

도시의 거리 협곡에서 건폐율과 외관비에 따른 미세먼지 농도의 미시적 분포 추정*

Estimating the Microscopic Distribution of PM₁₀ according to
Building Coverage Ratios and Aspect Ratios in Urban Street Canyons

김민순 Kim, Minsun**, 김형규 Kim, Hyungkyoo***

Abstract

Particulate matter (PM₁₀) that threatens human health has now become a social disaster. The urban form and physical characteristics are important factors that determine the dispersion of air pollutants. The aim of this paper is to explain the relationship building coverage ratios and the concentration of PM₁₀ in urban street canyons where the concentration of PM₁₀ is high. For this study, ENVI-met software was used after setting alternatives according to the change in the building coverage ratios and aspect ratio. Multiple regression analysis was performed with the concentration of PM₁₀ as a dependent variable, building coverage ratios as an independent variable, and wind direction, wind speed, and air temperature as control variables. As a result, it was found that the concentration of PM₁₀ increased as the building coverage ratios of the street canyons increased. This study suggests the change of the concentration of PM₁₀ according to the building coverage ratios in street canyons and suggests that building coverage ratios should be considered in urban design.

Keywords: PM₁₀, Building Coverage Ratio, Street Canyon, ENVI-met

I. 서론

1. 연구의 배경 및 목적

전 국민을 위협하는 미세먼지는 2019년 「재난 및 안전관리 기본법」 개정에 따라 사회재난이 되었다. 미세먼지를 장기간 흡입할 시 호흡기계와 심장, 뇌혈관 질환이 발생하고 심하면 사망까지 이르게 된다(명준

표 2016). 또한 사회는 미세먼지에 의해 생산활동에 제약받아 경제적 손실을 겪는다(민지원 2019). 세계보건기구는 2021년 9월 미세먼지와 초미세먼지를 가장 위험한 오염물질 중 하나로 정의하였고, 환경기준을 연평균 $15\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하로 결정하였다. 반면 우리나라 미세먼지 연간 대기환경 기준은 $50\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 세계보건기구 기준의 3배 이상의 느슨한 기준을 적용하고 있다. 정부는 미세먼지 저감을 위하여 관련 대책 마련과

* 이 논문은 2021년 국토교통부-국토교통과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2021-KA162410).

** 홍익대학교 도시계획과 석사과정(제1저자) | Master course, Department of Urban Design and Planning, Hongik University | Primary Author | comingsoon@mail.hongik.ac.kr

*** 홍익대학교 도시공학과 부교수(교신저자) | Associate professor, Department of Urban Design and Planning, Hongik University | Corresponding Author | gusailsang@gmail.com

법 제정 및 개선을 시도하고 있다. 2016년 「미세먼지 관리 특별대책」, 2017년 「미세먼지 관리 종합대책」, 2018년 「비상·상시 미세먼지 관리 강화대책」을 수립하였고, 「미세먼지 저감 및 관리에 관한 특별법」 등을 제정하고 「재난 및 안전관리 기본법」 등을 개정하였다. 2019년 국회예산정책처에서 발간한 「미세먼지 대응 사업 분석」에 따르면 정부는 미세먼지 대응 예산을 2016년부터 2019년까지 매년 20% 이상씩 증가시키는 등 많은 노력을 기울이고 있다(국회예산정책처 2019). 그러나 2019년 미세먼지 관리 전체 예산의 51.5%를 수송 부문에 할당하는 등, 관련 법안과 대책 마련을 배출원 관리에 집중하였다. 미세먼지 분포는 배출원의 분포와 반드시 일치하는 것은 아니므로 미세먼지의 분포 특성에 기초한 대책 수립이 필요하다(성선용 2020).

우리나라의 미세먼지와 도시공간 요소 간의 관계를 밝히는 연구의 필요성이 주장되는 가운데(오규식, 정희범 2007; 이연수, 손동욱 2015; 고동원, 박승훈 2019), 도시의 형태와 건물의 물리적 특징이 도시 내 대기오염 물질의 분산과 축적을 결정하는 중요한 요소임을 여러 연구를 통해 밝혔다(Edussuriya, Chan and Ye 2011; Li, Wang, Li and Peng et al. 2019). 도시의 대기 오염은 도시 형태와 바람 환경에 영향을 받으며(Yang, Shi, Shi and Marvin et al. 2020), 도시의 고밀도 건물은 환기를 차단하고 거리의 대기오염 물질 분산을 방해한다(Shi, Xie, Fung and Ng 2018). 밀집된 도시 공간의 미세먼지 농도 관리를 위해 도시 형태 요소와의 관계를 분석하고 미세먼지 관련 대책을 고려해 볼 수 있다.

도로상의 고농도 미세먼지 문제가 심각하다. 에어코리아 자료에 따르면 주요 간선도로에서 측정되는 도로변대기측정소의 2021년 연평균 미세먼지 농도 $41.57\mu\text{g}/\text{m}^3$ 가 서울특별시 연평균 도시대기측정소의 미세먼지 농도 $38.26\mu\text{g}/\text{m}^3$ 보다 높게 측정되었다. 도

로에서 측정된 미세먼지 농도는 서울 도시 곳곳에 설치된 도시대기측정소 값보다 크므로 도로 주변 보행자의 호흡기 건강을 위해 관리가 필요하다.

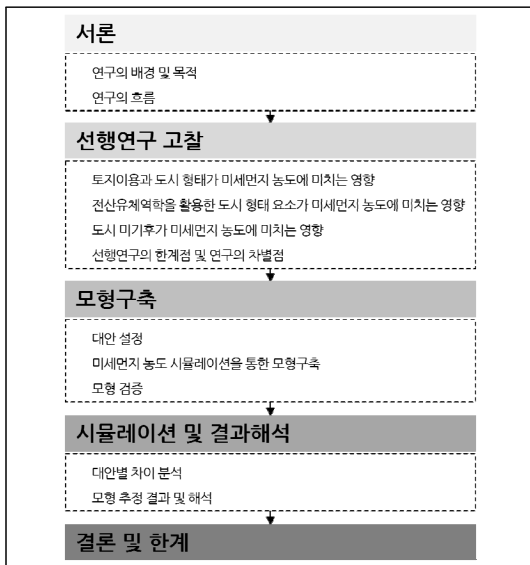
이에 본 연구에서는 교통량이 많고 개발밀도가 높은 도심에서 거리 협곡을 배경으로 건폐율과 미세먼지 농도 간의 관계를 규명하고자 한다. 미세먼지와 도시 형태를 나타내는 지표와의 관계 규명이 필요하며, 본 연구에서는 도시 형태를 나타내는 지표로 건폐율과 외관비를 활용한다. 건폐율은 우리나라 도시의 밀도, 경관, 오픈 스페이스의 지표로 다양한 도시 형태의 형성에 관여한다. 거리 협곡은 건물들이 거리 양옆에 줄이어 나타난 경관을 의미하며, 외관비와 같은 기하학적 지표로 표현할 수 있다. 외관비는 건물의 높이를 도로의 너비로 나눈 비율로 외관비에 따라 도시 협곡의 형태가 변화한다는 특징이 있다. 대다수의 건물이 용도지역·지구제에서 제시하는 최대 용적률을 채우고 있다. 이러한 실제의 환경을 반영하도록 용적률을 고정하고 건폐율과 그에 따른 외관비의 변화가 이루어져야 한다. 또한, 도시 형태에 의한 미세먼지의 축적을 막고 고농도의 미세먼지 영역으로부터 보행자를 보호할 필요성이 있다. 본 연구를 통해 도시의 물리적 변화에 의한 미세먼지 농도의 변화를 확인하고 그에 따른 도시 설계적 시사점을 제안하고자 한다.

2. 연구의 흐름

연구의 흐름은 <그림 1>과 같이 크게 5단계로 이루어진다. 첫째, 연구의 배경과 목적을 소개하고 연구의 흐름을 안내한다. 둘째, 선행연구 검토를 통해 연구 동향을 확인하고 한계점과 본 연구의 차별점을 파악한다. 셋째, 건폐율을 기반으로 하는 대안을 설정하고 미세먼지 농도 시뮬레이션을 통해 모형을 구축한다. 이후 구축된 모형의 데이터를 추출한다. 넷째, 추출한 테

이터를 일원 분산분석(One-way Analysis of Variance) 및 본페로니 사후검정(Bonferroni Correction)을 통해 대안별 차이를 확인한다. 미세먼지 농도를 종속변수, 건폐율을 독립변수, 풍향, 풍속, 기온을 통제 변수로 설정하여 변수 간의 인과관계를 확인한다. 다섯째, 실험 결과에 대한 결론, 시사점, 의의 및 한계를 제시한다.

그림 1_연구의 흐름도



II. 선행연구 고찰

최근 지형, 토지이용, 도시 형태, 인구, 교통 등 다양한 도시 요소가 미세먼지 농도 및 분산에 미치는 영향에 대한 연구가 진행되고 있다. 본 연구의 목적과 관련한 연구 동향을 살피고자 토지이용과 도시 형태 요소가 미세먼지 농도에 미치는 영향을 밝히는 연구, 전산유체역학을 활용한 도시 형태 요소가 미세먼지 농도에 미치는 영향을 확인하는 연구, 도시 미기후가 미세먼지 농도에 끼치는 영향을 규명하는 연구로 나누어 조사하였다. 이후 선행연구의 한계점과 본 연구의 차별점을 도출하였다.

