

Research Paper

LCZ 유형이 미세먼지에 미치는 영향에 관한 탐색적 연구

김연주 · 문한솔 · 정주철

부산대학교 도시공학과

An Exploratory Study on the Effect of LCZ Type on Particulate Matter

Yeonju Kim · Hansol Mun · Juchul Jung

Department of Urban Planning and Engineering, Pusan National University

요약: 2019년 기준 우리나라는 OECD 38개 국가들 중에서 미세먼지가 가장 심각한 수준이며 같은 해 「재난 및 안전관리 기본법」을 개정하여 미세먼지를 사회재난으로 규정하였다. 현재 정부는 총 5대 분야, 42개 과제, 177개 세부과제로 구성된 미세먼지 관리 종합계획(2022년~2023년)을 마련하여 배출량 저감 목표를 달성하기 위해 노력하고 있다. 하지만 단순히 배출원으로부터 저감대책을 세우는 것이 아니라, 도시의 다양한 공간 특성을 고려하여 대책을 마련할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 부산광역시를 대상으로 도시의 건축물유형과 토지피복유형별 17개의 형태로 분류된 LCZ(Local Climate Zone)분류체계를 활용하여 도시의 형태를 분류하였고, IDW기법을 활용하여 연평균 PM10, PM2.5 농도를 매핑하였다. 또한, LCZ분류체계를 정량화하기 위해 Fragstats와 Moving window를 활용하였다. 마지막으로 상관분석과 회귀분석을 실시하여 LCZ분류체계와 PM10, PM2.5 간의 관계를 분석하였다. 그 결과, 건축물의 높이가 낮은 유형과 나무가 있는 녹지 유형은 PM10, PM2.5 농도에 긍정적인 영향을 주는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 본 연구는 효율적인 공간계획에 기반한 미세먼지 저감 정책 수립을 위해 기초 자료로 활용될 것으로 기대된다.

주요어: LCZ, 도시형태, 미세먼지, 도시계획

Abstract: As of 2019, Korea's fine dust is the most severe among 38 OECD countries, and in the same year, 「the Framework on Disaster and Safety Management」 was revised to define fine dust as a social disaster. Currently, the government is working to achieve its emission reduction goals by preparing a comprehensive fine dust management plan (2022-2023) consisting of a total of five areas, 42 tasks, and 177 detailed tasks. However, it is necessary to come up with measures in consideration of the various spatial characteristics of the city, not just as a source of emission. Therefore, in this study, the shape of the city was classified using the LCZ (Local Climate Zone) classification system into 17 types by building type and land cover type in Busan, and the average annual PM10 and PM2.5 concentration were mapped using the IDW technique. In addition, Fragstats and Moving Window were used to quantify the LCZ classification system. Finally, correlation analysis and

First Author: Yeonju Kim, E-mail: kyj76540@gmail.com, ORCID: 0009-0005-1161-618X

Corresponding Author: Juchul Jung, Tel: +82-51-510-3521, E-mail: jcjung@pusan.ac.kr, ORCID: 0000-0003-2152-2345

Co-Author: Hansol Mun, E-mail: tkdfhr6917@naver.com, ORCID: 0000-0003-1370-2442

Received: 27 September, 2023. Revised: 19 October, 2023. Accepted: 19 October, 2023.

regression analysis were conducted to analyze the relationship between the LCZ classification system and PM10 and PM2.5. As a result, it was confirmed that the type of low height of the building and the type of green space with trees had a positive effect on the concentration of PM10 and PM2.5. Therefore, this study is expected to be used as basic data to establish fine dust reduction policies based on efficient spatial planning.

Keywords : LCZ, Urban Form, Particulate Matter, Urban Planning

I. 서론

세계보건기구(World Health Organization, WHO) 산하 국제암연구소(IARC)는 미세먼지를 1군 발암물질로 지정하였다(AirKorea, 2023). 미세먼지는 공기 중 고체상태와 입자의 혼합물로 배출되고 화학반응 또는 자연적으로 생성되며, 직경에 따라 PM10(지름이 10 μm 이하인 미세먼지)과 PM2.5(지름이 2.5 μm 이하인 미세먼지)으로 구분한다. PM10은 사업장 연소, 산불, 불법소각과 같은 생물성 연소 과정, 자동차 연료 연소, 도로 비산먼지, 공장 및 건설현장 등 특정 배출원에서 직접 발생된다. 반면 PM2.5의 경우 전구물질이 대기 중의 특정 조건에서 반응하여 2차 생성된다(National Fine dust information Center 2023). 이러한 미세먼지에 노출되면, 단기적으로는 콧물, 기침, 가래와 같은 증상이 나타나며 오랫동안 흡입하면 천식, 기관지염, 비염과 같은 만성 호흡기질환을 겪을 수 있다(Ebi and McGregor G 2008).

특히, 우리나라의 미세먼지(PM2.5) 농도는 2019년 기준 OECD(Organization for Economic Cooperation and Development) 38개 회원국 가운데 최하위 수준으로 평가되었다(Kindicator, 2022). 이에 정부는 같은 해 「재난 및 안전관리 기본법」을 개정하여 미세먼지를 사회재난으로 규정하기 시작했으며, 미세먼지에 대해 더욱 구체적인 대응계획이 필요한 시점이다.

이에 따라 현재 정부는 「미세먼지 관리 종합계획(2022년~2024년)」을 수립하여 국내 배출량 저감, 국제협력 강화, 국민건강 보호, 정책기반 마련, 국민 인식 제고 등의 목표를 세우고, 총 177개 세부과제와 약 20조원의 예산을 투입해 효과적으로 미세먼지를 저감할 수 있도록 노력하고 있다(National Fine dust

information Center, 2023). 학계에서도 발생 요인 규명과 현황 분석에 관한 논의가 활발히 진행되고 있으며, 그 중 도시형태에 따른 미세먼지 농도 변화에 대한 연구 또한 논의되기 시작했다(Hankey and Marshall 2017; Kim et al. 2023; Kang 2021; Oh et al. 2005; Shi et al. 2022; Yang et al. 2022). 기존에는 지형, 토지이용, 인구 등 미세먼지에 간접적으로 끼치는 요소들을 고려하지 않고 있기 때문이다. 미세먼지 배출원이 아닌 물리적인 도시형태에 따라 미세먼지의 농도 변화가 존재하고 이에 따른 상관성이 확인되고 있으므로, 도시형태가 반영된 미세먼지 저감대책 수립에 대한 필요성이 대두되고 있음을 알 수 있다. 따라서 미세먼지는 주변 환경과 대기의 영향을 받아 확산되는 오염물질이므로 토지이용, 토지피복, 그리고 건축물의 밀도나 높이 등 도시를 구성하는 요소들에 따라 분포가 달라질 수 있기 때문에(Brousse O et al. 2016) 미세먼지 피해로부터 성공적으로 대응하기 위해 필요한 전략 중 하나는 효율적인 공간계획이라고 볼 수 있다.

도시형태는 도시의 입지와 평면구성, 건축의 형태와 양식, 토지이용, 그리고 사회집단, 경제활동, 공공기관 등과 같은 요소들의 공간적 패턴 또는 배열이라고 할 수 있다. 좁은 의미로는 도시외형의 가시적인 형태를 의미하는 도시형태(Urban Form)에 한정할 수 있다. 넓은 의미로는 도시의 비물리적 요소를 더하여 입지, 배치상태, 그리고 이들의 상호작용을 나타내 도시 구조(Urban Structure)라 정의할 수 있다(Oh et al. 2005). 이에 본 연구는 도시외형의 가시적인 형태를 의미하는 개념으로 한정하여 도시의 물리적 형태와 미세먼지와의 영향관계를 분석하고자 LCZ 분류체계를 활용하였다. 따라서 본 연구는 이러한 도

시 구성 요소들을 고려하여 도시계획 측면에서 저감 대책을 고찰해보고자 도시형태와 미세먼지 간의 관계를 분석하고자 한다.

