

토지이용 유형별 공간특성을 고려한 ENVI-met 모델의 현장측정자료 기반의 검증

송봉근¹ · 박경훈^{2*} · 정성관³

Validation of ENVI-met Model with In Situ Measurements Considering Spatial Characteristics of Land Use Types

Bong-Geun SONG¹ · Kyung-Hun PARK^{2*} · Sung-Gwan JUNG³

요 약

본 연구는 미기후 분석 프로그램인 ENVI-met 모델의 정확도를 검증하기 위해 경상남도 창원시를 대상으로 도시지역의 주요 토지이용 유형별 공간특성을 고려하여 선정된 조사구역의 현장측정 기상자료와 비교하였다. 현장측정은 주간시간대 2일, 야간시간대 1일 총 3일간이동식으로 측정하였고, ENVI-met 모델링은 현장측정과 동일한 시간대로 설정하여 수행하였다. 측정항목별 분석결과에 따르면, 주간시간대의 순복사에너지는 ENVI-met 모델링이 현장측정값보다 약 300Wm^{-2} 정도 높았고, 야간시간대는 현장측정값이 200Wm^{-2} 정도 더 높았다. 기온은 주간 및 야간 시간대 모두 현장측정값이 약 $3\sim 6^{\circ}\text{C}$ 정도 더 높은 것으로 분석되었다. 표면온도도 현장측정값이 ENVI-met 모델링보다 약 $7\sim 13^{\circ}\text{C}$ 더 높았다. 풍속은 ENVI-met 모델링과 현장측정값 간의 차이가 매우 큰 것으로 나타났다. 회귀분석 결과에서는 기온자료의 R^2 값이 약 0.6정도로 비교적 높게 나타난 반면에, 나머지 순복사에너지와 표면온도, 풍속은 낮은 상관성을 보였다. 이는 ENVI-met 모델링이 태양 및 지구복사에너지를 과대 또는 과소 예측하고 있으며, 모델링 및 현장측정을 위해 선정된 조사구역들을 둘러싸고 있는 인접한 주변 지역의 공간구조적, 미기후적 특성 차이에 의한 영향으로 판단된다. 따라서 향후 이에 대한 보다 면밀한 실증적 연구가 필요할 것으로 판단된다.

주요어 : ENVI-met 모델, 미기후, 순 복사에너지, 기온, 토지이용

ABSTRACT

This research measures and compares on-site net radiation energy, air temperature,

2014년 3월 26일 접수 Received on March 26, 2014 / 2014년 6월 20일 수정 Revised on June 20, 2014 / 2014년 6월 23일 심사완료 Accepted on June 23, 2014

1 창원대학교 산업기술연구원 Institute of Industrial Technology, Changwon National University

2 창원대학교 환경공학과 Dept. of Environmental Engineering, Changwon National University

3 경북대학교 조경학과 Dept. of Landscape Architecture, Kyungpook National University

* Corresponding Author E-mail : landpkh@changwon.ac.kr

wind speed, and surface temperature considering various spatial characteristics with a focus on land use types in urban areas in Changwon, Southern Gyeongsangnam-do, to analyze the accuracy of an ENVI-met model, which is an analysis program of microclimate. The on-site measurement was performed for three days in a mobile measurement: two days during the daytime and one day during the nighttime. The analysis using the ENVI-met model was also performed in the same time zone as the on-site measurement. The results indicated that the ENVI-met model showed higher net radiation than the on-site measurement by approximately 300Wm^{-2} during the daytime whereas the latter showed higher net radiation energy by approximately 200Wm^{-2} during the nighttime. The temperature was found to be much higher by approximately $2\text{--}6^\circ\text{C}$ in the on-site measurement during both the daytime and nighttime. The on-site measurement also showed higher surface temperature than the ENVI-met by approximately $7\text{--}13^\circ\text{C}$. In terms of the wind speed, there was a significant difference between the results of the ENVI-met model and on-site measurement. As for the correlation between the results of the ENVI-met model and on-site measurement, the temperature showed significantly high correlation whereas the correlations for the net radiation energy, surface temperature, and wind speed were very low. These results appear to be affected by excessive or under estimation of solar and terrestrial radiation and climatic conditions of the surrounding areas and characteristics of land cover. Hence, these factors should be considered when applying these findings in urban and environment planning for improving the microclimate in urban areas.

KEYWORDS : ENVI-met Model, Microclimate, Net Radiation, Air Temperature, Land Use

서론

전 세계 많은 도시들은 무분별한 개발과 높은 인구밀도 등으로 인해, 여름철 도시외곽지역에 비해 기온이 뚜렷하게 높아지는 도시열섬현상을 빈번히 발생되고 있으며(Oke, 1987), 최근 들어 여름철 기록적인 폭염 현상은 도시 거주민의 생활환경과 건강에 부정적 영향을 미치고 있다(Korea Center for Disease Control and Prevention, 2013). 이에 많은 도시에서 기후변화 문제를 개선하기 위해 도시 및 환경 계획 차원에서 다양한 방안들이 연구되고 있으며, 최근에는 미기후 모델을 활용하여 열환경 및 미기후 개선효과를 유도할 수 있는 최적의 공간설계 방안을 마련하기 위한 연구가 이루어

지고 있다(Ratti *et al.*, 2003; Yao *et al.*, 2011).

미기후 모델은 녹지공간의 조성과 건물의 배치형태, 피복재질의 교체 등 다양한 공간설계기법의 적용에 따른 열환경 및 미기후적 개선효과를 사전에 비교하는데 효과적으로 활용되고 있다(Ozkeresteci *et al.*, 2003; Chen *et al.*, 2009). 또한 미기후 모델은 특정한 지역 및 지점에서 보다 정확한 기상 및 기후 자료를 획득할 수 있는 현장 측정 방법의 한계점인 미측정 지역 및 지점의 자료를 예측하는데 활용할 수 있다는 장점도 있다(Sun *et al.*, 2005).

선행연구에서는 미기후 모델을 이용해 다양한 연구가 이루어지고 있는데, 국외연구의 경우는 Chow and Brazel(2012)와 Ng *et al.*(2012), Yu and Hien(2006), Chow *et*

al.(2011), Krüger *et al.*(2011), Oliveira *et al.*(2011), Middel *et al.*(2014), Taleghani *et al.*(2014) 등이 미기후 모델인 ENVI-met 과 Rayman, CFD(Computational fluid dynamics) 등을 활용하여 현장측정을 통해 모델의 정확성을 검증한 후, 건물의 배치형태 변경, 추가적인 녹지공간 조성 등을 통한 미기후 변화 및 개선효과를 분석하였다. 또한 Yang *et al.*(2013)와 Samaali *et al.*(2007)은 미기후 모델의 지표면에서의 열적 특성에 대한 정확성을 더욱 세부적으로 파악하기 위해 표면온도와 복사에너지 흐름 등을 현장측정과 동시에 진행하여 비교하였다. Park *et al.*(2014)은 도시지역의 열쾌적성을 분석하는데 미기후 모델을 이용하기도 하였다.

국내연구에서는 Lee *et al.*(2010)이 고려대학교 캠퍼스를 대상으로 Rayman 모델을 이용하여 공간 구조별 열쾌적성 평가와 열환경 개선방안에 대해 연구하였다. Lim *et al.*(2013)은 대구시의 소규모 공원을 대상으로 ENVI-met 모델을 이용하여 미기후 특성 분석과 열환경 개선을 위한 도시공원의 개선방안을 제시하였다. Kim *et al.*(2009)과 Jung *et al.*(2006), Song(2012), Seo *et al.*(2011)은 ENVI-met 모델을 이용하여 도시개발에 의한 바람장의 변화패턴을 예측하였다. Kim *et al.*(2010)은 대구시를 대상으로 도시공원에서의 온도, 습도, 바람의 변화패턴을 분석하였으며, Park *et al.*(2011)은 수공간 조성에 의한 열섬현상의 저감 효과를 ENVI-met 모델을 이용하여 분석하였다. 이와 같이 많은 선행연구에서 미기후 모델을 이용하여 특정 공간에서의 복사에너지와 기온, 바람 등 다양한 미기후적 요소의 변화를 예측·분석하여 도시 및 환경계획에 적용하고자 하였다.

