

도시지표특성 모수 적용을 통한 태양복사모델 개선 효과 분석

양호진* · 권혁기* · 이채연**†

*한국외국어대학교 대기환경연구소 센터 선임연구원, **한국외국어대학교 대기환경연구소 센터 책임연구원

Analysis of Improvement of the Solar Radiation Model Using Urban Surface Characteristics Parameters

Yang, Hojin* · Kwon, Hyuk-Gi* · Yi, Chaeyeon**†

*Researcher, Research Center for Atmospheric Environment, HUFS, Yongin, Korea

**Principle Researcher, Research Center for Atmospheric Environment, HUFS, Yongin, Korea

ABSTRACT

Sudden change in an urban thermal environment has an intimate effect on resident's daily life, prompting increased interest in and demand for improvement of urban thermal environments. In order to improve the urban thermal environment, heat vulnerability information that reflects the actual physical environment is needed in a format that can be controlled as spatial information. In addition, a quantitative method is needed to analyze heat stress, as experienced by urban residents. In this study, solar radiation flux simulation results for Seoul metropolitan's main residential and commerce area are analyzed, and the accuracy of these results is enhanced by improving the urban simulation index. The SOLWEIG model is used in this study as it can simulate high-resolution solar radiation flux and mean radiant temperature using data such as the sky view factor, reflecting shapes of buildings and vegetation, shadow pattern, temperature, humidity, and solar radiation. In order to reflect domestic condition and geographical characteristics, a correlation equation of solar altitude angle and the difference in surface temperature and atmospheric temperature by land cover is derived. Based on this, a comparative analysis is performed on the simulation result using the SOLWEIG model and solar radiation observation data.

Key words: Heat Wave, Mean Radiant Temperature, SOLWEIG, Solar Radiation Flux, Urban Heat Island

1. 서론

도시지역의 대부분은 주택, 도로, 위락시설 등 도시기반시설이 존재하는 시가지 건조지역으로 구성되어 있다. 특히, 시가지 건조지역의 주요 특징인 인공피복의 면적은 지속적으로 증가하고 있는 추세이며, 우리나라는 1980년대에 국토면적의 2.1%를 차지했으나, 2000년대에 이르러 국토면적의 4.1%로 약 95%가 증가되었다(An et al., 2016). 시가지 건조지역을 주로 구성하는 아스팔트, 콘크리트 등의 인공피복물들은 자연식생피복과는 상이한 열

적 특성(반사도, 방출율, 열용량)을 가지고 있기 때문에 이들 지역에서는 주변 교외지역보다 상대적으로 높은 기온 분포가 나타난다(Oke, 1981; Kolokotroni and Giridharan, 2008; Lee et al., 2010; Song et al., 2014).

자연피복으로 주로 이루어진 교외지역에서는 지표면으로 입사된 태양복사에너지가 지표에 의해 반사되거나, 장파복사, 현열, 잠열 에너지 형태로 대기 중으로 방출되어 열과 수분 등의 교환이 원활하게 이루어진다. 하지만, 도시의 시가지 건조지역은 낮은 반사도와 높은 열용량을 가지는 인공피복물로 구성되어 있기 때문에 도시지역의 지표면으로 입사되는 태양복사에너지는 점차 누적되고, 인

†Corresponding author : prpr2222@hufs.ac.kr (81, Oedae-ro, Mohyeon-eup, Cheoin-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do, 17035, Korea. Tel. +82-31-8020-5586)

ORCID 양호진 0000-0001-7321-768X
권혁기 0000-0001-5337-5867

이채연 0000-0003-2802-2431

공 피복물들은 대기중으로 방출되는 수분과 열에너지 전달을 저해 한다. 누적된 태양복사에너지는 도시열섬과 같은 현상을 발생 시킬 수 있으며, 최근 이상기후 현상으로 인해 증가한 폭염 및 열대야와 같은 급작스러운 재난현상과 결합하여 도시열환경을 악화시킬 수 있다.

도시열환경 악화는 도시민들의 온열쾌적성을 떨어뜨리고, 열스트레스를 가중시킨다. 또한 열스트레스의 누적으로 온열질환자·사망사 발생증가 등 심각한 사회적 문제가 발생하고 이로 인해 막대한 사회적 관리비용이 지출되고 있다(Sailor et al., 2002; Scherer et al., 2014; Kim et al., 2013). 이에 따라 도시열환경 문제 개선에 대한 수요는 지속적으로 증대되고 있으며, 도시열환경 개선을 위하여 바람길 확보, 도시지역 녹지 증대 등 다양한 정책과 제도적 시도가 수행되고 있다(Suh, 2007; Eum et al., 2018). 하지만, 대부분의 정책과 해결방안은 녹지화와 같은 단순한 자연피복 증대에 집중되어 있다. 제한된 면적의 공간에서 자연피복의 증대로 인한 온도 저감은 한계가 있으며, 결과적으로 도시의 구조적 특징으로 인한 열환경 문제로부터 열적 스트레스와 취약성은 발생할 수 밖에 없는 실정이다(An et al., 2016). 이와 같은 문제에 대응하기 위해서는 도시면적의 대부분을 차지하고, 열환경 문제를 주로 심화시키는 시가지 건조 지역의 인공피복에 대해 조사하고 관리하는 체계가 필요하다. 이를 위해서는 우선적으로 도시민들이 생활하는 도시공간의 실제 물리적 구조환경이 반영된 공간정보형태의 열 취약성 정보가 필요하며, 도시민이 느끼는 열 스트레스를 정량적이고 구체적으로 평가할 수 있는 방안이 정립되어야 한다.

인간이 느끼는 열 스트레스를 정량화하고 대응기준을 마련하기 위하여 UTCI (Universal Thermal Climate Index; Jendritzky et al., 2012), PMV (Predicted Mean Vote; Fanger, 1970), PT (Perceived Temperature; Staiger et al., 2012) 등의 열스트레스 지수들이 주로 사용되고 있다. 열스트레스 지수들은 단순히 기온만을 이용하지 않고 습도, 평균복사온도, 인체의 생리적 반응, 물리적 환경을 종합적으로 고려하여 산출된다. 태양복사플럭스는 앞서 언급한 열스트레스 지수를 산출하기 위해 사용되는 주요한 요소 중 하나이며, 열 스트레스 지수들에 공통적으로 사용되는 평균복사온도 산출에 필수적인 요소이다. 특히, 도시지역은 건물과 같은 구조물로 인해 복잡한 형태의 표

면구조를 가지기 때문에 지표면 뿐만 아니라 건물지붕, 건물벽면 등 수평, 수직의 모든 방향에 대한 복사플럭스 산출이 필요하다.

