

3차원 카메라와 수치표고모델 자료에 따른 기상청 일사관측소의 복사관측환경 분석

지준범¹⁾ · 조일성^{2)*} · 이규태²⁾³⁾ · 조지영³⁾

¹⁾한국외국어대학교 대기환경연구소, ²⁾강릉원주대학교 복사-위성연구소,

³⁾강릉원주대학교 대기환경학과

(접수일: 2019년 7월 12일, 수정일: 2019년 9월 7일, 게재확정일: 2019년 9월 24일)

An Analysis of Radiative Observation Environment for Korea Meteorological Administration (KMA) Solar Radiation Stations based on 3-Dimensional Camera and Digital Elevation Model (DEM)

Joon-Bum Jee¹⁾, Il-Sung Zo^{2)*}, Kyu-Tae Lee²⁾³⁾, and Ji-Young Jo³⁾

¹⁾Research Center for Atmospheric Environment, Hankuk University of Foreign Studies, Yongin, Korea

²⁾Research Institute for Radiation-Satellite, Gangneung-Wonju National University, Gangneung, Korea

³⁾Department of Atmospheric and Environmental Sciences, Gangneung-Wonju National University, Gangneung, Korea

(Manuscript received 12 July 2019; revised 7 September 2019; accepted 24 September 2019)

Abstract To analyze the observation environment of solar radiation stations operated by the Korea Meteorological Administration (KMA), we analyzed the skyline, Sky View Factor (SVF), and solar radiation due to the surrounding topography and artificial structures using a Digital Elevation Model (DEM), 3D camera, and solar radiation model. Solar energy shielding of 25 km around the station was analyzed using 10 m resolution DEM data and the skyline elevation and SVF were analyzed by the surrounding environment using the image captured by the 3D camera. The solar radiation model was used to assess the contribution of the environment to solar radiation. Because the skyline elevation retrieved from the DEM is different from the actual environment, it is compared with the results obtained from the 3D camera. From the skyline and SVF calculations, it was observed that some stations were shielded by the surrounding environment at sunrise and sunset. The topographic effect of 3D camera is therefore more than 20 times higher than that of DEM throughout the year for monthly accumulated solar radiation. Due to relatively low solar radiation in winter, the solar radiation shielding is large in winter. Also, for the annual accumulated solar radiation, the difference of the global solar radiation calculated using the 3D camera was 176.70 MJ (solar radiation with 7 days; suppose daily accumulated solar radiation 26 MJ) on an average and a maximum of 439.90 MJ (solar radiation with 17.5 days).

Key words: Solar radiation site, observation environment, sky view factor, digital elevation model, 3 dimensional camera

*Corresponding Author: Il-Sung Zo, Research Institute for Radiation-Satellite, Gangneung-Wonju National University, 7, Jukheon-gil, Gangneung-si, Gangwon-do 25457, Korea.
Phone: +82-33-640-2397, Fax: +82-33-640-2320
E-mail: zoilsung@gwnu.ac.kr

1. 서 론

지표면에 도달하는 태양 에너지는 가장 원천적인 에너지원이며, 일사량은 기상학과 수문학 등의 영역에서 광범위하게 적용되고 중요한 역할을 한다(Almorox et al., 2013). 또한 일사량의 변화는 수문학적 순환, 지상 생태계 및 기후에 큰 영향을 미친다(Mehdizadeh et al., 2016). 특정 지역의 완전하고 정확한 일사량 자료는 지역 농작물 성장 모델링, 증발량 추정, 관개 시설 개발 및 태양 에너지 자원의 활용에 매우 중요하다. 반면에, 전세계적인 에너지 수요의 급격한 증가와 화석 연료가 환경에 미치는 파괴적 영향 때문에, 청정에너지 기술 개발을 위한 신뢰할 수 있는 일사량 정보에 대한 수요가 증가하고 있다(Hassan et al., 2016; Jamil and Akhtar, 2017).

지표면에 도달하는 태양복사(일사량) 연구에는 다양한 복사모델이 활용되고 있다(Ruiz-Arias et al., 2011; Lee et al., 2017; Arthur et al., 2018). 단층복사모델은 지표면에서 관측된 기상자료를 이용하여 빠르게 계산 가능하며 다층모델의 경우 기층별 자료를 이용해 정확성 높은 결과를 산출할 수 있다(Jee et al., 2013; Zo et al., 2014). 최근 복사 계산의 정확성 향상을 위하여 지형효과를 고려한 고해상도 복사모델들이 개발되고 있다(Bessafi et al., 2018; Lee et al., 2019, Olson and Rupper, 2019). 즉 지형 및 건물 등으로 인한 차폐와 산란으로 지표면에 도달하는 일사량은 변화할 수 있으며 이 효과는 고해상도로 갈수록 더욱 커진다.

지형효과 계산을 위해 사용되는 자료는 다양하며 이들 중 수치표고모델(DEM, Digital Elevation Model)은 원격탐사기법을 이용하여 지형의 고도(altitude)와 경사각(slope) 및 경사면(aspect) 등을 산출하여 활용한다(Piedallu and Gégout, 2008; Sabo et al, 2016; Jee et al., 2017). 또한 이 자료를 이용해 일사관측소의 관측환경을 분석할 수 있다(Jee et al., 2019a). 즉 고해상도 지형자료를 이용하여 일사관측소의 주변 차폐 및 하늘시계요소(Sky View Factor, SVF)를 산출하여 지표면에 도달하는 일사량 변화를 분석할 수 있다. 그러나 DEM 자료는 관측소 주변의 수목과 건물 등의 영향을 반영하지 못한다는 한계점이 있다. 한반도는 지형이 복잡하고 거주지역에는 건물들이 밀집되어 수목과 인공구조물 등의 효과가 미국이나 유럽 등에 비해 크게 나타난다. 따라서 차폐가 심하게 발생하는 관측소의 경우 해결책을 찾아 개선해야 한다.

본 연구에서는 기상청 14개 일사관측소에서 3차원 이미지를 활용하여 관측소 주변의 차폐 요소들에 대한 분석을 수행하였다. 또한 동일 지점의 DEM 자료를 이용해 같은 방법으로 두 자료 사이의 차이를 정량적으로 분석하였다. 그리고 이들 자료를 복사모델

Table 1. Summary of 14 solar radiation stations operated by KMA. The shaded station was taken a sky image using 3D camera.

ID	Name	Latitude (N)	Longitude (E)	Altitude (m)
93	Bukchuncheon	37.948	127.755	95.610
104	Bukgangneung	37.805	128.855	78.900
112	Incheon	37.478	126.624	68.200
131	Cheongju	36.639	127.441	58.700
133	Daejeon	36.372	127.372	68.940
136	Andong	36.573	128.707	140.100
143	Daegu	35.878	128.653	53.500
146	Jeonju	35.841	127.119	61.400
155	Changwon	35.170	128.573	37.600
156	Gwangju	35.173	126.892	72.380
159	Busan	35.105	129.030	69.560
165	Mokpo	34.817	126.381	38.000
184	Jeju	33.514	126.530	20.450
185	Gosanan	33.294	126.163	71.470

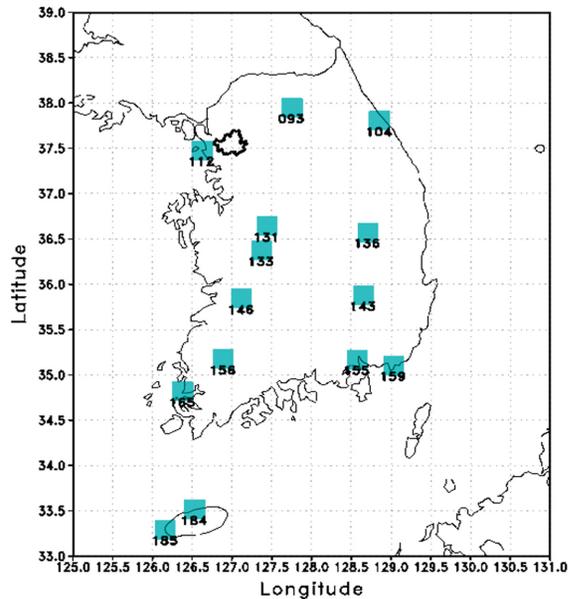


Fig. 1. Geolocations of 14 solar radiation sites operated by Korea Meteorological Administration (KMA).

에 결합하여 시간에 따른 정량적 분석을 수행하였다.