하지만 미기후 모델은 입력데이터 구축시에 복잡한 도시공간을 현실세계와 동일하게 표현하는데 한계가 있기 때문에 모델링 결과가 정확성을 지니는지에 대한 검증이 필요하다. 국외 연구에서는 대부분 현장에서 실측 자료를 획득하여 모델링 결과와 비교·검증한 후, 그 결과

를 고려하여 결과값을 해석하는데 반해, 국내의 연구에서는 미기후 모델의 현장 측정값과의 비교를 통한 정확성 검토가 충분히 이루어지지 않고 있다. 특히 국내의 도시들은 매우 고밀도 이면서 복잡하고 다양한 형태를 가지기 때문에, 미기후 모델의 적용 및 결과값의 해석에서 현장 측정자료의 차이를 검토할 필요가 있다.

따라서 본 연구는 우리나라 최초의 계획도시로서 토지이용 유형별 미기후 모델의 적용과 현장 측정자료의 비교가 가능한 경상남도 창원시 성산구 및 의창구 도심지역 대상으로 국내·외적으로 미기후 분석에서의 활용도가 높은 ENVI-met 모델링에 의한 기상요소 분석결과와 현장측정값을 상호 비교·분석하여 모델링 결과의 정확도를 검증하였다.

연구 방법

1. 연구 대상지 선정 및 공간 DB 구축

연구대상지는 창원시 성산구 및 의창구 도심지역(35° 14' 01.02" N, 128° 41' 19.95" E)의 토지이용유형을 고려하여 그림 1과 같이 도시공원지역, 저층아파트지역, 상업지역, 단독주택지역, 고층아파트지역으로 구분·선정하였다. 연구대상지는 주변이 산지로 둘러싸여 있는 분지형태의 공간특성을 가지며(Song and Park, 2012; Song and Park, 2014), 우리나라 최초의 계획도시로 토지이용구획이 명확하게 구분되어 있다. 또한 주거와 상업시설, 공공시설이 밀집되어 분포하고 인접하여 대규모의 국가산업단지가 위치해 있다(Lee *et al.*, 2010).

토지이용 유형별로 선정된 조사구역들의 공간적 특성은 그림 2와 같이 Song(2014)의 연구에서 구축된 피복재질분류도로 분석하였다. 이 자료는 창원시 환경지도 1:1,000 축척의 토지피복도(Changwon, 2009)를 기반으로 10cm의 고해상도 항공사진 정사영상과 현장조사를 통해 구축하였으며, 토지피복재질의 색상 등을 고려하여 총 21개의 재질로 분류되었다. 피복

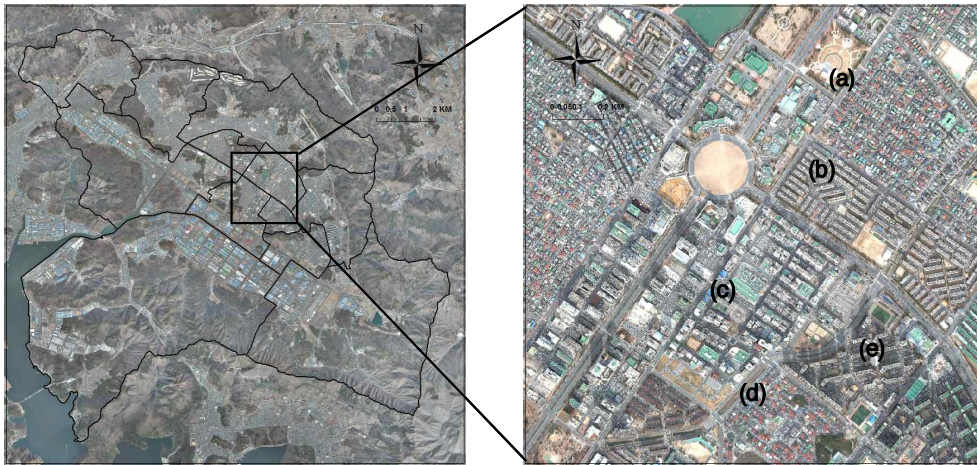


FIGURE 1. Study area (a: City park, b: Low-rise apartment, c: Commercial area, d: Single residential, e: High-rise apartment)

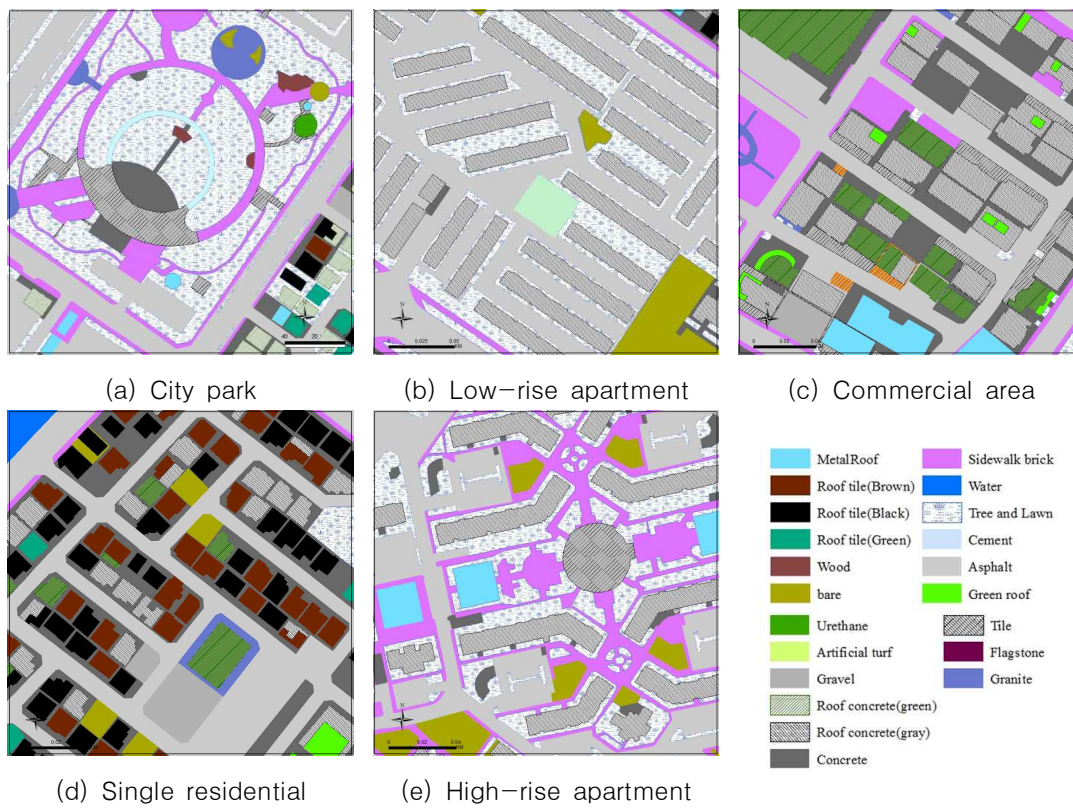


FIGURE 2. Land-cover classification map(Song, 2014)

재질분류도는 현장측정을 위한 지점의 선정과 ENVI-met 모델링의 입력데이터를 구축하는데 활용하였다.

토지이용유형별로 선정된 조사구역의 공간특성을 살펴보면, 먼저 도시공원지역은 대부분 수목과 잔디로 이루어져 있으며, 대리석과 조형 구조물 같은 인공구조물이 조성되어 있고, 주변 지역은 도로와 관공서, 단독주택이 위치해 있다. 저층아파트지역은 아스팔트 포장재질이 대부분 덮여 있고, 건물 사이 곳곳에 수목이 조성되어 있다. 건물의 높이는 5층으로 이루어져 있다. 상업지역은 30m 이상의 고층 건물이 10m 정도의 폭으로 매우 밀집되어 분포하고 있으며, 지표면은 대부분 아스팔트 재질로 포장되어 있다. 그리고 상업지역 내에는 시민들의 휴식공간인 소규모 분수 광장과 녹지 공원이 위치해 있

다. 단독주택지역은 건물이 대부분 2층 높이로 이루어져있고, 약 10가구 정도가 블록을 형성하고 있으며, 블록 간의 간격은 약 5m 정도이다. 지표면은 아스팔트로 포장되어 있고, 인근에 약 20m 높이의 상가 건물과 자갈 및 아스팔트 주차장이 위치해 있다. 고층아파트지역은 비교적 녹지가 풍부하게 조성되어 있으며, 약 50m 정도의 건물이 분포하고 있고, 타일로 덮여있는 광장도 위치하고 있다.

