

ENVI-Met 시뮬레이션을 통한 도로 방향별 가로수 식재 형태에 따른 여름철 열환경 개선 효과 분석

임현우* · 조상만* · 박수국**

*제주대학교 생명자원과학대학 원예학과 대학원 조경학연구실 박사과정 ·

**제주대학교 생명자원과학대학 생물산업학부 원예환경전공 조경학연구실 · 아열대농업생명과학연구소 · 친환경농업연구소 부교수

Analysis of Thermal Environment Modification Effects of Street Trees Depending on Planting Types and Street Directions in Summertime Using ENVI-Met Simulation

Lim, Hyeonwoo* · Jo, Sangman* · Park, Sookuk**

*Ph.D. Program, Lab. of Landscape Architecture, Graduate School of Horticultural Science,
College of Applied Life Sciences, Jeju National University

**Associate Professor, Research Institute for Subtropical Agriculture and Animal Biotechnology, SARI, Lab.
of Landscape Architecture, Horticultural Science, College of Applied Life Sciences, Jeju National University

ABSTRACT

The modification effects of street trees on outdoor thermal comfort in summertime according to tree planting types and road direction were analyzed using a computer simulation program, ENVI-met. With trees, the air temperature and wind speed decreased, and the relative humidity increased. In the case of mean radiant temperature (T_{mrt}) and human thermal sensation, physiological equivalent temperature (PET) and universal thermal climate index (UTCI), there was a decrease during the daytime. The greatest change among the meteorological factors by trees happened in T_{mrt} , and PET and UTCI showed similar patterns with T_{mrt} . The most effective tree planting type on thermal comfort modification was low tree height, wide tree crown, high leaf area index, and narrow planting interval (LWDN). T_{mrt} , PET and UTCI showed a large difference depending on shadow patterns of buildings and trees according to solar altitude and azimuth angles, and building locations. When the building shade areas increased, the thermal modification effect by trees decreased. In particular, results on the east and west sidewalks showed a large deviation over time. When applying the LWDN, the northwest, west and southwest sidewalks showed a significant reduction of 8.6-12.3°C PET and 4.2-4.5°C UTCI at 10:00, and the northeast, east and southeast sidewalks showed 8.1-11.8°C PET and 4.4-5.0°C UTCI at 16:00. On the other hand, when the least effective type (high tree height, narrow tree crown, low leaf area index, and wide planting interval) was applied, the maximum reduction was up to 1.8°C PET and 0.9°C UTCI on the eastern sidewalks, and up to 3.0°C PET and 0.9°C UTCI on the western ones. In addition, the difference in modification effects on T_{mrt} , PET and UTCI between the

Corresponding author: Sookuk Park, Associate Professor, Research Institute for Subtropical Agriculture and Animal Biotechnology, SARI, Lab. of Landscape Architecture, Horticultural Science, College of Applied Life Sciences, Jeju National University, Jeju 63243, Korea, Tel.: +82-64-754-3326, E-mail: sooland@jejunu.ac.kr

tree planting types was not significant when the tree effects were reduced by the effects of buildings. These results can be used as basic data to make the most appropriate street tree planting model for thermal comfort improvement in urban areas in summer.

Key Words: Human Thermal Sensation, Human Thermal Comfort, Simulation Model, Microclimate, Urban Climate

국문초록

컴퓨터 시뮬레이션 프로그램인 ENVI-met을 활용하여 여름철 도로 방향과 가로수 식재형태에 따른 도시공간의 열환경 개선 효과를 분석하였다. 수목 식재 시 낮 시간 동안의 기온과 풍속은 감소하고 상대습도는 증가하였다. 평균복사온도와 인간 열환경지수 PET(physiological equivalent temperature), UTCI(universal thermal climate index)는 수목 식재 시 감소하는 경향을 보였다. 수목 식재 시 가장 큰 변화를 보인 기상요소는 평균복사온도로, PET와 UTCI 변화량 또한 평균복사온도와 유사한 패턴을 보였다. 가장 큰 저감효과를 보인 수목식재방법은 수고가 낮고, 수관폭이 넓고, 엽면적지수가 높은 수목을 좁은 간격으로 식재하는 시나리오(LWDN)였다. 평균복사온도, PET, UTCI는 태양의 고도 및 방위와 건물의 위치에 따른 그림자 형성 조건에 따라 큰 차이를 보였으며, 건물에 의한 태양복사에너지 차단이 클수록 수목에 의한 영향이 줄어들었다. 특히, 동측과 서측 보도에서는 시간대별 저감량에서 큰 차이를 보였다. 가장 저감효과가 큰 수목식재 시나리오인 LWDN으로 식재하였을 때 서측 방면에 위치한 북서, 서, 남서측 보도는 오전 시간대인 10:00에 수목이 없는 경우에 비해 PET 8.6-12.3°C, UTCI 4.2-4.5°C, 동측 방면에 위치한 북동, 동, 남동측 보도는 오후 시간대인 16:00에 PET 8.1-11.8°C, UTCI 4.4-5.0°C로 큰 저감효과를 보였다. 반면, 가장 저감효과가 적었던 수고가 높고, 수관폭이 좁으며, 엽면적지수가 낮은 수목을 넓은 간격으로 식재하였을 때 최대 저감량은 동측 방면 보도에서 PET 1.8°C, UTCI 0.9°C 이하, 서측 방면 보도에서 PET 3°C, UTCI 0.9°C 이하로 적은 저감효과를 보였다. 또한, 건물에 의한 영향으로 인해 수목영향이 적은 시간대에는 수목식재 시나리오 간 평균복사온도, PET, UTCI 저감효과와 차이가 크지 않았다. 이 연구결과는 가로수 식재 시 여름철 도시 열환경 저감을 위한 모델 개발에 기초자료로서 활용가능할 것이다.

주제어: 인간 열환경지수, 인간 열쾌적성, 시뮬레이션 모델, 미기후, 도시기후

1. 서론

지난 수십 년간 경제 및 인구성장으로 나타난 급격한 도시화로 인해 여러 문제점들이 이슈화되고 있다. 특히, 산업화 시대 전후로 급증한 온실가스 배출량의 증가로 인한 전 지구적인 기온상승과 맞물려, 급격하게 악화되고 있는 도시 내 열환경의 악화는 인간에게 있어 열 질환(heat illness) 발생률과 사망률에 큰 영향을 미쳤다(Kovats and Hajat, 2008). 이것은 도시민들의 삶의 질 악화로 이어졌고, 각 국가의 정부 및 정책가에게 있어 해결해야 할 가장 중요한 문제들 중 한 가지로 자리 잡고 있다.

도시의 열환경은 도시의 형태(구조물, 피복 등)에 따라 다르게 형성된다. 각 공간 구성요소들의 에너지 흡수, 반사, 방출량 등의 물리적인 요인이 다르고, 그 차이에 따라 각 공간에 형성되는 에너지의 차이가 발생한다. 같은 맥락으로 도시중심지역이 외곽, 근교지역보다 높은 열에너지를 보이는 원인을 다음과 같이 정리할 수 있다(Oke, 1982; Stewart and Oke, 2012). 1)

높은 건물높이와 벽에 의한 태양복사에너지 흡수 면적 증가 및 다중 반사(태양복사에너지 흡수량 증가), 2) 인공 구조물에 의한 하늘시계지수(sky view factor, SVF) 감소에 따른 지구복사에너지 방출 방해[지구에너지 갇힘(trapping) 현상으로 인한 지구복사에너지 흡수량 증가], 3) 에너지 흡수율이 높은 건축자재, 포장재에 의한 비열용량(specific heat capacity) 증가[현열(sensible heat) 방출량 증가], 4) 불투수성 포장에 의한 증발산 작용 억제[잠열(latent heat) 방출량 감소, 현열 방출량 증가], 5) 밀집된 인공 구조물, 건축물 등에 의한 풍속 저감, 대류 현상을 통한 열순환 억제(대기 증으로의 잠열과 현열 방출량 감소, 지구복사에너지 방출량 증가). 이외에도 상대적으로 많은 인구에 의한 자동차와 냉·난방 등에 의해 발생하는 인공적 열에너지(artificial heat flux density) 발생량 증가, 대기오염에 의한 대기 중 지구복사에너지 방출량 증가 등을 원인으로 볼 수 있다. 이러한 관점에서 건축물, 수목 등 도시의 기하학적 형태와 물리적 성질 등이 도시 열환경에 있어서 중요한 요인이 됨을 알 수 있다.

도시의 기하학적 구조에서의 가장 큰 비중을 차지하는 요인인 건물에 대한 열환경 분석에 있어 Ali-Tourdert and Mayer(2006)의 연구에서는 컴퓨터 시뮬레이션을 이용한 각 도로 방향과 종횡비에 따른 실외 열환경을 평가하였으며, 더 나아가 도로변 건물의 비대칭 구조, 파사드 등 세부적인 디자인의 영향 또한 분석하였다(Ali-Toudert and Mayer, 2007). Lee *et al.*(2020)의 연구에서는 동-서 방향 도로에 대해 풍향과 풍속에 따른 기온, 평균복사온도, PET(physiological equivalent temperature: Höppe, 1999)의 차이를 분석하였다. Middel *et al.*(2014)의 연구에서는 LCZ(local climate zone: Stewart and Oke, 2012) 분류체계에 따른 대상지를 선정하여 모델링을 통해 열환경을 분석하였고, 비슷한 맥락으로 Lyu *et al.*(2019)의 연구에서는 LCZ 분류체계에 따른 공간을 구성하고 모델링을 통해 도시 공간형태의 매개변수 중 하나인 SVF와 미기후 요소 사이의 상관관계를 분석하는 등의 연구가 진행되어 왔다. 또한, 이러한 도시환경 내에서 실적을 통한 수목의 열저감 효과 분석(Lee *et al.*, 2016; Jo *et al.*, 2017), 컴퓨터 모델링을 통한 식재 형태에 따른 열환경 개선효과 분석(Morakinyo *et al.*, 2017, 2020; Park *et al.*, 2019), 컴퓨터 모델링을 통한 각 조정 요소별 열환경 비교분석(Hyun, 2019) 등 수목에 의한 열환경 개선 효과를 분석하고, 표준화하여, 조경분야에서 열환경 개선을 위한 수목식재 방법론을 제시하고자 하는 연구들 또한 다양하게 진행되어져 왔다.

열환경 개선 관점에서의 컴퓨터 모델링을 통한 조정 계획에 대한 연구는 주로 실제 공간을 대상으로 몇 가지 공간 구성 시나리오를 모델링하여 대상지에 대한 최적의 방안을 찾는 방향으로 연구가 진행되어 왔다(Teshnehdel *et al.*, 2020; Lee and Mayer, 2021; Mohammad *et al.*, 2021). 하지만 이러한 연구들은 공간의 다양성으로 인해 수목 특징, 식재 방식 등에 의한 효과를 객관화할 수 없어 대상지 외의 지역에 대한 참고자료로 활용하는데 한계가 있다. 이러한 관점에서 Park *et al.*(2019), Morakinyo *et al.*(2020), Lee and Mayer(2021)의 연구에서는 시뮬레이션 구성에 있어 주변 공간(종횡비: 건물높이와 도로폭의 비율)을 단순화하고, 수목 형태(수고, 지하고, 수관폭, 지엽 밀도)와 식재 방식에 중점을 두었기 때문에 수목 식재에 있어

보다 기초적인 가이드라인을 제시할 수 있다. 하지만 각 도시에서의 위도에 따라 열환경이 가장 좋지 못한 도로방향에 대해서(독일 프라이부르크·대한민국 서울의 경우 동-서 방향, 홍콩의 경우 남-북 방향)만 분석이 진행되었다.

이에 본 연구에서는 앞선 연구들과 같은 맥락으로 가로공간에서의 수목 식재 방식에 따른 열 저감 효과를 비교하고, 추가적으로 도로 방향이 다른 경우 수목 식재 효과에 대해서도 분석해 보고자 한다.

II. 연구방법

1. 연구 대상지

본 연구는 제주특별자치도 서귀포시 도시 바람길숲 기초조사 사업과 연계하여 진행되었다. 제주도는 한반도 최남단에 위치한 섬으로 쾨펜기후구분 중 온난습윤기후(cfa)에 해당하며, 연중 온난 습윤한 해양성이 강하여 내륙지역에 비해 일교차가 적고, 기온과 습도가 높으며, 풍속이 강한 특징이 있다. 대상지인 서귀포시는 한라산을 중심으로 남측에 위치하여 북고남저의 지형을 보인다.

기후정보를 얻기 위해 서귀포시 동흥동에 설치된 종관기상 관측(ASOS) 자료의 2004년부터 2019년까지 측정된 자료를 분석하였다(Table 1 참조). 풍속은 바다의 영향으로 평균 2.3~2.5 ms⁻¹로 대체적으로 내륙보다는 높게 나타났다. 풍향은 낮 시간대에는 해풍의 영향으로 남서풍이 많이 불었으며, 가을철에는 북동풍의 영향이 큰 것으로 나타났다(Figure 1 참조). 밤 시간대에는 북쪽에 위치한 한라산의 영향으로 산곡풍이 불어와 주로 북풍이 불어오는 것으로 나타났다. 여름철에는 평균기온이 낮 시간대 25.8℃, 밤 시간대 24.3℃로 변동폭이 1.5℃로 작았으며, 상대습도에서도 평균 83.8%로 낮과 밤 시간대의 평균차이는 4%밖에 나지 않았다. 평균풍속에서는 주간 2.6 ms⁻¹, 야간 2.0 ms⁻¹로 평균 2.3 ms⁻¹를 나타냈다. 풍향은 낮 시간대에는 남서풍이 주로 불어왔고, 밤 시간대에는 북동풍이 불어오는 것으로 나타났다.