2. 자료 및 방법

2.1 자료

기상청 일사량 관측자료는 다양한 연구에 활용되고 있으며 1960년대부터 장기간 신뢰성있는 관측자료를

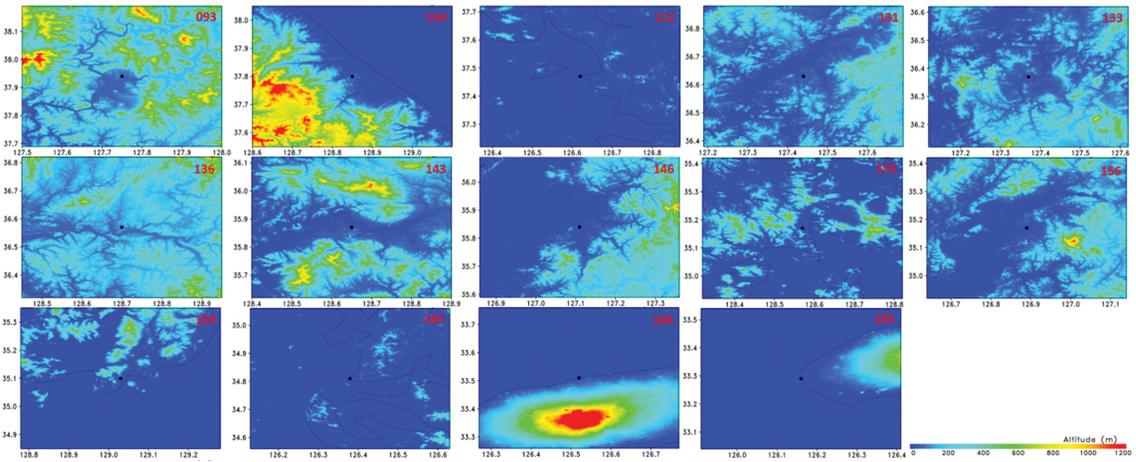


Fig. 2. DEM of 14 KMA solar stations. Black dots represent station point.

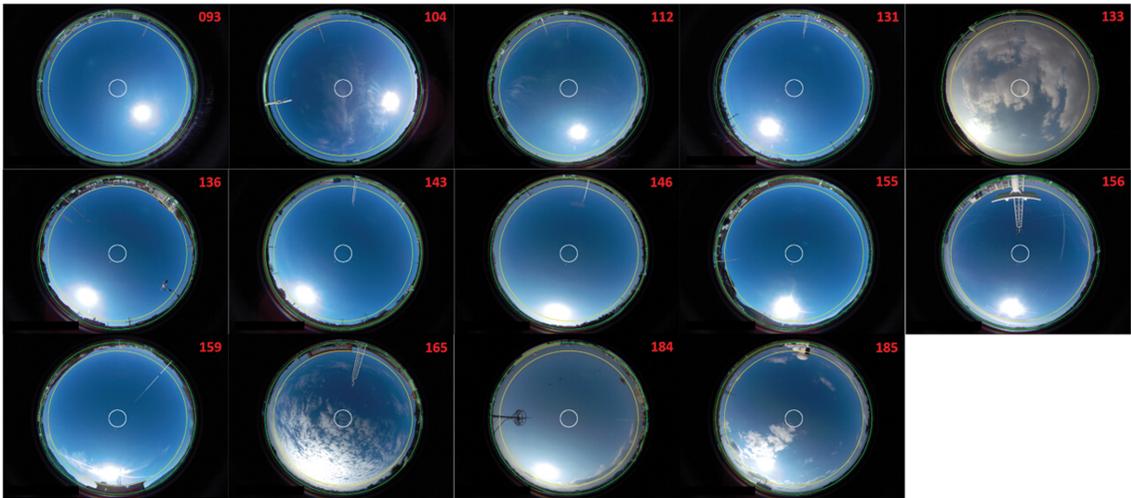


Fig. 3. 3D sky view images of 14 KMA solar stations. White, yellow and green circles represent solar zenith angle 10°, 60° and 90°, respectively.

생산하고 있다. 그러나 최근 관측소 주변지역의 개발로 관측환경이 지속적으로 변화하고 있다. 따라서 기상청 일사관측소의 복사 관측환경분석을 위하여 기상청 일사관측소의 위치정보 3차원 카메라로 촬영된 이미지, 그리고 DEM 자료 등을 수집하여 분석하였다 (Table 1과 Fig. 1 참조). 기상청 42개 일사관측소 중 유인관측소로 관측환경 분석이 수월한 14개 일사관측소 자료만 이용하였다.

관측소 환경분석을 위해 사용된 수치표고자료는 환경부에서 제공되는 10 m 해상도의 자료(Jee and Choi, 2014; Yi et al., 2017)와 미국 National Aeronautics and Space Administration (NASA)에서 제공되는 Shuttle

Radar Topography Mission (SRTM) 자료를 이용하였다. Figure 2는 14개 일사관측소의 지형고도를 나타낸 것으로 Table 1의 지점 순으로 좌에서 우로 위에서 아래 순으로 배치하였으며 관측소 위치(검은색 점)를 기준으로 20 km × 20 km 영역이 포함되어있다. 지형고도를 볼 때 대체로 관측소의 위치는 관측기기의 유지관리를 위하여 인구가 밀집되는 도시지역 또는 이들 주변의 낮은 지형고도에 위치하는 것으로 분석된다.

3차원 카메라(ZS-AC26)로 촬영된 이미지를 이용하여 sky line과 SVF를 산출하였고, DEM을 이용하여 산출된 결과와 비교하였다(Fig. 3 참조). 3차원 카메라는 강릉원주대에 설치되어 운영중인 Skyview (PSV-

100W)를 기준으로 검증되었고 상대적으로 높은 해상도를 가지고 있어 상세한 sky line과 SVF를 산출할 수 있다(Jee et al., 2019b). 3차원 카메라 이미지는 3264 × 2448 화소 및 220°의 화각으로 촬영하여 JPEG로 저장되기 때문에 적색(Red, 0~255), 녹색(Green, 0~255), 청색(Blue, 0~255)로 분리가 가능하며 총 1,678만가지 색으로 표현이 가능하다(Kim et al., 2016).

2.2 연구방법

2.2.1 Sky line과 sky view factor 산출

DEM 자료와 3차원 카메라의 이미지를 이용하여 sky line과 SVF를 산출하였다. DEM은 지형고도 자료이며 실제 산림이나 인공적으로 건설된 지형지물은 포함되지 않는다. 따라서 실제 육안으로 확인할 수 있는 산림과 주변 구조물의 차폐는 적용되지 않는다. DEM은 관측지점의 고도를 기준으로 방위각별로 시선의 높이와 지형고도를 이용하여 최대 고도각을 산출하며 이들을 연결하여 sky line으로 설정하였다.

3차원 카메라는 관측 위치를 중심으로 360° 방위에 대하여 천정으로부터 110°까지 촬영된다. 촬영된 이미지는 직교좌표로 저장되어 어안렌즈의 기하학적인 구조를 수치적으로 계산하기 위해 식(1)과 (2)를 이용해 구면좌표계로 변환하였다.

$$\phi = \tan^{-1} \frac{y}{x} \quad (1)$$

$$\alpha = \cos^{-1} \frac{z}{r} \quad (2)$$

여기서 x , y 는 이미지에서 화소별 위치정보이고 r 은 이미지의 화소간 거리($=\sqrt{x^2+y^2+z^2}$), α 는 고도각($=90^\circ$ -천정각), ϕ 는 방위각이다. 화소별 R, G, B 색 정보를 이용하여 하늘과 지형지물을 분리하여 경계면을 연결하여 sky line으로 설정하였다. 본 연구의 하늘과 지형지물의 분리는 $(R+G+B)/3 < 70$ 을 주변지형지물로 설정하였으며 방위각별 천정(이미지의 중심점)으로부터 천정각을 증가시켜 최초로 찾은 화소의 천정각을 지형지물의 고도각($\alpha=90^\circ-\theta$)으로 설정하였고 이들을 연결하여 sky line으로 선정하였다. 이미지 속 하늘과 지형지물의 분리는 흐린 날 또는 태양의 고도가 낮아 지형지물이 밝게 나타날 경우에는 하늘화소로 오탐지되는 경우가 있기 때문에 이미지와 산출된 sky line을 비교하여 최종 결정하였다.