2. 현장측정 방법

현장측정은 연구대상지역의 피복재질과 건물의 밀집형태 등을 고려하여 27개의 측정지점(도시공원지역: 9개, 저층아파트지역: 6개, 상업지역: 3개, 단독주택지역: 4개, 고층아파트지역: 5개)을 선정한 후, 이동식으로 측정을 실시

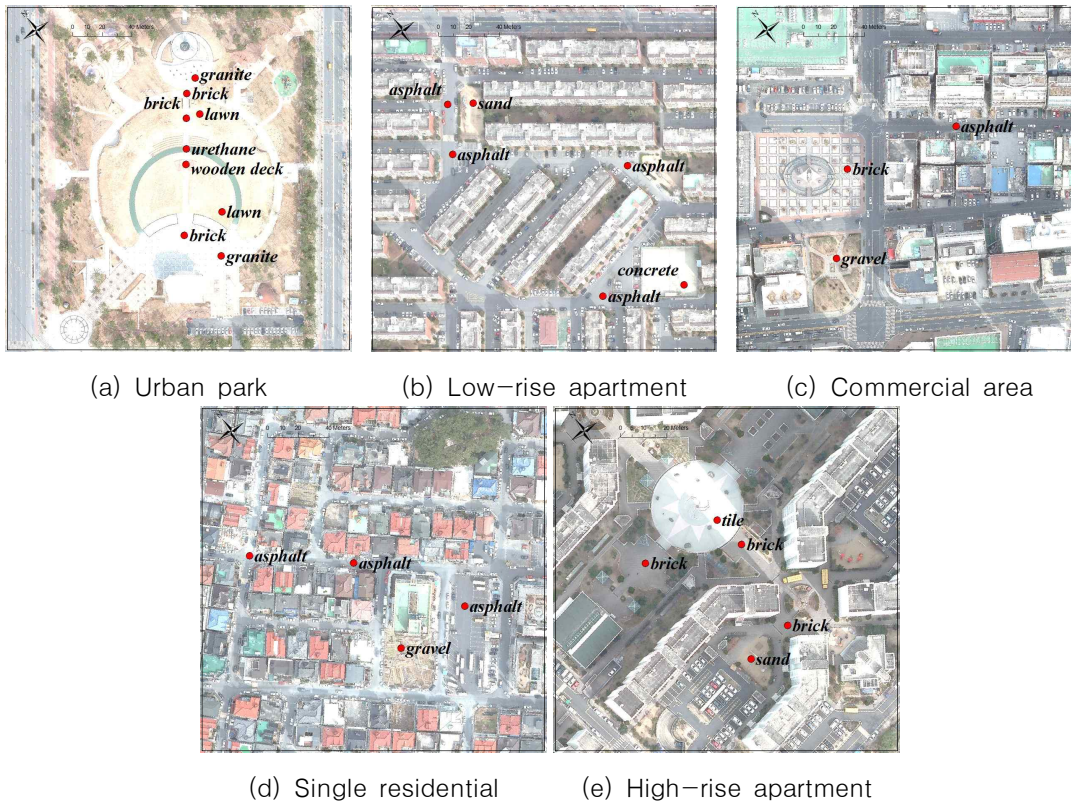


FIGURE 3. Measurement points of each site

하였다(그림 3). 측정일시는 2013년 여름철을 대상으로 구름이 거의 없는 맑은 날씨를 고려하여 측정을 실시하였으며, 주간시간대는 6월 29일과 8월 9일, 야간시간대는 8월 14일에 각각 측정되었다. 주간시간대의 측정시간은 13시에서 15시 30분이고, 야간시간대는 0시부터 02시 30분까지 약 2시간 30분까지로 하였다.

이동식 현장측정은 도시공원지역의 가장 북쪽에 위치한 화강암 재질을 시점으로 도시공원 지역 → 저층아파트지역 → 상업지역 → 단독주택지역 → 고층아파트지역 순서로 약 5km 구간을 측정하였고, 시점인 도시공원지역 화강암 재질을 마지막으로 다시 측정하여 식 (1), 식 (2)와 같이 경과 시간에 따른 측정값을 보정하였다.

$$\alpha = \left\{ \frac{X_f - X_s}{X_f} \right\} / (T_f - T_s) \quad (1)$$

$$Y = X - X \times (T - T_s) \times \alpha \quad (2)$$

여기서, α 는 보정계수, X_f 는 종점의 측정값, X_s 는 시점의 측정값, T_f 는 종점의 시간, T_s 는 시점의 시간, X 는 측정값, T 는 시간, Y 는 보정된 측정값이다.

측정항목은 미기후 형성에 중요한 영향을 미치는 요인을 고려하여 태양 및 지구복사에너지의 유입과 유출로 인해 지표면에 축적되는 순복사에너지와 기온, 풍속, 표면온도를 선정하였으며, 그림 4와 같은 이동식 측정장비로 제작 및 측정하였다. 순복사에너지는 CNR4 순복사 측정계(Kipp and Zonen 사)를 이용하였고, 기온과 풍속은 기상측정장치(Davis Vantage Pro2), 표면온도는 열적외 온도계(Testo 831)

를 각각 활용하였다. 측정장비의 높이는 순복사 측정계와 기상측정장치는 지표면에서 약 1.5m로 설정하였고, 열적외 온도계는 약 10cm 높이에서 측정하였다. 측정장비의 정확도는 표 1과 같다.

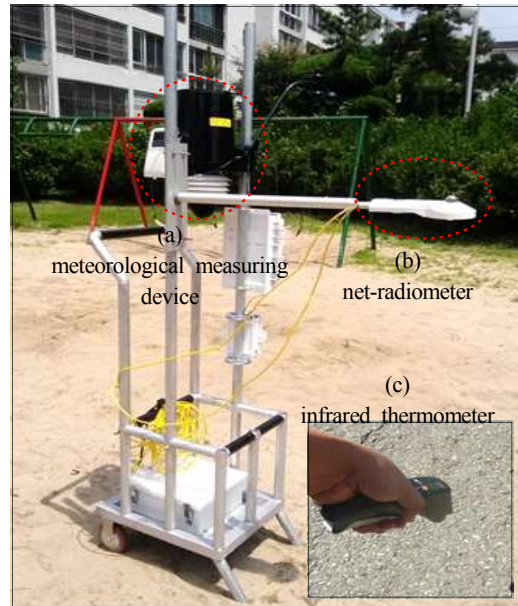


FIGURE 4. Mobile measurement equipment

3. ENVI-met 모델링

ENVI-met은 도시의 공간을 지표면, 구조물, 식생에 대한 정보를 격자형태로 입력하여 기류, 유체의 흐름, 온도, 습도, 복사에너지 등의 분포를 3차원으로 예측할 수 있는 미기후 분석 프로그램이다(Yu and Hien, 2006; Winston *et al.*, 2011). 공간적 해상도는 0.5~10m이고, 시간적 해상도는 10초이며, 24~48시간을 예측할 수 있다(Ng *et al.*, 2012; Bruse and Fler, 2004).

