

실측과 컴퓨터 모델링을 통한 미기후 요소 및 인간 열환경지수의 차이 비교 분석

Comparison of Differences on Microclimatic Factors and Human Thermal Sensation between *in situ* Measurement and Computer Modeling

박수국¹ · 공학양² · 강훈^{1*}

¹제주대학교 생명자원과학대학 생물산업학부 원예환경전공 교수, ²국립환경과학원 자연환경연구과 연구사

Sookuk Park¹, Hak-Yang Kong² and Hoon Kang^{1*}

¹Professor, Research Institute for Subtropical Agriculture and Animal Biotechnology, SARI, Horticultural Science, College of Applied Life Sciences, Jeju National University, Jeju 63243, Korea

²Researcher, Department of Environment Research Division, National Institute of Environmental Research, Incheon 22689, Korea

Received 9 January 2020, revised 17 February 2020, accepted 25 February 2020, published online 31 March 2020

ABSTRACT: For investigating restriction in the use of computer modeling results without adjusting them with measured data, this study analyzed and compared microclimatic aspects and human thermal sensation between *in situ* measurement and computer modeling using ENVI-met in and around a small urban park of downtown Changwon in May, 2012. In the results, ENVI-met underestimated air temperatures and wind speeds than the measured ones and overestimated relative humidities. In the radiation analysis, ENVI-met overestimated solar radiation from the sky hemisphere and terrestrial radiation from the ground hemisphere and underestimated terrestrial radiation from the sky hemisphere. Also, the differences of mean radiant temperatures with the measured ones reached up to 19.6°C which could create an 1.2 PMV difference. ENVI-met overestimated up to 2.3 PMV and 4°C UTCI at 12:00. The difference was shown clearly in PMV than in UTCI. Therefore, when computer modeling is used in urban microclimate and human thermal sensation (comfort) studies the modeling results should be compared with measured data and adjusted adequately to adopt the results to urban and landscape planning and design.

KEYWORDS: Microclimate, Human thermal comfort, Urban park, Modeling, ENVI-met, UTCI

요약: 본 연구는 컴퓨터 모델링의 결과를 실측자료 보정없이 이용하였을 때의 문제점을 조사하기 위해, 작은 도시공원을 대상으로 실측자료와 컴퓨터 모델링 결과를 비교 분석하여 보았다. 컴퓨터 모델링 결과는 실측자료에 비해 미기후 요소인 기온과 풍속에서는 과소예측을 보였으며, 상대습도와 평균복사온도에서는 과대예측을 하는 것으로 나타났다. 그 차이는 인간 열환경지수인 PMV와 UTCI에서 최대 2.3 PMV와 4°C UTCI의 차이를 보였다. 그러므로, 인간 열환경지수 (열쾌적성) 연구에서 컴퓨터 모델링을 이용할 때는 반드시 실측자료를 이용한 결과보정 과정을 거쳐 도시와 조경계획 및 디자인에 적용되어야 할 것이다.

핵심어: 미기후, 인간 열쾌적성, 도시공원, 모델링, ENVI-met, UTCI

1. 서론

최근에 도시 및 조경계획에서 기후·기상요소를 분

석하여 적용하려는 연구들이 활발히 진행되어 오고 있다. 단독 식재가 줄 수 있는 미기후적 특성 파악부터 (Ju et al. 2004, Choi and Lee 2006), 다양한 조경 재료가

*Corresponding author: khoon@jejunu.ac.kr, ORCID 0000-0002-6129-4888

© Korean Society of Ecology and Infrastructure Engineering. All rights reserved.

This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

미기후에 미치는 영향 연구 (Lee and Ryu 2010), 대학교 캠퍼스 (Joo et al. 2008, Lee et al. 2010), 공동주택 단지 (Lim et al. 2008), 신 도시 아파트 배치 (Moon et al. 2010), 토지이용변화 (Kong et al. 2016)와 택지개발지역 (Kong et al. 2018)에 따른 열환경지수 (human thermal sensation) 분석, 도시 중심상업지역에서의 열환경지수 결과를 이용한 인간 생명기후지도 (human bioclimatic map) 작성 (Park 2012, 2013) 등 다양한 분야에서 적용하려는 시도들이 있어 왔다. 또한, 환경부에서도 이상기후 (폭우, 폭염, 태풍 등)에 대비한 환경생태계획을 개발사업에 도입할 지침을 마련하였으며, 기후요소를 환경영향평가항목으로 포함시켜 계획 시부터 적용할 방안을 발표하였다 (Ministry of Environment 2012).

기후요소와 그로 인해 발생하는 열환경 분석을 위해서 실제 현장에서 자료들을 측정하는 방법과 컴퓨터 시뮬레이션 프로그램을 이용하는 방법이 주로 사용되고 있다. 실측을 통한 연구는 실존하는 연구 대상지가 있어야 사용할 수 있는 방법이며, 컴퓨터 모델링은 도시 및 조경계획 분야와 같이 변화된 환경에 대한 예측을 위한 연구의 목적으로 이용되고 있다. 그러나, 기존의 국내 연구들은 컴퓨터 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 열환경과 같은 기후·기상요소들을 분석하였으나, 실측을 통한 결과 검증이나 보정 없이 결론에 이른 경우가 많았다 (Baek and Jung 2009, Kim et al. 2010, Moon et al. 2010, Baek et al. 2011, Park et al. 2012). 여기에 대해서 Oke et al. (2017)은 시뮬레이션은 신뢰성 확보와 유용한 관련정보를 얻기 위해서는 실측자료를 통한 검증이 이루어져야 한다고 권고하고 있다 (“It is recommended that the simulation be validated against field measurements in order to establish confidence and gain useful insights.”).

보정없이 시뮬레이션 결과만을 이용하여 분석할 경우 나타날 수 있는 문제점을 예로 든다면, 국내에서 많이 이용된 미기후 분석 컴퓨터 시뮬레이션 프로그램인 ENVI-met의 경우, 복사에너지, 특히 태양 복사에너지를 과다하게 계산하며 (Park 2011), 평균복사온도 (mean radiant temperature, T_{mr})에서도 실측자료와 큰 차이를 보이는 것으로 나타났다 (Ali-Toudert 2005, Thorsson et al. 2007, Park 2011). 실측자료와 차이가 있었던 시뮬레이션 결과를 도시·조경계획 및 디자인에 실제로

적용하게 되면 잘못된 설계로 이어질 수 있으므로, 컴퓨터 모델링을 이용하는 연구는 현장에서 미기후 자료들을 측정하고 그 결과와 비교하여 보정하는 단계를 반드시 거쳐야만 그 결과에 대한 신뢰성을 얻을 수 있을 것이다.

