics", *Journal of the Korean Urban Management Association*, 25(4): 57-87.
32. 전창우·조대현·주뢰, 2018. "지리가중능형회귀(GWRR)를 이용한 미세먼지(PM10)의 공간적 이질성 탐색", 「한국지도학회지」, 18(3): 91-104.
 Jeon, C.W., Cho, D.H., and Zhu L., 2018. "Exploring the Spatial Heterogeneity of Particulate Matter (PM10) Using Geographically Weighted Ridge Regression (GWRR)", *Journal of the Korean Cartographic Association*, 18(3): 91-104.
33. 정재형·권오열, 2015. "서울시 도시공간구조와 온실가스-대기오염 통합 배출량의 통계모형분석", 「한국환경과학회지」, 24(3): 303-316.
 Jung, J.H. and Kwon, O.Y., 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.
34. 최열·문설희·임하경, 2007. "도시특성 요소가 대기오염에 미치는 영향에 관한 연구", 「국토계획」, 42(3): 191-202.
 Choi, Y., Moon, S.H., and Yim, H.K., 2007. "Assessing the Impact of the Factors of Urban Characteristics on Air Pollution Using Panel Model", *Journal of Korea Planning Association*, 42(3): 191-202.
35. 최태영·문호경·강다인·차재규, 2018. "서울시 토지피복에 따른 계절별 미세먼지 농도 차이 분석 -산림과 시가지지역을 중심으로-", 「환경영향평가」, 27(6): 635-646.
 Choi, T.Y., Moon, H.G., Kang, D.I., and Cha, J.G., 2018. "Analysis of the Seasonal Concentration Differences of Particulate Matter According to Land Cover of Seoul -Focusing on Forest and Urbanized Area-", *Journal of Environmental Impact Assessment*, 27(6): 635-646.
36. 한혁·정창훈·금현섭·김용표, 2017. "미세먼지(PM₁₀) 저감 정책의 비판적 검토: 1차 수도권 대기환경관리 기본계획의 정책 대상, 수단, 효과를 중심으로", 「환경정책」, 25(1): 49-79.
 Han, H., Jung, C.H., Kum, H.S., and Kim, Y.P., 2017. "The Revisit on the PM₁₀ Reduction Policy in Korea: Focusing on Policy Target, Tools and Effect of 1st Air Quality Management Plan in Seoul Metropolitan Area", *Journal of Environmental Policy and Administration*, 25(1): 49-79.
37. 환경부, 2014. 「대기오염 예측·발표의 대상지역 및 기준과 내용 등에 관한 고시」, 세종.
 Ministry of Environment, 2014. *Public Notice of the Area Subject to Air Pollution Prediction and Announcement, Standards, Contents*, Sejong.
38. 황인창, 2018. "서울시 미세먼지 관리 정책의 성과와 한계", 「한국정책학회보」, 27(2): 27-50.
 Hwang, I.C., 2018. "Particulate Matter Management Policy of Seoul: Achievements and Limitations", *The Korea Association for Policy Studies*, 27(2): 27-50.
39. Alwani, Z.I.Z., Ibrahim, A.I.N., Yunus, R.M., and Yusof, F., 2021. "Application of Zero-truncated Count Data Regression Models to Air-pollution Disease", *Journal of Physics: Conference Series*, 1988(1): 012096.
40. Ardiles, L.G., Tadano, Y.S., Costa, S., Urbina, V., Capucim, M.N., da Silva, I., Braga, A., Martins, J.A., and Martins, L.D., 2018. "Negative Binomial Regression Model for Analysis of the Relationship between Hospitalization and Air Pollution", *Atmospheric Pollution Research*, 9(2): 333-341.
41. Cho, M., Choi, Y.S., Kim, H.R., Yoo, C., and Lee, S.S., 2021. "Cold-season Atmospheric Conditions Associated with Sudden Changes in PM₁₀ Concentration over Seoul, Korea", *Atmospheric Pollution Research*, 12(5): 101041.
42. Clark, L.P., Millet, D.B., and Marshall, J.D., 2011. "Air Quality and Urban Form in US Urban Areas: Evidence from Regulatory Monitors", *Environmental Science & Technology*, 45(16): 7028-7035.
43. Jung, M.C., Park, J., and Kim, S., 2019. "Spatial Relationships between Urban Structures and Air Pollution in Korea", *Sustainability*, 11(2): 476.
44. Kim, H., 2020. "Land Use Impacts on Particulate Matter Levels in Seoul, South Korea: Comparing High and Low Seasons", *Land*, 9(5): 142.
45. Lee, S., Ho, C.H., and Choi, Y.S., 2011. "High-PM₁₀ Concentration Episodes in Seoul, Korea: Background Sources and Related Meteorological Conditions", *Atmospheric Environment*, 45(39): 7240-7247.
46. Nagelkerke, N.J., 1991. "A Note on a General Definition of the Coefficient of Determination", *Biometrika*, 78(3): 691-692.
47. Newman, P.W. and Kenworthy, J.R., 1989. "Gasoline Consumption and Cities: A Comparison of US Cities with a Global Survey", *Journal of the American Planning Association*, 55(1): 24-37.
48. Park, S.H. and Ko, D.W., 2018. "Investigating the Effects of the Built Environment on PM_{2.5} and PM₁₀: A Case Study of Seoul Metropolitan City, South Korea", *Sustainability*, 10(12): 4552.
49. Rodríguez, M.C., Dupont-Courtade, L., and Oueslati, W., 2016. "Air Pollution and Urban Structure Linkages: Evidence from European Cities", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53: 1-9.
50. Yum, Y. and Kim, D., 2018. "On the Use of Weighted Adaptive Nearest Neighbors for Missing Value Imputation", *The Korean Journal of Applied Statistics*, 31(4): 507-516.

Date Received 2021-09-25
 Reviewed(1st) 2021-11-25
 Date Revised 2022-01-11
 Reviewed(2nd) 2022-01-25
 Date Accepted 2022-01-25
 Final Received 2022-02-14