

여름철 도로 방향과 가로수 식재 방식에 의한 인간 열환경 개선효과 분석

문정현¹·최유리¹·최은자¹·양주은²·박수국^{3*}

Analysis of the effect of improving human thermal environment by road directions and street tree planting patterns in summer

Jeonghyeon Moon¹·Yuri Choi¹·Eunja Choi¹·Jueun Yang²·Sookuk Park^{3**}

요 약

본 연구는 서울시에서 도로 방향과 가로수 식재형태가 여름철 도시 열환경에 미치는 영향을 분석하여 최적의 식재방식을 찾는 것을 목표로 하였다. 컴퓨터 시뮬레이션 프로그램 ENVI-met을 이용하여, 도로 4방향과 가로수 식재형태에 따라 68가지 시나리오를 수행하였다. 그 결과, 수목 식재 시기, 평균복사온도, 인간 열환경지수가 개선되는 것으로 나타났다. 평균복사온도의 감소는 도로와 접한 건물에 의한 태양 복사에너지 차단과 수목의 그늘효과에 기인하였으며, 도로방향은 풍속 감소에 영향을 주는 것으로 나타났다. 모든 시나리오에서 낮은 수고(6m), 넓은 수관폭(9m), 높은 엽면적 지수(3.0), 좁은 식재간격(8m)일 때 가장 큰 열환경 개선효과를 보였다. 도로 방향은 동-서 방향의 북측 보도에서 열환경이 가장 크게 개선되었다. 본 연구는 컴퓨터 시뮬레이션을 이용해 현실 도시공간과의 차이를 감안해야 하고, 현장 실측과 더 많은 변수 고려를 통한 추가연구가 필요하다.

주요어 : 열환경지수, 열쾌적성, 미기후, 도시기후, ENVI-met 시뮬레이션

ABSTRACT

This study aimed to identify the optimal street tree planting method to improve the

2024년 3월 27일 접수 Received on March 27, 2024 / 2024년 5월 10일 수정 Revised on May 10, 2024 / 2024년 5월 14일 심사완료 Accepted on May 14, 2024

1 제주대학교 일반대학원 원예학과 석사과정 / Master student, Graduate program in Horticultural Science, College of Applied Life Science, Jeju National University

2 제주대학교 일반대학원 원예학과 박사과정 / Ph.D. student, Graduate program in Horticultural Science, College of Applied Life Science, Jeju National University

3 제주대학교 생명자원과학대학 원예환경전공 교수 / Professor, Department of Horticultural Science, College of Applied Life Science, Jeju National University

* Corresponding Author E-mail: sooland@jejunu.ac.kr

summer thermal environment in Seoul, Republic of Korea. The effects of road direction and street tree planting patterns on urban thermal environments using ENVI-met simulations were analyzed. The 68 scenarios were analyzed based on four road directions and 17 planting patterns. The results showed that tree planting had a reducing air temperature, mean radiant temperature, human thermal sensation (PET and UTCI). The most effective planting pattern among all scenarios was low tree height (6m), wide crown width (9m), high leaf area index (3.0), and narrow planting interval (8m). The largest improvement in the thermal environment was the northern sidewalk of the east-west road. Since this study used computer simulations, the difference from real urban spaces should be considered, and further research is needed through field measurement and consideration of more variables.

KEYWORDS : Thermal Sensation, Thermal Comfort, Microclimate, Urban Climate, ENVI-met Simulation

서 론

현대의 발전된 기술과 경제·인구 성장으로 인해 급격한 도시화가 광범위하게 진행되면서 여러 환경 문제가 대두되고 있다. 1900년대의 산업화 이후 급증한 온실가스로 인한 기온상승, 도시화로 인한 도시 내 열환경 악화 등 인간의 삶의 질은 저하되고 있다. 이에 대한 해결책으로 도시 내 가로수 식재(Park et al., 2012; Coutts et al., 2016; Sanusi et al., 2017; Sharmin et al., 2023) 및 도시숲 조성(Dwyer et al., 1992; Kim et al., 2010; Chang and Li, 2014; Lai et al., 2019; Guo et al., 2024) 등 여러 방법이 시행되고 있다.

국내에서도 환경문제를 해결하고 인간의 삶의 질을 개선하기 위하여, 도시 내의 열환경에 대한 다양한 연구가 진행되고 있다(Jeong and Park, 1999; Lee and Cho, 2004; Kim, 2011; Song and Park, 2012; Yoon et al., 2013; Jeong et al., 2016; Bae and Lee, 2024). 현재 진행되고 있는 연구방법은 지역기후모델(regional climate model)을 이용한 지표온도 분석(Lee and Cho, 2004; Kim, 2011)과 열섬현상 파악(Jeong and Park, 1999; Song and Park, 2012; Yoon et al., 2013; Bae and Lee, 2024) 등 현황분석이 주를 이루고 있다. 이는

지역 내 취약지 파악, 개선 대상지 결정 등 도시 계획 분야에서 유용하게 활용되고 있다. 그러나, 국지적 규모를 분석하는 모델이기 때문에, 이보다 더 소규모의 공간인 미기후의 규모에서는 이용되기 어렵고, 공간구성요소의 정량적 데이터 파악만으로 구체적인 공간의 설계·해결방안의 제시에는 어려움이 있다.

도시의 열환경은 도시 내 구조물, 피복, 식재 등 구성요소에 따라 형성되고, 각 구성요소의 에너지 흡수, 반사, 방사 등 물리적 요인과 그로 인해 형성되는 에너지의 차이에 의해서 구성된다(Park, 2012). 건물에 의해 태양 복사에너지의 흡수 면적이 증가하고, 하늘시계지수(sky view factor, SVF) 감소에 의해 지구 복사에너지의 방사량이 증가하며, 풍속이 저감되는 등 도시 내 건축물과 수목의 위치, 형태, 물리적 성질 등이 도시 열환경 형성에 중요한 요인이 될 수 있다.

건축물이 도시 내 열환경에 미치는 영향을 분석하는 연구는 최근 다양하게 진행되고 있으며(Hong et al., 2007; Choi, 2016; Eom et al., 2018). 이러한 도시환경 내의 수목의 열환경 저감 효과 분석도 진행되어오고 있다(Jo et al., 2017; Ren et al., 2022; Shin, 2022). 최근에는 다양한 수목과 건물의 종횡비(aspect ratio, H/W)를 달리해 도로의 열환경 개선효과를 분석하는 연구가 진행되었다(Ali-Toudert and

Mayer, 2006; Morakinyo, 2016, 2017; Zhao et al., 2018).

이 연구는 사전에 제주시를 대상으로 도로 방향과 가로수 식재 형태에 따른 여름철 미기후 요소와 인간 열환경지수의 변화를 살펴본 바 (Lim et al., 2022) 있으나, 대한민국에서 제주 시와 가장 위도 차이가 크게 나는 한국의 수도이자 국민의 약 19%가 거주하는 지역인 서울특별시를 연구대상지로 지정해 그 결과를 비교·분석하여 보고자 한다. 따라서 본 연구는 도시 내 건물과 접한 도로의 방향과 다양한 가로수 식재 형태로 인한 여름철 도시 내 열환경 개선 효과를 최대로 도출하는 가로수 식재 방식을 확인하는 데 목적을 두고 있다.

연구방법

1. ENVI-met 시뮬레이션

미기후에서 열환경의 중요성이 대두되면서 수치 모델링을 이용하여 도시의 열환경을 평가하는 방법이 발전하고 있다(Toparlak et al., 2017). 본 연구에서는 공간 형태에 따른 미기

후 및 열환경의 변화를 관찰하기 위하여 도시 미기후와 인간 열환경 분석에 주로 이용되는 CFD 모델인 ENVI-met Version 5.5.1 (<https://www.envi-met.com>)을 활용하였다.

ENVI-met 시뮬레이션을 위한 공간입력자료는 Lim (2022)의 제주특별자치도 내 도시지역을 대상으로 조사된 도로 폭과 건물 높이 자료를 토대로, 도심 내 운행속도가 60km/h 미만인 것을 고려하여 왕복 4차선도로(일반도로)를 기준으로 설계하였다. 도로 공간(총 25m: 차도 15m, 보도 각각 5m)의 양쪽에 건물(높이 12m, 폭 10m, 길이 100m)을 세우고, 남-북(N-S), 동-서(E-W), 북동-남서(NE-SW), 북서-남동(NW-SE) 4개 방향으로 도로를 구성하였다(그림 1과 표 1).