보다 상세한 도시지역의 복사플럭스와 평균복사온도 산출을 위하여 Lindberg et al.(2008)은 건물의 형태와 식생을 고려한 천개지수(Sky View Factor, SVF), 그림자패턴, 기온, 습도, 일사량 자료를 이용하는 SOLWEIG (Solar and Longwave Environmental Irradiance Geometry-model) 모델을 개발하였다. 국내에서도 SOLWEIG를 이용한 연구가 활발히 진행되고 있는데, Bae et al.(2020)은 청주시내의 폭염시 위험지역 분석을 위해 미시적 공간의 열환경 분석방법으로 SOLWEIG를 활용하였으며, An et al.(2016)은 도시림의 평균복사온도 저감 효과 분석에 활용하였다. SOLWEIG는 상세규모의 복사플럭스 생산과 평균복사온도를 산출의 목적으로 활용영역이 점차적으로 확대되고 있다(An et al., 2020). Yi et al.(2018; 2022)은 SOLWEIG를 이용하여 국내의 실제 도시들을 대상으로 복사플럭스를 산출하고 검증함으로써 도시지역의 열환경 평가에 유용함을 시사하였다. 하지만 태양복사가 활발히 진행되는 시간대에 상향장파 복사플럭스가 다소 과대모의 되는 문제점이 제기되었다.

기존의 선행 연구들에서는 SOLWEIG의 도시지역 지표면 대표 모수가 스웨덴의 태양복사환경을 기준으로 적용되었다. 도시지역 지표를 대표하는 모수(도시지표특성 모수)는 도시지표면으로부터 방출되는 복사플럭스인 상향장파 복사플럭스를 산정하는 주요 요소이며, 태양고도각, 지표온도, 기온과의 관계를 통해 산출된다. 이와 같은 이유로 SOLWEIG의 기본설정을 이용할 경우 국내 실정을 제대로 반영하지 못하는 문제점이 발생할 수 있다. 보다 세밀한 국내도시의 열환경 평가를 위해서는 국내 복사환경이 반영된 도시지표특성 모수의 적용이 필요하다.

본 연구에서는 국내 복사환경을 반영한 도시지표특성 모수를 산출하고 태양복사플럭스 관측자료를 이용하여 도시지표특성 모수의 개선효과를 평가하고자 한다. 이를 위하여 대한민국의 서울과 수도권의 대표적인 도시지역으로부터 측정된 기온, 표면온도, 태양복사자료를 이용하여 도시지표특성 모수를 개선하고, 도시지표특성 모수 개선 전, 후의 SOLWEIG 모의결과 비교·검증을 통해 개선효과를 분석하였다.

2. 연구자료 및 방법

2.1 연구대상지 및 사례일

기상청 WISE project에서는 도시기상 관측기술 개발을 위해 수도권 지역을 대상으로 2014년부터 에너지 수지관측을 위한 관측소를 구축하였다(Jee et al., 2017). 관측요소는 기압, 기온, 풍향, 풍속, 습도, 지표면온도 등의 기상 변수와 상·하향단파복사, 상·하향장파복사와 같은 복사에너지 변수로 구성된다. 관측소는 수도권의 상업, 주거지 등 다양한 토지이용 장소에 위치한다. Yi et al.(2021)은 WISE project의 에너지 수지관측소 지점들의 주변환경을 건물높이, 평면적, 건물 용도, 토지 피복도를 고려하여 LCZ (Local Climate Zone)에 따라 유형화 하였다. 도시지

표특성 모수 개선 적용과 검증에는 기상요소 관측과 복사 플럭스 관측 값이 필요하며, 도시지역을 대표하는 특성을 가진 지역을 대상으로 수행되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 도시지표특성 모수 개선에 필요한 관측자료가 보유했던 관측지점들중 LCZ 분류를 통해 도시지형으로 분류된 6개 지점 중랑(JUNG), 가좌(GAJW), 노원(NOWO), 안양(ANYA), 강동(GANG), 구로(GURO) 지점을 분석·검증 대상지역으로 선정하였다.

관측소들 중 분석·검증대상지를 제외하고 지표면온도 관측자료의 확보가 가능하며 수도권 중심지역에 위치한 관측지점인 광화문(GWHW)지점을 도시지표특성 모수 산출 대상지역으로 선정하였다. 실험대상지역의 관측소 반경 500 m는 인공피복률이 80% 이상으로 구성되어 있으며 모두 건물 옥상에 설치되어 있다.

Table 1. Summary of WISE observation sites for radiation flux validation

No.	Name	Latitude (°N)	Longitude (°E)	Elevation (m)	LCZ	Land cover ratio (%) (within a diameter of 500 m)
P1	GWHW	37.57	126.98	114	1E	Traffic 59.6, Commerce 17.4, Bare 9.4
V1	JUNG	37.59	127.07	22	3E	Traffic 41.4, Residence 30.9, Commerce 19.7
V2	GAJW	37.58	126.91	21	3E	Traffic 46.1, Residence 35.0, Commerce 11.1
V3	NOWO	37.65	127.05	38	1E	Traffic 64.6, Grassland 16.6, Commerce 9.0
V4	ANYA	37.39	126.96	37	4E	Traffic 56.9, Commerce 33.0, Public facility 5.2
V5	GANG	37.52	127.02	26	2E	Traffic 35.8, Commerce 35.4, Residence 27.0
V6	GURO	37.48	126.89	23	1E	Traffic 56.3, Commerce 40.3, Grassland 2.4

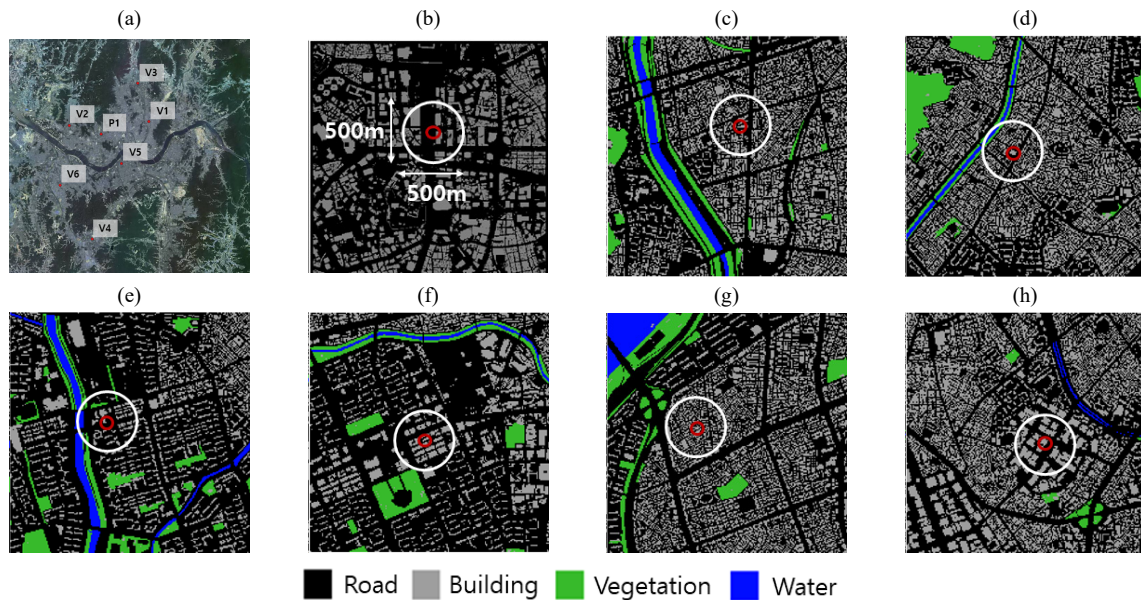


Fig. 1. (a) Location of WISE project observation sites and landcover around (b) P1, (c) V1, (d) V2, (e) V3, (f) V4, (g) V5, (h) V6 (white circles represent 500 m area surrounding observation sites)

복사플럭스 모델링 결과 비교를 위한 사례일은 강수가 없고 맑은 날이었던 폭염일(한국의 폭염 발생 기준은 일 최고기온이 33℃ 이상이 2일 이상 지속될 때)로, 2018년 8월

1일을 선정하였다. 2018년 8월 1일은 전국을 대상으로 폭염특보가 발표되었고, 서울지역을 기준으로 평균기온 33.6℃, 최고기온 39.6℃, 최저기온 27.8℃로 나타났다(Fig. 2).