산출된 방위각(ϕ)별 sky line의 천정각($\theta=90^\circ-\alpha$)을 이용하여 SVF를 산출하였다(Bernard et al., 2018).

$$SVF = \int_{\phi=0}^{2\pi} \sin^2 \theta d\phi \quad (3)$$

여기서 산출되는 SVF는 관측지점을 기준으로 반구영역에 대하여 하늘이 차지하는 비율을 의미하며 1이면 지형지물에 의하여 하늘면적이 가려지지 않음을 의미하고 0에 가까워질수록 지형지물이 하늘을 가리는 면적이 증가하는 것을 의미한다. 산출된 sky line을 천기도와 같이 이용하면 지형에 의한 태양의 차폐를 확인하는 데 이용될 수 있다. 즉, 태양의 경로상에 sky line이 위치하여 sky line 아래로 태양이 위치하면 관측지점에 일사가 도달하지 않음을 의미한다. 그리고 주변지형이 태양을 직접적으로 차폐하지 않으나 SVF가 감소할수록 태양으로부터 산란되어 관측지점에 도달하는 일사는 감소하게 된다. 따라서 산출된 sky line과 SVF는 태양복사모델에 적용하여 정량적인 일사량의 감소를 분석할 수 있다.

2.2.2 천기도 작성을 통한 관측환경 분석

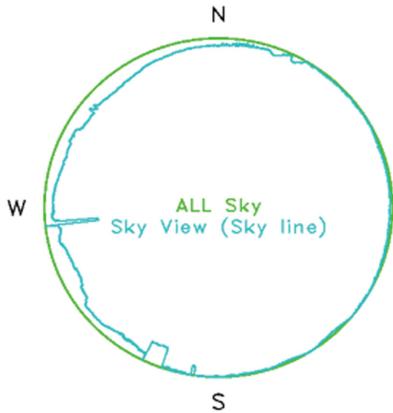
관측소 위치정보를 알고 있다면 관측지점에서 시간에 따른 태양의 경로(천기도)를 산출할 수 있다. 천기도는 관측소 위치에서 일출과 일몰의 시간 그리고 시간별 태양의 위치를 나타낼 수 있고 천기도와 2.2.1의 sky line 산출결과를 중첩하면 일사의 차폐시간 분석이 가능하다. 천기도에 나타난 태양의 위치와 sky line의 고도를 이용하면 연중 직달 일사의 차폐를 분석할 수 있으며 천기도 계산시 시간간격을 줄여 조밀하게 계산하면 정확한 시각과 위치를 분석할 수 있다.

2.2.3 태양복사모델을 이용한 일사량 산출

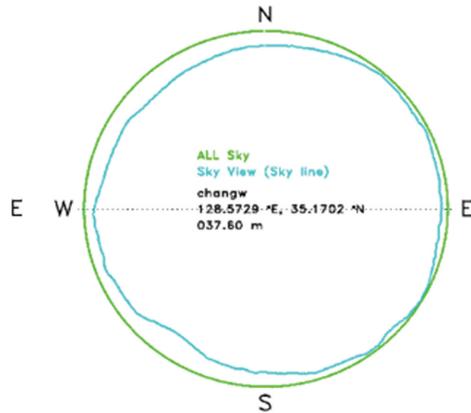
2.2.1과 2.2.2절의 결과를 태양복사모델에 적용하면 정량적인 일사량을 산출 및 분석이 가능하다. 지표면에 도달하는 일사량을 계산하기 위하여 GWNU 단층복사모델(Zo et al., 2014)을 사용하였다. 이 모델은 단일기층의 대기를 가정하였고 관측소의 지리적인 위치 정보(위도, 경도, 고도), 태양 천정각, 기온, 기압, 지표면 알베도, 오존전량, 가강수량, 에어로졸 광학두께 그리고 운량을 입력자료로 이용한다(Jee et al., 2010; Zo et al., 2014; Park et al., 2017). 관측소의 복사관측에 대한 분석을 위하여 이상적인 상태를 가정하여 정량적 분석을 하였다. 기온(288.15 K), 기압(1010 hPa), 오존전량(0.35 cm-atm), 가강수량(0.25 cm-atm), 에어로졸 광학두께(0.1) 그리고 구름(30%)은 단일값으로 모든 관측소에 동일하게 적용하여 1분 간격으로 일사량을 모의하여 분석을 수행하였다. 그리고 관측소별 DEM과 3차원 카메라로 촬영된 이미지를 이용하여 산출된 sky line과 SVF를 적용하여 지형 및 인공구조물의 차폐효과를 적용하였다. 즉, 기상 변수들에 따른 지표면 일사량 변화를 제외하고 오직 지형효과의 영향을 분석하기 위해 차폐영향만을 시간에 따라 변화시켰다. 따라서 계산과정에서 반복적으로 태양의 방위

Changwon(155)

a) Sky line (3D camera)

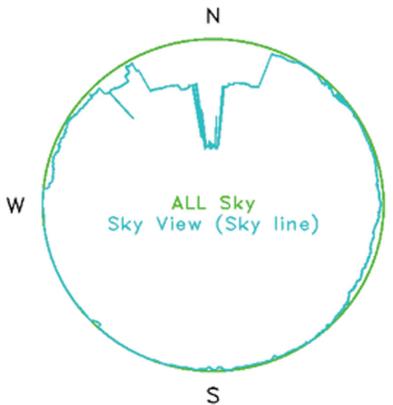


b) Sky line (DEM)



Gwangju (156)

c) Sky line (3D camera)



d) Sky line (DEM)

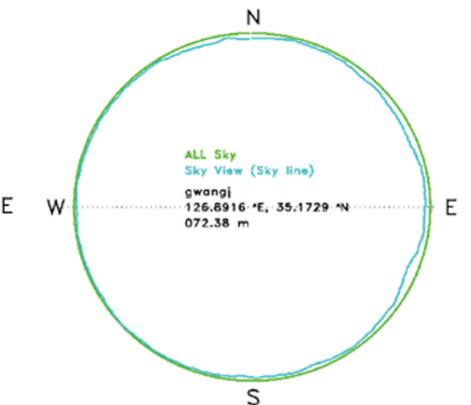


Fig. 4. Sky view image and sky line by 3D camera and sky line by DEM at Changwon (155) and Gwangju (156).

각과 태양고도각을 계산하며 sky line보다 낮은 태양 고도각이면 직달 일사량은 0이 된다. 그리고 산란 일사량은 하늘의 열린 공간을 통하여 관측위치(계산지점)에 도달하며 SVF를 가중하여 계산된다. 따라서 지형이 고려된 일사량(I_{topo})은 평탄 지형에서 계산된 직달 일사량(I_{dr})과 산란 일사량(I_{df})을 이용하여 계산한다.

$$I_{topo} = sl(\theta, \phi)I_{dr}\cos\theta + SVF I_{df} \quad (4)$$

여기서 $sl(\theta, \phi)$ 은 태양 천장각(θ)과 방위각(ϕ)에 따른 지형의 차폐(0 또는 1)이며 2.2.1과 2.2.2절에서 산출되는 sky line의 함수이다.

GWNU 단층 복사 모델을 이용하여 주변 지형의 영

향 유무를 고려한 일사량을 산출하였고 관측소별 관측환경과 연관지어 분석하였다.

3. 결 과

Figure 4는 Table 1에서 언급된 3차원 카메라 촬영 이미지 중 차폐가 큰 관측소인 창원과 광주 관측소의 이미지와 sky line 산출결과이다. 창원(155)의 경우 서쪽을 중심으로 산악이 높게 위치하여 고도각이 약 20°에 이르렀다. 그리고 광주(156)는 북쪽으로 아파트와 건물의 차폐의 고도각이 20°에 가까웠고 관측타워와 구조물이 약 70°까지 차폐를 나타내었다. 비록 직달

일사에는 영향을 미치지 않으나 산란 일사의 감쇄 또는 흰색 벽면의 반사로 인하여 직달 일사를 증가시킬 수 있을 것으로 분석된다. 3차원 카메라로 촬영된 이미지를 분석하였을 때 대부분의 관측지점에서 좁지만 비교적 높은 안테나 또는 철탑 등의 차폐가 발생하였으며 한반도의 복잡한 지형을 반영하듯 일정 고도 이상의 차폐를 일으키는 지형 또는 인공구조물이 위치하고 있다. 이미지를 이용하여 산출된 sky line은 비교적 정확하게 산출되었으나 관측탑의 구조물 사이 또는 인공구조물의 하부를 통하여 하늘을 볼 수 있는 공간이 있지만 산출 알고리즘으로 인하여 하늘 영역으로 판별되지 못하는 문제가 나타난다. DEM을 이용하였을 때 주변 지형에 의한 차폐는 3차원 카메라와 유사하였으나 인공구조물의 반영은 전혀 나타나지 않음을 알 수 있다. 특히 광주의 가까운 위치에 설치되어 있는 관측탑과 관측장비는 복사관측환경에 중요한 오차를 유발할 수 있다. 따라서 DEM을 이용하여 지형의 차폐를 계산할 수 있으나 이미지 또는 사진 등의 촬영자료를 이용하여 비교가 수반되어야 할 것으로 사료된다.