TABLE 1. Variables of road types and directions

Variables		
Space	51m × 106m × 30m (grid cell: 1m × 1m × 1m)	
	road width = 25m	
Road	N-S (0°)	NE-SW (45°)
	E-W (90°)	NW-SE (135°)
Building	H 10m × W 12m × L 100m	

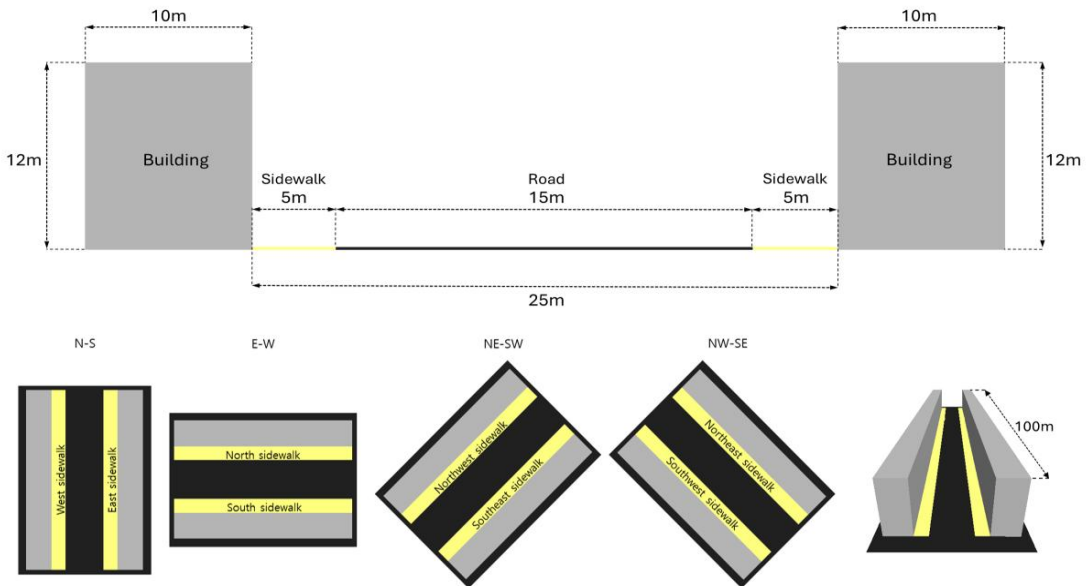


FIGURE 1. Description of area input data for ENVI-met simulation

TABLE 2. Tree planting variables and abbreviation

Height (H, m)	Crown width (W, m)	LAI (L)	Planting distance (D, m)	Abbreviation
6	7	1.5	8	H6W7L1.5D8
			12	H6W7L1.5D12
		9	3	8
	12			H6W7L3D12
	9		1.5	8
		12		H6W9L1.5D12
9		3	8	H6W9L3D8
	12		H6W9L3D12	
	10	7	1.5	8
12				H10W7L1.5D12
9			3	8
		12		H10W7L3D12
		9	1.5	8
12				H10W9L1.5D12
9	3		8	H10W9L3D8
		12	H10W9L3D12	

가로수 식재 시나리오는 Morakinyo et al.(2020)과 Lee and Mayer(2021)의 연구를 참고하여, 수목 특성인 수고(H: 6m, 10m), 수관폭(W: 7m, 9m), 엽면적 지수(leaf area index, LAI(L): 1.5, 3), 식재간격(D: 8m, 12m)을 변수로 설정하였고, 지하고는 3m로 하였다. 각 변수에 대한 수치는 Jo et al.(2017)의 연구에서 조사된 가로수 자료를 참조하였다. 이를 종합하여 16개의 수목 식재방식과 수목이 없는 경우(Notree)인 대조군을 더해 총 17개의 수목 식재 시나리오를 구성하였다(표 2). 도로 방향과 17개의 수목 식재 시나리오를 종합하여 총 68개의 시뮬레이션을 진행하였다.

기상 입력자료는 시간별 기온, 상대습도와 초기 풍향·풍속으로, 1991년부터 2020년까지 30년 동안의 서울시 여름철(6~8월) 일평균 기후를 조사하였고, 이와 가장 유사한 값을 가지는 날인 2004년 6월 30일의 자료를 사용하였다. 초기 풍향 자료와 풍속은 1991~2020년의 평균값인 북동풍(67.5°), 2.2 ms^{-1} 로 설정하였다(표 3). 기온, 상대습도는 서울특별시(지점

108)에 설치된 종관기상관측시스템(Automated Synoptic Observing System, ASOS)자료로부터 2004년 6월 30일 00:00~23:00 시간별 자료를 사용해 simple forcing을 설정하였다.

시뮬레이션 시간은 04:00부터 익일 20:59까지 총 15시간을 진행하였으며, 결과로는 여름철 하루 중 인간에게 가장 열환경이 극심한 시간인 10:00~16:00 시간대의 6시간 동안의 보도(인도) 부분의 평균값을 비교·분석하였다.

2. 인간 열환경지수

본 연구는 시뮬레이션의 결과로 미기후뿐만 아니라 인간 열환경지수에 대한 분석도 진행하였다. 공간적 구조와 환경 조건으로 조성된 열환경에서 인간은 열 수용체이다. 인간이 느끼는 열환경의 정량화는 열환경의 평가에 있어 중요한 지표로 이용될 수 있다(Coccolo et al., 2016). 1970년에 Fanger가 인간 열환경 연구의 기반인 PMV(predicted mean vote; Fanger, 1970)를 개발했고, 이후 개발된 실외

TABLE 3. Weather input data for ENVI-met simple forcing simulation

Input data			
Time	Air temperature (°C)	Relative humidity (%)	Wind speed (ms ⁻¹ , 10 m height)
04:00	21.5	87	2.2
05:00	21.2	88	(Wind direction: 67.5°)
06:00	21.5	86	
07:00	21.7	86	
08:00	22.2	84	
09:00	22.7	81	
10:00	24.5	70	
11:00	26.0	63	
12:00	26.7	62	
13:00	27.7	55	
14:00	27.7	59	
15:00	27.7	62	
16:00	28.6	60	
17:00	28.8	55	
18:00	27.6	66	
19:00	26.6	70	
20:00	25.6	72	
21:00	25.2	75	
22:00	24.7	77	
23:00	24.5	76	
00:00	21.7	84	
01:00	21.7	85	
02:00	21.7	85	
03:00	21.7	84	

지표인 PET(physiological equivalent temperature; Matzarakis et al., 1999), UTCI(universal thermal climate index; Brøde et al., 2012)가 현재 국제적으로 가장 활발하게 사용되는 인간 열환경 모델이다. 이 모델들은 미기후 요소(기온, 상대습도, 풍속, 평균복사온도)를 이용하여 실내·외 공간에서 인간이 느끼는 열환경을 분석하기 위해 이용되고 있다.

본 연구에서는 시뮬레이션 후 미기후 결과를 이용하여 인간 열환경지수인 PET와 UTCI를 ENVI-met의 BIO-met 기능을 사용해 계산하였다. 시나리오의 PET와 UTCI의 평균, 표준편차, 최대값과 저감비율 등을 구하기 위해 Microsoft Office 365 Excel을 이용하여 계산하였다. PET와 UTCI의 열환경지수 기준은 표 4와 같다.