따라서 본 연구는 도시지역에서 가장 높고 다양한 열환경을 보이는 중심상업지역에 위치한 소규모 도시 공원을 중심으로, 미기후 실측자료와 컴퓨터 시뮬레이션 프로그램을 이용한 모델링 결과의 미기후 요소와 인간 열환경지수의 차이를 비교 분석하여, 검정을 거치지 않았을 때 나타날 수 있는 차이의 문제점에 대해 연구하여 보았다.

2. 연구 방법

2.1 연구대상지

경상남도 창원시 상남동 중심상업지역에 위치한 소공원 (35°13'N, 128°41'E; 고도 17 m; 면적 2,950 m²)을 중심으로 13 - 50 m 높이의 상업용도의 건물들로 둘러싸인 지역을 연구 대상으로 선정하였다 (Fig. 1). 중심상업지역은 도시지역에서 가장 높고 다양한 열환경이 나타나는 지역으로 (Lau et al. 2019), 복잡한 도시공간구조로 인해, 실측자료와 컴퓨터 모델링 결과의 차이가 가장 크게 나타날 것으로 사료되어 연구 대상으로 선정하였다 (Kwok et al. 2019). 공원은 수고 5 - 7 m의 수목으로 둘러싸여 있으며, 잔디 피복에 십자형태의 통로는 적색 벽돌로 포장되어 있었다. 주변에 다른 가로수는 식재되어 있지 않아 전형적인 중심상업지역의 모습을 보이고 있다. 이 연구 대상지는 가장 복잡한 미기후 형태를 보이는 중심상업지역에 위치한 오픈스페이스 (open space)라는 특성을 가지고 있다.

2.2 분석방법

측정 지점은 6군데 (지점 1 - 6)로 2012년 5월 16일 맑은 날 9:30 - 17:00 동안 Davis Pro (<http://www.davisnet.com>)를 이용하여 지상 1.2 m 높이에서 기온, 상대습도와 풍속을 매 분 단위로 측정된 자료를 이용하였다. 태양 및 지구 복사에너지 자료는 공원의 중앙인 지점 1에서 CNR4 Net-radiometer와 CR1000 data logger (Kipp & Zonen Inc. of Delft, The Netherlands;

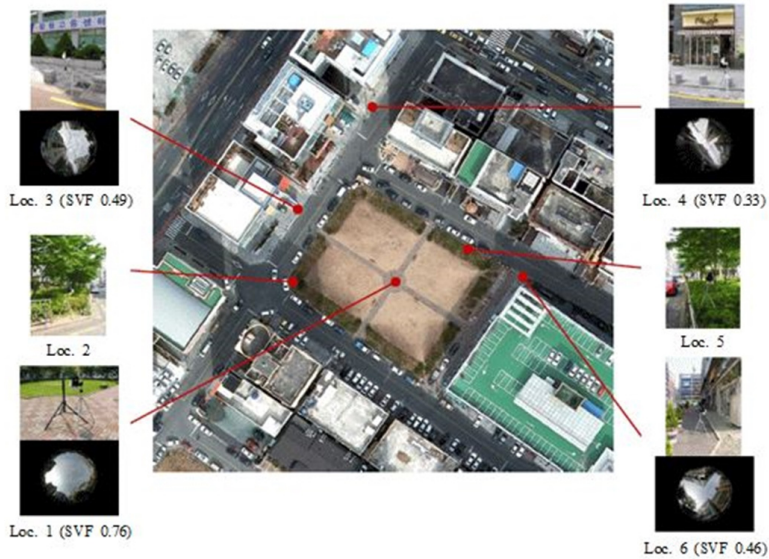


Fig. 1. Study site and data collection locations. SVF means sky view factor (1.0 = 100%).

Table 1. Input data for ENVI-met simulation

Category	Input data
Start Simulation at Day (DD.MM.YYYY)	16.05.2012
Start Simulation at Time (HH:MM:SS)	06:00:00
Total Simulation Time in Hours	24.00
Save Model State each min	10
Wind Speed in 10 m above Ground (m/s)	0.9
Wind Direction (0:N, 90:E, 180:S, 270:W)	90
Roughness Length z_0 at Reference Point	0.1
Initial Temperature Atmosphere (K)	287.13
Specific Humidity in 2500 m (g Water/kg air)	6.2
Relative Humidity in 2 m (%)	70.2

<http://www.kippzonen.com>)를 이용하여 같은 높이에서 동일한 시간 동안 측정하여, 매 5초 단위로 데이터 로그에 저장하였다.

컴퓨터 시뮬레이션 프로그램은 국내에서 미기후 및 인간 열환경 분석에 가장 많이 사용되는 ENVI-met (<http://www.envi-met.com>)을 이용하였다. 지역 입력 자료 (area input file)는 소공원과 주변지역을 포함한 190 m (x) × 210 m (y)의 면적을 2 m (x) × 2 m (y) × 1 m (z)의 grid 크기로 구축하였다. 필요한 구성 입력자료 (configuration file)는 Table 1과 같으며, 매 10분마다 결과를 저장하게 하였다. 입력자료 중 기온, 상대습도, 풍속 및 풍향은 기상청에서 운영하는 자동기상측정망 (AWS) 자료를 이용하였고, Initial Temperature At-

mosphere와 Specific Humidity in 2500 m는 세계기상기구 (World Meteorological Organization, WMO)와 미국 해양 및 대기부서 (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)에서 발표한 세계 월별 기후 자료 (Monthly climatic data for the world) 중 이 연구대상지에 적용 가능한 가장 최근의 자료인 2010년 5월 일본 후쿠오카에서 측정된 자료 (Vol. 63 No. 5)를 이용하였다. 실측자료와 ENVI-met 결과 (높이: 1.5 m)는 한 시간단위로 비교 분석하였으며, 분석 대상으로는 기온, 상대습도, 풍속, 태양 및 지구 복사에너지, 평균복사온도 (T_{mrt}), 인간 열환경지수 Perceived Mean Vote (PMV, Fanger 1972, ISO 7730 2005)과 Universal Thermal Climate Index (UTCI, <http://www.utci.org>)