연구 대상인 가로공간에 대한 정보는 국토지리정보원에서

Table 1. Mean seasonal climatic data from 2004 to 2019 in Seogwipo-si

Season	Air temperature(℃)			Relative humidity(%)			Wind speed(ms ⁻¹)		
	Daytime	Nighttime	Mean	Daytime	Nighttime	Mean	Daytime	Nighttime	Mean
Spring	16.3	13.5	14.9	64.2	68.7	66.5	2.7	2.1	2.4
Summer	25.8	24.3	25.0	81.8	85.8	83.8	2.6	2.0	2.3
Fall	21.2	18.1	19.7	65.3	71.5	68.4	2.7	2.2	2.5
Winter	9.4	7.2	8.3	59.5	66.2	62.9	2.6	2.1	2.3

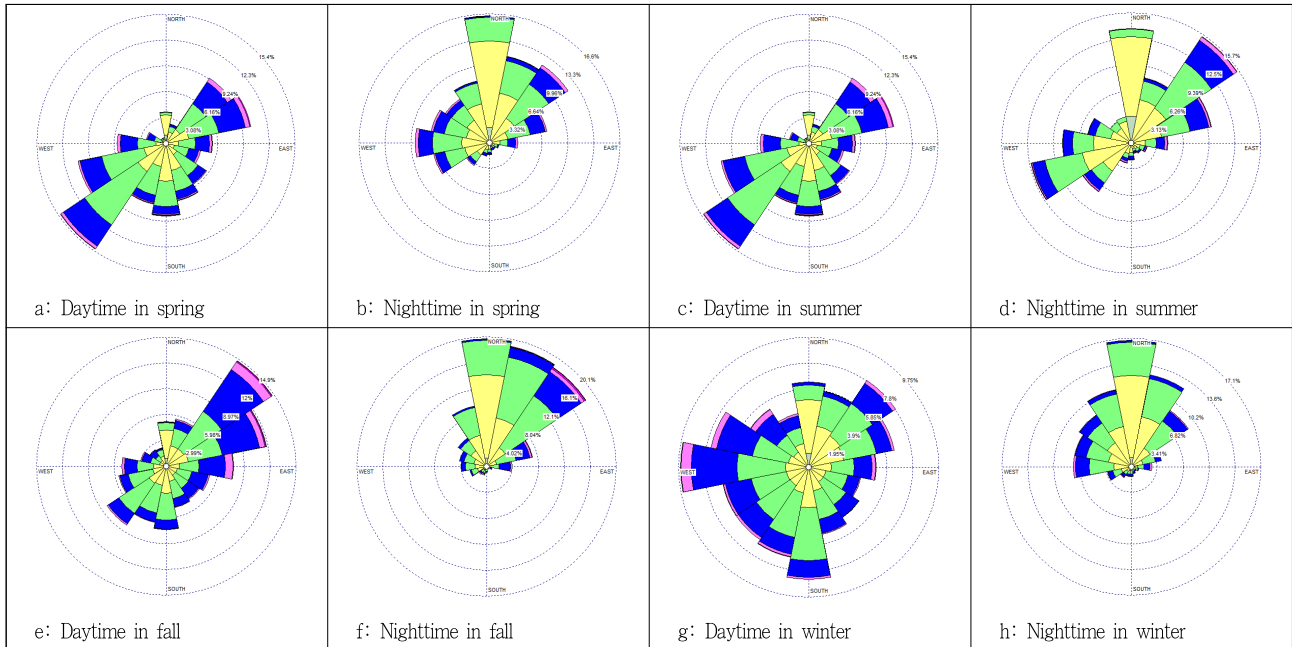


Figure 1. Windrose maps of seasonal daytime and nighttime from 2004 to 2019 in Seogwipo-si

제공하는 건축물과 도로 자료를 활용하여 조사하였다. 제주특별자치도 내 가장 도시화가 많이 진행된 신제주, 구제주 지역을 대상으로 도로 폭과 건물 높이를 조사하였으며, 가로수 식재가 가능한 지역을 구별하기 위해 보도가 있는 도로만을 대상으로 통계분석을 진행하였다. 분석결과, 대상지 내 21m, 25m의 4차선 도로가 가장 많은 비율을 차지하고 있었으며, 인근 건물 높이는 12m 내외의 3층 건물이 가장 많이 위치한 것으로 조사되었다.

2. 연구방법

1) 인간 열환경지수(Human thermal sensation)

환경 조건 및 도시 내 공간적 구조에 의해 조성된 열환경에 대해, 인간은 열수용체로 열환경 평가의 중요한 지표라고 할 수 있다(Coccolo *et al.*, 2016). 일반적으로 열쾌적성(thermal comfort)이라고 불리는 지표를 정량화하기 위한 노력은 20세기부터 시작되었으며, 1930년대 초 최초로 인체와 주변환경에서의 열 교환작용을 고려한 모델이 개발되었고('2-node-model': Gagge, 1936), 1970년 인간 열환경 연구에 기반이 되는 PMV(predicted mean vote: Fanger, 1970)가 개발되었다. 현재 전 세계적으로 널리 사용되고 있는 PMV, PET, UTCI(universal thermal climate index: Bröde *et al.*, 2012a, 2012b), COMFA(comfort formula: Brown and Gillespie, 1986) 등과 같은 열환경지수들은 인간 에너지 균형 모델(human energy balance model)을 기반으로 계산된다. 인간 에너지 균형 모델이란 인체

주변 환경으로부터 인체로 흡수·방출되는 에너지량을 정량적으로 계산하여, 열생리학적(thermophysiological)으로 인간이 수용하는 열적 반응을 분석하기 위한 모델이다(Eq. 1: Park, 2011).

$$M + R^* + L^* - L_b + C + E + C_r + E_r + H = S \quad (\text{Eq. 1})$$

M 은 신진대사에너지(metabolic energy), R^* 은 인체에 흡수되는 태양복사에너지(absorbed solar radiation)를 의미하며, 태양 직사광선(direct beam solar radiation, K_b), 건축물 또는 수목에 의해 가려지지 않은 하늘이 보이는 공간(sky view factor, SVF)에서 인체로 흡수되는 태양 분사광선(diffuse beam solar radiation, K_d), 그리고 건축물(solar radiation reflected by buildings, K_{ro})·수목(solar radiation reflected by trees, K_{rveg})·지표면(solar radiation reflected by the ground, K_{rg})에서 반사되어 흡수되는 태양 반사광선(reflected solar radiation, K_r)으로 구성된다. L^* 은 인체에 흡수되는 지구복사에너지(absorbed longwave radiation)를 의미하며, 하늘 공간(longwave radiation from the sky, L_a)·건축물(longwave radiation from buildings, L_b)·수목(longwave radiation from trees, L_{veg})·지표면(longwave radiation from the ground, L_g)에서 방출되어 인체로 흡수되는 지구복사에너지이고, L_b 는 인체에서 주변 환경으로 방출되는 지구복사에너지(longwave radiation from a human body surface)이다. C 는 인체 표면과 주변 공기의 온도 차이에 의해 발생하는 현열(sensible heat flux density), E 는 인체 표

면과 주변 공기의 습도 차이에 의해 발생하는 잠열(latent heat flux density), C_r 은 호흡을 통해 교환되는 현열, E_r 은 호흡을 통해 교환되는 잠열을 뜻하며, H 는 전도열(conductive heat flux density)이다. S 는 결과적으로 위의 에너지 교환이 이루어진 후, 인체에 남은 에너지량을 의미하며, S 의 값이 양(+)의 값이면 따뜻함, 더움, 매우 더움 등의 열환경지수 단계를 나타내며, 음(-)의 값이면 서늘함, 추움, 매우 추움 등의 단계를 나타낸다(Figure 2 참조).

본 연구에서는 전 세계에서 옥외공간의 인간 열환경 분석에 가장 많이 이용되는 PET와 UTCI를 통해 도시의 열환경을 분석하였다. PET는 열 지각(thermal perception) 정도를 나타내기 위한 지수로, 앞서 개발된 PMV에 적용된 Fanger(1970)의 방정식에서 인체의 에너지 교환 조건에 대해 현실적인 설명 부족에 대한 문제점을 보완하여 보다 실질적인 예측이 가능한 열

생리학적 균형 모델인 MEMI(Munich energy-balance model for individuals: Höppe, 1993)를 기반으로 계산된다. 단위는 온도(°C)로 표현되며, PET에 대한 열 지각 분류는 9단계로 구분할 수 있다(Matzarakis and Mayer, 1996). UTCI는 국제생명기상학회(International Society of Biometeorology, ISB)에서 전 세계적으로 보편화하여 적용 가능한 열생리학적 지수 개발을 위한 프로젝트에 의해 개발되었다(Błażejczyk *et al.*, 2013). PET, PMV와 같이 에너지 균형 모델을 기반으로 하며 심부, 피부 온도를 기반으로 동적인 열 감각에 대한 예측이 가능한 다중 노드 모델이 적용되었다(Fiala *et al.*, 2003; Bröde *et al.*, 2012b). UTCI의 단위도 온도(°C)로 표현되며, 열 스트레스(thermal stress) 표현을 중심으로 개발되었으며, UTCI는 10단계로 구분할 수 있다. PET와 UTCI의 열 지각 및 열 스트레스 단계는 Table 2와 같다.

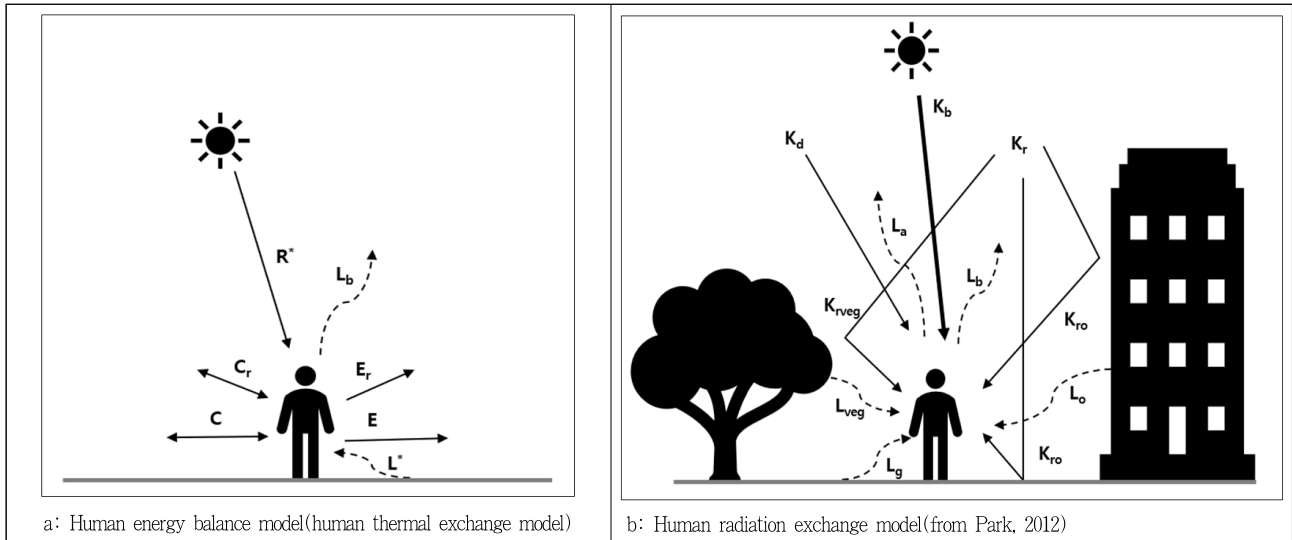


Figure 2. Energy transfers between a human body and its surrounding environment

Table 2. The thermal perception and stress levels of physiological equivalent temperature(PET) and universal thermal climate index(UTCI)(Jung *et al.*, 2016)

Thermal perception	PET(°C)	UTCI(°C)	Grade of physiological stress
Very cold	< 4	< -40	Extreme cold stress
		-40~-27	Very strong cold stress
Cold	4~8	-27~-13	Strong cold stress
Cool	8~13	-13~0	Moderate cold stress
Slightly cool	13~18	0~9	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

2) ENVI-met

미기후(microclimate)에서의 열환경 평가는 실측과 컴퓨터 모델링 등을 통하여, 지역 내 세부적인 공간에 대한 평가가 가능하다. 과거 원격탐사, 소규모 물리적 측정 등 관측 중심의 접근방법이 도시 미기후 연구에 있어 주로 사용되었다면, 시간이 지남에 따라 기술과 자본의 증가로 수치 모델링을 통한 도시 미기후에 대한 평가방법이 발전되고 있다(Toparlar *et al.*, 2017). EBM(energy balance models), CFD(computational fluid dynamics)와 같은 수치모델을 통한 접근방법은 기존 관측 중심의 접근방법에 비해, 서로 다른 형태의 공간 시나리오를 비교 분석할 수 있다. 또한, 측정지점에 대한 정보만을 얻을 수 있는 관측 중심 접근법에 비해, 전체 공간에 대한 정보를 얻을 수 있다는 장점이 있다.

본 연구에서는 공간형태에 따른 기상요소 및 열환경의 변화를 확인하기 위해, 전 세계적으로 도시 미기후와 인간 열환경 분석에서 가장 많이 이용되고 있는 CFD 모델인 ENVI-met Version 4.4.5(<https://www.envi-met.com>)를 활용하였다(Lenzholzer and Brown, 2016; Lam *et al.*, 2021). ENVI-met는 공간을 구성하는 구조물 및 피복 재료, 식물체에 따른 복사에너지 교환을 포함하는 3차원 비정역학모델(non-hydrostatic model)로 0.5~10m의 그리드(grid) 해상도로 분석이 가능하다(Bruse and Fler, 1998). 본 연구는 ENVI-met 시뮬레이션을 통해 계산된 데이터를 활용하여 분석을 진행하였다. 본 분석에 앞서 연구 대상지인 서귀포시에서의 ENVI-met 시뮬레이션의 성능

을 판단하기 위해 실측자료와 ENVI-met 시뮬레이션 결과를 SPSS Version 24를 이용하여 비교하였다. 2015년 여름철 서귀포시에서 측정된 가로수 실측자료(Jo *et al.*, 2017)를 활용하여 이에 대한 ENVI-met 시뮬레이션 결과와의 상관분석을 진행하여 대상지에서의 ENVI-met 시뮬레이션 결과에 대한 적합성을 평가하였다.

(1) 입력자료

기상 입력 자료는 시간별 기온, 상대습도, 평균 풍속 및 풍향값을 활용하였다. 시간별 기온과 상대습도자료는 여름철 평균값과 가장 유사한 일 평균값을 보인 2004년 6월 30일의 기상자료를 활용하였다(Table 3 참조). 풍속과 풍향은 ENVI-met의 단순제어기능을 사용하여 초기 입력해 준 값으로 고정되기 때문에, 여름철 평균 풍속인 2.3 ms^{-1} 와 가장 많은 빈도를 보인 남서풍(225°)으로 설정하였다.

공간입력자료는 앞서 조사된 자료를 바탕으로 길이 100m, 도로폭 25m(차도 15m, 보도 $5\text{m} \times 2$)로 설정하였으며, 도로의 양측에는 높이 12m, 폭 10m의 건물을 배치하였다(Figure 3 참조). 공간입력자료에 활용된 표면 특성[태양복사에너지 반사율(reflectivity, albedo), 지구복사에너지 방사율(emissivity)]은 창원시에서 조사된 Park(2012)의 자료를 활용하여 설정하였다(Appendix A). 분석 해상도는 $1 \times 1 \times 1\text{m}$ 로 분석 공간 외곽으로 3m의 여유 공간을 두어 $x \times y \times z = 51 \times 106 \times 30\text{m}$ 로 설정해 주었다.