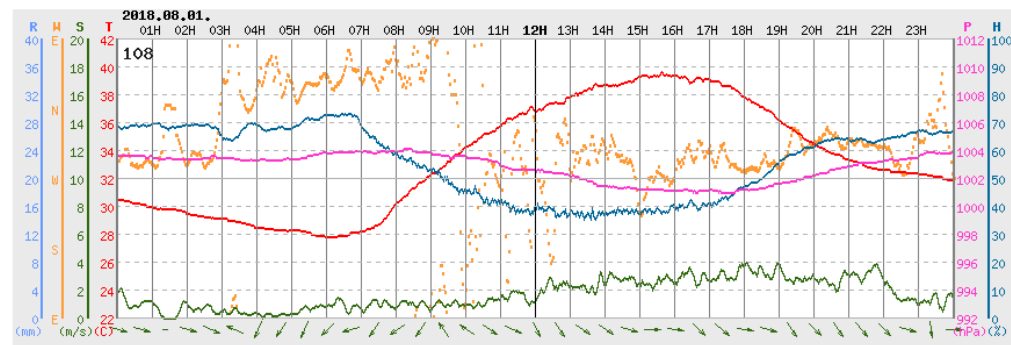


Fig 2. Time series of meteorological factors (temperature, pressure, relative humidity, rain, wind) on Aug. 1, 2018 (<https://www.weather.go.kr/>)

2.2. SOLWEIG 도시지표특성 모수 산출

SOLWEIG는 스웨덴 Gothenburg 대학 Urban climate group에서 개발한 고해상도 태양복사모델로 2009년에 1.0버전이 공개되었다. 본 연구에서는 여러 토지피복 특성을 적용할 수 있는 2015a 버전을 이용하였다. 이 모델은 도시 내의 건물이나 식생높이 등 도시의 물리적인 구조를 이용해 3차원

복사플럭스(3D radiant fluxes)와 평균복사온도(Mean Radiant Temperature, Tmrt)를 계산한다(Lindberg et al., 2011).

SOLWEIG 모델의 모의 결과 산출과정은 다음과 같다(Fig. 3). 사례일이 정해지면, 해당 사례일의 시간별 태양고도에 의해 그림자패턴(shadow pattern)이 계산된다. 건물이나 식생구조에 의한 시간별 그림자의 유무는 일사의 지속시간과 관련되며, 이는 복사플럭스 계산에 사용된다. 건물

및 식생구조 환경에 의한 SVF는 동서남북 4가지 방향을 먼저 계산하고 평균하여 산출한다. 이와 같은 과정을 모두 고려하여 장파복사량을 계산한다. 장파(longwave, L) 및 단파(shortwave, K) 복사플럭스와 이를 평균한 평균복사온도(Tmrt)를 최종적으로 산출한다.

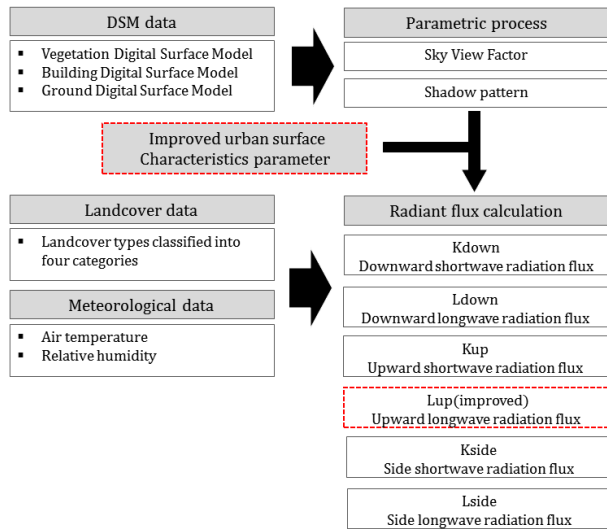


Fig. 3. Flow chart of radiant flux calculation process and application of improved urban surface characteristics parameter (factors in red boxes have a direct relationship to each other)

도시지표면으로부터 방출되는 복사플럭스인 상향장파 복사 생산과정(Fig. 3 red boxes)은 다음 식과 같다.

$$L_{up} = \varepsilon_g \sigma (T_a + Sh_{ij}(T_{diff}))^4 \quad (1)$$

여기서, ε_g 는 지표방출율, σ 는 스테판-볼츠만 상수, T_a 는 대기온도, Sh_{ij} 는 격자상 그림자 비율, T_{diff} 는 지표온도와 대기온도의 차이이다. T_{diff} 는 도시지표특성 모수를 이용한 관계식을 통해 산출할 수 있으며, 이는 상향장파 복사 산정에 주요한 영향을 줄 수 있다.

SOLWEIG 2015a의 도시지표특성 모수는 자갈, 아스팔트, 초지 등에 대한 관측실험을 바탕으로 건물, 아스팔트, 물, 초지 등 총 4가지로 분류되어 추정되었다(Lindberg et al., 2016). 모수 추정을 위한 관측자료는 스웨덴의 Gothenburg 공항과 인근에서 수집된 자료가 사용되었다. 모델에서 기본적으로 적용되는 모수들은 유럽의 기상상황과 태양 고도각을 반영하여 산출된 결과로, 국내에 반영할 경우, 다소 차이가 발생할 수 있다. 또한, 관측을 통해 모수를 추정된 지표면 인공피복 구성 물질은 아스팔트, 자갈 등이며, 개활지와 도로 등에서 관측되어 대부분이 콘크리트 구조의 고층 및 저층 건물로 이루어진 도심지의 상황과 다소 차이가 있다.