1. 토지이용과 도시 형태가 미세먼지 농도에 미치는 영향

다중회귀분석인 토지이용 회귀모형(Land Use Regression Model, 이하 LUR 모형)은 오염물질 배출 정보 없이 도시의 매개변수를 활용하여 특정 지역의 대기오염물질 농도 예측이 가능하며, 아시아, 유럽, 북미에서 일반적으로 채택된다(Beelen, Hoek, Vienneau and Eeftens et al. 2013; Shi, Lau and Ng 2016). LUR 모형은 토지 이용 현황, 인구 현황, 교통 현황 등을 변수로 대기오염 물질 농도를 추정한다. Kim(2020)은 LUR 모형을 통해 토지이용이 서울시의 미세먼지와 초미세먼지 농도에 미치는 영향을 조사하였다. 주거지역은 미세먼지 농도에 부(-)의 영향을 보이고, 상업지역은 미세먼지 농도에 정(+)의 영향을 보였다. 최근 토지이용 현황과 더불어 도시 형태를 변수로 활용한 연구가 등장하고 있다. Gong, Hu, Liu and Bu et al.(2016)은 토지 이용 외에 에어로솔 광학두께(Aerosol Optical Depth)와 건물 높이, 건폐율, 용적률, 건물 형상 계수, 고층 건물 비율 등의 거리 협곡 요소와 연간 미세먼지 농도 간의 관계를 확인했고, 에어로솔 광학두께와 건물 높이, 건폐율, 용적률, 건물 형상 계수, 고층 건물 비율이 증가할수록 미세먼지 농도가 증가하는 LUR 모형을 추정하였다. Shi, Xie, Fung and Ng(2018)는 LUR 모형을 통해 초미세먼지와 용적률, 건폐율, 입면도, 건물 높이의 분산 정도 등 도시 형태 요소와의 관계를 살피고, 용적률, 건폐율, 입면도가 증가할수록 초미세먼지가 증가하고 건물 높이의 분산 정도가 증가할수록 초미세먼지가 감소하는 LUR 모형을 추정하였다. Zhou, Xiang, Zhang and Wang et al.(2021)은 중국의 전형적인 도시에서 교통 관련 오염물질과 도시 형태와의 관계를 조사했다. 미세먼지의 분포를 결정하는 주요 도시 형태 요소로 도로로부터의 거리, 건폐율, 거리 협곡의 외관비가 있으며, 도로로부터의 거리가 감소하

고, 건폐율과 거리 협곡의 외관비가 증가할수록 미세먼지 농도가 증가한다고 밝혔다. 그러나 Jia, Liu and Ng(2021)는 관측지점으로부터 버퍼를 사용하는 LUR 모형은 미시적 공간 분포를 관찰할 수 없고, 어느 요소가 미세먼지에 직접적 영향을 미치는지 확인할 수 없다는 점을 지적하였다.

2. 전산유체역학을 활용한 도시 형태 요소가 미세먼지 농도에 미치는 영향

도시 형태 또는 거리 형태의 영향에 따른 대기오염 물질 분산을 확인하는 대표적인 방법으로 풍동실험과 전산유체역학 시뮬레이션이 있다(Tominaga and Stathopoulos 2013; Qin, Lin, Lau and Song 2020). 풍동실험은 현장 관측보다 높은 해상도의 분석으로 기류 및 거리 협곡에 제어할 수 있는 경계 조건 설정이 가능하지만, 비교적 낮은 해상도와 높은 비용, 통제 불가능한 기상 조건 등 한계가 존재해 전산유체역학 시뮬레이션이 학계와 산업 환경에서 널리 사용되고 있다(Li, Liu, Leung and Lam 2006; Wang, Zhou, Zuo and Rameezdeen 2018). 전산유체역학 시뮬레이션은 효율적인 비용으로 거리 협곡 내 오염물질의 농도와 분산을 고해상도로 확인할 수 있으며, 다양한 실험 조건 설정으로 관련 변수에 대한 포괄적인 데이터를 제공하여 경제적이며 효과적으로 실험이 가능하다(Li, Liu, Leung and Lam 2006; Yazid, Sidik, Salim and Saqr 2014; Wang, Zhou, Zuo and Rameezdeen 2018). 그러나 일부 연구(Hofman, Bartholomeus, Janssen and Calders et al. 2016; 홍석환, 텐왕팅, 안로사 2020; 배웅규, 박진철 2022)에서 가로 형태를 일반화하여 진행하는 등 전산유체역학 시뮬레이션의 경우 복잡한 실제 도시 환경을 구현하는 데에 한계가 존재하고, 시뮬레이션에 입력되는 경계 조건 및 모형 설정과 같은 다양

한 매개변수에 따라 결과가 달라진다(Tominaga and Stathopoulos 2013; Blocken 2015). 따라서 전산유체역학 시뮬레이션 결과를 해석하고 활용할 때 시뮬레이션이 지닌 한계와 불확실성에 대해 주의가 필요하며 적절한 검증과 이해가 요구된다.

Chan, Au and So(2003)는 건물 배열과 거리 협곡의 유동장 간의 관계를 조사해 대기오염물질의 분산 특성을 밝혔다. 외관비가 클수록 대기오염물질의 이동 속도가 감소해 환기가 이루어지지 않음을 확인했다. Wania, Bruse, Blond and Weber(2012)는 외관비와 수목 밀도에 따른 미세먼지 농도 추정 시뮬레이션을 진행하였고, 거리 협곡의 외관비가 증가할수록 미세먼지 농도가 증가함을 관측했다.

3. 도시 미기후가 미세먼지 농도에 미치는 영향

도시의 미기후는 미세먼지 농도와 분포에 다양한 영향을 미친다. 도시의 바람과 관련하여 박성규, 이희관, 김신도(2005)는 풍동실험에서 풍향과 도로의 방향이 평행일 때 대기 오염물질의 농도가 높으며 확산이 이루어지지 않음을 확인했다. Peng, Gao, Buccolieri and Shen et al.(2021)은 주거지역에서 도로의 방향과 환기 정도와의 관계를 연구하였고, 환기를 개선하기 위해 도로와 평행하게 건물을 배치하지 않을 것을 시사하였다. Wang, Zhou, Zuo and Rameezdeen(2018)은 전산유체역학 시뮬레이션 거리 협곡의 높이비와 풍향이 미세먼지 농도 및 분산에 미치는 영향을 확인하였고, 거리 협곡이 끝나는 지점에서 바람 흐름이 끊겨 역풍이 불어 미세먼지 농도가 높게 관측됨을 발견했다. Li, Ma, Wang and Liu et al.(2017)은 중국 도시의 기상 매개변수와 미세먼지 농도와의 관계를 분석하였고, 2014년 봄의 기온과 양(+의 상관관계가 있음을 확인하였다. 최우철, 정규수(2021)는 대기오염물질에 영향

을 미치는 기상인자를 확인하였고, 2020년 봄철 미세먼지 농도는 풍속이 증가하면 감소하고, 기온이 증가하면 증가함을 밝혔다.

4. 선행연구의 한계점 및 연구의 차별점

공간 요소와 미세먼지와와의 관계를 파악한 국외의 연구에서 건폐율은 미세먼지 농도에 영향을 미치는 변수라 할 수 있다. 하지만 국내에서 건폐율을 활용하여 미세먼지 농도를 추정하는 연구는 부족하며, 선행연구의 LUR 모형은 건폐율의 직접적인 영향력을 확인하기 어렵다는 특징이 있다. 도출된 연구 결과를 실제의 도시 환경에 반영할 수 있도록 건폐율에 따른 외관비 변화와 용적률의 통제가 필요하다.

건폐율에 따라 도시의 형태가 다르게 나타나는바 건폐율과 미세먼지와의 관계를 밝히는 연구가 필요하며, 외관비를 고려한 건폐율을 변수로 대안을 마련하고 전산유체역학을 통해 미세먼지 농도에 미치는 건폐율의 직접적인 영향력을 확인해야 한다. 또한 전산유체역학 시뮬레이션에 입력되는 조건과 변수에 따라 결과가 다르게 나타났다. 미세먼지 농도는 다양한 상황과 조건에 따라 영향력이 다르게 나타나는 선행연구를 참고하여 국내의 기상 상황과 대기오염원을 바탕으로 하는 연구가 필요하다.