II. 선행연구

1. 도시형태로서의 LCZ(Local Climate Zone) 분류체계

LCZ는 도시열섬 연구를 위한 프레임워크를 제공하

기 위해 설계되었다. 열 출력을 포함한 표면 특성을 기반으로 분류한 체계이며, 도시 및 녹지 피복을 특성화하는데 사용되고 있다(Demuzere et al. 2021). 건축물의 밀도와 높이, 토지의 피복도, 식물의 높이 및 밀도, 수자원의 구성으로 총 17가지 유형으로 구성되어 있으며, 10가지 건축물 유형(LCZ 1~10)과 7가지 토지피복 유형(LCZ A~G)으로 구분된다(Stewart et al. 2012). 특히, 건축물 유형은 크게 밀도와 높이에 따라 나뉘게 된다. LCZ 1~3 유형은 ‘Compact area’

Table 1. LCZ Framework

Type	Classification Functions		Type	Classification Functions	
Built	LCZ 1	Compact High-rise	Land cover	LCZ A	Dense Trees
	LCZ 2	Compact Mid-rise		LCZ B	Scattered Trees
	LCZ 3	Compact Low-rise		LCZ C	Bush, Scrub
	LCZ 4	Open High-rise		LCZ D	Low Plant
	LCZ 5	Open Mid-rise		LCZ E	Bare Rock or Paved
	LCZ 6	Open Low-rise		LCZ F	Bare Soil or Sand
	LCZ 7	Lightweight Low-rise		LCZ G	Water
	LCZ 8	Large Low-rise			
	LCZ 9	Sparsely Built			
	LCZ 10	Heavy Industry			

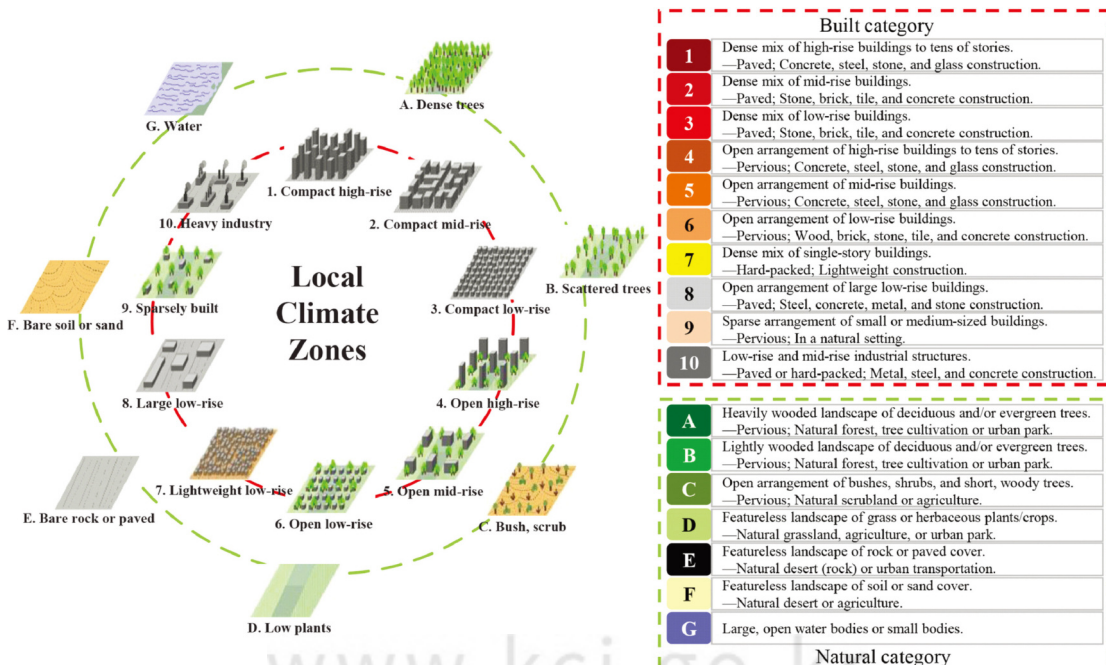


Figure 1. Description of LCZ classification system (Sources: Yang et al. 2022)

로 높은 밀도 유형을 나타내고, LCZ 4~6 유형은 'Open space'로 낮은 밀도 유형을 나타낸다. LCZ 1, 4는 'High-rise', LCZ 2, 5는 'Mid-rise', LCZ 3, 6는 'Low-rise'로 높이에 따라 다시 분류된다. 토지피복 유형의 LCZ A~C는 녹지로서 나무의 밀도와 높이에 따라 A, B, C를 구분하고, 기타 피복에 대해서는 Table 1과 같이 분류한다. 또한, LCZ분류체계의 건축물 유형은 기본적으로 토지피복 유형 위에 건물이 더해진 구성이며, 예로 LCZ 4~6과 9 유형은 LCZ B 위의 여러 유형의 건물이 더해진 것으로 확인할 수 있다(Figure 1).

최근, LCZ 분류체계에 기반을 두어 2022년을 기준으로 WUDAPT (The World Urban Database and Access Portal Tools) Protocol이 개발되어 전세계 도시들을 대상으로 동일한 열환경 공간 분석 지도를 제작할 수 있게 되었다(Kim and Eom 2017). 이 절차에서는 Google Earth를 활용하여 17개의 LCZ 유형을 대표할 수 있는 훈련지역이 선정된다. SAGA GIS를 이용하여 일종의 감독분류를 하기 위해 선정한 훈련지역 파일과 Landsat 8 위성영상을 바탕으로 LCZ 유형을 분류하고 LCZ map을 형성한다(Kim et al. 2017). 이 과정은 가장 정확도가 높은 LCZ map을 도출하기 위해 반복하여 진행되므로(Brousse et al. 2016), WUDAPT의 온라인 플랫폼에서 제공하는 어플리케이션은 정확도가 높고, 일관된 데이터를 구축할 수 있다는 이점이 있다(Kang et al. 2023).

본래 LCZ는 도시 열섬 연구를 위해 개발된 분류체계이지만 최근 기후변화, 방재, 도시계획, 건물에너지, 탄소배출과 관련된 주제로 확대 적용이 되고 있다. 다양한 연구 분야의 도구로서 잠재력을 내포하고 있으므로(Kang et al. 2023), 미세먼지와와의 관계 분석에서 활용이 가능할 것이라 판단되었다.

또한, LCZ는 현재 도시형태를 분류하기 위해 많이 사용되고 있는 토지피복도 데이터보다 더 세부적인 분석이 가능하다. 토지피복도와 LCZ를 비교분석한 결과, LCZ 데이터는 높이 및 밀도에 따른 토지피복 차이가 명확하게 나타나므로 건물의 높이 및 밀도, 녹지의 높이와 밀도 등 주요하게 영향을 미치는 인자들에 대한 데이터를 토지피복도보다 더욱 세부적으로 분

석할 수 있다(Kang et al. 2023). 따라서 본 연구에서는 도시형태와 미세먼지 간의 관계를 보다 세부적으로 확인하기 위하여 2022년 기준 WUDAPT Protocol에 따른 LCZ 분류체계를 채택하여 분석하였다.

