

제주시 공영 주차장 내 여름철 인간 열환경 분석 및 저감 방안 제안[†]

Analysis of The Human Thermal Environment in Jeju's Public Parking Lots in Summer and Suggestion for Its Modification[†]

최유리*, 박수국**

*제주대학교 생명자원과학대학 원예학과 대학원 석사과정

**제주대학교 생명자원과학대학 생물산업학부 원예환경전공 조경학연구실 교수

Choi, Yuri*, Park, Sookuk**

*Master Program in Graduate School of Horticultural Science, College of Applied Life Sciences, Jeju National University

**Professor in Lab. of Landscape Architecture, Department of Horticultural Science, College of Applied Life Sciences, Jeju National University

Received: March 19, 2024

Revised: April 08 2024 (1st)

Accepted: April 09 2024

3인익명 심사필

Corresponding author :

Sookuk Park

Professor, Lab. of Landscape

Architecture. Dept. of

Horticultural Science, College of

Applied Life Sciences, Jeju

National University, Jeju 63243,

Korea

Tel: +82-64-754-3326

E-mail: sooland@jejunu.ac.kr

국문초록

본 연구는 구성 요소가 다른 제주도 주차장 6곳에서 실측한 미기후 자료와 포장 알베도·수목 요소를 달리한 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 여름철 인간 열환경을 분석하고 저감 방안을 제안하는 데 목적을 둔다. 실측한 경우, 알베도로 인한 결과는 유의성이 없었으나 양지와 음지의 차이는 유의성을 보였다. 양지는 PET가 '매우 더움' 단계였으나, 음지는 2단계 낮은 '따뜻함' 단계로 나타났고, UTCI 역시 양지가 '매우 강한 열 스트레스' 단계인 반면 음지는 1단계 낮은 '강한 열 스트레스' 단계를 보이며, 태양 복사에너지의 유입을 줄이는 교목의 역할을 확인할 수 있었다. 시뮬레이션 결과도 실측된 알베도 값을 사용했기 때문에 실측 결과와 유사하게 시나리오 간 차이는 크지 않았다. 수목의 경우, 수관폭이 넓고, 엽면적지수가 높으며, 식재 간격이 좁은 시나리오가 인간 열환경을 저감하는 데 효과적 이었고, 수고에 따른 차이는 각 시나리오별 상이한 결과를 보였다. 가장 낮은 PET 값을 보인 시나리오는 H9W9L3D8(수고 9m, 수관폭 9m, 엽면적지수 3.0, 식재 간격 8m)로, 현재 조성된 시나리오와 비교했을 때 PET 0.7단계 하락한 것으로 나타났다. 이로써 조경 요소 중 바닥 포장보다는 교목이 여름철 인간 열환경에 주는 영향이 크다는 점을 확인할 수 있었다.

주제어: 열쾌적성, 도시열섬현상, 컴퓨터 시뮬레이션, 수목시나리오

ABSTRACT

This study aims to analyze the summer human thermal environment in Jeju City's outdoor parking lots by measuring microclimate data and comparing pavement and vegetation albedoes and elements through computer simulations. In measured cases, results due to albedo showed no significance, but there was a significant difference between sunny and shaded areas by trees. The sunny area had a PET (physiological equivalent temperature) in the 'very hot' level, while the shaded area exhibited a 2-step lower 'warm' level. UTCI (universal thermal climate index) also showed that the sunny area was in the 'very strong heat stress' level, whereas the shaded area was 1-step lower in the 'strong heat stress' level, confirming the role of trees in reducing incoming solar radiant energy. Simulation results, using the measured albedoes, closely resembled the measured results. Regarding vegetation, scenarios with a wide canopy, high leaf density, and narrow planting spacing were effective in mitigating the human thermal environment, and the differences due to tree height varied across scenarios. The scenario with the lowest PET value was H9W9L3D8 (tree height 9m, canopy width 9m, leaf area index 3.0, planting spacing 8m), indicating a 0.7-step decrease compared to the current landscaping scenario. Thus, it was confirmed that, among landscaping elements, trees have a significant impact on the summer human thermal environment compared to ground pavement.

Keywords: Thermal Comfort, Urban Heat Island, ENVI-met, Tree Scenario

[†]이 논문은 제주대학교 최유리 석사학위논문 일부에 발췌하였습니다. 이 논문은 2024학년도 제주대학교 교육·연구 및 학생지도비 지원에 의해 연구되었습니다.

1. 서론

도시에 거주하는 인구 비율이 지속해서 늘고 있다(Angel et al., 2011). 현재 전 인류의 절반이 넘는 수가 도시에 거주하고 있고, 2035년에는 62.5%가 도시에 거주할 것으로 전망된다(UN-Habitat, 2020). 이는 2000년도와 비교했을 때, 15.8%가 상승한 수치이다. 인구와 인프라가 도시로 이동하는 도시의 확장은 인공열을 형성하고, 도시 내 기온을 높이는 도시열섬현상(urban heat island, UHI)을 야기한다(Howard, 1833; Oke, 1982).

지금까지 UHI의 주 원인에 대한 연구들이 많이 이루어졌는데, Gago et al.(2013)은 녹지 부족과 그로 인해 도시 표면에 흡수된 태양 복사에너지를 원인으로 지목했고, Taha(1997)는 태양 복사에너지 반사율인 알베도(albedo), 인위적인 난방, 녹지 감소에 따른 증발산 작용에 의한 잠열 감소 등을 도시 기후에 영향을 미치는 요소로 꼽았다. Rizwan et al.(2008)은 도시 내 건축 자재로 인한 하늘 시계 지수(sky view factor, SVF)가 감소돼, 태양 복사에너지가 도시에 저장되고 이후 지구 복사에너지로 재방사되어 UHI를 만든다고 보았다.

이에 최근에는 도시 내 열환경 개선을 위해 다양한 연구들이 진행되고 있으며, 완화 전략으로는 UHI의 원인에 맞춰 크게 식생과 표면 알베도 조정, 도시 기하학 등이 언급되고 있다. 이 중 본 연구에서 다루고 있는 주차장과 관련한 요인은 ‘식생’과 ‘표면 알베도’다.

식생은 관목이나 잔디·초화류에 비해 태양 복사에너지의 유입을 줄여 음영을 만들고, 증발산 효과로 주변의 기온을 줄이는 데 효과적인 교목을 중심으로 이뤄지는 추세다(Shashua-Bar and Hoffman, 2000; Lee et al., 2016; Milošević et al., 2017; Aboelata and Sodoudi, 2019; Teoh et al., 2022). 교목의 수종·수고·지하교·엽면적지수·수관폭과 모양 등의 다양한 수목 요소와 식재 형태를 기반으로 자료를 실측하거나, 컴퓨터 시뮬레이션을 진행해 최대한 열환경을 감소시키는 방안을 검토하는 연구들이 주를 이룬다(De Abreu-Habich et al., 2015; Morakinyo et al., 2017; Sodoudi et al., 2018).

열환경을 개선하는 것으로 알려진 또 다른 요인은 포장 재료로, 이는 보행자의 편안함에 영향을 미치는 요인 중 하나다. 많은 연구에서 알베도 값을 상승시키면 표면에 반사되는 태양 복사에너지양도 함께 높아지는 추세를 보였고, 이는 포장재 내부에 흡수되는 태양 복사에너지양이 줄어들어 표면 온도가 낮아진다는 공통적인 결과(Del Carpio et al., 2016; Lopez-cabeza et al., 2022)를 도출하였다. 반면, 지구 복사에너지의 값은 동일한 환경조건에서 감소하는 추세를 보였다(Erell et al., 2014). 이전 연구들에서는 이러한 메커니즘을 활용해 포장 재료의 알베도 값을 다르게 하는 시나리오를 통해 열환경을 감소시킬 수 있는 방안을 찾았다(Taleghani et al., 2014; Taleghani, 2018; Sen et al., 2020).

그러나, 인간 열환경 관점에서 보았을 때, 반사율이 높아지는 고알베도 값은 인간 열환경에 영향을 미치는 미기후 중 하나인 평균복사온도(mean radiant temperature, T_{mr})의 값도 함께 상승시켜 인간 열환경지수에 대해서는 부정적인 영향을 미치는 것으로 나타났다(Karimi et al., 2020; Mohammad et al., 2021). 이처럼 기온과 T_{mr} 값의 연관성으로 인해 고알베도 값을 지닌 포장 재질의 열 저감 효과는 여전히 논쟁적인 부분으로 남아 있다.

한편 수목과 알베도 값을 다룬 다양한 연구가 있지만, 본 연구가 다루는 ‘야외 주차장’을 주제로 한 연구는 국내·외로 공원·가로수 등의 연구보다 미진한 편이다. 국내 연구를 보면, 복개하천 주차장을 대상으로 피복 종류와 수목 유무가 열환경에 미치는 영향(Kim and Kim, 2020)을 분석한 연구와 UHI를 완화하기 위해 생활권 녹지를 조성하는 방법 중 주차장 녹지를 고려해 피복재와 교목 식재 유무에 따른 시뮬레이션을 진행한 연구(Min et al., 2022)가 있다. 국외 연구 추세처럼, 두 연구 모두 인간 열환경과 주차장 내 식생 유무와 피복 상태의 관계성을 확인하는 데 집중했다. Kim and Kim(2020)의 경우, ‘아스팔트 포장 + 교목’ 조합이 ‘점토 바닥 벽돌 + 잔디 포장 + 교목’ 조합보다 더 효과적인 것으로 나타났고, Min et al.(2022)의 경우는 잔디블록과 교목의 효과를 각각 확인했을 때는 기온 저감과 인간 열환경지수인 PET(physiological equivalent temperature) 개선에 긍정적인 영향을 미쳤지만 ‘잔디블록 + 교목’을 동시에 조합한 경우에는 오히려 PET가 악화되는 결과를 보였다.

