



압축도시특성이 초미세먼지 농도에 미치는 영향 분석*

Examining the Impacts of Urban Compactness on Fine Particulate Matter Concentration in Korea

김우식** · 윤동근***

Kim, Woo Sik · Yoon, Dong Keun

Abstract

The problem of particulate matter resulting from environmental changes caused by rapid industrialization is threatening our lives in many ways. While many studies have found that particulate matter has been widely related to pollution and weather factors, relatively little attention has been paid to analyzing the impact of urban compactness on fine particulate matter. This study developed a fixed effects model to examine the relationship between urban compactness and PM2.5 concentration, by controlling weather and polluting factors. Urban compactness including Population density, Fragmentation and Contiguity were measured by population data and impervious surface data using Fragstats and GIS (Geographic Information System). The results showed that not only climate factors and emission sources have a significant impact on PM2.5 concentration, but characteristics of urban compactness also play an important role, as well as other factors. Moreover, this study found that the PM2.5 concentration tended to be lower in Metropolitan areas as contiguity increased, and PM2.5 concentration tended to decrease as the fragmentation increased in Urban areas. Accordingly, in constructing a smart city with an optimum air environment, urban planners should consider the characteristics of urban compactness to mitigate the urban air pollution problems.

주제어 초미세먼지, 압축도시, 고정효과모형, 도시공간구조

Keywords PM2.5, Urban Compactness, Fixed Effects Model, Urban Spatial Structure

1. 서론

산업화의 결과로 우리나라는 급격한 경제성장을 이룩하였지만, 빠른 도시화로 인하여 유발된 대기오염은 다양한 부문에서 우리의 삶을 위협하고 있다. 세계보건기구(World Health Organization)에 따르면 대기오염물질 중 미세먼지의 노출로 전 세계적으로 매년 420만 명이 조기 사망하는 원인으로 추정된다고 보

고되었다(WHO, 2016). 미세먼지의 장기적인 노출이 호흡기 질환, 심장병 등 여러 건강 문제의 원인이 되고 있으며(Puett et al., 2009; Park, 2019), 특히 어린이, 노약자, 임산부에게 특히 악영향을 미친다고 나타났다(Roy et al., 2012; Fossati et al., 2014; Zhu et al., 2015). 건강과 관련된 문제뿐만 아니라 미세먼지로 인한 동식물의 피해, 생태계 교란, 사회적 불안정 등의 문제가 빈번히 발생하고 있다(Smith et al., 2013; Chen and He,

* 이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단(No.2021R1A2C2013282)의 지원과 국토교통부의 스마트시티 혁신인재육성사업의 지원을 받아 수행됨.

** Doctorate Candidate, Department of Urban Planning and Engineering, Yonsei University (First Author: woosik212@yonsei.ac.kr)

*** Professor, Department of Urban Planning and Engineering, Yonsei University (Corresponding Author: dkyoon@yonsei.ac.kr)

2014). 또한, 미세먼지는 인구와 기반시설이 밀집해 있는 도시지역에서 농도가 높은 경향이 있으며, 소비 위축, 산업의 생산성 저하 등 여러 사회경제적 문제의 원인이 되고 있다(최종일·이영수, 2015; 이해춘 외, 2018).

위와 같은 미세먼지의 위협에 대응하기 위하여 정부는 미세먼지 저감을 위한 법·제도를 마련하고 대책을 강구하고 있다. 미세먼지의 위협에 대응하기 위하여 다양한 분야에서 미세먼지 배출 저감 및 관리를 위한 정책들이 시행되고 있으며 핵심 배출원(자동차, 발전소, 대형 산업 및 소각시설 등)의 오염물질 배출을 통제하는 등 미세먼지 저감을 위해 노력하고 있다. 또한, 지역의 특성을 고려하여 미세먼지 계절 관리제, 고농도 미세먼지 비상저감조치 등의 대책이 추진되고 있으며, 이와 더불어 도시 계획, 토지이용계획 등 공간 계획적인 시도를 통한 장기적인 미세먼지 문제해결이 필요하다(남성우 외, 2020). 도시지역에서 도심지의 고밀도 개발과 토지의 압축적인 이용을 통해 이동을 최소화하고 지속 가능한 도시공간을 조성하는 등 도시 계획적인 변화가 이루어지고 있다. 압축도시를 통해 도시의 경제와 사회적 문제뿐만 아니라 환경적인 문제를 최소화할 수 있으며(OECD, 2012), 많은 연구에서도 도시의 압축적 특징이 대기오염, 교통 등의 문제를 최소화하는 데 유용할 수 있다고 분석되었다(서승연 외., 2014; McCarty and Kaza, 2015; Rodríguez et al., 2016; Yuan et al., 2018a; Yuan et al., 2018b; Li and Zhou, 2019; Lee, 2020; Tao et al., 2020).

본 연구에서는 우리나라 전국 시·군·구를 대상으로 압축도시 특성과 초미세먼지 농도의 관계를 분석하였다. 선행연구를 기반으로 압축도시특성과 관련된 지표를 구축하였으며, 위성 데이터 기반의 연평균 초미세먼지(PM2.5) 농도를 분석에 활용하였다. 이후, 패널 고정효과모형을 활용하여 압축도시특성과 초미세먼지 농도와의 관계를 실증적으로 분석하였다. 이를 통해 향후 미세먼지 대응과 관련하여 미세먼지 농도를 감소시킬 수 있는 도시 계획적 대안을 제시하는 것을 목적으로 한다.

II. 이론적 배경

1. 미세먼지 발생 영향요인

미세먼지가 발생하는 요인에 대해서는 다양한 원인들이 제시되고 있으며, 크게 습도, 온도, 풍속 등의 기상학적 요인과 수송 및 산업 관련 오염원 등의 환경적 요인, 그 밖에 지역 특성요인 등이 주로 제시되고 있다. 기상학적인 관점에서는 날씨 등의 기후적 요소가 미세먼지에 유의한 영향을 미치며 습도, 온도, 기압 등과 유의한 관계가 있는 것으로 나타났다. 또한, 미세먼지는 기압 패턴, 풍향, 풍속 등에 따라 농도와 지속성이 증가할 수 있다. 일반적으로 기상요인 중 강수량과 풍속은 미세먼지 농도와 음의 관

계가 있는 것으로 분석되며 온도는 양의 관계가 있는 것으로 분석된다. 이는 비에 의하여 먼지가 씻겨 내려가고 풍속이 강한 곳은 대기확산이 활발하기 때문이라고 해석되며, 온도가 높은 지역일수록 화학작용이 활발하게 일어나 미세먼지 농도가 높아진다고 분석하였다(Zhang et al., 2018; Nguyen et al., 2017). 또한, 미세먼지는 기압과 밀접한 연관이 있는데, 정체성 고기압과 더불어 약한 풍속은 하층의 대기확산을 저해하여 고농도 미세먼지가 관측될 확률이 높아지게 된다. 이처럼 대기 안정도가 높을수록 고농도 미세먼지가 발생할 확률이 증가하게 되며, 높은 습도는 안개 형성을 촉진하여 대기가 한 지역에 더 오래 머무르게 만든다(Yuan et al., 2019; 박일수, 2016).

미세먼지 발생과 관련하여 환경과학 분야의 연구에서는 대기 오염 발생 근원에 초점을 맞추고 있다. 해당 분야의 연구 결과는 일관성을 보이고 있으며 수송 및 산업과 관련된 오염원이 미세먼지 농도를 상승시키는 원인이라고 나타났다(최태영 외, 2018; Waked et al., 2015; Colville et al., 2001). 우리나라 도시의 미세먼지 발생의 주범인 질산염(NOx)은 대부분 도로이동오염원에서 배출(48.7%, 30,383톤/년)되었으며, 황산화물(SOx)은 제조업 등의 공장과 같은 고정오염원에서 배출되었다(환경부, 2021).

또한, 미세먼지의 발생은 지역의 다양한 요인들이 복합적으로 영향을 미칠 수 있다. 미세먼지 농도는 도로와 교통량, 녹지지역의 분포, 토지이용(Land use), 토지피복(Land cover), 건물의 높이 및 밀도 등 도시의 다양한 공간적 특징들과 관계가 있다고 나타난다. 또한, 지역의 공간적 특징뿐만 아니라 인구와 지역내 총생산 등 도시의 사회경제적 특징이 대기오염과 유의한 관계가 있다고 분석된다(Wu et al., 2018; Jeon et al., 2018). 특히, 도시의 토지 용도와 토지피복 데이터를 활용하여 미세먼지 농도와 의 관계를 정량적으로 분석하는 연구가 많았으며, 미세먼지 농도를 추정하기 위한 회귀모델(Land Use Regression, LUR)에 활용되기도 하였다(Kim, 2020; Choi et al., 2019; Yuan et al., 2019; Zhai et al., 2017).

2. 도시형태의 특성

도시형태(Urban form)는 인구 분포와 같은 비물리적인 특성과 더불어 도시의 크기 및 형태 그리고 도시 공간의 건물과 도로 등의 물리적인 배치를 포함한다(Živković, 2020). 도시형태 특성을 더욱 세밀하게 구분하기 위해 인구학적 데이터뿐만 아니라 토지피복 데이터를 활용하면 도시의 공간적 패턴을 더욱 세밀하게 측정할 수 있어 도시형태 구분이 용이하다(McCarty and Kaza, 2015). 도시형태를 측정하는 가장 작은 단위인 패치(patch)는 특정 구역의 속성정보, 면적, 그리고 동적인 변화를 관찰할 수 있는 장점이 있다. 토지피복은 주로 패치 단위로 구분되어 해당 구역의 정보를 제공하며, 이를 활용하여 도시형태의 크기, 흩어진 정

도, 압축도 등 도시의 물리적인 분포에 대한 형태학적인 지표를 구축할 수 있다. 도시 패치의 크기에는 도시지역 면적, 패치의 수, 패치의 밀도 등이 있으며, 도시 패치의 복잡성(urban complexity)을 측정하는 지표는 패치의 둘레와 면적을 활용하여 패치의 모양과 분포를 측정하였다. 또한, 도시 패치의 인접성(urban contiguity)을 나타내는 지표로 패치의 인접한 정도 또는 연결성과 관련하여 다양한 지표를 측정하였다(McGarigal, 2015). 위와 같이 다양한 도시의 형태학적 지표를 통하여 도시의 물리적인 크기, 압축도, 복잡성 등의 지표를 측정할 수 있다. Liang and Gong(2020)은 도시의 크기, 형태, 응집으로 분류되는 형태학적 특성이 도시의 개발 단계에 따라 분류될 수 있으며, 이러한 특성이 장기적인 미세먼지 농도 변화에 영향을 미친다고 분석하였다. 도시가 발전함에 따라 건물과 도로 등의 물리적 형태의 배치와 인구 분포가 점진적으로 변화하고 있으며 이러한 변화는 도시의 외형적 팽창과 더불어 도시 내의 토지이용, 통행 패턴 등을 변화시켰다. 이처럼 도시 개발에 따른 도시 공간의 물리적 구조의 변화는 도시에서의 교통, 산업 등의 활동을 변화시켰고, 결과적으로 대기질에 직접적인 영향을 미치게 되었다. 이에 본 연구는 압축도시와 관련된 도시의 형태학적 특성을 선행연구를 기반으로 탐색하였으며, 대표적으로 파편화, 인접성, 그리고 인구밀도를 주요한 압축도시의 특성으로 도출하였다.