2. 도시형태와 Fragstats

경관구조 해석 모형(Fragstats)은 미국 내무성과 오레곤 주립대학이 공동으로 개발한 공간분석 프로그램이다. 이질적이고 다양한 구성요소(토지이용, 토지피복)로 표현되는 자연경관의 공간구조를 다양한 수치자료로 계산한다. McGarigal and Marks (1995)가 제안한 이래 수차례 기능이 향상되어 생태적 과정을 예측하는데 더 적합하게 보완되어져 왔으며 벡터자료와 레스터자료를 위한 두 가지 프로그램으로 개발되었다(Kwon et al. 2012).

이 프로그램에 투입되는 매트릭 값들은 한 지역 경관의 특성을 나타내는 특징적 요소이다. 하나의 매트릭 값이 그 지역을 대표하는 특성이 될 수는 없지만, 수십 개의 매트릭스가 함께 경관의 특징을 나타내므로 경관 생태지표를 도출하는데 도움이 된다. 또한 경관지수의 값들을 분석할 경관 규모와 유형에 따라 patch, class, landscape 수준에서 산출할 수 있다. patch 수준은 단일 조각에서의 값들이고, class 수준은 동일 유형의 조각들에 대한 값이며, landscape 수준은 모든 유형의 patch를 모두 포함한 수준에서 경관지수의 값을 도출하는 것을 의미한다(Kwon et al. 2012).

Fragstats는 개별녹지의 변화에 대한 분석과 시각적인 표현에는 어려운 한계가 있으나(Kang et al. 2012), 지역 내 경관 전반의 구조, 형태, 기능, 변화 등을 정량적으로 평가하기 용이하며, 현재 사용되고 있는 프로그램 가운데 가장 다양하고 많은 경관 지수를 포함하고 있는 장점이 있다(McGarigal and Marks 1995; Lee 2007; Lee and Yoon 2008) 이러한 장점으로 인해, 최근에는 도시계획 분야에서 녹지의 파편화 및 연결성, 스프롤의 정도를 정량화하기 위해 Fragstats가 폭넓게 사용되고 있다. 이에 본 연구에서는 LCZ체계 내 동일 유형에 대한 값을 정량화하기 위해 Fragstats의 Class 수준을 채택하여 분석을 진행하였다.

III. 연구 설계

1. 연구 질문 설정

본 연구에서는 다음과 같은 연구질문에 따라 탐색적 연구를 수행하고자 하였다.

- 연구질문 1: LCZ 분류체계에 따라 미세먼지 농도의 차이가 존재할 것인가?
- 연구질문 2: 밀도와 높이가 높은 건축물 또는 녹지의 형태를 가지는 LCZ 유형은 미세먼지에 어떤 영향을 미칠 것인가?

2. 연구의 범위

본 연구의 범위는 부산광역시를 대상으로 진행하였다(Figure 2). 부산광역시는 15구 1군을 가진 광역시로서 그 면적은 총 770,17km²에 달한다. 1995년 이후로 부산광역시의 인구는 낮은 출산율과 일자리 부족 등으로 인해 계속해서 줄어들고 있으며, 고령화율은 2010년 기준 402,231명에서 2022년 기준 714,797명으로 21,23% 증가하였다(Busan 2023). 이러한 부산의 고령화된 인구학적 특징으로 인해 미세먼지로 인

한 피해가 적지 않을 것으로 판단된다. 또한, 지형적 특징으로는 동부와 서부를 각각 둘러싸는 구릉성산지와 신어 산맥으로 인해 전형적인 분지 형태를 띠고 있다. 이러한 산지형 특성 때문에 부산의 해안지역은 소반도, 섬, 만입이 풍부한 전형적인 리아스식 해안의 형태를 띤다(Busan 2023). 다양한 지형적 특성으로 인해 WUDAPT Protocol의 LCZ 분류체계에 따라 부산광역시의 도시형태 유형을 분류했을 때, LCZ 7과 C 유형을 제외한 모든 유형이 확인되었다. 전국을 대상으로 LCZ 유형 현황을 분석했을 때 부산광역시에서 가장 많은 15개 유형이 도출되었으며, 이는 한국의 수도인 서울특별시보다도 많은 결과임을 확인하였다. 따라서 우리나라 전역 중 가장 많은 LCZ 유형을 보유한 지역으로서, 본 연구의 대상지로 설정하기에 적합한 것으로 판단되었다.

3. 분석방법

1) IDW 기법을 활용한 미세먼지 측정값 구축

본 연구에서는 미세먼지 공간 자료 구축을 위해 환경부 AirKorea에서 제공하는 측정소별 PM10, PM2.5

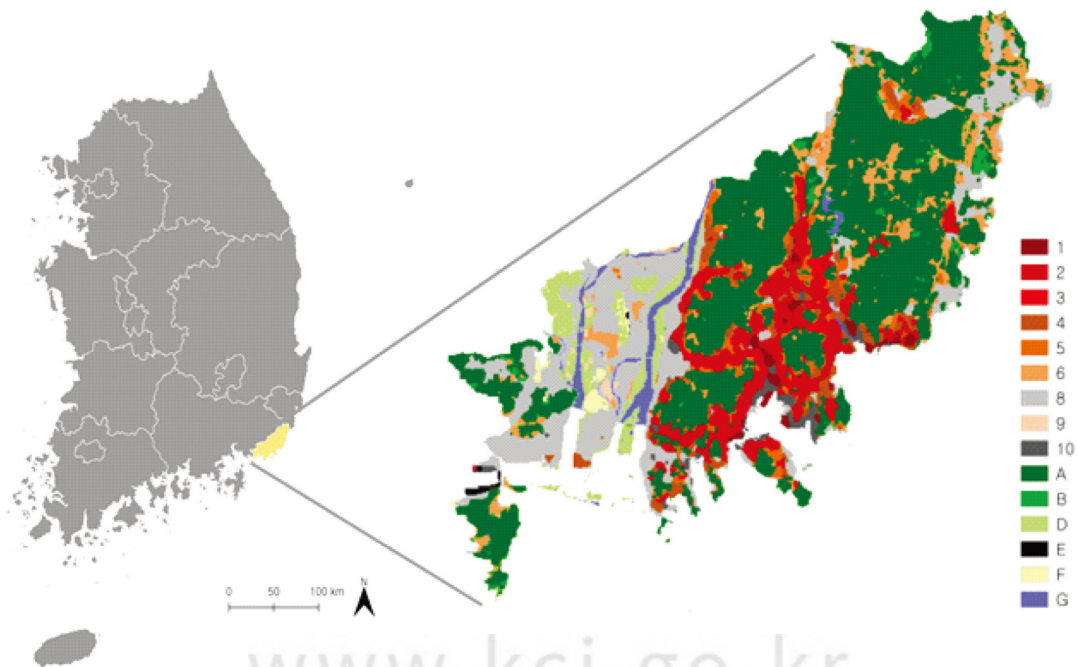


Figure 2. LCZ of Busan

데이터를 활용하였다. 이 때, LCZ Map이 형성된 2022년을 기준으로 분석하고자 하였으나, 자료 구득의 한계로 인해 가장 최근 자료인 2021년 측정소별 평균 미세먼지 농도 자료를 활용하였다.

미세먼지 농도 자료 구축을 위해서는 위성데이터의 측정값 사용 또는 측정소별 데이터의 공간보간 등의 방법이 있다. 전자의 경우 1,000m의 공간해상도로 구축되어 광범위한 지역의 연속적인 미세먼지 농도를 추정하는 데 용이하나(Kim et al. 2023), 본 연구에서 활용하는 100m×100m 공간해상도의 LCZ Map에 적용할 경우, LCZ 유형별 미세먼지 농도의 차이가 거의 나지 않아 본 연구에서는 적절치 않은 것으로 판단되었다. 따라서 공간보간법을 통한 추정치를 활용한다.