이처럼 식생 유무와 피복 상태의 관계성에 초점을 둔 연구가 진행되고 있지만, 인간 열환경지수를 개선하는 시나리오의 결과가 각기 다른 점, 실측값 없이 컴퓨터 시뮬레이션에서 제공해 주는 결과를 토대로 시나리오를 진행했을 때 오차에 대한 확인이 어려운 점을 한계로 지목할 수 있다. 이에 본 연구에서는 구성 요소가 다른 주차장 6곳을 대상으로 실측한 미기후 요소를 분석하고, 그 값을 기준으로 컴퓨터 시뮬레이션을 진행해 여름철 주차장의 열저감 방안을 제안해 보고자 한다.

2. 연구 방법론

2.1 연구 대상지

본 연구는 여름철 야외 주차장 내 인간 열환경에 미치는 요인을 확인하고자 조정 요소인 식생과 포장재 알베도 값을 기반으로 미기후와 인간 열환경지수를 분석해 보았다. 연구가 진행되는 주차장을 선정한 조건은 다음과 같다. ① 도시화가 진행되어 있으며 유동 인구가 있어 도시 내 주차장이 인간 열환경에 미치는 영향을 확인할 수 있는 곳, ② 비교할 주차장들이 근거리에 있어 대상지 간에 유사한 미기후를 지닐 것, ③ 외부 조건의 영향을 덜 받는 곳으로 최대한 오픈 스페이스일 것이다.

제주시에는 2024년 3월 기준, 노상 주차장과 노의 주차장을 포함한 공영 유료 주차장이 총 86개 있으며, 그중 위에서 언급한 선정 기준에 의해 제주도 26개 행정구역 중 인구가 가장 많은 지역인 노형동과 6번째로 많은 지역인 일도2동에 위치한 주차장을 채택하였다.

선정된 행정구역에서 인간 열환경에 미치는 요인 분석과 미기후 정량화 작업을 위해 비슷한 위치에 있는 주차장을 각각 3곳씩 묶어 자료를 수집하였다(Figure 1 참조). 첫 번째 그룹은 노형동에 있는 노형제1공영주차장[이하 ‘노형1아스콘(No_1_ascon)’, 월랑마을제2공영주차장[이하 ‘노형2콘크리트블록(No_2_concrete)’, 노형오거리노상주차장[이하 ‘노형3아스콘양지(No_3_ascon_sunny)’와 ‘노형3아스콘음지(No_3_ascon_shade)’]이며 대상지 주변에는 대형 마트, 호텔, 빌라 등이 위치해 있다, 두 번째 그룹은 일도2동에 있는 모로왓제1공영주차장[이하 ‘일도1잔디블록(II_1_grass)’, 영락교화주차장[이하 ‘일도2아스콘(II_2_ascon)’, 모로왓제2공영주차장[이하 ‘일도3아스콘(II_3_ascon)’]이다. 이 중 ‘일도2아스콘’은 유료 공영 주차장은 아니지만 ‘일도1잔디블록’과 ‘일도3아스콘’ 주차장 사이에 있으며, 선정 조건에도 부합해 분석 작업을 진행하였다.

2.2 연구 방법

연구는 총 3단계로 나누어 진행되었다. 1단계에서는 특징이 상이한 주차장 6곳(Table 1 참조)의 알베도 값과 미기후 자료(기온·상대습도·풍속·태양 및 지구 복사에너지)를 측정해 포장 재료별 인간 열환경지수를 분석하였다. 연구 대상지 6곳의 포장 재료는 총 아스콘 4곳, 콘크리트블록 1곳, 잔디블록 1곳으로 구성되었고, 아스콘은 제주도 유료 공영 주차장에서 가장 많이 사용되는 포장 재료라고 할 수 있다. 미기후 자료는 수목·건물·벽 등의 외부 요인의 영향을 최소화하기 위해 오픈 스페이스인 곳에서 양지를 기준으로 측정하였다.

2단계는 식생이 인간 열환경에 주는 영향을 알아보고자, 교목의 유무를 변수로 두었다. 6개 주차장 중 교목 식재 효과로 SVF가 가장 낮은 노형동의 ‘노형3아스콘’을 대상지로 하였고, 양지와 음지에 미기후 측정 장비를 각각 1

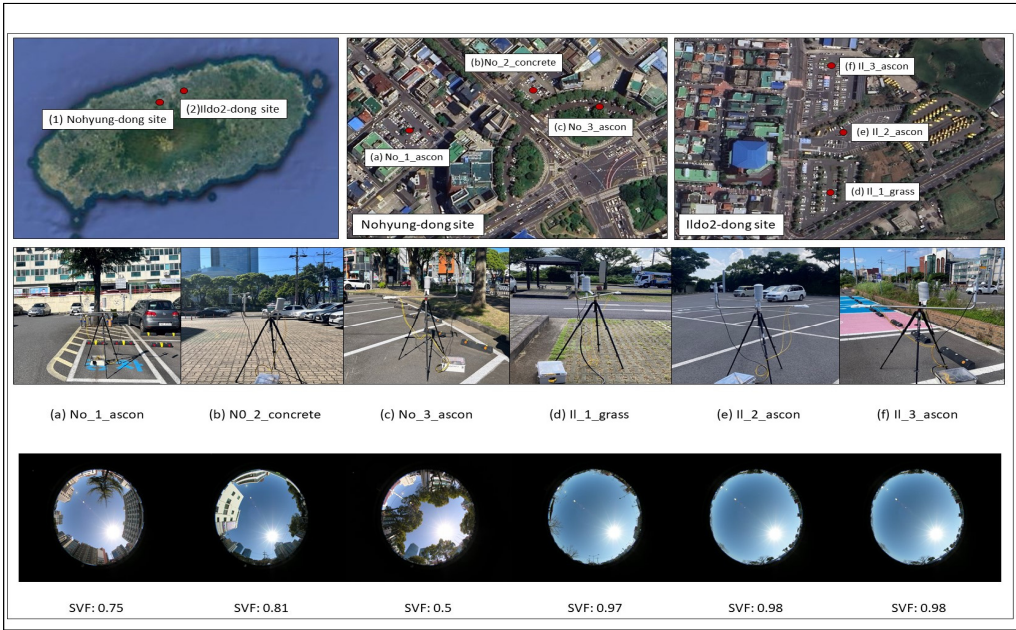


Figure 1. Locations and photographs of 6 parking lots in the study area

Table 1. Characteristics of 6 parking lots in the study area

Site	Nohyung-dong				Ildo2-dong		
Parking lot's name	Nohyung1 public parking lot	Wollang village 2 public parking lot	Nohyung orgeori parking lot (sunny)	Nohyung orgeori parking lot (shade)	Morrowat1 public parking lot	Youngnak church parking lot	Morrowat2 public parking lot
Code name	No_1_ascon	No_2_concrete	No_3_ascon		Il_1_grass	Il_2_ascon	Il_3_ascon
			No_3_ascon_sunny	No_3_ascon_shade			
Pavement matrial	Ascon	Concrete block	Ascon	Ascon	Grass block	Ascon	Ascon
Albedo value	0.1 (10%)	0.11 (11%)	0.08 (8%)	0.19 (19%)	0.14 (14%)	0.09 (9%)	0.17 (17%)
Vegetation pattern	Single tree in site	Street trees outside the site	Arrangement two rows of trees on both sides of the parking lot	Arrangement two rows of trees on both sides of the parking lot	Arrangement one row of trees inside the parking lot	Street trees outside the site	A flower bed in the parking lot
Sky view factor	0.75	0.81	0.5		0.97	0.98	0.98

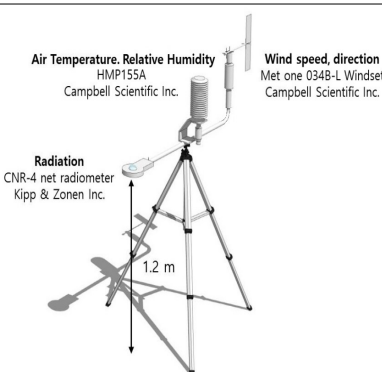
대씩 설치하여 자료를 수집해 분석하였다.

1단계와 2단계의 실측 자료는 여름철 8월 중 맑은 날을 기준으로 하루 동안 진행되었고, 태양 복사에너지 유입이 많은 낮 시간을 고려해, 9:00~18:00 동안의 미기후 자료를 측정하였다. 미기후 측정 장비는 신체의 가슴 높이로, 지표면에서 1.2m 높이에 설치하여, 기온·상대습도·풍속·풍향은 1분 단위로, 태양·지구 복사에너지 자료는 5초 단위로 수집하였으며(Table 2 참조), 자료를 분석할 때는 30분 평균값을 이용하였다.

