

가로수 식재 시나리오에 따른 기온 및 미세먼지 저감 효과 분석

엄정희¹ · 민진규² · 박주현² · 손정민² · 서홍덕³ · 오정학^{3*}

An Analysis of the Effect of Reducing Temperature and Fine Dust in the Roadside Tree Planting Scenario

Jeong-Hee EUM¹ · Jin-Kyu MIN² · Ju-Hyun PARK² · Jeong-Min SON² ·
Hong-Duck SOU³ · Jeong-Hak OH^{3*}

요 약

본 연구는 도시화 과정에서 발생한 도시 내 폭염 및 미세먼지를 저감하기 위해 가로수의 간격과 배열에 기반한 시나리오를 설정하고, 저감 정도를 정량적으로 분석하는 것을 목표로 한다. 가로수 조성 시나리오에 따른 열환경 및 미세먼지 개선 정도를 분석하기 위해서 미기후 시뮬레이션 프로그램인 ENVI-met 5.0.2v 모델을 사용하였다. 가로수 간격에 따른 기온 분석 결과, 가로수의 간격이 좁아져 식재한 수목의 양이 많아질수록 낮 시간대의 기온이 낮아졌으며, 오전 및 저녁 시간대에는 가로수 간격에 상관없이 비슷한 양상을 보였다. 가로수 배열에 따른 기온은 배열이 증가하여 식재한 수목의 양이 많아질수록 감소하는 경향을 보였다. 하지만, 같은 양의 수목을 식재하고 배열의 간격을 넓힌 시나리오에서 기온 저감폭이 더 크게 나타났기 때문에 수목의 양뿐만 아니라 수관투영면적 역시 기온 저감에 큰 영향을 주는 것으로 판단되었다. 가로수 배열에 있어서 미세먼지 농도는 간격에 따른 결과와 차이를 보였는데, 이는 주풍향과 수목 식재 방향의 관계에 따라 미세먼지 농도가 변화할 수 있음을 시사한다. 본 연구는 가로녹지에 의한 열환경 및 미세먼지 개선 정도를 정량적으로 분석함으로써, 가로수 조성·관리 기본 계획, 바람길숲 조성 사업 등 효율적인 가로환경 개선을 위한 정책 및 사업 추진에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

주요어 : 폭염, 도시열섬, 대기오염, PM2.5, ENVI-met

ABSTRACT

This study aims to establish a scenario based on the spacing and arrangement of the roadside trees to reduce heat waves and fine dust in cities that occurred during the

2023년 05월 08일 접수 Received on May 08, 2023 / 2023년 05월 14일 수정 Revised on May 14, 2023 / 2023년 06월 18일 심사완료 Accepted on June 18, 2023

1 경북대학교 산림과학·조경학부 조경학전공 / Dept. of Landscape Architecture, Kyungpook National University

2 경북대학교 일반대학원 조경학과 / Dept. of Landscape Architecture, Graduate School, Kyungpook National University

3 국립산림과학원 도시숲연구과 / Urban Forests Division, National Institute of Forest Science

* Corresponding Author E-mail: jehoh@korea.kr

urbanization process and to quantitatively analyze the degree of reduction. The ENVI-met 5.0.2v model, a micro-climate simulation program, was used to analyze the degree of improvement in the thermal environment and fine dust according to the roadside tree scenario. As a result of temperature analysis according to street tree spacing, the narrower the distance between roadside trees, the lower the temperature during the day as the number of planted trees increased, and a similar pattern was shown regardless of the distance between roadside trees in the morning and evening. In the case of fine dust emitted from the road, the concentration of fine dust increased slightly due to the increase in roadside trees, but the concentration of sidewalks where people walk increased slightly or there was no difference because of blocking fine dust on trees. The temperature according to the arrangement of street trees tended to decrease as the number of planted trees increased as the arrangement increased. However, not only the amount of trees but also the crown projected area was judged to have a significant impact on the temperature reduction because the temperature reduction was greater in the scenario of planting the same amount of trees and widening the interval of arrangement. In terms of the arrangement, the fine dust concentration showed a difference from the results according to the interval, suggesting that the fine dust concentration may change depending on the relationship between the main wind direction and the tree planting direction. By quantitatively analyzing the degree of thermal environment and fine dust improvement caused by roadside trees, this study is expected to promote policies and projects to improve the roadside environment efficiently, such as a basic plan for roadside trees and a project for wind corridor forests.

KEYWORDS : Heat wave, Urban heat island, Air pollution, PM2.5, ENVI-met

서론

산업화 및 도시화 과정에서 다양한 환경적 문제들이 발생하게 되었으며, 특히 최근 폭염 및 미세먼지에 대한 문제가 두드러지며 시민들의 관심 또한 증가하였다. 도시 환경에서 폭염은 교외지역과 비교하여 도시의 기온이 높아지는 도시 열섬현상(Oke, 1973)의 영향으로 발생한다. 이는 개발로 인해 도시 내 녹지가 줄어들며 증발산작용에 의한 잠열이 감소하거나(Taha, 1997), 콘크리트·아스팔트 등의 인공포장으로 인해 지표면 온도가 상승하고(Kim *et al.*, 2014; Kolokotroni and Giridharan, 2008), 건축물의 낮은 알베도로 태양열의 흡수 및 방출이 증가되는(Santamouris, 2015) 등 도시의 확장으로 인해 발생하고 심화된다. 도시 열섬현

상은 자연환경적 피해와 더불어 에너지 사용량을 증가시키고(Lee *et al.*, 2019), 특히 도시를 살아가는 시민들의 건강에 온열질환으로 피해를 입힐 수 있다(Lee *et al.*, 2019).

열환경 뿐만 아니라 미세먼지 측면에서도 도시화 과정이 부정적인 영향을 줄 수 있다. 토지 이용에 따른 대기질 측면에서 상업지역 및 교통지역의 미세먼지 농도는 식생지역의 미세먼지보다 높게 나타나는 경향이 있으며(Jeong and Lee, 2018), 사회적 영향으로써 인구 밀도나 증가율 역시 미세먼지 농도에 영향을 줄 수 있다(Maeng, 2014; Lou *et al.*, 2016). 뿐만 아니라 도시 내 교통으로 인한 배기가스가 미세먼지를 포함한 대기오염을 유발하는 주 배출원으로 평가되어(Colville *et al.*, 2001) 도시화 과정과 이로 인한 교통 및 인구 증가가 도시 내 미세먼지를 악화시킬 수 있다. 미세먼지는 사람

의 호흡기계 질환을 유발할 뿐만 아니라, 심장 질환 및 뇌혈관 질환에도 영향을 줄 수 있어(Myong, 2016) 2019년, 미세먼지는 ‘재난 및 안전관리기본법 개정안’을 통해 화재 및 폭발 등과 같은 사회재난으로 규정되었다. 특히 초미세먼지는 65세 이상 고령자에게 치명적인 영향을 주며 Hwang(2019)에 따르면 초미세먼지 연평균 농도가 $10\mu\text{g}/\text{m}^3$ 증가할 때 고령자가 환경성 질환으로 인해 사망할 위험성은 13.9% 증가하여 도시 내 미세먼지 저감을 위한 대책이 필요한 시점이다.