Table 3. Weather input data

Time	Air temperature(°C)	Relative humidity(%)	Time	Air temperature(°C)	Relative humidity(%)
00:00	23.7	79.0	12:00	27.9	71.0
01:00	23.3	82.0	13:00	28.2	67.0
02:00	23.2	82.0	14:00	28.1	69.0
03:00	23.6	78.0	15:00	28.5	67.0
04:00	22.5	81.0	16:00	27.7	68.0
05:00	22.2	81.0	17:00	26.5	73.0
06:00	22.3	80.0	18:00	26.4	73.0
07:00	24.0	76.0	19:00	25.4	79.0
08:00	25.4	76.0	20:00	24.5	84.0
09:00	25.9	75.0	21:00	24.3	86.0
10:00	26.5	74.0	22:00	24.0	83.0
11:00	27.1	72.0	23:00	23.5	84.0

Wind speed : 2.3 ms^{-1} Wind direction : 225°

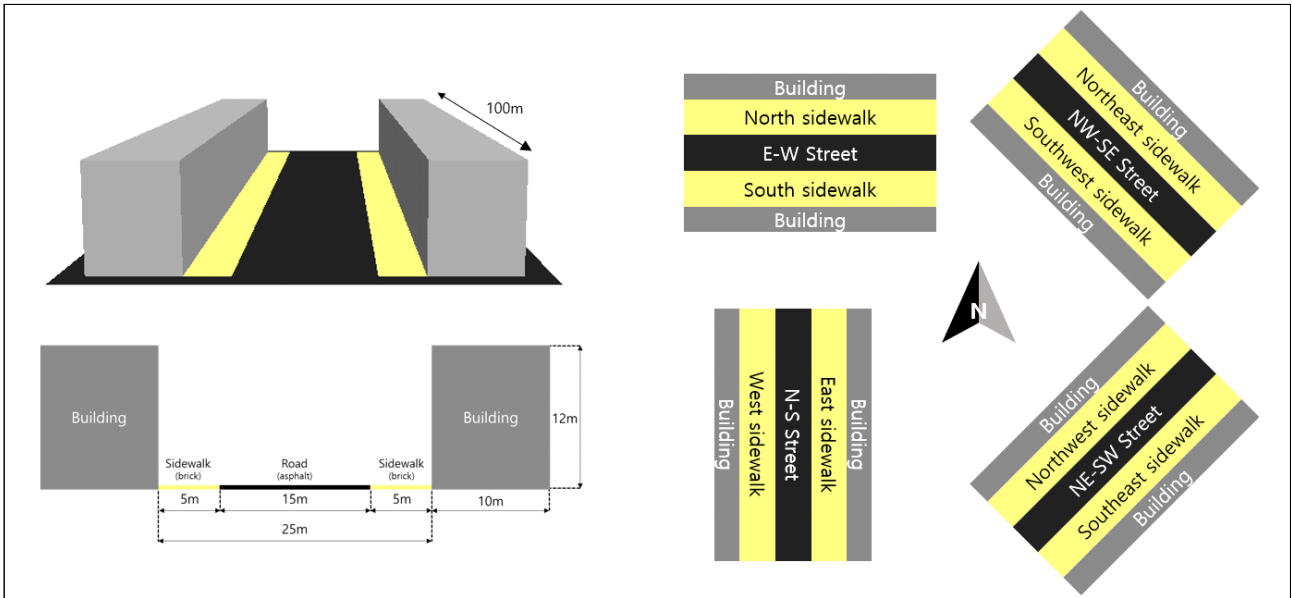


Figure 3. ENVI-met simulation area input data

(2) 시뮬레이션 시나리오

도시 내 인간 열환경에 있어 수목은 도시의 열 스트레스를 저감하는데 중요한 역할을 한다. 수목의 가장 큰 효과는 수관에 의한 그늘 형성이다. 가로수의 그늘 형성에 있어 중요한 수목특성은 이전 연구를 참고하여 수고, 수관폭, 엽면적지수와 수목의 식재간격 4가지 요소를 변수로 설정하였다(Morakinyo *et al.*, 2020; Lee and Mayer, 2021). 각 변수에 대한 수치는 Jo *et al.*(2017)에서 조사된 제주도 내 가로수 자료를 참고하여 수고는 6m, 10m, 수관폭은 7m, 9m로 설정하였고, 엽면적지수는 LAI[leaf area index(m^3m^{-3})]를 각각 1.5, 3.0의 값을 설정하였다. 수목의 식재거리는 8m, 12m 간격으로 설정하여 총 16개의 수목식재시나리오를 작성하였다(Table 4, 5 참조). 도로 공간은 남-북, 북동-남서, 동-서, 북서-남동 총 4개의 방향으로 설정하여 수목식재시나리오와 합쳐 총 64개의 시나리오에 대해 시뮬레이션을 진행하였다.

수목식재 특성에 대한 표기는 약어를 활용하였다. 예를 들어, 수고가 낮고(6m), 수관폭이 넓고(9m), 엽면적지수가 높고(LAI 3.0), 식재간격이 좁을 경우(8m), LWDN(low, wide, dense, narrow)으로 표기하였다(Table 4 참조). 반대로 수고가 높고(10m), 수관폭이 좁고(7m), 엽면적지수가 낮고(LAI 1.5), 식재간격이 넓은 경우(12m), HNSW(High, Narrow, Sparse, Wide)로 표기하였다. 각 위치별 보도의 위치는 방향별 도로를 중심으로 하여 방향에 따라 표기하였다(Figure 3 참조).

3) 결과 분석

ENVI-met 시뮬레이션을 통해 각 시나리오별 보도 공간의 기온, 상대습도, 풍속, 평균복사온도와 PET, UTCI의 평균값을

Table 4. Spatial input data variables

		Variable
Road	Aspect ratio	H/W = 0.48 (road width = 25m, building height = 12m)
	Road direction	N-S(0°)
		NE-SW(45°)
		E-W(90°)
NW-SE(135°)		
Tree	Height(m)	6(low)
		10(high)
	Crown width(m)	7(narrow)
		9(wide)
	Leaf area index (LAI, m^3m^{-3})	1.5(sparse)
3.0(dense)		
Planting distance(m)	8(narrow)	
	12(wide)	

계산하여 비교하였다. PET는 ENVI-met의 BIO-met를 이용해 계산하였으며, UTCI의 경우 BIO-met를 통해 계산 시 풍속이 $0.3 ms^{-1}$ 이하일 경우 불안정한 값을 보여, 공간에 대한 각 기상요소를 활용하여 RayMan Pro, Version 2.2(Matzarakis *et al.*, 2007, 2010) 프로그램을 이용해 계산해 주었다. 모든 결과는 지상에서 1.5m 높이에 대해서 분석을 하였으며, 하루 중 가장 극심한 열환경을 갖는 시간대인 10:00-16:00의 자료를 분석하였다. 분석과정은 크게 4단계로 1) 수목이 없는 경우 평균값, 2)

Table 5. Tree planting variables and abbreviation

Height(m)	Crown width(m)	Leaf area index(LAI)	Planting distance(m)	Abbreviation
6(low)	7(narrow)	1.5(sparse)	8(narrow)	LNSN
			12(wide)	LSNW
		3.0(dense)	8(narrow)	LNDN
			12(wide)	LNDW
	9(wide)	1.5(sparse)	8(narrow)	LWSN
			12(wide)	LWSW
		3.0(dense)	8(narrow)	LWDN
			12(wide)	LWDW
10(high)	7(narrow)	1.5(sparse)	8(narrow)	HNSN
			12(wide)	HSNW
		3.0(dense)	8(narrow)	HNDN
			12(wide)	HNDW
	9(wide)	1.5(sparse)	8(narrow)	HWSN
			12(wide)	HWSW
		3.0(dense)	8(narrow)	HWDN
			12(wide)	HWDW

수목이 없는 경우 시간별 변화량, 3) 수목식재 시나리오별 평균 저감량, 4) 수목식재 시나리오별 시간별 저감량을 분석하였다.

III. 연구결과 및 고찰

1. ENVI-met 시뮬레이션 적합성 평가

SPSS의 이변량 상관분석(bivariate correlation) 방법을 이용하여 기온, 상대습도, 풍속, 평균복사온도, PET, UTCI에 대한 상관분석을 진행하였다. 각 요소에 대한 결정계수(r^2) 값은 기온 $r^2 = 0.741$, 상대습도 $r^2 = 0.436$, 풍속 $r^2 = 0.036$, 평균복사온도 $r^2 = 0.52$, PET $r^2 = 0.594$, UTCI $r^2 = 0.743$ 으로 나타났다.

다(Table 6 참조). 풍속을 제외한 모든 요소는 99% 수준에서 통계학적으로 상관성이 있는 것으로 나타났다.

ENVI-met를 활용한 선행연구에서의 각 요소별 결정계수를 보면 기온의 경우 $r^2 = 0.63-0.99$, 상대습도 $r^2 = 0.76-0.97$, 풍속 $r^2 = 0.1-0.82$, 평균복사온도 $r^2 = 0.0625-0.997$, PET $r^2 = 0.77$ 의 값을 보였으며, UTCI에 대한 검증 결과는 없었다(Appendix 2, Lam *et al.*, 2021). 선행연구들의 결과와 비교하였을 때, 서귀포시에서의 결과는 상대습도와 풍속은 낮게 나타났다. 기온·평균복사온도·PET에서는 선행 연구들과 비슷한 수준의 결과를 보였다. UTCI의 경우는 비교할 수 있는 선행 연구가 없었지만, 본 분석 결과 중 가장 높은 결정계수 값을 보였다. 그러므로, 대상지인 서귀포시에서의 ENVI-met 시뮬

Table 6. Correlation analysis between measured microclimatic data and ENVI-met results

Microclimatic elements	N	p-value	r(spearman's rho)	r^2
Air temperature	15	0	0.861**	0.741
Relative humidity	15	0.007	0.660**	0.436
Wind speed	15	0.868	-0.189	0.036
Mean radiant temperature	15	0.002	0.721**	0.52
PET	15	0.001	0.771**	0.594
UTCI	15	0	0.862**	0.743

**Correlation is significant at the 0.01 level(2-tailed).

레이션 결과는 상대습도, 풍속을 제외하고 다른 지역에서의 결과와 비슷한 수준의 성능을 보이는 것으로 판단된다.

2. 도로 방향별 평균

1) 도로 방향별 평균

먼저 수목이 없는 경우의 각 기상요소 및 인간 열환경지수의 10:00~16:00 동안의 평균값을 도로방향별로 살펴보았다. 기온은 남-북 방향 도로의 서측 보도에서 31.1°C, 동-서 방향 도로의 남측 보도에서 31.0°C로 가장 높은 평균값을, 북서-남동 방향 도로의 북동측 보도에서 29.5°C로 가장 낮은 평균값을 보였다(Figure 4a 참조). 상대습도는 북동-남서 방향 도로의 남동측 보도에서 63.5%로 가장 높은 평균값을, 남-북 방향 도로의 서측 보도에서 58.5%로 가장 낮은 평균값을 보였다(Figure 4b 참조). 풍속의 경우 전체적으로 입력 풍속인 2.3 ms⁻¹ 보다 낮은 값을 보였다(Figure 4c 참조). 풍향과 수직으로 위치한 북서-남동 도로의 북동측, 남서측 보도에서 0.1, 0.2 ms⁻¹ 로 가장 낮은 값을 보였으며, 풍향의 45° 각도로 위치한 동-서, 남-북 방향 도로의 보도에서는 0.9, 1.1 ms⁻¹, 수평방향으로 위치한 북동-남서 방향 도로의 보도에서는 1.3 ms⁻¹ 로 가장 높은 풍속을 보였다. 평균복사온도는 동-서 방향 도로의 북측 보도에서 60.6°C로 가장 높은 값을, 북서-남동 방향 도로의 남서측 보도에서 52.6°C로 가장 낮은 값을 보였다(Figure 4d 참조). 동-서 방향 도로의 남측 보도를 제외하고 전체적으로 북-동측에 위치하는 보도일수록 높은 값을 보였다.

PET의 경우 북서-남동 방향 도로의 북동측 보도에서 48.6°C로 '매우 더움(very hot)' 수준의 열 지각 단계를 보이며 가장 높은 값을 보였고, 북동-남서 방향 도로의 남동측 보도에서 39.1°C로 '더움(hot)' 수준의 열 지각 단계를 보이며 가장 낮은 값을 보였다(Figure 4e 참조). 각 보도 위치별로 북측, 북동측, 남측, 남서측 보도에서 '매우 더움' 수준의 열 지각 단계, 동측, 남동측, 서측, 북서측 보도에서 '더움' 수준의 열 지각 단계를 보였다. UTCI 에서는 동-서 방향 도로의 북측 보도에서 39.4°C로 가장 높은 값을, 북서-남동 방향도로의 남서측 보도에서 37.0°C로 가장 낮은 값을 보였으며, 북측, 북동측, 남측 보도에서 '매우 강한 열 스트레스(very strong heat stress)', 동측, 남동측, 남서측, 서측, 북서측 보도에서 '강한 열 스트레스(strong heat stress)' 단계를 보였다(Figure 4f 참조).