3단계는 ENVI-met 프로그램(Ver. 5.5.1)을 활용하여 시뮬레이션을 진행하였다. ENVI-met은 전산 유체 역학을 기반으로 하는 프로그램으로 도시 공간 구성이 가능하며, 건물, 수목, 포장 재료 등의 특성을 다양화하여 3차원 공간 모델링을 실시할 수 있다. 아울러 공간 시뮬레이션을 통해 미기후 및 인간 열환경 분석이 가능해 전 세계적으로 활발히 사용되고 있다.

본 단계에서는 분석된 대상지 6곳 중 오픈 스페이스인 '일도1잔디블록'을 대상으로 두었고, ENVI-met을 활용해 바닥 포장재와 교목 식재에 변화를 둔 시나리오를 만들었다. 이후 시뮬레이션의 결과값을 비교해 도시 주차장에 적합한 옵션을 찾아보았다. 해당 단계에서는 실측 자료와 시뮬레이션 자료의 오차를 최소화하기 위해 보정값을 활용해 시뮬레이션 결과를 비교하였고, 결과는 주차장 내 한 지점이 아닌 주차장 전체 공간의 평균값을 도출해 사용하였다.

Table 2. Instruments for microclimatic data (Jo et al., 2017)

Instrument					
Image	Data	Name	Accuracy	Resolution	Manufacture
	Solar and longwave radiation	CNR4 net radiometer	$\leq 1\%$ ($-40 - 80^{\circ}\text{C}$)	0.1Wm^{-2}	Kipp & Zonen Inc.
	Air temperature and relative humidity	HMP155A	Air temp: $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ ($-80 - 60^{\circ}\text{C}$) Relative humidity: 2% ($0 - 90\%$) 3% ($90 - 100\%$)	0.01°C 0.01%	Campbell Scientific Inc.
	Wind speed and direction	Met one 034B-L windset	Wind speed: $\pm 0.1\text{ms}^{-1}$ ($\leq 10.1\text{ms}^{-1}$) $\pm 1.1\%$ ($\geq 10.1\text{ms}^{-1}$) Wind direction: $\pm 4^{\circ}$	0.001ms^{-1}	
	Datalogger	CR1000	$\pm 0.06\%$ ($0 - 40^{\circ}\text{C}$)		

2.2.1 시뮬레이션 시나리오

시뮬레이션은 ‘일도1잔디블록’ 대상지를 200(x축) × 200(y축) × 100(z축) 그리드(grid) 크기로 구축하고, 그리드 분석 해상도는 1m × 1m × 1m를 적용하였다. 시뮬레이션 시간은 실측을 진행했던 2023년 8월 2일을 기준으로 삼았으며, 새벽 4시부터 24시간 동안 시뮬레이션을 진행하였다. 시뮬레이션 옵션은 Simple forcing으로 진행하였고, 기상 입력 자료 중 9:00부터 16:00까지의 기온, 상대습도는 현장에서 실측한 값을, 나머지 시간대는 이도동 AWS 기상 자료를 참고해 만들었다. 초기 풍속 자료는 실측값의 평균치를 사용하였고, 풍향은 가장 열환경이 높은 오후 시간대에 주로 나타나는 바람의 방향을 고려해 설정하였다(Table 3 참조). 이 중 인간 열환경에 가장 큰 영향을 주는 시간대인 10:00~16:00 동안의 자료를 비교·분석하였다.

수목 식재 시나리오는 수목 요소 중 수고(H), 수관폭(W), 엽면적지수(L)와 식재 간격(D) 등 4가지 요소를 변수로 삼았고(Table 4 참조), 지하고는 3m로 고정하였다. 수목에 대한 변수는 이전 연구(Jo et al., 2017; Lim et al., 2022)와 대상지에 있는 수목(후박나무, 왕벚나무) 자료를 참고해 설정하였다.

시나리오는 크게 바닥 포장재와 수목 요소를 변수로 삼았으며, 알베도 값의 차이와 수목의 특성에 따라 대상지 내 인간 열환경 값의 변화 추이를 확인하는데 목적을 두었다. 수목 요소를 조정한 시나리오는 제주에서 많이 사용되고 있는 포장재 2종(아스콘, 잔디블록)에 각각 수목 요소를 다르게 한 시나리오 16개로 총 32개의 시나리오를 구성하였다(Figure 2 참조). 또한, 포장재에 대한 영향만을 분석하기 위하여, 4종류의 포장재(아스콘, 콘크리트블록, 잔디블록 2종)를 고려한 시나리오 2종류(① 현재 수목 식재 패턴 + 포장재, ② 수목 식재 없음 + 포장재)를 구성하여

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

Time	Air temperature (°C)	Relative humidity (%)	Time	Air temperature (°C)	Relative humidity (%)
00:00	27.6	80.6	12:00	29.1	83.9
01:00	27.6	81.3	13:00	30.9	73.8
02:00	27.4	83.8	14:00	33.9	55.8
03:00	27.4	84.4	15:00	33.8	57.7
04:00	27.3	85.9	16:00	32.8	64.8
05:00	27.3	87.7	17:00	32.4	64.4
06:00	27.2	91.0	18:00	32.5	59.6
07:00	27.1	96.0	19:00	31.2	64.9
08:00	28.4	88.3	20:00	30.3	66.5
09:00	29.1	83.5	21:00	29.8	65.8
10:00	29.1	83.8	22:00	30.1	65.4
11:00	28.9	84.5	23:00	30.1	72.0
Wind speed: 2.8ms ⁻¹					
Wind direction: 105°					

Table 4. Characteristics of trees in the scenarios for ENVI-met simulation

Height (m)	Crown width (m)	Trunk height (m)	Leaf area index (LAI)	Planting distance (m)
6	7	3	1.5	8
				12
			3.0	8
				12
	9		1.5	8
				12
			3	8
				12
9	7		1.5	8
				12
			3.0	8
				12
	0		1.5	8
				12
			3.0	8
				12

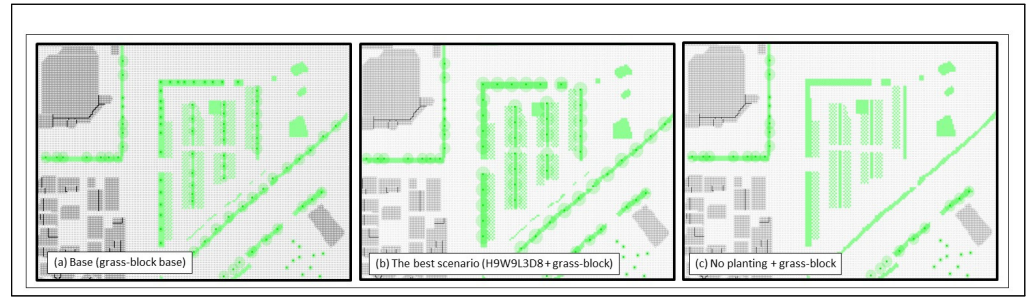


Figure 2. A example of tree planting scenarios for ENVI-met area input files

8개의 시나리오를 만들었다. 잔디블록의 경우, 생육 상태에 따른 차이를 보고자 생육이 좋지 않을 때 [알베도 0.14 (블록 0.14+잔디 0.14)]와 좋을 때[알베도 0.17(블록 0.14+잔디 0.2)]로 값을 설정하였다. 각각의 알베도 값은 현장에서 실측한 값을 참고하여 ‘아스콘 0.12(12%)’, ‘콘크리트블록 0.11(11%)’, 잔디블록 내 ‘블록 0.14(14%)’로 진행하였고, 수목 식재 시나리오에 들어가는 잔디블록 내 잔디는 알베도 0.2로 설정하였다.

2.2.2 인간 열환경지수 분석 방법

인간 열환경지수는 본 연구에서 중요한 지표 중 하나로, 야외 공간의 인간 열환경지수를 다룰 때 주로 쓰는 PET와 UTCI(universal thermal climate index)를 사용하였다(Table 5 참조). 본 지표는 미기후인 기온·상대습도·풍속· T_{mrt} 를 RayMan Pro 2.2에 입력해 해당 값을 도출하였다. 미기후 자료 중 T_{mrt} 는 Park(2011)의 계산법을 이용해 태양 및 지구 복사에너지를 이용해 산출하였다.

2.3 통계 방법

본 연구에서는 주차장을 구성하고 있는 요소들에 의한 결과값 차이가 유의한지를 확인하기 위해, IBM SPSS statistics 24 프로그램 중 ANOVA(분산분석) Duncan 검정을 실행하였다. 실측한 값으로는 현장 6곳의 양지에서 측정한 미기후 요소와 인간 열환경지수의 값이 이에 속하며, 시뮬레이션의 경우, 바닥 포장재 4종의 결과값을 대상으로 하였다. 본문 내 표기 시에는 미기후와 인간 열환경지수의 값에 위첨자로 a, b, c 등으로 적어, 결과값 사이의 유의성 차이를 나타내었다.