TABLE 4. The levels of physiological equivalent temperature (PET) and universal thermal climate index (UTCI) (Matzarakis and Mayer, 1996; Jo et al., 2023)

Thermal perception	PET (°C)	UTCI (°C)	Grade of physiological stress
very cold	< 4	< -40	extreme cold stress
		-27 ~ -40	very strong cold stress
cold	4 ~ 8	-13 ~ -27	strong cold stress
cool	8 ~ 13	0 ~ -13	moderate cold stress
slightly cool	13 ~ 18	9 ~ 0	slight cold stress
neutral	18 ~ 23	9 ~ 26	no thermal stress
slightly warm	23 ~ 29		slight heat stress
warm	29 ~ 35	26 ~ 32	moderate heat stress
hot	35 ~ 41	32 ~ 38	strong heat stress
very hot	> 41	38 ~ 46	very strong heat stress
		> 46	extreme heat stress

연구결과

1. 실측자료와 ENVI-met 시뮬레이션 결과 검증

본 연구에서 이용한 시나리오는 실제 부지가 아니기 때문에 검증이 불가능하다. 대신, 시나리오의 기후자료와 대상지를 서울시로 설정했기 때문에 이전에 연구된 서울시에 위치한 아파트 단지(서울시 강서구 마곡서1로 100 마곡엠밸리)의 4개 부지(아파트 중심, 운동장, 놀이터,

가로수길)에서 측정된 자료와 이를 기반으로 작성된 시뮬레이션 자료의 결과값을 비교하였다 (Park et al., 2022) (그림 2). 4개 부지의 실측값과 시뮬레이션의 기온, 상대습도, 평균복사온도, 풍속, PET의 차이값을 비교하여 결정계수인 R^2 값을 확인한 결과, 풍속을 제외한 모든 요소에서 양호한 결과를 나타내어 신뢰성이 있다고 판단하였다.

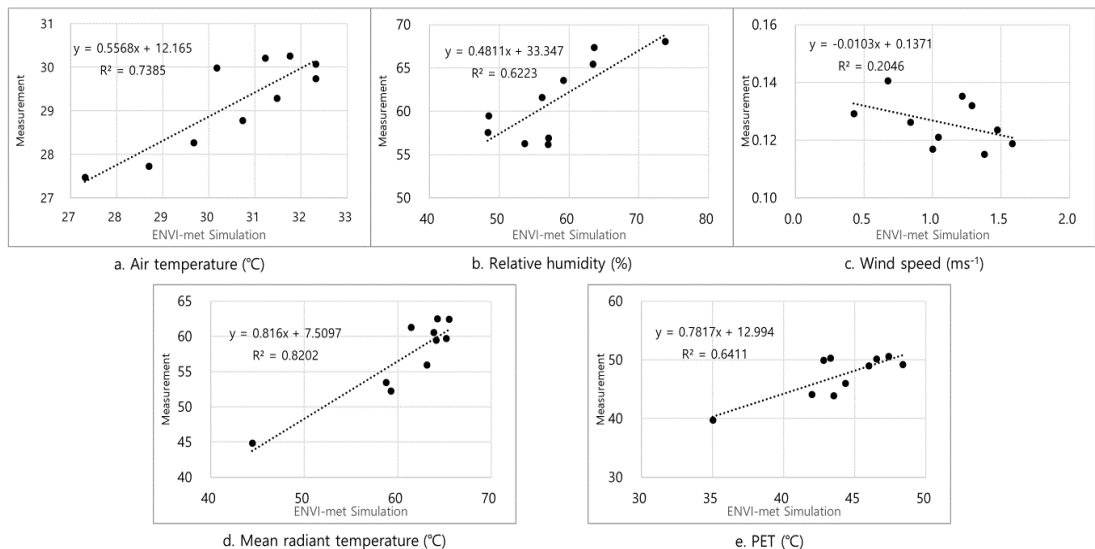


FIGURE 2. Comparison of measurements and ENVI-met simulation results

2. 시나리오별 미기후 요소 비교·분석

시나리오는 2004년 6월 30일 주간 10:00-16:00 동안을 비교하였다. 모든 시나리오의 평균 기온은 28.6-31.0°C, 상대습도는 46.9-55.4%, 풍속은 0.7-0.9 ms⁻¹, 평균복사온도는 32.2-59.7°C 값을 보였다. 북-남(N-S), 동-서(E-W), 북동-남서(NE-SW), 북서-남동(NW-SE) 4방향의 시나리오 평균값을 비교한 결과, H6W9L3D8[수고(H) 6m, 수관폭(W) 9m, 엽면적지수(L) 3, 식재간격(D) 8m]에서 가장 낮은 기온(28.6°C), 가장 높은 상대습도(53.9%), 가장 약한 풍속(0.7 ms⁻¹), 가장 낮은 평균복사온도(32.2°C)를 보여주어, Notree와 가장 큰 차이값을 보이는 것으로 나타났다.

기온의 경우, 전체 시나리오 평균값을 각 방향의 대조군인 Notree와 비교해 볼 때, 수목을 식재했을 경우인 모든 시나리오에서 기온이 감소하였다. 전체 시나리오 중 가장 낮은 온도 값을 나타내는 시나리오는 4방향 모두 H6W9L3D8이었다. 가장 낮은 값을 보인 시나리오는 북-남 방향의 동측 보도의 H6W9L3D8(28.2°C)로 수목이 없는 경우보다 평균 1.5°C 낮았다. 수관폭이 넓고, 엽면적 지수가 높으며, 식재간격이 좁은 경우가 비교적 더 크고 짙은 그늘을 조성해 기온을 저감시킨 것으로 보인다. 전체 시나리오의 변수를 비교했을 때, 기온 저감량이 수고 6m가 10m보다 낮은 값을, 수관폭 9m가 7m보다 낮은 값을, 엽면적 지수 3.0이 1.5보다 낮은 값을, 식재거리 8m가 12m보다 낮은 값을 나타냈다. 기온이 낮게 나온 곳은 건물과 교목의 그림자 영향으로 유입되는 태양 복사에너지의 양이 줄어 기온 역시 낮아진 것으로 해석된다.

상대습도는 모든 시나리오에서 증가하였다. 전체 시나리오 중 가장 낮은 상대습도 값을 나타내는 시나리오는 방향마다 차이를 보였고, 전 방향 중 가장 낮은 값을 보인 시나리오는 북서-남동 방향의 남서측 보도의 H10W9L3D12(45.8%)로 수목이 없는 경우보

다 평균 3.8% 높았다. 이는 수고가 높고, 식재간격이 넓어 비교적 기온이 높아 상대적으로 상대습도가 낮아진 것으로 보인다. 전체 시나리오의 변수를 비교했을 때, 상대습도 저감량이 수고 10m가 6m보다 낮은 값을, 수관폭 7m가 9m보다 낮은 값을, 엽면적 지수 1.5가 3.0보다 낮은 값을, 식재거리 12m가 8m보다 낮은 값을 나타냈다. 기온과 상대습도의 관계는 반비례 추세를 띄었다.

풍속은 모든 시나리오에서 감소하였다. 특히, 전체 시나리오가 초기 입력값인 2.2 ms⁻¹보다 낮은 값을 나타냈다. 전체 시나리오 중 가장 높은 풍속을 나타내는 시나리오는 주로 H10W7L1.5D12였다. 전 방향 중 가장 높은 풍속을 나타낸 시나리오는 북동-남서 방향 도로의 북서측 보도의 H10W7L1.5D12(1.2 ms⁻¹)였고, 수목이 없는 경우보다 0.06ms⁻¹ 낮은 것으로 나타났다. 전체 시나리오의 변수를 비교했을 때, 풍속이 수고 10m가 6m보다 높은 값을, 수관폭 7m가 9m보다 낮은 값을, 엽면적 지수 1.5가 3.0보다 낮은 값을, 식재거리 12m가 8m보다 낮은 값을 나타냈다.

평균복사온도의 시나리오별 분포는 그림 3과 같았다. 전체 시나리오 평균값을 각 방향의 Notree와 비교해 보면, 모든 시나리오에서 감소하였다. 전체 시나리오 중 가장 낮은 평균복사온도 값을 나타낸 시나리오는 4방향 모두에서 H6W9L3D8이었다. 전 방향 중 가장 낮은 평균복사온도를 나타낸 시나리오는 북동-남서 방향의 북서측 보도의 H6W9L3D8(31.5°C)로, 수목이 없는 경우보다 22.1°C 낮은 것으로 나타났다. 전체 시나리오의 변수를 비교했을 때, 평균복사온도 저감량이 수고 6m가 10m보다 높은 값을, 수관폭 9m가 7m보다 높은 값을, 엽면적 지수 3.0이 1.5보다 높은 값을, 식재거리 8m가 12m보다 높은 값을 나타냈다. 평균복사온도는 기온과 비례하게 넓은 수관폭, 높은 엽면적 지수와 좁은 식재간격이 비교적 크고 짙은 그늘을 조성해 온도의 저감으로 이어졌다고 유추할 수 있다.