TABLE 1. Accuracy of measurement equipments

Equipment		Accuracy
CNR4 Net-radiometer	radiation	$\pm 100 \text{Wm}^{-2}$
	air temperature	$\pm 0.5^\circ \text{C}$
Davis Vantage Pro2	wind speed	$\pm 1 \text{m/s}$
	surface temperature	$\pm 0.5^\circ \text{C}$
Thermal infrared thermometers (Testo 831)		$\pm 0.5^\circ \text{C}$

TABLE 2. ENVI-met Configuration file setting

Category	29/06/2013	09/08/2013	14/08/2013
Simulation setting			
Start simulation at Day(dd.mm.yyyy)	29.06.2013	09.08.2013	13.08.2013
Start simulation at Time(hh.mm.ss)	06:00:00	06:00:00	06:00:00
Total simulation time in hour(hr)	24hr	24hr	24hr
Save model state(min)	10	10	10
Meteorological inputs			
Wind speed in 10m above ground(m/s)	1.0	0	0.9
Wind direction(°)	135	112.5	225
Initial temperature atmosphere(K)	293.4	301.2	300.1
Specific humidity in 2,500m(g/kg)	3.48	3.52	3.52
Relative humidity in 2m(%)	81.3	88.5	74.7

1998).

입력자료는 Area input file(*.in)과 Configuration file(*.cf)로 구성된다. Area input file은 대상지역의 지리적 위치와 건물의 배열 및 높이, 지표면 피복재질 유형, 식생 유형 등을 나타내는 것으로, 피복재질분류도와 항공 사진정사영상, 그리고 현장조사자료를 이용하여 작성하였다. 수평 및 수직 공간해상도는 각각 4m와 1m로 설정하였고, GRID 수는 도시공원 지역은 60×60×30개, 저층아파트지역은 52×52×30개, 상업지역은 50×50×30개, 단독주택지역은 34×34×30개, 고층아파트지역은 52×52×30개이다. 정확한 건물형태를 나타내기 위해 도시공원지역과 저층아파트지역, 상업지역, 단독주택지역은 35°로, 고층아파트지역은 78°로 방위각을 조정하였다. 그리고 현장측정 자료와 직접적인 비교를 위해 현장측정 지점과 동일한 위치에 Receptor를 설정하였다.

Configuration file은 모델링 초기의 기상상태와 모델링 시기 등을 입력하는 것으로, 초기 기온과 지상 10m에서의 풍속, 고도 2500m에서의 절대 습도와 같은 기상상태는 연구대상지 인근에 설치된 창원시 재난안전대책본부에서 관리하는 기상측정자료와 기상대 자료를 활용하였다. 모델링 기간설정은 현장측정과 동일하게 설정하였고, 모델링 시작 시간설정은 모델링 초기값의 영향을 최소화하기 위해 Ng *et al.* (2012)의 연구결과를 참조하여 주간시간대

는 6월 29일과 8월 9일 06시, 야간시간대는 8월 13일 06시로 설정하였다. 모델링 지속시간은 24시간, 저장시간은 10분 단위로 설정하였다(표 2).

Receptor에 분석된 ENVI-met 모델링 결과는 현장측정과 동일하게 1.5m 높이에서 순복사에너지와 기온, 풍속을 추출하였고, 표면온도는 지표면 레벨에서 획득하였다. 여기서 순복사에너지는 태양 및 지구복사에너지가 대기 중에서 직접적으로 유입되거나 건물이나 지표면에 의해 반사되어 유입 및 유출되는 복사에너지 흐름을 고려하여 산출하였다. ENVI-met 프로그램에서 기본적으로 제공하는 피복재질별 방사율과 반사율은 Song(2014)에 의해서 제시된 값을 적용하였다.

결과 및 고찰

1. 지점별 ENVI-met 모델링과 현장측정의

비교

1) 순복사에너지

순복사에너지의 현장측정과 ENVI-met 모델링의 결과값을 분석한 결과는 Figure 5(a)와 같다. 현장측정에 의한 순복사에너지량의 평균값은 6월 29일 490Wm⁻², 8월 9일 445Wm⁻², 8월 14일 -52.8Wm⁻²로 나타났다. 주간시간대는 아스팔트 포장도로면의 순복사에너지량이 많았고, 모래와 회색 콘크리트, 자갈,

TABLE 3. Comparison of mean radiation between measured and modeled

	Measured(Wm^{-2})				Modeled(Wm^{-2})			
	K↓	K↑	L↓	L↑	K↓	K↑	L↓	L↑
29/06/2013	795.5	158.2	370.8	517.9	1,054.6	54.2	340.6	506.9
09/08/2013	716.2	137.2	413.8	548.1	943.1	50.0	104.9	361.7
14/08/2013	-4.4	0.2	401.3	449.6	0	0	119.2	389.6

K↓: downward solar radiation, K↑: upward solar radiation, L↓: downward terrestrial radiation, L↑: upward terrestrial radiation

타일과 같은 밝은 색의 피복재질은 반사율이 높기 때문에 순복사에너지량이 적었다. 야간시간대는 피복재질별 순복사에너지량의 차이가 크지 않은 것으로 분석되었다. ENVI-met 모델링에 의한 순복사에너지량의 평균값은 6월 29일 평균 $834.1Wm^{-2}$, 8월 9일은 $678.2Wm^{-2}$, 8월 14일은 $-238.9Wm^{-2}$ 로 현장측정에 비해 높게 나타났다. 특히 주간시간대의 순복사에너지량은 현장측정보다 다소 많은 반면에, 야간시간대는 ENVI-met 모델링이 보다 적은 것으로 예측되었다.

현장측정과 모델링 간의 RMSE(Root Mean Square Error)를 분석한 결과, 6월 29일은 $383.1Wm^{-2}$, 8월 9일은 $365.2Wm^{-2}$, 8월 14일은 $213.8Wm^{-2}$ 로 큰 차이를 보였다. 이러한 이유를 알아보려고 현장측정 및 ENVI-met 모델링 간의 태양 및 지구복사에너지의 유입 및 유출량을 비교해 본 결과, 주간시간대의 경우에 ENVI-met 모델링에서 대기로부터 유입되는 태양복사에너지의 양이 실제 현장에서 측정된 양보다 6월 29일은 $259.1Wm^{-2}$ (현장측정: $795.5Wm^{-2}$, ENVI-met: $1,054.6Wm^{-2}$), 8월 9일은 $226.9Wm^{-2}$ (현장측정: $716.2Wm^{-2}$, ENVI-met: $943.1Wm^{-2}$)정도 과다하게 예측되었으며, 야간시간에는 대기로부터 유입되는 지구복사에너지의 양이 약 $300Wm^{-2}$ 정도 과소 예측되었기 때문에 현장측정과 ENVI-met 간의 순복사에너지량의 차이가 발생하는 것으로 나타났다(표 3). 선행연구인 Park(2011)의 연구에서도 주간시간 동안 캐나다 Nanaimo와 창원시 도시지역을 대상으로 ENVI-met 모델링을 현장측정과 비교하였으며, ENVI-met 모델링의 태양 복사에너지의 유입양이 현장에서

실측된 양보다 약 $200\sim300Wm^{-2}$ 정도 많은 것으로 분석되어 본 연구의 결과와 유사한 것으로 나타났다. 따라서 ENVI-met 모델링은 대기로부터 유입되는 태양 및 지구복사에너지의 양에서 실측값과 상당한 차이가 있기 때문에 이에 대한 선행적인 검토가 필요할 것으로 판단된다.

2) 기온

현장에서 측정된 기온의 평균값은 8월 9일이 $35.4^{\circ}C$ 로 가장 높았고, 6월 29일이 $29.6^{\circ}C$, 야간시간대인 8월 14일도 $28.7^{\circ}C$ 로 기온이 매우 높은 것으로 나타났다. 대상지역별로는 아스팔트와 콘크리트 같은 인공구조물이 밀집되어 있는 상업지역(6월 29일: $30.0^{\circ}C$, 8월 9일: $35.8^{\circ}C$, 8월 14일: $29.2^{\circ}C$)과 단독주택 지역(6월 29일: $29.9^{\circ}C$, 8월 9일: $35.8^{\circ}C$, 8월 14일: $28.9^{\circ}C$)에서 평균 기온이 가장 높은 것으로 나타났고, 다른 대상지역에 비해 녹지가 풍부하고 건물에 의해 그림자 지역이 많은 고층아파트지역(6월 29일: $29.4^{\circ}C$, 8월 9일: $34.7^{\circ}C$, 8월 14일: $28.4^{\circ}C$)은 기온이 다소 낮았다. ENVI-met 모델링에서는 6월 29일이 $26.2^{\circ}C$, 8월 9일은 $30.3^{\circ}C$, 8월 14일은 $22.4^{\circ}C$ 로 현장에서 측정된 기온보다 다소 낮았다. 대상지역별로는 현장측정 결과와 마찬가지로 상업지역(6월 29일: $27.5^{\circ}C$, 8월 9일: $30.5^{\circ}C$, 8월 14일: $25.6^{\circ}C$)과 단독주택지역(6월 29일: $26.3^{\circ}C$, 8월 9일: $30.7^{\circ}C$, 8월 14일: $24.1^{\circ}C$)의 기온이 높은 것으로 나타났다(그림 5(b)).