공간보간법은 특정 지점의 관측값을 이용하여 관측되지 않는 지점의 값을 예측하는 기법이며, 대표적인 방법으로는 IDW (Inverse Distance Weighting), Kriging, Spline이 있다. IDW 기법은 공간적으로 인접한 지점 사이의 값은 공통된 위치요인으로 인하여 유사성을 가지고, 두 지점간의 거리가 증가할수록 유사성이 상대적으로 감소하게 된다는 가정에 기초한다(Cho and Jeong 2006; Lee et al. 2011). 가까이 있는 실측값에 더 큰 가중치를 주어 내삽하는 방법으로, 거리가 가까울수록 높은 가중치가 적용된다. 반대로

실측값으로부터 멀어질수록 가중되는 값의 영향력은 줄어들기 때문에 인접 지역에 대한 공간가중치 설정에 따라 추정값과 정확도가 달라진다(Mun et al. 2020). Kriging은 측정값들 간의 자기상관을 포함하는 통계적 모델에 근거하고, IDW와 같이 보간하고자 하는 점 주위의 측정값에 가중치를 부여하여 예측한다. 하지만 IDW와는 다르게 단순거리에 관한 함수를 이용하지 않고, 측정된 값들 간의 공간적 구조와 공간상관에 근거하는 방법이다(Kim and Jo 2012). Spline은 관측된 지점의 값을 통과하는 표면 곡률의 총합이 최소가 되게 표면을 형성하여 미관측 지점의 값을 예측하는 기법이다(Kim et al. 2014). 선택인자에는 곡률의 최소화를 위한 가중치와 셀의 계산과 지점간 거리 및 곡률에 영향을 주는 관측 지점의 수가 있다. 그러나 Spline의 경우 타 보간 방법에 비해 예측 정확도가 떨어진다는 한계가 있고(Kim et al. 2010), 고도 데이터와 같은 공간상 완만하게 변화하는 자료의 보간에 적합한 것으로 알려져 있다. 선행연구에서 시·공간적인 대기질 분석을 위해서는 IDW와 Kriging을 사용하여 실측값과 보간 값을 비교했을 때 IDW가 보다 정확하다는 연구결과를 확인하였으므로(Jha et al. 2011), 본 연구에서는 세 가지 기법 중 IDW 기법을 활용하였다.

이를 통해 예측된 미세먼지 농도 분포는 Figure 3

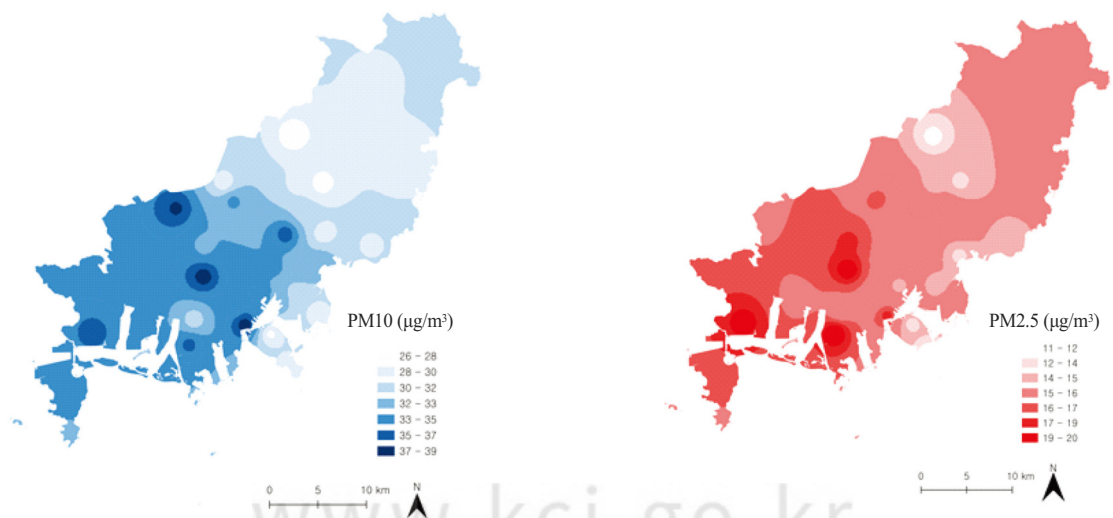


Figure 3. PM10 (left) and PM2.5 (right) concentration map in Busan (Unit: µg/m³)

과 같다. 부산광역시의 PM10 농도의 범위는 26µg/m³~39µg/m³이며, PM2.5의 농도 범위는 11µg/m³~20µg/m³로 나타났다. Figure 3의 지도에서 확인할 수 있듯 색이 짙을수록 농도가 높다는 것을 뜻한다. PM10과 PM2.5 모두 미세먼지 배출원으로 알려져 있는 공업단지가 많이 모여 있는 서·남쪽일수록 높게 나타났다. 반면 부산광역시 내 비교적 개발이 덜 된 기장군 지역과 큰 산이 위치해 있는 동·북쪽일수록 농도가 낮게 분포되어 있는 것을 확인할 수 있다. 이후 LCZ map의 공간해상도와 같은 100m×100m 공간 해상도의 그리드를 형성하고, QGIS의 공간통계 분석을 실시하여 LCZ 유형별 PM10, PM2.5 값을 구축하였다.

2) Fragstats를 활용한 LCZ유형 정량화

LCZ유형을 정량화하는 과정은 생태적인 의미와는 다르게 토지의 유형별 패치의 크기를 의미하기 때문에 Class 수준 메트릭을 활용한다. 이는 각 패치 유형의 양과 공간 구성을 개별적으로 정량화하므로, 경관에서 각 패치 유형의 범위와 단편화를 정량화할 수 있는 수단을 제공한다(McGarigal 2015). 본 연구는 Class 수준의 경관 메트릭 중 LCZ 유형별 크기를 백분율로 환산하여 정량화하는 PLAND (Percentage of Landscape)와 도시형태별로 가장 큰 패치를 도출하여 LCZ 유형의 영향을 보다 세밀하게 확인할 수 있는 LPI (Large Patch Index)를 활용하였다. 하지만 이는 해상도에 민감하다는 특성이 있어 해상도의 영향을 통제하고 각 유형의 패치 집계 수준을 평가할 수 있는 집계 지수 AI (Aggregation Index)를 함께 활용하였다.