이러한 문제들로 인해 열환경 및 미세먼지를 개선하기 위한 다양한 선행연구들이 이어져왔으며, 특히 도시 내 녹지는 도시환경 개선에 긍정적인 영향을 줄 수 있다. 녹지는 콘크리트 등의 인공포장보다 태양복사로 인한 온도 상승이 더 더 녹지를 통해 지표면 온도를 낮추어 열환경을 개선할 수 있고(Song and Park, 2015), 동시에 녹지는 미세먼지를 포함한 대기오염 물질을 침착, 저감시킬 수 있다(Gromke, 2009). 특히 도심 속 녹지 및 인근 산에서 야간에 기압차로 인해 도심으로 차고 신선한 공기가 흐르게 되는데, 이를 효과적으로 유도하도록 바람길을 관리하여 도시 내 기온 및 미세먼지를 저감할 수 있다(Eum *et al.*, 2018). 이를 바탕으로 우리나라에선 2019년부터 도시 내 녹지를 조성 및 관리하여 바람길을 유도하는 도시바람길숲 조성 사업을 추진하여 2022년까지 전국 17개 도시에 도시바람길숲 조성을 목표로 하였다.

하지만 도시 환경 개선에 녹지가 긍정적 영향을 미치지만, 무분별하게 확장된 도시 공간에서 녹지 조성을 위한 토지 확보는 지가 상승 및 수급 문제 등으로 한계가 있다(Han *et al.*, 2013). 이에 따라 토지 매입 없이 도시의 녹지율을 높이기 위해선 건축물의 옥상 및 벽면을 녹화하거나 공공공간을 녹화하는 것이 일반적이며, 특히 대표적인 공공공간인 가로를 녹화하는 것이 대안으로 떠오르고 있다(Han *et al.*, 2013)

따라서 본 연구는 가로녹지를 대상으로 녹지 조성 시나리오를 나누어 이에 따른 도시의 열환경 및 미세먼지 정도를 정량적으로 비교하고 효

율적인 조성 시나리오를 제시하는 것을 목표로 한다. 이를 위해 가로녹지 조성 방법과 세부 시나리오를 세우고 실제 기상 자료와 차량 통행량에 기반한 미기상 시뮬레이션 모델을 구축한 뒤 각 시나리오의 기온 및 지표면 온도, 미세먼지 농도를 비교하여 효과적인 도시 환경 개선 시나리오를 도출하고자 한다.

연구방법

가로수 조성 방법에 따른 열환경 및 미세먼지 개선 효과를 확인하기 위해 ENVI-met 5.0.2v를 활용하였다. ENVI-met은 대표적인 전산 유체 역학 기반 미기상 시뮬레이션 프로그램으로 시뮬레이션 예측 정확도가 양호한 것으로 평가되어(Mirzaei and Haghghat, 2010) 도시 기후 연구에 주로 사용되고 있다(Saito *et al.*, 2017; Tsoka *et al.*, 2018; Kim *et al.*, 2022). ENVI-met을 통하여 건축물 및 토지피복과 같은 도시 환경적 요소와 기온 및 습도, 풍향, 풍속 등과 같은 기상적 요소, 그리고 교목 및 관목, 초화 등의 녹화 요소에 따른 시간별 기온, 상대습도, 풍향 및 풍속, 지표면 온도 등을 예상할 수 있고, 오염물질의 농도 및 흡착량 등을 분석할 수 있어 열환경 및 미세먼지 분석에 효과적이다.

연구를 위한 대상지는 대구광역시 수성구청역과 범어역 사이 달구벌대로 일대로, 대구의 중심을 관통하는 주요 도로 주변지역이며, 인구밀도가 높고 통행량이 많은 주거 및 상업지역으로 지정되어 있다. 동서방향으로 300m, 남북방향으로 100m, 총 $30,000\text{m}^2$ 이다(그림 1). 해당 대상지는 보도폭이 최대 10m로 넓은 폭을 가지고 있어 가로수 식재가 용이하고, 왕복 10차선의 대로가 있어 차량에 의해 발생하는 미세먼지가 많을 것으로 예상된다. 시뮬레이션 구동을 위해서 우선 각 시나리오의 공간 모형을 정사영상과 거리뷰 이미지를 참고하여 구축하였다. 시뮬레이션을 위한 입력자료는 표 1과 같다. 분석 공간 모형의 가로·세로 크기는 $300\text{m}\times 100\text{m}$ 로 설정하였으며 해상도는 1m로 구축하였다. 분석 공간의 높이는 대상지의 평균 건축물 높이



FIGURE 1. The location of study area

를 고려하여 40m로 설정하였다. 기상 입력 자료는 방재기상관측(AWS) 대구신암 지점(860)의 2017년부터 2021년까지의 7, 8월 평균 기상자료를 활용하였으며, 이때 강우일의 데이터는 제외하였다. 그 결과, 본 연구 대상지의 평균 기온 범위는 25°C~36°C, 평균 습도 범위는 45%~75%, 평균 풍속은 2.0m/s로 나타났다. 풍향의 경우 가장 많은 빈도로 나타난 180°(남풍)를 적용하였다. 추가로 분석 대상지의 미세먼지 농도를 분석하기 위해 PM2.5 배출량을 설정하였다. ENVI-met을 통한 미세먼지 농도 분석을 위해 일일 차량 통행량과 차선의 수, 통행하는 차량 유형별 비율, 그리고 각 차량 유형별 오염물질 배출량을 입력하여야 한다. 이를 위해 차량 통행량과 차량 유형별 비율은 대구광역시 교통 관련 기초조사 자료(Seo *et al.*, 2021)를 활용해 입력하였으며, 차량 유형별 오염물질 배출량은 국립환경과학원의 PM2.5 배출계수 자료집을 추가로 활용하여 입력하였다(National Institute of Environmental Research, 2014). 시간에 따라 누적되는 복사열을 반영할 수 있도록 시뮬레이션 구동을 오전 4시부터 진행하였으며, 오후 9시까지 총 17시간 시뮬레이션을 구동하고 그 중 오전 8시부터 오후 8시까지 2시간 간격으로 데이터를 추출하였다. 그리고 시뮬레이션의 결과는 사람의 눈높이와 유사한 지표면으로부터 1.5m 높이의 데이터를 추출하여 분석하였다.