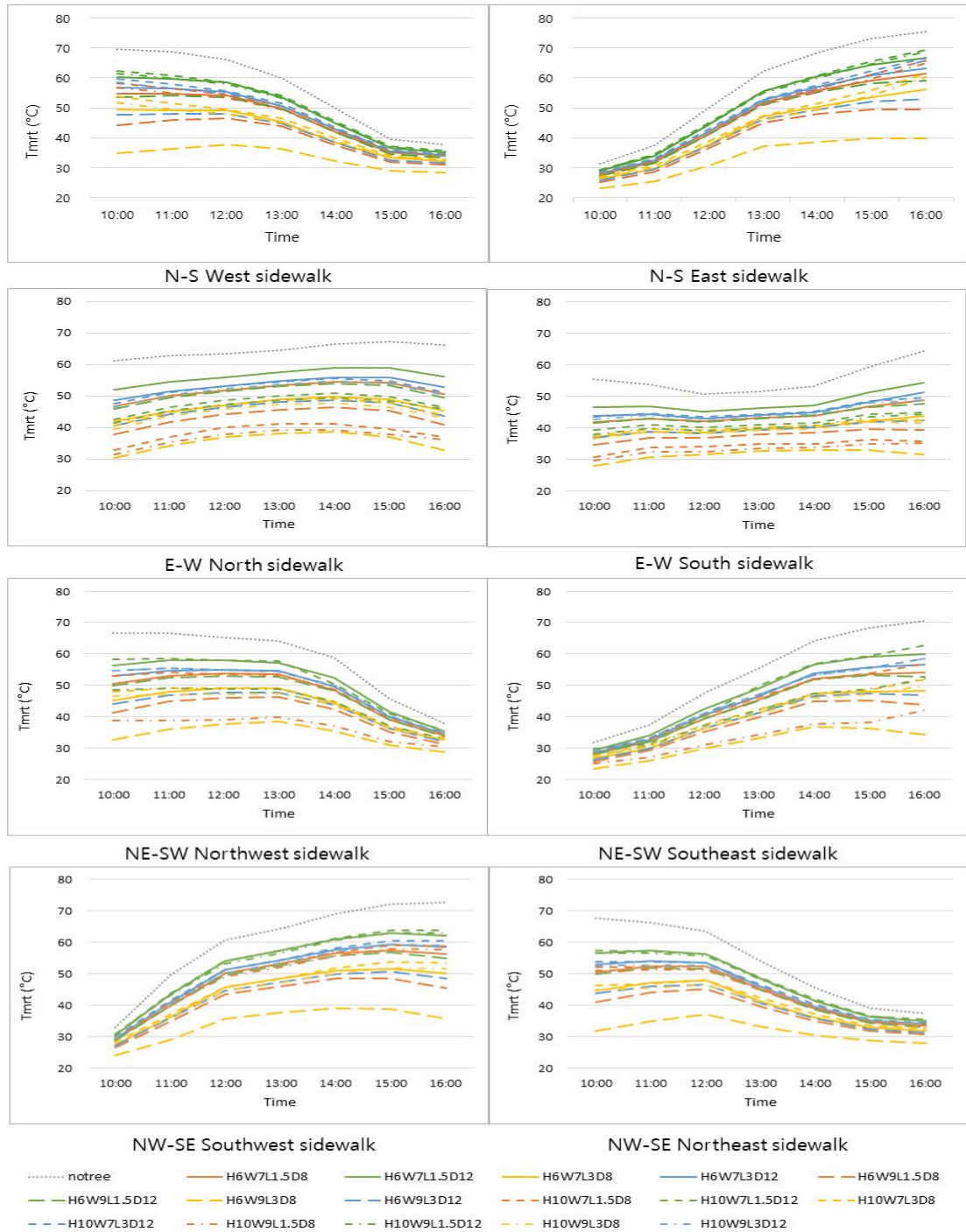


FIGURE 3. Comparison of mean radiant temperature by scenario. T_{mrt} means mean radiant temperature

3. 시나리오별 인간 열환경지수(PET, UTCI) 비교·분석

모든 시나리오의 10:00-16:00 동안의 평균 PET는 32.6-47.7℃로 ‘따뜻함(warm)’ ~ ‘매우 더움(very hot)’, UTCI는 29.5-39.3℃로 ‘적당한 열 스트레스(moderate heat stress)’ ~ ‘매우 강한 열 스트레스(very strong heat stress)’ 값을 보였다. 도로 4방향의 시나리오 평균값을 비교한 결과, H6W9L3D8가 PET와 UTCI에서 가장 낮은 결과를 보여, Notree와 비교했을 때 가장 큰 열환경 개선효과를 보이는 것으로 나타났다.

PET의 경우, 시나리오 평균값을 각 방향의 대조군인 Notree와 비교했을 때, 수목을 식재했을 경우인 모든 시나리오에서 PET가 감소하였다(그림 4). 전체 시나리오 중 가장 낮은 PET 값을 보인 시나리오는 4방향 모두에서 H6W9L3D8이었다. 가장 낮은 값은 동-서 방향의 남측 보도에서 H6W9L3D8(32.6℃)로 Notree보다 10.26℃ 낮게 나타났으나, 저감량이 가장 큰 시나리오는 동-서 방향의 북측 보도에서 H6W9L3D8(34.8℃)이 Notree보다 12.9℃ 낮아 ‘매우 더움(very hot)’에서 ‘따뜻함(warm)’으로 2단계 하락한 것으로

나타났다. 전체 시나리오의 변수를 비교했을 때, PET 저감량이 수고 6m가 10m보다, 수관폭 9m가 7m보다, 엽면적 지수 3.0이 1.5보다, 식재거리 8m가 12m보다 큰 것으로 나타났다.

UTCI도 시나리오 평균값을 각 방향의 대조군인 Notree와 비교했을 때, 수목을 식재했을 경우인 모든 시나리오에서 UTCI가 감소하였다(그림 5). 전체 시나리오 중 가장 낮은 UTCI 값을 나타내는 시나리오는 4방향 모두에서 H6W9L3D8이었다. 가장 낮은 값을 보인 시나리오는 북동-남서 방향의 남동측 보도의 H6W9L3D8(29.5℃)로 Notree보다 6.2℃ 낮아 ‘강한 열 스트레스(strong heat stress)’에서 ‘적당한 열 스트레스(moderate heat stress)’로 1단계 하락한 것으로 나타났다. 저감량이 가장 큰 시나리오는 동-서 방향의 북측 보도의 H6W9L3D8(31.2℃)로 Notree보다 8.1℃ 낮아 ‘매우 강한 열 스트레스(very strong heat stress)’에서 ‘적당한 열 스트레스(moderate heat stress)’로 2단계 하락한 것으로 나타났다. 전체 시나리오의 변수를 비교했을 때, UTCI 저감량도 PET와 동일하게 수고 6m, 수관폭 9m, 엽면적 지수 3.0, 식재거리 8m가 큰 것으로 나타났다.