2) 시간별 비교

각 도로 방향별 보도 위치에 대한 자료를 시간별로 분석하였다(Figure 5 참조). 먼저 기온의 경우 서측방면으로 위치한 북서측, 서측, 남서측 보도에서는 13:00까지 기온이 증가하다 이후 감소하는 경향을 보였다(Figure 5a 참조). 동측 방면에 위치한 북동측, 동측, 남동측 보도와 북측, 남측 보도에서는 15:00까지 기온이 증가하는 경향을 보였으며, 동-서 방향 도로의 남측 보도에서 15:00에 32.4°C로 가장 높은 기온값을 보였다. 상대습도는 기온과 유사한 패턴을 보이며, 서측 방면에 위치한 북서측, 서측, 남서측 보도에서는 13:00까지 감소하다 이후 약간 증가하며, 나머지 위치의 보도에서는 15:00~16:00까지

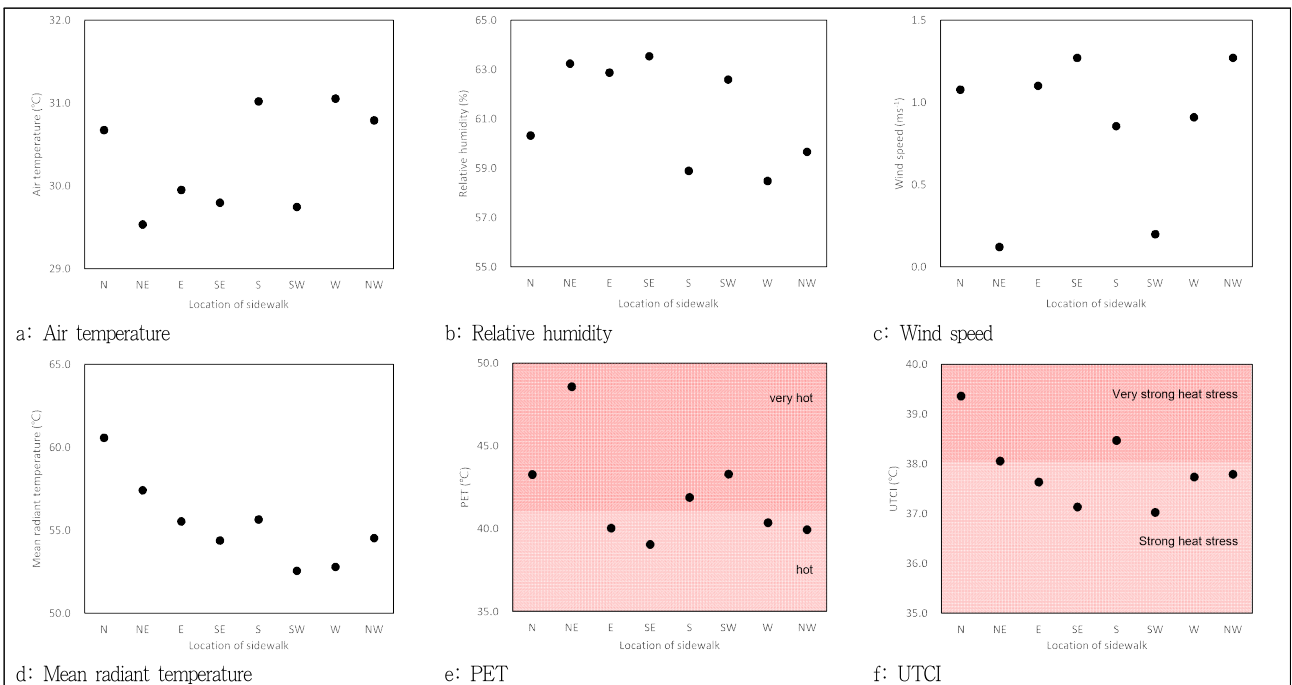


Figure 4. Mean microclimatic data by the location of sidewalk

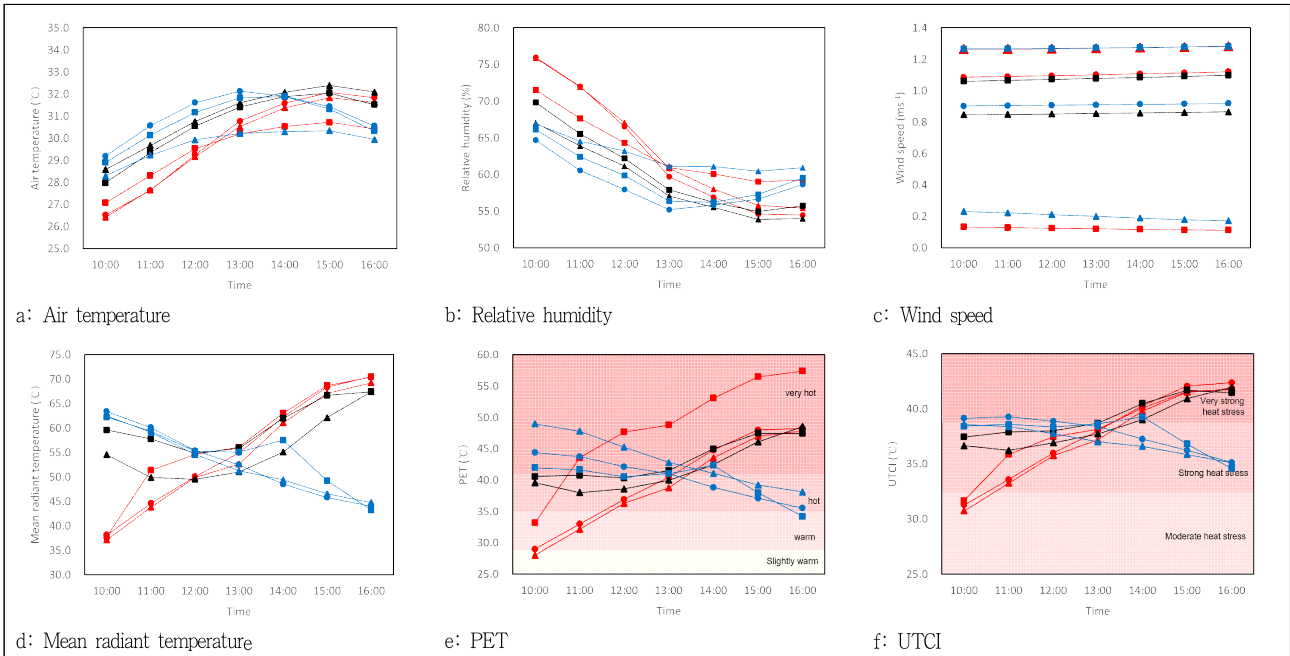


Figure 5. Microclimatic data according to the location and time of sidewalk

Legend: ■ Northeast ■ East ■ Southeast ■ North ■ South ■ Northwest ■ West ■ Southwest

감소하는 경향을 보였다(Figure 5b 참조). 풍향과 풍속의 경우 초기 설정해준 값이 유지되기 때문에 큰 변화를 보이지 않았고, 보도 위치별 차이는 낮 시간 평균값과 유사하였다(Figure 5c 참조).

평균복사온도는 서측 방면에 위치한 북서측, 서측, 남서측 보도에서는 10:00에 62.2-63.4°C로 가장 높은 값을 보이다 시간이 지날수록 점차 감소하였고, 동측 방면에 위치한 북동측, 동측, 남동측 보도에서는 오전시간 낮은 값을 보이다 점차 증가하여 16:00에 69.2-70.5°C로 가장 높은 값을 보였다(Figure 5d 참조). 오전시간 서측 방면의 보도보다 오후시간 동측 방면의 보도에서 더 높은 값을 보였으며, 동측 보도에서 16:00에 70.5°C로 가장 높은 값을 보였다. 동-서 방향 도로의 남측, 북측 보도에서는 12:00를 기준으로 10:00부터 시간이 지날수록 점차 감소하다가 12:00 이후 다시 증가하여 16:00에 67.4°C로 가장 높은 값을 보였다.

PET의 경우 평균복사온도와 비슷하게 서측, 남서측 보도는 10:00, 북서측 보도는 14:00, 동측 방면에 위치한 북동측, 동측, 남동측 보도는 16:00에 가장 높은 값을 보였다(Figure 5e 참조). 풍속이 낮게 나타난 북서-남동 방향 도로의 북동측, 남서측 보도에서 다른 위치의 보도들보다 더 높은 값을 보였으며, 북동측 보도에서 16:00에 57.4°C로 가장 높은 PET값을 보였다. 열 지각 단계를 시간별로 살펴보면 북서측, 서측 보도는 10:00부터 약 4시간 정도 '매우 더움' 수준의 열 지각 단계를 보였고, 동측, 남동측 보도와 북측, 남측 보도에서는 13:00-14:00 이후 3-4 시간 정도 '매우 더움' 수준의 열 지각

단계를 보인 반면, 북동측, 남서측 보도는 5-6시간 동안 41°C 이상의 값을 보이며 다른 위치의 보도에 비해 더 긴 시간 동안 '매우 더움' 수준의 열 지각 단계를 보였다.

UTCI 또한 평균복사온도와 매우 유사한 패턴을 보였다(Figure 5f 참조). 서측 보도는 11:00에 39.2°C, 남서측 보도는 10:00에 38.6°C, 북서측 보도는 14:00에 39.2°C로 하루 중 가장 높은 값을 보였고, 북동측, 동측, 남동측 보도는 16:00에 41.7°C, 42.4°C, 41.8°C로 하루 중 가장 높은 값을 보였다. PET에서 북동측, 남서측 보도에서 높은 값을 보인 반면, UTCI에서는 동측, 서측 보도에서 더 높은 값을 보였다.

3. 수목식재 효과

1) 낮 시간 평균 저감량

16개의 수목식재 시나리오에 대한 시뮬레이션 결과를 비교 분석하였다(Figure 6, Appendix 2 참조). 각 시나리오 적용 시 기상요소 및 인간 열환경지수 PET와 UTCI의 평균 변화량을 비교해 본 결과, LWDN 시나리오에서 가장 큰 변화량을, HNSW 시나리오에서 가장 적은 변화량을 보였다. 기온의 경우 북동측, 남서측 보도를 제외하고 수목 식재 시 감소하였으며, 북측 보도에서 LWDN 시나리오 적용 시 0.8°C로 가장 큰 감소 효과를 보였다(Figure 6a 참조). 풍향과 수직으로 위치한 북서-남동 방향의 북동측, 남서측 보도에서는 수목 식재 시 오히려 기온이 약간 증가하는 경향을 보였다. 상대습도는 남서측 보도를 제외하고 수목 식재 시 증가하였으며, 북측 보도에서 LWDN

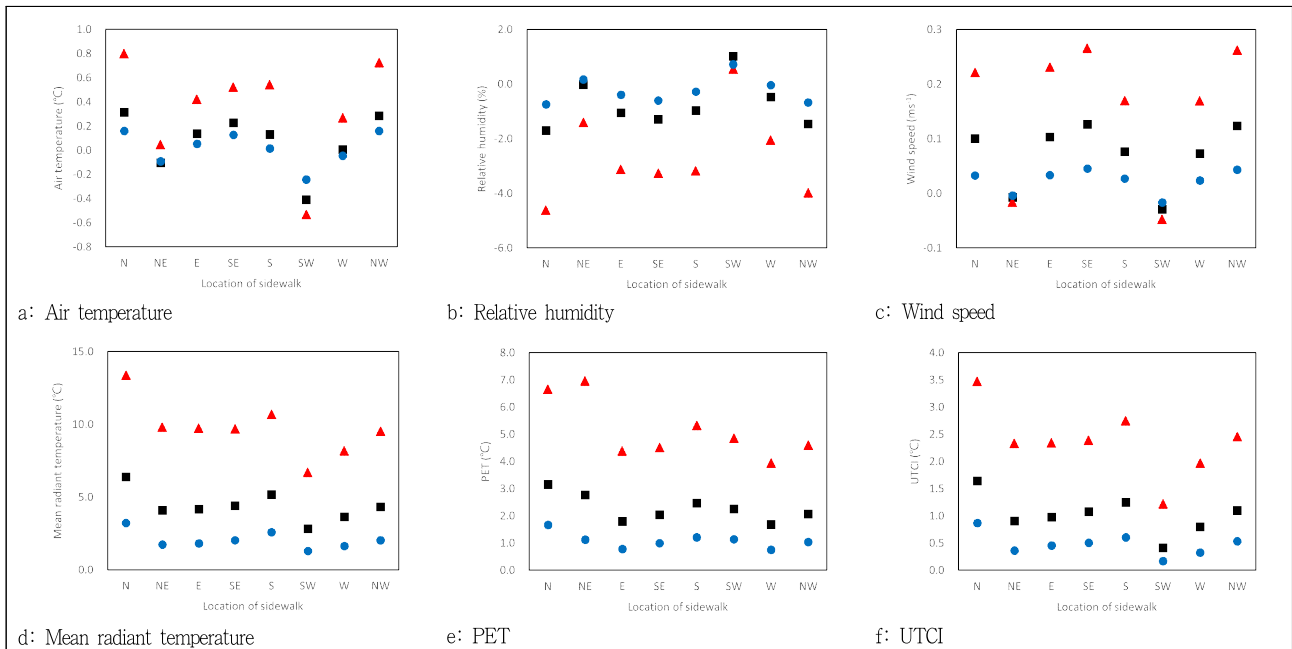


Figure 6. The mean reduction in microclimatic data with planting trees [the red triangle is maximum reduction among scenarios(LWDN: low tree height, wide tree crown width, high LAI value, and narrow planting interval), the black square is mean of all scenarios, and the blue dot is minimum reduction among scenarios(HNSW: high tree height, narrow tree crown width, low LAI value, and wide planting interval). The scenarios were vice versa in relative humidity]

Legend: ▲ No trees – LWDN scenario ● No trees – HNSW scenario ■ No trees – average of scenarios

시나리오 적용 시 4.6%로 가장 큰 증가량을 보였다(Figure 6b 참조). 풍속의 경우 수목 식재 시 감소하였지만, 그 수치가 0.3 ms^{-1} 이내로 1.5m 높이에서 수목에 의한 영향이 거의 없는 것으로 보였다(Figure 6c 참조). 평균복사온도의 경우 LWDN 시나리오 적용 시 6.7-13.4°C의 평균 저감량을 보인 반면, HNSW 시나리오 적용 시 1.3-3.2°C의 적은 저감량을 보였다. 보도 위치별로 보았을 때, 북측 보도에서 LWDN 시나리오 적용 시 13.4°C로 가장 큰 저감량을 보였다(Figure 6d 참조).

PET와 UTCI도 LWDN 시나리오 적용 시 PET 3.9-7.0°C, UTCI 1.2-3.5°C 감소하여 가장 큰 저감효과를 보였고, HNSW 시나리오 적용 시 PET 0.7-1.7°C, UTCI 0.2-0.9°C 감소하여 가장 적은 저감효과를 보였다(Figure 6e, f 참조). 보도 위치별 수목식재효과는 LWDN 시나리오 적용 시 PET는 북동측 보도에서 7.0°C, UTCI는 북측 보도에서 3.5°C로 가장 큰 저감효과를 보였다.

2) 시간별 저감량

수목 식재효과가 가장 크게 나타난 LWDN 시나리오와 가장 적은 HNSW 시나리오의 수목식재 효과를 시간별로 분석하였다(Figure 7 참조). 기온의 경우 LWDN 시나리오 적용 시 북서측 보도에서 12:00-13:00에 0.9°C로 가장 큰 감소를 보였다(Figure 7a 참조). 풍향에 수직으로 위치한 북서-남동 방향의 도로에서는 수목 식재 시 기온이 오히려 증가하기도 하였는데,

북동측 보도에서는 14:00-16:00, 남서측 보도에서는 11:00 이후 기온이 증가하는 값을 보였다. HNSW 시나리오 적용 시 기온의 최대 감소량은 0.2°C, 증가량은 0.3°C 정도로 LWDN 시나리오에 비해 수목식재에 의한 기온 변화가 적게 나타났다.