였다. T_{mri} 를 위한 계산식은 측정된 태양 및 지구복사에너지를 이용하여 Park (2011)의 식을 이용하여 산정하였다. 각 지점들의 하늘시계지수(sky view factor, SVF)는 BMSky-view 컴퓨터 프로그램 (Gál et al. 2007)을 이용하여 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 기온

연구대상지 안의 여섯 지점에서 측정된 기온은 측정 시간인 9:30 - 17:00 동안 5.7°C (20.8 - 26.5°C)의 변화를 보였으며, 지점 간 최대 2°C 정도의 차이를 보였다 (Fig. 2 (a)). 가장 높은 기온을 나타낸 시간은 14:30 - 15:00이었다. 최고 기온을 보인 지점은 양지인 지점 2였으며 (26.5°C), 지점 3과 4는 음지로 최저 기온을 나

타내었다. 이때 태양의 방위각은 255°53'09", 고도는 51°39'04"이었다.

지점 4는 주변의 높은 건물에 의해 계속 음지 상태로 다른 지점보다 낮은 온도를 유지하였으며, 지점 3은 12:00까지는 바로 앞에 위치한 건물 벽면에 태양 직사광선이 도달함에 따라 높은 반사 태양복사에너지와 그 표면에서 방출되는 높은 지구복사에너지의 영향으로 높은 온도를 유지하였으나, 13:00부터 건물 벽면에 그늘이 형성되면 반사되는 태양복사에너지가 줄어들고 낮은 지구복사에너지의 방출로 인해 낮은 온도를 나타내게 되었다. 이것은 도시 공간에서 기온에 미치는 주변 건물의 영향(건물 벽면의 양지 및 음지 여부)을 잘 보여주는 것으로 판단된다.

복사에너지의 영향보다는 약하지만 기온에 큰 영향을 미치는 요인은 풍속으로 판단된다 (Figs. 2 (a) and 2 (c)). 보통 지역풍은 도시공간 내에 기온보다 상대적으로 낮은 온도를 보인다. 건물의 형태와 배치에 따라 지역풍이 유입되는 도로 (road)와 가로 (street)에서 높은 풍속을 보이는데, 이 지점의 대기는 기온이 낮은 지역풍과 섞여 풍속이 낮은 지점보다 기온이 낮게 나타난다 (Park 2013).

지점 1은 측정시간 중 계속 양지를 유지함으로써 꾸준히 높은 온도를 나타내었다. 지점 5는 나무그늘 밑에 설치되어 있어서 오전 중에는 가장 낮은 기온을 나타냈던 지점 4와 비슷하게 계속 낮은 온도를 유지하였으나, 13:00경부터는 건물의 음지에 위치한 지점 4보다 높은 온도를 나타냈다. 지점 6은 오전 중에는 건물 그늘에 의해 낮은 온도를 보였으나, 13:30부터 양지가 되어 높은 온도를 유지하였다.

한편, 미기후 모델링 프로그램인 ENVI-met 결과에 따르면 오전에는 평균 4°C, 오후에는 평균 5°C 정도로 실측한 기온보다 낮게 나타났다 (Fig. 2 (a)). 측정시간 중 변화량도 3.2°C, 시간대별 지점 간 기온 변화도 0.5°C 정도로 실측한 값보다 적은 차이를 보여, 실제보다 미기후 변화를 잘 표현하지 못하는 것으로 판단된다. 그러나, 실측자료와의 회귀분석 결과 $r^2 = 0.8013$ 로 나타나 상호간의 기온 패턴은 매우 관련성이 높은 것으로 나타났다 (Fig. 3 (a)).

3.2 습도

측정된 각 지점별 상대습도는 9:30경에는 43.5 - 46.5%

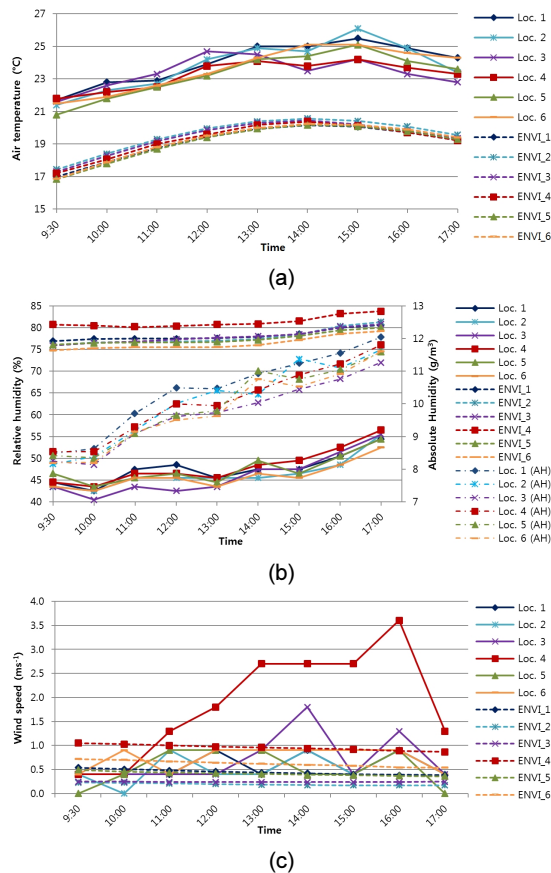


Fig. 2. Comparison between *in situ* data and ENVI-met results: a) air temperature, b) relative humidity [absolute humidity (AH) is only from *in situ* data] and c) wind speed.

로 최대 3%의 차이를 보였으며, 12:00경엔 42.5 - 48.5%로 최대 6%의 차이를, 17:00경에는 52.5 - 56.5%로 최대 4%의 차이를 나타냈다 (Fig. 2 (b)).

기온의 영향을 받는 상대습도가 아닌 절대습도 (absolute humidity)를 이용하여 각 지점들을 비교하여 보았다. 절대습도값은 8.3 (9:30) - 11.7 (17:00) gm^{-3} 로 오후로 갈수록 높아졌으며 (Fig. 2 (b)), 지점 간 최대 1.0 gm^{-3} (12:00)로 차이가 크지 않았다.