3. 압축도시와 미세먼지와와의 관계

도시의 형태학적 특징이 대기오염에 미치는 영향에 관한 많은 연구가 수행되고 있으며(Table 1), 압축도시의 특성과 미세먼지 농도와의 관계가 상이하게 나타난다(Lee, 2020; Tao et al., 2020; Li and Zhou, 2019; Fan et al., 2018; Yuan et al., 2018b; McCarty and Kaza, 2015). Lee(2020)와 McCarty and Kaza(2015)의 연구에서는 도시가 파편적인 형태일수록 미세먼지 농도가 높아지는 경향이 있는 것으로 나타났으며, 도시가 파편적일수록 도시의 연결성이 감소함에 따라 차량의 이동 거리가 증가하여 미세먼지 농도가 높아진다고 제시하였다. 반면, Tao et al.(2020)의 연구에서는 공간적으로 파편화된 지역의 미세먼지 농도가 낮은 경향이 있는 것으로 나타났다. 또한, Li and Zhou(2019)와 Yuan et al.(2018b)의 연구에서 도시의 콤팩트한 수준이 높을수록 미세먼지 농도는 낮은 경향이 있는 것으로 나타났으나, Fan et al.(2018)의 연구에서는 콤팩트한 수준이 높으면 미세먼지 농도가 증가하는 경향이 있는 것으로 나타났다.

압축도시의 고밀도의 주거개발과 더불어 복합토지이용도 지역의 증가로 차량에 대한 의존도를 낮추고 대중교통 이용과 보행을 증가시킨다고 제시된다(Rodríguez et al., 2016). 예를 들어, 도시의 형태가 저밀도로 퍼져있는 지역은 상대적으로 도시의 형태가 밀집된 지역보다 주행거리가 멀어져 오염원의 배출이 증가하게

되므로 미세먼지 농도가 높은 경향이 있다고 분석된다(Martins, 2012; Nam et al., 2012). 이는 미국과 유럽에서 진행된 대다수의 실증적인 연구에서 일관성 있는 결과로 나타나며, 도시의 파편화 정도가 높을수록 대기오염이 증가하는 경향이 있다고 분석된다(Lee, 2020; Rodríguez et al., 2016; McCarty and Kaza, 2015; Stone, 2008). 반면에, 위의 연구와 다르게 파편화된 도시 형태는 산업에서 배출되는 오염원을 분산시킬 수 있으며, 오히려 교통 혼잡이 감소하고 거리 협곡 효과(Street canyon effect)가 완화되어 대기오염이 감소할 수 있다고 분석된다(Glaeser and Kahn, 2004). 위와 같이 도시형태가 다중심적이고 분산되어있는 도시는 압축되고 단일중심적인 도시보다 인구와 일자리가 더욱 분산되어있어 대기오염도가 낮은 경향이 있는 것으로 나타났다(Li et al., 2020; Gaigné et al., 2012). Tao et al.(2020)은 공간적으로 퍼져있고 파편화된 지역이 인접하고 압축된 지역보다 상대적으로 미세먼지 농도가 낮은 경향이 있다고 분석하였으며, 다중심적인 도시와 같이 압축되고 퍼져있는 도시형태가 대기오염 완화에 적절하다고 제시하였다.

압축도시의 인구밀도가 높고 공간적으로 콤팩트한 도시이며, 이러한 도시는 가까운 거리에 통행을 유발하는 시설들이 많이 존재하기 때문에 차량의 주행거리가 감소하는 것으로 나타난다. 인구밀도가 높은 지역은 대중교통 이용이 더욱 활발해 차량으로 인한 오염된 공기 배출이 감소할 수 있다고 여러 연구에서 제시하였다(Yuan et al., 2018a; 서승연 외, 2014). 반면, 많은 연구에서 압축된 도시의 형태가 대기질의 개선과 유의한 관계가 없었으며, 오히려 고밀도인 도시 공간에서 오염물질의 농도가 높아지는 경향이 있는 것으로 나타났다(Cho and Choi, 2014; Clark et al., 2011; Schweitzer and Zhou, 2010). 이는, 도시지역의 높은 인구밀도와 더불어 압축된 도시형태는 공기를 가두게 되어 오염된 공기 농도가 증가한다고 분석된다. 물리적으로 압축된 도시 공간은 대기의 확산을 억제하여 이에 따라 대기오염도가 증가하며 오염된 공기가 한 지역에 오래 정체되는 현상이 나타난다. 또한, 도시가 밀집된 형태일수록 열섬(Urban Heat Island)현상이 더 강하게 나타나기 때문에 이차적인 오염물질 생성에 영향을 미치게 되어 대기질이 더 나빠질 수 있다고 분석된다(Sarrat et al., 2006).

분석대상 지역의 특징에 따라 도시형태가 미세먼지에 미치는 영향이 다르게 나타난다. 많은 연구에서 도시의 인구 크기나 도시의 경제 발전 정도에 따라 도시형태와 미세먼지와의 관계에 대해 다른 결과가 나타난다고 분석하였다(Li et al., 2020; Liang and Gong, 2020; Yuan et al., 2018b). Liang and Gong(2020)의 연구에서 도시의 인구가 많고 경제적 발전이 높은 지역은 파편화된 정도가 높을수록 미세먼지 농도가 높은 경향이 있었다. 마찬가지로, Yuan et al.(2018b)의 연구에서도 도시의 인구 크기에 따라 인구밀도와 도시의 콤팩트한 정도가 미세먼지에 미치는 영

Table 1. Studies of relationship between urban forms and air pollution

Author	Study area	Method	Urban forms	Pollutants	Main conclusion
Stone, 2008	45 US Metropolitan regions in 2000	Linear regression model	Connectivity, density, centeredness, land use mix, sprawl index	NO ₂ , O ₃ , VOC	<ul style="list-style-type: none"> • Compact (less fragmented and better traffic accessibility) metropolitan regions are related to less air pollution
McCarty and Kaza, 2015	All US counties in 2006	Spatial regression model	Total urban area, number of patches, total land area, mean urban patch area, std. dev of urban patch area, eccentricity of standard deviation ellipse, total forest area, urban forest mixing, centrality (Gini)	The number of exceedance days of PM2.5, O ₃ , and AQI	<ul style="list-style-type: none"> • Fragmentary urban patterns increase in number of exceedance days of AQI • As the forest area increases, the number of days with high air quality decreases
Rodríguez et al., 2016	249 large urban areas in 26 countries across Europe in 2006	Bayesian model and linear regression model	Number of fragments, surface area, median altitude, highway density, road access, population density, decentralization, share of (agriculture/industry/wetland/forest) area	PM10, NO ₂ , SO ₂	<ul style="list-style-type: none"> • As the fragmentation, population density and impervious increase, the concentration of pollutants increase
Lee, 2020	377 metropolitan statistical areas in US from 2014 to 2016	Linear regression model	Fragments, population density, road length, job-resident balance, average distance to the nearest (employment center/school/urban park)	PM2.5	<ul style="list-style-type: none"> • The higher fragments, population density, and road density are associated with higher PM2.5 concentration
Fan et al., 2018	344 cities in China in 2010	Geographically weighted regression	Compactness ratio, largest patch index, urban elongation ratio, population density	PM2.5, NO ₂ , SO ₂ , CO	<ul style="list-style-type: none"> • Urban fragmentation and urban compactness are significant and positively associated with CO, NO₂, and PM2.5
Yuan et al., 2018b	269 China cities in 2014	Spatial regression model	Population density, degree of centering, road density, compactness, continuity, Shannon landscape diversity index	PM2.5	<ul style="list-style-type: none"> • The effects of population density, degree of centering, and compactness vary with city size • The higher compactness and degree of centering are associated with lower PM2.5 concentration, and the higher continuity and road density are associated with higher PM2.5 concentration
Li and Zhou, 2019	288 cities in China in 2015	Spatial regression model	Total urban area, compactness ratio, population density, largest patch index, road density	AQI, PM2.5, PM10, SO ₂ , NO ₂ , CO, O ₃	<ul style="list-style-type: none"> • Negative relationship between the compact urban form and NO₂ and SO₂ pollution • Population density had a significant negative effect on urban air quality
Liang and Gong, 2020	626 cities in China from 2000 to 2014	Panel data analysis	Total area, largest path index, number of patches, patch density, mean patch size, mean patch shape index, mean patch fractal dimension, mean contiguity index, mean nearest neighbor distance, landscape shape index, patch cohesion index, splitting index, landscape division index, effective mesh size, aggregation index	PM2.5	<ul style="list-style-type: none"> • Urban contiguity (fragmentation) is found to have a positive effect on the long-term PM2.5 pollution changes • More aggregated (compactness) landscape results in a higher degree of PM2.5 level changes
Tao et al., 2020	350 cities in Yangtze River delta region of China from 1988-2015	Ridge regression analysis	Circularity, fragmentation, compactness	PM2.5	<ul style="list-style-type: none"> • More spatially fragmented urban areas had relatively lower PM2.5 concentrations than more spatially compact and contiguous urban areas
Li et al., 2020	286 cities in China from 2001 to 2016	Panel data analysis	Polycentric population, dispersed population	PM2.5	<ul style="list-style-type: none"> • Increase in degrees of polycentricity and dispersion would lead to rise in PM2.5 concentration • Polycentric distribution of population expected to reduce PM2.5 in cities with high GDP
Ouyang et al., 2021	19 urban agglomerations from 2000 to 2017	Geographically weighted regression	Fractal dimension, compactness, shape index	PM2.5	<ul style="list-style-type: none"> • Increase in fractal dimension, compactness and shape index would lead to decrease in PM2.5 concentration

향이 달라질 수 있다고 나타났다. 또한, Li et al.(2020)의 연구에서 인구가 적고 경제적 발전 정도가 낮은 지역은 다중심적이고 분산될수록 미세먼지 농도가 높은 경향이 있다고 나타났으며, 오히려 인구가 많고 경제적 발전 정도가 높은 지역은 다중심적일수록 미세먼지 농도가 낮은 경향이 있다고 분석되었다. 인구의 크기나 경제적 발전 정도 외에도 지역의 특징을 지형적으로 구분한 연구의 경우(Fan et al., 2018), 산이 많은 지형은 다중심적이기보다 단일중심적인 도시가 미세먼지 농도 감소에 유리하다고 나타났다.