RMSE는 6월 29일 $3.4^{\circ}C$, 8월 9일 $4.6^{\circ}C$, 8월 14일 $6.5^{\circ}C$ 로 분석되었다. 기존

의 선행연구와 비교해 보면, Middel *et al.*(2014)의 연구에서는 현장측정과 ENVI-met 모델링 사이의 RMSE가 1.4~2.0° C의 차이를 보였고, Yang *et al.*(2013)은 1.01° C, Chow *et al.*(2011)은 1.53° C를 나타냈다. 그리고 Park(2011)은 현장측정과 ENVI-met 모델링 간의 평균 차이를 비교하였는데, 약 7~11° C의 차이를 보이는 것으로 나타났다. 하지만 Park(2011)의 연구를 제외한 나머지 선행연구에서는 하루를 기준으로 시간의 변화에 따른 모델링과 현장측정 간의 평균적인 차이를 비교하였기 때문에 큰 차이가 없었으나, 본 연구와 같은 시간대인 14시를 기준으로 비교하였을 때에는 모델링과 현장측정 간의 기온 차이가 약 3° C 이상으로 나타나 본 연구와 유사한 결과를 보였다.

이와 같이 ENVI-met 모델링에서 분석된 기온이 현장에서 측정된 자료와 차이가 발생하는 이유는 모델링 분석에서 건물 벽면과 지표면의 잘못된 예측실제 공간에서의 기온은 바람에 의해 대상지역 외부에서 유입되는 기온의 영향을 받거나 계절적인 영향이 크게 작용하였기 때문으로 판단되며, 본 연구의 기온 측정결과에서도 주간시간의 경우 풍속이 강하여 주변지역의 영향이 컸으며, 야간시간은 열대야 현상과 같은 이상기후 현상이 나타난 것으로 측정되었다. 하지만 ENVI-met 모델에서는 초기 기상상태를 입력한 후 비교적 짧은 기간과 좁은 공간에 대해 기후 현상을 예측하기 때문에 앞서 실제 공간에서 기온에 영향을 미칠 수 있는 요인들을 반영하지 못하기 때문에 실측 자료와 차이가 발생하는 것으로 생각된다.

3) 표면온도

조사구역의 피복재질별 표면온도를 현장 측정한 결과, 주간시간대는 목재데크가 6월 29일 67.3° C, 8월 9일 66.6° C로 가장 높았고, 다음으로 우레탄이 6월 29일 59.7° C, 8월 9일 59.8° C로 나타났다. 대체로 콘크리트와 아스팔트 같은 인공 피복재질은 55° C 이상으로 높았고, 잔디와 모래는 45° C 이하로 인공 피복

재질에 비해 낮게 나타났다. 야간시간대는 주간 시간대에 가장 높았던 목재데크가 24.7° C로 가장 낮은 것으로 측정되었다(그림 5(c)). 이는 목재데크의 열용량이 비교적 낮기 때문에 주간 시간대에 축적된 열에너지가 야간에 빠르게 방출되어 표면온도가 낮아지는 것으로 판단된다. 피복재질별 표면온도의 차이는 25~33° C로 주간시간대에 비해 크지 않았다.

ENVI-met 모델링에서 주간시간대는 아스팔트와 콘크리트 재질이 약 50° C 이상으로 가장 높았고, 잔디와 모래는 35° C로 비교적 낮게 나타났다. 현장측정에서 가장 높았던 목재데크(6월 29일: 45.1° C, 8월 9일: 36.7° C)와 우레탄(6월 29일: 45.1° C, 8월 9일: 36.6° C)은 ENVI-met 모델링 결과와 큰 차이를 보였다. 야간시간대에는 상업지역과 단독주택에 위치한 아스팔트(24.2~26.6° C)와 보도블록(27.7° C)에서 표면온도가 가장 높았고, 도시공원의 잔디(20.1~20.2° C)와 모래(20.5° C)에서 상대적으로 낮았다.

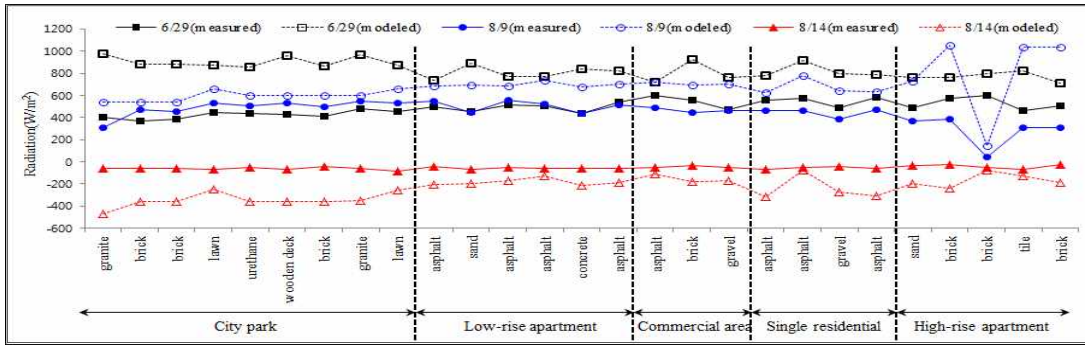
RMSE는 6월 29일이 8.4° C, 8월 9일 13.2° C, 8월 14일 7.0° C로 현장에서 측정된 표면온도가 다소 높은 것으로 나타났다. 선행연구인 Chow *et al.*(2011)과 Middel *et al.*(2014)에서는 RMSE가 각각 0.63° C과 3.17° C로 분석되었다. 또한 Yang *et al.*(2013)의 연구에서는 토지피복재질별로 ENVI-met 모델링과 현장측정 간의 차이를 시간대별로 비교하였는데, 오전(06~11시)과 늦은 저녁(22~06시)은 모델링값이 높았지만, 낮과 이른 저녁(11~22시)까지는 현장측정값이 높게 나타났다. 이는 피복재질면의 단면과 깊이, 그리고 비열 등과 같은 요소들을 실제와 정확하게 설정하는데 한계가 있기 때문에 나타난 결과라 판단된다.

4) 풍속

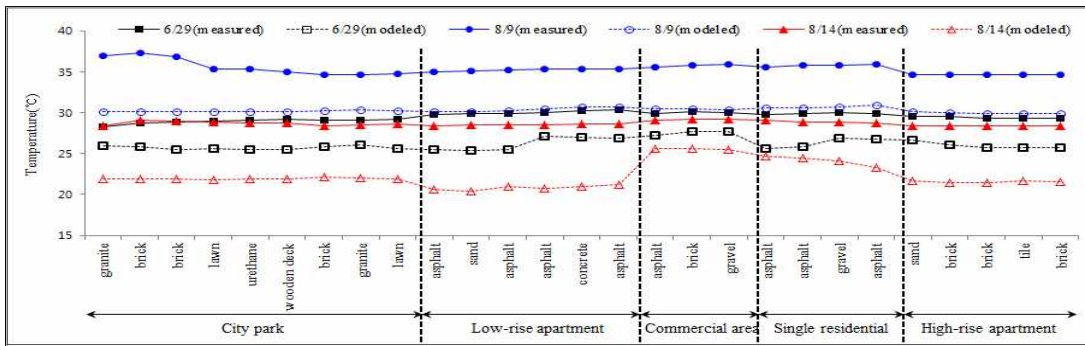
현장에서 측정된 풍속은 6월 29일 평균 0.9m/s, 8월 9일 1.3m/s이었으며, 8월 14일은 바람이 전혀 불지 않았다. 다른 조사구역에 비해 주변의 건물이 거의 없는 도시공원지역(6월