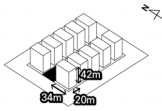
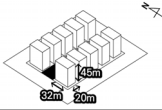
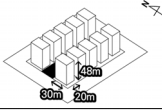
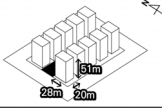
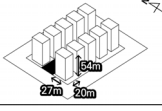
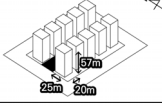
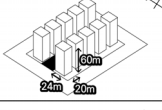
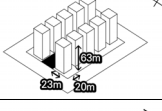
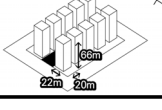
III. 모형 구축

1. 대안 설정

본 연구는 서울시의 조건과 거리 협곡을 배경으로 가상의 공간에서 대안을 마련하여 진행한다. 거리 협곡은 도로를 중심으로 건물이 연속적으로 나타나는 경관이며, 자동차와 같은 대기오염원이 지나고 환기가

어려워 대기 오염이 심각하다. 서울시의 일반상업지역은 유동 인구나 교통량이 많고, 최대 건폐율이 60%이고 최대 용적률이 800%로 고밀도의 도시경관이 나타나 본 연구의 대상으로 선정한다. 건폐율 변화에 따른 미세먼지 농도를 관찰하기 위해 용적률을 고정하고 건폐율을 변화시킨 9개의 대안을 <표 1>과 같이 마련하였다. 대안의 건폐율의 범위는 34~57%로, 일

표 1_대안 설정

구분	건폐율 (%)	건물 너비 (m)	건물 길이 (m)	건물 높이 (m)	외관비	도안
대안 1	57	20	34	42	1.24	
대안 2	53	20	32	45	1.32	
대안 3	50	20	30	48	1.41	
대안 4	47	20	28	51	1.50	
대안 5	44	20	27	54	1.59	
대안 6	42	20	25	57	1.68	
대안 7	40	20	24	60	1.76	
대안 8	36	20	23	63	1.85	
대안 9	34	20	22	66	1.94	

반상업지역 최대 건폐율 60%를 초과하지 않은 선에서 최대 건폐율을 설정하였고, 서울시 강남대로의 밀도와 경관을 기반으로 최소 건폐율을 34%로 제한하였다. 대안 1은 건폐율이 57%일 때 건물의 너비 20m, 건물의 깊이 34m, 건물의 높이 42m이다. 대안 2는 건폐율이 53%일 때 건물의 너비 20m, 건물의 깊이 32m, 건물의 높이 45m이다. 대안 9까지 건폐율을 감소하며 건물의 높이를 증가하는 방식으로 대안을 구성하였다. 모든 대안은 가로 30m, 세로 40m 크기의 필지 10개를 2열로 배열하고 그 사이에 길이 150m, 폭 30m의 도로를 배치하였다. 대상지 내 미세먼지의 분산을 확인하고자 필지와 도로를 둘러싼 30m의 주변 영역을 추가하여 총 가로 210m, 세로 170m 영역을 조성하였다. 모든 건물은 중앙 도로로부터 2m의 간격을 두어 정렬하고 건물 사이 간격을 10m로 고정하였다. 건폐율 변화에 따른 미세먼지 농도를 관찰하기 위해 용적률을 고정하며 대안의 건폐율과 건물 높이를 제외한 다른 변수를 통제하였다.

이때 대안 1의 경우 외관비는 1.24이고, 대안 2의 외관비는 1.32이다. 다른 변수가 통제된 상태에서 대안 9까지 건물의 높이가 변화하였기 때문에 건물의 높이가 높아질수록 대안의 외관비가 상승하였다.

2. 미세먼지 농도 시뮬레이션을 통한 모형 구축

가상 도시 공간의 오염원 배출 시뮬레이션을 진행하고자 ENVI-met v4.4.6 프로그램을 사용한다. ENVI-met은 사용자가 관측하고자 하는 공간을 구성하고 기상 변수를 설정하여 미기후를 관측하는 3차원 모델링 프로그램으로, 1998년에 독일의 마이클 부르스(Michael Bruse)에 의해 개발되었다. ENVI-met은 공간 정보에 기온, 풍향, 풍속 등의 기상 변수를 넣어 공간의 미기후를 확인할 수 있다. 특히 ENVI-met은 오염물질 분

산 모형을 사용하여 NO, NO₂, O₃ 및 미세먼지 등의 오염물질의 방출, 분산, 침전을 확인할 수 있으며 광화학 반응도 고려한다. 이는 ENVI-guide를 통해 배경 오염 농도의 조정과 교통 분석 도구 Traffic tools로 대기오염 배출원의 속성 설정이 가능하다.

ENVI-met의 오염물질의 분산 모형의 경우 정확도를 검증하기 위한 연구가 진행되고 있다. Paas and Schneider(2016) 연구에서 오염물질 분산 모형의 성능 비교를 위해 Austal2000과 ENVI-met에서 추정된 미세먼지 농도와 실제 관측한 미세먼지 농도와의 비교를 시도했고, Austal2000이 실측치에 더 가까운 것과 ENVI-met이 실제 관측값보다 낮게 추정하는 것을 밝혔다. ENVI-met은 복잡한 물리학의 이해가 없어도 사용자 친화적이라는 장점으로 최근 미세먼지를 대상으로 하는 연구에서 사용되고 있다(Deng, Ma, Zhang and Jia et al. 2019; Guo, Dai and Bi 2019; Jung and Yoon 2021; 백지원, 김수련, 강동균, 고아라 외 2022). 그러나 Paas and Schneider(2016) 연구에서 ENVI-met이 미세먼지 농도를 과소모의 추정할 것처럼, 시물레이션 결과 해석 시 전산유체역학 시물레이션이 지닌 한계점과 실험 조건의 통제에 대해 주의가 필요하다.

ENVI-met의 단계는 크게 모델링, 환경 설정, 시물레이션 구동 및 결과 산출 등 3단계로 이루어진다.

먼저 ENVI-met의 Spaces에서 앞서 설정한 9개의 대안의 모델링을 실시한다. 셀 단위가 미세하면 모형의 정확도가 향상되나 소요 시간이 증가한다. 원활한 시물레이션 구동을 위해 셀 단위를 가로 1m, 세로 1m, 높이 3m로 설정하였다. 가로 210m이고 세로는 170m이고 연직의 경우 15개의 레이어로 설정하였으며, 원활한 대류가 일어날 수 있도록 지상 6m 이후 8%의 배율로 상승하도록 천공의 높이를 조정하였다.

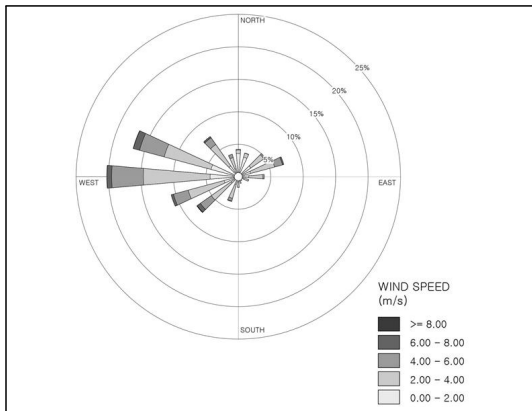
다음으로 시물레이션 구동에 필요한 환경을 설정한다. 크게 기상환경 설정, 배경 대기오염 농도 조건

표 2_기상환경 조건

변수	조건	자료
기온	Min. 2.51°C (at 07:00) Max. 10.45°C (at 15:00)	기상청 기상자료 개방포털 2010~2019년 데이터
습도	Min. 36.36% (at 15:00) Max. 66.13% (at 7:00)	
풍향	Default 270°(Main wind direction in March 2010~2019) ~ 0°	
풍속	2.79m/s	

설정, 선 오염원 배출 조건 설정으로 구성된다. <표 2>와 같이 기상환경을 설정하였다. 구체적으로 서울의 2010년부터 2019년의 월평균 미세먼지 농도를 조사하였고, 3월이 62.425 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 높은 월평균 농도를 기록하여 3월을 본 연구의 시간적 배경으로 선택하였다. 3월의 대표일로 춘분인 2019년의 3월 21일과 차량의 침두시간인 18시를 구체적 시간적 배경으로 설정한다. ENVI-met의 초기 기상환경을 구축하고자 종관기상관측소 서울(108) 지점의 10년간의 3월 자료를 활용하였다. 조사 결과, 일 중 최고 온도는 10.45°C이고 최저 온도는 2.51°C, 최고 습도는 66.13%, 최저 습도는 36.36%로 나타났다. 같은 자료에서 <그림 2>와 같이 바람장미(Wind rose)를 그려 주 풍향이 서풍임을 확인하였다.

그림 2_2010년~2019년 3월의 바람장미



자료: 기상청 기상자료개방포털 2010~2019년 데이터 (<https://data.kma.go.kr/data/grnd/selectAsosRltmList.do?pgmNo=36>, 2023년 6월 13일 검색).

본 연구에서 풍환경 변화에 따른 미세먼지 분포 양상을 관찰하기 위해 초기 풍향을 다양화하였다. 선행 연구를 바탕으로 거리 협곡과 평행한 서풍부터 거리 협곡과 수직인 북풍까지 각도를 22.5°씩 조정하여 서풍, 서북서풍, 북서풍, 북북서풍, 북풍 등 5가지 풍향을 선정하였다. 평균 풍속은 2.79m/s로 나타났고 이를 고도 10m의 유입풍속 값으로 설정하였다.

배경 대기오염 농도 조건은 서울특별시 대기환경정보에서 제공하는 2010년부터 2019년까지 3월 평균 대기오염 물질의 농도를 바탕으로 <표 3>과 같이 이산화질소 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 오존 22 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 아황산가스 6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 미세먼지 63 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 초미세먼지 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 설정하였다.