본 연구에서는 이를 보완하기 위하여 국내의 도시지역 특성과 기상상황을 반영한 개선된 도시지표특성 모수를 산출하였다. 도시지표특성 모수를 산출하기 위해서는 지표구성에 따른 표면온도 정보가 필요하다. 태양복사에 노출된 표면온도는 맑은 날의 태양고도각과 대기온도와 표면온도 차이의 선형관계에서 추정할 수 있다(Bogren et al. 2000). 다음과 같은 선형회귀식(식 (2))을 통해 모수 값을 산출할 수 있다.

$$T_{diff} = \beta \cdot \eta_{max} - \alpha \quad (2)$$

여기서, T_{diff} 는 대기온도와 표면온도 차이이며, β 는 회귀계수(T_s/η_{max})이며, α 는 절편으로 태양고도각이 0일 때 초기온도(T_{start})이다.

도시지표특성 모수 개선을 위하여 P1 (GHW)관측소로부터 수집된 표면온도와 대기온도 자료를 사용하였으며, 수집된 자료는 2016년 1월 1일부터 2016년 12월 31일까지의 운량이 1할 이하인 맑은 날이다. 태양고도각은 한국천문연구원에서 제공되는 태양위치자료를 사용하였다. 수집된 건물옥상 표면온도자료와 기온관측 자료를 이용하여 표면온도와 대기온도 차이값을 산출하였으며, 동일한 날짜의 태양고도각과의 선형회귀식을 산출하여 도시지역 건물지붕에서의 모수 값을 산출하였다(Fig. 4). 기존의 모수 값과 개선된 모수 값은 Table 2와 같다.

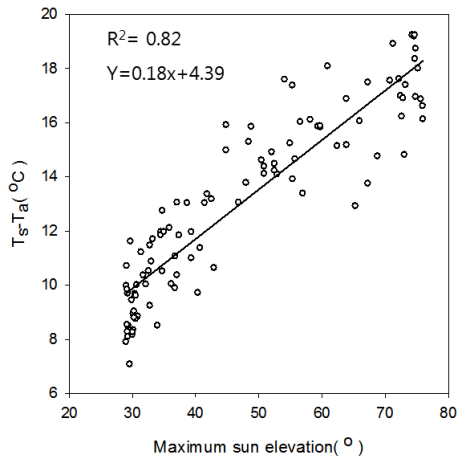


Fig. 4. Relation between sun elevation and difference between surface and air temperature observation on clear days at rooftop in Gwanghwamun (GWHW), Seoul

Table 2. Urban surface characteristics parameter of roof before and after the improvement

Urban surface characteristics parameter of roof			
	Ts/ηmax (°C)	Tstart (°C)	TmaxLST (Local time, h)
Before	0.58	-9.78	15.0
After	0.18	+4.39	15.0

2.3. 지형·기상입력자료

SOLWEIG 모의를 위해서 고해상도 도시 지표면 입력 자료를 산출하였다. 실험대상지역인 총 6개 에너지수지시스템 관측지점을 중심으로 각각에 2 km × 2 km 영역의 토지피복정보(Fig. 2)와 건물, 지형, 식생 고도정보(Fig. 5)를 10 m 해상도로 작성하였다. 입력자료를 위해 국토교통부 국가공간정보포털에서 제공하는 수치지형도와 환경부 토지피복지도를 이용하였고, 건물높이는 국토지리정보원 수치지도 2.0의 건물 층수로부터 추산하였다. 식생의 높이는 산림청 임상도(1:5,000)의 식생높이 정보를 이용하였다.

건물과 식생구조 환경을 반영하여 SVF를 동서남북 방향으로 계산하고 최종적으로 평균된 SVF를 산출하였다(Fig. 6). SVF는 지표면에서 정해진 한 위치(Oke, 1981)를 중심으로 반구를 추정하여 지표면과 반구 사이 공간에서 하늘이 보이는 정도를 비율로 나타낸 것이다. SVF가 0이 된다는 것은 하늘 전체가 장애물에 의해 시야가 차단된다는 것을 의미하며, 하늘 조망 부분을 막는 장애물이 적으면(하늘이 많이 보여지면) SVF는 0보다 커진다. SVF가 0 이상이 되어 수치가 커지면 낮동안 입사되는 단파복사량이 증가하고, 밤동안 지면에서 방출되는 장파복사량도 증가한다(An et al., 2014, Yi et al., 2018).