PLAND는 class 수준 경관 지수의 가장 기본적인 척도이며, 구체적으로 경관의 어느 정도가 특정 패치 유형으로 구성되어 있는지가 나타난다.

$$PLAND = P_i = \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij}}{A} = (100)$$

P_i = 패치 유형(class) i 가 차지하는 경관의 비율
 a_{ij} = 패치 ij 의 면적(m²)
 A = 총 경관 영역(m²)

LPI는 PLAND와 유사하나 해당 유형의 가장 큰 패치의 면적을 총 경관 면적으로 나누어 100을 곱한 값이다. 즉, LPI는 가장 큰 패치로 구성된 경관을 백분율로 정량화한 것이다.

$$LPI = \frac{\max(a_{ij})}{A} \quad (100)$$

a_{ij} = 패치 ij 의 면적(m²)
 A = 총 경관 면적(m²)

AI는 단일 카운트 방법을 기반으로 패치의 최대 유사 인접 수에 관하여 관측된 비율을 백분율로 계산한 것이다. AI가 0일 경우 지정된 경관 유형의 모든 패치가 완전히 분산된 경우(Shi et al. 2019)를 뜻한다.

$$AI = \left[\sum_{i=1}^m \left(\frac{g_{ii}}{\max \rightarrow g_{ii}} \right) P_i \right] \quad (100)$$

g_{ii} = 단일 카운트 방식에 기초한 패치 유형 (Class) i 의 픽셀들 사이의 유사한 인접 수
 $\max \rightarrow g_{ii}$ = 단일 카운트 방법을 기반으로 패치 유형 (Class) i 의 픽셀 간의 최대 유사 인접 수
 P_i = 패치 유형(Class) i 로 구성된 경관의 비율

다음으로 PLAND, LPI, AI를 통해 정량화된 LCZ 유형을 공간보간법을 통해 형성된 PM10, PM2.5 농도 데이터와 결합하기 위해 Moving window 기능을 활용하였다. Moving window는 디지털 지도상에서 셀 단위로 이동하여 특정 구역 내의 메트릭을 계산한 후, 각각의 결과를 센터 셀로 변환하는 것이다 (McGarigal and Cushman 2002). 결과 메트릭 맵은 각 셀에 대한 경관 다양성 또는 토지 사용 유형의 백분율에 대한 정보를 제공하며 경관 패턴을 정량화하기 위한 필수 전제 조건이다(Gottschalk et al. 2008). Moving window 기능을 수행하기 위해서는 윈도우의 모양과 크기를 지정해야 하는데, 본 연구에서는 경관지수를 통해 LCZ 유형 정량화를 시도했던 선행연구(Shi et al. 2022)의 결과에 따라서 원형(R-buffer) 반경을 선택하였다. R-buffer 적용시 단일 유형에서의 영향 관계보다는 인접하고 있는 LCZ 유형과의 연계성을 포함하여 확인하기 위해, 건축물의 형태 및 배치, 간격, 오픈스페이스와 가로수 등의 도시건축 특성이 포함된 500m 반경을 기준으로 설정하였다

(Lee 2023). 이외의 반경 설정에 대해서는 선행연구 (Shi et al. 2022) 결과 중 미세먼지와외의 관계에서 가장 유의미한 값이 도출되었던 1,000m, 1,500m를 추가하여 총 500m, 1,000m, 1,500m의 3가지의 공간 스케일을 설정하였다.

3) 상관분석 및 선형회귀분석

Fragstats를 통해 정량화된 LCZ유형과 IDW를 통해 측정된 PM10, PM2.5 농도를 QGIS 프로그램을 활용하여 중첩하였다. 먼저 LCZ와 같은 공간해상도의 그리드를 생성한 후 두 데이터를 중첩하여 데이터를 구축하였다. 최종적으로 두 가지 연구질문을 해결하기 위해 (1)두 변수 사이의 상관관계를 확인하였고, (2)상관분석 결과 중에서 가장 유의미한 값들을 추출한 후 선형회귀분석을 통해 영향관계를 확인하였다.

IV. 연구결과

1. 부산광역시의 LCZ형태별 미세먼지 농도 차이

LCZ 17개 유형에 대해 Box plot을 작성하여 유형에 따른 농도 분포 패턴을 분석하였고, 그 결과 건축물 유형과 토지피복 유형 모두에서 유의미한 결과를 확인하였다. 먼저 건축물 유형에 대해 box plot을 작성한 결과, LCZ Compact area 1~3 도시형태와 LCZ

Open space 4~6의 도시형태를 비교해보았을 때, 건축물의 밀도가 낮은 Open space에서 미세먼지 농도가 낮은 것을 확인할 수 있다(Figure 4). 또한, 높이로 분류된 LCZ High-rise 1, 4 유형은 각 Compact area와 Open space의 영역에서 가장 높게 측정되었으며, LCZ Low rise 3, 6 유형은 Compact area와 Open space에서 가장 낮은 것을 확인하였다. 따라서 건축물의 높이와 밀도는 PM10 농도 분포에 유의미한 영향을 미친다는 점을 시사한다. 한편 토지피복유형의 경우, 녹지를 나타내는 LCZ A와 B에서의 PM10 농도가 타 피복보다 현저히 낮은 것을 알 수 있다.

LCZ 8은 대형 저층건물이 개방적으로 배치된 유형으로서 물류센터, 경공업 등이 해당할 것으로 예상된다. 이는 미세먼지의 발생원으로서 PM10, PM2.5 농도가 높게 측정된 것으로 사료된다. LCZ 9는 중소형 건축물이 개방적으로 배치되어 있는 자연 및 인공 나지가 그 예시이다. 부산광역시의 경우 나지에 따른 PM10과 PM2.5 농도 데이터가 다른 LCZ 도시형태에 비하여 적게 나타나, 현재 데이터만으로 관계를 규명하기에는 한계가 있을 것으로 판단되었다. 그리고 대체적으로 높게 나타난 D, E, F, G 중 LCZ F, G는 각각 모래와 수역을 나타내는데 측정 중 미세한 모래와 수증기의 입자가 미세먼지로 측정됐을 가능성이 있다. 그러나 부산광역시는 대표적인 항구도시로서,

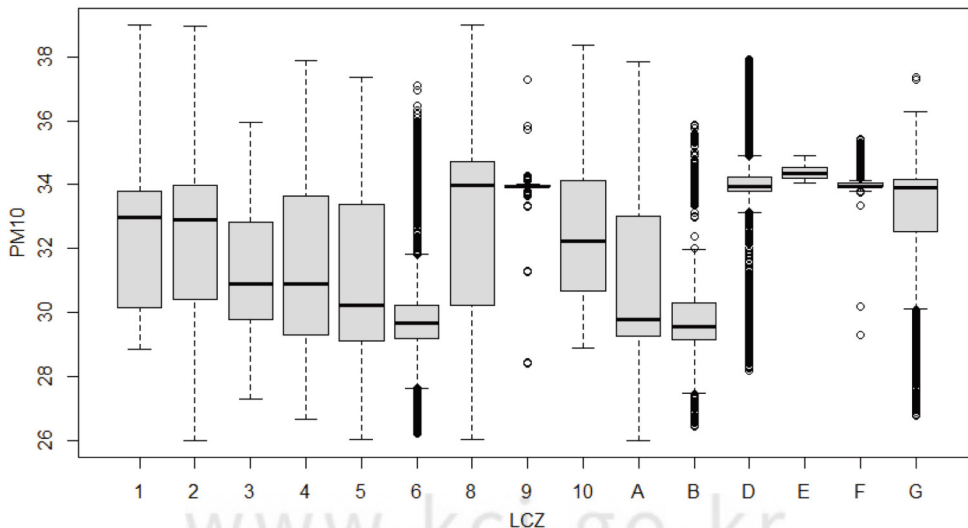


Figure 4. Box plot of PM10, LCZ (N= 78,729)