이처럼, 여러 국가 및 지역을 대상으로 압축도시의 특성과 미세먼지 농도 간의 관계를 분석한 연구가 수행되었지만, 그러한 관계에 대한 일관된 결과가 존재하지는 않았다. 또한, 국가나 지역적 특성에 따라서 압축도시가 미세먼지 농도에 미치는 영향이 다른 양상을 보였다. 그중에서도 우리나라를 대상으로 진행된 연구는 대기오염과 인구, 토지이용, 건축 및 주거, 교통 등의 도시의 공간적인 특성과의 관계에 관한 연구가 다수 진행되었다(허유경·강민규, 2022; Kim, 2020). 이에 본 연구에서는 우리나라 도시의 공간적 특성과 관련된 변수와 더불어, 초미세먼지와 압축도시특성과의 관계를 분석하고자 한다.

III. 연구 방법

1. 연구의 범위

본 연구는 압축도시특성이 초미세먼지 농도에 미치는 영향을 분석하는 것을 목적으로 한다. 압축도시특성과 초미세먼지 농도와의 관계를 파악하기 위하여 지방자치단체 단위로 집계된 데이터를 활용하였다. 우리나라 시·군·구는 지방자치단체가 각 지역을 담당하는 행정구역으로, 토지이용과 건물인허가 등 도시 계획에 관한 의사결정을 하여 관할지역의 도시형태를 결정하므로 해당 수준의 분석단위를 설정하였다. 본 연구에서는 데이터의 구득이 어려운 지역을 제외한 209개 시·군·구를 대상으로 초미세먼지 농도와 압축도시특성과 통제변수(토지이용, 기상요인, 교통 등)를 구축하였다. 1990년대 말, 2000년대 말, 2010년대 말에 해당하는 209개 지자체의 데이터를 수집하였으며, 수집된 연도들의 평균값을 적용하여 최종적으로 209개 지역에 대한 3년대의 패널 데이터셋을 구축하였다.

우리나라의 지방자치단체는 다음과 같이 시·군·구로 구분되고 있으며(지방자치법 법률 제18661호, 2021. 12. 28.), 지방자치법에 명시된 상위 관할 단위, 인구 및 도시화 정도에 따라 구분된다. 지자체를 구분하는 유형 중에서 '시'와 '구'는 도시화된 지역을 나타내고, '군'은 특별시와 광역시에 해당하는 대도시의 하위 지자체를 나타낸다. '군'은 도시화된 지역에 비해 인구가 적고 도시화가 덜 된 지역으로 밭이나 산지가 많이 분포하고 있다. 도시지역

과 비도시지역은 인구밀도, 토지이용, 교통 등의 측면에서 서로 다른 특성을 가지고 있다. 이러한 특성과 함께 본 연구의 주요 관심 변수인 압축도시특성 역시 각 범주(시·군·구)에 속하는 지자체별로 뚜렷한 특징을 보이는 것으로 나타났다. 예를 들어, 대도시지역에 속하는 지자체의 평균 인구밀도는 도시지역보다 약 2배 높게 나타났으며 비도시지역보다 약 4배 높은 것으로 나타났다. 이러한 차이로 인해 도시형태의 영향은 각 범주의 지자체별로 구분될 수 있다. 따라서, 본 연구는 지방자치단체의 범주에 따라 72곳의 대도시지역(구, 군), 68곳의 도시지역(시) 그리고 69곳의 비도시지역(군)으로 구분하여 분석을 진행하였다.

2. 분석 방법

1) 변수 설정

본 연구에서 사용되는 종속변수인 초미세먼지 농도는 위성 데이터를 기반의 고해상도 자료를 사용하였다. 위성 자료는 지상관측소의 값과는 다르게 영상의 해상도나 기상 상태에 따라 일정 범위의 오차가 존재할 수 있고 정밀한 미세먼지 농도를 관측하기 어려울 수 있으나, 광범위한 지역의 연속적인 미세먼지 농도를 추정하는 데 유용하다. 기존 선행연구에서는 미세먼지 데이터를 전역적으로 구축하기 위하여 지상관측소의 농도를 활용하여 지역의 대푯값으로 활용하거나 보간법(Interpolation)이나 지역의 공간적 특징과 관련된 회귀모델을 구축(토지이용 회귀 모형)하여 전역적인 농도에 대한 추정값을 산출하였다(Kim, 2020; Kim and Song, 2017). 위와 같이 보간법이나 토지이용 회귀 모형을 활용하면 관측지점으로부터 거리에 따라 예측 정확도의 편차가 크게 나타날 수 있으며, 측정소가 주로 도시지역에 위치하기 때문에 도시 외곽지역으로 갈수록 예측 정확도가 떨어질 수 있다(Zhang et al., 2018).

위와 같은 한계를 극복하기 위하여 많은 연구에서 위성 데이터를 활용한 연속적인 미세먼지 농도 추정값을 사용한다. 본 연구에서는 위성 데이터를 기반으로 추정된 전국 고해상도(1km×1km)의 PM2.5 연평균 농도를 활용하여 분석대상 지역에 레스터 단위 농도의 평균값을 적용하였다. 본 연구에 사용된 PM2.5 농도는 Dalhousie University의 Atmospheric Composition Analysis Group에서 위성에서 관측된 에어로졸을 바탕으로 화학 수송 모델을 통하여 추정된 값이며, 전 세계에 있는 대표적인 지상관측소의 값과 비교한 결과 매우 일관된 결과($R^2=0.81$)를 보여준다(Hammer et al., 2020). 위의 연구에서 추정된 미세먼지 농도는 많은 연구에서 활용되었다(Lee, 2020; Li et al., 2020; Liang and Gong, 2020; Tao et al., 2020). 실제로 아래의 표(Table 2)는 위성 자료를 활용하여 추정된 초미세먼지 농도와 우리나라 에어코리아(AirKorea)의 전국 미세먼지 지상관측소에서 측정된 값과의 오차를 검증한 결과를 나타낸다. RMSE(Root

Table 2. Validation between PM2.5 of satellite data estimation and the measurement value of ground observations

Validation year	Number of ground observations	MAE	RMSE
2017	169	3.014	3.922
2018	257	2.543	3.109
2019	365	2.892	3.694

Mean Square Error)와 MAE(Mean Absolute Error)는 정확도 평가에 보편적으로 사용하는 지표 중 하나로 실측값과 추정값 간 오차 측정값을 의미한다. 초미세먼지 지상관측소의 데이터를 얻기 어려운 연도는 오차 검증에서 제외하였다.

본 연구에서는 도시형태와 미세먼지의 관계와 관련된 선행연구를 참고하여 도시 압축성을 나타내는 변수(인구밀도, 파편화, 인접성)를 최종 선정하였다(Table 3). 파편화는 압축도시의 특성 중 하나로 프랙털 지수(fractal dimension)라고도 하며 도시의 파편화 정도와 관련이 있고 불규칙성 지수(shape index)는 도시 패치의 불규칙한 정도와 관련이 있으며, 위 두 지수는 도시지역의 둘레와 면적을 사용하여 측정하였다. 인접성 지수(contiguity

index)는 압축도시의 특성 중 하나로 인접 행렬을 통해 패치 사이의 인접 값을 측정하여 도시 패치의 인접성 또는 연결성 정도와 관련이 있다. 도시형태 지표를 구축하기 위해 환경공간정보서비스에서 제공하는 전국단위의 토지피복 데이터를 활용하였다. GIS(Geographic Information System)을 이용하여 전국 토지피복 데이터를 고해상도(30m×30m)의 레스터 파일로 변환하였고, 이후 토지피복 분류 중 시가지·건조지역(주거, 상업, 공업, 문화·체육·휴양, 교통, 공공시설)의 레스터 파일만 따로 분류하여 최종적으로 전국 209개 시·군·구의 도시지역에 대한 압축성과 관련된 변수를 구축하였다. 변수의 생성과 구축을 위해 FRAGSTATS 4.2.1과 ArcGIS 10.2 프로그램을 활용하였다.