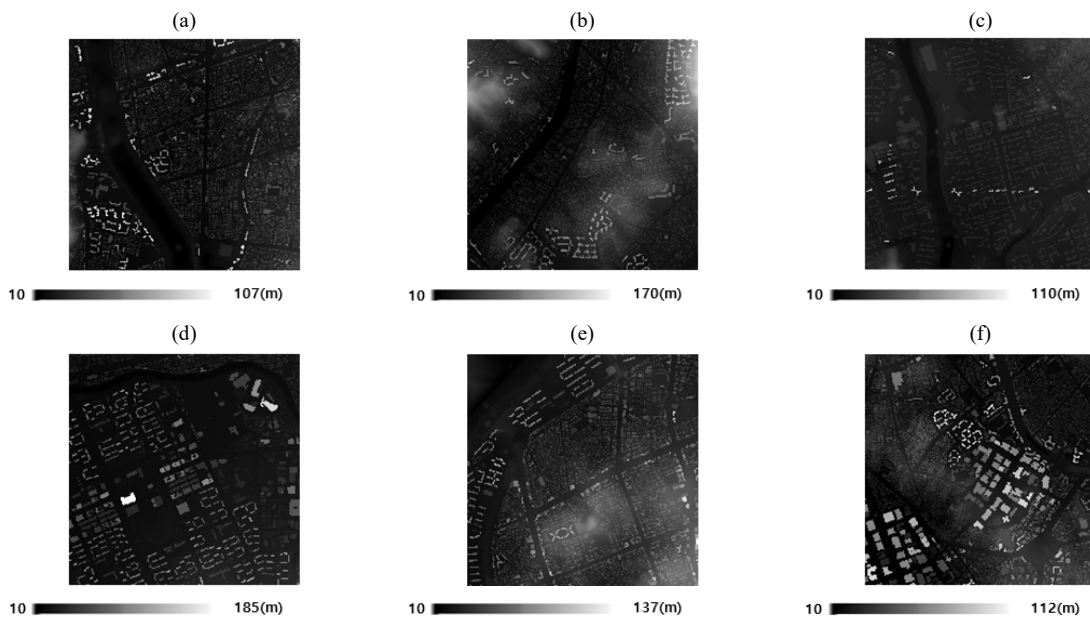


Fig. 5. Digital surface model of (a) V1, (b) V2, (c) V3, (d) V4, (e) V5, (f) V6

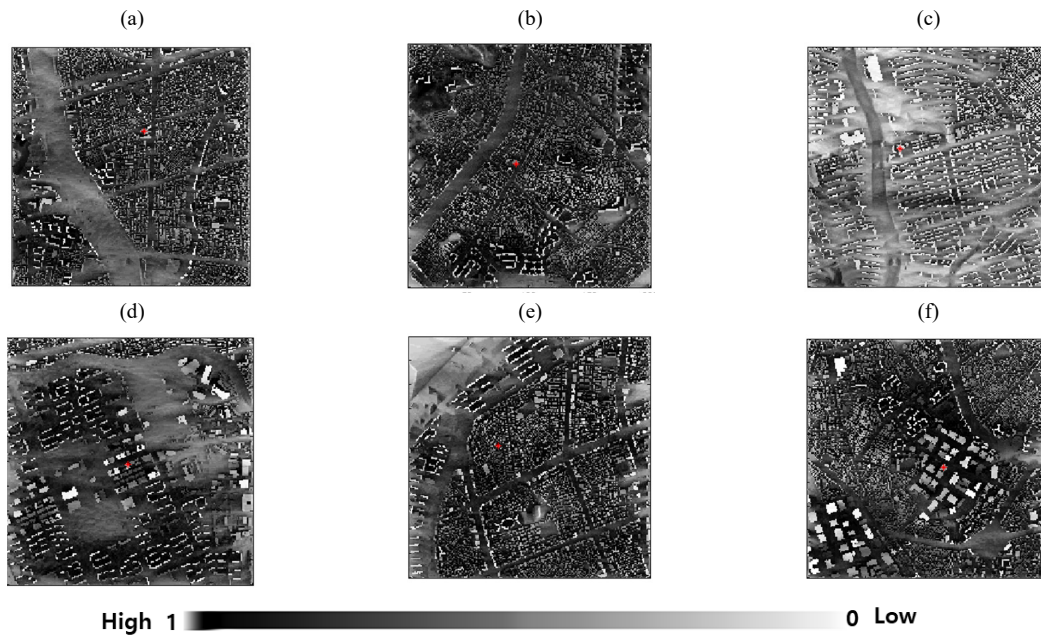


Fig. 6. Sky view factor of (a) V1, (b) V2, (c) V3, (d) V4, (e) V5, (f) V6

SOLWEIG 모델 모의를 위한 입력 기상자료로 각 지점의 시간별 기온, 습도, 일사량이 적용되었다. 지점별 기상 자료는 4 m 높이에서 관측된 복합센서 자료를 이용하였고, 일사량은 16 m 높이의 에너지수지관측 자료를 이용하

였다. Table 3은 사례일의 지점별 기상요소의 최소, 평균, 최고값을 보여준다. 2018년 8월 1일의 평균기온은 중층의 주거지역으로 이루어진 V2 (GAJW)가 가장 높게 나타났으며 최고기온은 31.73℃였다.

Table 3. Summary of meteorological input data of SOLWEIG

No.	Name	Temperature (°C)			Relative humidity (%)			Solar radiation (W/m ²)		
		Min	Mean	Max	Min	Mean	Max	Min	Mean	Max
V1	JUNG	19.65	25.43	30.69	31.50	48.11	72.62	0.00	307.66	889.57
V2	GAJW	20.86	26.33	31.73	33.61	50.43	73.40	0.00	338.45	962.82
V3	NOWO	18.88	24.94	30.11	34.63	51.26	76.26	0.00	326.83	961.26
V4	ANYA	17.50	22.97	28.08	36.49	55.70	91.24	0.00	326.32	926.97
V5	GANG	20.02	25.00	29.89	33.94	48.34	70.57	0.00	320.20	924.64
V6	GURO	18.97	24.37	29.63	32.11	49.24	73.46	0.00	338.63	974.28

2.4. 복사플럭스의 검증 방법

6개 지점의 상향·하향 장파 복사플럭스(upward·downward longwave radiant flux)를 대상으로 SOLWEIG에서 모의된 값들과 에너지수지관측소에서 관측된 복사플럭스값들의 시계열 그래프 비교, R² 및 RMSE 값 비교

를 수행하였다. R²는 통계학에서 결정계수(coefficient of determination)를 말하며, 모의된 자료와 관측된 자료의 변동 경향을 설명하고 0~1의 범위로 계산된다. R²가 1에 가깝다는 것은 SOLWEIG에서 모의된 값이 관측된 값의 경향과 매우 유사하다는 것으로 설명할 수 있다. RMSE (Root Mean Square Error)는 모델 예측오차의 크기를 설

명한다. 잔차는 회귀선 데이터 점으로부터 얼마나 멀리 떨어져 있는지를 나타내는 척도이며, RMSE는 잔차의 표준편차를 나타낸다. 즉, 데이터가 최량 적합선 주위에 얼마나 집중되어 있는지 알려주며, 수치가 작을수록 SOLWEIG에서 모의한 값과 관측된 값 사이의 오차가 작다는 것을 나타낸다.

3. 결과 및 고찰

기존의 도시지표특성 모수값과 개선된 모수값을 각각 적용한 SOLWEIG 수치모의를 수행하였다. 모의된 결과 값들과 6개 지점에서 매시간 관측된 하향단파(K_{down}), 상향단파(K_{up}), 하향장파(L_{down}), 상향장파(L_{up}) 복사플럭스를 비교하였다.

Table 4와 5는 6개 지점의 복사량을 관측하는 net radiometer 관측 결과와 기존의 도시지표특성 모수와 개

선된 도시지표특성 모수를 이용한 SOLWEIG 모의 결과의 검증 수치를 나타낸다.

하향단파 복사플럭스(K_{down})의 모의값과 관측 값의 검증수치로 V1 (JUNG), V3 (NOWO), V4 (ANYA), V5 (GANG)에서 R^2 가 0.9 이상이었다(Table 4). V2 (GAJW), V6 (GURO)에서는 오전시간에 주변 건물의 그림자영향으로 도시지표특성 모수 개선 전, 후의 모든 모의에서 부분적으로 낮은 하향단파 복사플럭스 값이 나타난다.

도시지표특성 모수 개선 전, 후의 모든 모의에서 상향단파 복사플럭스(K_{up})는 하향단파 복사플럭스(K_{down})의 경향과 거의 유사하게 나타나며, 관측과 모의 값도 거의 비슷한 수준으로 나타났다(R^2 가 0.7 이상, 그 중 4개 지점은 0.9 이상). 도시지표특성 모수 개선전과 후의 상·하향단파 복사 모의 값이 매우 유사하며, 이는 단파의 경우, 태양으로부터 직접적으로 고려되기 때문에 도시지표특성 모수의 영향을 크게 받지 않기 때문이다.