상대습도는 수목 식재 시 대부분 증가하는 값을 보였으며, LWDN 시나리오 적용 시 북서측 보도에서 11:00-12:00에 4.7%로 최대 증가량을 보였다(Figure 7b 참조). 북동측 보도에서 15:00, 남서측 보도 12:00 이후에는 오히려 상대습도가 감소하였으며, 남서측 보도에서 14:00-15:00에 2%로 최대 감소량을 보였다. HNSW 시나리오 적용 시에는 최대 증가량 1%, 최대 감소량 1.1%로 LWDN 시나리오에 비해 적은 수치를 보였다.

풍속의 경우 도로 방향별로 차이를 보였다(Figure 7c 참조). LWDN 시나리오 적용 시 풍향에 수평 방향으로 위치한 북동-남서 방향 도로에서는 최대 0.3 ms^{-1} 로 가장 큰 저감량을 보였으며, 동-서 방향, 남-북 방향 도로에서는 수목에 의해 0.2 ms^{-1} 의 저감량을 보였다. 풍향에 수직으로 위치한 북서-남동 방향의 도로에서는 수목에 의한 변화가 거의 나타나지 않았으며, 남서측 보도에서 14:00 이후로 0.1 ms^{-1} 정도로 약간 증가하는 경향을 보였다. HNSW 시나리오에서는 수목에 의한 변화량이 0.1 ms^{-1} 이내로 나타났다.

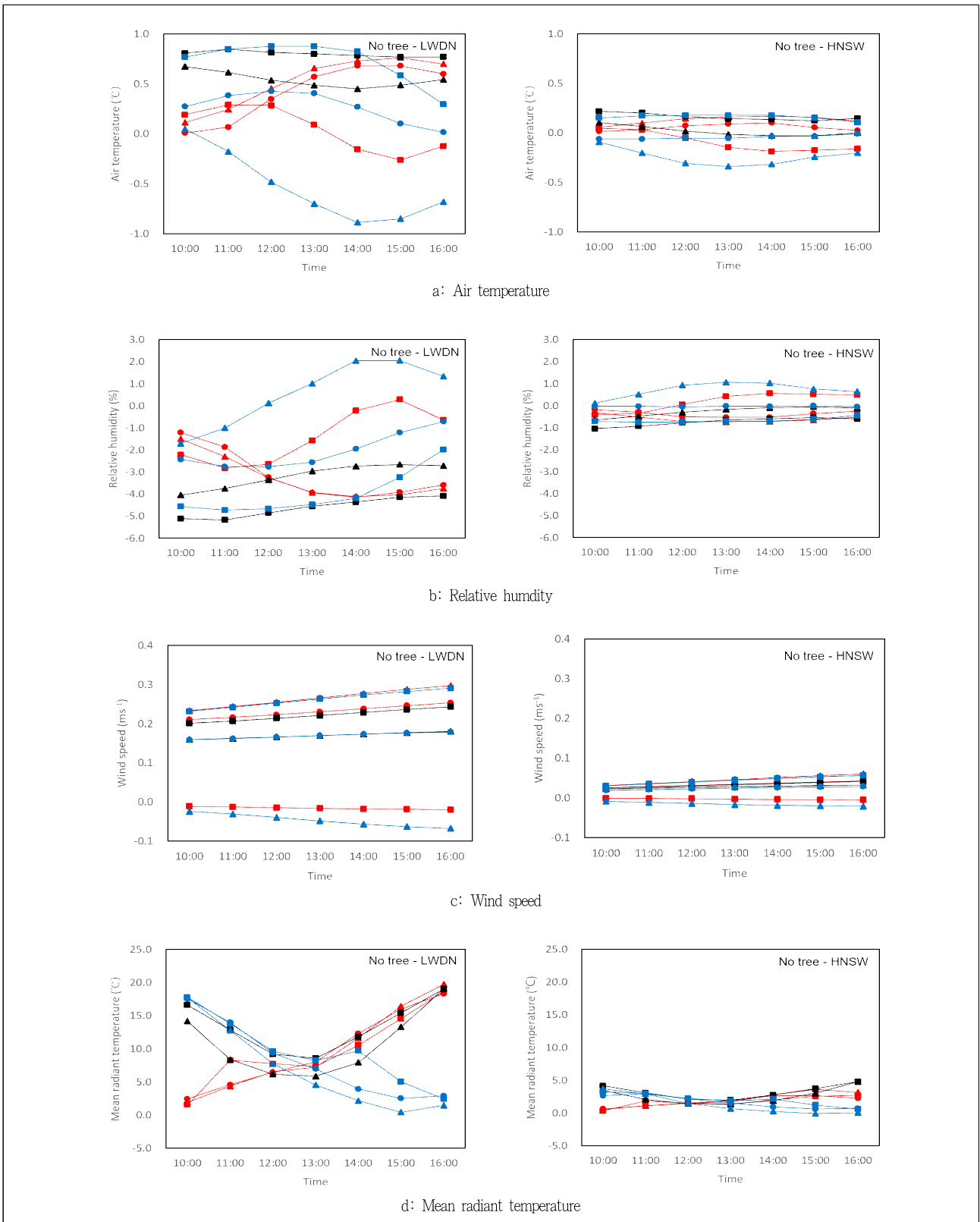


Figure 7. Amount of reduction at the sidewalks by time with the LWDN(low tree height, wide tree crown width, high LAI value, and narrow planting interval) and HNSW(high tree height, narrow tree crown width, low LAI value, and wide planting interval) scenarios. Y axis is the difference between no tree scenario and LWDN and HNSW scenarios

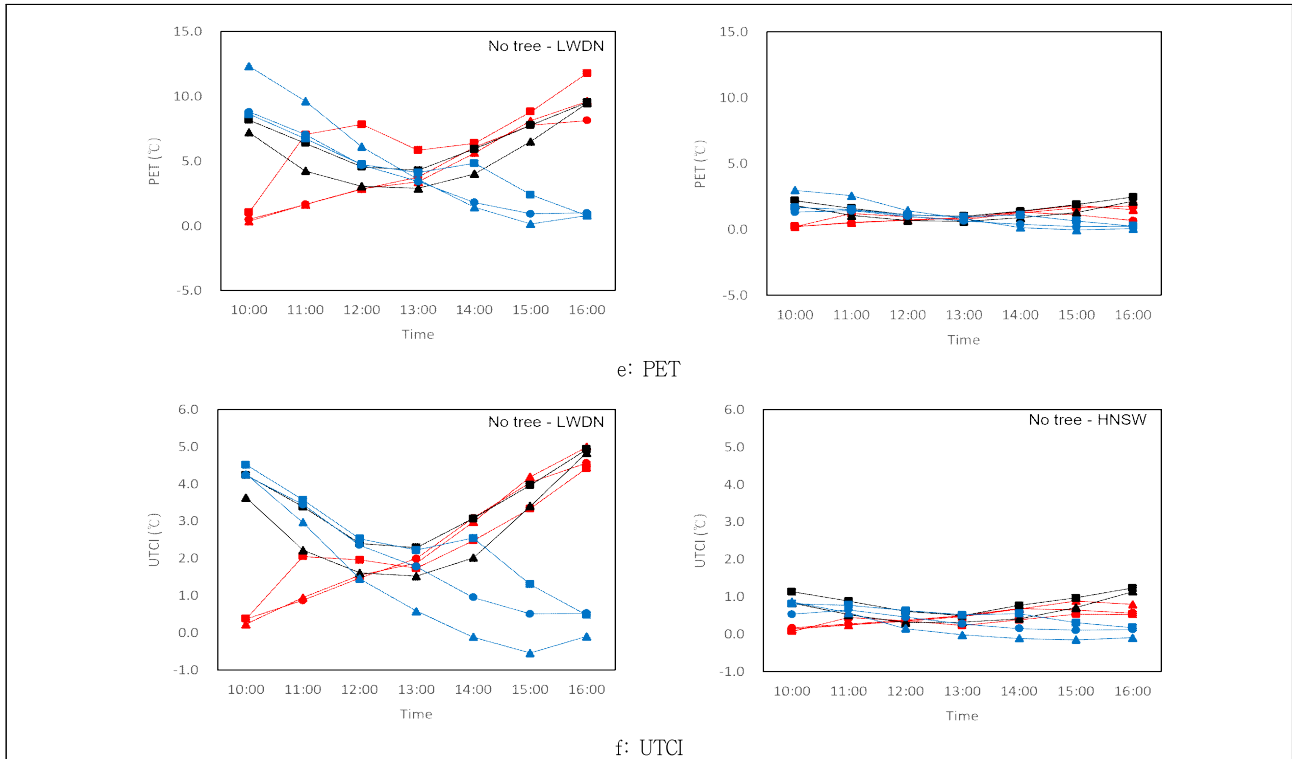


Figure 7. Continued

Legend: ■ Northeast ● East ▲ Southeast ■ North ▲ South ■ Northwest ● West ▲ Southwest

평균복사온도는 각 보도 위치별로 보았을 때, 건물에 의한 태양 복사에너지 차단이 적은 경우 수목의 효과가 크게 나타났다(Figure 7d 참조). LWDN 시나리오 적용 시 서측 방면에 위치한 북서, 서, 남서측 보도는 오전시간대 큰 저감효과를 보였으며, 10:00에 17.5-17.8℃로 가장 큰 저감효과를 보였다. 동측 방면으로 위치한 북동측, 동측, 남동측 보도에서는 오후 시간대 큰 저감효과를 보였으며, 16:00에 18.3-19.7℃로 가장 큰 저감효과를 보였다. 남측과 북측 보도에서는 10:00에 16.6℃, 14.1℃로 큰 저감효과를 보이다 13:00까지 점차 감소하였으며, 13:00 이후 다시 증가하여 16:00에 19.0℃로 최대 저감효과를 보였다. HNSW 시나리오에서도 서측 방면에 위치한 북서측, 서측, 남서측 보도는 오전시간, 동측방면의 북동측, 동측, 남동측 보도는 오후시간 큰 저감효과를 보였으며, 남측, 북측 보도에서는 13:00를 기준으로 오전시간 10:00, 오후시간 16:00 가장 큰 저감효과를 보였지만, 저감량은 최대 4.8℃ 이내로 LWDN 시나리오에 비해 적은 저감효과를 보였다.

PET도 평균복사온도와 유사한 패턴을 보였으며, LWDN 시나리오 적용 시 북서측, 서측, 남서측 보도는 10:00에 8.6℃, 8.8℃, 12.3℃로 오전시간에 최대 저감량을 보였고, 북동측, 동측, 남동측 보도는 16:00에 11.8℃, 8.1℃, 9.6℃로 오후시간에 최대 저감량을 보였었다(Figure 7e 참조). 남측과 북측 보도는 오전시간 10:00에 8.2℃, 7.2℃, 오후시간 16:00에 9.5℃, 9.4℃로 큰 저감효과

를 보였다. HNSW 시나리오에서도 비슷한 패턴을 보였지만 최대 저감량이 3℃ 정도로 LWDN 시나리오에 비해 상대적으로 적게 나타났다. 열 지각 단계를 기준으로 살펴보면, LWDN 시나리오 적용 시 수목이 식재되지 않은 경우에 '매우 더움' 수준의 열 지각 단계를 보이는 시간대에 북동측 보도를 제외하고 '따뜻함', '더움' 수준으로 1-2 단계 낮아지는 효과를 보였다. 북동측 보도에서는 11:00-12:00에는 수목이 없는 경우 '매우 더움' 단계에서 LWDN 시나리오 적용 시 '더움' 단계로 1단계 낮아졌지만, 13:00-16:00에는 모두 '매우 더움' 수준으로 유지되었다. HNSW 시나리오에서는 열 지각 단계에 있어 LWDN 시나리오처럼 큰 변화를 보이지 않았다.

UTCI에서도 수목에 의한 저감효과는 평균복사온도와 유사한 패턴을 보였다(Figure 7f 참조). LWDN 시나리오 적용 시 북서측, 서측, 남서측 보도는 10:00에 4.5℃, 4.2℃, 4.3℃ 감소하여 오전시간에 하루 중 가장 큰 저감효과를 보였고, 북동측, 동측, 남동측 보도에서는 16:00에 4.4℃, 4.6℃, 5.0℃의 감소량을 보이며 오후시간에 하루 중 가장 큰 저감효과를 보였다. 북측, 남측 보도에서는 10:00에 4.2℃, 3.6℃, 16:00에 4.9℃, 4.8℃의 저감효과를 보였다. 열 스트레스 단계로 구분해보면, 북동측 보도에서 15:00를 제외하고 수목이 없는 경우 '매우 강한 열 스트레스' 단계를 보인 시간대에 LWDN 시나리오 적용 시 '적당한 열 스트레스' 단계로 1단계 낮아지는 효과를 보였다. HNSW 시나

리에서는 LWDN 시나리오에 비해 열 스트레스 단계에 있어 큰 변화를 보이지 않았다.

4. 고찰

본 연구에서는 0.48의 종횡비(aspect ratio)를 가진 4차선 도로에서 도로의 방향과 그에 따른 수목식재형태별 열저감 효과의 차이를 비교분석하였다. 수목이 없는 공간에 대한 기상요소 및 인간 열환경지수에 대한 평가로 기온과 상대습도는 각 보도 위치 간 큰 차이를 보이지 않았으며, 시간에 따른 변화도 보도 위치 간 거의 유사한 패턴을 보였다. 풍속은 풍향과 건물의 배치에 따라 차이를 보였으며, Lee *et al.*(2020)의 연구와 같이 모든 방향의 보도에서 초기 입력 풍속보다 낮은 값을 보였다. 풍향과 수직으로 건물이 위치한 경우 풍속이 건물에 의해 매우 크게 저감되었는데, 본 연구에서 공간입력자료 설정에 있어 건물 사이 공간을 두지 않았기 때문에 건물 사이 공간이 있는 경우 풍속에 대한 평가가 추가적으로 필요하다.

보도 위치별 평균복사온도는 낮 시간 동안의 평균값을 보았을 때 Ali-Tourdert and Mayer(2006)의 연구 결과와 같이 동-서 방향도로에서 가장 높은 값을 보였고, 북측 보도에서 높은 값을 보였다. 하지만 시간별로 살펴보았을 때, 동측 방면에 위치한 북동, 동, 남동측 보도에서는 오전시간에, 서측 방면에 위치한 북서, 서, 남서측 보도에서는 오후시간에 하루 중 최대값을 보였으며, 동-서 방향 도로의 남측, 북측 보도보다 최대값이 더 높게 나타났다. 따라서 열환경 개선을 위한 식재 계획에 있어 동-서 방향의 도로를 우선순위로 두는 것이 아닌, 시간별 평가를 통해 세부적인 계획을 세우는 것이 더 효과적으로 보행자의 열환경을 개선할 수 있을 것으로 판단된다.