3. 연구 결과

3.1 실측 자료 분석

3.1.1 미기후 분석 행정구역 간 비교

본 연구는 제주도 내 주거 인구가 많은 노형동과 일도2동을 대상으로 이뤄졌다. 행정구역별로 미기후를 비교했

Table 5. The levels of physiological equivalent temperature (PET) and universal thermal climate index (UTCI)

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

(Jo et al., 2023; Matzarakis and Mayer, 1996)

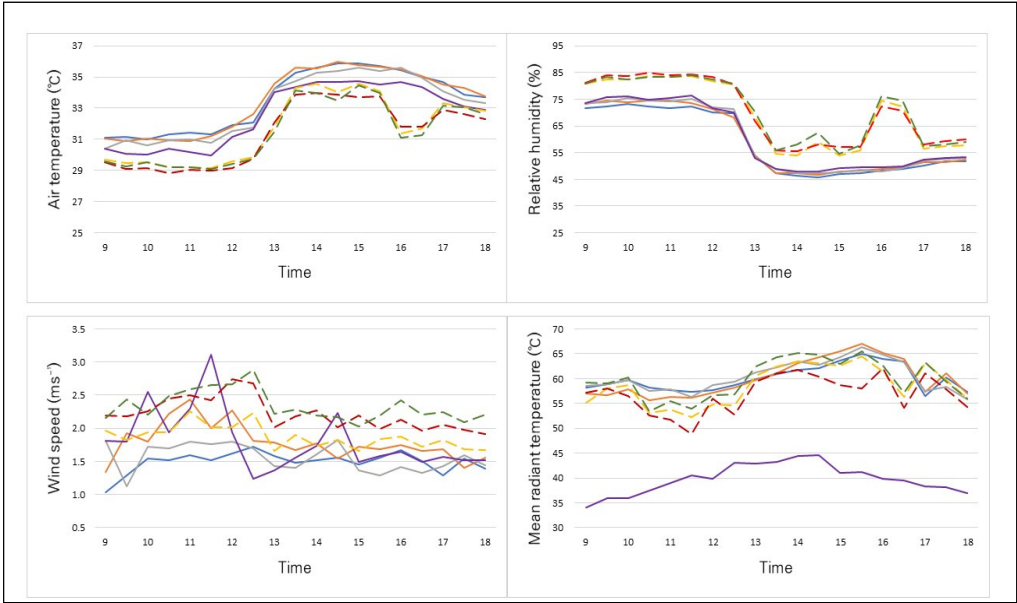


Figure 3. Microclimatic factors of 6 parking lots
Legend: No_1_ascon No_2_concrete No_3_ascon_sunny No_3_ascon_shade
Il_1_grass Il_2_ascon Il_3_ascon

을 때(Figure 3 참조), 기온은 노형동이 일도2동보다 평균 1.9℃ 높았다. 이는 자료를 측정하는 대상지 주변을 비교했을 때, 노형동(SVF 0.5~0.81)이 일도2동(SVF 0.97~0.98)보다 큰 건물과 안공 포장이 많고, 이로 인한 인공열이 높아지는 UHI의 한 현상으로 해석된다.

상대습도는 일도2동 대상지가 노형동보다 평균 10% 정도 더 높은 것으로 나타났는데, 이 역시 도시화의 영향 중 하나로, 도시 내 높아진 기온이 상대습도를 낮추는 데 영향을 준 것으로 보인다. 또한, 그린 스페이스가 적은 경우, 식생의 증발산 작용도 적어 그린 스페이스가 있는 곳보다 상대습도가 낮게 나오는 것도 한 요인으로 판단된다(Rahman et al., 2020).

풍속은 SVF가 낮은 노형동이 평균 0.54ms⁻¹ 낮은 결과를 보였으며, T_{mrt}는 일도2동의 경우, ‘일도3아스콘’(평균 62.6℃, 최대 67.8℃)이 가장 높은 결과를 보였고, ‘일도1잔디블록’(평균 58.8℃, 최대 67.8℃)이 가장 낮은 값을 보였다. 노형동 대상지(평균 60.2℃)가 대체적으로 일도2동 대상지(평균 58.2℃)보다 높은 값을 보였지만, 가장 높은 T_{mrt}를 보인 대상지는 ‘일도3아스콘’이었다.

3.1.2 포장 재료에 따른 미기후 요소 비교

총 6개 야외 주차장의 포장 재료는 잔디블록 1곳, 콘크리트블록 1곳, 아스콘 4곳으로 구성되었다(Table 1 참조). 대상지들 중 가장 낮은 알베도 값을 보인 곳은 ‘노형3아스콘양지’로 0.08(8%)을 나타냈고, 가장 높은 알베도 값은 ‘일도3아스콘’으로 0.17(17%)을 보였다. 아스콘 포장 재질을 사용하는 주차장은 4곳이 있었지만, 알베도 값은 각기 상이했으며, 같은 대상지 내 양지와 음지 차이에 따라서도 알베도 값이 달라진다는 사실을 확인할 수 있었다. 위에서 분석한 것처럼 행정구역별로 미기후 차이가 있어, 본 결과도 행정구역별로 비교해 보았다. 노형동의 경우, ‘노형1아스콘’(알베도 0.10)^a과 ‘노형2콘크리트블록’(알베도 0.11)^a이 33.5℃로 가장 높은 기온을 보였고, ‘노형3아스콘양지’(알베도 0.08)^a와 ‘노형3아스콘음지’(알베도 0.19)^a는 32.6℃의 기온이 관측됐다. 상대습도의 경우, ‘노형3아스콘양지’^a · ‘노형3아스콘음지’^a (60.4%)^a > ‘노형2콘크리트블록’^a (59.4%)^a > ‘노형1아스콘’^a (58.5%)^a 순으로 나타났으며, T_{mrt}는 ‘노형3아스콘양지’^b (60.4℃)^b > ‘노형2콘크리트블록’^b (60.1℃)^b > ‘노형1아스콘’^b (60.0℃)^b > ‘노형3아스콘음지’^a (39.8℃)^a 순으로 나타났다. 이를 SPSS Duncan을 활용해 분석한 결과, 기온과 상대습도의 경우 노형동 내 대상지들은 유의성이 없었으며, T_{mrt}는 ‘노형3아스콘음지’를 제외한 나머지 대상지는 유의성이 없는 것으로 분석되었다.

일도2동은 ‘일도2아스콘’(알베도 0.09)^a이 31.6℃로 가장 높은 기온을 보였고, ‘일도1잔디블록’(알베도 0.14)^a이 31.4℃로 가장 낮은 기온을 나타냈다. 상대습도의 경우, ‘일도3아스콘’^a (70.8%)^a > ‘일도1잔디블록’^a (70.4%)^a > ‘일도2아스콘’^a (69.6%)^a 순으로 나타났으며, T_{mrt}는 ‘일도3아스콘’^b (59.9℃)^b > ‘일도2아스콘’^{ab} (58.6℃)^{ab} > ‘일도1잔디블록’^a (57.0℃)^a 순으로 나타났다. 이는 SPSS Duncan 분석 결과, 기온과 상대습도의 경우 노형동 대상지와 마찬가지로 일도2

동 내 대상지 간에 유의성은 없었다. T_{net} 의 경우에는, ‘일도1잔디블록’과 ‘일도3아스콘’은 서로 유의성이 있는 것으로 나타났다.

3.1.3 태양 및 지구 복사에너지 분석

CNR4 net-radiometer를 이용해 측정된 태양 복사에너지는 하늘 반구(sky hemisphere)에서 지표면으로 내려오는 직사광선(K_b)과 분사광선(K_d)의 합인 S_{up} 과 지표면에서 하늘로 반사되어 올라가는 반사광선(K_r)인 S_{dn} 으로 구성된다. 지구 복사에너지 역시 하늘 반구에서 지표면으로 향하는 L_{up} , 지표면에서 인체로 향하는 L_{dn} 으로 나뉜다.

본 연구 결과를 행정구역으로 나누어 보면(Figure 4 참조, 노형동의 S_{up} 은 평균 692.4 Wm^{-2} 인 반면 일도2동은 639.9 Wm^{-2} 로, 52.6 Wm^{-2} 차이가 났다. 노형동의 S_{up} 은 ‘노형2콘크리트블록’(704.3 Wm^{-2}) · ‘노형1아스콘’(704.3 Wm^{-2}) > ‘노형3아스콘양지’(682.4 Wm^{-2})이었으며, S_{dn} 도 S_{up} 과 같은 순서로, ‘노형2콘크리트블록’(80.2 Wm^{-2}) > ‘노형1아스콘’(69.4 Wm^{-2}) > ‘노형3아스콘양지’(56.7 Wm^{-2}) 순으로 나타났다. 일도2동은 S_{up} 의 경우, ‘일도3아스콘’(641.5 Wm^{-2}) > ‘일도2아스콘’(640.7 Wm^{-2}) > ‘일도1잔디블록’(637.4 Wm^{-2}) 순이었으며, S_{dn} 은 ‘일도3아스콘’(107.9 Wm^{-2}) > ‘일도1잔디블록’(89.2 Wm^{-2}) > ‘일도2아스콘’(56.8 Wm^{-2}) 순으로 나타났다.

이전 연구(Del Carpio et al., 2016; Zhang and Hu, 2022) 결과와 마찬가지로 노형동과 일도2동 모두 알베도 값이 높은 재질이 알베도 값이 낮은 재질보다 반사되는 태양 복사에너지 값이 큰 것으로 관측됐다. 일도2동은 알베도 값이 높은 ‘일도3아스콘’(알베도 0.17)이 ‘일도2아스콘’(알베도 0.09)보다 반사광선이 평균 51.1 Wm^{-2} 높게 측정되었는데 이는, 동일한 아스콘 바닥 포장의 영향과 함께 ‘일도3아스콘’에 위치한 높이 30cm가량의 적벽돌 화단의 영향으로 알베도 값이 큰 쪽으로 상승했고 이로 인해 반사광선 값이 함께 올라간 것으로 분석된다.