시나리오는 크게 가로수 간격에 따른 시나리오와 가로수 배열에 따른 시나리오로 나누었다. 다른 시나리오와의 비교를 위한 기준이 되는 시나리오인 S1은 산림청의 가로수 조성 및 관리 규정 고시에 따라 가로수를 8m 간격으로 식재하였으며, S2는 기준시나리오(S1)보다 가까운 6m 간격으로, S3은 반대로 먼 간격인 12m마다 가로수를 식재하였다. S4, S5, S6은 기준시나리오(S1)과 같은 8m 간격으로 가로수를 식재하였으며, 가로수 배열은 S4는 2열, S5는 3열, S6은 도로 다이어트 실행 후 열간 간격을 넓힌 3열로 다열식재 하였다. 도로 다이어트는 도로의 차선 중 보도 쪽 1개의 차선을 줄이고 보도를 넓혀 보도 너비가 13m가 되도록 구축하였다(표 2, 그림 2). 본 시뮬레이션에서 사용한 수목은 수고 11m, 수관폭 8m, 지하고 6m로 설정한 낙엽활엽교목이며 수종의 구분 없이 일괄되게 구축하였다.

TABLE 1. Input data for simulation

Analysis area	300m×100m×40m
Grid size	1m×1m×1m
Range of temperature	25°C~36°C
Range of Relative humidity	45%~75%
Wind speed	2.0m/s
Wind direction	180°
Simulation time	04:00~21:00 (17hr)

TABLE 2. Detailed scenarios

Scenario Number	Detailed scenario	Number of trees	Crown projected area (m ²)
S1	Tree spacing 8m (One-row arrangement of trees)	61	4,209
S2	Tree spacing 6m	77	4,603
S3	Tree spacing 12m	39	2,691
S4	Two-row arrangement of trees	122	7,381
S5	Three-row arrangement of trees	177	7,711
S6	Three-row arrangement of trees (Increasing arrays spacing after road diet)	177	9,188

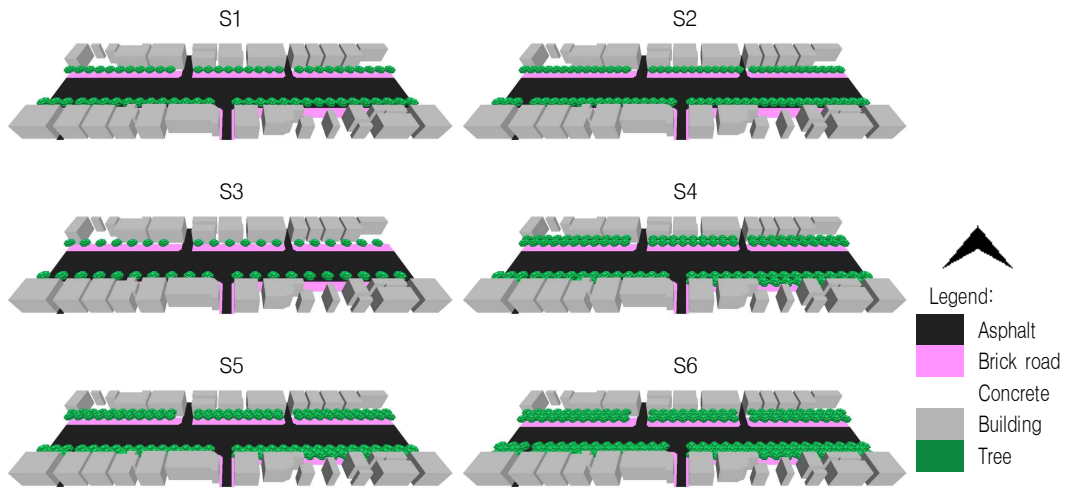


FIGURE 2. Space data for ENVI-met simulation

연구결과

1. 가로수 간격

분석영역 전체를 기준으로 데이터를 추출해 비교한 결과, 가로수 간격에 따른 기온의 경우 분석 시간(8시~20시, 2시간 간격) 전체 평균 기온이 가로수를 12m 간격으로 식재한 S3에서 33.32°C로 제일 높았으며, 가로수를 8m 간격으로 식재한 S1은 33.28°C, 6m 간격으로 식재한 S2는 33.27°C로 비슷한 수치를 보였다(표 3, 그림 3). 시간대별 각 시나리오의 기온을 비교하면 일사의 영향이 비교적 적은 8시와 20시의 경우 모든 시나리오의 기온이 비슷한 수치를 보였고, 낮 시간대(12시~16시)에서는 S1과 비교

했을 때 S2는 기온이 약 0.02°C 낮았으며, S3은 약 0.06°C 높았다. 지표면 온도 역시 분석 시간 전체 평균 기온이 S3에서 제일 높은 38.17°C가 나타났고 S1이 약 0.28°C 낮은 37.89°C, S2가 약 0.39°C 낮은 37.78°C로 나타났다(표 3, 그림 4). 지표면 온도가 제일 높게 나타난 14시의 경우 S1과 비교하였을 때 S2의 지표면 온도는 분석영역 전체에서 평균 0.23°C 낮았고, S3은 0.55°C 높았다. 전체 분석영역 중 보행자 열스트레스가 가장 높은 대로의 북측 보도(Lim *et al.*, 2022; Lachapelle *et al.*, 2023) 부분만 추출하여 14시를 기준으로 기온을 비교한 결과, S1과 비교하여 S2는 평균 0.04°C, 최대 0.51°C 기온이 낮았고, 반면 S3은

TABLE 3. Average temperature(A.T.) and surface temperature(S.T.) per two-hours(°C)

	S1		S2		S3		S4		S5		S6	
	A.T.	S.T.	A.T.	S.T.	A.T.	S.T.	A.T.	S.T.	A.T.	S.T.	A.T.	S.T.
08:00	28.68	28.56	28.68	28.57	28.69	28.55	28.66	28.60	28.67	28.64	28.60	28.15
10:00	31.54	36.26	31.52	36.14	31.59	36.56	31.47	35.82	31.48	35.81	31.36	35.04
12:00	33.84	41.93	33.82	41.74	33.91	42.41	33.75	41.26	33.75	41.13	33.62	40.27
14:00	35.43	44.04	35.40	43.82	35.50	44.59	35.33	43.30	35.33	43.13	35.20	42.30
16:00	36.26	42.92	36.23	42.70	36.33	43.39	36.16	42.18	36.16	42.07	36.04	41.33
18:00	34.61	38.02	34.60	37.95	34.63	38.19	34.55	37.66	34.56	37.62	34.45	37.07
20:00	32.61	33.51	32.61	33.51	32.60	33.48	32.61	33.49	32.62	33.48	32.58	33.31
Average	33.28	37.89	33.27	37.77	33.32	38.17	33.22	37.47	33.22	37.41	33.12	36.78