보도 위치별 PET와 UTCI는 약간 다른 경향을 보인다. UTCI의 경우, 낮 시간 평균값, 시간별 자료에서 평균복사온도와 매우 유사한 패턴을 보인 반면, PET에서는 풍속이 낮은 북서-남동 방향의 도로에서 상대적으로 더 높은 값을 보였다. 이는 Jung *et al.*(2016), Jo *et al.*(2018)의 연구에서도 언급된 것과 같이 PET가 UTCI에 비해 풍속에 더 민감하게 반응하는 것을 알 수 있으며, 제주도와 같이 풍속이 강한 지역에서는 열환경 평가에 있어 UTCI보다 PET를 활용하는 것이 적합한 것으로 판단된다.

연구 결과에서 수목 식재 시 보행자 열환경 개선에 있어 가장 큰 효과는 태양복사에너지 차단을 통한 평균복사온도의 저감효과로 보인다. 보도 위치별 PET와 UTCI의 보도 위치별 저감량 또한 평균복사온도의 변화와 매우 유사한 패턴을 보인다. 따라서 가로 공간의 열 저감을 위한 수목 식재 시 평균복사온도를 낮추기 위해 수고가 낮고, 수관폭이 넓고, 엽면적지수가 높은 수종을 좁은 간격으로 식재해 주어 효율적으로 태양복사

에너지를 차단해 주는 것이 중요하다. 다만, 시간별 자료를 보면 보도 위치별 평균복사온도, PET, UTCI의 저감량은 건물에 의한 태양복사에너지 차단이 적은 시간대의 경우 수목에 의한 저감효과가 크게 나타났으며, 건물에 의한 태양복사에너지 차단이 큰 시간대에는 수목에 의한 저감효과가 크게 줄어드는 것을 확인하였다. 이러한 결과와 함께 시간별 통행량, 주요 시설 간 동선 등의 자료를 결합하면 보행자의 열환경 개선을 위한 가로수 식재에 있어 공간에 따른 중요도를 평가하고, 식재계획을 세우는데 유용하게 활용될 수 있을 것으로 보인다. 예를 들어 주요동선 또는 통행량이 많은 시간대에 열환경이 좋지 못한 공간의 경우 우선대상지로 선정하여 수목을 통한 태양복사에너지 차단에 목적을 두고 식재를 하고, 그렇지 않은 경우에는 미적, 또는 다른 기능을 목적으로 식재하는 등의 보다 효율적인 식재 계획 수립이 가능할 것으로 판단된다.

하지만 ENVI-met를 통한 분석에 있어서는 몇 가지 한계점이 존재한다. 먼저, 풍속의 경우 열환경 평가에 있어 중요한 요인이지만 ENVI-met 시뮬레이션에서는 층류 방식의 계산으로 난류에 대한 평가가 부적합하다고 판단된다. 또한, 본 연구에서 활용된 ENVI-met 4.4.5 버전에서는 수목 수관 내부의 복사에너지 평가가 매우 단순하게 계산되며(Simon *et al.*, 2020), Park *et al.*(2020)의 연구에서는 복사에너지는 높은 상관성을 보이고, 회귀분석에서 높은 설명력을 보였지만, 태양복사에너지는 전체적으로 과대평가, 하늘 반구에서 들어오는 지구복사에너지는 실측 자료보다 낮게, 지표면 반구에서 오는 지구복사에너지는 실측자료보다 높게 평가하는 결과를 보였다. 이러한 결과는 컴퓨터 모델링 결과만을 통한 분석에 대한 문제점을 잘 보여준다. 따라서 컴퓨터 시뮬레이션을 통한 분석에 있어서는 실측자료와의 검증 및 결과 보정 과정이 반드시 진행되어야 하며, 이에 대한 추가적인 연구가 반드시 필요하다.

IV. 결론

제주특별자치도 서귀포시를 대상으로 가로 공간의 가로수 식재 방식에 있어 각 도로방향에 따른 보도 위치별 보행자의 열환경 개선효과와의 차이를 ENVI-met 시뮬레이션을 통해 분석하였다. 시뮬레이션 결과, 보행자의 열환경 개선에 있어 수목의 역할은 태양복사에너지 차단을 통한 평균복사온도 저감이 가장 효과가 컸다. 그러므로, 태양복사에너지 차단에 유리하게 수고가 낮고, 수관폭이 넓고, 엽면적지수가 높은 수종을 좁은 간격으로 식재해 주었을 때 가장 좋은 효과를 얻을 수 있을 것이다. 하지만, 동측, 서측 보도의 경우, 건물 위치와 태양 고도 및 방위각에 따라 시간대별 편차가 크며, 건물에 의해 태양복사에너지 차단이 큰 시간대의 경우 수목에 의한 효과는 미비하기 때문에 각 공간에 대해 시간대별 열환경 조건을 파악하여 해당

공간에 알맞은 식재 계획을 세우는 것이 바람직하다.

본 연구는 보행자의 열환경 개선을 위한 가로수 식재 계획에 대한 파일럿 스터디로서 가로의 형태와, 수목식재방식을 단순화하여 가상의 공간에 대한 시뮬레이션을 진행하였다. 따라서 결과로서의 각 수치는 낮 시간 동안의 기본적인 열 환경 구성 패턴을 보여줄 뿐, 실제 적용하는데 있어 한계점이 있다. 따라서 식재 계획에 있어 본 연구 결과를 바탕으로 더 나아가 실제 대상지에서의 실측과, 이를 통한 검증 및 보정 과정이 추가적으로 이루어져야 할 것이다.

References

1. Acero, J. A. and K. Herranz-Pascual(2015) A comparison of thermal comfort conditions in four urban spaces by means of measurements and modelling techniques. *Building and Environment* 93: 245-257.
2. 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.
3. Ali-Toudert, F. and H. Mayer(2007) Effects of asymmetry, galleries, overhanging facades and vegetation on thermal comfort in urban street canyons. *Solar Energy* 81(6): 742-754.
4. Biqaraz, B., R. Fayaz and G. Haghghaati Naeni(2019) A comparison of outdoor thermal comfort in historical and contemporary urban fabrics of Lar City. *Urban Climate* 27: 212-226.
5. Błażejczyk, K., G. Jendritzky, P. Bröde, D. Fiala, G. Havenith, Y. Epstein, A. Psikuta and B. Kampmann(2013) An introduction to the universal thermal climate index(UTCI). *Geographia Polonica* 86(1): 5-10.
6. Brown, R. D. and T. J. Gillespie(1986) Estimating outdoor thermal comfort using a cylindrical radiation thermometer and an energy budget model. *International Journal of Biometeorology* 30(1): 43-52.
7. Bröde, P., E. L. Krüger, F. A. Rossi and D. Fiala(2012a) Predicting urban outdoor thermal comfort by the universal thermal climate Index UTCI-A case study in Southern Brazil. *International Journal of Biometeorology* 56(3): 471-480.
8. Bröde, P., D. Fiala, K. Błażejczyk, I. Holmér, G. Jendritzky, B. Kampmann, B. Tinz and G. Havenith(2012b). Deriving the operational procedure for the universal thermal climate index(UTCI). *International Journal of Biometeorology* 56(3): 481-494.
9. Bruse, M. and H. Fleer(1998) Simulating surface-plant-air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model. *Environmental Modelling & Software* 13(3-4): 373-384.
10. Chatterjee, S., A. Khan, A. dinda, S. Mithun, R. Khatun, H. Akbari, H. Kusaka, C. Mitra, S. S. Bhatti, Q. V. Doan and Y. Wang(2019) Simulating micro-scale thermal interactions in different building environments for mitigating urban heat islands. *Science of The Total Environment* 663: 610-631.
11. Chen, L. and E. Ng(2013) Simulation of the effect of downtown greenery on thermal comfort in subtropical climate using PET index: A case study in Hong Kong. *Architectural Science Review* 56(4): 1-9.
12. Chen, Y., T. Lin and A. Matzarakis(2014) Comparison of mean radiant temperature from field experiment and modelling: A case study in Freiburg, Germany. *Theoretical and Applied Climatology* 118(3): 535-551.
13. Chow, W. T. L. and A. J. Brazel(2012) Assessing xeriscaping as a sustainable heat island mitigation approach for a desert city. *Building and Environment* 47: 170-181.
14. Chow, W. T. L., R. Pope, C. Martin and A. Brazel(2011) Observing and modeling the nocturnal park cool island of an arid city: Horizontal and vertical impacts. *Theoretical and Applied Climatology* 103(1-2): 197-211.
15. Cocco, S., J. Kämpf, J. L. Scartezzini and D. Pearlmutter(2016) Outdoor human comfort and thermal stress: A comprehensive review on models and standards. *Urban Climate* 18: 33-57.
16. Fanger, P. O.(1970) *Thermal Comfort, Analysis and Applications in Environmental Engineering, Thermal Comfort, Analysis and Applications in Environmental Engineering*. New York: McGraw-Hill.
17. Fiala, D., K. J. Lomas and M. Stohrer(2003) First principles modeling of thermal sensation responses in steady-state and transient conditions. *ASHRAE Transactions* 109: 179-186.
18. Gagge, A. P.(1936) The linearity criterion as applied to partitioned calorimetry. *American Journal of Physiology* 116(3): 656-668.
19. Gusson, C. S. and D. H. S. Duarte(2016) Effects of built density and urban morphology on urban microclimate - Calibration of the model ENVI-met V4 for the subtropical Sao Paulo, Brazil. *Procedia Engineering* 169: 2-10.
20. Hedquist, B. C. and A. J. Brazel(2014) Seasonal variability of temperatures and outdoor human comfort in phoenix, Arizona, U.S.A. *Building and Environment* 72: 377-388.
21. Höppe, P. R.(1993) Heat balance modelling. *Experientia* 49(9): 741-746.
22. Höppe, P. R.(1999) The physiological equivalent temperature - A universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. *International Journal of Biometeorology* 43(2): 71-75.
23. Hyun, C.(2019) *Analysis of Human Thermal Environments in The Apartment Complex by Computer Simulation - Goduck-Gangil Area, Gandon-gu, Seoul Metropolitan City*. Master Thesis. Jeju National University, Jeju.
24. Jänicke, B., F. Meier, M. T. Hoelscher and D. Scherer(2015) Evaluating the effects of façade greening on human bioclimate in a complex urban environment. *Advances in Meteorology*, 2015.
25. Jo, S., C. Hyun and S. Park(2017) Analysis of the influence of street trees on human thermal sensation in summer. *Journal of Korean Institute of Landscape Architecture* 45(5): 105-112.
26. Jung, L., Y. Jin, Y. Jeun, K. Ko, H. Park and S. Park(2016) A case study of human thermal sensation(comfort) in plastic houses. *The Korean Environmental Sciences Society* 25(8): 1115-1129.
27. Katsoulas, N., D. Antoniadis, I. L. Tsirogiannis, E. Labraki, T. Bartzanas and C. Kittas(2017) Microclimatic effects of planted hydroponic structures in urban environment: Measurements and simulations. *International Journal of Biometeorology* 61(5): 1-14.
28. Krüger, E. L., F. O. Minella and F. Rasia(2011) Impact of urban geometry on outdoor thermal comfort and air quality from field measurements in Curitiba, Brazil. *Building and Environment* 46(3): 621-634.
29. Kovats, R. S. and S. Hajat(2008) Heat stress and public health: A critical review. *Annual Review of Public Health* 29: 41-55.
30. Lam, C. K. C., H. Lee, S. Yang and S. Park(2021) A review on the significance and perspective of the numerical simulations of outdoor thermal environment. *Sustainable Cities and Society*: 102971.
31. 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.

32. Lee, H., H. Mayer and W. Kuttler(2020) Impact of the spacing between tree crowns on the mitigation of daytime heat stress for pedestrians inside E-W urban street canyons under Central European conditions, *Urban Forestry & Urban Greening* 48: 126558.
33. 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.
34. Lenzholzer, S. and R. D. Brown(2016) Post-positivist microclimatic urban design research: A review, *Landscape and Urban Planning* 153: 111-121.
35. Li, Y. and Y. Song(2019) Optimization of vegetation arrangement to improve microclimate and thermal comfort in an urban park, *International Review for Spatial Planning and Sustainable Development* 7(1): 18-30.
36. Lobaccaro, G., J. A. Acero, G. Sanchez Martinez, A. Padro, T. Laburu and G. Fernandez(2019) Effects of orientations, aspect ratios, pavement materials and vegetation elements on thermal stress inside typical urban canyons, *International Journal of Environmental Research and Public Health* 16(19): 3574.
37. López-Cabeza, V. P., C. Galán-Marín, C. Rivera-Gómez and J. Roa-Fernández(2018) Courtyard microclimate ENVI-met outputs deviation from the experimental data, *Building and Environment* 144: 129-141.
38. Lyu, T., R. Buccolieri and Z. Gao(2019) A numerical study on the correlation between sky view factor and summer microclimate of local climate zones, *Atmosphere* 10(8): 438.
39. Ma, X., H. Fukuda, D. Zhou and M. Wang(2019a) A study of the pedestrianized zone for tourists: Urban design effects on humans' thermal comfort in Fo Shan City, Southern China, *Sustainability* 11(10): 2774.
40. Ma, X., H. Fukuda, D. Zhou and M. Wang(2019b) Study on outdoor thermal comfort of the commercial pedestrian block in hot-summer and cold-winter region of southern China-A case study of the Taizhou Old Block, *Tourism Management* 75: 186-205.
41. Matzarakis, A. and H. Mayer(1996). Another kind of environmental stress: Thermal stress. *WHO Newsletter* 18(January 1996): 7-10.
42. Matzarakis, A., F. Rutz and H. Mayer(2007) Modelling radiation fluxes in simple and complex environments—Application of the RayMan model, *International Journal of Biometeorology* 51(4): 323-334.
43. Matzarakis, A., F. Rutz and H. Mayer(2010) Modelling radiation fluxes in simple and complex environments: Basics of the RayMan model, *International Journal of Biometeorology* 54(2): 131-139.
44. 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.
45. Middel, A., K. Häb, A. J. Brazel, C. A. Martin and S. Guhathakurta(2014) Impact of urban form and design on mid-afternoon microclimate in phoenix local climate zones, *Landscape and Urban Planning* 122: 16-28.
46. 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.
47. Morakinyo, T. E., A. Lai, K. K. L. Lau and E. Ng(2019) Thermal benefits of vertical greening in a high-density city: Case study of Hong Kong, *Urban Forestry & Urban Greening* 37: 42-55.
48. Morakinyo, T. E., W. Ouyang, K. K. L. Lau, C. Ren 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.
49. Müller, N., W. Kuttler and A. B. Barlag(2014) Counteracting urban climate change: Adaptation measures and their effect on thermal comfort, *Theoretical & Applied Climatology* 115(1-2): 243-257.
50. Ng, E., L. Chen, Y. Wang and C. Yuan(2012) A study on the cooling effects of greening in a high-density city: An experience from Hong Kong, *Building and Environment* 47: 256-271.
51. Oke, T. R.(1982) The energetic basis of the urban heat island, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 108: 1-24.
52. Park, C., D. Lee, E. S. Krayenhoff, H. Heo, J. Hyun, K. Oh and T. Park(2019) Variations in pedestrian mean radiant temperature based on the spacing and size of street trees, *Sustainable Cities and Society* 48: 101521.
53. Park, S.(2011) Human-Urban Radiation Exchange Simulation Model, Doctoral Dissertation, University of Victoria.
54. Park, S.(2012) The Initial Investigation for Making Human Bioclimatic Maps: A Site of Downtown Daegu, Research Report to Daegu Gyeongbuk Development Institute.
55. Park, S., H. Kong and H. Kang(2020) 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.
56. Park, S., S. E. Tuller and M. Jo(2014) Application of universal thermal climate index(UTCI) for microclimatic analysis in urban thermal environments, *Landscape and Urban Planning* 125: 146-155.
57. Piselli, C., V. L. Castaldo, I. Pigliautile, A. L. Pisello and F. Cotana(2018) Outdoor comfort conditions in urban areas: On citizens' perspective about microclimate mitigation of urban transit areas, *Sustainable Cities and Society* 39: 16-36.
58. Qaid, A. and D. R. Ossen(2015) Effect of asymmetrical street aspect ratios on microclimates in hot, humid regions, *International Journal of Biometeorology* 59(6): 657-677.
59. Salata, F., I. Golasi, R. de Lieto Vollaro and A. de Lieto Vollaro(2016) Urban microclimate and outdoor thermal comfort. A proper procedure to fit ENVI-met simulation outputs to experimental data, *Sustainable Cities and Society* 26: 318-343.
60. Simon, H., T. Sinsel and M. Bruse(2020) Introduction of fractal-based tree digitalization and accurate in-canopy radiation transfer modelling to the microclimate model ENVI-met, *Forests* 11(8): 869.
61. Stewart, I. D and T. R. Oke(2012) Local climate zones for urban temperature studies, *Bulletin of the American Meteorological Society* 93(12): 1879-1900.
62. Sun S., X. Xu, Z. Lao, W. Liu, Z. Li, E. Higuera García, L. He and J. Zhu(2017) Evaluating the impact of urban green space and landscape design parameters on thermal comfort in hot summer by numerical simulation, *Building and Environment* 123: 277-288.
63. Taleghani, M., L. Kleerekoper, M. Tenpierik and A. van den Dobbelen(2015) Outdoor thermal comfort within five different urban forms in the Netherlands, *Building and Environment* 83: 65-78.
64. Tan, J., L. Yang, C. S. B. Grimmond, J. Shi, W. Gu, Y. Chang, P. Hu, J. Sun, X. Ao and Z. Han(2015) Urban integrated meteorological observations: Practice and experience in Shanghai, China, *Bulletin of the American Meteorological Society* 96(1): 197-210.
65. Teshnehdel, S., H. Akbari, E. D. Giuseppe and R. D. Brown(2020) Effect of tree cover and tree species on microclimate and pedestrian comfort in a residential district in Iran, *Building and Environment* 178: 106899.
66. Toparlak, Y., B. Blocken, B. Maiheu and G. J. F. Van Heijst(2017) A review on the CFD analysis of urban microclimate, *Renewable and*