일도2동의 L_{up} 은 ‘일도1잔디블록’(446.5 Wm^{-2}) > ‘일도2아스콘’(445.7 Wm^{-2}) > ‘일도3아스콘’(444.5 Wm^{-2}) 순으로, 각 대상지 간 차이가 거의 없었다. L_{dn} 의 경우는 ‘일도2아스콘’(609.9 Wm^{-2}) > ‘일도3아스콘’(595.1 Wm^{-2}) > ‘일도1잔디블록’(557.9 Wm^{-2}) 순으로 나타났다. 노형동 사이트의 L_{up} 의 경우, ‘노형3아스콘양지’(473.9 Wm^{-2}) > ‘노형1아스콘’(468.7 Wm^{-2}) > ‘노형2콘크리트블록’(454.7 Wm^{-2}) 순이었고 L_{dn} 은 L_{up} 과 마찬가지로 ‘노형3아스콘양지’(613.5 Wm^{-2}) > ‘노형1아스콘’(603.5 Wm^{-2}) > ‘노형2콘크리트블록’(596.7 Wm^{-2}) 순으로 나타났으며, 콘크리트블록보다 알베도 값이 더 낮은 아스콘이 지구 복사에너지는 더 높은 값을 보였다. 노형동 대상지의 경우 알베도 값이 상승할수록 반사된 태양 복사에너지량은 상승하는 반면 장파 복사에너지인 지구 복사에너지의 값

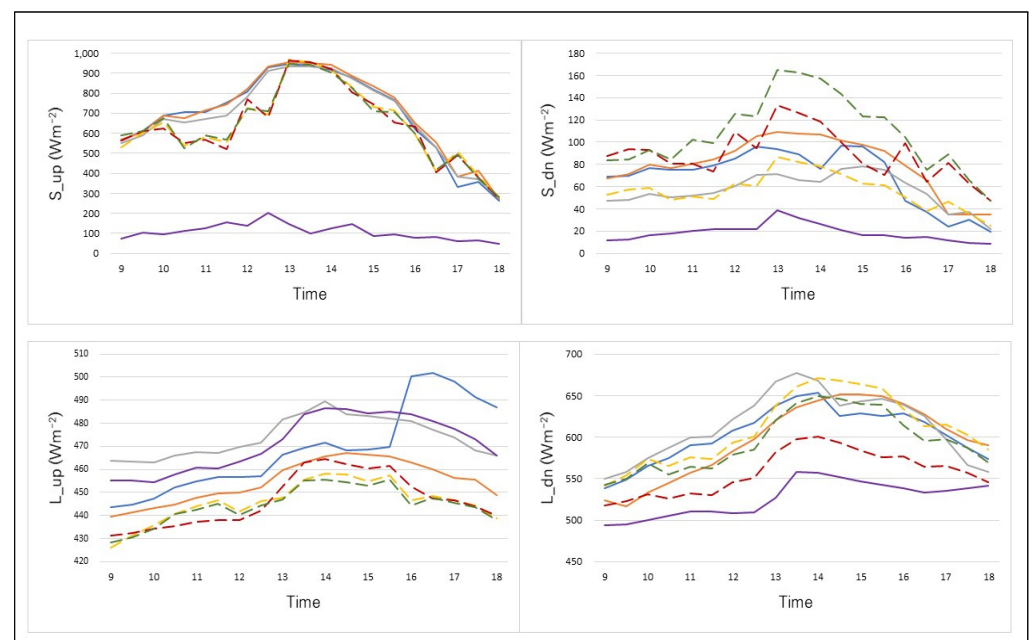


Figure 4. Shortwave (S) and longwave (L) radiation values of 6 parking lots. Up and dn mean incoming radiation directions

Legend: —No_1_ascon —No_2_concrete —No_3_ascon_sunny —No_3_ascon_shade
- -Il_1_grass - -Il_2_ascon - -Il_3_ascon

은 감소한다는 이전 연구(Erell et al., 2014)와 일치하는 결과를 보였다.

3.1.4 식재 유무에 따른 미기후 요소 비교

주차장을 기준으로 교목이 양옆에 1열로 배치되어 있는 ‘노형3아스콘’의 경우, 양지와 음지의 차이를 비교하기 위해 각각 미기후 측정 장비를 1대씩 설치해 자료를 측정하였다. 양지의 경우, 기온의 평균은 33.2℃로 음지에 비해 평균 0.6℃ 높게 나타났으며, 상대습도는 양지가 음지보다 0.6% 낮은 값을 보였다.

양지와 음지의 T_{mrt} 는 다른 미기후 요소보다 더 큰 차이를 보였는데, 양지의 T_{mrt} 평균값은 61.3℃로, 가장 높은 값을 보인 시간대는 15:30으로, 67.1℃였다. 반면 음지의 T_{mrt} 의 평균값은 39.8℃로, 양지보다 21.5℃ 낮게 측정됐는데, 태양 복사에너지양이 6.4배 차이가 난 것으로 나타났다. 음지의 낮은 T_{mrt} 값은 태양 직사광선 양의 저감 영향으로 ‘노형3아스콘’ 주차장에 식재된 교목의 그늘 영향을 받은 것이다. 이에 식재 패턴을 디자인할 때, 최대한 음지 영역을 확대하는 방안을 고려해야 할 필요성이 있다고 할 수 있다.

3.1.5 인간 열환경지수 분석

인간 열환경지수의 경우(Figure 5 참조), PET 기준, ‘노형1아스콘’(평균 44.7℃)^d > ‘노형2콘크리트블록’(44.2℃)^d > ‘노형3아스콘양지’(43.5℃)^{cd} > ‘일도2아스콘’(41.8℃)^{bc} > ‘일도3아스콘’(41.2℃)^{bc} > ‘일도1잔디블록’(40.2℃)^b > ‘노형3아스콘음지’(35.0℃)^a 순으로 나타났다. 양지를 기준으로 봤을 때, 최고 값이 나온 ‘노형1아스콘’과 최저값이 나온 ‘일도1잔디블록’만 비교하면 ‘노형1아스콘’은 ‘매우 더움(very hot)’ 단계를 보였고, ‘일도1잔디블록’은 ‘더움(hot)’ 단계로, 두 주차장 사이에 한 단계 차이가 났다.

UTCI의 경우, PET와 마찬가지로 ‘노형1아스콘’(평균 41.5℃)^d > ‘노형2콘크리트블록’(41.3℃)^d > ‘노형3아스콘양지’(40.5℃)^{cd} > ‘일도2아스콘’(40.0℃)^{bc} > ‘일도3아스콘’(39.5℃)^{bc} > ‘일도1잔디블록’(38.5℃)^b > ‘노형3아스콘음지’(35.7℃)^a 순으로 나타났다. ‘노형1아스콘’과 ‘일도1잔디블록’ 모두 ‘매우 강한 열스트레스(very strong heat stress)’ 단계를 보였다.

양지와 음지만을 비교했을 때, ‘노형3아스콘양지’의 PET는 ‘매우 더움(very hot)’ 단계인 반면, ‘노형3아스콘음지’는 ‘따뜻함(warm)’ 단계를 보였다. UTCI는 양지가 ‘매우 강한 열 스트레스(very strong heat stress)’ 단계가 나왔고, 음지는 그보다 한 단계 낮은 ‘강한 열 스트레스(strong heat stress)’ 단계로 나타났다.

SPSS Duncan 통계 분석 결과, PET와 UTCI의 경우 ‘노형3아스콘음지’는 다른 대상지들과 유의성이 있었으나, 같은 행정구역 내 대상지들은 서로 유의성이 없었다.

3.2 시뮬레이션 자료 분석

3.2.1 시뮬레이션 결과 보정식 값 도출

컴퓨터 시뮬레이션으로 도출한 값은 실측한 값과는 다를 가능성이 있어, 보정이 필요하다(Park et al., 2022). 본 연구에서는 값의 오차를 줄이기 위해 선행 연구(Lim et al., 2022)에서 진행한 방식을 참고해 기온·상대습도·풍속· T_{mrt} ·PET·UTCI의 시간에 따른 실측과 시뮬레이션의 차이값으로 보정식을 산출하였다(Figure 6 참조). 결정 계수(R^2)가 0.82 이상으로 상관성이 높아져, 산출한 보정식(Eqs. 1~6)을 시뮬레이션 결과값에 넣어 보정을 진행하였다. 아래 보정식에서 new는 최종 보정한 값, old는 기존 시뮬레이션 값을 의미하며, t는 시간을 나타낸다. T_a ,