Table 3. Variable definitions

Categories	Variables	Definitions
Dependent variable	PM2.5	Annual average concentration of fine particulate matter ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
	Population density	Population/Total area (person/ km^2) • The higher the population density, the less sprawl of urban form
	Fractal dimension index	Fractal dimension = $\frac{2\ln(P/4)}{\ln(A)}$ P: the perimeter of urban land, A: the area of urban land • As the value increases, the degree of urban fragmentation and the internal gaps in the city increases
	Contiguity index	Contiguity = $\frac{\sum_{r=1}^v c_{ijr}}{a_{ij} - 1}$ c_{ijr} : contiguity value for pixel r in patch ij, a_{ij} : the area of patch ij, v: the size of the contiguity filter matrix (13 in this case) • The larger the value, the patch contiguity, or connectedness, increases
Urban compactness	Irregularity	Shape = $\frac{0.25P}{\sqrt{A}}$ P: the perimeter of urban land, A: the area of urban land • As the value increases, the irregularity of shape increases
	Residential area	Residential area (km^2)
	Commercial area	Commercial area (km^2)
	Industrial area	Industrial area (km^2)
	Green area	Green area (km^2)
Land use and development	Total number of businesses	Total number of businesses (number of businesses)
	Total housing	Total housing (house)
	Total households	Total households (household)
	Housing supply ratio	Total housing/Total households (housing/household)
Housing and construction	Construction permission	Construction permission of residential, commercial and industrial area (km^2)
	Road density	Road area/Total area (km/km^2)
	Commute	(Commuting population to other region/Commuting population)*100 (%)
Meteorological conditions	Precipitation	Annual cumulative precipitation (mm)
	Temperature	Annual average temperature ($^{\circ}\text{C}$)

통제변수는 선행연구 검토를 통하여 토지이용 및 개발, 주거 및 건축, 교통, 기상학적 조건으로 나누어 정리하였다. 기존 선행 연구들은 미세먼지와 도시공간구조와 관련하여 토지이용 및 개발, 주거 및 건축, 교통 등을 공통적인 변수로 제시하고 있었으며, 이에 본 연구에서도 선행연구들을 참조하여 미세먼지와 관련 있는 도시공간구조 요인들을 변수로 구성하였다. 토지이용 및 개발과 관련된 변수들로 주거지역면적, 상업지역면적, 공업지역면적, 녹지지역면적 그리고 총사업체 수를 활용하였으며, 주거 및 건축과 관련된 변수들로 총주택 수, 총가구 수, 주택보급률, 건축허가 면적을 활용하였다. 교통과 관련된 변수로 도로밀도, 타 지역 통근·통학 비율을 활용하였다. 위와 같은 도시공간구조 요인은 통계청의 데이터를 기본으로 활용하였으며, 국토지리정보원의 자료를 보완하여 구축하였다. 기상요인(강수량, 기온, 풍속)은 전국에 설치된 기상청 자동기상관측장비(Automatic Weather System, AWS)의 일 평균 자료를 수집하였고, 보간(Interpolation)을 통해 전국 격자 단위(100m×100m)의 데이터를 생성하였다. 이후, 시·군·구별로 격자 단위의 평균값을 도출하였다. 본 연구에서 사용된 토지피복 데이터와의 시간적 범위를 맞추기 위해 모든 통제 변수는 1990년대 말(1998-2000년), 2000년대 말(2008-2010년), 2010년대 말(2017-2019년)의 평균값을 활용하였다.

2) 패널 고정효과모형

본 연구에서는 전국 209개 시·군·구의 1990년대 말, 2000년대 말, 2010년대 말의 초미세먼지 농도와 도시공간구조 및 기상요인의 자료를 수집하여 시계열 자료와 횡단면 자료가 결합한 형태인 균형패널자료(Balanced panel data)를 구축하였다. 패널 회귀 분석을 활용하여 비교적 짧은 기간을 대상으로 유사한 연구가 다수 진행되었으며(Lee, 2020; Han et al., 2020; Hao et al., 2018; Liu et al., 2017; Wu et al., 2016), 본 연구에서도 유사한 선행연구들과 같이 3개년도의 패널자료를 대상으로 분석하였다. 본 연구에서는 비교적 짧은 기간을 대상으로 분석하므로 비관측 시간 효과는 미비하다고 판단되어 비관측 지역 효과만을 반영한 모형을 사용하였다. 또한, 모든 변수를 포함한 모형을 구축한 후, 다중공선성을 고려하여 본 연구에서 활용할 변수를 포함한 최종적인 모형을 추정하였다. 분석을 위해 구성한 최종적인 패널데이터 모형은 아래의 식 (1)과 같다. 아래의 식에서 $PM_{2.5i,t}$ 는 i 지역의 t 시점의 초미세먼지 농도, $X_{i,t}$ 는 i 지역의 t 시점의 독립변수, β 는 추정계수, $\epsilon_{i,t}$ 은 오차항을 나타낸다. 패널 회귀분석의 가장 큰 장점은 비관측이질성(unobserved heterogeneity)을 고려할 수 있다는 점이다(Arellano, 2003). 본 연구에서 사용된 모든 변수는 공간적인 분포가 균일하지 않은 특징이 있기에 고정효과(fixed-effects) 모형을 활용하여 지역별 변화요인을 통제하였다. 또한, 패널모형은 오차항을 어떻게 규정하느냐에 따라 모형이 구분되며, 각 특성을 고정된 상수항으로 가정할 경우 고정효과모형

(Fixed Effects Model)으로, 무작위의 확률항으로 고려할 경우 확률효과모형(Random Effects Model)으로 세분화할 수 있다. 본 연구에서 활용한 고정효과모형이 적합한지 판단하기 위해 하우스만 검정(Hausman Test)을 실시하였다.

$$\ln(PM_{2.5i,t}) = \alpha + \beta \ln(X_{i,t}) + \dots + \epsilon_{i,t} \quad (1)$$

IV. 분석 결과

1. 기초통계분석

우리나라 대도시지역(구, 군), 도시지역(시), 그리고 비도시지역(군)의 초미세먼지 농도와 압축도시특성의 차이를 보기 위해 기초통계분석을 진행하였다(Table 4). 우리나라의 대도시지역, 도시지역 그리고 비도시지역은 초미세먼지 농도에 영향을 미치는 인구, 주거, 교통 등 도시공간구조 측면에서 서로 다른 특성이 있는 것으로 나타난다. 이러한 특성과 함께 본 연구의 주요 관심 변수인 압축도시특성 역시 각 범주에 해당하는 지자체 간에 뚜렷한 특징을 보인다. Kruskal-Wallis 검정 결과 대도시지역, 도시지역, 그리고 비도시지역의 초미세먼지 농도와 인구밀도, 파편화, 인접성, 불규칙성을 나타내는 압축도시특성은 범주별로 유의한 차이($p < 0.001$)가 있는 것으로 나타났다. 이러한 차이로 인해 지자체별로 압축도시특성의 영향을 각 범주별로 구분할 수 있으며, 관심 변수와 초미세먼지 농도 사이의 차별화된 관계를 분석하기 위해 각 지자체 범주에 대한 분석 모델을 포함하였다. 아래의 그림(Figure 1)은 대도시지역, 도시지역, 비도시지역을 범주로 나눈 분포를 보여주며, 전체기간의 평균 초미세먼지 농도와 압축도시 변수에 관한 분포를 나타낸다. 초미세먼지 농도와 압축도시특성과 관련된 변수 모두 대도시지역, 도시지역, 비도시지역 순으로 높게 나타났다. 우리나라는 산이 많고 평지가 적은 지형으로 초미세먼지 농도가 태백산맥과 소백산맥의 주변에서 낮고, 평지와 논이 많은 수도권과 광역시 주변에서 높은 특징을 보인다. 한편 토지이용 및 개발과 관련된 변수 중 공업지역면적은 도시지역이 대도시지역보다 2배 이상 높게 나타났고 비도시지역보다 5배 이상 높게 나타났으며 도시지역에 공업지역이 다소 많이 분포하고 있음을 알 수 있다. 비산먼지의 발생과 직접적인 관련이 높은 건축 허가면적의 경우(허유경·강민규, 2022), 대도시지역과 도시지역이 비슷하게 나타났으며 비도시지역에 비해 6배 이상 높은 것으로 나타났다. 대도시지역은 도시지역과 건축허가면적이 비슷함에도 불구하고 주택보급률은 도시지역보다 낮은 것으로 나타났다. 교통과 관련된 변수 중 도로밀도는 대도시지역이 도시지역보다 4배 이상 높게 나타났고 비도시지역보다 14배 이상

Table 4. Descriptive statistics

Categories	Variables	Total (Si-Gun-Gu)	Metropolitan district (Gu-Gun)	Urban district (Si)	Rural district (Gun)
Dependent variable	PM2.5	23.30 (2.62)	24.58 (1.92)	23.66 (2.78)	21.60 (2.16)
Urban compactness	Population density	12947.32 (9906.28)	21687.92 (9747.40)	11193.38 (6914.76)	5555.20 (3724.48)
	Fragmentation	1.0414 (0.0102)	1.0461 (0.0143)	1.0407 (0.0052)	1.0371 (0.0058)
	Contiguity	0.6946 (0.1866)	0.8879 (0.0721)	0.68 (0.1328)	0.5072 (0.0913)
	Irregularity	1.251 (0.157)	1.352 (0.225)	1.219 (0.053)	1.176 (0.045)
Land use and development	Residential area	10.64 (8.87)	12.08 (5.33)	16.22 (11.16)	3.63 (2.07)
	Commercial area	1.32 (1.35)	1.51 (1.18)	2.00 (1.67)	0.47 (0.29)
	Industrial area	4.59 (8.06)	3.84 (6.25)	8.40 (11.33)	1.63 (2.55)
	Green area	55.21 (72.85)	42.49 (67.97)	97.59 (88.63)	26.72 (28.27)
	Total number of businesses	15490.25 (14007.84)	22888.25 (11076.83)	19496.71 (16105.85)	3822.21 (1585.74)
Housing and construction	Total housing	71552.75 (63089.42)	97912.5 (4755.51)	95288.27 (76621.62)	20655.39 (7752.77)
	Total households	77054.50 (70790.54)	109248.52 (51386.10)	101631.37 (86521.84)	19240.07 (7207.64)
	Housing supply ratio	0.98 (0.133)	0.896 (0.113)	0.972 (0.116)	1.077 (0.101)
	Construction permission	0.452 (0.791)	0.625 (1.087)	0.626 (0.693)	0.099 (0.098)
Transportation	Road density	4.09 (5.35)	9.36 (5.98)	2.02 (2.06)	0.64 (0.17)
	Commute	7.42 (8.39)	10.10 (4.89)	9.23 (11.87)	2.84 (4.25)
Meteorological conditions	Precipitation	1289.42 (186.58)	1311.38 (194.47)	1276.82 (182.14)	1278.94 (181.24)
	Temperature	12.82 (0.99)	13.40 (0.84)	12.52 (0.85)	12.51 (0.99)

높게 나타났다. 또한, 다른 지역으로 통근·통학하는 비율은 대도시지역과 도시지역이 비도시지역보다 3배 이상 높은 것으로 나타나 도시지역은 다른 지역으로의 이동이 다소 높은 수준임을 알 수 있다. 기상요인인 강수량과 기온 모두 대도시지역에서 높은 것으로 나타났다.