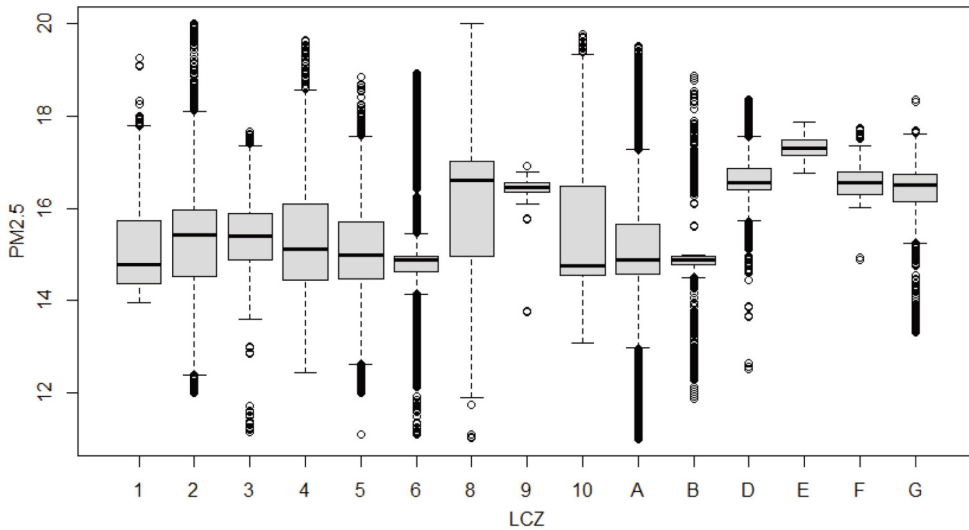


Figure 5. Box plot of PM2.5, LCZ (N= 78,729)

선박에서 배출되는 미세먼지가 많은 영향을 미치는 것으로 판단된다. 또한, LCZ 10, D, E 유형은 미세먼지 배출원으로 많이 알려진 공장과 도로의 유형이다. 본 연구의 배경과 질문에 따라 미세먼지 배출원을 제외한 건축물의 밀도와 높이, 녹지의 밀도와 높이가 미세먼지에 미치는 영향관계를 확인하기 위해 LCZ 1~6과 LCZ A, B 유형을 중심으로 해석하고자 한다.

다음으로 PM2.5의 농도 차이를 확인해 보았을 때 (Figure 5), LCZ Compact area 2, 3 유형의 농도가 LCZ 1~6 중에서 가장 높은 것으로 나타났으며, LCZ Open space의 유형에서는 High, Mid, Low-rise 순으로 높게 나타났다. 하지만 Compact와 High-rise에 속하는 LCZ 1 유형이 건축물 유형 중 가장 낮게 측정되었으며, PM10과 PM2.5 농도 분포에는 형태에 따라 차이가 존재하는 것으로 확인되었다. 이는 추후에 관련 연구가 필요할 것으로 사료된다. 토지피복 유형에서는 PM10과 마찬가지로 녹지의 존재와 나무의 높이에 따라 미세먼지 차이가 있음을 보여준다.

2. 부산광역시의 LCZ 형태와 미세먼지 농도와의 상관분석 및 회귀분석

본 절에서는 연구질문 1에 대해 분석하기 위해 Moving Window를 통해 형성된 R-buffer 500m, 1,000m, 1,500m별로 정량화된 LCZ유형의 PLAND,

LPI, AI 값과 PM10 및 PM2.5 농도를 대상으로 상관분석을 진행하였다. 상관분석 결과, 99%의 신뢰수준에서 유의한 변수들에 대한 R-buffer별 PLAND, LPI, AI 값을 Table 2, Table 3과 같이 정리하였고, 상관관계가 매우 작게 나타난 변수들은 제외하였다. 이 때 음의 상관계수를 가지는 관계는 괄호로 표시하였다.

먼저 PM10의 경우, 앞서 그래프에서 농도가 낮게 나타났던 LCZ Open space 4-6 유형과 LCZ 3 유형에서 음의 상관관계가 나타났다. 즉, 건축물의 밀도가 낮고 높이가 낮은 유형과 PM10 농도는 음의 상관관계가 있음을 알 수 있다. 또한 토지피복 유형 중 LCZ A 유형은 녹지의 밀도와 높이가 모두 높은 유형이고 LCZ B 유형은 녹지의 밀도는 낮으나 높이가 높은 유형인데, 이 두 유형과 PM10 농도는 음의 상관관계를 가지는 것을 확인하였다. 한편 이를 제외한 나머지 유형에서는 양의 관계를 확인할 수 있었는데, 특히 건축물의 밀도와 높이가 높은 유형과 녹지를 포함하지 않는 토지피복 유형은 양의 상관관계를 가진다. 다음으로 PM2.5의 경우, 건축물 유형에서의 차이는 명확히 확인할 수 없으나, 토지피복 유형에서 녹지의 밀도와 높이가 높은 유형에서 음의 상관관계가 나타나는 것을 확인할 수 있다.

다음으로 연구질문 2에 대해 분석하기 위해 상관분

Table 2. Summary of the most influential R-buffers with PM10 concentrations (Unit: m)

Type	Classification Functions		PLAND	LPI	AI
Built	LCZ 1	Compact High-rise	1500	1500	1500
	LCZ 2	Compact Mid-rise	1500	1500	500
	LCZ 3	Compact Low-rise	(1500)	(1500)	(1500)
	LCZ 4	Open High-rise	(1500)	(1500)	1500
	LCZ 5	Open Mid-rise	(1500)	(1500)	(1500)
	LCZ 6	Open Low-rise	(1500)	(1500)	(500)
	LCZ 7	Lightweight Low-rise	-	-	-
	LCZ 8	Large Low-rise	1500	1500	500
	LCZ 9	Sparsely Built	1500	1500	1500
	LCZ 10	Heavy Industry	1500	1500	1500
Land cover	LCZ A	Dense Trees	(1500)	(1500)	(1000)
	LCZ B	Scattered Trees	(1500)	(1500)	(1500)
	LCZ C	Bush, Scrub	-	-	-
	LCZ D	Low Plant	1500	1500	1000
	LCZ E	Bare Rock or Paved	1500	1500	1500
	LCZ F	Bare Soil or Sand	1500	1500	1500
	LCZ G	Water	1500	1500	1500

Table 3. Summary of the most influential R-buffers with PM2.5 concentrations (Unit: m)

Type	Classification Functions Description		PLAND	LPI	AI
Built	LCZ 1	Compact High-rise	(1500)	(1500)	(1000)
	LCZ 2	Compact Mid-rise	(500)	(1000)	(1500)
	LCZ 3	Compact Low-rise	(1500)	(1500)	(1500)
	LCZ 4	Open High-rise	(1500)	(1500)	1500
	LCZ 5	Open Mid-rise	(500)	(1500)	(1500)
	LCZ 6	Open Low-rise	(1500)	(1500)	(500)
	LCZ 7	Lightweight Low-rise	-	-	-
	LCZ 8	Large Low-rise	1500	1500	500
	LCZ 9	Sparsely Built	1500	1500	1500
	LCZ 10	Heavy Industry	(1000)	(1000)	1500
Land cover	LCZ A	Dense Trees	(1500)	(1500)	(1000)
	LCZ B	Scattered Trees	(1500)	(1500)	(1500)
	LCZ C	Bush, Scrub	-	-	-
	LCZ D	Low Plant	1500	1500	1500
	LCZ E	Bare Rock or Paved	1500	1500	1500
	LCZ F	Bare Soil or Sand	1500	1500	1500
	LCZ G	Water	1500	1500	1500

석 결과를 기반으로 선형회귀분석을 실시하였다. 먼저 독립변수들 간의 지나친 상관관계로 인해 회귀계수 추정에 영향을 미치는 다중공선성 문제를 제거하기 위해 VIF 값이 5를 초과하는 변수들은 모두 제외하

였으며 p-value 값이 99%에서 유의하지 않은 PM10 AI (LCZ5,1500m)와 PM2.5 LPI (LCZ5,1500m) 값은 해석에서 제외하였다. 건축물 유형일 경우, PM10에서는 LPI (LCZ5,1500m), AI (LCZ6,500m)이, PM2.5