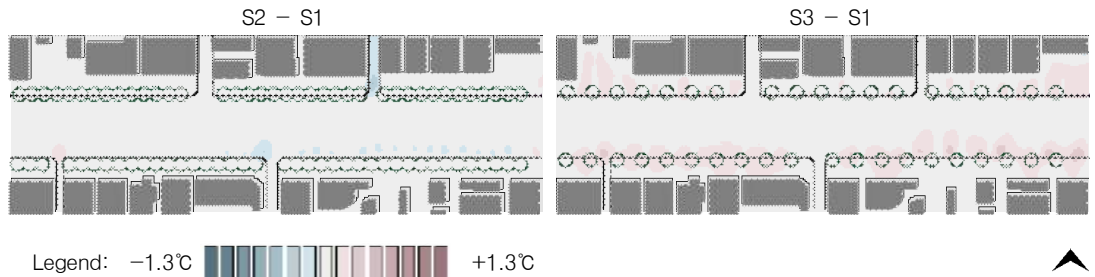


FIGURE 3. Air temperature difference between spacing scenarios of roadside trees at 14:00

평균 0.08°C, 최대 0.26°C 기온이 높았다. 같은 조건에서 지표면 온도는 S1과 비교하여 S2에서 평균 0.04°C 최대 0.50°C 저감되었고, 반면 S3은 평균 0.08°C 최대 0.26°C 상승하였다(표 4).

미세먼지는 기온과 반대의 양상을 나타내었다(그림 5). 각 시나리오의 전체 시간대 평균 미세먼지 농도가 S3은 13.59 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 제일 낮았고, S1이 13.92 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, S2가 14.03 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 순으로 분

TABLE 4. Average temperature(A.T.) and surface temperature(S.T.) on the sidewalk at 14:00(°C)

	S1	S2	S3	S4	S5	S6
A.T.	35.79	35.75	35.88	35.67	35.66	35.32
S.T.	35.09	34.53	36.20	34.73	34.21	35.36

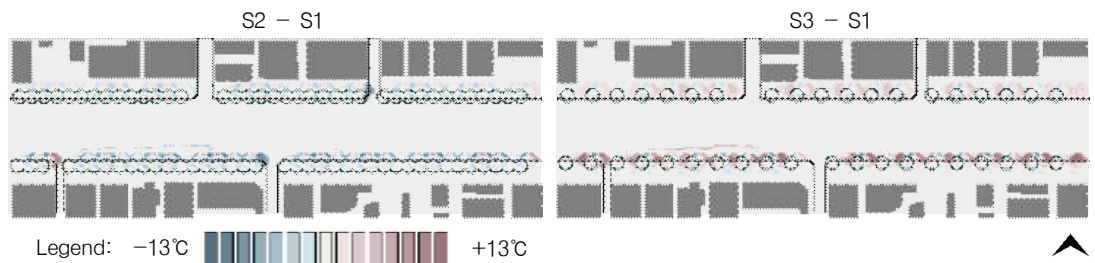


FIGURE 4. Surface temperature differences between spacing scenarios of roadside trees at 14:00

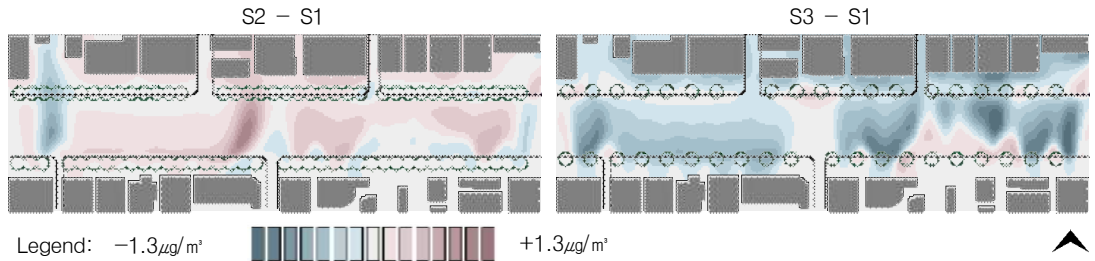


FIGURE 5. PM2.5 concentration differences between spacing scenarios of roadside trees at 14:00

TABLE 5. Average PM2.5 concentration per two-hours ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

	S1	S2	S3	S4	S5	S6
08:00	15.64	15.76	15.24	15.98	16.05	15.88
10:00	14.14	14.26	13.78	14.44	14.50	14.41
12:00	12.94	13.04	12.61	13.21	13.26	13.22
14:00	12.50	12.61	12.19	12.77	12.83	12.80
16:00	12.44	12.54	12.14	12.72	12.78	12.75
18:00	14.04	14.14	13.74	14.36	14.43	14.35
20:00	15.76	15.87	15.45	16.13	16.20	16.01
Average	13.92	14.03	13.59	14.23	14.29	14.20

석되었다(표 5). 시간대별로 비교하였을 때 모든 시나리오에서 8시부터 시간이 지남에 따라 미세먼지 농도가 점차 낮아졌고, 18시 이후 다시 농도가 높아지는 경향을 보였다. 대로의 방향을 수직으로 가로지르는 단면을 잘라 농도의 분포를 확인하면 S1과 비교했을 때, S2는 대로 부분의 미세먼지 농도가 다소 상승하여 14시 기준 최대 $0.33\mu\text{g}/\text{m}^3$ 증가하였고, S3의 경우 대로 부분의 미세먼지 농도가 반대로 감소하여 최대

$0.73\mu\text{g}/\text{m}^3$ 저감되었다(그림 6). 대로를 기준으로 남쪽에 위치한 보도는 S2, S3 모두 S1과 비교하여 큰 차이를 보이지 않았고, 북쪽에 위치한 대로의 경우 S2는 일부 상승, S3은 일부 감소하였으나 그 정도가 미미하였다.