- Sustainable Energy Reviews 80: 1613-1640.
67. Wang, Y., F. Bakker, R. de Groot, H. Wortche and R. Leemans(2015) Effects of urban trees on local outdoor microclimate: Synthesizing field measurements by numerical modelling. *Urban Ecosystems* 18(4): 1305-1331.
68. Yang, X., L. Zhao, M. Bruse and Q. Meng(2013) Evaluation of a microclimate model for predicting the thermal behavior of different ground surfaces. *Building and Environment* 60: 93-104.
69. Yang, W., Y. Lin and C. Q. Li(2018) Effects of landscape design on urban microclimate and thermal comfort in tropical climate. *Advances in Meteorology* 2018: 13.
70. Yang, Y., D. Zhou, Y. Wang, D. Ma, W. Chen, D. Xu and Z. Zhu(2019) Economical and outdoor thermal comfort analysis of greening in multistory residential areas in Xi'an. *Sustainable Cities and Society* 51: 101730.
71. Zhang, L., Q. Zhan and Y. Lan(2018) Effects of the tree distribution and species on outdoor environment conditions in a hot summer and cold winter zone: A case study in Wuhan residential quarters. *Building and Environment* 130: 27-39.

Received : 24 November, 2021

Revised : 3 December, 2021 (1st)
15 February, 2022 (2nd)

Accepted : 15 February, 2022

3인익명 심사필

Appendix 1. Characteristics of surface materials in ENVI-met simulation

	z_0 Roughness length(m)	Albedo	Emissivity	Surface is irrigated
Asphalt road	0.01	0.08	0.97	FALSE
Brick road(yellow stones)	0.01	0.2	0.97	FALSE
Concrete pavement(gray)	0.01	0.18	0.96	FALSE

Appendix 2. Overview of coefficient of determination(r^2) in air temperature, relative humidity, wind speed, mean radiant temperature, and PET between ENVI-met simulations and observations

Reference	City and country	r^2				
		Air temperature	Relative humidity	Wind speed	Mean radiant temperature	PET
Acerro and Herranz-Pascual(2015)	Bilbao, Spain			0.1024	0.49	
Biqaraz <i>et al.</i> (2019)	Lar, Iran		0.68–0.94			
Chatterjee <i>et al.</i> (2019)	Kolkata, India		0.791			
Chen and Ng(2013)	Hong Kong, China				0.6149	
Chen <i>et al.</i> (2014)	Freiburg, Germany				0.0625	
Chow and Brazel(2012)	Phoenix, USA	0.86–0.92				
Chow <i>et al.</i> (2011)	Phoenix, USA (1 m height at 5:30)	0.47				
Gusson and Duarte(2016)	São Paulo, Brazil	0.85–0.92				
Hedquist and Brazel(2014)	Phoenix, USA	0.68–0.94				
Jänicke <i>et al.</i> (2015)	Berlin, Germany				0.95	
Katsoulas <i>et al.</i> (2017)	Arta, Greece	0.8–0.9				
Krüger <i>et al.</i> (2011)	Curitiba, Brazil			0.7		
Lee <i>et al.</i> (2016)	Freiburg, Germany				0.86	0.77
Li and Song(2019)	Seoul, Republic of Korea	0.69–0.88				
Lobaccaro <i>et al.</i> (2019)	Bilbao, Spain	0.89				
López-Cabeza <i>et al.</i> (2018)	Seville, Spain	0.84–0.99				
Middel <i>et al.</i> (2014)	Phoenix, USA	0.97–0.99				
Ma <i>et al.</i> (2019a)	Fo Shan, China		0.7664–0.9813	0.7307–0.9001		
Ma <i>et al.</i> (2019b)	Taizhou, China		0.7469–0.9693			
Morakinyo <i>et al.</i> (2017)	Hong Kong, China	0.79–0.81			0.69–0.74	
Morakinyo <i>et al.</i> (2019)	Hong Kong, China		0.76			
Müller <i>et al.</i> (2014)	Oberhausen, Germany	0.97	0.97			
Ng <i>et al.</i> (2012)	Hong Kong, China	0.63				
Park <i>et al.</i> (2014)	Nanaimo, Canada & Changwon, Republic of Korea			0.56		
Piselli <i>et al.</i> (2018)	Perugia, Italy	0.74	0.9216			

Appendix 2. Continued

Reference	City and Country	r^2				
		Air temperature	Relative humidity	Wind speed	Mean radiant temperature	PET
Qaid and Ossen(2015)	Putrajaya, Malaysia	0.6				
Salata <i>et al.</i> (2016)	Rome, Italy	0.91			0.96	
Sun <i>et al.</i> (2017)	Beijing, China		0.78–0.9			
Taleghani <i>et al.</i> (2015)	De Bilt, Netherlands	0.64				
Tan <i>et al.</i> (2015)	Hong Kong, China				0.997	
Wang <i>et al.</i> (2015)	Assen, Netherlands	0.88–0.89				
Wang <i>et al.</i> (2015)	Assen, Netherlands	0.88 ± 0.05				
Yang <i>et al.</i> (2013)	Guangzhou, China	0.94–0.96				
Yang <i>et al.</i> (2018)	Bedok, Singapore	0.95–0.99			0.74–0.96	
Yang <i>et al.</i> (2019)	Xi'an, China		0.91			
Zhang <i>et al.</i> (2018)	Wuhan, China	0.71–0.89		0.51–0.71	0.89	

Appendix 3-1. Mean air temperature according to the scenarios(in parentheses, mean air temperature reduction according to the scenarios). The scenario abbreviation refers to Table 5

Scenario	North	South	Northwest	Southeast	West	East	Northeast	Southwest
No tree	30.7	31.0	30.8	29.8	31.1	30.0	29.5	29.7
LNSN	30.5(-0.2)	31(0)	30.6(-0.2)	29.7(-0.1)	31.1(0)	29.9(-0.1)	29.6(+0.1)	30.1(+0.4)
LNSW	30.6(-0.1)	31(0)	30.7(-0.1)	29.7(-0.1)	31.1(0)	29.9(-0.1)	29.6(+0.1)	30(+0.3)
LNDN	30.3(-0.4)	30.9(-0.1)	30.5(-0.3)	29.5(-0.3)	31.1(0)	29.8(-0.2)	29.6(+0.1)	30.3(+0.6)
LNDW	30.5(-0.2)	31(0)	30.6(-0.2)	29.7(-0.1)	31.1(0)	29.8(-0.2)	29.7(+0.2)	30.2(+0.5)
LWSN	30.3(-0.4)	30.8(-0.2)	30.4(-0.4)	29.5(-0.3)	31(-0.1)	29.7(-0.3)	29.6(+0.1)	30.3(+0.6)
LWSW	30.5(-0.2)	30.9(-0.1)	30.6(-0.2)	29.6(-0.2)	31(-0.1)	29.8(-0.2)	29.7(+0.2)	30.2(+0.5)
LWDN	29.9(-0.8)	30.5(-0.5)	30.1(-0.7)	29.3(-0.5)	30.8(-0.3)	29.5(-0.5)	29.5(0)	30.3(+0.6)
LWDW	30.2(-0.5)	30.8(-0.2)	30.4(-0.4)	29.5(-0.3)	31(-0.1)	29.7(-0.3)	29.6(+0.1)	30.3(+0.6)
HNSN	30.4(-0.3)	31(0)	30.5(-0.3)	29.6(-0.2)	31.1(0)	29.9(-0.1)	29.6(+0.1)	30.1(+0.4)
HNSW	30.5(-0.2)	31(0)	30.6(-0.2)	29.7(-0.1)	31.1(0)	29.9(-0.1)	29.6(+0.1)	30(+0.3)
HNDN	30.2(-0.5)	30.8(-0.2)	30.4(-0.4)	29.5(-0.3)	31.1(0)	29.8(-0.2)	29.7(+0.2)	30.2(+0.5)
HNDW	30.4(-0.3)	31(0)	30.6(-0.2)	29.6(-0.2)	31.1(0)	29.9(-0.1)	29.7(+0.2)	30.2(+0.5)
HWSN	30.4(-0.3)	30.9(-0.1)	30.5(-0.3)	29.6(-0.2)	31.1(0)	29.9(-0.1)	29.6(+0.1)	30.1(+0.4)
HWSW	30.5(-0.2)	31(0)	30.6(-0.2)	29.7(-0.1)	31.1(0)	29.9(-0.1)	29.6(+0.1)	30(+0.3)
HWDN	30.2(-0.5)	30.8(-0.2)	30.3(-0.5)	29.4(-0.4)	31(-0.1)	29.8(-0.2)	29.6(+0.1)	30.2(+0.5)
HWDW	30.4(-0.3)	30.9(-0.1)	30.5(-0.3)	29.6(-0.2)	31.1(0)	29.9(-0.1)	29.7(+0.2)	30.2(+0.5)

Appendix 3-2. Mean relative humidity according to the scenarios(in parentheses, mean relative humidity reduction according to the scenarios). The scenario abbreviation refers to Table 5

Scenario	North	South	Northwest	Southeast	West	East	Northeast	Southwest
No tree	60.3	58.9	59.7	63.5	58.5	62.9	63.2	62.6
LNSN	61.5(+1.2)	59.5(+0.6)	60.7(+1)	64.5(+1)	58.8(+0.3)	63.7(+0.8)	63.1(-0.1)	61.7(-0.9)
LNSW	61(+0.7)	59.2(+0.3)	60.2(+0.5)	64.1(+0.6)	58.6(+0.1)	63.4(+0.5)	63.1(-0.1)	61.9(-0.7)
LNDN	62.5(+2.2)	60.2(+1.3)	61.5(+1.8)	65.2(+1.7)	59.1(+0.6)	64.4(+1.5)	63.4(+0.2)	61.5(-1.1)
LNDW	61.6(+1.3)	59.6(+0.7)	60.7(+1)	64.5(+1)	58.8(+0.3)	63.8(+0.9)	63.1(-0.1)	61.5(-1.1)
LWSN	62.7(+2.4)	60.4(+1.5)	61.7(+2)	65.3(+1.8)	59.4(+0.9)	64.5(+1.6)	63.3(+0.1)	61.3(-1.3)
LWSW	61.7(+1.4)	59.7(+0.8)	60.8(+1.1)	64.6(+1.1)	58.9(+0.4)	63.8(+0.9)	63(-0.2)	61.4(-1.2)
LWDN	65(+4.7)	62.1(+3.2)	63.7(+4)	66.8(+3.3)	60.6(+2.1)	66(+3.1)	64.6(+1.4)	62.1(-0.5)
LWDW	62.9(+2.6)	60.6(+1.7)	61.8(+2.1)	65.4(+1.9)	59.5(+1)	64.6(+1.7)	63.6(+0.4)	61.4(-1.2)
HNSN	61.5(+1.2)	59.5(+0.6)	60.8(+1.1)	64.5(+1)	58.6(+0.1)	63.5(+0.6)	63.1(-0.1)	61.7(-0.9)
HNSW	61.1(+0.8)	59.2(+0.3)	60.3(+0.6)	64.1(+0.6)	58.5(0)	63.3(+0.4)	63.1(-0.1)	61.9(-0.7)
HNDN	62.4(+2.1)	60(+1.1)	61.5(+1.8)	65.1(+1.6)	58.9(+0.4)	64(+1.1)	63.3(+0.1)	61.4(-1.2)
HNDW	61.6(+1.3)	59.4(+0.5)	60.7(+1)	64.5(+1)	58.6(+0.1)	63.5(+0.6)	63.1(-0.1)	61.5(-1.1)
HWSN	61.6(+1.3)	59.5(+0.6)	60.9(+1.2)	64.6(+1.1)	58.7(+0.2)	63.6(+0.7)	63.1(-0.1)	61.6(-1)
HWSW	61.1(+0.8)	59.2(+0.3)	60.4(+0.7)	64.2(+0.7)	58.6(+0.1)	63.3(+0.4)	63.1(-0.1)	61.8(-0.8)
HWDN	62.6(+2.3)	60.2(+1.3)	61.7(+2)	65.3(+1.8)	59(+0.5)	64.1(+1.2)	63.4(+0.2)	61.4(-1.2)
HWDW	61.7(+1.4)	59.5(+0.6)	60.8(+1.1)	64.6(+1.1)	58.7(+0.2)	63.6(+0.7)	63.1(-0.1)	61.5(-1.1)