가장 높은 절대습도값을 나타낸 곳은 공원의 중앙에 위치한 지점 1로서 잔디밭과 공원둘레의 수목들의 증발산의 영향을 받은 것으로 생각된다. 반면에 실측과 ENVI-met 결과 모두에서 상대습도가 가장 높게 나왔던 지점 4는 절대습도값에서는 중간정도의 결과를 보였다. 가장 낮은 지점은 지점 3으로 나타났는데, 지점 6과 비교해 보면 오전에는 두 지점 다 가장 낮은 절대습도값을 나타내었으나 오후부터는 지점 6이 더 높게 나타났다.

ENVI-met 결과는 시간대별 측정 지점 간 차이는 최대 약 5%를 나타내 실측자료와 비슷한 결과를 예측하였으나, 실측자료에 비해 평균 $31.3 \pm 2.7\%$ 높은 결과를 보였다. 가장 높게 나온 지점 (지점 4)과 가장 낮게 나온 지점 (지점 6)도 실측자료와 동일한 결과를 보이는 것으로 나타났다. 실측자료와 모델링 자료의 상호관련성 ($r^2 = 0.5107$)은 기온에 비해 높지 않은 것으로 나타났다 (Fig. 3 (b)).

3.3 풍속

측정된 자료들은 11:00 - 16:00 동안 높은 풍속 값을 나타낸 반면에, ENVI-met 결과는 시간에 관계없이 비슷한 값을 보였다 (Fig. 2 (c)). 좁은 골목에 위치한 지점 4는 실측자료에서는 평균 $1.9 \pm 1.1 \text{ ms}^{-1}$, 최고 3.6 ms^{-1} 로 제일 높은 풍속을 나타내었으며, ENVI-met 결과에서도 평균 $1.0 \pm 0.1 \text{ ms}^{-1}$ 로 가장 높은 결과를 보였으나, 실측자료와 평균 $0.9 \pm 1.1 \text{ ms}^{-1}$ 의 큰 차이를 보였다. 다음으로 실측에서 강한 풍속을 나타낸 곳은 지점 3으로 14:00경에 1.8 ms^{-1} 를 나타내었고, 두 곳을 제외한 나머지 지점들은 대체적으로 1.0 ms^{-1} 이하의 값을 보였다.

지점 1, 5와 6은 ENVI-met 결과와의 차이가 평균 $0.1 \pm 0.3 \text{ ms}^{-1}$ 로 가장 근접한 결과를 보였고, 지점 2는 지점 3과 같은 도로변에 위치해 있었지만 나무 옆에 있어서 위의 두 지점들보다는 조금 높은 평균 $0.3 \pm 0.3 \text{ ms}^{-1}$ 의 차

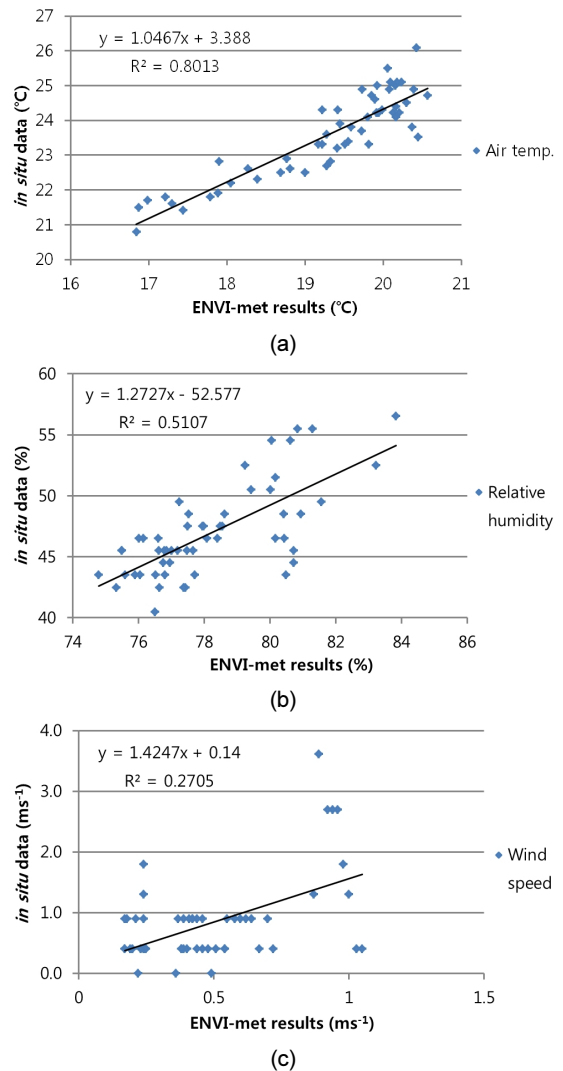


Fig. 3. Regression analysis between *in situ* data and ENVI-met results: a) air temperature, b) relative humidity and c) wind speed.

이를 보였다. 실측자료와 ENVI-met 결과의 회귀분석 결과 $r^2 = 0.2705$ 로 매우 낮은 설명력을 보여 ENVI-met의 미기후 풍속예측은 정확성이 높지 않다고 할 수 있다 (Fig. 3 (c)).

3.4 복사에너지 (Radiation)

ENVI-met 프로그램은 지표면 반구 (the ground hemisphere)에서 반사되어 오는 태양 복사에너지에 대한 결과는 표출되지 않기 때문에, 지점 1에서의 하늘 반구 (the sky hemisphere)에서 오는 태양 복사에너지 ($K \downarrow$)

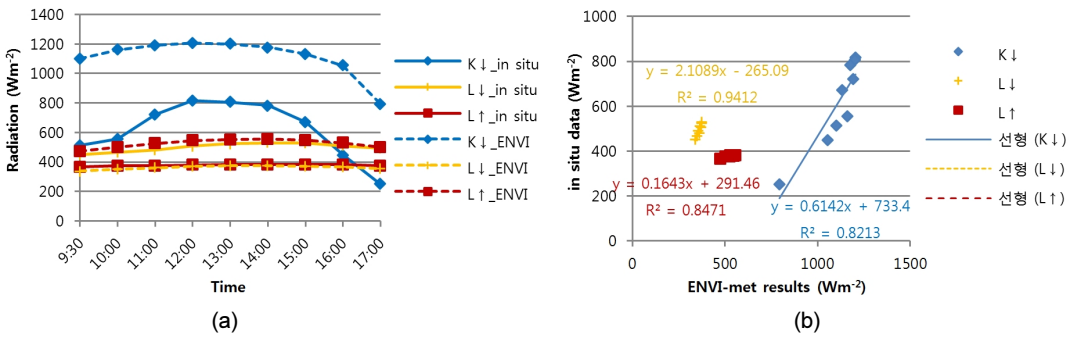


Fig. 4. Comparison between *in situ* data and ENVI-met results: a) radiation comparison and b) radiation regression analysis.