2. 가로수 배열

가로수 배열에 따라 분석영역 전체를 시나리오별 비교한 결과, 분석 시간 전체 평균 기온이

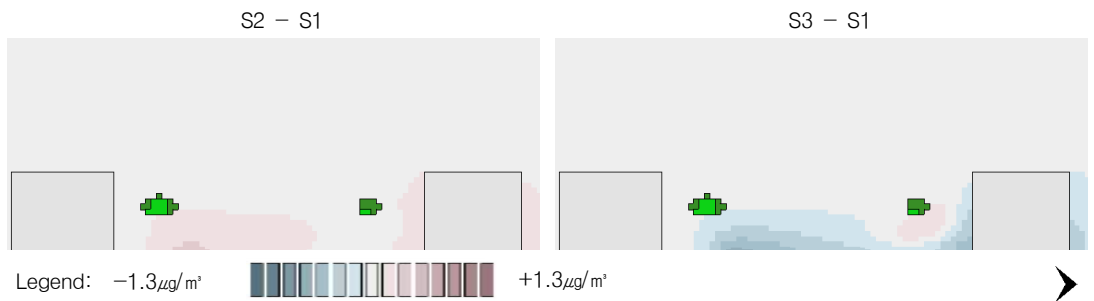


FIGURE 6. PM2.5 concentration differences between spacing scenarios of roadside trees at 14:00 (vertical side)

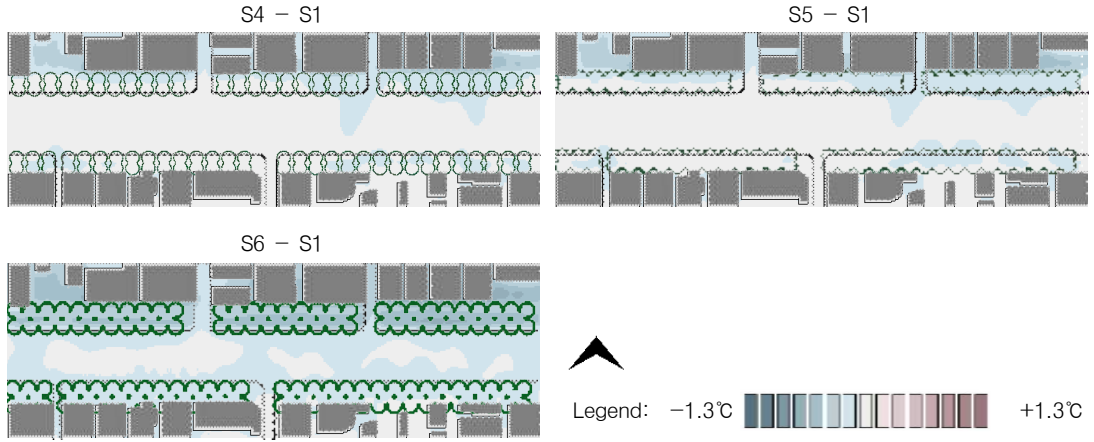


FIGURE 7. Air temperature differences between arrangement scenarios of roadside trees at 14:00

가로수를 1열 식재한 S1에서 제일 높은 33.28°C가 나타났으며, 가로수를 2열로 식재한 S4와 3열로 식재한 S5에서 33.22°C로 비슷한 수치를 보였다(그림 7). 도로 다이어트로 보도를 넓혀 가로수 열간 간격을 넓힌 뒤 3열로 식재한 S6의 경우 제일 낮은 기온인 33.12°C로 나타났다. 가로수 간격과 마찬가지로 8시와 20시의 경우 각 시나리오별 기온 차이가 크게 나지 않았으며, S1과 비교해서 S4와 S5는 낮 평균 0.1°C 기온 저감을 보였고, 수관투영면적이 제일 넓은

S6의 경우 낮 시간대인 12~16시에 평균 0.23°C 기온 저감을 보였다. 지표면 온도는 14시를 기준으로 S1과 비교하였을 때 S4, S5, S6은 분석영역 전체 평균이 각각 0.73°C, 0.91°C, 1.74°C 낮았다(그림 8). 보행자 열스트레스가 가장 높은 대로의 북측 보도 부분만 추출해 14시를 기준으로 기온을 비교한 결과, S1과 비교하여 S4는 평균 0.12°C 최대 0.31°C, S5는 평균 0.13°C 최대 0.31°C, S6은 평균 0.17°C 최대 0.28°C 저감되었다. 지표면 온도는 같은 조건에

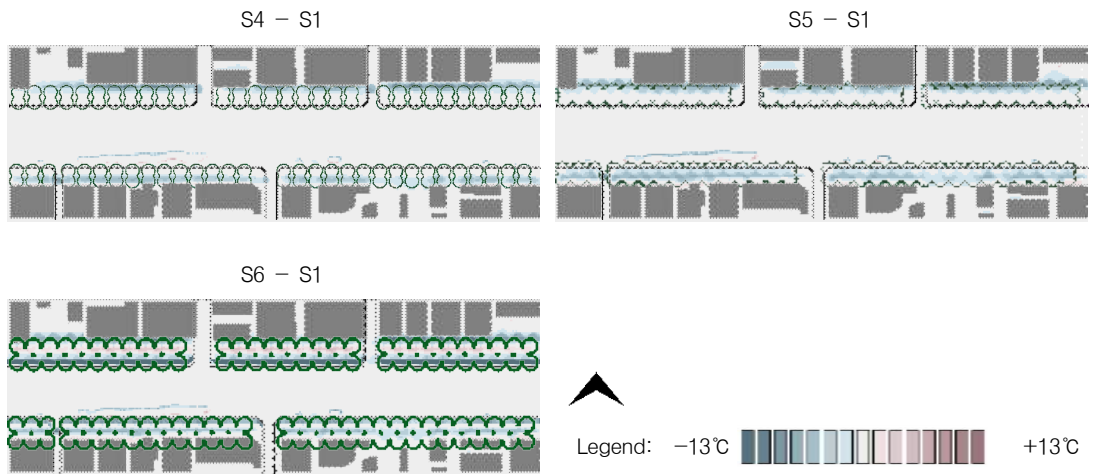


FIGURE 8. Surface temperature differences between arrangement scenarios of roadside trees at 14:00

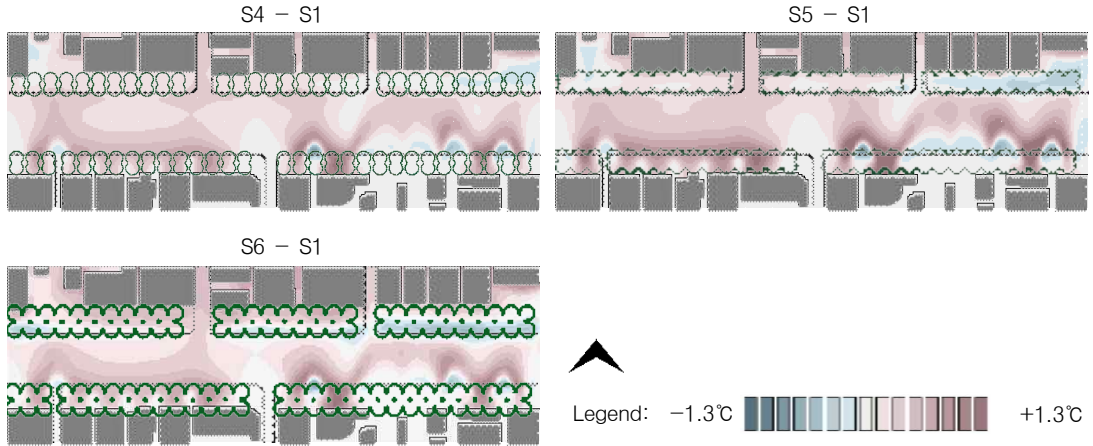


FIGURE 9. PM2.5 concentration differences between arrangement scenarios of roadside trees