Table 4. Validation values of shortwave radiation flux before and after the improvement

	K_{up} [before]		K_{up} [after]		K_{down} [before]		K_{down} [after]	
	R^2	RMSE	R^2	RMSE	R^2	RMSE	R^2	RMSE
JUNG	0.98	16.07	0.98	15.45	0.99	55.33	0.98	59.70
GAJW	0.73	46.09	0.76	40.43	0.75	229.75	0.78	198.58
NOWO	0.97	26.07	0.97	25.98	0.99	36.41	0.99	36.76
ANYA	0.94	15.65	0.96	20.51	0.94	95.22	0.94	95.22
GANG	0.95	15.65	0.95	15.59	0.98	66.46	0.98	67.20
GURO	0.77	28.33	0.77	28.32	0.76	207.38	0.76	207.38
Ave.	0.89	24.64	0.89	24.38	0.90	115.09	0.90	110.80

Table 5. Validation values of longwave radiation flux before and after the improvement

	L_{up} [before]		L_{up} [after]		L_{down} [before]		L_{down} [after]	
	R^2	RMSE	R^2	RMSE	R^2	RMSE	R^2	RMSE
JUNG	0.96	39.63	0.98	18.15	0.83	24.79	0.86	28.86
GAJW	0.86	41.58	0.89	25.65	0.89	65.99	0.91	66.68
NOWO	0.95	43.06	0.96	14.26	0.65	20.50	0.66	20.56
ANYA	0.88	47.40	0.95	22.79	0.77	29.38	0.76	29.37
GANG	0.92	51.73	0.96	21.65	0.88	45.33	0.88	46.23
GURO	0.88	51.87	0.92	28.05	0.86	49.62	0.86	49.61
Ave.	0.91	45.88	0.94	21.75	0.81	39.27	0.82	40.21

상향장파 복사플럭스(Lup)는 6개 전 지점에서 관측된 값과 도시지표특성 모수 개선 전, 후 모의 값의 R²가 0.8 이상으로 나타났으며, 6개 지점 모두에서 도시지표특성 모수 개선 후의 R²값이 개선전보다 높게 나타났다. RMSE의 경우, 평균적으로 약 25 W/m² 이상 낮아졌다. 이는 건물지붕에서 개선된 도시표면 모수값의 영향이 상향장파 복사플럭스에 가장 크게 반영되기 때문이다.

상향장파 복사플럭스는 하향장파 복사플럭스보다 대체로 크게 관측이 된다. 장파복사 플럭스는 지표면에서 대

기로 전달되지만 대기의 온도가 높은 때는 대기에서 지표면으로 장파복사 플럭스가 전달된다. 지표면에서 방출되는 장파복사 플럭스는 주간에 지표면온도에 민감하게 반응하며, 지표면과 대기의 기온차로 인하여 센서에서 관측되는 상향장파 복사플럭스가 크게 나타난다.

도시지표특성 모수 개선 전의 경우, 6개 모든 지점에서 낮 시간(13~14시) 최대 상향장파 복사플럭스 모의 값이 관측된 값보다 다소 높게 나타났다(Fig. 7).

관측된 상향장파 복사플럭스의 값은 최대 약 530 W/m²

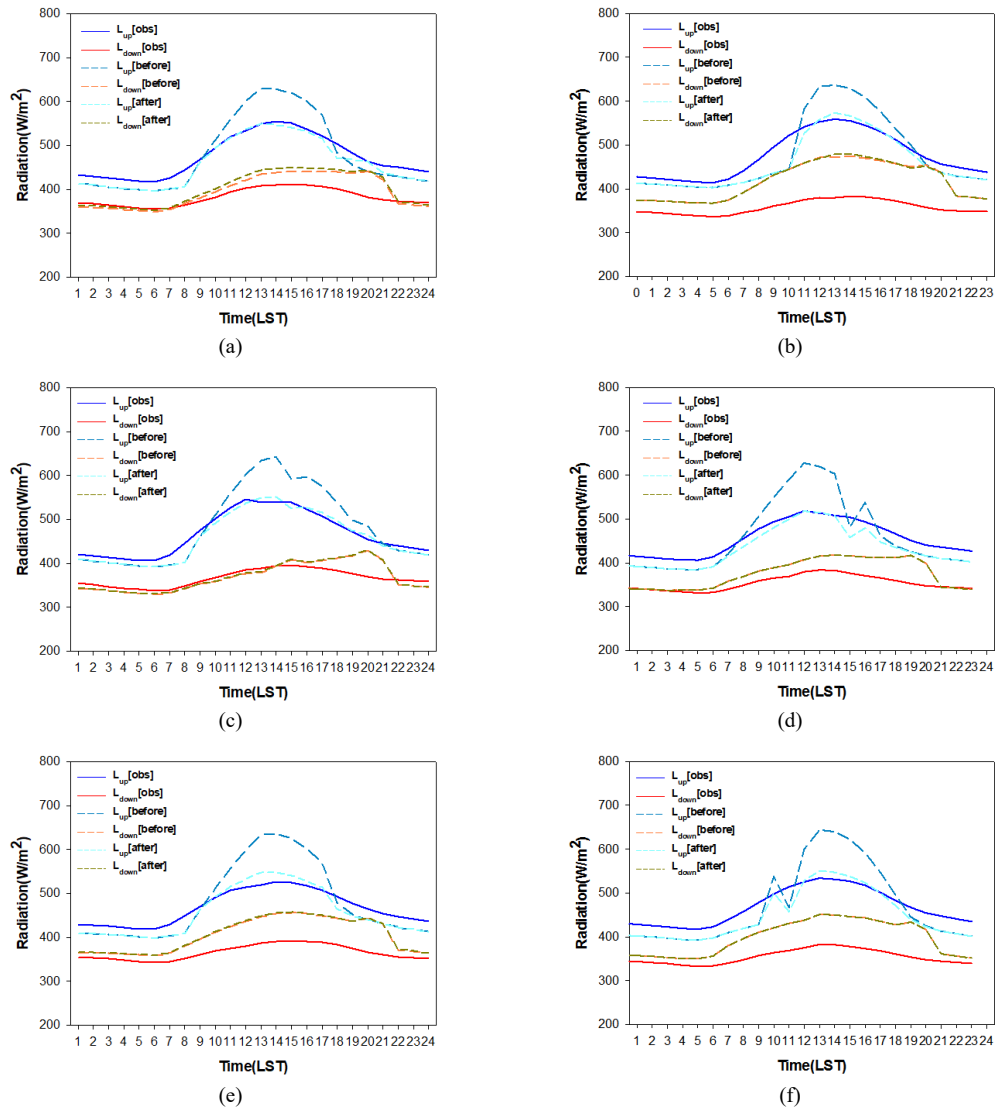


Fig. 7. Comparison of observation and simulated (before and after the application of improved urban surface characteristics parameters) longwave radiation flux for (a) V1, (b) V2, (c) V3, (d) V4, (e) V5, (f) V6

으로 나타나고, 도시지표특성 모수 개선 전의 모의결과는 비교적 과대 산정되었다. V1 (JUNG)의 경우 13시에 최대 80 W/m² 정도 과대 추정되었으며, V5 (GANG)는 최대 113 W/m² 정도 과대 추정하였다. 6개 지점에서 상향장파 복사의 과대 추정이 나타났으며, 평균 RMSE는 약 45 W/m² 수준으로 나타났다.