Appendix 3-3. Mean wind speed according to the scenarios(in parentheses, mean wind speed reduction according to the scenarios). The scenario abbreviation refers to Table 5

Scenario	North	South	Northwest	Southeast	West	East	Northeast	Southwest
No tree	1.1	0.9	1.3	1.3	0.9	1.1	0.1	0.2
LNSN	1(-0.1)	0.8(-0.1)	1.1(-0.2)	1.1(-0.2)	0.8(-0.1)	1(-0.1)	0.1(0)	0.2(0)
LNSW	1(-0.1)	0.8(-0.1)	1.2(-0.1)	1.2(-0.1)	0.9(0)	1(-0.1)	0.1(0)	0.2(0)
LNDN	0.9(-0.2)	0.7(-0.2)	1.1(-0.2)	1.1(-0.2)	0.8(-0.1)	0.9(-0.2)	0.1(0)	0.2(0)
LNDW	1(-0.1)	0.8(-0.1)	1.1(-0.2)	1.1(-0.2)	0.8(-0.1)	1(-0.1)	0.1(0)	0.2(0)
LWSN	0.9(-0.2)	0.7(-0.2)	1.1(-0.2)	1.1(-0.2)	0.8(-0.1)	0.9(-0.2)	0.1(0)	0.2(0)
LWSW	1(-0.1)	0.8(-0.1)	1.1(-0.2)	1.1(-0.2)	0.8(-0.1)	1(-0.1)	0.1(0)	0.2(0)
LWDN	0.9(-0.2)	0.7(-0.2)	1.0(-0.3)	1.0(-0.3)	0.7(-0.2)	0.9(-0.2)	0.1(0)	0.2(0)
LWDW	0.9(-0.2)	0.7(-0.2)	1.1(-0.2)	1.1(-0.2)	0.8(-0.1)	0.9(-0.2)	0.1(0)	0.2(0)
HNSN	1(-0.1)	0.8(-0.1)	1.2(-0.1)	1.2(-0.1)	0.9(0)	1.1(0)	0.1(0)	0.2(0)
HNSW	1(-0.1)	0.8(-0.1)	1.2(-0.1)	1.2(-0.1)	0.9(0)	1.1(0)	0.1(0)	0.2(0)
HNDN	1(-0.1)	0.8(-0.1)	1.2(-0.1)	1.2(-0.1)	0.8(-0.1)	1(-0.1)	0.1(0)	0.2(0)
HNDW	1(-0.1)	0.8(-0.1)	1.2(-0.1)	1.2(-0.1)	0.9(0)	1(-0.1)	0.1(0)	0.2(0)
HWSN	1(-0.1)	0.8(-0.1)	1.2(-0.1)	1.2(-0.1)	0.9(0)	1.1(0)	0.1(0)	0.2(0)
HWSW	1(-0.1)	0.8(-0.1)	1.2(-0.1)	1.2(-0.1)	0.9(0)	1.1(0)	0.1(0)	0.2(0)
HWDN	1(-0.1)	0.8(-0.1)	1.2(-0.1)	1.2(-0.1)	0.8(-0.1)	1(-0.1)	0.1(0)	0.2(0)
HWDW	1(-0.1)	0.8(-0.1)	1.2(-0.1)	1.2(-0.1)	0.9(0)	1(-0.1)	0.1(0)	0.2(0)

Appendix 3-4. Average mean radiant temperature according to the scenarios(in parentheses, average mean radiant temperature reduction according to the scenarios). The scenario abbreviation refers to Table 5

Scenario	North	South	Northwest	Southeast	West	East	Northeast	Southwest
No tree	60.6	55.7	54.5	54.4	52.8	55.5	57.4	52.6
LNSN	55.7(-4.9)	51.5(-4.2)	51(-3.5)	50.7(-3.7)	49.8(-3)	52(-3.5)	54.2(-3.2)	50.6(-2)
LNSW	57.4(-3.2)	53(-2.7)	52.3(-2.2)	52.1(-2.3)	50.9(-1.9)	53.3(-2.2)	55.4(-2)	51.3(-1.3)
LNDN	52.3(-8.3)	48.7(-7)	48.7(-5.8)	48.4(-6)	47.9(-4.9)	49.8(-5.7)	51.6(-5.8)	48.7(-3.9)
LNDW	55.3(-5.3)	51.2(-4.5)	50.8(-3.7)	50.6(-3.8)	49.6(-3.2)	51.9(-3.6)	53.8(-3.6)	50.2(-2.4)
LWSN	52.4(-8.2)	49.1(-6.6)	48.7(-5.8)	48.3(-6.1)	47.7(-5.1)	49.5(-6)	52(-5.4)	49.2(-3.4)
LWSW	55.3(-5.3)	51.4(-4.3)	50.8(-3.7)	50.5(-3.9)	49.5(-3.3)	51.6(-3.9)	54.1(-3.3)	50.5(-2.1)
LWDN	47.2(-13.4)	45(-10.7)	45(-9.5)	44.7(-9.7)	44.6(-8.2)	45.8(-9.7)	47.6(-9.8)	45.9(-6.7)
LWDW	51.8(-8.8)	48.6(-7.1)	48.4(-6.1)	48.1(-6.3)	47.5(-5.3)	49.3(-6.2)	51.3(-6.1)	48.5(-4.1)
HNSN	55.6(-5)	51.7(-4)	51.4(-3.1)	51.2(-3.2)	50.2(-2.6)	52.7(-2.8)	54.6(-2.8)	50.5(-2.1)
HNSW	57.4(-3.2)	53.1(-2.6)	52.5(-2)	52.3(-2.1)	51.2(-1.6)	53.7(-1.8)	55.7(-1.7)	51.3(-1.3)
HNDN	52.3(-8.3)	49.1(-6.6)	49.3(-5.2)	49.1(-5.3)	48.6(-4.2)	50.9(-4.6)	52.4(-5)	48.8(-3.8)
HNDW	55.2(-5.4)	51.4(-4.3)	51.2(-3.3)	51(-3.4)	50.1(-2.7)	52.6(-2.9)	54.3(-3.1)	50.2(-2.4)
HWSN	55.3(-5.3)	51.4(-4.3)	51.1(-3.4)	51(-3.4)	50(-2.8)	52.5(-3)	54.4(-3)	50.4(-2.2)
HWSW	57.2(-3.4)	52.9(-2.8)	52.3(-2.2)	52.2(-2.2)	51(-1.8)	53.6(-1.9)	55.5(-1.9)	51.2(-1.4)
HWDN	51.8(-8.8)	48.7(-7)	48.9(-5.6)	48.7(-5.7)	48.2(-4.6)	50.5(-5)	52(-5.4)	48.5(-4.1)
HWDW	54.9(-5.7)	51.1(-4.6)	50.9(-3.6)	50.7(-3.7)	49.9(-2.9)	52.3(-3.2)	54.1(-3.3)	50.1(-2.5)

Appendix 3-5. Mean PET according to the scenarios(in parentheses, mean PET reduction according to the scenarios). The scenario abbreviation refers to Table 5

Scenario	North	South	Northwest	Southeast	West	East	Northeast	Southwest
No tree	43.3	41.9	39.9	39.1	40.4	40.0	48.6	43.3
LNSN	41(-2.3)	40(-1.9)	38.4(-1.5)	37.5(-1.6)	39(-1.4)	38.6(-1.4)	46.5(-2.1)	41.6(-1.7)
LNSW	41.8(-1.5)	40.7(-1.2)	39(-0.9)	38.1(-1)	39.5(-0.9)	39.2(-0.8)	47.3(-1.3)	42.2(-1.1)
LNDN	39.4(-3.9)	38.7(-3.2)	37.3(-2.6)	36.5(-2.6)	38.2(-2.2)	37.6(-2.4)	44.6(-4)	40.3(-3)
LNDW	40.9(-2.4)	39.9(-2)	38.4(-1.5)	37.5(-1.6)	39(-1.4)	38.6(-1.4)	46.1(-2.5)	41.5(-1.8)
LWSN	39.3(-4)	38.7(-3.2)	37.2(-2.7)	36.3(-2.8)	38(-2.4)	37.4(-2.6)	45.1(-3.5)	40.5(-2.8)
LWSW	40.8(-2.5)	39.9(-2)	38.3(-1.6)	37.4(-1.7)	38.9(-1.5)	38.5(-1.5)	46.4(-2.2)	41.5(-1.8)
LWDN	36.6(-6.7)	36.6(-5.3)	35.4(-4.5)	34.6(-4.5)	36.4(-4)	35.7(-4.3)	41.6(-7)	38.5(-4.8)
LWDW	39.1(-4.2)	38.5(-3.4)	37.2(-2.7)	36.3(-2.8)	37.9(-2.5)	37.4(-2.6)	44.3(-4.3)	40.3(-3)
HNSN	40.7(-2.6)	40(-1.9)	38.3(-1.6)	37.5(-1.6)	39.2(-1.2)	38.8(-1.2)	46.8(-1.8)	41.5(-1.8)
HNSW	41.6(-1.7)	40.7(-1.2)	38.9(-1)	38.1(-1)	39.6(-0.8)	39.3(-0.7)	47.5(-1.1)	42.2(-1.1)
HNDN	39(-4.3)	38.7(-3.2)	37.3(-2.6)	36.5(-2.6)	38.4(-2)	37.9(-2.1)	45.2(-3.4)	40.3(-3)
HNDW	40.6(-2.7)	39.8(-2.1)	38.3(-1.6)	37.4(-1.7)	39.1(-1.3)	38.7(-1.3)	46.4(-2.2)	41.5(-1.8)
HWSN	40.6(-2.7)	39.8(-2.1)	38.2(-1.7)	37.4(-1.7)	39.1(-1.3)	38.7(-1.3)	46.6(-2)	41.4(-1.9)
HWSW	41.5(-1.8)	40.6(-1.3)	38.8(-1.1)	38(-1.1)	39.6(-0.8)	39.2(-0.8)	47.4(-1.2)	42.1(-1.2)
HWDN	38.8(-4.5)	38.4(-3.5)	37(-2.9)	36.2(-2.9)	38.2(-2.2)	37.8(-2.2)	44.9(-3.7)	40.1(-3.2)
HWDW	40.4(-2.9)	39.7(-2.2)	38.1(-1.8)	37.3(-1.8)	39(-1.4)	38.6(-1.4)	46.3(-2.3)	41.3(-2)

Appendix 3-6. Mean UTCI according to the scenarios(in parentheses, mean UTCI reduction according to the scenarios). The scenario abbreviation refers to Table 5

Scenario	North	South	Northwest	Southeast	West	East	Northeast	Southwest
No tree	39.4	38.5	37.8	37.1	37.7	37.6	38.1	37.0
LNSN	38.2(-1.2)	37.5(-1)	37(-0.8)	36.3(-0.8)	37.1(-0.6)	36.8(-0.8)	37.4(-0.7)	36.8(-0.2)
LNSW	38.6(-0.8)	37.9(-0.6)	37.3(-0.5)	36.6(-0.5)	37.4(-0.3)	37.1(-0.5)	37.7(-0.4)	36.9(-0.1)
LNDN	37.3(-2.1)	36.8(-1.7)	36.4(-1.4)	35.7(-1.4)	36.7(-1)	36.3(-1.3)	36.8(-1.3)	36.4(-0.6)
LNDW	38.1(-1.3)	37.5(-1)	37(-0.8)	36.3(-0.8)	37.1(-0.6)	36.8(-0.8)	37.3(-0.8)	36.7(-0.3)
LWSN	37.3(-2.1)	36.9(-1.6)	36.3(-1.5)	35.7(-1.4)	36.6(-1.1)	36.2(-1.4)	36.9(-1.2)	36.5(-0.5)
LWSW	38.1(-1.3)	37.5(-1)	36.9(-0.9)	36.2(-0.9)	37(-0.7)	36.8(-0.8)	37.4(-0.7)	36.8(-0.2)
LWDN	35.9(-3.5)	35.7(-2.8)	35.3(-2.5)	34.7(-2.4)	35.8(-1.9)	35.3(-2.3)	35.7(-2.4)	35.8(-1.2)
LWDW	37.2(-2.2)	36.7(-1.8)	36.3(-1.5)	35.7(-1.4)	36.5(-1.2)	36.2(-1.4)	36.7(-1.4)	36.4(-0.6)
HNSN	38.1(-1.3)	37.5(-1)	36.9(-0.9)	36.3(-0.8)	37.2(-0.5)	37(-0.6)	37.5(-0.6)	36.8(-0.2)
HNSW	38.5(-0.9)	37.9(-0.6)	37.3(-0.5)	36.6(-0.5)	37.4(-0.3)	37.2(-0.4)	37.7(-0.4)	36.9(-0.1)
HNDN	37.2(-2.2)	36.9(-1.6)	36.4(-1.4)	35.7(-1.4)	36.8(-0.9)	36.5(-1.1)	36.9(-1.2)	36.4(-0.6)
HNDW	38(-1.4)	37.5(-1)	36.9(-0.9)	36.3(-0.8)	37.2(-0.5)	36.9(-0.7)	37.4(-0.7)	36.8(-0.2)
HWSN	38(-1.4)	37.5(-1)	36.8(-1)	36.2(-0.9)	37.1(-0.6)	36.9(-0.7)	37.4(-0.7)	36.7(-0.3)
HWSW	38.5(-0.9)	37.8(-0.7)	37.2(-0.6)	36.6(-0.5)	37.4(-0.3)	37.2(-0.4)	37.7(-0.4)	36.9(-0.1)
HWDN	37(-2.4)	36.7(-1.8)	36.2(-1.6)	35.7(-1.4)	36.7(-1)	36.4(-1.2)	36.8(-1.3)	36.4(-0.6)
HWDW	37.9(-1.5)	37.4(-1.1)	36.8(-1)	36.2(-0.9)	37.1(-0.6)	36.9(-0.7)	37.4(-0.7)	36.7(-0.3)