표 3_배경 대기오염 농도 조건

변수	대기오염 농도	자료
NO ₂	40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	서울특별시 대기환경정보 2010~2019년 데이터
Ozone	22 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	
SO ₂	6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	
PM ₁₀	63 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	
PM _{2.5}	35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	

ENVI-met의 경우 교통 분석도구함 (Traffic toolbox)에서 오염원 배출 조건을 설정할 수 있다. 도로 종류, 일간 통행량, 차선 수, 교통량 비중을 입력하면 주행거리당 오염원의 배출량이 자동으로 계산된다(Buccolieri, Gatto, Manisco and Ippolito et al. 2020; ENVI-met 2023). <표 4>의 선 오염원 배출 조건 설정 중 교통량은 서울특별시 교통정보 시스템(TOPIS)에서 제공하는 자료를 활용하였다. 2019년 서울 도심의 주중 유입 교통량은 22,548대, 유출 교통량은 21,087대로 각 교통량을 ENVI-met이 설정한 시간대별 교통량에 맞게 배분하였다. 차선 수는 도심이며 교통량이 많은 서울시 강남구 강남대로를 참고하여 8개의 차선을 배치하였다. 통행차종은 서울시 2019년 12월 자동차 등록 대수를

표 4_선 오염원 배출 조건

변수	조건		자료
도로 종류	Inner-Urban Road		-
일간 통행량(Veh/24h)	inflow	22,548	서울특별시 교통정보 시스템(TOPIS) 2019년 3월 교통이용 통계
	outflow	21,087	
차선 수	8		-
교통량 비중(%)	LDV (Light Duty Vehicles/Transporter)	3.2	서울시 2019년 12월 자동차등록 통계
	HDE (Heavy Duty Vehicles)	9.5	
	MC (Motocycles)	12.6	
	Urban Bus (Public Transport)	3	Default
	Coaches	1	
	PC (Passenger Cars)	70.7	

기반으로 Light Duty Vehicles는 승합차 3.2%, Heavy Duty Vehicles는 화물차 9.5%, Motocycles는 이륜차 12.6%로 설정하였다. 자동차 등록 대수에서 분류되지 않은 Urban Bus와 Coaches는 ENVI-met의 기본값을 따랐으며 Passenger Cars 승용차는 앞선 분류의 잔여 값을 사용하였다. 이때의 배출량 강도 설정은 ENVI-met 공식 웹사이트에서 제시한 방법을 이용하였고 18~19시의 차선당 미세먼지 배출량은 inflow의 경우 0.531 $\mu\text{g}/(\text{m}^*\text{s})$ 이고 outflow의 경우 0.497 $\mu\text{g}/(\text{m}^*\text{s})$ 으로 계산되었다.¹⁾

마지막으로 ENVI-met의 ENVI-core로 대안의 시물레이션을 진행하고 시물레이션 결과를 Leonardo로 데이터를 추출하였다. 추출한 데이터는 미세먼지 농도 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)와 풍속(m/s), 기온($^{\circ}\text{C}$)이고, 분석 영역은 건물 사이 가로의 지상 1.5m의 보행자 영역이며, 분석 시 대안별 보행자 영역의 평균값을 사용하였다.

3. 모형 검증

먼저 대안의 평균 및 표준편차를 기술한다. 이후 풍향을 고정한 뒤 풍향별 일원 분산분석을 진행하여 대안 간 차이 유무를 밝힌다. 분산분석 결과로 대안 간 차

이가 존재할 때 풍향별 9개 대안의 본페로니 사후검정을 실시한다. 본페로니 사후검정이란 일원 분산분석에서 발생할 수 있는 오류를 해결하고자 시행하는 사후검정으로, 대안 간에 차이가 어디서 발생하였는지 확인할 수 있다.

건폐율이 미세먼지에 미치는 영향을 확인하기 위해 다중회귀분석을 실시한다. 종속변수는 미세먼지 농도이고, 독립변수는 건폐율, 통제변수는 풍향과 풍속, 기온으로 설정하였다. 독립변수 및 통제변수의 상관성을 사전에 확인하고자 상관분석을 실시한다. 이후 종속변수인 대안의 미세먼지 평균 농도와 독립변수에 따른 9개의 건폐율과 통제변수 5개의 풍향에 대한 45개의 대안을 다중회귀분석한다. 추정된 회귀모형의 설명력을 확인하고, 선택된 변수의 유의수준을 검토하며, 다중공선성과 이분산성 검정을 통해 회귀모형의 적합성을 판정한다. 다중공선성은 분산팽창계수를 통해 확인할 수 있다. 독립변수와 통제변수 간의 다중공선성이 발생할 경우, 한 변수가 다른 변수에 영향을 미칠 수 있으므로 변수의 다중공선성이 의심될 시 회귀분석 과정 중 유의하지 않은 변수를 단계적으로 제거하는 단계선택법을 활용한다. 이분산성은 Breusch-pagan/Cook-weisberg 검정을 통해 확인할 수 있다. 오차항에

1) ENVI-met(<https://envi-met.info/doku.php?id=examples:airpollution>, 2023년 6월 13일 검색).

이분산성이 존재할 시 추정 계수의 표준오차 추정치가 올바르게 주어지지 않아 추정 계수에 대한 회귀모형 기본 가설에 대해 문제가 발생할 수 있다. 이때 로버스트 회귀분석으로 회귀모형의 이분산성 문제를 해결한다. 로버스트 회귀분석(Robust Regression)이란 최소자승법으로 추정하면서 왜곡이 발생하는 추정계수의 표준오차에 수정을 가하여 더욱 적절한 값을 갖도록 하는 방법이다. 다중회귀분석에 대한 검정 후 적합한 모형을 선택하여 선택된 변수와 회귀계수를 확인한다.

IV. 시뮬레이션 및 결과 해석

1. 대안별 차이 분석

<표 5>와 <표 6>에서 서풍일 때 대안 1의 평균 미세먼지 농도는 63.45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이고 대안 9의 평균 미세먼지

농도는 63.46 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이며, 이때 배경농도 63 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 대비 대안 1은 0.714%, 대안 9는 0.730% 상승했다. 건폐율이 높을 때 평균 미세먼지 농도가 높은 것으로 나타났으나, 일원 분산분석 결과 F 통계량이 1.93으로 대안 간 차이가 없는 것으로 확인되었다. 서북서풍일 때 대안 1의 평균 미세먼지 농도는 63.41 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이고 대안 9의 평균 미세먼지 농도는 63.40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이며, 이때 배경농도 대비 대안 1은 0.651%, 대안 9는 0.635% 상승했다. 건폐율이 증가할수록 평균 미세먼지 농도의 변화율이 크게 변화하지 않아 방향성을 확인할 수 없다. 이때의 일원 분산분석 결과 F 통계량이 2.21로 대안 간 차이가 존재함이 확인되었다. 북서풍일 때 대안 1의 평균 미세먼지 농도는 63.37 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이고 대안 9의 평균 미세먼지 농도는 63.33 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이며, 이때 배경농도 63 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 대비 대안 1은 0.587%, 대안 9는 0.524% 상승했다. 건폐율이 증가할수록 평균 미세먼지 농도가

표 5_대안의 일원 분산분석(ANOVA) 결과

(단위: $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

풍향	평균									F값 (p)
	대안 1 (건폐율 57%)	대안 2 (건폐율 53%)	대안 3 (건폐율 50%)	대안 4 (건폐율 47%)	대안 5 (건폐율 44%)	대안 6 (건폐율 42%)	대안 7 (건폐율 40%)	대안 8 (건폐율 36%)	대안 9 (건폐율 34%)	
서풍	63.45 (0.24)	63.45 (0.24)	63.45 (0.24)	63.45 (0.24)	63.45 (0.24)	63.45 (0.24)	63.46 (0.24)	63.46 (0.25)	63.46 (0.24)	1.93 (0.0515)
서북서풍	63.41 (0.23)	63.40 (0.22)	63.41 (0.23)	63.40 (0.23)	63.41 (0.23)	63.40 (0.23)	63.41 (0.23)	63.41 (0.23)	63.40 (0.23)	2.21* (0.0236)
북서풍	63.37 (0.90)	63.36 (0.90)	63.36 (0.90)	63.35 (0.90)	63.35 (0.90)	63.34 (0.90)	63.34 (0.90)	63.34 (0.90)	63.33 (0.90)	27.33*** (0.000)
북북서풍	63.34 (0.16)	63.33 (0.15)	63.33 (0.15)	63.32 (0.15)	63.32 (0.15)	63.31 (0.14)	63.31 (0.14)	63.32 (0.14)	63.30 (0.14)	35.73*** (0.000)
북풍	63.38 (0.16)	63.37 (0.16)	63.37 (0.16)	63.36 (0.16)	63.37 (0.16)	63.36 (0.16)	63.36 (0.16)	63.37 (0.16)	63.35 (0.16)	10.28*** (0.000)

주: 1) 괄호 안은 표준편차를 뜻함.