Table 2. Results of mean radiant temperature (T_{mrt}) and human thermal sensation (PMV, UTCI) from *in situ* data and ENVI-met results

Time	T_{mrt} (°C)		PMV		UTCI (°C)	
	<i>in situ</i>	ENVI-met	<i>in situ</i>	ENVI-met	<i>in situ</i>	ENVI-met
9:30	48.5	62.5	2.0	2.5	29.2	31.6
10:00	47.6	63.8	2.0	2.9	29.5	32.4
11:00	49.9	68.0	2.3	3.7	30.4	34.0
12:00	51.5	71.1	2.0	4.3	30.9	35.1
13:00	53.0	71.4	3.1	4.5	32.4	35.4
14:00	56.8	65.4	2.8	3.8	32.9	34.2
15:00	58.4	19.6	3.8	-1.0	34.2	21.2
16:00	53.4	13.4	2.4	-1.6	32.1	19.0
17:00	45.6	12.1	2.2	-1.8	30.4	18.2

와 지구 복사에너지 ($L\downarrow$), 지표면 반구에서 오는 지구 복사에너지 ($L\uparrow$)를 실측자료와 비교하였다 (Fig. 4 (a)).

$K\downarrow$ 에서는 실측자료가 250 - 514 Wm⁻²로 나타난 반면에, ENVI-met 결과는 793 - 1,100 Wm⁻²로 그 차이가 평균 495 ± 92 Wm⁻²로 매우 크게 나타났다. $L\downarrow$ 는 실측에서는 451 - 529 Wm⁻², ENVI-met은 338 - 376 Wm⁻²로 평균 137 ± 16 Wm⁻² 낮게 예측되었다. 이러한 결과는 ENVI-met의 기온예측이 실측자료보다 4 - 5°C 낮은 것이 원인이 될 수 있다. $L\uparrow$ 는 실측 367 - 383 Wm⁻², ENVI-met 473 - 555 Wm⁻²로 평균 148 ± 24 Wm⁻² 높게 예측되었다. 이러한 결과는 ENVI-met이 하늘 반구에서 오는 태양 복사에너지를 과다예측한 영향으로 지표면 온도를 실제보다 높게 예측한 것이 원인이라 할 수 있다.

실측자료와 ENVI-met 결과의 선형회귀분석에서는 세 가지 다 높은 결과를 보여 주었다: $K\downarrow$, $r^2 = 0.821$; $L\downarrow$, $r^2 = 0.941$; $L\uparrow$, $r^2 = 0.847$ (Fig. 4 (b)). 특히, $L\downarrow$ 에서 높은 상관성을 보여준 원인은 ENVI-met이 예측한 하늘시계지수 (sky view factor)는 0.67로 실측된 하늘

시계지수보다 0.1 (10%) 정도 낮은 값을 보이기 때문이라 판단된다. 이것이 ENVI-met에서 낮게 예측된 기온의 영향으로 실제보다 대기에서 오는 지구 복사에너지 양을 낮게 예측하게 되며, 실제보다 낮게 예측된 주변의 구조물 (건물 벽, 수목, 다른 인공구조물) 표면온도 (ENVI-met이 실측보다 평균 137 ± 16 Wm⁻² 낮게 예측한데서 유추하였음)에 비해 그 구조물이 차지하는 시계지수 (= 1 - 하늘시계지수)가 높아짐으로써 주변 구조물에서 오는 지구 복사에너지 양을 더 높이는 역할을 하였다.

여기서는 지표면 반구에서 오는 태양 복사에너지 ($K\uparrow$)에 대해서는 비교하지 못했지만, 실측된 지표면 태양 복사에너지 반사율 (albedo)을 보면, 적색 벽돌포장재의 반사율이 2009년 6월 (19.0%)에 측정된 것보다 2012년 5월 (16.6%)에 2.4% 낮아진 결과를 보였다. 이것은 3년 동안 포장재 표면의 오염이 증가하여 반사율이 낮아진 현상으로 생각된다.

T_{mrt} 에서는 ENVI-met이 12:00에 실측자료보다 최대 19.6°C 높은 결과를 보였다 (Table 2). 최대 차이를 보인 12:00를 기준으로 이른 오전과 오후로 갈수록 그

Table 3. Levels of human thermal sensation, PMV and UTCI (Fanger 1972; <http://www.utci.org>)

PMV	UTCI (°C)	Thermal perception	Grade of Physiological Stress
< -3.5	< -40	very cold	extreme cold stress
	-27 - -40		very strong cold stress
-2.5 - -3.5	-13 - -27	Cold	strong cold stress
-1.5 - -2.5	0 - 13	Cool	moderate cold stress
-0.5 - -1.5	9 - 0	slightly cool	slight cold stress
-0.5 - 0.5	9 - 26	neutral, comfortable, indifferent	no thermal stress
0.5 - 1.5		slightly warm	
1.5 - 2.5	26 - 32	Warm	moderate heat stress
2.5 - 3.5	32 - 38	Hot	strong heat stress
> 3.5	38 - 46	very hot	very strong heat stress
	> 46		extreme heat stress

차이는 줄어드는 모습을 보였으며, 15:00부터는 ENVI-met이 지점 1뿐만 아니라 공원 전체를 음지로 인식하는 오류도 발생하였다.

한편, Fahmy and Sharples (2009)의 T_{mrt} 와 인간 열환경지수인 PMV와의 회귀식을 이용하면 ($r^2 = 0.7763$):

$$PMV = 0.0688 \times T_{mrt} - 17.426 \quad (\text{Eq. 1})$$

19.6°C T_{mrt} 의 차이는 1.2 PMV 차이를 보이므로, ENVI-met의 복사에너지 예측에 심각한 문제가 있음을 알 수 있었다 (Table 3).