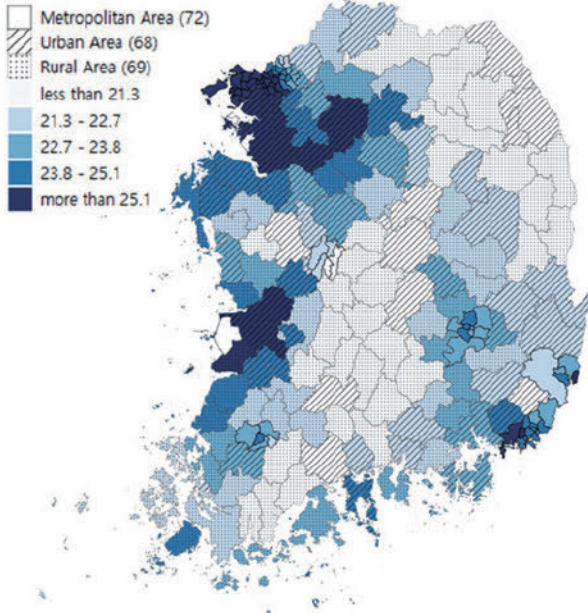
2. 압축도시특성과 초미세먼지의 관계

본 연구에서는 초미세먼지 농도가 압축도시특성에 미치는 영향을 분석함과 동시에 대도시, 도시, 비도시의 지자체 범주별 차이를 확인하기 위해 패널 데이터분석을 시행하였다. 각 지자체

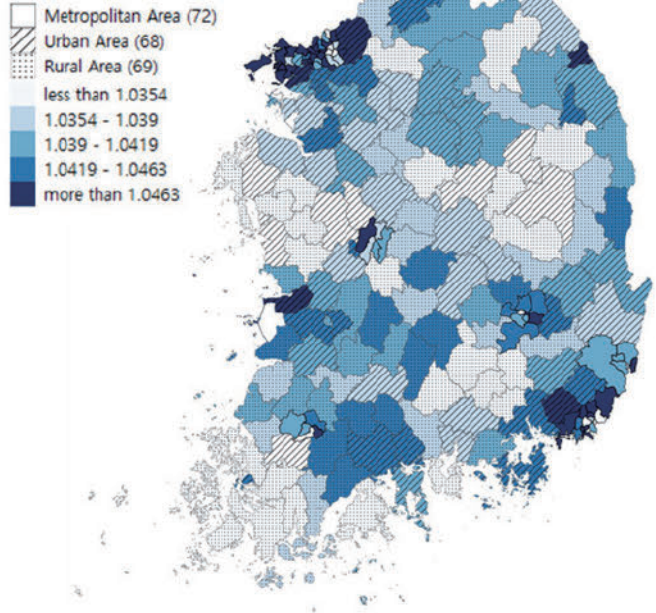
범주별 분석모형을 구축하였으며, 전체지역(Model 1), 대도시지역(Model 2), 도시지역(Model 3) 그리고 비도시지역(Model 4) 모델을 제시하였다(Table 5). 패널자료를 구성하고 있는 요인을 더욱 효과적으로 도출할 수 있도록 고정효과모형과 확률효과모형의 패널자료에 대해 하우스만 검정을 통해 모형 선택의 적절성을 판단하였다. 하우스만 검정 시행 결과, 모든 모델에서 두 추정계수 간에 차이가 있다는 귀무가설을 기각하여($p < 0.1$) 고정효과모형이 더 적합한 것으로 나타났다. 또한, 분석에 앞서 다중공선성을 검토하여 VIF 값이 5 이상이고 상관관계가 높은 변수들을 제거하여 최종적으로 모델을 구축하여 분석을 진행하였다.

전체지역을 대상으로 분석을 진행한 Model 1에서 인구밀도,

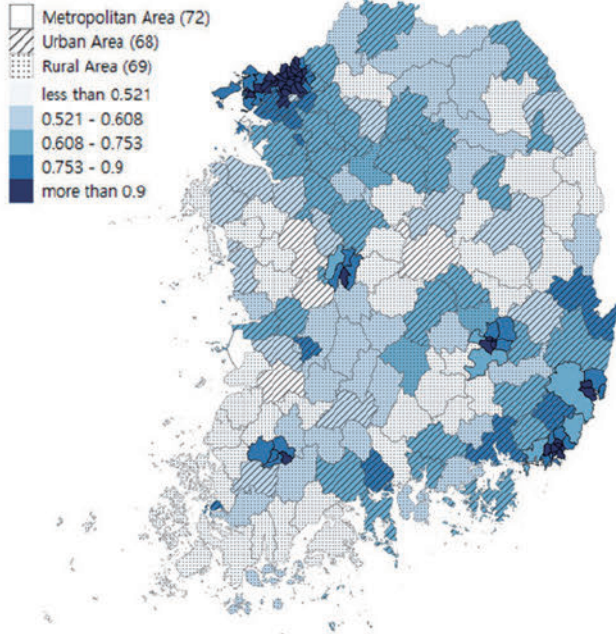
PM2.5



Fragmentation



Contiguity



Irregularity

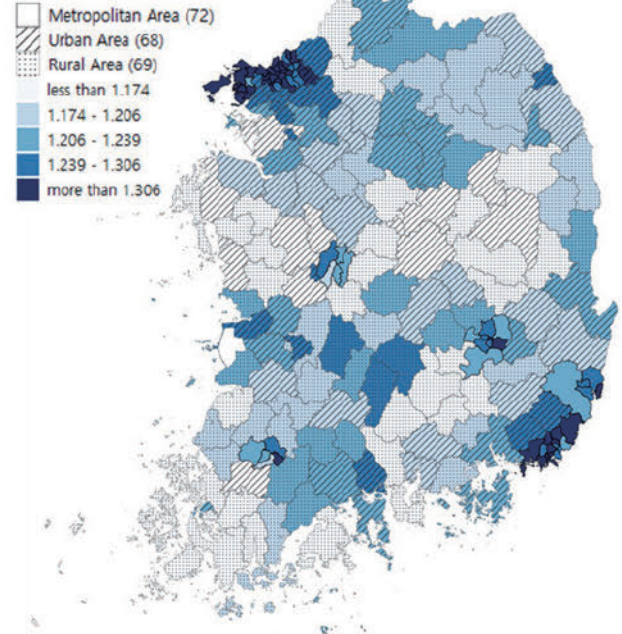


Figure 1. Distribution of PM2.5 concentration and urban compactness in Korea

인접성 그리고 불규칙성을 나타내는 세 개의 압축도시특성과 관련된 변수가 유의한 것으로 나타났다. 인구밀도와 인접성이 높을수록 초미세먼지 농도가 낮은 경향이 있었으며 불규칙성이 높을수록 초미세먼지 농도가 높은 경향이 있는 것으로 분석되었다. 또한, 토지이용 및 개발과 관련된 변수인 공업지역면적과 녹지지역면적이 유의한 변수로 나타났으며, 특히 녹지지역면적이 음의 영향을 미친다는 결과는 다른 선행연구들의 결과와 일맥상통하며 녹지의 증가가 초미세먼지 저감에 긍정적인 영향을 준다는 점을 다시 한번 입증하였다(Tao et al., 2020; 최태영 외, 2018;

McCarty and Kaza, 2015). 주거 및 건축과 관련된 변수인 건축허가면적은 초미세먼지 농도에 유의한 양의 영향을 주는 것으로 나타났다. 비산먼지 유발에 직접적으로 관련이 있는 건축허가와 관련된 변수가 초미세먼지 발생에 유의한 양의 영향을 미치고 있다는 점에서, 비산먼지를 감소시키기 위해 여러 지자체가 기울이고 있는 정책적 노력은 적절하다고 볼 수 있다(허유경·강민규, 2022). 마지막으로 교통과 관련된 변수인 도로밀도와 타 지역 통근·통학 비율 모두 초미세먼지 농도와 유의한 양의 영향이 있는 것으로 나타났으며, 기존 교통과 관련하여 시행되고 있는 미세먼

Table 5. Estimation of fixed effect models (Total, Metropolitan, Urban, Rural)

	Total		Metropolitan district		Urban district		Rural district	
	Model 1		Model 2		Model 3		Model 4	
	Coefficient	p-value	Coefficient	p-value	Coefficient	p-value	Coefficient	p-value
(Intercept)	3.372***	0.000	3.193***	0.000	3.585***	0.000	3.517***	0.000
Urban form variables								
Population density	-0.014*	0.087	-0.004	0.744	-0.035*	0.086	0.01	0.517
Fragmentation	-0.047	0.671	-0.066	0.570	-0.828***	0.004	0.132	0.980
Contiguity	-0.091***	0.001	-0.268***	0.000	-0.017	0.828	-0.01	0.849
Irregularity	0.132***	0.003	0.157***	0.000	0.079	0.751	-0.289	0.219
Land use and development variables								
Industrial area	0.0014***	0.009	0.0036***	0.000	0.0007	0.408	0.0008	0.774
Green area	-0.0002***	0.000	-0.0005***	0.000	-0.0002**	0.013	0.0001	0.748
Housing and construction								
Housing supply ratio	-0.012	0.727	-0.005	0.898	-0.189**	0.019	0.092	0.121
Construction permission	0.038***	0.000	0.005	0.392	0.052***	0.000	0.034***	0.000
Transportation								
Road density	0.035***	0.000	0.032***	0.001	0.063***	0.000	0.117***	0.000
Commute	0.004***	0.000	0.008***	0.000	0.002***	0.005	0.002	0.160
Meteorological conditions								
Precipitation	-0.186***	0.000	-0.109***	0.003	-0.128*	0.100	-0.244***	0.000
Temperature	0.266***	0.004	0.223***	0.002	0.166	0.175	0.323	0.001
N	627		216		204		207	
Hausman Test (χ^2)	37.69***		4.44*		14.56***		12.82***	
Within R²	0.512		0.587		0.434		0.422	

*p<0.1, **p<0.05, ***p<0.01

지 저감 정책이 적절하다는 것을 확인할 수 있었다. 수송 부문과 관련하여 5등급 차량 운행 제한, 도로 미세먼지 제거 등의 정책이 추진되고 있으나(환경부, 2021), 수송 부문의 미세먼지 저감을 위한 좀 더 다양한 정책대안 마련이 필요하다.