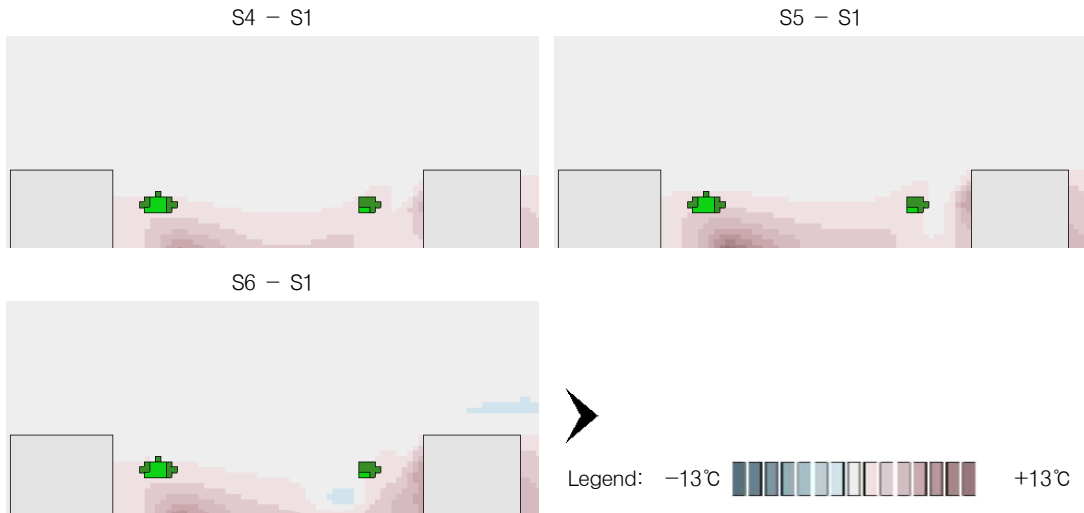


FIGURE 10. PM2.5 concentration differences between arrangement scenarios of roadside trees (vertical side)

서 S1과 비교하였을 때 S4는 평균 0.36°C 최대 6.0°C, S5는 평균 0.88°C 최대 7.26°C, S6은 평균 4.3°C 최대 12.75°C 저감되었다.

미세먼지의 경우 전체 시간대의 평균 농도가 S5에서 제일 높은 14.29 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났고, S4는 14.23 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, S6은 14.20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, S1은 13.92 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 평가되었다(표 5, 그림 9). 가로수 간격과 마찬가지로 모든 시나리오에서 낮 시간대가 되며 미세먼지 농도가 점차 낮아졌고, 18시를 지

나며 농도가 다시 상승하였다. 대로의 방향을 수직으로 가로지르는 단면을 추출해 확인한 결과, S1과 비교하여 대로변의 미세먼지 농도가 S4는 14시 기준 최대 0.85 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, S5는 최대 1.35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, S6은 최대 0.95 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 상승하였다(그림 10). 가로수 간격의 결과와는 상이하게 보드 부분의 미세먼지 농도도 S1과 비교해 다른 시나리오들에서 다소 증가하는 모습을 보여 농도가 최대 0.72 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 증가하였다.

결론

1. 결과 종합

본 연구는 가로수 간격과 가로수 배열에 따른 열환경 및 미세먼지 변화 정도를 분석하기 위해 ENVI-met 시뮬레이션을 활용하여 시나리오를 분석 및 비교하였다. 가로수 간격에 대한 시나리오를 분석한 결과, 평균기온의 경우 가장 좁은 간격인 6m 간격으로 가로수를 식재한 S2에서 가장 낮은 기온을 나타냈으며, 8m 간격으로 식재한 S1과 12m 간격으로 식재한 S3 순으로 온도가 높아지는 경향을 보였다. 지표면 온도의 경우 마찬가지로 식재한 수목의 수가 많아 수관 투영면적이 높아질수록 온도는 낮아지는 경향을 보였다. 미세먼지의 경우 S3의 미세먼지 농도가 가장 낮았으며, 그 뒤로 S1, S2 순으로 미세먼지 농도가 높은 것으로 나타나 수목의 수가 많을수록 미세먼지 농도는 증가하는 경향을 보였다. 그러나 대로 방향의 수직 단면을 잘라 미세먼지 농도를 확인한 결과 미세먼지 농도는 주로 도로 부분에서 농도가 증가하는 것으로 나타났으며, 사람들이 보행하는 보도 부분은 변화가 없거나 약 $0.3\mu\text{g}/\text{m}^3$ 정도의 미미한 농도 증가를 보였다.

가로수 배열에 따른 시나리오를 분석한 결과 평균 기온의 경우 가로수를 1열 식재한 S1에서 가장 높은 기온을 나타냈으며, 그 뒤로 2열로 식재한 S4와 3열로 식재한 S5는 비슷한 기온 수치를 보였고, 마지막으로 도로 다이어트 후 가로수의 열간 간격을 넓혀 3열을 식재한 S6이 가장 낮은 기온을 나타내었다. 가로수 배열의 경우 열수가 증가할수록 가로수의 수가 증가하여 기온이 낮아지는 경향을 나타내었다. 그러나 S4와 비교하여 S5는 가로수의 수가 약 31% 증가하였음에도 불구하고 비슷한 기온을 나타내었는데, 그 이유는 수관투영면적이 거의 비슷한 것에서 찾을 수 있다. S5의 경우 한정된 보도 너비로 인해 가로수의 열간 간격이 좁아져 수관 투영 면적이 S4보다 약 4% 정도만 증가하였다는 점에서 가로수에 의한 기온 저감은 수목의

수보다 수관 투영 면적의 영향을 더 많이 받는 것으로 판단된다. 가장 더운 시간인 14시를 기준으로 지표면 온도 차이를 비교하였을 때 S1을 기준으로 S5보다 S6가 약 두 배 정도 더 낮은 온도 저감 정도를 보인 점도 마찬가지로 수관투영면적이 지표면 온도 저감에 큰 영향을 미친 것으로 판단된다. 미세먼지 농도의 경우 S5의 농도가 가장 높았고, 그 뒤로 S4, S6, S1 순으로 낮아졌다. 가로수 간격에 있어서 수목의 수가 많아질수록 미세먼지 농도가 비교적 높아졌던 것에 반해 S6의 경우 S4, S5보다 수목의 수가 많거나 같음에도 미세먼지 농도는 낮은 것으로 나타나 녹지의 양과 식재밀도가 미세먼지 농도에 영향을 미친 것으로 판단된다.