Table 2는 14개 관측지점의 DEM을 이용하여 산출된 sky line과 SVF 산출결과를 3D 카메라 이미지로 산출된 값과 비교하여 정리하였다. 모든 관측소에서 3차원 카메라로 촬영한 이미지의 sky line이 높게 나타났으며 최댓값은 광주에서 평균 7.208° 높았다. 3차원 카메라의 SVF 최댓값은 전주(146; 0.970)이고 최소값은 안동(136; 0.890)이었으며 주변 차폐가 없는 관측환경은 전주가 가장 좋은 위치이며 안동과 광주는 주변 시설물과 관측장비의 차폐가 나타나 관측위치 또는 관측기 높이 변경이 필요하다. DEM의 SVF 최댓값은 인천(112; 1.000)이었으나 주변 시설물

Table 2. Summary of sky line and SVF retrieved from 3D camera and DEM for KMA station.

ID	Difference of Sky line (DEM - 3D camera)		SVF	
	Max (Min)	Mean	3D camera	DEM
093	5.07(-20.70)	-0.519	0.935	0.992
104	2.50(-33.00)	-2.014	0.962	0.998
112	0.59(-30.17)	-3.744	0.952	1.000
131	1.26(-31.48)	-3.467	0.940	0.999
133	1.39(-50.73)	-2.780	0.938	0.998
136	1.82(-39.13)	-5.260	0.890	0.998
143	2.62(-29.90)	-1.955	0.943	0.998
146	2.90(-24.62)	-1.827	0.970	0.999
155	6.96(-23.22)	-0.422	0.926	0.987
156	1.72(-65.50)	-7.208	0.894	0.999
159	5.10(-61.50)	-1.725	0.933	0.993
165	2.01(-50.72)	-4.260	0.927	0.999
184	5.31(-45.92)	-2.708	0.940	0.998
185	0.62(-30.10)	-3.666	0.956	1.000

에 의한 차폐가 비교적 높은 지점이었고 최소값은 창원(155; 0.987)으로서 관측소 주변지형의 차폐가 큰 것으로 분석된다. 따라서 DEM에서 나타난 SVF는 3차원 카메라에서도 나타났고 더불어 주변 인공구조물에 의한 차폐가 가중되었다. 또한 지형자체에 의한 차폐가 작은 관측소에서도 주변 인공구조물이 인접하여 설치되었거나 관측고도가 낮은 곳에서는 차폐가 비교적 크게 발생되었다.

Figure 5는 창원과 광주의 천기도와 sky line을 나타낸 것이다. 각 선들은 시간에 따른 태양의 경로를 의미하며 보라색 선들은 시간대의 연중 태양의 위치

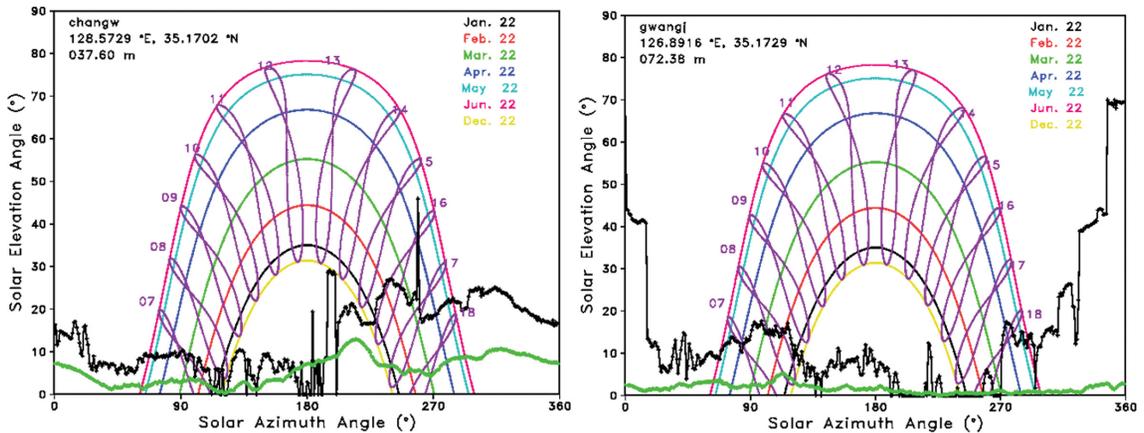
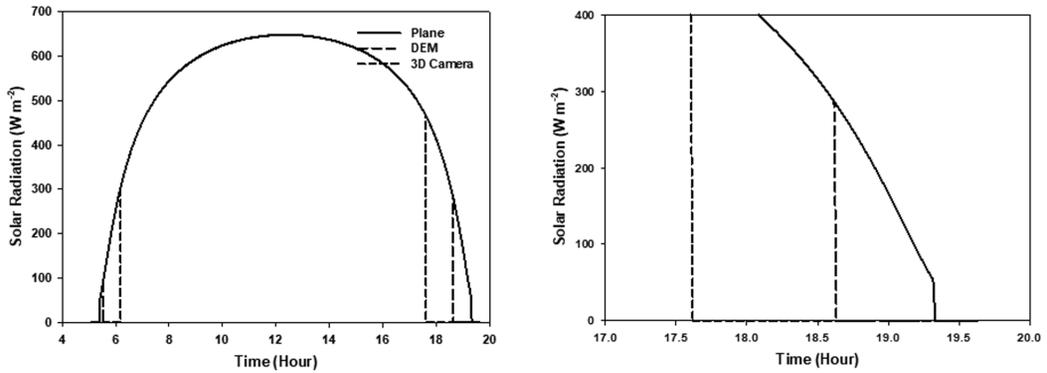
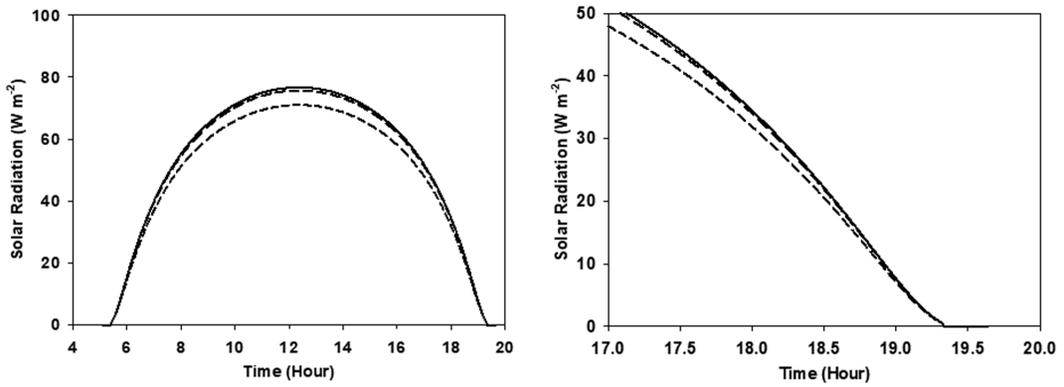


Fig. 5. Solar map with skyline by 3D camera and DEM at Changwon (155) and Gwangju (156). Thin lines represent solar path with time and thick black and green lines represent sky line retrieved from 3D camera and DEM, respectively.

a) Direct Solar Radiation



b) Diffuse Solar Radiation



c) Global Solar Radiation

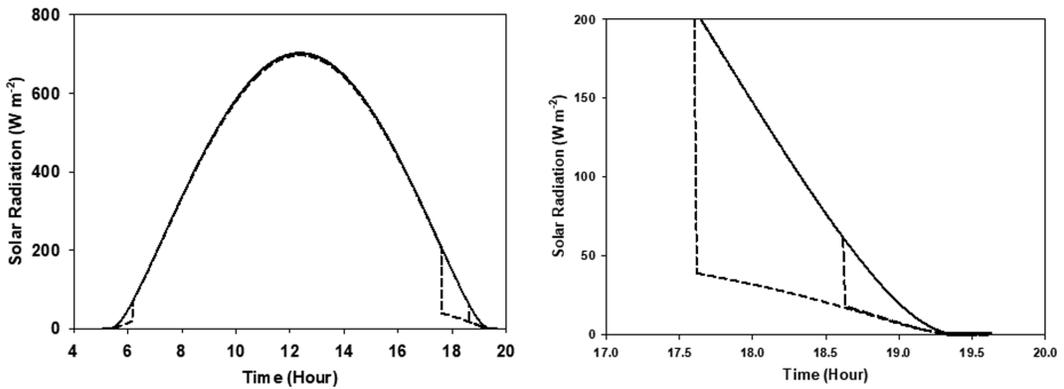
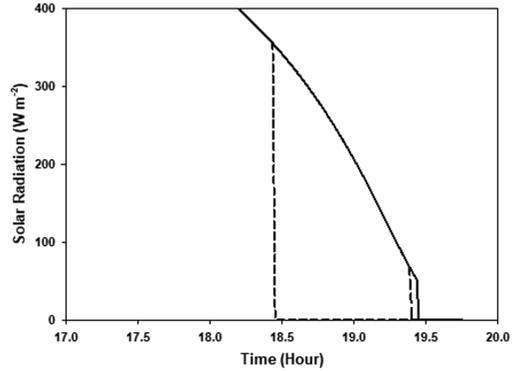
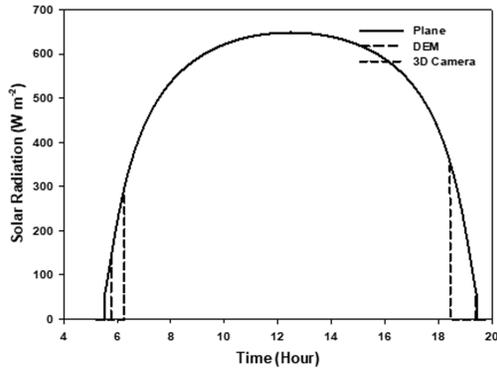