대도시지역(Model 2)을 대상으로 분석한 결과 초미세먼지 농도에 인접성은 유의한 음의 영향을 미치는 것으로 나타났고 불규칙성은 유의한 양의 영향을 미치는 것으로 분석되었다. 본 연구에서 사용된 압축도시특성을 나타내는 인접성과 불규칙성은 도시확장과 더 명확하게 관련이 있다(McCarty and Kaza, 2015). 예를 들어, 대도시지역과 같이 도시의 확장이 억제되어 매립 개발이 진행되고 있다면 압축지수가 증가하는 경향이 있으나, 도시지역의 위성도시 출현 등으로 도시의 확장이 진행되고 있다면 프랙털 차원 지수가 증가하는 경향이 있다(Ouyang et al., 2021). 또한, 도시지역 사이의 연결성을 나타내는 인접성 변수의 경우 특히 대도시지역에서 유의한 음의 영향이 있는 것으로 나타났으며, 이는 압축도시 논의의 주요한 특성으로 거론된 고밀개발과

이동을 최소화한다는 측면에서 일치한다(허유경·강민규, 2022; 서원석·김리영, 2013). 높은 인구밀도를 가지고 있는 대도시지역은 상대적으로 다른 지역에 비해 기반시설이 많고 대중교통이 발달한 경향이 높으며, 대중교통 이용이 증가할수록 차량의 총주행 거리가 감소하게 되어 결과적으로 교통과 관련된 오염물질 발생이 줄어들어 따라 도심지의 초미세먼지 농도가 감소하는 경향이 있는 것으로 분석되었다(Yuan et al., 2018a; 서승연 외, 2014). 인접성과 관련된 변수의 영향은 대도시지역에 비해 도시지역과 비도시지역에서 약한 것을 알 수 있다. 전반적으로 대도시지역의 집합체가 더 압축되어 있고 불규칙하지만, 도시지역과 비도시지역은 대도시지역보다 도시 집합체가 더 퍼져있는 경향이 있었다. 위와 같이 도시지역과 비도시지역에서 패치가 하나로 뭉쳐있지 않고 여러 갈래로 퍼져있는 형태는 도시가 확장하는 단계에 있음을 나타내며, 시간이 지남에 따라 도시의 패치들이 연결되어 압축성이 큰 도시로 변화한다(Ouyang et al., 2021).

도시지역의 경우 대부분 대도시지역 주변에 위치하여 위성도

시의 역할을 하는 도시가 많으며, 이에 해당하는 지자체는 주택지와 공업지가 많은 특징을 가지고 있다. 대부분 도시가 확장하는 단계에서 대도시로 집중되는 인구를 분산시키기 위해 생성되었으며, 주택지나 공업지가 분산되어있는 다중심적인 도시형태를 보인다. 도시지역(Model 3)을 대상으로 분석한 결과 초미세먼지 농도에 인구밀도와 파편화가 유의한 음의 영향을 미치는 것으로 분석되었다. 인구밀도 외에도 주거 및 건축과 관련된 주택보급률, 건축허가면적이 유의한 영향을 미치는 것으로 나타났다. McCarty and Kaza(2015)는 도시가 파편화될수록 도시와 녹지의 혼합이 높아져 오히려 대기질을 개선할 수 있다고 분석하였으며, Wood(1990)는 파편화된 도시지역에서 녹지지역과 같은 공터가 많을수록 공기의 희석이 활발하게 나타난다고 해석하였다. 위와 같은 결과는 본 연구 결과와 일치하며, 실제로 산지를 제외한 녹지지역면적이 도시지역에서 가장 많이 나타났으며, 유의한 음의 영향을 주고 있는 것으로 분석되었다. 본 연구에서 활용한 파편화와 관련된 변수는 프랙털 지수이며, 값이 높을수록 파편화가 높고 도시 패치 간의 공극이 크다. Li et al.(2020)과 Gaigné et al.(2012)의 연구에서도 공간적으로 도시가 파편적으로 분산되어 있지만, 인구밀도가 높은 다중심적인 도시형태를 가질수록 미세먼지 농도가 낮아지는 경향이 있다고 제시하였다.

토지의 인접성과 파편화와 관련하여 대도시지역과 도시지역에서 유의하면서 상반되는 결과가 나타난 것은 본 연구에서 사용된 지표에 관하여 여러 선행연구에서 나타난 변수의 비일관적인 결과와 유사하다(Lee, 2020; Liang and Gong, 2020; Li et al., 2020; Rodríguez et al., 2016; Cho and Choi, 2014; Gaigné et al., 2012; Bechle et al., 2011). Lee(2020)와 Rodríguez et al.(2016)의 연구에서는 도시의 파편화된 수준이 높을수록 도시 패치가 불연속적으로 나타나며, 패치 사이의 거리가 멀어질수록 자동차 이용이 많아져 교통과 관련된 오염원 발생이 증가하는 경향이 있는 것으로 제시하였다. 한편, Li et al.(2020)의 연구에서는 도시가 파편화될수록 다중심적인 도시형태를 가지고 있지만, 다중심적이면서 인구밀도가 높은 도시는 오히려 초미세먼지 농도가 낮은 경향이 있는 것으로 분석되었다. 인접성과 관련하여 Cho and Choi(2014)는 도시지역의 콤팩트한 수준이 높을수록 미세먼지 농도가 증가하는 경향이 있는 것으로 나타나며, 콤팩트한 도시공간 구조는 대기확산을 억제하여 미세먼지 농도를 증가시키는 것으로 분석되었다. Liang and Gong(2020)의 연구에서도 도시 패치 간의 인접성이 높으면 교통 혼잡을 증가시켜 오히려 오염물질을 가두게 되어 초미세먼지 농도가 높아질 수 있다고 분석하였다. 하지만, 위 연구 결과들은 연결성이 높은 도시지역이 대기오염 개선에 유리하다는 분석 결과와 반대된다(Bechle et al., 2011). 이처럼 압축도시를 반영하는 변수들 사이에도 초미세먼지에 미치는 영향이 상충될 수 있으며, 초미세먼지뿐만 아니라 대기오염과 관련하여 압축도시를 논의함에 있어 신중한 접근이

필요하다고 볼 수 있다.

이외에도 본 연구는 토지이용 및 개발, 주거 및 건축, 교통과 관련된 도시공간구조를 통제변수로서 활용하였다. 대도시지역의 초미세먼지 농도에 유의하게 영향을 미치는 변수로 공업지역면적, 도로밀도, 타 지역 통근·통학 비율이 양의 영향을, 녹지지역면적이 음의 영향을 미치는 것으로 나타났다. 도시지역을 대상으로 분석한 Model 3의 경우 건축허가면적, 도로밀도, 타 지역 통근·통학 비율이 양의 영향을, 녹지지역면적과 주택보급률이 음의 영향을 미치는 것으로 나타났다. 특히, 도시지역의 주거 및 산업 등의 기능을 수행하는 위성도시는 대도시를 중심으로 분산되어 있으며, 공업지역이 분산되어 분포할수록 교통 체증을 완화하고 연비를 개선할 수 있으며 거리 협곡 효과(Street canyon effects)를 완화하여 대기오염 개선에 유익하다고 나타났다(Glaeser and Kahn, 2004; Manins et al., 1998). 또한, 건축허가 면적이 증가할수록 비산먼지 등의 발생이 많아져 초미세먼지 농도가 높아지는 경향이 있지만, 주택보급률이 도시지역에서만 유의한 음의 영향 결과로 미루어볼 때, 주거의 기능을 수행하고 있는 도시지역의 위성도시의 경우 초미세먼지 농도 완화에 긍정적인 역할을 하고 있다고 볼 수 있다. 대도시로의 인구과밀을 억제하고 위성도시로 인구를 분산시켜 배치함에 따라 초미세먼지 농도 개선에 유의한 영향을 줄 수 있는 것으로 나타났다. 대도시지역과 비도시지역 타 지역 통근·통학 비율이 초미세먼지 농도와 양의 관계가 있는 것으로 나타났으며, 지역 간의 이동과 관련하여 교통에너지 소비를 줄일 수 있는 정책을 추진해 나갈 필요가 있다.

비도시지역(Model 4)을 대상으로 분석한 결과 초미세먼지 농도에 유의하게 영향을 미치는 변수로 건축허가 면적, 도로밀도가 양의 영향을 미치는 것으로 나타났다. 이외에도 본 연구는 초미세먼지 농도의 영향요인으로 기상요인인 강수량과 기온을 통제변수로 활용하였다. 분석 결과, 강수량이 높을수록 초미세먼지 농도가 낮은 경향이 있었으며, 온도가 증가할수록 초미세먼지 농도가 높은 경향이 있는 것으로 나타났다(박익수, 2016).

V. 요약 및 결론

본 연구는 그동안 미세먼지 저감을 위해 다양한 대책과 더불어 공간 계획적인 시도를 통한 장기적인 미세먼지 문제해결의 필요성을 제안한다는 점에 주목하여 연구를 진행하였다. 고밀개발과 이동의 최소화를 통해 환경적인 문제를 해결하는 압축도시에 대하여 지속적으로 논의되어 왔으며, 여러 연구에서 파편화와 압축적 도시개발을 비교하여 분석하였다. 그러나 도시의 형태학적 특성과 대기오염과의 관계에 관한 연구는 국내에서 상대적으로 부족하며, 지금까지 이와 관련된 연구가 전무한 실정이다. 이에 따라, 본 연구에서는 전국 209개 지자체를 대상으로 압축도시특성을 형태학적으로 측정하고, 초미세먼지 농도에 영향을 미치는 압

축도시특성을 패널 고정효과 모형을 적용하여 분석하였다. 압축도시의 형태학적 특성에 대한 뚜렷한 차이를 비교하기 위하여 인구밀도, 파편화(프랙털 지수), 인접성 지수, 불규칙성 지수를 활용하였다. 또한, 고정효과모형을 활용하여 대도시지역, 도시지역 그리고 비도시지역으로 지자체를 분류하여 분석을 수행하였다.