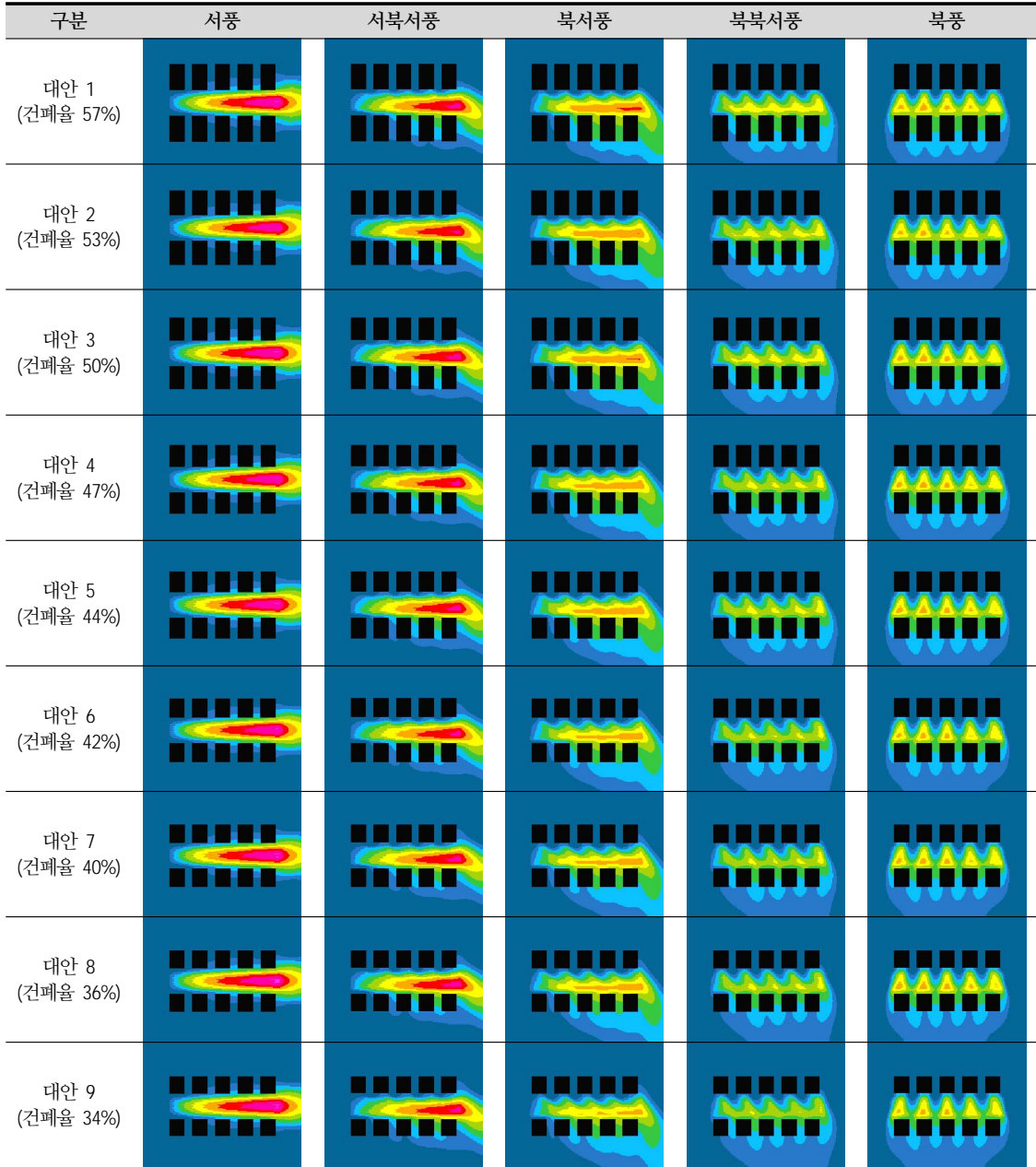
2) * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$.

표 6_배경농도 대비 대안의 농도 변화율

(단위: %)

구분	대안 1	대안 2	대안 3	대안 4	대안 5	대안 6	대안 7	대안 8	대안 9
서풍	0.714	0.714	0.714	0.714	0.714	0.714	0.730	0.730	0.730
서북서풍	0.651	0.635	0.651	0.635	0.651	0.635	0.651	0.651	0.635
북서풍	0.587	0.571	0.571	0.556	0.556	0.540	0.540	0.540	0.524
북북서풍	0.540	0.524	0.524	0.508	0.508	0.492	0.492	0.508	0.476
북풍	0.603	0.587	0.587	0.571	0.587	0.571	0.571	0.587	0.556

표 7_시뮬레이션 평면 결과



PM10 Concentration

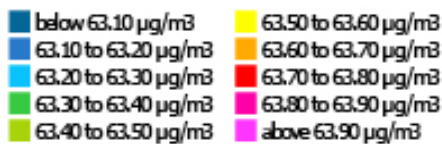
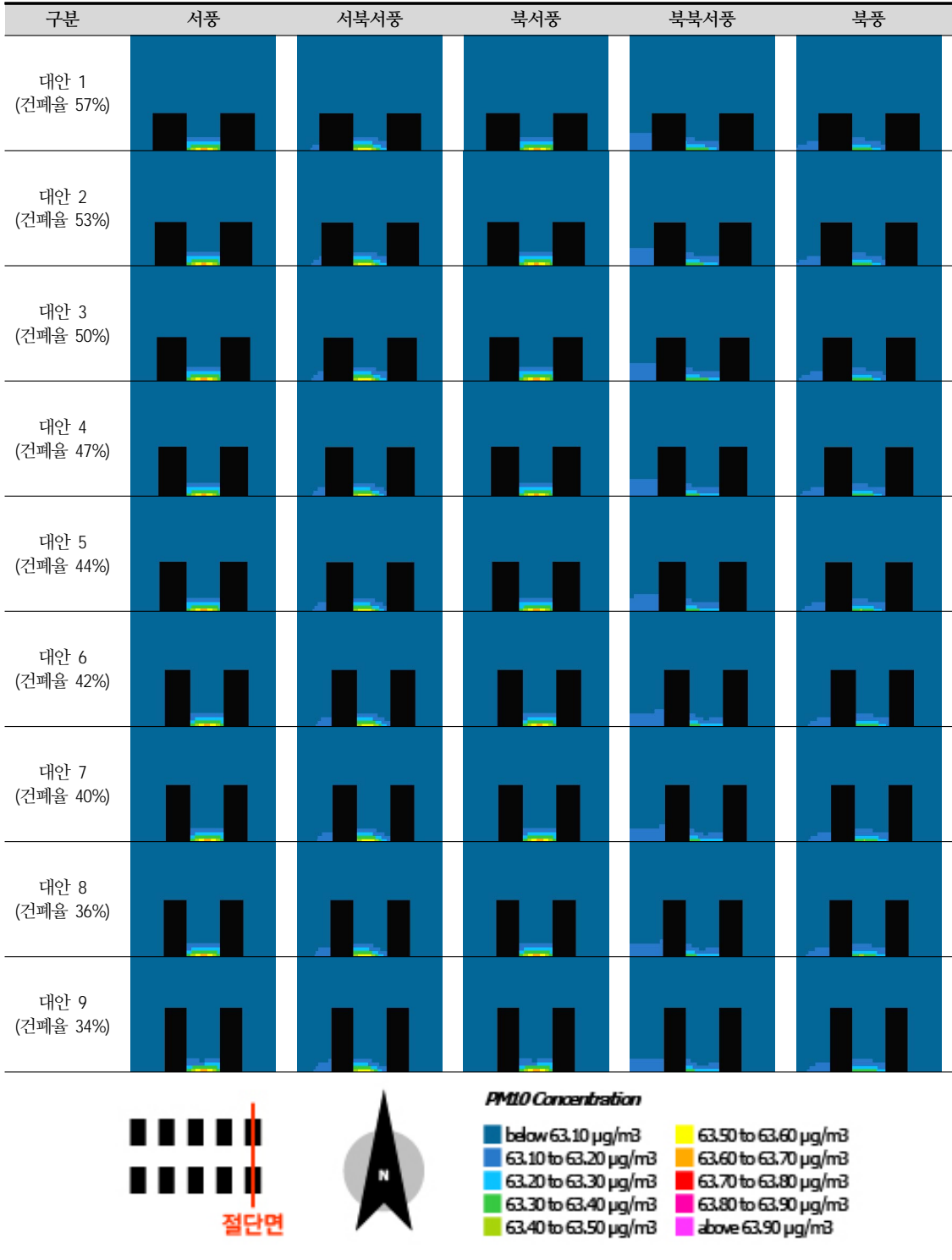


표 8_시뮬레이션 단면 결과



증가하였다. 이때의 일일 분산분석 결과 F 통계량이 27.33로 대안 간 차이가 존재하였다. 북북서풍일 때 대안 1의 평균 미세먼지 농도는 63.34 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이고 대안 9의 평균 미세먼지 농도는 63.30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이며, 이때 배경농도 63 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 대비 대안 1은 0.540%, 대안 9는 0.476% 상승했다. 건폐율이 증가할수록 평균 미세먼지 농도가 감소하였다. 이때의 일일 분산분석 결과 F 통계량이 35.73으로 대안 간 차이가 존재함을 확인하였다. 북풍일 때 대안 1의 평균 미세먼지 농도는 63.38 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이고, 대안 9의 평균 미세먼지 농도는 63.35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이며, 이때 배경농도 63 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 대비 대안 1은 0.603%, 대안 9는 0.556% 상승했다. 건폐율이 증가할수록 평균 미세먼지 농도가 증가하였다. 이때의 일일 분산분석 결과 F 통계량이 10.28로 대안 간 차이가 존재하였다.

<표 7>과 <표 8>에서 서풍, 서북서풍일 때 대안 간 미세먼지 분포의 변화가 나타나지 않았다. 반면 북

서풍, 북북서풍, 북풍일 때 건폐율이 감소할수록 고농도의 미세먼지 영역이 감소함을 확인하였다.