실험 지역들의 표면은 건물옥상으로써 불투수면으로 되어 있는 공통된 특성을 갖고 있는데, SOLWEIG 모델에

서 이 건물옥상 표면 특성을 T_s/η_{max} , T_{start} , T_{max_LST} 로 반영하였고 모의 과정에서 도시지표특성 모수에 따라 매개변수화 한다. 개선 전 도시지표특성 모수들은 실제 국내 도시지역의 건물지붕을 구성하는 콘크리트 재질이 아닌 자갈도로나 아스팔트도로 상에서 측정된 자료를 바탕으로 산출되었다. 이와 같은 이유로 개선 전의 도시지표특성 모수를 이용한 SOLWEIG 모의값은 실제 건물 지붕으로부터 방출되는 상향장파 복사플럭스 관측 값에 비

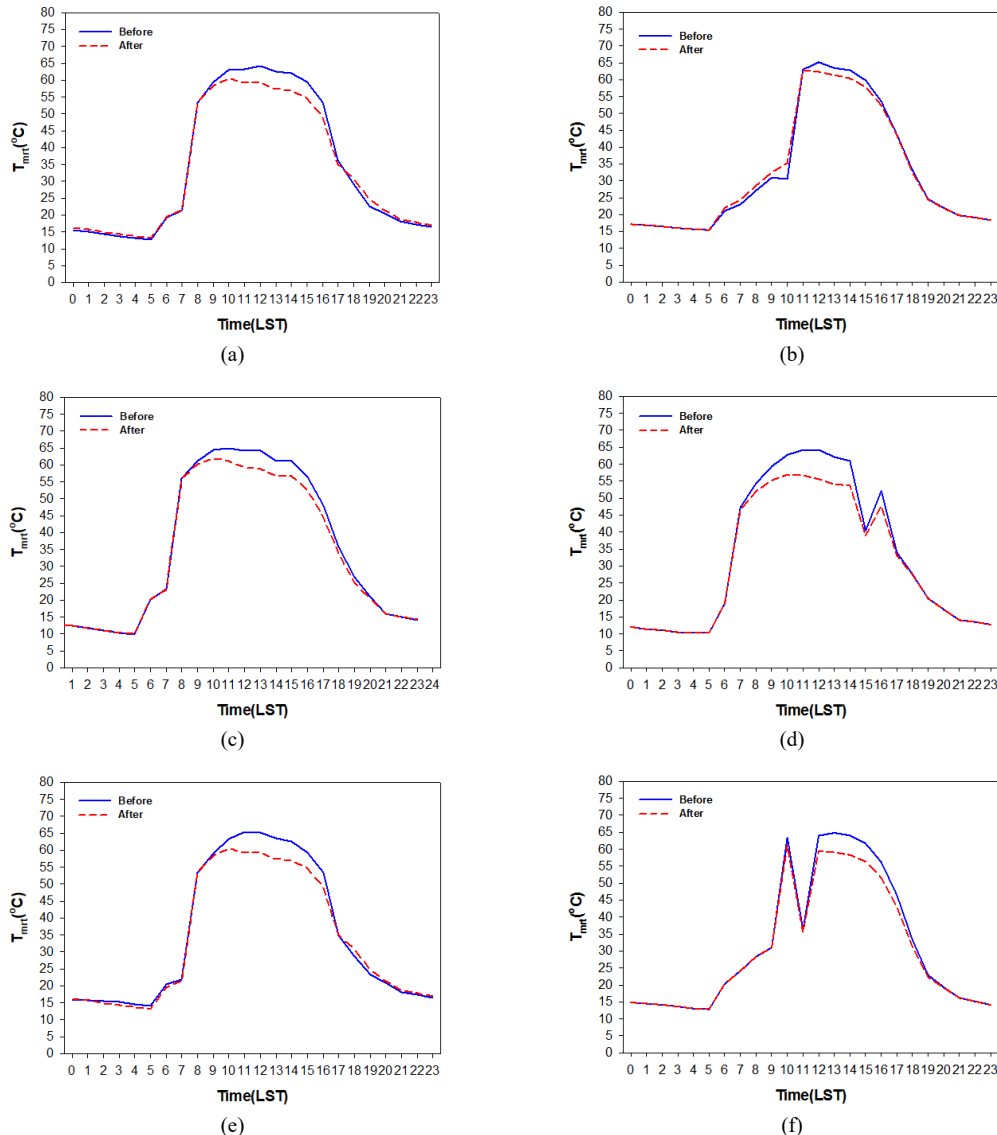


Fig. 8. Comparison of observation and simulated (before and after the application of improved urban surface characteristics parameters) mean radiant temperature for (a) V1, (b) V2, (c) V3, (d) V4, (e) V5, (f) V6

해 과대하게 추정된다.

개선된 도시지표특성 모수들은 건물지붕에서 측정된 관측 값을 기반으로 산출되었다. 이와 같은 이유로 도시 지역 건물에서 방출되는 장파복사는 개선된 도시지표특성 모수를 사용할 경우, 개선 전 도시지표특성 모수를 사용한 경우 보다 실제 관측 값에 가깝게 모의한다. 일출 이후, 10시부터 16시의 태양복사에 의해 지표면이 가열되는 시간동안 과대 추정되던 상향장파복사 값들이 도시지표특성 모수 개선을 통해 보다 실제적으로 모의 되었으며, 상향장파복사의 최대값이 나타나는 시간대의 값들도 도시지표특성 모수 개선을 통해 모의 정확도가 향상되었다.

SOLWEIG 모델에서는 평균복사온도를 생산하며, 그 중 장파복사는 평균복사온도 생산에 주요한 영향을 줄 수 있다. 도시지표특성 모수를 개선함으로써 보다 실제적인 평균복사온도 생산이 가능할 것으로 사료된다. Fig. 8은 도시지표특성 모수 개선 전후의 복사플럭스 관측지점의 평균 복사온도를 비교하였다. 도시지표특성 모수 개선 후, JUNG, GAJW, NOWO, ANYA, GANG, GURO 모든 지점에서 일출 후, 지표면 장파복사가 활발히 일어나기 시작하는 10~16시에서 2~8℃ 정도 평균복사온도가 낮아졌다. 이는 상향 장파복사 플럭스의 방출이 도시지표특성 모수 개선 전에 비해 감소하였기 때문이다. 평균복사온도는 지표와 건물 벽면으로부터 방출되는 복사플럭스의 평균 계산을 통해 산출되므로 상향장파 복사플럭스가 감소함에 따라 선형적으로 감소되는 경향을 나타낸다. 도시지표특성 모수 개선 전과 후의 상향장파 복사플럭스의 변화량과 평균복사온도의 변화량의 상관성을 조사한 결과, 강한 양의 상관도(JUNG:0.9, GAJW:0.71, NOWO:0.9, ANYA:0.9, GANG:0.9, GURO:0.9)가 나타났으며, 상향 장파플럭스의 정확도 개선은 평균복사온도에 큰 영향을 줄 수 있음을 나타냈다. 앞서 수행된 복사플럭스 검증 을 기반으로 도시지표특성 모수 개선이 평균복사온도 산출 정확도를 개선할 수 있음을 간접적으로 확인할 수 있다. 추후 태양복사플럭스 관측과 평균복사온도 관측 병행을 통해 보다 상세한 정량적 평가가 요구된다.