3.5 인간 열환경지수 (Human Thermal Sensation)

실측자료와 ENVI-met 결과를 이용해 인간 열환경지수인 PMV와 UTCI를 분석해 본 결과, 실측자료는 오전에는 PMV와 UTCI 둘 다 따뜻하다 (warm)는 결과를 보이다가 13:00부터 덥다 (hot)는 결과를 보여주었다. PMV는 15:00에 매우 덥다 (very hot)는 결과도 보였다 (Tables 2 and 3).

ENVI-met은 PMV에서는 9:30부터 UTCI에서는 10:00부터 덥다는 결과 (hot)를 보이다가, PMV는 11:00부터 매우 덥다는 결과 (very hot)를 보였다. 실측자료와 ENVI-met 결과는 12:00에 최대 2.3 PMV, 4.2°C UTCI의 차이를 보였다. 이것은 ENVI-met이 예측한 낮은 기온과 풍속, 높은 상대습도와 평균복사온도의 영향이 복합적으로 나타난 결과이며, UTCI에서 보다는 PMV에서 그 차이를 확연히 찾아 볼 수 있었다.

위와 같은 실측과 컴퓨터 모델링 결과의 차이는 도시 및 조정 계획에 심각한 오류를 발생시킬 수 있으므로, 실측과의 검·보정 과정을 거쳐 그 결과를 이용하여야 할 것이다.

3.6 인간 열환경지수 민감도 조사 (Sensitivity test of human thermal sensation)

여름철을 기준으로, 인간 열환경지수에서 각각의 미기후 자료들의 오차범위를 설정해 본다면, 한 지표의 반 (heat stress 기준으로; PMV: 0.5, UTCI: 3°C)을 오차범위의 한계로 잡는 것이 합당할 것으로 생각된다. 그 한계는 오차로 인해 잘못된 지표 (예: warm 지역을 hot 지역으로)를 나타낼 확률이 50%이며, 지표를 기존의 단계에 중간 단계를 추가하여 좀 더 세분화하면 오차로 인한 지표 결과 오류를 반감시킬 수 있기 때문이다. 예를 들어, 여름철 PMV 지표 4단계 (slightly warm-warm-hot-very hot)를 중간 단계를 추가한 7단계 (slightly warm-warm-very warm-slightly hot-hot-very hot-extremely hot)로 세분화하면, 오류가 발생하더라도 기존의 지표에서의 한 단계가 아닌 반 단계의 오류만으로 줄일 수 있게 된다.

PMV와 UTCI의 반 단계인 0.5와 3°C를 발생시킬 수 있는 미기후 요소들의 최대 오차범위를 여름철 기준으로 Human Thermal Sensation Computer Program (Park 2012)을 이용하여 살펴보았다. 먼저, 기준이 되는 입력자료로서 신진대사에너지 (metabolic energy)는 서 있는 자세에서 발생하는 1.5 MET을, 의복은 전형

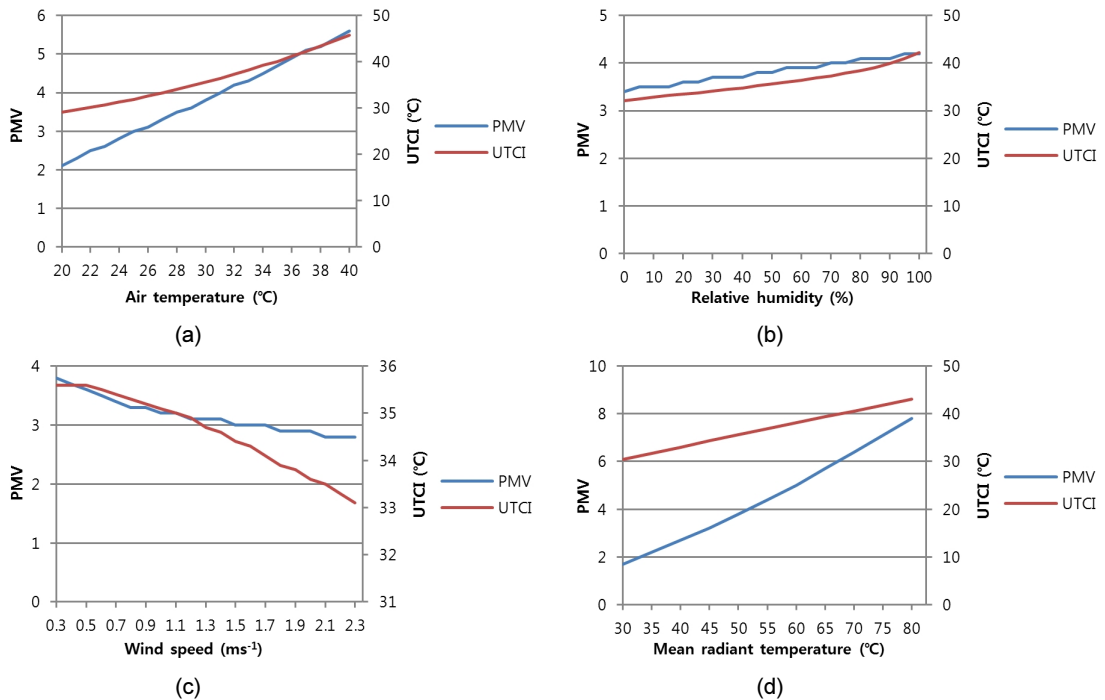


Fig. 5. Sensitivity tests of microclimatic factors in human thermal sensation: a) air temperature, b) wind speed, c) relative humidity and d) mean radiant temperature.

적인 여름철 복장인 긴 바지와 짧은 팔 티셔츠의 의류절연(clothing insulation)수치인 0.55 clo로, 기온은 30°C, 평균복사온도는 50°C, 풍속은 거의 없는 기준 (calm)인 0.3 ms⁻¹, 상대습도는 50%로 정하였다. 여기서 미기후 요소들의 분석 범위를 기온은 20 - 40°C, 평균복사온도는 30 - 80°C, 풍속은 0.3 - 2.3 ms⁻¹ (높이는 지상에서 1.2 m 기준), 상대습도는 0 - 100%로 하여, 나머지 기준들을 고정한 뒤 각각의 미기후 자료들의 분석 범위에 따라 값들을 입력하여 결과를 분석하였다.