일일 분산분석에서 서북서풍일 때 대안 간의 차이가 있음이 확인되었지만 본페로니 사후검정에서 서풍과 서북서풍일 때 모든 대안이 유의수준 0.05 이상으로 대안의 차이가 발생하지 않음이 드러났다. <표 9>에서 북서풍일 때 대안 2 기준 대안 1과, 대안 5 기준 대안 1, 4와, 대안 6 기준 대안 1과, 대안 7 기준 대안 1, 2, 3, 5, 6과, 대안 8 기준 대안 1, 2, 3과, 대안 9 기준 대안 1, 2, 3, 4, 5, 6과 차이가 발생하였다. <표 10>에서 북북서풍일 때 대안 2 기준 대안 1과, 대안 3 기준 대안 1과, 대안 5 기준 대안 1, 4와, 대안 6 기준 대안 1, 4와, 대안 7 기준 대안 1, 2, 3, 4, 5, 6과, 대안 8 기준 대안 1, 2, 3, 4와, 대안 9 기준 대안 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8과 차이가 발생하였다. <표 11>에서 북풍일 때 대안 2 기준 대안 1과, 대안 5 기준 대안 1과, 대안

표 9_북서풍일 때 본페로니 사후검정 결과

구분	대안 1	대안 2	대안 3	대안 4	대안 5	대안 6	대안 7	대안 8
대안 2	0.0132*							
대안 3	0.0107	-0.0025						
대안 4	0.0094	-0.0038	-0.0013					
대안 5	0.0224***	0.0092	0.0117	0.0131*				
대안 6	0.0213***	0.0082	0.0107	0.0120	-0.0011			
대안 7	0.0358***	0.0226***	0.0251***	0.0265	0.0134*	0.0145**		
대안 8	0.0312***	0.0180***	0.0205***	0.0218	0.0088	0.0098	-0.0046	
대안 9	0.0452***	0.0320***	0.0345***	0.0359***	0.0228***	0.0239***	0.0094	0.0140*

주: * p<0.05, ** p<0.01, *** p<0.001.

표 10_북북서풍일 때 본페로니 사후검정 결과

구분	대안 1	대안 2	대안 3	대안 4	대안 5	대안 6	대안 7	대안 8
대안 2	0.0132***							
대안 3	0.0112**	-0.0021						
대안 4	0.0089	-0.0043	-0.0022					
대안 5	0.0205***	0.0072	0.0093	0.0115**				
대안 6	0.0185***	0.0053	0.0073	0.0096*	-0.0020			
대안 7	0.0309***	0.0177***	0.0198***	0.0220***	0.0104**	0.0124**		
대안 8	0.0265***	0.0132***	0.0153***	0.0175***	0.0060	0.0080	-0.0044	
대안 9	0.0404***	0.0272***	0.0292***	0.0315***	0.0199***	0.0219***	0.0095*	0.0139***

주: * p<0.05, ** p<0.01, *** p<0.001.

표 11_복풍일 때 본페로니 사후검정 결과

구분	대안 1	대안 2	대안 3	대안 4	대안 5	대안 6	대안 7	대안 8
대안 2	0.0140***							
대안 3	0.0087	-0.0052						
대안 4	0.0057	-0.0083	-0.0030					
대안 5	0.0156***	0.0016	0.0069	0.0099				
대안 6	0.0131**	-0.0009	0.0044	0.0074	-0.0025			
대안 7	0.0198***	0.0058	0.0111*	0.0141***	0.0042	0.0067		
대안 8	0.0144***	0.0004	0.0056	0.0087	-0.0012	0.0013	-0.0054	
대안 9	0.0240***	0.0100	0.0152***	0.0182***	0.0083	0.0109*	0.0042	0.0096

주: * p<0.05, ** p<0.01, *** p<0.001.

6 기준 대안 1과, 대안 7 기준 대안 1, 3, 4와, 대안 8 기준 대안 1과, 대안 9 기준 대안 1, 3, 4, 6과 차이가 발생하였다. 본 연구에서 밝혀낸 <표 5>와 <표 6>의 농도 차이값의 크기가 작게 보이더라도 본페로니 사후 검정을 통한 통계적 검정 결과, 차이가 유의한 것으로 확인되며 Rui, Buccolieri, Gao and Gatto et al.(2019) 연구와 백지원, 김수련, 강동균, 고아라 외(2022) 연구 등 타 연구와 농도 차이 값의 크기 비교 시 실험 조건이 상이하기 때문으로 추정된다.

표 12_독립변수 및 통제변수 간 상관관계 결과

구분	건폐율	풍향	풍속	기온
건폐율	1.0000			
풍향	0.0000	1.0000		
풍속	-0.048***	-0.561***	1.0000	
기온	0.260***	-0.398***	0.336***	1.0000

주: * p<0.05, ** p<0.01, *** p<0.001.

<표 12>의 독립변수와 통제변수의 상관관계에서 건폐율과 풍향, 건폐율과 풍속, 건폐율과 기온은 상관 관계가 약함이 밝혀졌다. 풍향과 풍속은 강한 음(-)의 상관관계가 존재하고, 풍향과 기온은 음(-)의 상관관계를 가지고, 풍속과 기온은 양(+)의 약한 상관관계가 존재하였다.

2. 모형 추정 결과 및 해석

<표 13>과 같이 미세먼지 농도와 건폐율, 풍향, 기온, 풍속의 다중회귀분석 결과, 추정된 다중회귀모형 1의 조정된 결정계수는 0.9613이고, 사용된 독립변수와 통제변수 모두 유의하였다. 건폐율의 표준화 계수는 -0.1213이고, 풍향의 표준화 계수는 -1.9669, 기온의 표준화 계수는 0.3583, 풍속의 표준화 계수는 -1.3485

표 13_다중회귀분석 결과

변수	다중회귀모형 1					다중회귀모형 2					로버스트 회귀모형				
	B	S.E.	β	P> t	VIF	B	S.E.	β	P> t	VIF	B	S.E.	β	P> t	VIF
건폐율	-0.0834	0.0336	-0.1213	0.0170	2.71	0.1390	0.0399	0.2022	0.0010	1.28	0.1390	0.0384	0.2022	0.0010	1.28
풍향	-0.2378	0.0130	-1.9669	0.0000	13.24	-0.1267	0.0080	-1.0475	0.0000	1.65	-0.1267	0.0062	-1.0475	0.0000	1.65
기온	0.1937	0.0405	0.3583	0.0000	6.4	-0.1149	0.0386	-0.2125	0.0050	1.93	-0.1149	0.0337	-0.2125	0.0050	1.93
풍속	-0.1109	0.0122	-1.3485	0.0000	24.92										
상수	61.9427	0.3477		0.0000		64.4831	0.3600		0.0000		64.4831	0.3162		0.0000	
Observations	45					45					45				
Prob > F	0.0000					0.0000					0.0000				
R-squared	0.9648					0.8919					0.8919				
Adj R-squared	0.9613					0.8840					0.8840				
Root MSE	0.0091					0.0158					0.0158				

로 나타났다. 그러나 풍속과 풍향의 다중공선성이 의심되어 변수의 제거가 필요하였다. 풍속 변수를 제거하여 실시한 다중회귀분석 결과, 다중회귀모형 2의 조정된 결정계수는 0.8840이고 사용된 건폐율과 풍향, 기온 변수 모두 유의한 매개변수로 나타났다. 건폐율의 표준화 계수는 0.2022, 풍향의 표준화 계수는 -1.0475, 기온의 표준화 계수는 -0.2125로 나타났으며, 다중회귀모형 1과는 달리 건폐율의 부호는 음(-)에서 양(+)으로, 기온 변수의 부호는 양(+)에서 음(-)으로 변화했다. 독립변수와 통제변수 모두 분산팽창계수가 2를 넘지 않아 상호 간의 공선성이 없다고 판단하였다. 그러나 Breusch-Pagan / Cook-Weisberg 검정에서 이분산성 확인 결과, 유의수준이 0.0175로 등분산이라는 귀무가설을 신뢰수준 0.05 하에서 기각하여 오차항이 이분산성임을 확인하였다. 이후 로버스트 회귀분석을 실시하였고, 모형의 결정계수는 0.8919이고 매개변수의 부호와 계수, VIF 값은 같으나 표준편차가 건폐율은 0.0399에서 0.0384로 풍향은 0.0080에서 0.0062로 기온은 0.0386에서 0.0337로 변경되었다.

로버스트 회귀분석을 실시하였을 때 건폐율이 증가하면 미세먼지 농도는 증가한다. 이때의 표준화 계수는 0.2022이다. 이는 건폐율이 증가할수록 미세먼지를 비롯한 대기 오염물질 농도가 증가한다는 Gong, Hu, Liu and Bu et al.(2016), Shi, Xie, Fung and Ng(2018), Zhou, Xiang, Zhang and Wang et al.(2021)의 선행연구를 따른다. 이 결과는 건폐율이 증가할수록 지면에서 건물이 차지하는 공간이 늘어나 환기 영역이 줄어드는 것을 나타낸다. 또한 건폐율이 감소할수록 대기 순환 영역 증가와 건물 높이의 상승에 의한 협곡 내 풍속 증가로 오염물질의 분산이 활발해지며 이는 미세먼지의 농도가 감소하는 결과를 보였다.

이외에도 풍향이 거리 협곡의 방향과 일치하지 않을수록 미세먼지 농도가 낮게 나타나며, 이때의 표준

화 계수는 -1.0475이다. 거리 협곡의 방향이 풍향과 일치할 때 대기 오염물질 농도가 높게 나타남을 확인한 박성규, 이희관, 김신도(2005), Peng, Gao, Buccolieri and Shen et al.(2021) 연구의 결과를 따른다. 그러나 본 연구 결과는 바람길 확보 및 풍향과 도로를 나란히 건설하도록 하는 가이드라인을 제시한 박중순, 박태선, 김은란, 이상은 외(2019) 연구와 Voordeckers, Lauriks, Denys and Billen et al.(2021) 연구와는 다른 결과를 보였다. 실험 영역이 본 연구와 유사한 연구에서는 오염물질의 분산도 유사한 양상으로 나타났다(Guo, Dai and Bi 2019; Miao, Chen and Yu 2022). 이는 본 연구가 실제 도시 환경과는 달리 단순하며 차량의 이동이 연속되고 고립된 미시적인 실험 조건에서 나타난 결과로 판단된다.