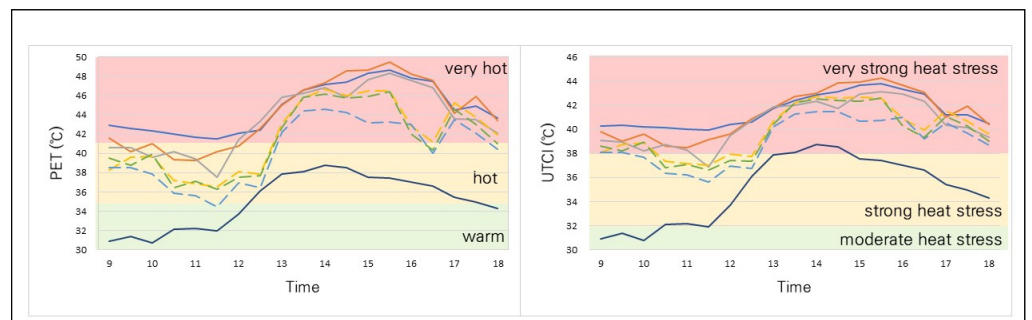


Figure 5. PET and UTCI values of 6 parking lots
 Legend: — No_1_ascon — No_2_concrete — No_3_ascon_sunny — No_3_ascon_shade
 - - II_1_grass - - II_2_ascon - - II_3_ascon

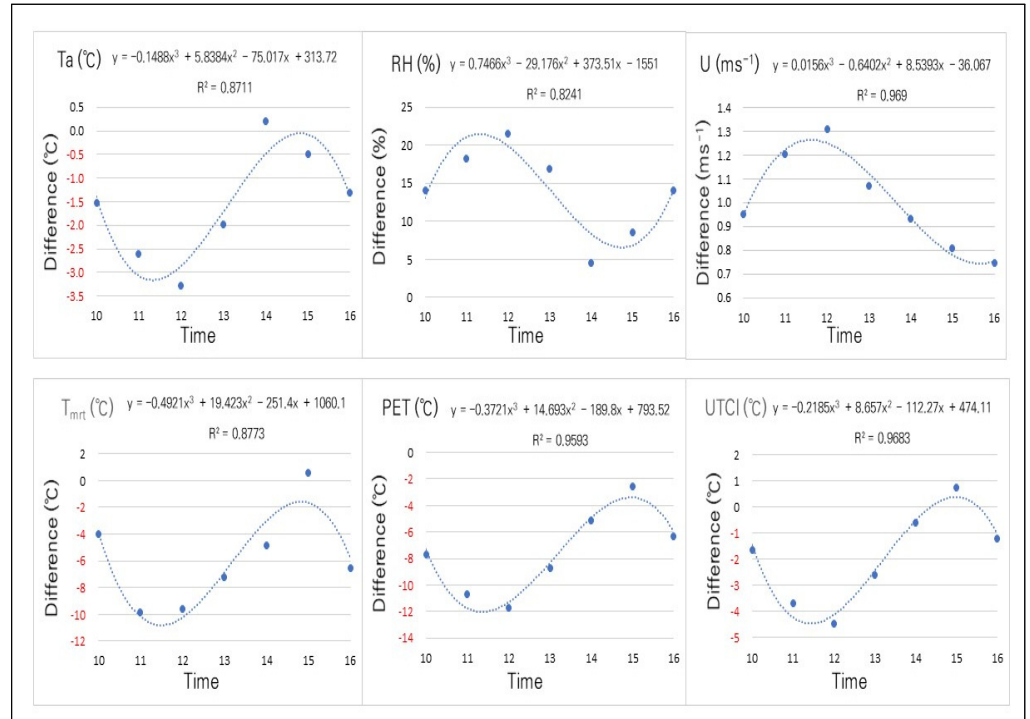


Figure 6. Polynomial regression analysis between time and differences of measured microclimatic data and ENVI-met results

RH, U는 각각 기온, 상대습도, 풍속을 뜻한다.

$$T_{a_new} = T_{a_old} - 0.1488t^3 + 5.8384t^2 - 75.017t + 313.72 \quad (\text{Eq. 1})$$

$$RH_{new} = RH_{old} + 0.7466t^3 - 29.176t^2 + 373.51t - 1,551 \quad (\text{Eq. 2})$$

$$U_{new} = U_{old} + 0.0156t^3 - 0.6402t^2 + 8.5393t - 36.067 \quad (\text{Eq. 3})$$

$$T_{mrt_new} = T_{mrt_old} - 0.4921t^3 + 19.423t^2 - 251.4t + 1,060.1 \quad (\text{Eq. 4})$$

$$PET_{new} = PET_{old} - 0.3721t^3 + 14.693t^2 - 189.8t + 793.52 \quad (\text{Eq. 5})$$

$$UTCI_{new} = UTCI_{old} - 0.2185t^3 + 8.657t^2 - 112.27t + 474.11 \quad (\text{Eq. 6})$$

인간 열환경지수의 경우, PET에서 가장 높은 값을 보인 재질은 콘크리트블록(40.5°C)^a > 잔디블록 14 · 17%(40.0°C)^a > 아스콘(39.7°C)^a 순으로 나타났으며, 세 시나리오 모두 ‘더움(hot)’ 단계에 해당했다. UTCI도 PET와 마찬가지로 콘크리트블록(41.0°C)^a > 잔디블록 14 · 17%(38.9°C)^a > 아스콘(38.7°C)^a 순이었고, 단계별로 보자면 ‘매우 강한 열 스트레스(very strong heat stress)’에 해당하는 것으로 나타났다. 재질 간의 값 차이는 미비했으며, 이는 알베도 값이 최소 1%~ 최대 6%밖에 차이가 나지 않아 큰 변동을 보이지 않은 것으로 해석된다. 통계 분석 결과, PET와 UTCI 모두 재질 간의 유의성은 나타나지 않았다.

3.2.2 수목 요소에 따른 미기후 및 인간 열환경 저감 효과

수고, 수관폭, 엽면적지수, 식재 간격을 변수로 구성해 수목 및 식재 형태가 다른 16가지 시나리오를 만들고, 여기에 잔디블록, 아스콘을 바닥 포장재로 두어 총 32가지의 시나리오를 시뮬레이션하였다. 실제 대상지의 교목 식재 패턴을 따르되, 잔디의 알베도 값을 실측한 0.14 대신 잔디 생육이 좋다고 가정한 알베도 값인 0.2로 설정한 시나리오 ‘grass-block base(BASE)’를 대조군으로 선정해 실험군과의 값 차이를 중심으로 결과를 분석하였다. 그 결과, 기온과 T_{mrt} , PET와 UTCI 모두 가장 높은 값을 나타낸 시나리오는 식재를 하지 않은 시나리오였고, 결과값 간의 비교는 식재가 되어 있지 않은 시나리오를 제외하고 진행하였다(Figure 7 참조).

기온은 잔디블록과 아스콘의 경우, 각각 H6W7L1.5D12[수고(H) 6m, 수관폭(W) 7m, 엽면적지수(L) 1.5, 식재 간격(D) 12m]와 H9W7L1.5D12[수고(H) 9m, 수관폭(W) 7m, 엽면적지수(L) 1.5, 식재 간격(D) 12m]가 가장 좋지 않은 시나리오로 나왔으며, 평균값은 31.29°C(0.13°C ↑), 31.35°C(0.12°C ↑)로 나왔다. 가장 낮은 평균 기온을 보

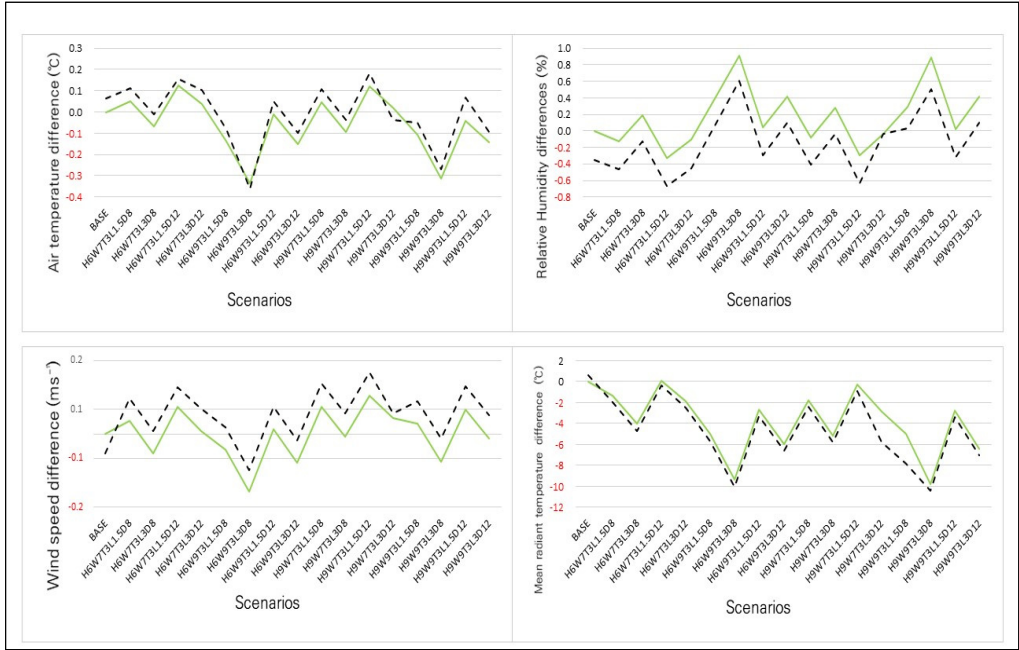


Figure 7. Differences between grass-block base (BASE) and other scenarios about microclimate aspects

Legend: — grass-block --- ascon

인 시나리오는 두 포장 재질 모두 H6W9L3D8(평균 30.8℃)로, 대조군보다 0.33℃(잔디블록), 0.42℃(아스콘) 낮게 나타났다.