그 결과, 기온은 PMV에서는 3°C의 기온 변화가 반 단계인 0.5의 값을 변경한다고 일률적으로 나타났으나, UTCI에서는 기온 20°C 근처에서는 5°C 정도로 나타나다가 40°C로 갈수록 PMV와 같은 3°C 정도의 결과를 보였다(Fig. 5 (a)). 풍속은 PMV에서는 풍속이 낮을 때는 0.5 ms⁻¹ 정도에서, 풍속이 강할 때는 1.4 ms⁻¹의 결과를 보였으며, UTCI에서는 2.5°C 변화에 2.0 ms⁻¹의 결과를 보여 풍속에 대한 영향이 PMV보다는 약한 것으로 보인다(Fig. 5 (b)). 상대습도는 PMV에서는 60% 정도로, UTCI에서는 상대습도가 낮을 때는 45% 정도의 변화에, 상대습도가 높을 때는 15%의 변화라는 결과를 보였다(Fig. 5 (c)). 평균복사온도는 PMV에서 4 -

5°C의 변화가, UTCI에서는 12°C 정도의 변화를 보이는 것으로 나타나 평균복사온도가 UTCI에는 영향을 적게 미치는 것으로 나타났다(Fig. 5 (d)). 그러나, 위의 결과는 각각의 미기후 자료가 반 단계의 지표를 변화시킬 수 있는 최대치를 나타낸 것이므로, 실제 연구에서는 각각의 미기후 자료의 오차만 볼 것이 아니라 그 오차가 종합적으로 만들어 낼 결과에 대해서 분석하여야 할 것이다.

5. 결론

본 연구는 경상남도 창원시 중심상업지역에 위치한 소규모 도시공원을 대상으로 미기후 실측 자료와 컴퓨터 시뮬레이션 프로그램인 ENVI-met을 이용하여 얻어진 결과의 차이를 비교 분석해 보았다.

ENVI-met 프로그램은 기온에서 실측보다 4 - 5°C 정도 낮게 예측하였으며, 상대습도는 31.3 ± 2.7% 높게, 풍속은 0.3 ± 0.6 ms⁻¹ 낮은 결과를 보여주었다. 회귀 분석에서는 기온이 가장 높은 결과 ($r^2 = 0.8013$)를 보였으며, 상대습도 ($r^2 = 0.5107$)와 풍속 ($r^2 = 0.2705$)은 낮은 결과를 보여, ENVI-met의 상대습도와 풍속예측

은 신뢰성이 높지 않다고 할 수 있겠다. 복사에너지에서는 하늘 반구에서 오는 태양 복사에너지에서 평균 $495 \pm 92 \text{ Wm}^{-2}$ 로 가장 큰 차이로 높게 예측하였다. 하늘 반구에서 오는 지구 복사에너지는 평균 $137 \pm 16 \text{ Wm}^{-2}$ 낮게 예측하였고, 지표면 반구에서는 평균 $148 \pm 24 \text{ Wm}^{-2}$ 높게 예측하였다. 회귀분석에서는 전체적으로 82% 이상의 높은 설명력을 보였고, 하늘 반구에서 오는 태양 복사에너지에서는 $r^2 = 0.9412$ 로 가장 높은 상관성을 보여주었다. 반면, T_{mrt} 에서 최대 19.6°C 의 차이를 보이는 것으로 나타나, 인간 열환경지수인 PMV에서 1.2의 차이를 보이는 것으로 나타났다. 이 차이는 PMV의 평가 기준으로 보았을 때, 1단계 이상의 차이를 나타내는 것으로 (예: 실제로는 warm한 지역을 hot한 지역으로 분석하여 열환경 개선 지역으로 분류), 인간 열환경지수 분석에서 심각한 오류를 발생시킬 수 있는 수준이라 할 수 있겠다. 그러므로 ENVI-met의 복사에너지 예측치의 신뢰성에 큰 문제가 있음을 알 수 있었다.

인간 열환경지수인 PMV와 UTCI에서는, 실측자료와는 12:00에 최대 2.3 PMV, 4.2°C UTCI의 차이를 보였다. 이것은 ENVI-met이 예측한 낮은 기온과 풍속, 높은 상대습도와 T_{mrt} 의 영향이 복합적으로 작용한 결과이며, UTCI에서 보다는 PMV에서 그 차이를 확연히 찾아 볼 수 있었다.

이 연구에서 보였던 두 자료들의 차이들은 절대값으로서의 의미는 없으며, 시간적 공간적 범위의 차이에 의해 다른 결과들을 보일 것이다. 그렇지만, 실측을 통한 검·보정 과정을 거치지 않은 컴퓨터 모델링 결과만의 비교 분석의 문제점은 잘 보여주었다고 생각된다. 미기후 자료를 이용한 인간 열환경지수 검·보정 방법은 Park (2014)와 Hyun (2018)에서 찾아볼 수 있으며, 아직까지는 연구대상지에 따라 검·보정식이 다르게 나와, 차후 이에 대한 더 많은 연구들이 진행되어야 할 것이다.

따라서 도시기후를 고려한 공간계획과 관련된 연구를 수행할 때는 실측을 통한 검·보정 과정을 통해서 컴퓨터 모델링 결과의 정확도를 향상시킬 필요가 있다고 판단된다. 이러한 측면에서 본 연구는 국내·외적으로 도시 및 조경계획 등 다양한 공간계획 차원에서 활용되고 있는 미기후 프로그램의 결과를 실측치와의 상호 비교 분석을 실시하여, 미기후 요소별 차이를 확인하였다는 점에서 향후 관련 연구 수행에 활용 가능할 것으로

기대된다.