2. 결론 및 고찰

본 연구는 식재 방법적 측면에서 가로수의 간격 및 배열이 변화하였을 때 도시의 열환경 및 미세먼지 농도의 변화 양상을 파악하고, 이를 활용하여 열환경 개선 및 미세먼지 저감을 위한 효율적인 녹지 조성 방안을 제시하고자 수행되었다. 특히 가로수의 간격과 배열을 통한 녹지의 개선은 현재 가로수 현황에서 보도폭과 가로수 간격 등을 고려하여 충분히 적용가능한 매개 변수이며, 2019년부터 현재까지 활발하게 진행되고 있는 바람길숲 조성 사업에서 가장 많이 적용하는 녹화 방법 중 하나로 파악되고 있어 그 효과에 대한 정략적 검증이 필요한 시점으로 판단된다.

가로수 간격의 경우 식재한 가로수의 수가 많아질수록 낮 시간대의 기온이 저감되는 경향을 보였으며, 오전과 저녁 시간에는 일사의 영향을 적게 받아 각 시나리오별 기온차가 두드러지지 않았다. 반면 미세먼지의 경우 기온과 반대로 가로수의 수가 많아질수록 미세먼지 농도가 높아지는 것으로 확인되었는데, 이는 많아진 수목이 바람의 흐름을 방해하여 대상지의 풍속이 다소 느려짐(Vos *et al.*, 2013; Yuan *et al.*, 2017)과 동시에, 대로변에서 지속적으로 미세먼지가 배출되지만 차량의 이동에 의한 미세먼지의 확산

은 시물레이션 특성상 반영하지 못해 대로변에 미세먼지가 갇혀 농도가 높게 평가된 것으로 판단된다. 수직 단면을 통해 대로와 보도의 미세먼지 농도를 분석한 결과 가로수 수가 많아지며 증가한 미세먼지는 대부분 대로변에 위치하였으며, 보도는 미세먼지 변화가 없거나 미미한 증가를 보여 가로수가 도로변에서 발생하는 미세먼지를 대부분 차단한 것으로 판단된다. 가로수 배열에 따른 기온에서도 마찬가지로 가로수의 수가 많아질수록 기온이 저감되는 경향은 보였으나, 더 많은 양의 수목을 식재해도 그 간격이 좁아 수관투영면적이 비슷한 경우 기온 역시 비슷한 수준을 보였다는 점과, 같은 양의 수목을 식재해도 간격이 넓어 수관투영면적이 높아질 경우 더욱 큰 기온저감 폭을 보인다는 점에서 기온 저감에 있어서 수목의 수보다 수관투영면적의 영향이 더 큰 것으로 판단된다. 가로수 간격에 따른 결과와 상이하게 가로수 배열에 있어서 미세먼지 농도는 수목의 수와 비례하지 않았다. 이는 가로수 배열의 증가에 따른 녹지량의 증가 및 가로수 밀도의 증가가 복합적으로 작용한 것으로 판단된다. 녹지량의 경우 녹지량이 증가할수록 녹지에 의한 미세먼지 흡착량이 증가하여 미세먼지 농도 저감에 유리한 방향으로 작용한 반면, 가로수 밀도의 경우 밀도가 증가할수록 풍속이 느려져 미세먼지 저감에 불리한 것으로 나타났다.

본 연구를 통해 가로수 간격 및 배열에 따른 가로녹지 조성 시나리오를 분석하고 각 시나리오별 열환경 완화 및 미세먼지 저감 정도를 정량적으로 비교하였다. 이는 녹지 조성을 위한 토지 확보가 어려운 상황에서 도시 환경 개선을 위한 효율적인 가로녹지 조성 방안을 마련하는데 활용될 수 있다는 점에서 의의가 있다. 그러나 가로수 간격 및 배열 외에도 가로수의 수종과 관목·초화 등의 하부식재 등 다양한 효과를 확인하지 못하였다는 한계가 있다. 또한 실제 관측한 미세먼지 데이터를 활용한 것이 아닌, 지자체 통행량 기초자료와 시물레이션에 기반하여 미세먼지 농도를 추정해 분석하였다는 점에서 정확도 검증이 필요하다는 한계가 존재

한다. 미세먼지 분석 과정에서 전체 시물레이션 분석 면적이 비교적 작아 충분한 주변부를 고려하지 못하였다는 점, 차량 통행으로 인한 PM2.5 발생량은 고려하였으나 차량 통행으로 발생하는 풍속 등으로 재비산되는 미세먼지는 고려하지 못하였다는 점, 그리고 배출되는 미세먼지 외의 배경 미세먼지는 고려되지 않았다는 점에서 실제와 다른 미세먼지 농도 결과가 나타날 수 있을 것으로 판단된다.

이와 같은 한계점들을 보완하기 위해 가로수 간격 및 배열뿐만 아니라 띠녹지와 하부식재 및 층위구조 등 다양한 녹화 방법을 추가로 분석해 각 시나리오를 비교할 필요가 있으며, 분석 모델의 크기와 미세먼지 분포 정도 등을 고려하여 연구를 보완할 필요가 있다. 또한 다열식재의 경우 열간 간격의 임계값에 대한 연구를 통해 단위면적당 가로수의 적정 밀도에 대한 추가 연구가 필요하다. 나아가 가로환경의 경우 건물의 높이, 보도 및 도로의 너비, 종횡비, 거리방향 등 거리협곡의 공간적 특성에 따라 열환경 및 미세먼지의 저감 방향이 달라질 수 있어 이에 대한 추가 연구가 필요하다. 마지막으로 분석 대상지 내에서 여러 관측 지점을 선택하여 실제 미세먼지 농도를 측정하여 시물레이션을 위한 입력자료를 구축하거나, 또는 실제 관측값과 시물레이션 결과값을 비교해 정확도를 검증하는 후속 연구 역시 필요하다. **KAGIS**

REFERENCES

- Colville, 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.
- Eum, J.H., Son, J.M., Seo, K.H., and Park, K.H. 2018. Management strategies of ventilation paths for improving thermal environment—A case study of Gimhae, South Korea. *Journal of the Korean*