T_{mrt} 의 경우, 잔디블록 중 가장 높은 값을 보인 시나리오는 H6W7L1.5D12(평균 55.2℃)로 나타났으며, 현재 대 상지를 반영한 시나리오보다 악화된 결과를 보였다. 반면, 가장 낮은 값을 보인 시나리오는 H9W9L3D8(평균 45. 3℃)로, 높은 값을 보인 시나리오와는 약 9.9℃가량 차이가 났다. 아스콘 바닥 포장 시나리오와 잔디블록 포장 시나 리오의 저감 효과와 크게 다르지 않았으며, 수목 시나리오에 따른 저감 효과는 잔디블록 시나리오와 같은 결과가 나왔다. 아스콘 내 가장 높은 값을 보인 H6W7L1.5D12와 가장 낮은 값을 보인 H9W9L3D8의 차이는 10.09℃, 수목이 없는 시나리오와 비교했을 때는 15℃ 차이가 났다.

인간 열환경지수(Figure 8 참조)인 PET 역시, T_{mrt} 의 결과와 마찬가지로 가장 낮은 값을 보인 시나리오는 잔디 블록과 아스콘 시나리오 모두 H9W9L3D8로, 잔디블록은 평균 35.8℃, 아스콘은 평균 35.5℃를 나타냈으며 PET 단계로는 ‘더움(hot)’에 해당한다. 결과를 BASE와 비교했을 때, 잔디블록이 4.2℃, 아스콘이 4.5℃ 낮게 나왔으며, 식재가 없는 시나리오보다 잔디블록 6.1℃, 아스콘 6.3℃ 낮았다. 이는 지수로 설명했을 때, 각각 약 0.7단계, 1단계 낮은 값이다. 가장 높은 값을 보인 시나리오는 H6W7L1.5D12로, 잔디블록은 40.0℃, 아스콘은 39.7℃로, 잔디블록 이 아스콘보다 0.4℃ 높게 나왔다.

UTCI 중 가장 높은 값을 보인 시나리오 역시 H6W7L1.5D12로 앞선 결과들과 유사한 추세를 보였으며, 잔디블 록은 38.9℃, 아스콘은 38.8℃이었으며, 가장 낮은 값은 보인 시나리오는 각 포장 재질별로 수고가 다른 결과를 보 였다. 잔디블록은 H6W9L3D8(36.6℃)이, 아스콘은 H9W9L3D8(36.2℃) 시나리오가 가장 좋은 열 환경을 보인 시 나리오였으며, 각각의 값은 대조군과 각각 2.3℃, 2.7℃ 차이로, 약 0.4 단계 낮은 값을 보였다.

4. 고찰

모든 결과에서 음지(교목 그늘)가 열환경 개선 효과에 가장 큰 효과를 보였으며, 이는 수목의 그늘이 도시의 열쾌 적성을 향상시키며, 인간 열환경지수를 낮추는 데 도움이 된다는 이전 연구와 같은 결과를 보였다(De Abreu-Harbach et al., 2015; Lee et al., 2013; Rahman et al., 2020).

연구 대상지들에서는 다른 포장재가 사용되었는데, 본 연구에서는 같은 포장재라 할지라도 알베도의 값이 각기 달랐고, 같은 대상지여도 양지와 음지에 따라 다른 값을 보여 주는 것을 확인할 수 있었다. 또한 노형동과 일도2동 대상지는 공통적으로 고알베도인 경우, 저알베도인 대상지보다 반사되는 태양 복사에너지(반사광선)의 양이 많은 것

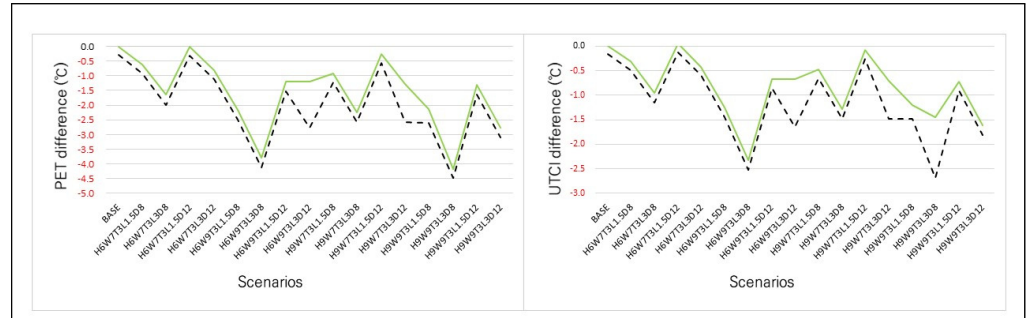


Figure 8. Differences between grass-block base (BASE) and other scenarios about PET and UTCI

Legend: — grass-block --- ascon

으로 나타났으며, 이 중 노형동은, 고알베도 대상지가 저알베도 대상지보다 더 낮은 지구 복사에너지 값을 보이며 선행 연구(Erell et al., 2014)와 동일한 결과를 보였다. 그러나, 알베도의 상승으로 함께 상승될 것으로 예상되었던 T_{mrt} 와 인간 열환경지수의 결과는 저알베도 대상지에서 도출된 값과 큰 차이가 없었다.

ENVI-met 시뮬레이션의 경우, 바닥 포장재에 따른 결과를 보기 위해 동일한 식재 패턴에 잔디블록 2종(블록 알베도 0.14, 잔디 알베도 $0.14 \cdot 0.2$), 콘크리트블록(0.11), 아스콘(0.12)의 포장재와 알베도 값을 달리해 결과를 비교하였다. 예상과 달리 알베도 값이 가장 낮은 콘크리트블록이 T_{mrt} 와 인간 열환경지수 값이 가장 좋지 않게 나왔으며, 아스콘이 가장 낮은 값을 보였다. 잔디의 생육 차이에 따른 결과(생육이 좋지 않을 때 알베도 0.14, 생육이 좋을 때 알베도 0.2) 역시 큰 차이를 보이지 않았다. 이는 알베도의 폭이 최대 0.06(6%)로, 그 값이 크지 않은 결과로 해석된다. 반면, 기존 연구(Taleghani and Berardi, 2018; Sen et al., 2020)에서는 대조군과 실험군과의 알베도 차이를 최소 0.16(16%)에서 최대 0.4(40%)로 설정하는 등 본 연구보다 알베도 값 차이를 크게 두어, 결과 역시 변화의 폭이 크게 나타난 것으로 보인다.

수목 요소를 살펴봤을 때, 식재를 하지 않은 시나리오가 가장 열환경이 좋지 않은 것으로 나타났다. 식재를 한 경우, T_{mrt} , PET, UTCI 중 가장 열환경이 좋지 않게 나온 시나리오는 공통적으로 H6W7D1.5L12로, 이는 수고가 낮고, 수관폭이 좁고, 엽면적지수가 낮고, 식재 간격이 넓은 시나리오를 의미한다. 반면, 가장 큰 저감 효과를 보인 시나리오는 공통적으로 수관폭이 넓고, 엽면적지수가 높으면서, 식재 간격이 좁은 경우로, 수고는 시나리오별로 약간의 차이를 보였다. 이전 연구(Lim et al., 2022)에서는 PET와 UTCI의 결과값에서 수고가 낮고, 수관폭이 넓으며, 엽면적지수가 높으면서 식재 간격이 좁은 시나리오가 가장 큰 저감 효과를 보였으며, 가장 적은 저감 효과를 보인 시나리오는 수고가 높고, 수관폭이 좁으며, 엽면적지수가 낮으면서 식재 간격이 넓은 경우였다.

이전 연구와 본 연구를 비교했을 때, 공통적으로 수관폭, 엽면적지수, 식재 간격 부분은 동일한 패턴을 보였으나, 수고에 따른 결과는 상이하게 나왔다. 본 연구는 교목의 영향을 받는 주차 구역 외에도 양지가 있는 주차장 전 구역을 중심으로 평균값을 분석한 반면, 선행 연구(Lim et al., 2022)에서는 가로수의 영향을 받는 보도를 중심으로 결과값을 분석하였다. 보도만 분석할 경우, 수고가 낮은 보도 중심으로 그림자를 형성하는 게 인간 열환경지수를 낮추는 데 도움이 될 것으로 보인다. 그러나, 오픈 스페이스인 주차장을 대상으로 분석할 경우에는, 수고가 낮은 것 보다는 수목의 높이가 커 그림자의 범주를 넓히는 것이 주차장 전체 평균값을 낮추는 데 영향을 미친 것으로 보여진다. 이에 결과값을 분석하는 대상지 영역 선정에 따른 차이가 수고의 결과값에 영향을 준 것으로 해석된다.

주차장 내 교목과 바닥 포장재의 조합을 살펴봤을 때, 선행 연구(Kim and Kim, 2020; Min et al., 2022)에서는 ‘아스팔트 + 교목’ 혹은 ‘아스팔트+교목 식재 없음’이 ‘잔디블록 + 교목’보다 인간 열환경을 개선하는 데 더 효과적인 것으로 나왔다. 본 연구에서도 ‘아스콘 + 교목’보다 ‘잔디블록 + 교목’ 시나리오의 인간 열환경지수가 미미하게 더 악화된 것으로 나타나 동일한 결과를 보였지만, Min et al.(2022)의 연구에서처럼 ‘아스콘 + 교목 식재 없음’이 ‘잔디블록 + 교목’보다 인간 열환경지수를 낮추는 데 더 효과적이라고 볼 순 없었다. 오히려 본 연구에서는 ‘잔디블록(0.17) + 교목’이 ‘아스콘(0.12) + 교목 식재 없음’보다 PET는 1.78°C , UTCI는 1.13°C 낮추는 것으로 나타났다.