본 연구는 한번의 관측과 모델링의 결과를 비교분석한 연구로서, 시간적·공간적 다양성에 의해 그 차이는 적게도 크게도 나타날 수 있으므로, 이 연구의 시기나 장소, 그리고 결과에 절대적인 의미는 없다고 하겠다. 차후 다양한 시기와 장소에서의 비교연구가 진행되어야 할 것이다. 한편, 본 연구 대상지는 중심상업지역에 위치해 있으므로, 교통수단과 건물에서 발생하는 인공열도 고려하여야 하나, 다양한 교통수단과 건물용도에 따라 발생하는 인공열 계산을 미기후 단위로 실측하기 어려웠으며, 이 연구에 이용된 컴퓨터 시뮬레이션 프로그램인 ENVI-met에도 그에 대한 입력기능이 없어, 이 연구에서는 포함시키지 못 하였다.

사 사

본 연구는 국립환경과학원의 조사연구사업 (NIER-2019-01-01-047)과 2019학년도 제주대학교 교원성과 지원사업에 의하여 수행되었습니다.

References

- Ali-Toudert, F. 2005. Dependence of outdoor thermal comfort on street design in hot and dry climate. *Berichte des Meteorologischen Institutes der Universität Freiburg* Nr.15, <http://www.freidok.de/volltexte/207>.
- Baek, S.H. and Jung, E.H. 2009. A study on microclimate change via time series analysis of satellite images - centered on Dalseo district, Daegu city. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* 12(2): 34-43.
- Baek, S.H., Aki, S., Kim, H.Y. and Jung, E.H. 2011. Evaluation of thermal environment improvement effect from public design improvement project on the urban street space. *Journal of Environmental Science International* 20(9): 1105-1114.
- Choi, D.H. and Lee, B.Y. 2006. Analysis of passive cooling effect of the tree by field observations in the summer. *Journal of the Korean Solar Energy Society* 26(4): 109-118.
- Fahmy, M. and Sharples, S. 2009. On the development of an urban passive thermal comfort system in Cairo, Egypt. *Building and Environment* 44: 1907-1916.
- Fanger, P.O. 1972. *Thermal Comfort: Analysis and Applications in Environmental Engineering*. McGraw-Hill, New York.

- Gál, T., Rzepa, M., Gromek, B. and Unger, J. 2007. Comparison between sky view factor values computed by two different methods in an urban environment. *ACTA Climatologica et Chorologica, Universitatis Szegediensis*, Tomus 40-41: 17-26.
- Hyun, C.J. 2018. Analysis of human thermal environments in the apartment complex by computer simulation. Master thesis, Jeju National University, Jeju.
- ISO 7730. 2005. Ergonomics of the thermal environment- Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria. International Standard Organization, Geneva, Switzerland.
- Joo, C.H., Yoon, Y.H., Park, B.J. and Kim, W.T. 2008. The influence of land cover types on thermal comfort in urban open space. *J. kor. soc. PeoplePlantsEnviron* 11(3): 59-65.
- Ju, M.J., Lee, C.S. and Ryu, N.H. 2004. The effect of urban shade trees on the WBGT (Wet Bulb Globe Thermometer Index). *Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture* 32(3): 51-59.
- Kim, D.W., Kim, K.J. and Jung, E.H. 2010. An analysis of micro-climate environmental changes followed by establishment of an urban park-focused on the Junggu in Daegu city. *Journal of the Urban Design Institute of Korea Urban Design* 11(2): 77-94.
- Kong, H., Choi, N., Park, S., Lee, J. and Park, S. 2018. A study on human thermal comfort of residential development districts in summer season. *Ecology and Resilient Infrastructure* 5(4): 219-228.
- Kong, H., Kim, S. and Cho, H. 2016. Effect of land use on urban thermal environments in Incheon, Korea. *Ecology and Resilient Infrastructure* 3(4): 315-321.
- Kwok, Y.T., Schoetter, R., Lau, K.K., Hidalgo, J. Ren, C., Pigeon, G. and Masson, V. 2019. How well does the local climate zone scheme discern the thermal environment of Toulouse (France)? An analysis using numerical simulation data. *International Journal of Climatology* 39(14): 5292-5315.
- Lau, K.K., Chung, S.C. and Ren, C. 2019. Outdoor thermal comfort in different urban settings of subtropical high-density cities: An approach of adopting local climate zone (LCZ) classification. *Building and Environment* 154: 227-238.
- Lee, J.A., Jung, D.Y., Chon, J.H., Lee, S.M. and Song, Y.B. 2010. An evaluation of human thermal comfort and improvement of thermal environment by spatial structure. *Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture* 38(5): 12-20.
- Lee, C.S. and Ryn, N.H. 2010. The influence of landscape pavements on the WBGT of outdoor spaces without ventilation or shade at summer midday. *Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture* 38(2): 1-8.
- Lim, J.Y., Hwang, H.K., Song, D.S. and Kim, T.Y. 2008. Assessment on thermal environment and human thermal comfort in residential building block through field measurement. *Proceedings of the Korean Solar Energy Society 2008 Spring Annual Conference*, 311-317.
- Ministry of Environment. 2012. Development of environment-ecological plan against abnormal weather for development business. Nature Conservation Bureau in Land and Environmental Policy, Ministry of Environment.
- Moon, S.Y., Kim, H.S. and Lee, K.B. 2010. A study on the urban climate mitigation effects with ecological landscape planning with reference to Namyang-Ju Walsanli Master-plan. *The International Journal of The Korea Institute of Ecological Architecture and Environment* 10(6): 11-19.
- Oke, T.R., Mills, G., Christen, A. and Voogt, J.A. 2017. *Urban Climate*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Park, K.Y., Lee, S.W. and Hwang, H.Y. 2012. Analysis on the mitigation effects of heat island phenomenon in apartment complex through creation of green network: a case study of Yeol-Mae village Apt in Daejeon's Noeun District. *Journal of Environmental Policy and Administration* 20(3): 27-50.
- Park, S.K. 2011. Human-Urban Radiation Exchange Simulation model. PhD dissertation, University of Victoria, B. C., Canada.
- 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.
- Park, S.K. 2013. A way for creating human bioclimatic maps using human thermal sensation (comfort) and applying the maps to urban and landscape planning and design. *Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture* 41(1): 21-33.
- Park, S.K. 2014. Application of universal thermal climate index (UTCI) for microclimatic analysis in urban thermal environments. *Landscape and Urban Planning* 125: 146-155.
- Thorsson, S., Lindberg, F., Eliasson, I. and Holmer, B. 2007. Different methods for estimating the mean radiant temperature in an outdoor urban setting. *International Journal of Climatology* 27: 1983-1993.