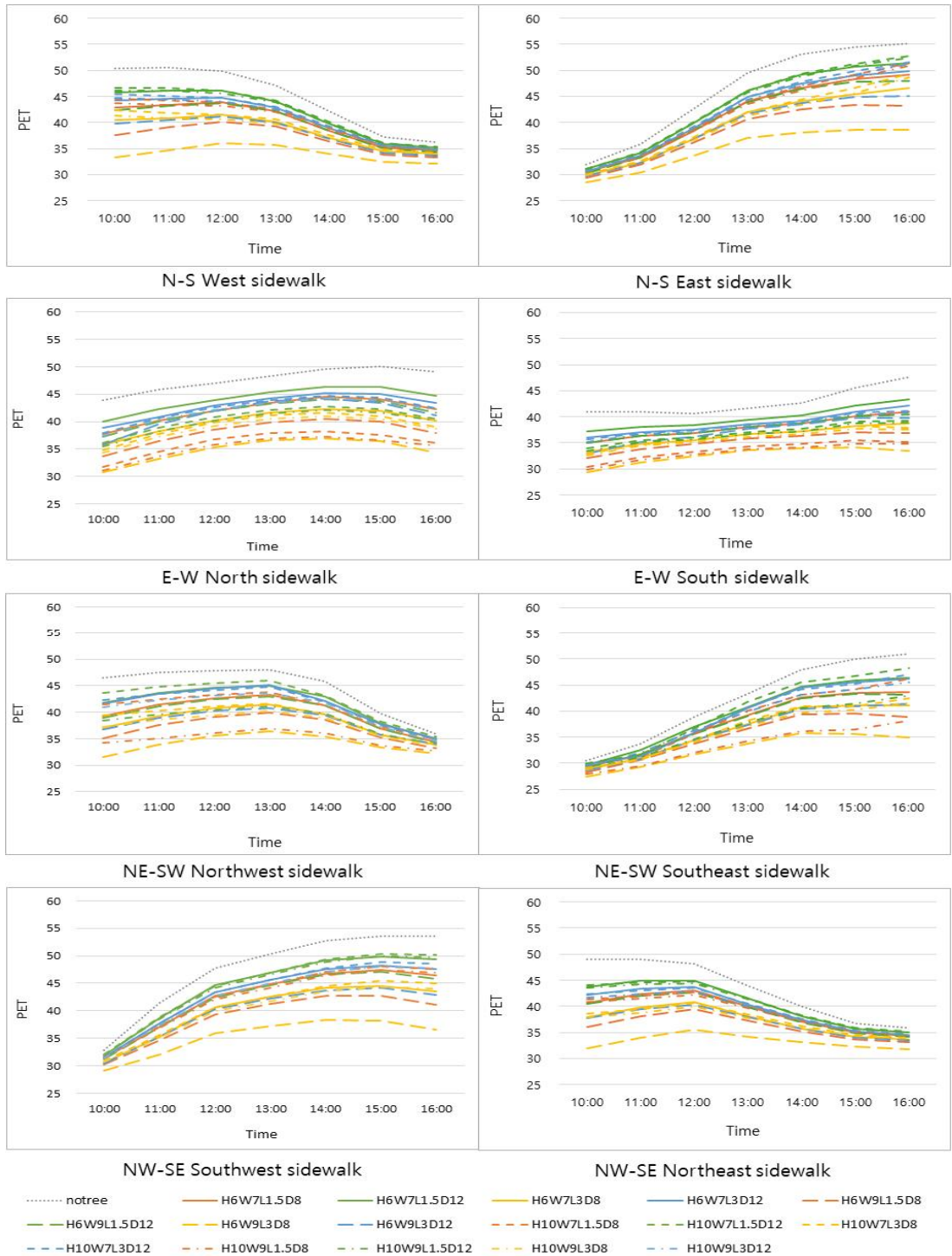


FIGURE 4. Comparison of PET by scenarios

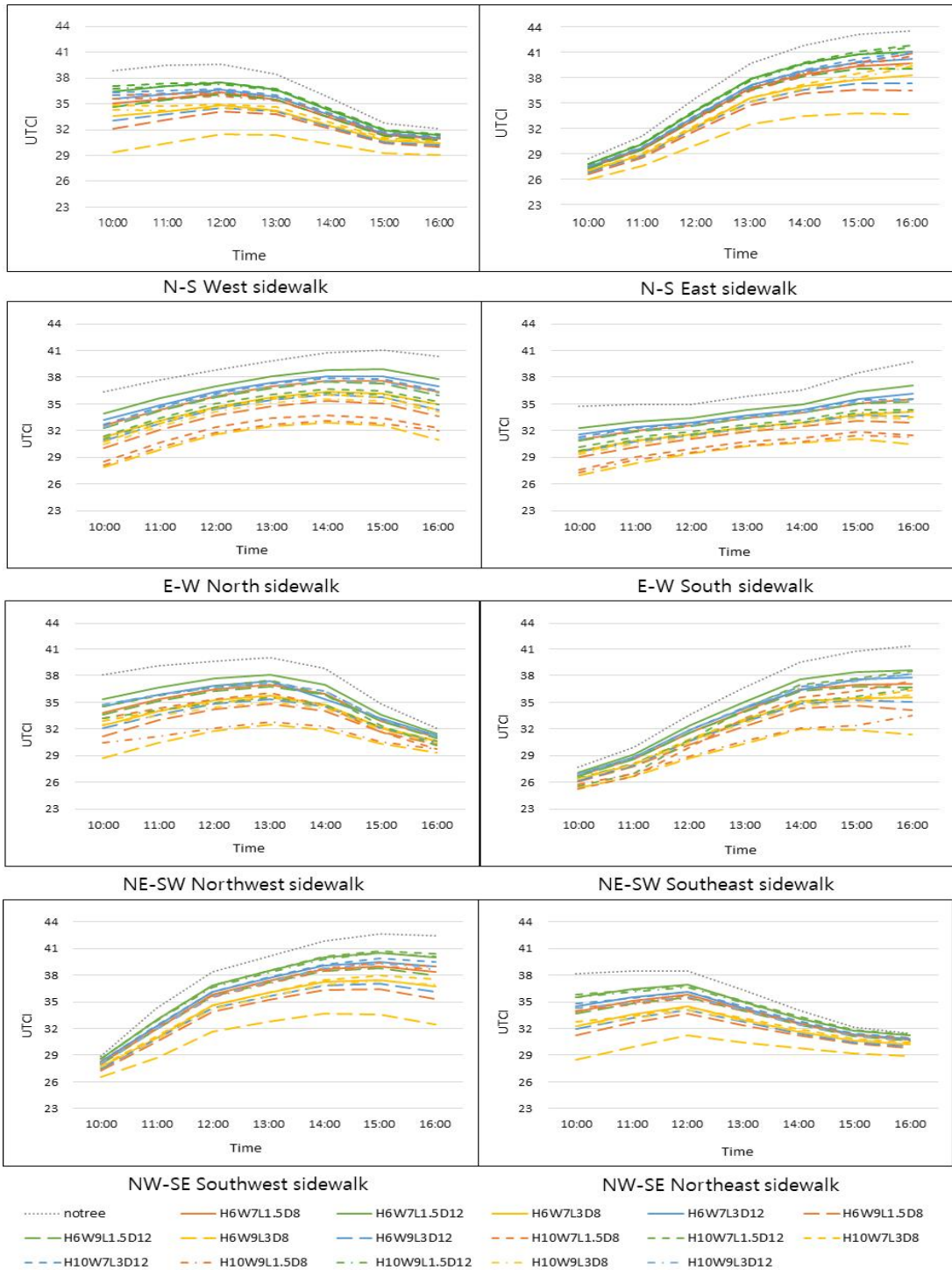


FIGURE 5. Comparison of UTCI by scenarios

4. 방향별 미기후 요소 비교·분석

전체 시나리오를 Notree와 비교했을 때, 기온이 가장 많은 차이를 보인 것은 동-서 방향 도로의 북측 보도로 나타났다(그림 6). 그 중 가장 기온 저감량이 높았던 시나리오는 H6W9L3D8로, Notree보다 1.9°C 낮았다.

상대습도가 가장 작은 차이를 보인 것은 남-북 방향 도로의 동측 보도로 나타났다. 그 중 가장 상대습도 저감량이 작은 시나리오는 H10W7L1.5D12로, Notree보다 0.7% 높았다.

풍속에서 가장 작은 차이를 보인 보도는 시물레이션의 초기 풍향자료가 북동풍(67.5°)으로 설정되어 거의 직각을 이루는 남-북 방향 도로의 동측 보도와 북서-남동 방향 도로의 남서측 보도로 나타났다. 그 중 가장 풍속의 저감이 가장 작은 시나리오는 H10W7L1.5D12로, Notree보다 0.01 ms⁻¹ 낮았다. 풍속의 저감이 가장 컸던 보도는 동-서 방향 도로의 남측 보

도로 풍향과 평행한 도로의 영향으로, H6W9L3D8에서 최대 0.32 ms⁻¹ 저감되는 것으로 나타났다. 풍속은 다른 미기후 요소와는 달리 조성 지역의 풍향과 연관성이 높으며, 건물에 의해 풍속이 줄어드는 경우에는 수목 식재에 의한 풍속 저감은 약해지고, 풍향과 평행한 도로에서는 수목 식재에 의한 풍속의 저감이 큰 것으로 나타났다.