29일: 1.3m/s, 8월 9일: 2.2m/s)은 바람이 강하게 부는 것으로 나타났으며, 고층 건물이 밀집된 고층아파트지역(6월 29일: 0.3m/s, 8월 9일: 0.6m/s)과 상업지역(6월 29일: 0.9m/s, 8월 9일: 0.4m/s)에서 바람이 약한 것으로 측

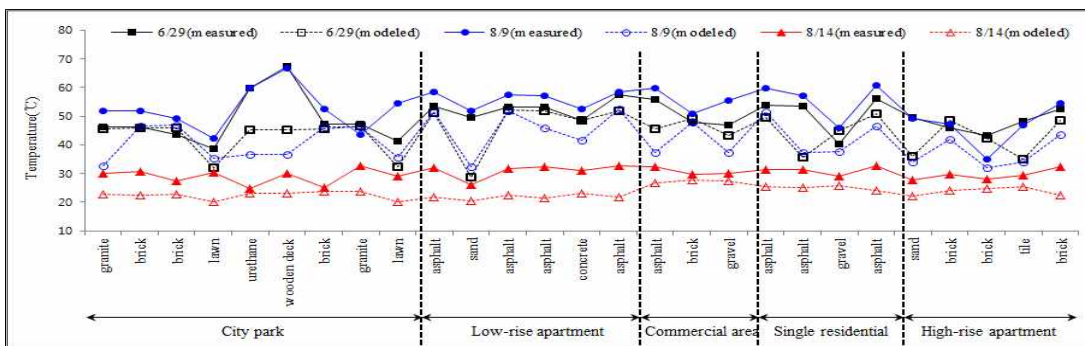
정되었다(그림 5(d)). 하지만 지표면 부근에서의 풍속은 외부 공간에서 불어오는 바람과 건물, 수목 등에 대한 영향이 크게 작용하기 때문에 조사구역별로 풍속을 직접적으로 비교하는 것은 한계가 있으리라 판단된다.



(a) Net radiation

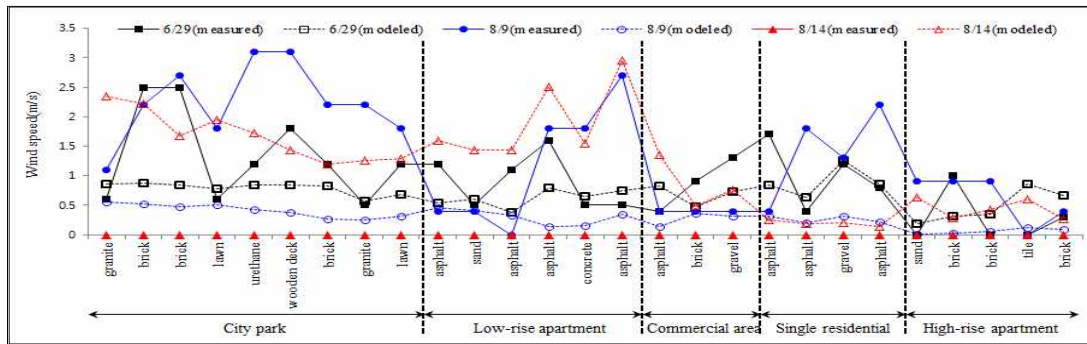


(b) Air temperature



(c) Surface temperature

FIGURE 5. Comparison between in-situ measurement and ENVI-met modeling by each measurement points



(d) Wind speed

FIGURE 5. Continued

ENVI-met 모델링 분석 결과, 6월 29일은 0.7m/s, 8월 9일은 0.3m/s, 현장측정에서 바람이 불지 않았던 8월 14일에는 평균 1.2m/s의 바람이 부는 것으로 예측되었다. 조사구역별로 주간시간대는 도시공원지역(6월 29일: 0.8m/s, 8월 9일: 0.4m/s)과 단독주택지역(6월 29일: 1.7m/s, 8월 9일: 1.9m/s)에서 바람이 비교적 강하게 불었으며, 현장측정과 동일하게 고층아파트지역(6월 29일: 0.5m/s, 8월 9일: 0.1m/s, 8월 14일: 0.4m/s)에서 풍속이 가장 약하게 나타났다. RMSE는 6월 29일 0.7m/s, 8월 9일 1.4m/s, 8월 14일 1.6m/s로 현장측정과 ENVI-met 모델링 간의 차이가 큰 것으로 나타났다. 이는 풍속을 비롯한 바람은 도시외곽에서 불어오는 국지풍 및 지역풍에 대한 영향이 크게 작용하지만, ENVI-met 모델링은 이를 반영하는데 한계가 있기 때문에 나타나는 결과라 판단된다.

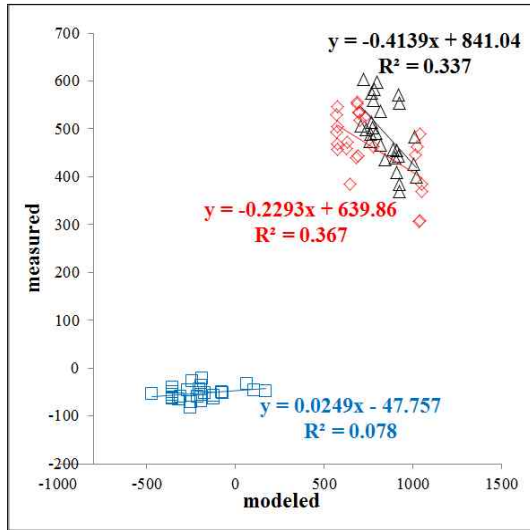
2. ENVI-met 모델링과 현장측정의 선형회귀 분석

그림 6은 ENVI-met 모델과 현장측정 간의 산점도 분포를 나타낸 것이다. 순복사에너지는 그림자의 영향이 있는 측정지점(8월 9일 고층아파트지역 지점)을 제외하고 분석하였으며, 주간시간대는 선형회귀의 결정계수(R^2)가 6월 29일은 0.337, 8월 9일은 0.367로 나타났고, 야

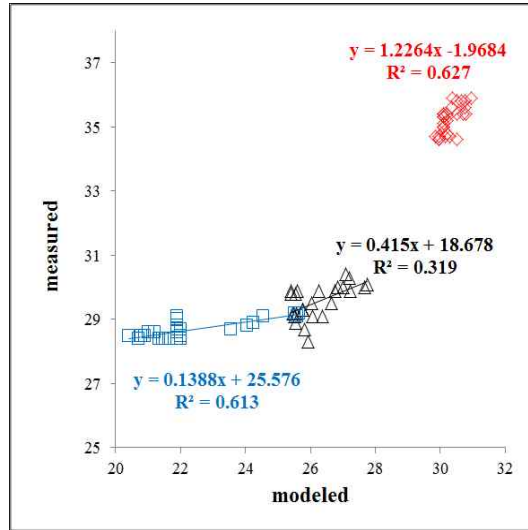
간시간대는 주간시간대보다 낮은 0.078로 분석되었다. 선형회귀식의 기울기는 주간시간대는 모두 음(-)으로 분석되어(6월 29일: -0.4139, 8월 9일: -0.2293) 모델링의 값이 커질수록 현장측정 값이 적어지는 것으로 나타났다(그림 6(a)). 이는 현장측정의 경우 건물 벽면의 다양한 피복재질과 인접하여 식재된 수목 등에서 방출되는 복사에너지의 영향이 반영되어 측정되었지만, ENVI-met 모델링에서는 실제 공간에 비해 비교적 단순한 건물 벽면 재질과 식재수목 정보로 표현되기 때문이라 판단된다.