Fig. 6. Solar radiation with and without topographic shading using GWNU solar radiation model on Changwon (155) for May 22. With and without topographic shading calculated using 3D camera (SVF = 0.926), DEM (SVF = 0.987) and plane surface (SVF = 1.000).

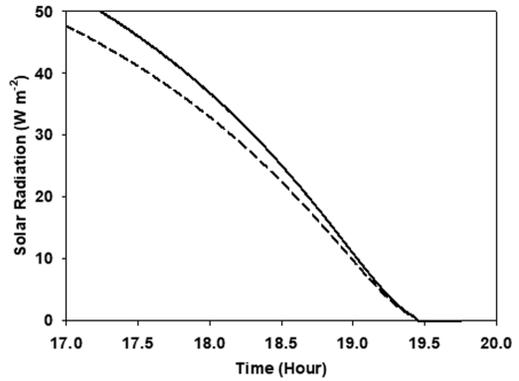
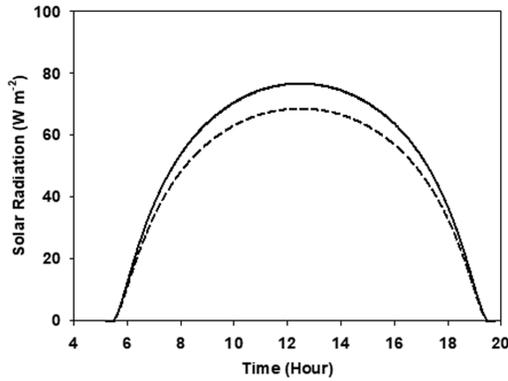
를 연결한 것이다. 즉 6월 22일(하지) 선을 보면 태양의 고도가 가장 높게 위치하고 12월 22일(동지) 선은 가장 아래쪽에 위치함을 볼 수 있다. 또한 태양의 고

도각이 0°를 기준으로 보면 일별 일출 시각을 볼 수 있다. 다시 말해, 하지의 일출 시간이 가장 빠르고 동지의 일출 시간이 가장 느린 것을 보여준다. 시간대

a) Direct Solar Radiation



b) Diffuse Solar Radiation



c) Global Solar Radiation

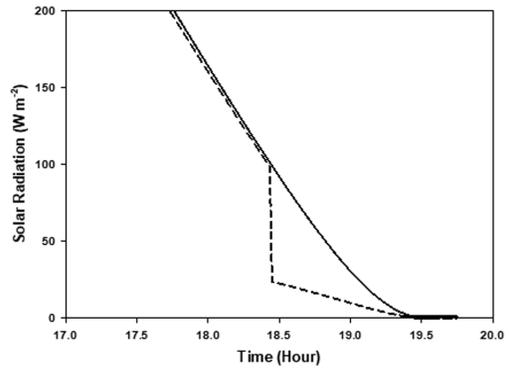
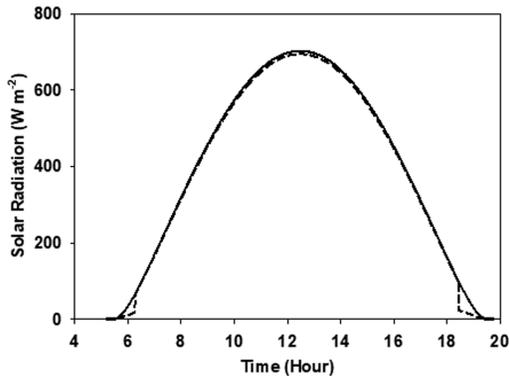
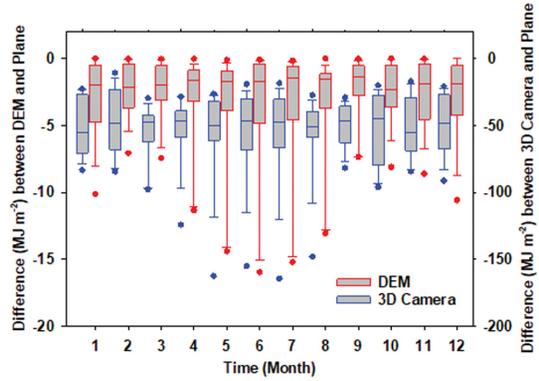
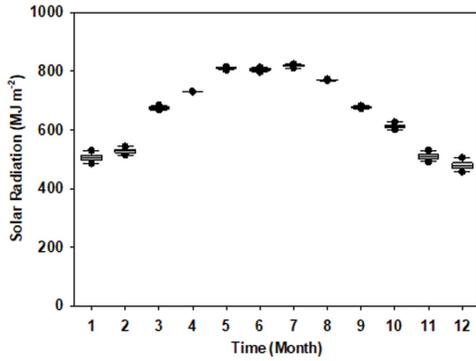


Fig. 7. Same as Fig. 6 except for Gwangju (156) site. With and without topographic shading calculated using 3D camera (SVF = 0.894), DEM (SVF = 0.999) and plane surface (SVF = 1.000).

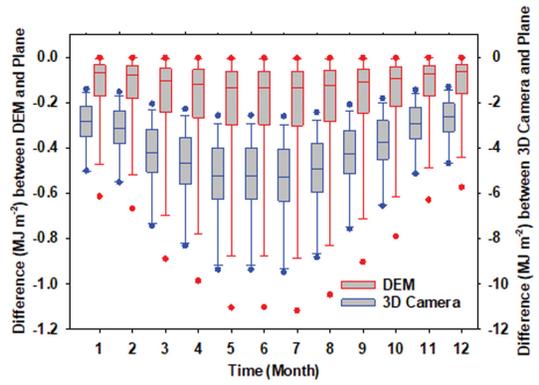
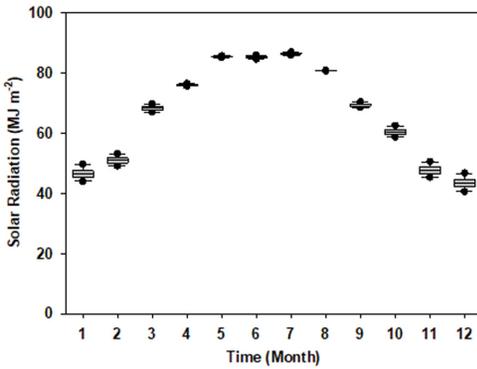
별 태양의 고도각도 12시 선을 보면 하지와 동지 사이에 태양의 고도각은 40° 이상 차이가 나타나는 것을 볼 수 있다. 태양과 지구 사이의 이심률로 인하여 동일 시각의 태양의 위치는 1년을 주기로 위치가 변

화한다. 그림의 아래쪽에 위치한 두꺼운 검은색과 녹색 선은 각각 3차원 카메라와 DEM의 sky line을 의미한다. Sky line들은 전체적으로 유사한 분포를 나타내고 있으나 검은색 선은 일부 방위각에서 높은 태양

a) Direct Solar Radiation



b) Diffuse Solar Radiation



c) Global Solar Radiation

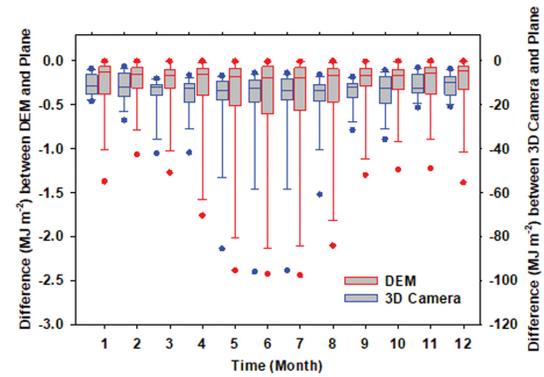
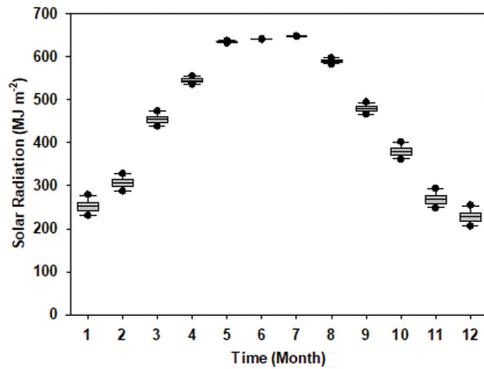


Fig. 8. Boxplot of monthly solar radiation without topographic shading on 14 KMA solar radiation sites. And boxplot of difference of solar radiation with DEM and 3D camera against plane surface.