평균복사온도가 가장 많은 차이를 보인 것은 동-서 방향 도로의 북측 보도로 나타났다. 그 중 가장 평균복사온도 저감량이 많은 시나리오는 H6W9L3D8로, Notree보다 29.1°C 낮았다.

미기후 요소를 종합적으로 보았을 때, 기온과 평균복사온도에서는 동-서 방향 도로의 북측 보도의 시나리오가 가장 큰 저감효과를 보였고, 상대습도와 풍속에서는 남-북 방향 도로의 동측 보도의 시나리오가 가장 적은 저감량을 보였다.

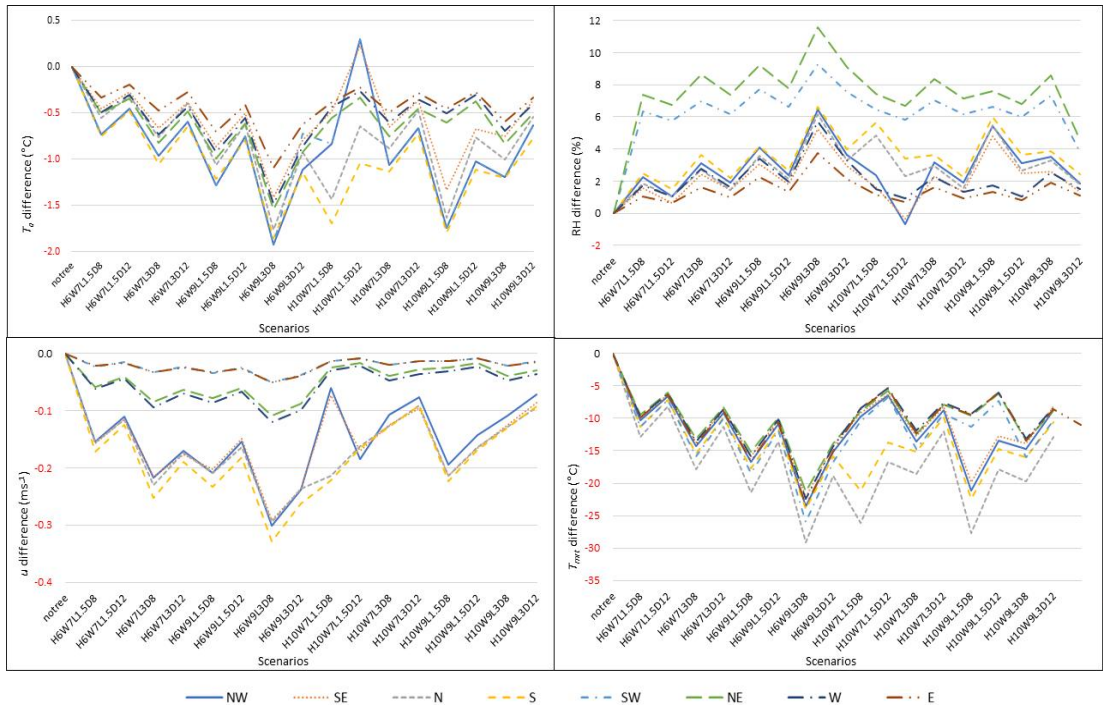


FIGURE 6. Comparison of average microclimate factors by sidewalk directions. NW, SE, N, S, SW, NE, W, and E indicate sidewalk directions

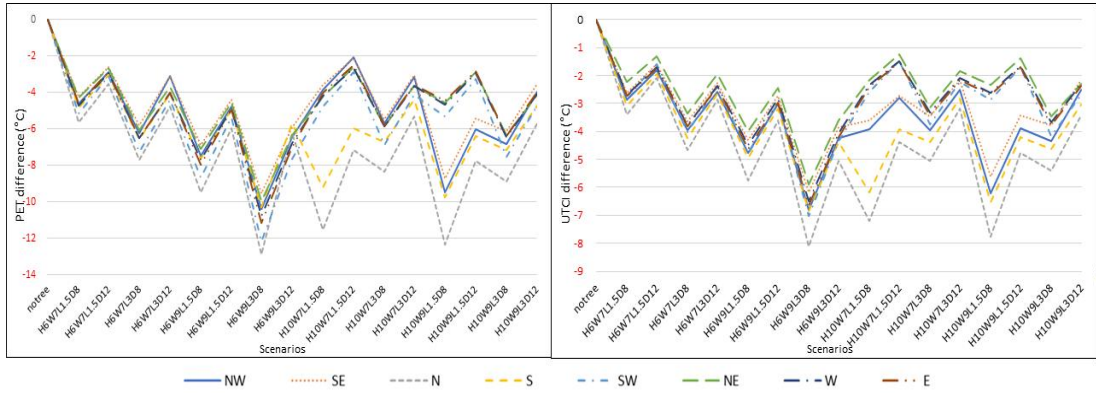


FIGURE 7. Comparison of average PET and UTCI by sidewalk directions. NW, SE, N, S, SW, NE, W, and E indicate sidewalk directions

5. 방향별 인간 열환경지수(PET, UTCI)

고찰

비교·분석

Notree와 비교했을 때, PET가 가장 많은 차이를 보인 것은 동-서 방향 도로의 북측으로 나타났다(그림 7). 그 중 가장 PET 저감량이 큰 시나리오는 H6W9L3D8로, Notree보다 12.9°C 낮아 ‘매우 더움(very hot)’에서 ‘따뜻함(warm)’으로 2단계 하락한 것으로 나타났다. 해당 부지에서 상대습도는 미미한 차이를 보였지만, 다른 보도 방향의 평균과 비교했을 때, 기온이 낮고, 풍속이 빠르며, 평균복사온도가 낮은 부분이 최저 PET 값을 보인 요인으로 해석된다.

UTCI가 가장 많은 차이를 보인 것은 동-서 방향 도로의 북측으로 나타났다. 그 중 가장 UTCI 저감량이 큰 시나리오는 H6W9L3D8로, Notree보다 8.1°C 낮아 ‘매우 강한 열 스트레스(very strong heat stress)’에서 ‘적당한 열 스트레스(moderate heat stress)’로 2단계 하락한 것으로 나타났다.

PET와 UTCI 두 지수 모두 동-서 방향 도로의 북측 시나리오가 가장 개선된 결과를 보였다. PET와 UTCI는 비례관계를 보였으며, PET 결과값에서 나타난 최고 온도-최저 온도 순서가 UTCI에서도 유사하게 나타났다.

수목 식재 후 기온, 상대습도, 풍속의 변화는 미미하였으나 평균복사온도는 저감효과가 뚜렷하였다. 이에 따라 인간 열환경지수인 PET와 UTCI도 수목 식재 시 저감효과를 보였다. 이는 수목 식재 시 그늘이 조성되어 평균복사온도가 낮아진 것으로 보이며, 이전 연구에서 수목의 식재면적이 넓어질수록 평균복사온도의 감소량이 크고, 이에 따라 인간 열환경지수의 감소로 이어지는 결과와 동일한 결과를 보였다(Ren et al., 2022; Shin, 2022). 또한, 인간 열환경지수에 영향을 미친 요인이 기온보다 평균복사온도의 저감인 결과가 수목 밀도가 높을수록 기온보다 PET 저감에 영향을 더 미쳤던 이전의 연구와 동일하였다(Zhao, 2018). 이를 통해 열쾌적성을 증진하기 위해서는 수목(교목)을 식재하여 그늘을 확보해 평균복사온도를 낮추는 것이 중요하다. 이때 낮은 수고, 넓은 수관폭을 가진 수목을 식재간격을 비교적 좁게 식재하면 더 넓은 그늘면적을 확보해 효율적으로 태양 복사에너지 차단해 평균복사온도를 낮출 수 있다.