기온이 증가하면 미세먼지 농도는 낮게 나타난다. 이때의 표준화 계수는 -0.2125이다. 그러나 기온의 경우 기온과 미세먼지 농도의 양(+)의 상관관계를 보였던 Li, Ma, Wang and Liu et al.(2017)과 최우철, 정규수(2021)가 진행한 선행연구의 결과를 따르지 않았다.

V. 결론 및 한계

본 연구는 거리 협곡에서 미세먼지의 농도에 미치는 건폐율의 영향력을 확인하기 위해 건폐율과 외관비 변화에 따라 9가지 대안을 마련하고 풍향과 기온을 통제하여 분석하였다. 2010~2019년 10년간의 기상 데이터 및 대기오염물질 데이터를 활용하고, 3차원 모델링 프로그램인 ENVI-met을 통해 시뮬레이션을 진행하였으며 출력된 미세먼지 농도 데이터 및 미기후 데이터를 비교 및 분석하였다. 주요 분석 결과는 다음과 같다.

거리 협곡의 전체적인 건폐율이 증가할수록 미세먼지 농도가 증가하고, 주 풍향과 거리 협곡의 방향이

일치할수록 미세먼지 농도가 증가하며, 기온이 높아 질수록 미세먼지 농도는 감소하는 결과를 보인다.

건폐율이 증가할수록 건물의 높이가 낮아지고 표면의 밀도가 증가하며, 대기가 고립되고 기류가 정체 될 가능성이 있다. 이는 미세먼지가 발생하는 도심의 거리 협곡에서 건폐율을 고려하는 도시설계가 필요함을 시사한다. 시사업점을 위한 구체적 제안은 다음과 같다. 교통량이 많고 밀도 있는 건조 환경에서 건폐율을 낮춰 환기를 도모해야 한다. 건물이 최대 용적률로 지어질 때, 환기 성능 증대를 위해 건폐율을 낮추거나 보행자 영역의 대기 순환 면적을 늘리는 등의 설계가 필요하다.

본 연구에서 주 풍향이 거리 협곡의 방향과 일치할 때, 미세먼지 입자가 바람이 불어 나가는 쪽으로 축적 되어 거리 협곡 미세먼지의 평균 농도는 상승하였다. 반면 거리 협곡의 방향과 주 풍향이 일치하지 않을 때 건물 사이로 새로운 대기가 유입되어 미세먼지의 분산이 일어나 미세먼지 농도가 감소하였다. 그러나 본 실험 조건이 실제 환경과는 달리 단일적이고 미시적이기 때문에 향후 연구에서 정확도를 높일 필요가 있다.

본 연구는 가상의 상황을 구현하여 미세먼지와 도시 형태 간의 관계를 규명하였음에도 불구하고, 실제의 도시 형태를 구현하지 못해 선행연구 결과와 차이가 존재한다. 시뮬레이션을 위해 풍속 등의 기상 변수와 건물 정렬 및 건물 사이 간격 고정 등의 통제와 많아 복잡한 현실과 거리가 있다는 점도 한계다. 마지막으로, 전 계절적 양상을 확인하기 위해 다양한 기간의 추가적인 연구가 필요하다. 본 연구는 주로 토지이용에 의해 규명되었던 미세먼지 농도와 도시 형태 요소인 건폐율과 외관비 간의 관계를 규명하였다는 점에서 의의가 있다.

참고문헌

- 고동원, 박승훈. 2019. 근린환경이 서울시 대기오염물질에 미치는 영향에 관한 연구. 한국지역개발학회지 31권, 1호: 123-140.
Ko Dongwon and Park Seunghoon. 2019. A Study on the Influences of Neighborhood Built Environment on Air Pollutants in Seoul. *JKRDA* 31, no.1: 123-140.
- 국회예산정책처. 2019. 미세먼지 대응 사업 분석. 서울: 국회예산정책처.
National Assembly Budget Office (NABO). 2019. *Business Analysis on Particulate Matter Responding Program*. Seoul: National Assembly Budget Office (NABO).
- 기상청 기상자료개방포털. <https://data.kma.go.kr/data/grnd/selectAsosRltmList.do?pgmNo=36> (2023년 6월 13일 검색). Korea Meteorological Administration Open MET Data Portal. <https://data.kma.go.kr/data/grnd/selectAsosRltmList.do?pgmNo=36> (accessed June 13, 2023).
- 명준표. 2016. 미세먼지와 건강 장애. 대한내과학회지 91권, 2호: 106-113.
Myong Junpyo. 2016. Health effects of particulate matter. *Korean J Med* 91, no.2: 106-113.
- 민지원. 2019. 미세먼지에 대한 국민 인식 조사 - 미세먼지로 인한 경제적 비용 연간 4조 원으로 추정. 한국경제주평 833권: 1-16.
Min Jiwon. 2019. National Awareness Survey on Particulate Matters. *Weekly Economic Review* 833: 1-16.
- 박성규, 이희관, 김신도. 2005. 풍동실험을 이용한 도시거리 협곡에서의 대기오염확산모델의 개발. 대한환경공학회지 27권, 8호: 850-856.
Park Seongkyu, Lee Heekwan and Kim Shindo. 2005. Development of Empirical Model for the Air Pollutant Dispersion in Urban Street Canyons Using Wind Tunnel Test. *J Korean Soc Environ Eng* 27, no.8: 850-856.
- 박종순, 박태선, 김은란, 이상은, 안승만, 이정찬, 성선용 외. 2019. 미세먼지 저감을 위한 국토·환경계획 연계 방안 연구: 바람길 적용을 중심으로. 세종: 국토연구원.
Park Jongsoon, Park Taesun, Kim Eunran, Lee Sangeun, Ahn Seungman, Lee Jungchan and Sung Sunyong et al. 2019. A Study on Integration of Spatial and Environmental Planning to Mitigate Particulate Matter: Focusing on Ventilation Corridors. Sejong: Korea Research Institute for Human

Settlements.

8. 배웅규, 박진철. 2022. CFD 시뮬레이션을 통한 저층주거지 도시재생뉴딜사업 마중물사업의 시행에 따른 온도 및 미세먼지(pm2.5) 감소효과 분석 연구. 한국산학기술학회논문지 23권 1호: 67-83.
Bae Woongkyoo and Park Jincheol. 2022. A Study on the Effect of Temperature and Fine Dust (PM2.5) on the Implementation of the Urban Regeneration New Deal Project in Low-rise Residential Areas through CFD Simulation. *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society* 23, no.1: 67-83.
9. 백지원, 김수련, 강동균, 고아라, 아이다 아야노, 최재연, 박찬. 2022. 주택재개발사업지의 층수변화 시나리오별 미기후 영향 예측 : 기온, 미세먼지, 초미세먼지를 중심으로. 국토계획 57권, 6호: 124-137.
Baek Jiwon, Kim Suryeon, Kang Dongkyun, Ko Ahra, Aida Ayano, Choi Jaeyeon, Park Chan. 2022. Prediction of Microclimate Impact by Floor Height Change Scenarios in Housing Renewal Site : Focusing on the Temperature, Particulate Matter (PM10), Fine Particulate Matter (PM2.5). *Journal of Korea Planning Association* 57, no.6: 124-137.
10. 서울 열린데이터 광장. <https://data.seoul.go.kr/dataList/255/S/2/datasetView.do> (2023년 6월 13일 검색).
Seoul open data. <https://data.seoul.go.kr/dataList/255/S/2/datasetView.do> (accessed June 13, 2023).
11. 서울시 교통정보 시스템. <https://topis.seoul.go.kr/> (2023년 6월 13일 검색).
TOPIS. <https://topis.seoul.go.kr/> (accessed June 13, 2023).
12. 서울특별시 대기환경정보. <https://cleanair.seoul.go.kr/?area=111142&type=pm10> (2023년 6월 13일 검색).
Seoul Clean Air Pollution Information. <https://cleanair.seoul.go.kr/?area=111142&type=pm10> (accessed June 13, 2023).
13. 성선용. 2020. 미세먼지 농도의 공간적 현황 및 잠재영향인자를 고려한 환경계획적 대응 방향. 한국환경복원기술학회지 23권, 1호: 89-96.
Sung Sunyong. 2020. Environmental Planning Countermeasures Considering Spatial Distribution and Potential Factors of Particulate Matters Concentration. *Journal of the Korea Society of Environmental Restoration Technology* 23, no.1: 89-96.
14. 에어코리아. <https://www.airkorea.or.kr/web/> (2023년 6월 13일 검색).
AIR KOREA. <https://www.airkorea.or.kr/web/> (accessed June 13, 2023).
15. 오규식, 정희범. 2007. 도시의 개발밀도 변화가 대기오염에 미치는 영향. 국토계획 42권, 5호: 197-210.
Oh Kyushik and Chung Heebum. 2007. The Influence of Urban Development Density on Air Pollution. *Journal of Korea Planning Association* 42, no.5: 197-210.
16. 이연수, 손동욱. 2015. 도시의 물리적 환경특성과 서울시 대기오염과의 연관성 분석. 도시설계 16권, 3호: 5-19.
Lee Younsoo and Sohn Donwook. 2015. An Analysis of the Relationships between the Characteristics of Urban Physical Environment and Air Pollution in Seoul. *Urban Design* 16, no.3: 5-19.
17. 최우철, 정규수. 2021. 코로나19 전후 미세먼지 농도에 영향을 미치는 요인 비교분석. 한국방재학회논문집 21권, 6호: 395-402.
Choi Woochul and Cheong Kyusoo. 2021. Analysis of the Factors Affecting Fine Dust Concentration Before and After COVID-19. *Journal of The Korean Society of Hazard Mitigation* 21, no.6: 395-402.
18. 홍석환, 텐완팅, 안로사. 2020. 가로녹지 및 건물 높이가 미세먼지 농도에 미치는 영향. 한국환경생태학회지 34권, 5호: 466-482.
Hong Sukhwan, Tian Wanting and Ahn Rosa. 2020. The Effect of the Green Space in Roadside and Building Height on the Mitigation of Concentration of Particulate Matters. *Korean Journal of Environment and Ecology* 34, no.5: 466-482.
19. Beelen, R., Hoek, G., Vienneau, D., Eeftens, M., Dimakopoulou, K., Pedeli, X., and Tsai, M. et al. 2013. Development of NO2 and NOx land use regression models for estimating air pollution exposure in 36 study areas in europe—the ESCAPE project. *Atmospheric Environment* 72: 10-23.
20. Blocken, B. 2015. Computational fluid dynamics for urban physics: Importance, scales, possibilities, limitations and ten tips and tricks towards accurate and reliable simulations. *Building and Environment* 91: 219-245.
21. Buccolieri, R., Gatto, E., Manisco, M., Ippolito, F., Santiago, J. L. and Gao, Z. 2020. Characterization of Urban Greening in a District of Lecce (Southern Italy) for the Analysis of CO2 Storage and Air Pollutant Dispersion. *Atmosphere* 11, no.9: 967.
22. Chan, A. T., Au, W. and So, P. 2003. Strategic guidelines for street canyon geometry to achieve sustainable street air quality—part II: Multiple canopies and canyons. *Atmospheric Environment* 37, no.20: 2761-2772.