분석 결과, 초미세먼지 농도는 대도시지역과 도시지역의 압축도시특성에 따라 차이가 있는 것으로 분석되었다. 대도시지역의 경우 도시 패치 간의 인접성이 높을수록 불규칙성이 낮을수록 초미세먼지 농도가 낮은 경향이 있었으며, 도시지역의 경우 도시 패치의 파편화와 인구밀도가 높을수록 초미세먼지 농도가 낮은 경향이 있는 것으로 분석되었다. 위와 같은 결과는 인구밀도가 높고 기반시설이 많은 대도시지역의 경우 고밀개발과 이동을 최소화할 수 있는 압축도시에 대한 논의가 적절함을 시사하는 바이다. 반면, 주거 및 산업 등의 주요 기능을 수행하고 있는 도시지역의 경우 산업과 관련된 도시는 분산시키고 주택보급률을 높여 도시의 주거 기능을 강화하는 등의 정책은 초미세먼지 농도 개선에 긍정적 영향을 미칠 수 있다. 따라서, 적절한 인구와 기반시설의 집중과 분산은 도시지역의 미세먼지 농도를 개선할 수 있는 하나의 방법이 될 수 있으며 도시기반시설이 대도시에만 집중되지 않도록 위성도시의 기능이 다양해질 수 있도록 하는 정책 마련이 필요하다.

본 연구는 기존 선행연구에서 사용되었던 변수 이외에 압축도시특성, 수송과 관련된 변수를 활용하여 초미세먼지 농도와와의 관계를 규명했으며, 국지적 공간 범위가 아닌 전국을 대상으로 지역을 구분하여 압축도시특성에 따른 초미세먼지 농도의 영향을 분석했다는 점에서 의의가 있다. 특히, 우리나라를 대상으로 진행된 연구는 서울 및 수도권, 광역시를 대상으로 대기오염과 도시의 공간적인 특성과의 관계에 관한 연구가 다수 진행되었으나(Ahn et al., 2022; 허유경·강민규, 2022; Kim, 2020; Park and Ko, 2018), 본 연구는 전국을 대상으로 대도시지역, 도시지역, 비도시지역으로 구분하였으며, 지역에 따라 초미세먼지 농도 개선을 위한 정책적 시사점이 다를 수 있음을 제시하였다. 또한, 본 연구에서 활용된 통제변수 중 수송과 관련된 변수인 도로밀도, 타 지역 통근·통학 비율은 모두 초미세먼지 농도와 양의 관계가 있는 것으로 분석되었다. 미세먼지 저감을 위해 배출가스 5등급 차량에 대한 운행 제한 등의 정책이 시행되고 있으나, 이외에도 수송 분야에서 다른 지역으로의 통근·통학 비율을 줄이는 등 지역 간 차량의 이동을 최소화할 수 있는 정책이 마련될 필요가 있다. 코로나 상황에 시행된 사회적 거리두기 정책에 따라 교통과 관련된 초미세먼지 배출량이 감소하였다는 여러 연구 결과를 통하여 볼 때(Seo et al., 2020; Kang et al., 2020), 재택근무를 장려하는 등 차량의 이동을 최소화할 수 있는 정책은 초미세먼지 농도 개선에 긍정적 효과를 가져올 수 있음을 보여준다. 이처럼 본 연구는 기존 선행연구에서 활용한 수송과 관련된 도로밀도,

교통량 등의 변수 외에, 차량의 이동과 관련하여 타 지역 통근·통학 비율을 활용하였으며, 해당 변수가 초미세먼지 농도에 대해 수송 부문에서 하나의 대리변수로 사용될 수 있음을 시사하는 바이다.

본 연구는 초미세먼지와 압축도시특성의 관계를 제시하고 있으나 다음과 같은 한계가 존재한다. 본 연구에서 토지피복 데이터를 활용하여 압축도시의 형태를 측정하였으나 도시의 형태를 측정하기 위한 변수와 기법들에 대한 추가적 검토가 필요하다. 예를 들어, 여러 연구에서 다중심적인 형태나 직주근접 등 물리적인 현상으로부터는 설명하기 어려운 개념을 측정하기 위해 인구나 고용과 관련된 데이터를 사용하였다(Lee, 2020; Han et al., 2020; Kang et al., 2019; Clark et al., 2011). 또한, 대기오염 물질(PM_{2.5}, PM₁₀, NO₂, SO₂, CO, O₃)과 도시형태의 관계에 관한 후속 연구가 필요하다. 기존의 선행연구에서 SO₂는 인구밀도가 높을수록 높아지며, NO₂는 차량의 이용이 많아질수록 높아진다고 분석하였다(Li and Zhou, 2019; Fan et al., 2018; Yuan et al., 2018a). 초미세먼지 발생과 밀접한 연관이 있는 NO₂와 SO₂는 도시의 형태학적 지표에 따라 그 영향이 다르게 나타났다. 따라서, 초미세먼지뿐만 아니라 대기오염물질과 도시의 형태학적 관계를 분석하고 이에 대한 종합적인 공간계획 등의 대책 마련이 필요하다. 후속 연구에서 다양한 오염물질과 도시의 형태학적 관계를 분석한다면, 대기오염 정책과 관련하여 향후 도시 계획적 방향에 대한 구체적인 대안을 제시할 수 있을 것으로 기대한다.

인용문헌 References

1. 남성우·성선용·박종순, 2020. “미세먼지 저감대책으로서 바람길 적용 방안: 세종시를 대상으로”, 「한국콘텐츠학회논문지」, 20(3): 1-9.
Nam, S., Sung, S., and Park, J.S., 2020. “Application of Ventilation Corridor to Mitigate Particulate Matter for the Sejong-si”, *The Journal of the Korea Contents Association*, 20(3): 1-9.
2. 박일수, 2016. “서울 수도권지역에서 미세먼지 고농도 발생의 근본은 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.
3. 서승연·김승남·이경환, 2014. “차량 주행거리에 영향을 미치는 도시 토지이용 및 도시형태 특성에 관한 실증분석: 한국의 74개 중소도시를 대상으로”, 「국토계획」, 49(8): 107-121.
Seo, S.Y., Kim, S.N., and Lee, K.H., 2014. “Effects of Land Use and Urban Form on Vehicle Kilometer Traveled: Focused on the 74 Small and Medium-sized Cities in Korea”, *Journal of Korean Planning Association*, 49(8): 107-121.

4. 서원석·김리영, 2013. “도시공간구조 유형과 환경요소의 관계에 대한 실증 연구”, 『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.
5. 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.
6. 최종일·이영수, 2015. “초미세먼지(PM_{2.5}) 배출량이 호흡기계 질환에 미치는 영향 연구”, 『환경정책』, 23(4): 155-172.
Choe, J.I. and Lee, Y.S., 2015. “A Study on the Impact of PM_{2.5} Emissions on Respiratory Diseases”, *Journal of Environmental Policy and Administration*, 23(4): 155-172.
7. 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.
8. 허유경·강민규, 2022. “도시공간구조와 기상요인이 계절별 고농도 미세먼지 발생에 미치는 영향에 관한 연구”, 『국토계획』, 57(1): 145-160.
Hur, Y.G. and Kang, M.G., 2022. “The Effects of Urban Spatial Structure and Meteorological Factors on the High Concentration of Fine Dust Pollution”, *Journal of Korean Planning Association*, 57(1): 145-160.
9. 환경부, 2021. 『제3차 미세먼지 계절관리제 시행계획』, 세종. Ministry of Environment, 2021. *3rd Implementation Plan for Fine Dust Seasonal Management System*, Sejong.
10. Ahn, H., Lee, J., and Hong, A., 2022. “Urban Form and Air Pollution: Clustering Patterns of Urban Form Factors Related to Particulate Matter in Seoul, Korea”, *Sustainable Cities and Society*, 81: 103859.
11. Arellano, M., 2003. *Panel Data Econometrics*, Oxford University Press.
12. Bechle, M.J., Millet, D.B., and Marshall, J.D., 2011. “Effects of Income and Urban Form on Urban NO₂: Global Evidence from Satellites”, *Environmental Science & Technology*, 45(11): 4914-4919.
13. Chen, S.M. and He, L.Y., 2014. “Welfare Loss of China's Air Pollution: How to Make Personal Vehicle Transportation Policy”, *China Economic Review*, 31: 106-118.
14. Cho, H.S. and Choi, M.J., 2014. “Effects of Compact Urban Development on Air Pollution: Empirical Evidence from Korea”, *Sustainability (Switzerland)*, 6(9): 5968-5982.
15. Choi, T.Y., Kang, D.I., and Cha, J.G., 2019. “An Analysis of the Correlation between Seoul's Monthly Particulate Matter Concentrations and Surrounding Land Cover Categories”, *Journal of Environmental Impact Assessment*, 28(6): 568-579.
16. Clark, L.P., Millet, D.B., and Marshall, J.D., 2011. “Air Quality and Urban Form in U.S. Urban Areas: Evidence from Regulatory Monitors”, *Environmental Science and Technology*, 45(16): 7028-7035.
17. Colvile, R.N., Hutchinson, E.J., Mindell, J.S., and Warren, R.F., 2001. “The Transport Sector as a Source of Air Pollution”, *Atmospheric Environment*, 35(9): 1537-1565.
18. Fan, C., Tian, L., Zhou, L., Hou, D., Song, Y., Qiao, X., and Li, J., 2018. “Examining the Impacts of Urban Form on Air Pollutant Emissions: Evidence from China”, *Journal of Environmental Management*, 212: 405-414.
19. Fossati, S., Baccarelli, A., Zanobetti, A., Hoxha, M., Vokonas, P.S., Wright, R.O., and Schwartz, J., 2014. “Ambient Particulate Air Pollution and MicroRNAs in Elderly Men”, *Epidemiology*, 25(1): 68-78.
20. Gaigné, C., Riou, S., and Thisse, J.F., 2012. “Are Compact Cities Environmentally Friendly?”, *Journal of Urban Economics*, 72(2-3): 123-136.
21. Glaeser, E.L. and Kahn, M.E., 2004. “Sprawl and Urban Growth”, in *Handbook of Regional and Urban Economics (Vol. 4)*, edited by J.V. Henderson and J.F. Thisse, 2481-2527, Elsevier.
22. Hammer, M.S., van Donkelaar, A., Li, C., Lyapustin, A., Sayer, A.M., Hsu, N.C., Levy, R.C., Garay, M.J., Kalashnikova, O.V., Kahn, R.A., Brauer, M., Apte, J.S., Henze, D.K., Zhang, L., Zhang, Q., Ford, B., Pierce, J.R., and Martin, R.V., 2020. “Global Estimates and Long-term Trends of Fine Particulate Matter Concentrations (1998-2018)”, *Environmental Science & Technology*, 54(13): 7879-7890.
23. Han, S., Sun, B., and Zhang, T., 2020. “Mono- and Polycentric Urban Spatial Structure and PM_{2.5} Concentrations: Regarding the Dependence on Population Density”, *Habitat International*, 104: 102257.
24. Hao, Y., Peng, H., Temulun, T., Liu, L.Q., Mao, J., Lu, Z.N., and Chen, H., 2018. “How Harmful is Air Pollution to Economic Development? New Evidence from PM_{2.5} Concentrations of Chinese Cities”, *Journal of Cleaner Production*, 172: 743-757.
25. Jeon, C.W., Cho, D., and Zhu, L., 2018. “Exploring the Spatial Heterogeneity of Particulate Matter (PM₁₀) using Geographically Weighted Ridge Regression (GWR_{RR})”, *Journal of the Korean Cartographic Association*, 18(3): 91-104.
26. Kang, J.E., Yoon, D.K., and Bae, H.J., 2019. “Evaluating the Effect of Compact Urban Form on Air Quality in Korea”, *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 46(1): 179-200.
27. Kang, Y.H., You, S., Bae, M., Kim, E., Son, K., Bae, C., Kim, Y., Kim, B.U., Kim, H.C., and Kim, S., 2020. “The Impacts of COVID-19, Meteorology, and Emission Control Policies on PM_{2.5} drops in Northeast Asia”, *Scientific Reports*, 10(1): 22112.
28. Kim, H., 2020. “Land Use Impacts on Particulate Matter