기온 측정항목은 도시공원지역에서 풍속이 강하여 주변 지역의 영향이 많은 것으로 분석된 8월 9일 측정지점을 제외하고 ENVI-met 모델링과 현장측정 간의 정확도를 분석하였다. R^2 는 8월 9일(0.627)과 8월 14일(0.613)이 높았고, 6월 29일은 0.319로 낮게 나타났다(그림 6(b)). 이와 유사한 선행 연구인 Ng *et al.*(2012)와 Yang *et al.*(2013)에서는 R^2 가 각각 0.6~0.7와 0.94로 분석되어 본 연구의 결과가 다소 낮았다. 하지만 선행연구는 동일한 측정 지점에서 일변화에 따른 모델링과 현장측정 자료를 서로 비교한 반면에, 본 연구는 토지이용유형별 다양한 공간특성을 고려하였다면 점에서 기온의 모델링 정확도는 낮지 않은 것으로 판단된다.

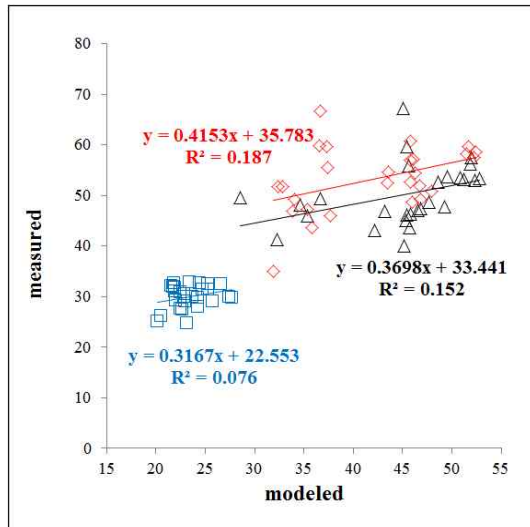
표면온도의 분석결과와 그림 6(c)와 같이,



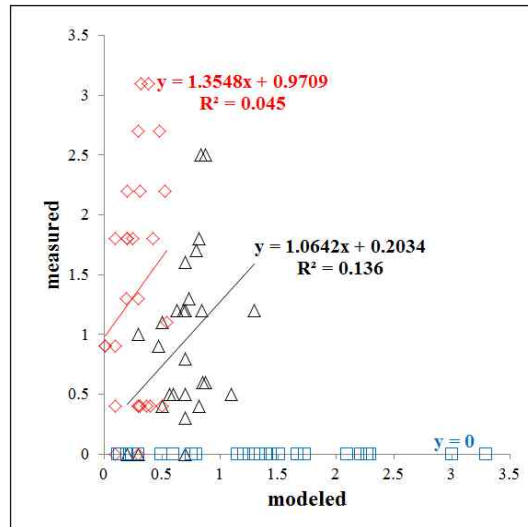
(a) Net radiation



(b) Air temperature



(c) Surface temperature



(d) Wind speed

FIGURE 6. Scatter plots between ENVI-met model and In-situ measurement(Δ : June 29th, \diamond : August 9th, \square : August 14th)

모델링과 현장측정값의 R^2 는 6월 29일이 0.152, 8월 9일은 0.187, 8월 14일은 0.076로 각각 분석되어 모델링과 현장측정 간의 상관성이 매우 낮은 것으로 나타났다. 이러한 결과는 피복재질별 내부 단면과 두께, 비열과 같

은 특성을 ENVI-met 프로그램의 기본값을 실제의 조건에 맞도록 변경하여 모델링을 실시할 필요가 있을 것으로 판단된다. 또한 표면온도는 건물이나 수목 등에 의해 형성되는 그림자의 영향을 크게 받기 때문에 건물의 형태와 수목

의 유형을 실제 공간과 최대한 유사하게 표현할 필요가 있을 것으로 생각된다.

풍속은 주변지역의 국지풍 및 지역풍에 대한 영향이 크게 작용하기 때문에 R^2 가 6월 29일은 0.136, 8월 9일은 0.045로 토지이용유형별 공간특성에 따라 모델링과 현장측정 간의 정확도가 매우 낮은 것으로 나타났다.

이상과 같이 ENVI-met 모델링에 의해 예측된 순복사에너지와 기온, 표면온도, 풍속을 현장측정값과 비교한 결과, 기온은 모델링 구역의 공간적 특성에 따라 현장측정값과의 상관성이 비교적 높은 것으로 나타났으나 다른 측정항목에서는 낮은 것으로 분석되었다. 따라서 기온은 ENVI-met 모델링과 현장측정 자료와 큰 차이를 보였지만 보정 모형을 통해 활용이 가능할 것으로 판단된다. 하지만 순복사에너지와 표면온도, 풍속 등은 모델링 구역의 공간특성을 실제와 최대한 유사하게 반영된 입력데이터를 구축하거나, 모델링 주변 지역에 대한 영향을 충분히 고려할 필요가 있을 것으로 판단된다.

결론

본 연구는 다양한 토지이용 및 공간적 특성을 가지는 경상남도 창원시 도심지역을 대상으로 국내·외적의 도시기후 관련 연구에 많이 활용되고 있는 ENVI-met 모델링 결과를 현장측정자료 기반으로 순복사에너지, 기온, 표면온도, 풍속에 대해서 비교·검증하였다.

분석결과를 요약하면 다음과 같다. 먼저 순복사에너지는 주간시간대의 경우 모델링이 현장측정보다 약 300Wm^{-2} 이상 높은 것으로 나타났는데, 주된 원인은 현장측정에 비해 태양복사에너지의 유입량이 과다하게 예측되었기 때문이다. 반면, 야간시간대는 지구복사에너지의 유입량이 현장측정에 비해 모델링이 적게 예측되어 약 200Wm^{-2} 정도 낮았다. 전체적으로 순복사에너지의 모델링과 현장측정 자료의 선형회귀분석에 의한 설명력도 매우 낮게 나타났다. 기온은 주간 및 야간시간대 모두 현장측정이 모델링보다 높았고, 조사구역 주변 지역에 의한

영향이 반영된 것으로 판단되며, 회귀분석결과 6월 29일을 제외하고 8월 9일과 8월 14일에서 모두 R^2 가 0.6 이상으로 높게 나타났다. 표면온도의 경우도 현장측정이 모델링보다 높았으며, 이는 각종 구조물들의 피복재질 등의 특성 차이가 충분히 반영되지 못한 결과라 판단되며, 풍속도 모델링 구역의 주변 지역에서 형성되는 국지풍과 지역풍의 영향으로 모델링에 의한 예측값이 현장측정값과 큰 차이를 보였다. 전체적으로 표면온도와 풍속의 모델링과 현장측정 간의 회귀분석에 의한 설명력도 매우 낮게 나타났다.

이상과 같이 ENVI-met 모델링에 의한 미기후 요소들의 예측결과를 현장측정자료 기반으로 검증한 결과, 기온을 제외하고 순복사에너지와 표면온도, 풍속은 많은 차이가 있는 것으로 나타났으며, 이는 모델링 구역을 둘러싸고 있는 주변 지역의 지형·지물, 토지이용 등에 의한 영향 정도와 모델링 구역 내의 입력자료 생성의 정밀도 등이 충분히 고려되지 못한 점이 주된 원인이라 판단된다.

따라서 모델링의 정확성을 더욱 높이기 위해서는 분석하고자 하는 대상지역의 장기적인 기후 특성을 파악하거나, 국지적 규모 또는 중규모 기후모델을 통해 모델링 구역의 주변 지역에서 미치는 영향을 고려한 후 ENVI-met과 같은 미기후 모델링을 적용할 필요가 있을 것으로 판단된다. 또한 모델링 입력자료로 활용되는 토지피복재질의 유형과 그 특성들은 비교적 단순하게 설정되어 있기 때문에 복잡한 공간특성으로 구성된 도시지역에 적용하기 위해서는 대상지역의 피복재질과 수목 유형 등을 보다 상세하게 입력할 필요가 있다. 이상과 같이, 도시 미기후 모델링의 문제점이 보완된다면 보다 신뢰성이 확보된 미기후 현상 파악이 가능할 것으로 판단되며, 도시 및 환경계획 차원에서 도시 미기후 개선을 위한 방안을 마련하는데 있어 더욱 객관적인 분석도구로 활용 가능할 것으로 사료된다.

감사의 글

이 논문은 2013년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No 2013-0095-0000).

