

## 수치표고모델, 3차원 카메라이미지자료 및 복사모델을 이용한 Sky Line과 Skyview Factor에 따른 강릉원주대학교 복사관측소 관측환경 분석

지준범<sup>1)</sup> · 조일성<sup>1)\*</sup> · 김부요<sup>1)</sup> · 이규태<sup>1),2)</sup> · 장정필<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>강릉원주대학교 복사-위성연구소, <sup>2)</sup>강릉원주대학교 대기환경과학과

(접수일: 2018년 12월 26일, 수정일: 2019년 1월 30일, 게재확정일: 2019년 3월 7일)

### Analysis of Observation Environment with Sky Line and Skyview Factor using Digital Elevation Model (DEM), 3-Dimensional Camera Image and Radiative Transfer Model at Radiation Site, Gangneung-Wonju National University

Joon-Bum Jee<sup>1)</sup>, Il-Sung Zo<sup>1)\*</sup>, Bu-Yo Kim<sup>1)</sup>, Kyu-Tae Lee<sup>1),2)</sup>, and Jeong-Pil Jang<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Research Institute for Radiation-Satellite, Gangneung-Wonju National University, Gangneung, Korea

<sup>2)</sup>Department of Atmospheric and Environmental Sciences, Gangneung-Wonju National University, Gangneung, Korea

(Manuscript received 26 December 2018; revised 30 January 2019; accepted 7 March 2019)

**Abstract** To investigate the observational environment, sky line and skyview factor (SVF) are calculated using a digital elevation model (DEM; 10 m spatial resolution) and 3 dimensional (3D) sky image at radiation site, Gangneung-Wonju National University (GWNU). Solar radiation is calculated using GWNU solar radiation model with and without the sky line and the SVF retrieved from the 3D sky image and DEM. When compared with the maximum sky line elevation from Skyview, the result from 3D camera is higher by 3° and that from DEM is lower by 7°. The SVF calculated from 3D camera, DEM and Skyview is 0.991, 0.998, and 0.993, respectively. When the solar path is analyzed using astronomical solar map with time, the sky line by 3D camera shield the direct solar radiation up to 14° with solar altitude at winter solstice. The solar radiation is calculated with minutely, and monthly and annual accumulated using the GWNU model. During the summer and winter solstice, the GWNU radiation site is shielded from direct solar radiation by the west mountain 40 and 60 minutes before sunset, respectively. The monthly difference between plane and real surface is up to 29.18 MJ m<sup>-2</sup> with 3D camera in November, while that with DEM is 4.87 MJ m<sup>-2</sup> in January. The difference in the annual accumulated solar radiation is 208.50 MJ m<sup>-2</sup> (2.65%) and 47.96 MJ m<sup>-2</sup> (0.63%) with direct solar radiation and 30.93 MJ m<sup>-2</sup> (0.58%) and 3.84 MJ m<sup>-2</sup> (0.07%) with global solar radiation, respectively.

**Key words:** Solar radiation site, observation environment, skyview 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

태양복사(일사)는 지구대기를 순환시키는 근본적인 에너지원으로 대기에 존재하는 구름, 에어로솔, 기체 등에 의하여 흡수 또는 산란되며 지표면으로 흡수 및 반사된다(IPCC, 2013). 이러한 과정에서 높은 고도의 산악이나 빌딩 등의 주변지역에서는 일사가 직접적으로 차단되고 흡수된 일사는 적외복사로 방출되어 적외복사량을 증가시킬 수 있다(Flerchinger et al., 2009). 따라서 일사를 활용하는 연구와 신재생에너지 개발 사업 등에서는 복잡한 지형에 따른 증감효과를 배제하지 않을 수 없다.

초기에 이러한 효과를 고려하기 위한 방법으로 pen-and-ink 방법 등을 이용하여 지형효과를 근사적으로 계산하였다(Hsia and Wang, 1985). 또한 최근에는 지리정보시스템기반의 수치표고모델(DEM, Digital Elevation Model) 자료를 이용하여 고도(altitude), 경사각(slope) 그리고 경사면(aspect) 등을 산출하여 지형이 복사에너지에 미치는 영향을 분석하였다(Dozier and Frew, 1990; Dubayah, 1994; Rich et al., 1994; Dubayah and Rich, 1995; Fu and Rich, 2000; Zo et al., 2014; Jee et al., 2016). 그러나 이 연구들은 지형 고도자료를 분석하여, 태양에너지를 산출하거나 또는 수치모델 수행을 위한 보조자료로만 활용되었다.