본 연구에서는 엽면적 지수가 높은 수목 형태가 열환경 저감에 더욱 효과적이었고, 이는 다른 연구와 동일하였다(Zhao, 2018; Lim et al., 2022; Ren et al., 2022; Shin, 2022). 하지

만, 고층 건물일수록 낮은 엽면적 지수를 가진 수목을 식재해 환기 차단효과를 줄여야 한다는 연구와는 차이를 보여 건물의 태양 복사에너지 차단 정도에 따른 최적 엽면적 지수값에 대해서도 고려할 필요성이 있다고 하겠다(Morakinyo et al., 2017).


풍속의 경우, 북동-남서 도로 방향과 동-서 도로 방향의 시나리오가 초기 설정값인 동북동풍(67.5°)으로 인해 가장 높았는데, 이는 공간의 바람길과 풍향이 비슷해 풍속의 저감이 가장 적었던 것으로 보인다. 이는 도심 내 공간 구성 초기단계에 도로의 방향을 해당 지역의 여름철 주 풍향과 같게 설계해 풍속의 저감을 낮추면 열환경이 보다 개선될 것으로 생각된다.

먼저 진행되었던 연구(Lim et al., 2022)에서는 제주시를 대상으로 도로 방향과 가로수 식재 형태에 따른 여름철 열환경 저감효과를 비교·분석했는데, 본 연구와 마찬가지로 열환경 저감효과의 가장 큰 영향은 그늘에 의한 태양 복사에너지의 감소인 것으로 나타났다(Lim et al., 2022). 하지만 앞선 연구는 도로의 가로길이와 건물과의 중횡비(aspect ratio)를 변수로 두어 보다 많은 영향을 고려할 수 있었다. 이전에 건축물과 가로수의 열환경 저감 관계를 확인하는 연구(Zhao et al., 2018)에서, 공간 내 건축물의 높이와 도로의 폭인 중횡비에 따라 최적의 수목식재형태가 다른 점을 보여, 중횡비도 도심 내 열환경에 영향을 미치는 요소임을 알 수 있다.

본 연구에서는 변수를 도로 방향, 수고, 수관폭, 엽면적 지수, 식재간격 총 5가지로만 한정해 상대적 차이를 비교했기 때문에 최적의 식재형태를 분석하기에는 한계가 있다. 좀 더 다양한 수목 변수값, 수형, 지하고, 도로의 중횡비(aspect ratio) 등에 대한 비교 연구도 요구된다. 또한, 고층건물이 많이 분포하고 있는 서울시의 식재효과를 분석하기 위해서는 현 시나리오 내에 건물의 높이를 반영하지 못한 데에 아쉬움이 있어 이에 대한 추가적인 분석이 필요하다.

결론

도시 안에서 건물과 접한 도로의 방향과 가로수 식재 형태의 변화에 따른 서울시 여름철 열환경 개선 효과의 차이를 비교·분석해 보고자 하였다. 연구 결과, 가장 적합한 가로수 식재 형태는 도로 방향에 관계없이 수고 6m, 수관폭 9m, 엽면적 지수 3.0, 식재 간격 8m인 것으로 나타나, 수고가 낮고, 수관폭이 넓으며, 엽면적 지수가 높고, 식재간격이 좁은 형태가 도심 내 열환경 개선에 가장 효과적인 가로수 식재 형태라고 해석할 수 있다. 도로의 방향에 가장 큰 영향을 미친 요소는 도로와 접한 건물의 그늘에 의한 태양직사광선의 차단에 의해 평균복사온도가 감소한 것으로 보이며, 수목 식재 효과는 도로의 방향에 따라 상이하게 나타났다. 도로는 해당 지역의 주 풍향에 따라 바람길을 조성해 풍속이 저감되지 않는 방향으로 설계하고, 수고가 비교적 낮고, 수관폭이 넓고, 엽면적 지수가 높은 가로수를 식재거리를 좁게 배치하는 것이 도로의 열환경을 개선하는데에 유리한 것으로 나타났다. 도시 설계 초기에 도로의 방향과 공간의 특성에 맞는 가로수의 품종 선정, 효율적인 수목 배치 등을 고려해 식재하면 가로수를 통한 열환경 개선효과를 얻을 수 있을 것으로 예상된다.

본 연구는 컴퓨터 시뮬레이션 내 시나리오 공간이 실제로 도시화된 지역보다 작고 단순하게 구성되어 실제 지역과 비교했을 때 건축물의 영향이 과소평가되었고, 영향을 미칠 수 있는 다른 도시 구성요소가 배제된 채, 설정한 변수만으로 수행되어 실제 환경과는 차이가 있다는 한계를 지니고 있다. 이에 대해 실제 대상지를 실측한 후, 건축물 등 기존의 공간을 토대로 시나리오를 제작해 도로 방향과 가로수 식재 형태의 변화에 따른 결과를 비교·분석하는 등 추가적인 연구가 필요하다. 

REFERENCES

- Ali-Toudert, F. and H. Mayer. 2006. Numerical study on the effects of aspect ratio and orientation of an urban street canyon on outdoor thermal comfort in hot and dry climate. *Building and Environment* 41(2):94-108.
- Bae, W. and J. Lee. 2024. Assessing temperature and wind speed dynamics by building cluster type: Simulation of cold air spread along the han river during a heatwave in the Heukseok-dong area of Dongjak-gu, Seoul. *Architectural Institute of Korea* 40(1):157-168 (배웅규, 이재준. 2024. 폭염기 한강변 저온공기의 확산에 따른 건축물 군집유형별 온도 및 풍속 변화 시뮬레이션 연구-서울시 동작구 흑석동 일대를 대상으로. *대한건축학회 논문집* 40(1):157-168).
- Bröde, P., Krüger, E.L., Rossi, F.A. and D. Fiala. 2012. Predicting urban outdoor thermal comfort by the Universal Thermal Climate Index UTCI-A case study in Southern Brazil. *International Journal of Biometeorology* 56:471-480.
- Chang, C.R. and M.H. Li. 2014. Effects of urban parks on the local urban thermal environment. *Urban Forestry and Urban Greening* 13(4):672-681.
- Choi, H.J. 2016. A study on the stability of the thermal environment in the city using a micrometeorological urban model (ENVI-met). *Journal of the Korean Society of Architectural Eco-Friendly Facilities* 10(6):416-427 (최현정. 2016. 미기상 도시모델(ENVI-met)을 이용한 도시 내 열환경 안정도 연구. *한국건축친환경설비 학회 논문집* 10(6):416-427).
- Coccolo, S., Kämpf, J., Scartezzini, J.L. and D. Pearlmutter. 2016. Outdoor human comfort and thermal stress: A comprehensive review on models and standards. *Urban Climate* 18:33-57.
- Coutts, A.M., White, E.C., Tapper, N.J., Beringer, J. and S.J. Livesley. 2016. Temperature and human thermal comfort effects of street trees across three contrasting street canyon environments. *Theoretical and Applied Climatology* 124:55-68.
- Dwyer, J.F., McPherson, E.G., Schroeder, H.W. and R.A. Rowntree. 1992. Assessing the benefits and costs of the urban forest. *Journal of Arboriculture* 18:227-227.
- Eom, Y.S., Kim, Y.J. and D.H. Kang. 2018. Effect of high-rise apartment building shape and densities on outdoor thermal environment by floor in summer season. *Journal of Korean Institute of Architectural Sustainable Environment and Building Systems* 12(2):87-100 (엄예슬, 김용진, 강동화. 2018. 여름철 고층아파트 건물의 주동형태와 밀도가 층별 외부 열 환경에 미치는 영향. *한국건축친환경설비학회 논문집* 12(2):87-100).
- Fanger, P.O. 1970. Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering. Danish Technical Press. 244 pp.
- Guo, Y., Ren, Z., Wang, C. Zhang, P., Ma, Z., Hong, S., Hong, W., and X. He. 2024. Spatiotemporal patterns of urban forest carbon sequestration capacity: Implications for urban CO2 emission