- Association of Geographic Information Studies 21(1):115-127 (엄정희, 손정민, 서경호, 박경훈. 2018. 도시 열환경 개선을 위한 바람길 관리 전략-김해시를 사례로. 한국지리정보학회지 21(1):115-127).
- Gromke, C., and Ruck, B. 2009. On the impact of trees on dispersion processes of traffic emissions in street canyons. *Boundary-Layer Meteorology* 131(1):19-34.
- Han, B.H., Kwak, J.I., and Kim, H.S. 2013. Influence factors of street environment for provision and management of street green. *Korean Journal of Environment and Ecology* 27(2):253-265 (한봉호, 박정인, 김홍순. 2013. 가로녹지 조성 및 관리를 위한 가로환경 영향요인 분석 연구-서울시 관리도로를 대상으로. 한국환경생태학회지 27(2):253-265).
- Hwang, I.C. 2019. Health effects of aging and ultrafine Dust. Policy Report 1-22 (황인창. 2019. 고령화와 초미세먼지 건강영향. 정책리포트 1-22).
- Jeong, J.C., and Lee, S.H. 2018. Spatial distribution of particulate matters in comparison with land-use and traffic volume in Seoul, Republic of Korea. *Journal of Cadastre & Land InformatiX* 48(1):123-138 (정중철, 이상훈. 2018. 서울시 토지이용과 교통량에 따른 미세먼지의 공간분포. 지적과 국토정보 48(1):123-138).
- Kim, M.K., Kim, S.P., Kim, N.H., and Sohn, H.G. 2014. Urbanization and urban heat island analysis using LANDSAT imagery: Sejong city as a case study. *KSCE Journal of Civil and Environmental Engineering Research* 34(3):1033-1041 (김미경, 김상필, 김남훈, 손홍규. 2014. LANDSAT 영상을 이용한 세종특별자치시의 도시화와 열섬현상 분석. 대한토목학회논문집 34(3):1033-1041).
- Kim, S.H., Park, K.H., Lee, S.A., and Song, B.G. 2022. Analysis of Thermal Environment Characteristics by Spatial Type using UAV and ENVI-met. *Journal of Geographic Information Studies* 25(1):28-43 (김성현, 박경훈, 이수아, 송봉근. UAV와 ENVI-met을 활용한 공간 유형별 열환경 특성 분석. 한국지리정보학회지 25(1):28-43).
- Kolokotroni, M., and Giridharan, R. 2008. Urban heat island intensity in London: An investigation of the impact of physical characteristics on changes in outdoor air temperature during summer. *Solar energy* 82(11):986-998.
- Lachapelle, J.A., Krayenhoff, E.S., Middel, A., Coseo, P., & Warland, J. 2023. Maximizing the pedestrian radiative cooling benefit per street tree. *Landscape and Urban Planning*, 230, 104608.
- Lee, S., Kim, K., and Lee, S. 2019. Empirical Analysis of Mutual Influential Relationship between Urban Temperature and Building Energy Consumption Using Simultaneous Equation-Focused on Seoul, Korea. *Seoul Studies* 20:33-44 (이수진, 김기중, 이승일. 2019. 연립방정식을 이용한 도시온도와 건물에너지 소비의 상호영향관계 실증 분석 - 서울시를 중심으로 -. 서울도시연구 20(1):33-44).
- Lee, S.M., Kweon, I., and Kim, Y.J. 2019. A study on the influence of urban environment on the generation of thermal diseases. *The Journal of the Korea Contents Association* 19(12):84-92 (이수미, 권일, 김용진. 2019. 도시 환경이 온열질환 발생에 미치는 영향에 관한 연구. 한국콘텐츠학회논문지 19(12):84-92).

- Lim, H., Jo, S., and Park, S. 2022. Analysis of thermal environment modification effects of street trees depending on planting types and street directions in summertime using ENVI-met simulation. *Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture* 50(2):1-12 (임현우, 조상만, 박수국. 2022. ENVI-Met 시뮬레이션을 통한 도로 방향별 가로수 식재 형태에 따른 여름철 열환경 개선 효과 분석. *한국조경학회지* 50(2):1-22).
- Lou, C.R., Liu, H.Y., Li, Y.F., and Li, Y.L. 2016. Socioeconomic drivers of PM2.5 in the accumulation phase of air pollution episodes in the Yangtze River Delta of China. *International journal of environmental research and public health* 13(10):928.
- Maeng, J.Y. 2014. A study on the correlations between urban variables and air pollutants: focused on SO₂, NO₂, and PM10. Ph.D. Thesis, Gachon University, Seongnam, Korea. (맹지연. 2014. 도시특성변수와 대기 오염 간의 상관관계 연구 : 이산화황·이산화질소·미세먼지를 중심으로. 가천대학교 대학원 박사학위논문).
- Mirzaei, P.A., and Haghghat, F. 2010. Approaches to study urban heat island-abilities and limitations. *Building and environment* 45(10):2192-2201.
- Myong, J.P. 2016. Health effects of particulate matter. *The Korean Journal of Medicine* 91(2):106-113 (명준표. 2016. 미세먼지와 건강 장애. *대한내과학회지* 91(2):106-113).
- National Institute of Environmental Research. 2014. PM2.5 Emission Factor Data Book - 2011 Air Pollutant Emissions Standards. 78pp (국립환경과학원. 2014. PM2.5 배출계수 자료집 - 2011년 대기오염물질 배출량 기준. 78쪽)
- Oke, T.R. 1973. City size and the urban heat island. *Atmospheric Environment* (1967) 7(8):769-779.
- Saito, K., Said, I., and Shinozaki, M. 2017. Evidence-based neighborhood greening and concomitant improvement of urban heat environment in the context of a world heritage site-Malacca, Malaysia. *Computers, Environment and Urban Systems* 64:356-372.
- Santamouris, M. 2015. Regulating the damaged thermostat of the cities - Status, impacts and mitigation challenges. *Energy and Buildings* 91:43-56.
- Seo, S., Kwon, T., Kim, S., and Lee, S. 2021. 2021 Basic Traffic Survey (II) - Traffic and Traffic Speed Survey -. Daegu. 152pp (서상언, 권태범, 김수성, 이세희. 2021. 2021년 교통 관련 기초조사(II) - 교통량 및 통행속도 조사 -. 대구광역시. 152쪽).
- Song, B.G., and PARK, K.H. 2015. An analysis of rational green area ratio by land use types for mitigating heat-island effects. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* 18(2):59-74 (송봉근, 박경훈. 2015. 도시열섬완화를 위한 토지 이용 유형별 합리적 녹지율 분석. *한국지리정보학회지* 18(2):59-74).
- Taha, H. 1997. Urban climates and heat islands: albedo, evapotranspiration, and anthropogenic heat. *Energy and buildings* 25(2):99-103.
- Tsoka, S., Tsikaloudaki, A., and Theodosiou, T. 2018. Analyzing the ENVI-met microclimate model's performance and assessing cool

- materials and urban vegetation applications : A review. *Sustainable cities and society* 43:55–76.
- Vos, P.E., Maiheu, B., Vankerkom, J., & Janssen, S. 2013. Improving local air quality in cities: to tree or not to tree?. *Environmental pollution*, 183:113–122.
- Yuan, C., Norford, L., & Ng, E. 2017. A semi-empirical model for the effect of trees on the urban wind environment. *Landscape and Urban Planning*, 168:84–93. [KAGIS](#)