Table 4. Results of regression analysis of PM10 and LCZ

Predictor Variables	Std Beta	t Ratio	p-value	VIF
LPI _{LCZ5,1500m}	-.055	-12.624	.000	1.877
AI _{LCZ5,1500m}	-.009	-1.853	.064	2.147
AI _{LCZ6,500m}	-.103	-30.706	.000	1.133
AI _{LCZ8,500m}	.092	25.411	.000	1.309
AI _{LCZ9,1500m}	-.046	-11.588	.000	1.610
AI _{LCZ10,1500m}	.123	35.694	.000	1.195
AI _{LCZA,1000m}	-.132	-28.087	.000	2.205
AI _{LCZB,1500m}	-.185	-53.300	.000	1.210
AI _{LCZD,1000m}	.070	15.535	.000	2.037
AI _{LCZE,1500m}	.045	13.669	.000	1.082
AI _{LCZF,1500m}	.171	45.868	.000	1.403
AI _{LCZG,1500m}	-.017	-4.374	.000	1.502
F		1809.768***		

Table 5. Results of regression analysis of PM2.5 and LCZ

Predictor Variables	Std Beta	t Ratio	p-value	VIF
PLAND _{LCZ5,500m}	-.109	-32.735	.000	1.103
LPI _{LCZ5,1500m}	.002	.367	.714	1.954
AI _{LCZ5,1500m}	-.079	-16.802	.000	2.172
AI _{LCZ6,500m}	-.068	-20.070	.000	1.146
AI _{LCZ8,500m}	.163	44.622	.000	1.328
AI _{LCZ9,1500m}	-.096	-23.689	.000	1.616
AI _{LCZ10,1500m}	.120	34.633	.000	1.196
AI _{LCZA,1000m}	-.059	-12.581	.000	2.210
AI _{LCZB,1500m}	-.112	-32.047	.000	1.218
AI _{LCZD,1500m}	.124	22.873	.000	2.935
AI _{LCZE,1500m}	.056	16.833	.000	1.085
AI _{LCZF,1500m}	.160	42.654	.000	1.403
AI _{LCZG,1500m}	-.016	-3.954	.000	1.573
F		1461.321***		

에서는 PLAND (LCZ5,500m), AI (LCZ5,1500m), AI (LCZ6,500m)이 유의미한 변수로 나타났으며 모두 음의 계수를 띠고 있었다. 마찬가지로 토지피복유형 LCZ A, B는 PM10, PM2.5 농도에서 모두 AI (LCZA, 1000m), AI(LCZB,1500m) 형태와 음의 계수를 가진다. 따라서 Open space 유형의 Mid, Low-rise 형태, 그리고 나무가 있는 형태를 취하고 있는 지역은 PM10와 PM2.5 농도 감소에 긍정적인 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 다음으로 LCZ 8, 10, D, E에서는 모두 양의 계수를 확인하였으므로 앞 절에서의 결과와 같

이, 공장, 도로, 농지의 증가는 모두 PM10 및 PM2.5 농도가 증가하는 결과를 초래하는 것을 알 수 있다. 또한, 토지피복유형의 LCZ A,B는 PM10과 PM2.5 농도 모두 AI 1,000m, 1,500m 반경에서 음의 영향이 있는 것으로 보아 LCZ A,B의 도시형태는 집산도의 영향 또한 크다는 것을 확인할 수 있었다. 반면, 본 연구에서 중점적으로 보고자 하였던 LCZ 1~6 유형 중 Compact area LCZ 1~3에서 대한 결과는 확인되지 않았으므로 건축물의 밀도와 높이가 높은 유형에 대한 직접적 해석을 제시하기에는 한계가 있다.

V. 결론

미세먼지는 인체에 심각한 피해를 끼치고 있는 대기오염물질 중 하나로서, 오늘날 환경문제에서 나아가 사회문제로 인식되는 상황에 놓이게 되었다. 이에 배출원 관리뿐만 아니라 도시를 구성하는 요소들을 고려한 효율적인 저감 대책을 마련할 필요가 있다. 따라서 본 연구는 LCZ 분류체계에 따른 형태와 PM10 및 PM2.5 농도 간의 관계에 대해 탐색적 분석을 실시하였다.

먼저, PLAND, LPI, AI 별 상관분석을 진행한 결과, PM10의 경우 LCZ Open space 4-6 유형과 LCZ 3 유형에서 음의 상관관계를 확인하였다. PM2.5의 경우 건축물 유형에서의 차이는 명확히 확인할 수 없으나, 토지피복유형에서는 나무가 존재하는 형태와 음의 상관관계가 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 이를 기반으로 회귀분석을 진행한 결과, Open space 유형의 Mid, Low-rise 형태와 밀집된 LCZ A, B 유형은 PM10과 PM2.5 농도 감소에 긍정적인 영향을 미치는 것을 알 수 있었다. 결과적으로, 개방된 공간에서의 중층, 저층의 건축물 유형과 나무로 밀집되어 있는 토지피복 유형은 PM10과 PM2.5 농도 감축에 있어서 효과적인 도시형태임을 알 수 있다.

따라서 본 연구를 통해 다음의 시사점을 제시할 수 있다. 먼저, 도시형태와 PM10 및 PM2.5 사이의 유의미한 관계를 확인함으로써 도시형태를 고려한 미세먼지 저감대책의 필요성을 확인하였다. 또한 도시계획수립 시 미세먼지 농도에 있어 건축물 높이와 녹지 크기의 가치를 고려하여 밀집된 녹지의 형태 즉, 산을 훼손하지 않는 선에서 개발이 이루어져야 한다. 건축물의 간격을 넓히고 높이는 낮추어야 하며, 나무가 충분히 식재된 녹지와 함께 개발한다면 미세먼지로 인한 피해를 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

한편 본 연구에는 다음의 한계점이 존재한다. 첫째, 데이터 구축의 한계로 인해 2021년 미세먼지 측정 데이터를 사용하였으나, LCZ map은 2022년 위성영상을 기준으로 구축되었으므로 두 데이터의 시간적 범위에 다소 차이가 있을 것으로 판단된다. 두 번째, 대기물질인 미세먼지의 특성상 많은 외부요인들로부

터 영향을 받을 것으로 예상되나, 다른 통제변수들은 고려하지 않고 도시형태와 미세먼지 간의 관계만 고려하였다. 마지막으로, 본 연구의 분석 단위는 500m에서 최대 1,500m의 buffer 형태로서 매우 작은 단위에서 진행되었다. 격자 내의 형태에 집중하다보니 도시 차원에서 거시적인 형태를 파악하지 않았고 도시 단위의 압축도시와 외연적 확산 형태에 관한 형태는 고찰하지 못했다. 따라서 추후 분석 스케일을 달리하여 도시 단위의 분석이 이루어져야 할 것으로 판단된다.

하지만 이러한 한계점에도 불구하고 본 연구는 기존의 토지피복도에 의존한 분석 방법론에서 벗어나, LCZ분류체계에 따른 명확한 도시형태를 기준으로 미세먼지 농도 차이를 확인하였음에 방법론적 의의가 있다. 이에 따라, 본 연구는 효율적인 공간계획에 기반한 미세먼지 저감 정책 수립을 위해 기초 자료로 활용될 것으로 기대된다.

사사

이 논문은 국토교통부의 스마트시티 혁신인재육성 사업과 환경부 「기후변화특성화대학원사업」의 지원으로 수행되었습니다.