고도각까지 위치하는 것을 볼 수 있다. 이것은 관측소 내의 인공구조물에 의한 차폐로 나타나는 sky line이다. 창원에서 sky line의 고도각이 높은 선을 볼 수 있는데 이는 관측소 내의 안테나이며 5월의 일몰시간

대에 일사를 차폐하는 것으로 보인다. 그리고 광주의 북쪽에 위치한 관측타워와 인접 관측장비는 태양의 경로를 벗어나 위치하기 때문에 직달 일사의 차폐는 없으나 벽면이 흰색으로 도포되어있고 인접해 있어

Table 3. Summary of difference between DEM and 3D Camera and plane surface for monthly accumulated direct solar radiation (I_{dr_topo}). Mean, Max and Min represent average, maximum and minimum values and ID means station id.

Month	DEM-Plane (MJ m^{-2})			3D Camera-Plane (MJ m^{-2})		
	Mean	Max(ID)	Min(ID)	Mean	Max(ID)	Min(ID)
1	-2.817	-10.157(155)	0.000(185)	-50.024	-83.521(143)	-22.815(104)
2	-2.258	-7.079(155)	-0.033(112)	-47.157	-84.522(136)	-10.749(104)
3	-2.281	-7.456(155)	-0.048(112)	-54.867	-97.814(136)	-29.659(159)
4	-2.953	-11.362(093)	-0.034(112)	-52.253	-124.358(184)	-28.715(146)
5	-3.681	-14.427(155)	-0.121(112)	-55.075	-162.663(184)	-26.448(143)
6	-3.934	-15.985(093)	-0.093(112)	-55.551	-155.320(184)	-19.277(104)
7	-3.813	-15.217(093)	-0.163(112)	-54.775	-164.605(184)	-18.517(104)
8	-3.388	-13.068(155)	-0.006(112)	-56.013	-148.247(184)	-27.416(146)
9	-2.207	-7.353(155)	-0.036(112)	-50.376	-81.852(155)	-29.174(159)
10	-2.418	-8.109(155)	0.000(185)	-51.927	-96.202(136)	-20.143(104)
11	-2.628	-8.626(155)	-0.016(112)	-49.782	-84.462(136)	-17.136(104)
12	-2.747	-10.601(155)	0.000(112)	-49.176	-91.421(143)	-20.973(185)

일사의 반사가 나타나 일사량관측에 오차를 유발할 것으로 분석된다.

Figure 6와 7은 창원과 광주의 5월 22일 일사량 모의결과이다. 창원은 일몰시 주변 지형에 의하여 차폐가 비교적 크게 나타났고 광주는 3차원 카메라 이미지의 SVF가 가장 작게 나타나는 지점이다. 창원은 지형효과가 없는 일사량과 비교하여 일몰 시 약 1시간 이상 빠르게 직달 일사가 차폐되어 500 W m^{-2} 의 일사량이 차폐된 것을 볼 수 있다. 그리고 산란 일사는 SVF에 의존적이기 때문에 3차원 카메라(0.926)와 DEM(0.987)에 의한 일사량 차이는 거의 나타나지 않았다. 따라서 창원은 직달 일사에 의한 일사량에 의존적으로 전천 일사량이 나타나게 되고 17시 40분경 전천 일사량의 급격한 감소가 나타났다. 반면 광주의 경우에는 일몰 시 상대적으로 낮은 sky line이었으나 3차원 카메라와 DEM의 sky line 차이로 인하여 지형의 차폐가 없을 때와 비교하여 1시간(3차원 카메라)과 5분(DEM) 이전에 직달 일사의 차폐가 나타났다. 또한 SVF 차이가 비교적 뚜렷하게 나타나고 있어(3차원 카메라: 0.894, DEM: 0.999) 3차원 카메라의 경우 산란 일사량의 차이는 정오에 5 W m^{-2} 가까이 나타났다. 산란 일사량은 직달 일사량과 비교하여 차이가 작기(약 1/10) 때문에 전천 일사량의 차이는 창원과 유사하게 일몰시 직달 일사량에 의존적으로 나타나고 있다.

Figure 8은 14개 관측지점의 월누적 일사량을 요소별로 나타낸 것이다. 월누적 일사량 계산은 지형의 차폐가 없는 수평면일 때를 기준으로 DEM과 3차원 카메라를 이용하여 산출된 sky line 고도와 SVF를 적용하여 시간별 일사량을 계산하였고 이를 월별 누적하여 비교하였다. 지점에 따라 차이는 있으나 대체로 태

양의 고도각이 낮은 겨울철에 지점별 일사량은 뚜렷한 차이가 나타나기 때문이다. 이는 태양의 고도각이 높은 여름철에는 대체로 비슷한 일사량이 차폐없이 지표면에 도달하나 겨울철에는 낮은 태양고도각으로 인하여 지형의 차폐가 크게 나타났다. 그러나 상대적으로 일사량이 큰 여름철에 일출과 일몰시 지형의 차폐는 상대적으로 큰 편차를 나타내었다. Figure 8a)에서 보이는 것과 같이 겨울철(12월부터 2월 사이) 지점에 따라 일사량 편차는 상대적으로 크게 나타나고 있으며 수평면에 도달하는 일사량과 DEM과 3차원 카메라의 지형고도 의한 편차로 나타내었을 때 상대적으로 일사량이 큰 여름철(5월에서 8월 사이)의 편차가 크게 나타나고 있다. 즉, 연중 3차원 카메라의 지형효과는 DEM의 지형효과보다 평균 20배 이상 크게 나타나고 있으며 상대적으로 일사량이 큰 여름철의 일사량 편차가 최대 150 MJ m^{-2} 이상 나타나고 있어 겨울철과 비교하여 1.5배 이상 일사량의 편차가 나타난다. 그러나 상대적으로 겨울철 일사량이 작기 때문에 일사의 차폐효과는 겨울철이 크다. 산란 일사와 전천 일사 모두 겨울철에 지점별 일사량의 차이가 크게 나타나고 있으며 일사량의 편차는 여름철에 크게 나타나고 있으나 상대적인 차폐효과는 겨울철이 큰 것으로 분석된다.

월별 DEM과 3차원 카메라에 의한 지형효과(지형 차폐 고려-수평면 일사량)를 Table 3~5에 일사량 요소별로 정리하였다. 직달 일사량은 지점별 주변 지형의 차폐에 따라 편차가 뚜렷하게 나타나고 있고 산란 일사량은 SVF에 의존적으로 나타나고 있다. 즉, SVF가 작은 지점에서 산란 일사량의 편차가 크게 나타나고 있고 직달 일사량에 의존적인 전천 일사량은 직달 일사량과 유사한 지점에서 최대, 최소값이 나타나고 있다.

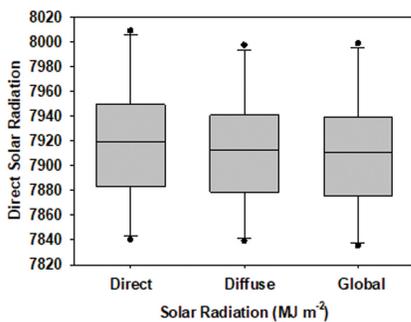
Table 4. Same as Table 3 except for diffuse solar radiation (I_{df_topo}).