4. 결론 및 제언

본 연구에서는 태양복사플럭스 관측자료를 이용하여, 태양복사모델인 SOLWEIG에 사용되는 도시 모수값을 개선 적용하였고, 도시지역에 설치되어 관측된 복사플럭스 자료와 모의된 결과를 비교 및 검증하였다. 대한민국의 태양복사 특성과 도시의 구조적 특성을 반영한 도시지표

특성 모수 개선을 위하여 대표적인 도시지역인 서울 광화문에서 관측된 복사플럭스 자료와 건물지붕의 표면온도, 기온 등 기상자료를 종합하여 도시지표특성 모수를 산출하였다. 산출된 도시지표특성 모수와 기존의 도시지표특성 모수를 SOLWEIG 모델에 적용하여 서울과 수도권 도시지역의 6개 지점에서의 복사플럭스값을 산출하였다. 이를 실제 관측된 복사플럭스 자료와 비교하여 SOLWEIG 복사모델 개선을 통해 상향장파 복사플럭스 모의 정확성이 향상됨을 확인하였다. 또한 평균복사온도 비교를 통해 간접적으로 평균복사온도 정확도 개선에도 영향을 줄 수 있음을 확인하였다.

본 연구에서는 도시지표를 주로 구성하는 콘크리트 등의 건물지붕을 구성하는 인공피복물에 대한 도시지표특성 모수만을 개선하였는데, 최근 도시 열환경 개선을 위하여 도시공원, 바람길 연결 숲 등 도시내부온도를 낮추기 위한 다양한 자연피복의 증가를 위한 정책이 수행되고 있다. 이를 통해 도시지역은 인공피복과 자연피복이 복합적으로 구성되어 더욱 복잡한 열 환경 구조로 변화하고 있음을 알 수 있으며, 복잡해지는 도시지역의 열환경을 분석하기 위해서는 인공피복물 뿐만 아니라 도심지 내에 존재하는, 초지와 나무 등 자연피복물에 대한 도시지표특성 모수 개선이 추가적으로 필요하다. 이와 같은 도시지표특성 모수의 개선을 위해서는 다양한 토지피복상의 복사플럭스 관측 등이 상세규모로 수행되어야 하며, 보다 장기간에 걸친 자료 축적이 필요하다. 후속 연구를 통해 토지피복별 표면온도와 기온의 구조적 특징에 대한 관측이 수행된다면 보다 정확한 복사플럭스와 열환경 정보생산이 가능할 것으로 기대된다.

사사

본 연구는 행정안전부 자연재난 정책연계형 기술개발사업의 지원을 받아 수행된 연구입니다(2020-MOIS35-001).

References

- Ahn SH, Kwon HG, Yang HJ, Lee GH, Yi CY. 2020. Predicting Road Surface Temperature using Solar Radiation Data from SOLWEIG (Solar and LongWave Environmental Irradiance Geometry-model): Focused on Naebu Expressway in Seoul. Journal of the Korean

- Association of Geographic Information Studies 23(4): 156-172.
- An SM, Kim BS, Lee HY, Kim CH, Yi CY, Eum JH, Woo JH. 2014. Three-dimensional point cloud based sky view factor analysis in complex urban settings. *International Journal of Climatology* 34(8): 2685-2701.
- An SM, Kim SJ, Lee HC. 2016. A Study on the Urban Area Micro climate Management Direction. KRIHS.
- An SM, Son HG, Lee KS, Yi C. 2016. A study of the urban tree canopy mean radiant temperature mitigation estimation. *Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture* 44(1): 93-106.
- Bae MK, Kim BE, Lee CY. 2020. Analysis on the spatial relationship between the residential area of the vulnerable groups and the hazardous area during the heat wave. *Korea Environmental Policy and Administration* 28(3): 243-280.
- Eum JH, Son JM, Seo KH, Park KH. 2018. Management Strategies of Ventilation Paths for Improving Thermal Environment-A Case Study of Gimhae. South Korea. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* 21(1): 115-127.
- Fanger PO. 1970. Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering. *Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering.*
- Jee JB, Lee H, Min JS, Chae JH, Kim S. 2017. Analysis of Radiation Energy Budget Using WISE Observation Data on the Seoul Metropolitan Area. *Journal of the Korean Solar Energy Society* 37(6): 103-114.
- Jendritzky G, de Dear R, Havenith G. 2012. UTCI—why another thermal index?. *International journal of biometeorology* 56(3): 421-428.
- Kim KR, Yi C, Scherer D, Jung H-S. 2013. Impact of distance from the city-core and land cover on air temperature in Seoul metropolitan area (in Korean). In *Proceedings of the Spring Meeting of the Korea Meteorological Society*, Seoul 496-497.
- Kolokotroni, M., Giridharan R. 2008. Urban heat island intensity in London: An investigation of the impact of physical characteristics on changes in outdoor air temperature during summer. *Solar energy* 82(11): 986-998.
- Korea Meteorological Administration. 2021. Weather information; [accessed 2021 Aug 25]. https://www.weather.go.kr/plus/land/current/aws_graph_popup.jsp
- Lee H, Jee JB, Min JS, Kim S, Chae JH. 2018. Analysis of meteorological and radiation characteristics using WISE observation data. *Journal of the Korean earth science society* 39(1): 89-102.
- Lindberg F, Holmer B, Thorsson S. 2008. SOLWEIG 1.0—Modelling spatial variations of 3D radiant fluxes and mean radiant temperature in complex urban settings. *International journal of biometeorology* 52(7): 697-713.
- Lindberg F, C. S. B. Grimmond. 2011. The influence of vegetation and building morphology on shadow patterns and mean radiant temperature in urban areas: Model development and evaluation. *Theoretical and Applied Climatology* 105(3): 311-323.
- Lindberg F, Onomura S, C. S. B. Grimmond. 2016. Influence of ground surface characteristics on the mean radiant temperature in urban areas. *International Journal of Biometeorology* 60(9): 1439-1452.
- Sailor D, Kalkstein LE, Wong. 2002. Alleviating heat-related mortality through urban heat island mitigation. *Bulletin of the American Meteorological Society* 83(5): 663-664.
- Scherer D, Fehrenbach U, Lakes T, Lauf S, Meier F, Schuster C. 2014. Quantification of heat-stress related mortality hazard, vulnerability, risk in Berlin, Germany. *DIE ERDE—Journal of the Geographical Society of Berlin* 144(3/4): 238-259.
- Song Y, Chae JH, Choi MH, Park MS, Choi YJ. 2014. Standardization of metadata for urban meteorological observations. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment* 30(6): 600-618.
- Staiger H, Laschewski G, Grätz A. 2012. The perceived temperature—a versatile index for the assessment of the

- human thermal environment. Part A: scientific basics. *International journal of biometeorology* 56(1): 165-176.
- Suh EC. 2007. A study on the mitigation policies for urban heat island. *KIEAE Journal* 7(2): 17-23.
- Yi C, Kwon HG, Yang H. 2022. Spatial temperature differences in local climate zones of Seoul metropolitan area during a heatwave. *Urban Climate* 41: 101012.
- Yi CY, Kwon HG, Lindberg F. 2018. Radiation Flux Impact in High Density Residential Areas-A Case Study from Jungnang area, Seoul. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* 21(4): 26-49.