References

- Air quality standard substances. 2023. AirKorea. Available from: https://www.airkorea.or.kr/web/airMatter?pMENU_NO=130
- Basic status. 2023. Busan. 2023. Available from: <https://www.busan.go.kr/index>
- Brousse O, Martilli A, Foley M, Mills G, Bechtel B. 2016. WUDAPT, an efficient land use producing data tool for mesoscale models? Integration of urban LCZ in WRF over Madrid. Urban Climate, 17: 116-134.
- Cho HL, Jeong JC. 2009. The distribution analysis of PM10 in Seoul using spatial interpolation

- methods. *Journal of Environmental Impact Assessment*, 18(1): 31-39. [Korean Literature]
- Demuzere M, Kittner J, Bechtel B. 2021. LCZ Generator: a web application to create Local Climate Zone maps. *Frontiers in Environmental Science*, 9: 637455.
- Ebi KL, McGregor G. 2008. Climate change, tropospheric ozone and particulate matter, and health impacts. *Environmental health perspectives*, 116(11): 1449-1455.
- Efforts to reduce fine dust. 2023. National Fine dust information Center. Available from: <https://www.air.go.kr/main.do>
- Fine dust (PM2.5) concentration. 2022. Kindicator. Available from: <https://www.index.go.kr/unify/idx-info.do?idxCd=4275>
- Gottschalk TK, Bertling M, Wolters V, Biermann J. 2008. A new MW algorithm to speed up landscape index calculation of high resolution maps. *Geoinformatics paves the highway to digital Earth*. Institut für Geoinformatik und Fernerkundung, University of Osnabruck, Osnabruck, pp. 29-32.
- Hankey S, Marshall JD. 2017. Urban form, air pollution, and health, *Current Environmental Health Reports*, 4: 491-503.
- Jeong HJ, Lee YJ, Lee SY, Han JY, Kim YW, Lee SJ. 2021. Association between farmers' perceived susceptibility to fine dust exposure and attitudes toward wearing masks and participating in respiratory disease prevention education. *Rural Medicine-Regional Health*, 46(2): 78-88. [Korean Literature]
- Jha DK, Sabesan M, Das A, Vinithkumar NV, Kirubakaran R. 2011. Evaluation of Interpolation Technique for Air Quality Parameters in Port Blair, India. *Universal Journal of Environmental Research & Technology*, 1(3).
- Kang JE, Choi HS, Hwang HS, Lee SH. 2018. Analysis of Ecological Network According to Invalidation of Decision on Urban Parks: Focused on Busan. *Journal of Environmental Impact Assessment*, 27(6): 618-634. [Korean Literature]
- Kang SJ. 2021. Analysis of correlation between urbanization type and fine dust: Cases of five metropolitan cities. *GRI Research Journal*, 23(3): 1-16. [Korean Literature]
- Kang SW, Moon HS, Park HM, Jeong JC. 2023. Applicability analysis of urban climate zones using land use/cover (LULC) data. *Journal of the Korean Geographic Information Society*, 26(1): 69-88. [Korean Literature]
- Kang YH, Kim ST, Yoo SH. 2020. Evaluation of the impact of ship emissions on ultrafine dust concentrations in the Busan area. *Proceedings of the Korean Society of Atmospheric Environment Conference*, pp. 68-68. [Korean Literature]
- Kang WM, Ko IS, Park CH, Lee DW. 2012. An Analysis of Changes in Forest Fragmentation and Morphology in Surrounding Landscapes of Maeulsoops and Jinan-gun. *Korean Journal of Environmental and Ecology*, 26(6): 941-951. [Korean Literature]
- Kwon SS, Choi SH. 2012. A Study of the Landscape Analysis at Su-ji/Gi-heung in Young-in city using the FRAGSTATS Model. *Journal of Environmental Impact Assessment*, 21(5): 781-787. [Korean Literature]
- Kim K, Eom JH. 2017. Local Climate Zone classification using WUDAPT Protocol - Seoul Metropolitan City as an example. *Journal of the Korean Society of Landscape Architecture*, 45(4): 131-142. [Korean Literature]
- Kim HJ, Jo WK. 2012. Assessment of PM-10 monitoring stations in Daegu using GIS interpolation. *Journal of Korean Society*

- for Geospatial Information Science, 20(2): 3-13. [Korean Literature]
- Kim JH, Choi JH, Kim CS. 2010. Comparative Evaluation of Interpolation Accuracy for CO₂ Emission using GIS. *Journal of Environmental Impact Assessment*, 19(6): 647-656. [Korean Literature]
- Kim YS, Sim KM, Jung MP, Choi IT. 2014. Accuracy comparison of air temperature estimation using spatial interpolation methods according to application of temperature lapse rate effect. *Journal of Climate Change Research*, 5(4): 323-329 [Korean Literature]
- Kim WS, Yoon DK. 2023. Examining the Impacts of Urban Compactness on Fine Particulate Matter Concentration in Korea. *Journal of Korea Planning Association*, 58(2): 116-130 [Korean Literature]
- Lee GW. 2023. Reconsideration of reduction calculation methods for fine dust reduction techniques at the urban and architectural planning stage – Focusing on the unit method. *KIEAE Journal*, 23(4): 13-22. [Korean Literature]
- Lee SB. 2007. Study on Landscape Ecological Methodology for Ecological Ridgeline Analysis. Korea Environment Institute. [Korean Literature]
- Lee IS, Yoon EJ. 2008. Analysis of Scale Sensitivity of Landscape Indices for the Assessment of Urban Green Areas. *Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture*, 36(2): 69-79. [Korean Literature]
- Lee TS, Song BG, Han CB, Park KH. 2011. Analysis of the GIS-based water cycle system for effective rainwater management of Gyeongsangnam-do. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies*, 14(2): 82-95 [Korean Literature]
- McGarigal K. 1995. FRAGSTATS: spatial pattern analysis program for quantifying landscape structure (Vol. 351). US Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station.
- McGarigal K. 2015. FRAGSTATS help. University of Massachusetts: Amherst, MA, USA, p. 182.
- McGarigal K, Cushman SA. 2005. The gradient concept of landscape structure. *Issues and perspectives in landscape ecology*. Cambridge University Press, Cambridge, 112-119.
- Mun HS, Li MI, Jung JC. 2022. Spatial-temporal characteristics and influencing factors of particulate matter: Geodetector approach. *Land*, 11(12): 2336. [Korean Literature]
- Mun HS, Song BG, Seo KH, Kim TH, Park KH. 2020. PM_{2.5} using GIS spatial interpolation. 5 Analysis of distribution characteristics – targeting urban areas in Changwon City. *Journal of the Korean Geographic Information Society*, 23(2): 1-20. [Korean Literature]
- Oh KS, Koo JH, Cho CJ. 2005. Impact of urban form components on regional air pollution: Seoul as a case study. *National Territorial Planning*, 40(3): 159-170. [Korean Literature]
- Shi Y, Ren C, Lau KKL, Ng E. 2019. Investigating the influence of urban land use and landscape pattern on PM_{2.5} spatial variation using mobile monitoring and WUDAPT. *Landscape and Urban Planning*, 189: 15-26.
- Stewart ID, Oke TR. 2012. Local climate zones for urban temperature studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(12): 1879-1900.
- Yuan C, Ng E, Norford LK. 2014. Improving air quality in high-density cities by understanding the relationship between air pollutant

- dispersion and urban morphologies. *Building and Environment*, 71: 245-258.
- Yang H, Leng Q, Xiao Y, Chen W. 2022. Investigating the impact of urban landscape composition and configuration on PM2.5 concentration under the LCZ scheme: A case study in Nanchang, China. *Sustainable Cities and Society*, 84: 104006.