- mitigation during China's rapid urbanization. *Science of The Total Environment* 912:168781.
- Hong, W.H., Lee, K.G. and W.D. Seo. 2007. Simulation of urban temperature characteristics and thermal environment according to land use conditions. *Journal of the Architectural Institute of Korea* 23(9):139-146 (홍원화, 이강국, 서원덕. 2007. 토지이용상태에 따른 도시 기온 특성과 열환경 시뮬레이션. *대한건축학회논문집* 23(9):139-146).
- Jeong, M.A., Park, S.J. and G.S. Song. 2016. Comparison of human thermal responses between the urban forest area and the central building district in Seoul, Korea. *Urban Forestry and Urban Greening* 15:133-148.
- Jeong, S.K. and K.H. Park. 1999. Analysis on urban heat island effects for the metropolitan green space planning. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* 2(3):35-45 (정성관, 박경훈. 1999. 광역적 녹지계획 수립을 위한 도시열섬효과 분석. *한국지리정보학회지* 2(3):35-45).
- Jo, S., Kong, H., Choi, N., Shin, Y. and S. Park. 2023. Comparison of the thermal environment by local climate zones in summer: A case study in Suwon, Republic of Korea. *Sustainability* 15(3): 2620.
- Jo, S.M., Hyeon, C.J. and S.K. Park. 2017. Analysis of the influence of street trees on human thermal sensation in summer. *Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture* 45(5):105-112 (조상만, 현철지, 박수국. 여름철 열환경지수에 미치는 가로수의 영향 분석. 2017. *한국조경학회지* 45(5):105-112).
- Kim, D.W., Kim, J.K. and E.H. Jeong. 2010. Analysis of changes in microclimate environment due to urban park creation: Targeting Jung-gu, Daegu metropolitan city. *Journal of the Korean Society of Urban Design* 11(2):77-94 (김대욱, 김중권, 정용호. 2010. 도시공원 조성에 따른 미기후환경의 변화 분석: 대구광역시 중구를 대상으로. *한국도시설계학회지* 11(2):77-94).
- Kim, D.Y. 2011. The relationship of change of land cover and surface temperature using satellite images in Incheon. *The Geographical Journal of Korea* 45(3):493-501 (김대영. 2011. 위성영상을 이용한 토지피복과 지표온도 변화의 관계: 인천시를 사례로. *국토지리학회지* 45(3):493-501).
- Lai, D., Liu, W., Gan, T., Liu, K. and Q. Chen. 2019. A review of mitigating strategies to improve the thermal environment and thermal comfort in urban outdoor spaces. *Science of the Total Environment* 661:337-353.
- Lee, H. and H. Mayer. 2021. Solar elevation impact on the heat stress mitigation of pedestrians on tree-lined sidewalks of E-W street canyons—Analysis under Central European heat wave conditions. *Urban Forestry & Urban Greening* 58:126905.
- Lee, K.J. and M.H. Jo. 2004. Analysis of urban surface temperature distribution properties using spatial information technologies. *Korean Journal of Remote Sensing* 20(6):397-408 (이광재, 조명희. 2004. 공간정보기술을 활용한 도시지역 지표온도 분포 특성 해석. *대한원격탐사학회지* 20(6):397-408).

- Lim, H.W. 2022. Comparison and analysis of thermal environment modification effects of street tree planting types in summer according to road directions—based on Jeju city. Master thesis, Jeju National University (임현우. 2022. 도로 방향과 가로수 식재 형태에 따른 여름철 열환경 저감효과 비교·분석-제주시를 대상으로. 석사학위논문, 제주대학교).
- Lim, H.W., Jo, S.M. and S.K. Park. 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):1-22 (임현우, 조상만, 박수국. 2022. ENVI-Met 시뮬레이션을 통한 도로 방향별 가로수 식재 형태에 따른 여름철 열환경 개선 효과 분석. *한국조경학회지* 50(2):1-22).
- Matzarakis, A. and H. Mayer (1996) Another kind of environmental stress: thermal stress. WHO Collaborating Centre for Air Quality Management and Air Pollution Control Newsletters 18:7-10.
- Matzarakis, A., Mayer, H. and M.G. Iziomon. 1999, Applications of a universal thermal index: physiological equivalent temperature. *International Journal of Biometeorology* 43:76-84.
- Morakinyo, T.E., Kong, L., Lau, K.L., Yuan, C. and E. Ng. 2017. A study on the impact of shadow-cast and tree species on in-canyon and neighborhood's thermal comfort. *Building and Environment* 115:1-17.
- Morakinyo, T.E., Ouyang, W., Lau, K.K.L., Ren, C. and E. Ng. 2020. Right tree, right place (urban canyon): Tree species selection approach for optimum urban heat mitigation—development and evaluation. *Science of The Total Environment* 719:137461.
- Morakinyo, T.E. and Y.F. Lam. 2016. Simulation study on the impact of tree-configuration, planting pattern and wind condition on street-canyon's micro-climate and thermal comfort. *Building and Environment* 103:262-275.
- Park, M.S., Hagishima, A., Tanimoto, J. and K. Narita. 2012. Effect of urban vegetation on outdoor thermal environment: Field measurement at a scale model site. *Building and Environment* 56:38-46.
- Park, S.K. 2012. Landscape planning and design methods with human thermal sensation. *Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture* 40(1):1-11 (박수국. 2012. 인간 열환경지수를 이용한 조경계획 및 디자인 방법. *한국조경학회지* 40(1):1-11).
- Park, S.K., Hyeon, C.J. and H. Kang. 2022. Analysis of human thermal environment in an apartment complex in late spring and summer - Magok-dong, Gangseo-gu, Seoul. *Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture* 50(1):68-77 (박수국, 현철지, 강훈. 2022. 아파트 단지의 늦봄, 여름철 인간 열환경 분석 - 서울특별시 강서구 마곡동. *한국조경학회지* 50(1):68-77).
- Ren, Z., Zhao, H., Fu, Y., Xiao, L. and Y. Dong. 2022. Effects of urban street trees on human thermal comfort and physiological indices: a case study in Changchun city, China. *Journal of*

- Forestry Research 33(3):911–922.
- Sanusi, R., Johnstone, D., May, P. and S.J. Livesley. 2017. Microclimate benefits that different street tree species provide to sidewalk pedestrians relate to differences in Plant Area Index. *Landscape and Urban Planning* 157:502–511.
- Sharmin, M., Tjoelker, M.G., Pfautsch, S., Esperon–Rodriguez, M., Rymer, P.D. and S.A. Power. 2023. Tree crown traits and planting context contribute to reducing urban heat. *Urban Forestry and Urban Greening* 83:127913.
- Shin J.H. 2022. Analysis of thermal environment depending on tree shape, leaf area index and planting rate in summer daytime : Jeju–si, Jeju Special Self–Governing Province. Master Thesis, Univ. of Jeju, Jeju, Korea. 39 pp (신지환. 2022. 여름철 주간 수목의 수형, 지엽밀도, 식재량에 따른 열환경 분석. 제주대학교 일반대학원 석사학위논문. 39쪽).
- Song, B.G. and K.H. Park. 2012. Analysis of heat island characteristics considering urban space at nighttime. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* 15(1):133–143 (송봉근, 박경훈. 2012. 도시공간을 고려한 야간시간대의 열섬특성 분석. *한국지리정보학회지* 15(1):133–143).
- Toparlar, Y., Blocken, B., Maiheu, B. and G.J.F Van Heijst. 2017. A review on the CFD analysis of urban microclimate. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 80:1613–1640.
- Yoon, H.C., Kim, M.K. and G.Y. Jeong. 2013. Analysis of temperature change by forest growth for mitigation of the urban heat island. *Journal of The Korean Society of Survey, Geodesy, Photogrammetry and Cartography* 31(2):143–150 (윤희천, 김민규, 정갑용. 도시열섬 완화를 위한 녹지증가에 따른 온도변화 분석. *한국측량학회지* 31(2): 143–150).
- Zhao, Q., Sailor, D.J. and E.A. Wentz. 2018. Impact of tree locations and arrangements on outdoor microclimates and human thermal comfort in an urban residential environment. *Urban Forestry and Urban Greening* 32:81–91. [KAGIS](#)