23. Deng, S., Ma, J., Zhang, L., Jia, Z., and Ma, L. 2019. Microclimate simulation and model optimization of the effect of roadway green space on atmospheric particulate matter. *Environmental Pollution* 246: 932-944.
24. Edussuriya, P., Chan, A. and Ye, A. 2011. Urban morphology and air quality in dense residential environments in hong kong. part I: District-level analysis. *Atmospheric Environment* 45, no.27: 4789-4803.
25. ENVI-met Case Study: Air Pollution. <https://envi-met.info/doku.php?id=examples:airpollution> (accessed June 13, 2023).
26. ENVI-met Using Pollutant and Water Spray Sources in ENVI-met. https://envi-met.info/lib/exe/fetch.php?media=k:b:knowledgebase_sources.pdf (accessed June 13, 2023).
27. Gong, J., Hu, Y., Liu, M., Bu, R., Chang, Y., Bilal, M. and Li, C. et al. 2016. Land use regression models using satellite aerosol optical depth observations and 3D building data from the central cities of liaoning province, china. *Polish Journal of Environmental Studies* 25, no.3: 1015-1026.
28. Guo, X., Dai, F. and Bi, S. 2019. Simulation Study and Evaluation the Impact of Road Greenbelt Layout on Particulate Matter Dispersion and Removal. *Modern Environmental Science and Engineering* 5, no.5: 362-372.
29. Hofman, J., Bartholomeus, H., Janssen, S., Calders, K., Wuyts, K., Van Wittenberghe, S. and Samson, R. 2016. Influence of tree crown characteristics on the local PM10 distribution inside an urban street canyon in antwerp (belgium): A model and experimental approach. *Urban Forestry & Urban Greening* 20: 265-276.
30. Jia, B., Liu, S. and Ng, M. 2021. Air quality and key variables in high-density housing. *Sustainability* 13, no.8: 4281.
31. Jung, S. and Yoon, S. 2021. Analysis of the effects of floor area ratio change in urban street canyons on microclimate and particulate matter. *Energies* 14, no.3: 714.
32. Kim, H. 2020. Land Use Impacts on Particulate Matter Levels in Seoul, South Korea: Comparing High and Low Seasons. *Land* 9, no.5: 142.
33. Li, C., Wang, Z., Li, B., Peng, Z. and Fu, Q. 2019. Investigating the relationship between air pollution variation and urban form. *Building and Environment* 147: 559-568.
34. Li, X., Ma, Y., Wang, Y., Liu, N. and Hong, Y. 2017. Temporal and spatial analyses of particulate matter (PM10 and PM2.5) and its relationship with meteorological parameters over an urban city in northeast china. *Atmospheric Research* 198: 185-193.
35. Li, X., Liu, C., Leung, D. Y. C. and Lam, K. M. 2006. Recent progress in CFD modelling of wind field and pollutant transport in street canyons. *Atmospheric Environment* 40, no.29: 5640-5658.
36. Miao, C., Chen, W. and Yu, S. 2022. Assessing Ozone Distribution Vertically and Horizontally in Urban Street Canyons Based on Field Investigation and ENVI-met Modelling. *Buildings* 12, no.3: 262.
37. Paas, B. and Schneider, C. 2016. A comparison of model performance between ENVI-met and AUSTAL2000 for particulate matter. *Atmospheric Environment* 145: 392-404.
38. Peng, Y., Gao, Z., Buccolieri, R., Shen, J. and Ding, W. 2021. Urban ventilation of typical residential streets and impact of building form variation. *Sustainable Cities and Society* 67: 102735.
39. Qin, H., Lin, P., Lau, S. S. Y. and Song, D. 2020. Influence of site and tower types on urban natural ventilation performance in high-rise high-density urban environment. *Building and Environment* 179: 106960.
40. Rui, L., Buccolieri, R., Gao, Z., Gatto, E. and Ding, W. 2019. Study of the effect of green quantity and structure on thermal comfort and air quality in an urban-like residential district by ENVI-met modelling. *Building Simulation* 12, no.2: 183-194.
41. Shi, Y., Lau, K. and Ng, E. 2016. Developing street-level PM2.5 and PM10 land use regression models in high-density hong kong with urban morphological factors. *Environmental Science & Technology* 50, no.15: 8178-8187.
42. Shi, Y., Xie, X., Fung, J. C. and Ng, E. 2018. Identifying critical building morphological design factors of street-level air pollution dispersion in high-density built environment using mobile monitoring. *Building and Environment* 128: 248-259.
43. Tominaga, Y. and Stathopoulos, T. 2013. CFD simulation of near-field pollutant dispersion in the urban environment: A review of current modeling techniques. *Atmospheric Environment* 79: 716-730.
44. Voordeckers, D., Lauriks, T., Denys, S., Billen, P., Tytgat,

- T. and Van Acker, M. 2021. Guidelines for passive control of traffic-related air pollution in street canyons: An overview for urban planning. *Landscape and Urban Planning* 207: 103980.
45. Wang, Y., Zhou, Y., Zuo, J. and Rameezdeen, R. 2018. A computational fluid dynamic (CFD) simulation of PM10 dispersion caused by rail transit construction activity: A real urban street canyon model. *Int J Environ Res Public Health* 15, no.3: 482.
46. Wania, A., Bruse, M., Blond, N. and Weber, C. 2012. Analysing the influence of different street vegetation on traffic-induced particle dispersion using microscale simulations. *Journal of Environmental Management* 94, no.1: 91-101.
47. Yang, J., Shi, B., Shi, Y., Marvin, S., Zheng, Y. and Xia, G. 2020. Air pollution dispersal in high density urban areas: Research on the triadic relation of wind, air pollution, and urban form. *Sustainable Cities and Society* 54: 101941.
48. Yazid, A. W. M., Sidik, N. A. C., Salim, S. M. and Saqr, K. M. 2014. A review on the flow structure and pollutant dispersion in urban street canyons for urban planning strategies. *Simulation* 90, no.8: 892-916.
49. Zhou, J., Xiang, S., Zhang, Y., Wang, Y., Ge, W., Liu, J. and Hu, J. et al. 2021. Evaluation of the street canyon level air pollution distribution pattern in a typical city block in baoding, china. *Int J Environ Res Public Health* 19, no.16: 10432.

-
- 논문 접수일: 2023. 2. 7.
 - 심사 완료일: 2023. 5. 15.
 - 심사 완료일: 2023. 6. 13.

요약

주제어: 미세먼지, 건폐율, 거리 협곡, ENVI-met

인간의 건강을 위협하는 미세먼지(PM₁₀)는 사회적 재난이 되었다. 본 연구는 미세먼지 농도가 높게 나타나는 도심의 거리 협곡을 배경으로 건폐율 및 외관 비와 미세먼지 농도 간의 관계를 규명하고자 한다. 이를 위해 건폐율 변화에 따라 대안을 설정하고 ENVI-met 소프트웨어로 시뮬레이션을 진행하였다. 대안별 미세먼지 농도 및 기온, 풍속, 등의 데이터를

추출한 후 미세먼지 농도를 종속변수로, 건폐율을 독립변수로, 풍향, 풍속, 기온을 통제 변수로 설정하고 다중회귀분석을 진행하였다. 분석 결과, 거리 협곡 건물의 건폐율이 증가할수록 미세먼지 농도가 증가함을 밝혔다. 이를 통하여 본 연구는 거리 협곡에서 건폐율에 따른 미세먼지 농도 변화를 제시하고 건폐율을 고려한 도시설계가 필요함을 시사한다.