5. 결론

여름철 주차장을 구성하는 조경 요소인 포장재와 교목이 인간 열환경에 미치는 영향을 실측과 시뮬레이션을 통

해 분석하였다. 본 연구는 단계를 나눠 1단계에서는 특징이 다른 주차장 6곳의 미기후를 실측해 인간 열환경지수를 분석하였고, 2단계에서는 같은 주차장 내 양지와 음지의 차이를 분석하였다. 마지막으로 3단계에서는 1단계에서 실측한 대상지 중 하나를 선정해 바닥 포장재와 수목 요소에 따라 인간 열환경지수가 어떻게 변화하는지를 살펴보았다.

1단계에서 주차장이 위치한 두 행정구역 간 비교를 했을 때, 도시화가 더 진행된 노형동이 일도2동보다 미기후와 인간 열환경지수의 값이 높게 나왔으나, 인간 열환경지수 단계에서는 큰 차이를 나타내진 않았다. PET에서 가장 낮은 값을 보인 '일도1잔디블록'을 제외한 다른 대상지가 '매우 더움(very hot)' 단계를 보였고, UTCI는 모든 대상지가 '매우 강한 열 스트레스(very strong heat stress)' 단계를 보였다. 2단계인 양지와 음지(교목 그늘) 비교는 눈에 띄는 차이를 보였는데, 이는 태양 복사에너지양의 유입이 6배가량 차이가 난 결과로, 양지와 음지의 T_{mrt} 값의 차이는 21.5°C 였다. PET와 UTCI는 각각 1단계 차이가 났으며, 음지의 경우, PET는 '따뜻함(warm)' 단계, UTCI는 '강한 열 스트레스(strong heat stress)' 단계로 나타났다. 3단계인 ENVI-met 시나리오의 결과도 1단계에서 진행한 실측 단계에서 보인 결과와 동일하게 나타났다.

그 결과 포장재보다는 교목이 주는 영향이 더 크다는 사실을 확인하였으며, 해당 내용은 주차장 조경 설계에 기초 자료로 사용될 수 있을 것으로 사료된다. 그러나, 본 연구에서 사용한 수목의 구성 요소는 식재되는 지역에 따라 상대적인 기준이 될 수 있을 것이다. 지역별로 식재되어 있는 수목의 수고와 수관폭, 엽면적지수, 식재 거리 등을 좀 더 세분화해 시뮬레이션을 진행하고 지역에 맞는 식재 패턴을 찾는 후속 연구가 필요할 것으로 보인다.

Reference

1. Aboelata, A. and S. Sodoudi(2019) Evaluating urban vegetation scenarios to mitigate urban heat island and reduce buildings' energy in dense built-up areas in Cairo. *Building and Environment* 166, 106407.
2. Angel, S., J. Parent, D. L. Blei, and D. Potere(2011) The dimensions of global urban expansion: Estimates and projections for all countries, 2000–2050. *Progress in Planning* 75(2):53–107
3. De Abreu-Harbich, L. V., L. C. Labaki, and A. Matzarakis(2015) Effect of tree planting design and tree species on human thermal comfort in the tropics. *Landscape and Urban Planning* 138: 99–109.
4. Del Carpio, J. A. V., D. L. Marinowski, G. Trichês, R. Lamberts, and J. V. S. de Melo(2016) Urban pavements used in Brazil: Characterization of solar reflectance and temperature verification in the field. *Solar Energy* 134: 72–81.
5. Erell, E., D. Pearlmutter, D. Boneh, and P. B. Kutiel(2014) Effect of high-albedo materials on pedestrian heat stress in urban street canyons. *Urban Climate* 10: 367–386.
6. Gago, E. J., J. Roldan, R. Pacheco-Torres, and J. Ordóñez(2013) The city and urban heat islands: A review of strategies to mitigate adverse effects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 25: 749–758.
7. Howard, L.(1833) *The Climate of London, Deduced from Meteorological Observations*. Volume 2, London.
8. Jo, S., H. Kong, N. Choi, Y. Shin, 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.
9. Karimi, A., H. Sanaieian, H. Farhadi, and S. Norouzian-Maleki(2020) Evaluation of the thermal indices and thermal comfort improvement by different vegetation species and materials in a medium-sized urban park. *Energy Reports* 6: 1670–1684.
10. Kim, E. and H. Kim(2020) Improving thermal environment and thermal comfort by modifying paving and planting of a covered parking lot – Focusing on Mansu public parking lot in Namdong-gu, Incheon, *Urban Design Institute of Korea* 21(2): 117–131.
11. Lee, H., H. Mayer, and L. Chen(2016) Contribution of trees and grasslands to the mitigation of human heat stress in a residential district of Freiburg, Southwest Germany. *Landscape and Urban Planning* 148: 37–50.
12. Lee, H., J. Holst, and H. Mayer(2013) Modification of human-biometeorologically significant radiant flux densities by shading as local method to mitigate heat stress in summer within urban street canyons. *Advances in Meteorology*. 2013.
13. Lim, H., S. Jo, and S. 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.
14. Lopez-Cabeza, V. P., S. Alzate-Gaviria, E. Diz-Mellado, C. Rivera-Gomez, and C. Galan-Marin(2022) Albedo influence on the microclimate and thermal comfort of courtyards under Mediterranean hot summer climate conditions. *Sustainable Cities and Society* 81: 103872.
 15. 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.
 16. Milošević, D. D., I. V. Bajšanski, and S. M. Savić(2017) Influence of changing trees locations on thermal comfort on street parking lot and footways. *Urban Forestry & Urban Greening* 23: 113-124.
 17. Morakinyo, T. E., L. Kong, K. K. L. Lau, C. Yuan, 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.
 18. Min, J., J. Eum, U. Sung, J. Son, and J. Kim(2022) Scenario-based analysis on the effects of green areas on the improvement of urban thermal environment. *Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture* 50(6): 1-14.
 19. Mohammad, P., S. Aghlmand, A. Fadaei, S. Gachkar, D. Gachkar, and A. Karimi(2021) Evaluating the role of the albedo of material and vegetation scenarios along the urban street canyon for improving pedestrian thermal comfort outdoors. *Urban Climate* 40: 100993.
 20. Oke, T. R.(1982) The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 108(455): 1-24.
 21. Park, S.(2011) Human-Urban Radiation Exchange Simulation Model, PHD Dissertation, University of Victoria, Victoria, B.C., Canada.
 22. Park, S., H. Kong, and H. Kang(2022) Comparison of differences on microclimatic factors and human thermal sensation between in situ measurement and computer modeling. *Ecology and Resilient Infrastructure* 7(1): 43-52.
 23. Rahman, M. A., C. Hartmann, A. Moser-Reischl, M. F. von Strachwitz, H. Paeth, H. Pretzsch, and T. Rötzer(2020) Tree cooling effects and human thermal comfort under contrasting species and sites. *Agricultural and Forest Meteorology* 287: 107947.
 24. Rizwan, A. M., L. Y. Dennis, and L. I. U. Chunho(2008) A review on the generation, determination and mitigation of Urban Heat Island. *Journal of Environmental Sciences* 20(1): 120-128.
 25. Sen, S., J. P. R. M. R. Fernández, and J. Roesler(2020) Reflective parking lots for microscale urban heat island mitigation. *Transportation Research Record* 2674(8): 663-671.
 26. Shashua-Bar, L. and M. E. Hoffman(2000) Vegetation as a climatic component in the design of an urban street: An empirical model for predicting the cooling effect of urban green areas with trees. *Energy and Buildings* 31(3): 221-235.
 27. Sodoudi, S., H. Zhang, X. Chi, F. Müller, and H. Li(2018) The influence of spatial configuration of green areas on microclimate and thermal comfort. *Urban Forestry & Urban Greening* 34: 85-96.
 28. Taha, H.(1997) Urban climates and heat islands: albedo, evapotranspiration, and anthropogenic heat. *Energy and Buildings* 25(2): 99-103.
 29. Taleghani, M.(2018) Outdoor thermal comfort by different heat mitigation strategies-A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 81: 2011-2018.
 30. Taleghani, M., D. J. Sailor, M. Tenpierik, and A. van den Dobbelsteen(2014) Thermal assessment of heat mitigation strategies: The case of Portland State University, Oregon, USA. *Building and Environment* 73: 138-150.
 31. Taleghnai, M. and U. Berardi(2018) The effect of pavement characteristics on pedestrians' thermal comfort in Toronto. *Urban Climate* 24: 449-459.
 32. Teoh, M. Y., M. Shinozaki, K. Saito, and I. Said(2022) Studying Outdoor Thermal Comfort and Resilience in an Urban Design Perspective: A Case Study in IPOH Old Town and New Town, Malaysia. In *Routledge Handbook of Resilient Thermal Comfort*(pp. 259-275). Routledge.

33. UN-Habitat(2020) World cities report 2020: The Value of Sustainable Urbanization.