Month	DEM-Plane (MJ m ⁻²)			3D Camera-Plane (MJ m ⁻²)		
	Mean	Max(ID)	Min(ID)	Mean	Max(ID)	Min(ID)
1	-0.134	-0.615(155)	-0.002(112)	-2.977	-5.014(156)	-1.402(146)
2	-0.147	-0.669(155)	-0.002(112)	-3.262	-5.527(136)	-1.536(146)
3	-0.197	-0.891(155)	-0.003(112)	-4.363	-7.441(136)	-2.056(146)
4	-0.219	-0.988(155)	-0.003(112)	-4.858	-8.325(136)	-2.289(146)
5	-0.247	-1.106(155)	-0.004(112)	-5.456	-9.379(136)	-2.571(146)
6	-0.246	-1.105(155)	-0.004(112)	-5.450	-9.381(136)	-2.569(146)
7	-0.250	-1.120(155)	-0.004(112)	-5.526	-9.506(136)	-2.605(146)
8	-0.233	-1.049(155)	-0.004(112)	-5.157	-8.85(136)	-2.431(146)
9	-0.201	-0.905(155)	-0.003(112)	-4.436	-7.583(136)	-2.090(146)
10	-0.175	-0.792(155)	-0.003(112)	-3.864	-6.566(136)	-1.820(146)
11	-0.138	-0.630(155)	-0.002(112)	-3.054	-5.150(136)	-1.438(146)
12	-0.125	-0.574(155)	-0.002(112)	-2.776	-4.685(156)	-1.307(146)

Table 5. Same as Table 3 except for global solar radiation (I_{dg_topo}).

Month	DEM-Plane (MJ m ⁻²)			3D Camera-Plane (MJ m ⁻²)		
	Mean	Max(ID)	Min(ID)	Mean	Max(ID)	Min(ID)
1	-0.275	-1.374(155)	-0.003(112)	-11.051	-18.429(165)	-3.625(104)
2	-0.243	-1.064(155)	-0.003(112)	-11.914	-27.045(136)	-2.684(104)
3	-0.286	-1.272(155)	-0.004(112)	-15.412	-42.197(136)	-8.081(159)
4	-0.381	-1.761(155)	-0.004(112)	-15.196	-41.788(184)	-6.518(146)
5	-0.481	-2.388(155)	-0.005(112)	-18.209	-85.621(184)	-6.722(146)
6	-0.517	-2.430(155)	-0.006(112)	-18.786	-96.138(184)	-5.496(104)
7	-0.506	-2.442(155)	-0.006(112)	-18.573	-95.494(184)	-5.512(104)
8	-0.431	-2.105(155)	-0.004(112)	-17.122	-60.868(184)	-6.251(146)
9	-0.295	-1.300(155)	-0.005(112)	-14.328	-31.556(136)	-7.209(146)
10	-0.272	-1.236(155)	-0.003(112)	-13.918	-35.759(136)	-4.273(104)
11	-0.264	-1.226(155)	-0.002(112)	-11.343	-21.246(136)	-3.132(104)
12	-0.261	-1.387(155)	-0.002(112)	-10.779	-20.825(155)	-3.740(185)

a) Annual Accumulated Solar Radiation



b) Difference of Solar Radiation

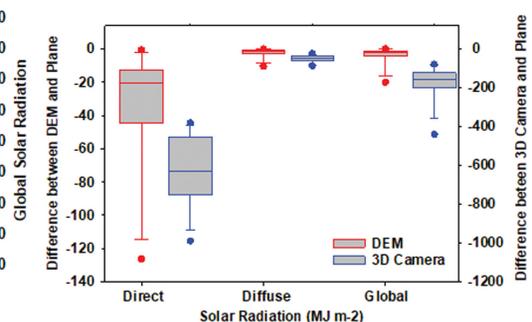


Fig. 9. Same as Fig. 8 except for annual solar radiation.

Figure 9에 연누적 일사량 분석결과를 나타내었다. 수평면 일사량의 지점별 최대 및 최소값 차이는 직달,

산란 및 전천 일사량순으로 160 MJ, 25 MJ, 300 MJ 이상으로 나타났다. 이는 지점의 지리적인 위치인 위

Table 6. Summary of difference between DEM and 3D Camera and plane surface for annual accumulated direct (I_{dr_topo}), diffuse (I_{df_topo}) and global (I_{dg_topo}) solar radiation. Mean, Max. and Min. represent average, maximum and minimum values and ID means station id.

	DEM - Plane			3D Camera - Plane		
	I_{dr_topo}	I_{df_topo}	I_{dg_topo}	I_{dr_topo}	I_{df_topo}	I_{dg_topo}
Mean	-35.13	-2.31	-4.26	-627.02	-51.17	-176.70
Max.	-126.26(155)	-10.45(155)	-20.07(155)	-990.13(184)	-87.36(136)	-439.90(184)
Min.	-0.63(112)	-0.04(112)	-0.05(112)	-381.80(104)	-24.10(136)	-79.36(104)

도 차이에 의한 것으로 분석된다. 지형의 차폐를 살펴보기 위하여 수평면 일사량과 DEM과 3차원 카메라에 의한 편차를 계산하였을 때 직달 일사량의 경우 지점들의 평균 일사량은 -20 MJ과 -650 MJ로 3차원 카메라 이미지로 산출된 지형의 차폐가 30배 이상 크게 나타나고 있다. 지점별 최대 일사량 편차는 -126 MJ(155; 창원)과 -990 MJ(184; 제주)로 나타났다. 산란 일사량은 상대적으로 작은 값으로 직달 일사량의 10% 미만의 편차로 나타난다. 전천 일사량은 직달 일사량의 차폐에 의존적으로 나타나고 있어 직달 일사량과 동일한 지점에서 최대 편차가 나타나고 있다.

연누적 일사량의 평균, 최대, 최소 및 지점을 정리하면 Table 6과 같다. 인공구조물이 없는 지형고도만을 이용하여 계산하였을 때 14개소의 일사량 편차의 평균은 4.26 MJ이며 최대 20.07 MJ로 겨울철 맑은 날 일누적 일사량에 해당되는 정도였다. 그러나 3차원 카메라 이미지를 이용하여 계산된 전천 일사량의 편차는 평균 176.70 MJ과 최대 439.90 MJ이다. 이는 일 누적 일사량을 26 MJ로 가정하였을 때 14개소의 일사량은 연간 평균 7일 그리고 최대인 지점(155; 창원)은 17.5일 동안 주변 지형 또는 인공구조물에 의하여 차폐되는 것으로 분석되었다.

4. 요약 및 제언

본 연구에서는 기상청 14개소 일사량 관측소 주변의 수치표고모델(DEM)과 하늘이미지자료(3차원 카메라)를 이용하여 관측소의 관측환경을 분석하였다. 관측소 주변 지형고도와 하늘이미지자료를 이용하여 주변 지형과 인공구조물에 sky line 고도와 SVF를 계산하였으며 천기도와 중첩하여 연중 태양 복사의 차폐를 분석하였다. 또한 DEM과 3차원 카메라 이미지에서 산출된 지형의 고도와 SVF를 단층 태양복사모델에 적용하여 이론적인 시간별, 월누적 및 연누적 일사량을 계산하여 지형에 의한 차폐효과를 분석하였다.

Sky line 고도를 천기도와 중첩하였을 때 창원관측소의 경우 Sky line 고도각이 높아 5월의 일출과 일몰시간에 직달 일사의 차폐를 확인할 수 있었고 광주

관측소의 경우 직접적인 직달 일사의 차폐는 약하였으나 북쪽에 위치한 관측타워와 관측장비가 인접해 있기 때문에 일사의 반사가 나타나 일사량 관측에 오차를 유발할 것으로 분석되었다.

창원과 광주의 5월 22일 복사모델을 이용하여 일사량 모의한 결과, 창원은 지형효과가 없는 일사량과 비교하여 일몰시 약 1시간 이상 빠르게 직달 일사가 차폐되어 500 W m^{-2} 의 일사량이 차폐되었고 산란 일사는 3차원 카메라(0.926)와 DEM(0.987)에 의한 일사량 차이는 거의 나타나지 않았다. 반면 광주관측소의 경우 일몰시 상대적으로 낮은 sky line이었으나 3차원 카메라와 DEM의 sky line차이로 인하여 지형의 차폐가 없을 때와 비교하여 1시간(3차원 카메라)과 5분(DEM) 이전에 직달 일사의 차폐가 나타났다.

월 누적 일사량 결과에서 일년 내내 3차원 카메라의 지형효과는 DEM의 지형효과보다 평균 20배 이상 크게 나타나고 있으며 상대적으로 일사량이 큰 여름철(5월에서 8월 사이)의 일사량의 편차가 최대 150 MJ m^{-2} 이상 나타나고 있어 겨울철과 비교하여 1.5배 이상 일사량의 편차가 나타났다. 그러나 상대적으로 겨울철 일사량이 작기 때문에 일사의 차폐효과는 겨울철이 큰 것으로 분석되었다. 연누적 일사량의 경우 인공구조물이 없는 지형고도만을 이용하여 계산하였을 때 14개소의 일사량편차의 평균은 4.26 MJ이며 최대 20.07 MJ로 겨울철 맑은 날 일누적 일사량 이하의 차폐가 나타났다. 그러나 3차원 카메라 이미지를 이용하여 계산된 전천 일사량의 편차는 평균 176.70 MJ과 최대 439.90 MJ였다. 이는 일 누적 일사량을 26 MJ로 가정하였을 때 14개소의 일사량이 주변 지형 또는 인공구조물에 의하여 평균 7일 그리고 최대인 지점은 17.5일 동안 차폐되는 것으로 분석되었다.