KAGIS

REFERENCES

- Bruse, M. and H. Fleer. 1998. Simulating surface-plant-air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model. *Environment Modeling & Software* 13:373-384.
- Changwon-si. 2009. The construction of Changwon-si environmental atlas and GIS DB(1st). Changwon-si Research Report, Changwon, South Korea (창원시. 2009. 창원시 환경지도 제작 및 GIS 구축 연구보고서(1차년도)).
- Chen, H., R. Ooka, H. Huang and T. Tsuchiya. 2009. Study on mitigation measures for outdoor thermal environment on present urban blocks in Tokyo using coupled simulation. *Building and Environment* 44:2290-2299.
- 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.
- Chow, W.T.L., R.L. Pope, C.A. Martin and A.J. Brazel. 2011. Observing and modeling the nocturnal park cool island of an arid city: horizontal and vertical impacts. *Theoretical and Applied Climatology* 103:197-211.
- Jung, W.S., J.K. Park and H.W. Lee. 2006. An analysis on influence of geographical variation induced by development affecting to the local scale wind environment-numerical simulation using the Envi-met model-. *Journal of Korean Society for Amospheric Environment* 22(6):888-903 (정우식, 박종길, 이화운. 2006. 개발에 따른 지형변화가 국지 바람장에 미치는 영향 분석-Envi-met 모형을 이용한 수치모의-. *한국환경과학회지* 22(6): 888-903).
- Kim, D.W., J.K. Kim and E.H. Jung. 2010. An analysis of micro-climate environmental changes followed by establishment of an urban park -focused on the Junggu in Daegu city-. *Journal of Urban Design Institute of Korea* 11(2):77-94 (김대욱, 김중권, 정우호. 2010. 도시공원 조성에 따른 미기후환경의 변화 분석. *한국도시설계학회지* 11(2): 77-94).
- Kim, M.K., H.W. Lee, W.G. Dou and W.S. Jung. 2009. An analysis of wind field around the air quality monitoring station in the urban area by using the Envi-met model. *Journal of the Environmental Sciences* 18(9):941-952 (김민경, 이화운, 도우곤, 정우식. 2009. Envi-met 모형을 이용한 도심지역 대기오염측정망 주변의 바람장 분석. *한국환경과학회지* 18(9):941-952).
- Korea Center for Disease Control and Prevention. 2013. Annual report on the notified patients with heat related illness in Korea. *Public Health Weekly Report* (질병관리본부. 2013. 폭염으로 인한 온열질환 신고현황 연보. 주간 건강과 질병 보고서).
- 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: 621-634.
- Lee, J.A., D.Y. Jung, J.H. Chon, S.M. Lee and Y.B. Song. 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 (이정아, 정대영, 전진형, 이상문, 송영배. 2010. 공간구조별 열쾌적성 평가와 열환경 개선방안. *한국조경학회지* 38(5):12-20).
- Lee, W.S., S.G. Jung, K.H. Park and K.T. Kim. 2010. Analysis of urban thermal environment for environment-friendly spatial plan. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* 13(1):142-154 (이우성, 정성관, 박경훈, 김경태. 2010. 친환경적 공간계획을 위한 도시의 열환경 분석. *한국지리정보학회지* 13(1):142-154).
- Lim, E.N., W.S. Lee, C.H. Choi, B.G. Song and S.G. Jung. 2013. An evaluation of thermal comfort on urban neighborhood park for improving thermal environment. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* 16(4): 159-170 (임은나, 이우성, 최철현, 송봉근, 정성관. 2013. 도시근린공원의 열환경 개선을 위한 열쾌적성 평가. *한국지리정보학회지* 16(4):159-170).
- 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.
- 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.
- Oke, T.R. 1987. *Boundary Layer Climates(2nd)*. London. Methuen. pp.1-10.
- Oliveira, S., H. Andrade and T. Vaz. 2011. The cooling effect of green spaces as a contribution to the mitigation of urban heat: a case study in Lisbon. *Building and Environment* 46(11):2186-2194.
- Ozkeresteci, I. K. Crewe, A.J. Brazel and M. Bruse. 2003. Use and evaluation of the Envi-met model for environment design and planning : an experiment on linear parks. *Proceedings of the 21th International Cartographic Conference*. pp.402-408.
- Park, K.Y., S.W. Lee, Y.J. Shim and H.Y. Hwang. 2011. Analysis of the mitigation effects of urban heat island through creation of water space. *Journal of The Korea Institute of Ecological Architecture and Environment* 11(5):13-18 (박기용, 이선우, 심용주, 황희연. 2011. 수공간 조성을 통한 도시의 열섬현상 저감효과 분석. *한국생태환경건축학회논문집* 11(5):13-18).
- Park, S.K. 2011. *Human-urban radiation exchange simulation model*, Ph.D. Thesis, University of Victoria, B.C. Canada.
- Park, S.K., S.E. Tuller and M. Jo. 2014. Application of universal thermal climate index (UTCI) for microclimate analysis in urban thermal environments. *Landscape and Urban Planning* 125:146

- 155.
- Ratti, C., D. Raydan and K. Steemers. 2003. Building form and environmental performance: archetypes, analysis and an arid climate. *Energy and Buildings* 35:49-59.
- Samaali, M., D. Courault, M. Bruse, A. Oliosio and R. Occelli. 2007. Analysis of a 3D boundary layer model at local scale: validation on soybean surface radiation measurements. *Atmospheric Research* 85:183-198.
- Seo, H.S., Y.G. Kim and G.S. Young. 2011. Study on the change of wind field and temperature according to location of high-rise building using micrometeorology numerical model. *Journal of Korean Society of Environmental Engineers* 33(5):340-352 (서홍석, 김유근, 양고수. 2011. 미기상 수치 모델을 이용한 고층아파트 입지에 따른 바람장 및 기온 변화 연구. *대한환경공학회지* 33(5):340-352).
- Song, B.G. 2014. Development of environmental planning methodology for mitigation of climate change and heat island effect in urban area. Ph.D. Thesis, Univ. of Changwon, Changwon, Korea (송봉근. 2014. 도시지역의 기후변화 및 열섬효과 완화를 위한 환경계획 기법의 개발. 창원대학교 대학원 박사학위논문).
- Song, B.G. and K.H. Park. 2012. Analysis of heat island characteristics considering urban space at nighttime. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* 16(2): 16-29 (송봉근, 박경훈. 2012. 야간시간대 도시공간을 고려한 열섬특성 분석, *한국지리정보학회지* 16(2):16-29).
- Song, B.G. and K.H. Park. 2014. Validation of ASTER surface temperature data with in situ measurements to evaluate heat islands in complex urban areas. *Advances in Meteorology*. <http://dx.doi.org/10.1155/2014/620410>.
- Song, D.W. 2012. An analysis of local wind field by location of industrial complex using CALMET and Envi-met. *Journal of Environmental Impact Assessment* 21(3):417-429 (송동웅. 2012. CALMET 및 ENVI-MET를 이용한 산업단지 입지에 따른 국지 바람장 분석. *환경영향평가학회지* 21(3):417-429).
- Sun, Y.J., J.F. Wang, R.H. Zhang, R.R. Gillies, Y. Xue and Y.C. Bo. 2005. Air temperature retrieval from remote sensing data based on thermodynamics. *Theoretical and Applied Climatology* 80:37-48.
- Taleghani, M., M. Tenpierik, A. Dobbelsteen and D.J. Sailor. 2014. Heat in courtyards: a validated and calibrated parametric study of heat mitigation strategies for urban courtyards in the Netherlands. *Solar Energy* 103:108-124.
- Winston, T.L.C., L.P., Ronal, A.M. Chris and J.B. Anthony. 2011. Observing and modeling the nocturnal park cool island of an arid city: horizontal and vertical impacts. *Theoretical and Applied Climatology* 103:197-211.
- 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.

Yao, R., Q. Luo and B. Li. 2011. A simplified mathematical model for urban microclimate simulation. *Building and Environment* 46:253–265.

Yu, C. and W.N. Hien. 2006. Thermal benefits of city parks. *Energy and Buildings* 38:105–120. [KAGIS](#)