- Levels in Seoul, South Korea: Comparing High and Low Seasons”, *Land*, 9(5): 142.
29. Kim, S.Y. and Song, I., 2017. “National-scale Exposure Prediction for Long-term Concentrations of Particulate Matter and Nitrogen Dioxide in South Korea”, *Environmental Pollution*, 226: 21-29.
 30. Lee, C., 2020. “Impacts of Multi-scale Urban Form on PM_{2.5} Concentrations using Continuous Surface Estimates with High-resolution in U.S. Metropolitan Areas”, *Landscape and Urban Planning*, 204: 103935.
 31. Li, F. and Zhou, T., 2019. “Effects of Urban Form on air Quality in China: An Analysis based on the Spatial Autoregressive Model”, *Cities*, 89: 130-140.
 32. Li, Y., Zhu, K., and Wang, S., 2020. “Polycentric and Dispersed Population Distribution Increases PM_{2.5} Concentrations: Evidence from 286 Chinese Cities, 2001-2016”, *Journal of Cleaner Production*, 248: 119202.
 33. Liang, L. and Gong, P., 2020. “Urban and Air Pollution: A Multi-city Study of Long-term Effects of Urban Landscape Patterns on Air Quality Trends”, *Scientific Reports*, 10(1): 1-13.
 34. Liu, Y., Arp, H.P.H., Song, X., and Song, Y., 2017. “Research on the Relationship between Urban Form and Urban Smog in China”, *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 44(2): 328-342.
 35. Manins, P.C., Cope, M.E., Hurley, P.J., Newton, P.W., Smith, N.C., and Marquez, L.O., 1998. “The Impact of Urban Development on Air Quality and Energy Use”, Paper presented at 14th International Clean Air & Environment Conference, Melbourne, Australia.
 36. Martins, H., 2012. “Urban Compaction or Dispersion? An Air Quality Modelling Study”, *Atmospheric Environment*, 54: 60-72.
 37. McCarty, J. and Kaza, N., 2015. “Urban Form and Air Quality in the United States”, *Landscape and Urban Planning*, 139: 168-179.
 38. McGarigal, K., 2015. *FRAGSTATS Help*, Amherst, MA, USA: University of Massachusetts.
 39. Nam, K., Lim, U., and Kim, B.H.S., 2012. “‘Compact’ or ‘Sprawl’ for Sustainable Urban Form? Measuring the Effect on Travel Behavior in Korea”, *The Annals of Regional Science*, 49(1): 157-173.
 40. Nguyen, M.V., Park, G.H., and Lee, B.K., 2017. “Correlation Analysis of Size-resolved Airborne Particulate Matter with Classified Meteorological Conditions”, *Meteorology and Atmospheric Physics*, 129(1): 35-46.
 41. Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD), 2012. *Compact City Policies: A Comparative Assessment*, Paris.
 42. Ouyang, X., Wei, X., Li, Y., Wang, X.C., and Klemeš, J.J., 2021. “Impacts of Urban Land Morphology on PM_{2.5} Concentration in the Urban Agglomerations of China”, *Journal of Environmental Management*, 283: 112000.
 43. 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.
 44. Park, S.K., 2019. “Assessing the Impact of Ozone and Particulate Matter on Mortality Rate from Respiratory Disease in Seoul, Korea”, *Atmosphere*, 10(11): 430-441.
 45. Puett, R.C., Hart, J.E., Yanosky, J.D., Paciorek, C., Schwartz, J., Suh, H., Speizer, F.E., and Laden, F., 2009. “Chronic Fine and Coarse Particulate Exposure, Mortality, and Coronary Heart Disease in the Nurses’ Health Study”, *Environmental Health Perspectives*, 117(11): 1697-1701.
 46. 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.
 47. Roy, A., Hu, W., Wei, F., Korn, L., Chapman, R.S., and Zhang, J.J., 2012. “Ambient Particulate Matter and Lung Function Growth in Chinese Children”, *Epidemiology*, 23(3): 464-472.
 48. Sarrat, C., Lemonsu, A., Masson, V., and Guedalia, D., 2006. “Impact of Urban Heat Island on Regional Atmospheric Pollution”, *Atmospheric Environment*, 40(10): 1743-1758.
 49. Schweitzer, L. and Zhou, J., 2010. “Neighborhood Air Quality, Respiratory Health, and Vulnerable Populations in Compact and Sprawled Regions”, *Journal of the American Planning Association*, 76(3): 363-371.
 50. Seo, J.H., Jeon, H.W., Sung, U.J., and Sohn, J.R., 2020. “Impact of the COVID-19 Outbreak on Air Quality in Korea”, *Atmosphere*, 11(10): 1137.
 51. Smith, P., Ashmore, M.R., Black, H.I., Burgess, P.J., Evans, C.D., Quine, T.A., Thomson, A.M., Hicks, K., and Orr, H.G., 2013. “The Role of Ecosystems and Their Management in Regulating Climate, and Soil, Water and Air Quality”, *Journal of Applied Ecology*, 50(4): 812-829.
 52. Stone, B., 2008. “Urban Sprawl and Air Quality in Large US Cities”, *Journal of Environmental Management*, 86(4): 688-698.
 53. Tao, Y., Zhang, Z., Ou, W., Guo, J., and Pueppke, S.G., 2020. “How Does Urban Form Influence PM_{2.5} Concentrations: Insights from 350 Different-sized Cities in the Rapidly Urbanizing Yangtze River Delta Region of China, 1998-2015”, *Cities*, 98: 102581.
 54. Waked, A., Afif, C., and Seigneur, C., 2015. “Assessment of Source Contributions to Air Pollution in Beirut, Lebanon: A Comparison of Source-based and Tracer-based Modeling Approaches”, *Air Quality, Atmosphere & Health*, 8(5): 495-505.
 55. Wood, C.M., 1990. “Air Pollution Control by Land Use Planning Techniques: A British-American Review”, *International Journal of Environmental Studies*, 35(4): 233-243.
 56. World Health Organization, 2016. *Ambient Air Pollution: A Global Assessment of Exposure and Burden of Disease*, Geneva, Switzerland.
 57. Wu, J., Zhang, P., Yi, H., and Qin, Z., 2016. “What Causes Haze Pollution? An Empirical Study of PM_{2.5} Concentrations in Chinese Cities”, *Sustainability*, 8(2): 132.

58. Wu, J., Zheng, H., Zhe, F., Xie, W., and Song, J., 2018. "Study on the Relationship between Urbanization and Fine Particulate Matter (PM_{2.5}) Concentration and Its Implication in China", *Journal of Cleaner Production*, 182: 872-882.
59. Yuan, M., Huang, Y., Shen, H., and Li, T., 2018b. "Effects of Urban Form on Haze Pollution in China: Spatial Regression Analysis based on PM_{2.5} Remote Sensing Data", *Applied Geography*, 98: 215-223.
60. Yuan, M., Song, Y., Huang, Y., Hong, S., and Huang, L., 2018a. "Exploring the Association between Urban Form and Air Quality in China", *Journal of Planning Education and Research*, 38(4): 413-426.
61. Yuan, M., Song, Y., Huang, Y., Shen, H., and Li, T., 2019. "Exploring the Association between the Built Environment and Remotely Sensed PM_{2.5} Concentrations in Urban Areas", *Journal of Cleaner Production*, 220: 1014-1023.
62. Zhai, L., Zou, B., Fang, X., Luo, Y., Wan, N., and Li, S., 2017. "Land Use Regression Modeling of PM_{2.5} Concentrations at Optimized Spatial Scales", *Atmosphere*, 8(1): 1.
63. Zhang, Z., Wang, J., Hart, J.E., Laden, F., Zhao, C., Li, T., Zheng, P., Li, D., Ye, Z., and Chen, K., 2018. "National Scale Spatiotemporal Land-use Regression Model for PM_{2.5}, PM₁₀ and NO₂ Concentration in China", *Atmospheric Environment*, 192: 48-54.
64. Zhu, X., Liu, Y., Chen, Y., Yao, C., Che, Z., and Cao, J., 2015. "Maternal Exposure to Fine Particulate Matter (PM_{2.5}) and Pregnancy Outcomes: A Meta-analysis", *Environmental Science and Pollution Research*, 22(5): 3383-3396.
65. Živković, J., 2020. "Urban Form and Function", *Climate Action*, 862-871.

Date Received	2022-10-12
Reviewed(1 st)	2022-11-20
Date Revised	2023-01-24
Reviewed(2 nd)	2023-02-07
Date Revised	2023-02-14
Reviewed(3 rd)	2023-02-15
Date Accepted	2023-02-15
Final Received	2023-02-27