이상의 결과를 통하여 기상청에서 현업운영되고 있는 일사관측소의 일사량 관측환경은 대체적으로 초기 설치시보다 주변의 인공구조물 특히, 아파트, 수목 등의 영향에 의하여 일출 및 일몰시 태양복사를 차폐하고 있다. 인공구조물 등의 영향이 적은 DEM의 경우보다 3차원 카메라 이미지에서 주변의 식생 및 인공구조물(관측탑, 가로등, 구조물 등)에 의한 차폐가 뚜

렸하게 관측되는 것으로 분석되었다. 이러한 환경을 단층 태양복사모델에 입력자료로 적용하였을 때 연누적 일사량의 경우 주변 인공적인 구조물에 의한 일사량의 뚜렷한 변화를 이론적으로 계산되었다. 따라서 이들 결과는 일사관측소의 관측환경의 기초연구로서 관측자료 분석시 자료처리 그리고 관측자료 분석의 기초자료로 활용이 가능하다. 그러나 이론적인 복사모델을 활용하였기 때문에 추가적인 관측자료 분석이 필요하다. 계산된 일사량 결과에 따르면 일사관측소 관측자료 및 관측환경에 대한 세밀하고 추가적인 분석이 필요하다. 즉, 일사량 관측자료에서 이론적인 계산 결과와 동일한 지형차폐가 확인된다면 관측소 이전 또는 관측장비의 이동설치 등 관측환경 개선이 필요한 것으로 사료된다.

감사의 글

이 논문은 2017년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(No. NRF-2017R1D1A3B03034467)입니다. 그리고 이 연구는 기상청 <기상·지진See-At기술개발연구>(KMI2018-05910)의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- Almorox, J., M. Bocco, and E. Willington, 2013: Estimation of daily global solar radiation from measured temperatures at Cañada de Luque, Córdoba, Argentina. *Renew. Energ.*, **60**, 382-387, doi:10.1016/j.renene.2013.05.033.
- Arthur, R. S., K. A. Lundquist, J. D. Mirocha, and F. K. Chow, 2018: Topographic effects on radiation in the WRF model with the immersed boundary method: implementation, validation, and application to complex terrain. *Mon. Wea. Rev.*, **146**, 3277-3292, doi:10.1175/MWR-D-18-0108.1.
- Bernard, J., E. Bocher, G. Petit, and S. Palominos, 2018: Sky View Factor calculation in urban context: Computational performance and accuracy analysis of two open and free GIS tools. *Climate*, **6**, 60, doi:10.3390/cli6030060.
- Bessafi, M., and Coauthors, 2018: Multifractional analysis of daily global horizontal radiation in complex topography island: La Reunion as a case study. *J. Sol. Energy Eng.*, **141**, 031005, doi.org/10.1115/1.4041404.
- Hassan, G. E., M. E. Youssef, M. A. Ali, Z. E. Mohamed, and A. I. Shehata, 2016: Performance assessment of different day-of-the-year based models for estimating global solar radiation-case study: Egypt. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.*, **149**, 69-80, doi:10.1016/j.jastp.2016.09.011.
- Jamil, B., and N. Akhtar, 2017: Estimation of diffuse solar radiation in humid-subtropical climatic region of India: comparison of diffuse fraction and diffusion coefficient models. *Energy*, **131**, 149-164, doi:10.1016/j.energy.2017.05.018.
- Jee, J.-B., and Y.-J. Choi, 2014: Conjugation of landsat data for analysis of the land surface properties in Capital Area. *J. Kor. Earth Sci. Soc.*, **35**, 54-68 (in Korean with English abstract).
- _____, Y.-D. Kim, W.-H. Lee, and K.-T. Lee, 2010: Temporal and spatial distributions of solar radiation with surface pyranometer data in South Korea. *J. Kor. Earth Sci. Soc.*, **31**, 720-737 (in Korean with English abstract).
- _____, I.-S. Zo, and K.T. Lee, 2013: A study on the retrievals of downward solar radiation at the surface based on the observations from multiple geostationary satellites. *Kor. J. Remote Sens.*, **29**, 123-135 (in Korean with English abstract).
- _____, M. Jang, J.-S. Min, I.-S. Zo, B.-Y. Kim, and K.-T. Lee, 2017: Estimation of solar energy based on high-resolution digital elevation model on the Seoul area. *Atmosphere*, **27**, 331-344 (in Korean with English abstract).
- _____, I.-S. Zo, B.-Y. Kim, K.-T. Lee, and J.-P. Jang, 2019a: Analysis of observation environment with sky line and skyview factor using Digital Elevation Model (DEM), 3-Dimensional camera image and radiation transfer model at radiation site, Gangneung-Wonju National University. *Atmosphere*, **29**, 61-74 (in Korean with English abstract).
- _____, _____, _____, and _____, 2019b: An analysis of observational environments for solar radiation stations of Korea Meteorological Administration using the digital elevation model and solar radiation model. *J. Kor. Earth Sci. Soc.*, **40**, 119-134 (in Korean with English abstract).
- Kim, B.-Y., J.-B. Jee, I.-S. Zo, and K.-T. Lee, 2016: Cloud cover retrieved from skyviewer: A validation with human observations. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **52**, 1-10, doi:10.1007/s13143-015-0083-4.
- Lee, W.-L., K.-N. Liou, Y. Gu, C. C. Wang, C. H. Wu, and H. H. Hsu, 2017: Impact of topography-radiation interaction on surface energy budget of the Tibetan Plateau in GCM simulations. *Extended Abstracts, American Geophysical Union Fall meeting 2017*, abstract #A43M-05.

- _____, _____, C.-C. Wang, Y. Gu, H.-H. Hsu, and J.-L. F. Li, 2019: Impact of 3-D radiation-topography interactions on surface temperature and energy budget over the Tibetan Plateau in winter. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **124**, 1537-1549, doi:10.1029/2018JD029592.
- Mehdizadeh, S., J. Behmanesh, and K. Khalili, 2016: Comparison of artificial intelligence methods and empirical equations to estimate daily solar radiation. *J. Atmos. Sol.- Terr. Phys.*, **146**, 215-227, doi:10.1016/j.jastp.2016.06.006.
- Olson, M., and S. Rupper, 2019: Impacts of topographic shading on direct solar radiation for valley glaciers in complex topography. *The Cryosphere*, **13**, 29-40, doi:10.5194/tc-13-29-2019.
- Park, M.-S., S.-H. Park, J.-H. Chae, M.-H. Choi, Y. Song, M. Kang, and J.-W. Roh, 2017: High-resolution urban observation network for user-specific meteorological information service in the Seoul Metropolitan Area, South Korea. *Atmos. Meas. Tech.*, **10**, 1575-1594, doi:10.5194/amt-10-1575-2017.
- Piedallu, C., and J.-C. Gégout, 2008: Efficient assessment of topographic solar radiation to improve plant distribution models. *Agric. Forest Meteorol.*, **148**, 1696-1706.
- Ruiz-Arias, J. A., D. Pozo-Vázquez, V. Lara-Fanego, F. J. Santos-Alamillos, and J. Tovar-Pescador, 2011: A high-resolution topographic correction method for clear-sky solar irradiance derived with a numerical weather prediction model. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **50**, 2460-2472, doi:10.1175/2011JAMC2571.1.
- Sabo, L. M., N. Mariun, H. Hizam, M. A. M. Radzi, and A. Zakaria, 2016: Estimation of solar radiation from digital elevation model in area of rough topography. *World J. Eng.*, **13**, 453-460, doi:10.1108/WJE-08-2016-0063.
- Yi, C., Y. Shin, and S. M. An, 2017: A study on a comparison of sky view factors and a correlation with air temperature in the city. *Atmosphere*, **27**, 483-498 (in Korean with English abstract).
- Zo, I.-S., J.-B. Jee, and K.-T. Lee, 2014: Development of GWNU (Gangneung-Wonju National University) one-layer transfer model for calculation of solar radiation distribution of the Korean peninsula. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **50**, 575-584, doi:10.1007/s13143-014-0047-0.