특히 일사를 관측하기 위한 복사관측소는 지상에 설치되어 열린 하늘로부터 유입되는 에너지를 관측하기 때문에 주변지형과 인공구조물들에 의한 영향을 받게 된다. 따라서 이러한 효과를 고려하여 영향을 최소화할 수 있는 거점을 선정하여 운영해야 하고 연속적인 관측환경의 모니터링이 필요하다. 이때 주변 지형과 인공구조물은 사람이 직접 육안으로 판단할 수도 있지만, 하늘이미지자료를 이용할 경우 객관적인 분석이 가능하다. 하늘이미지자료는 지상관측기반의 TSI (Total Sky Imager)와 WSI (Whole Sky Imager) 등을 이용하여 얻을 수 있으며, 이 장비들은 하늘시계요소(SVF, Skyview Factor) 분석과 구름 분석등에도 활용되고 있다(Johnson and Hering, 1987; Shields et al., 1993, 2013; Long et al., 2001; Heinle et al., 2010; Kim et al., 2015, 2016; Bernard et al., 2018).

본 연구에서는 관측소 주변 지형과 인공구조물에 의한 영향을 분석하기 위하여 강릉원주대학교 복사관측소 주변의 수치표고모델과 하늘이미지자료를 이용하여 주변 지형고도와 하늘이미지자료를 이용하여 주변 지형과 인공구조물에 의한 일사의 차폐를 계산하였고 sky line과 SVF를 분석하여 일사관측소의 관측환경을 설명하고자 하였다. 지형고도자료를 이용하여 sky line과 SVF를 산출하였고 단층 태양복

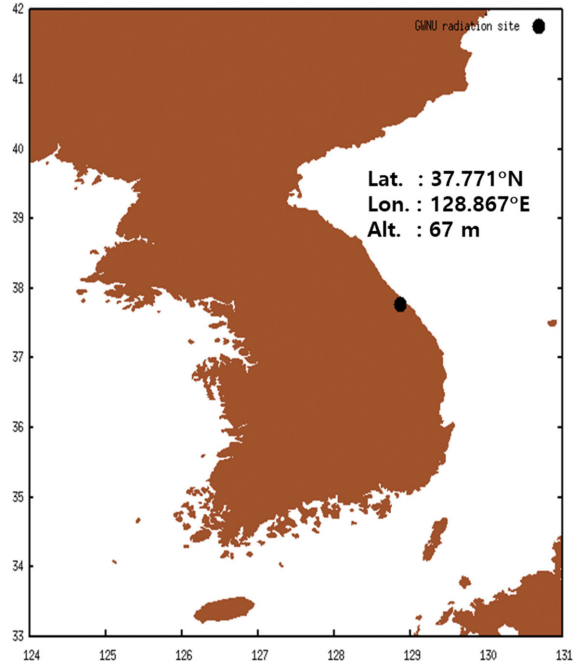


Fig. 1. Geolocation of Gangneung-Wonju National University (GWNU) radiation site.

사모델을 이용하여 계산된 일사량과 중첩하여 월별, 시간별 태양에너지의 변화를 분석하였고 DEM 자료와 하늘이미지자료의 활용을 논하였다.

## 2. 자료 및 방법

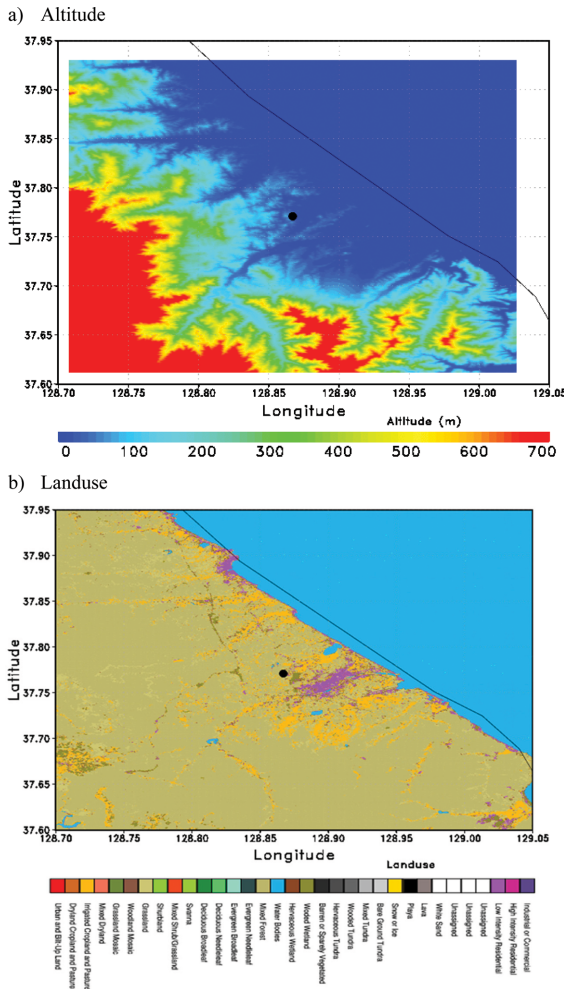
### 2.1 자료

#### 2.1.1 강릉원주대학교 복사관측소

관측환경 분석을 위하여 강릉원주대학교 복사관측소(이하 GWNU 복사관측소)의 위치를 기준으로 분석하였다. GWNU 복사관측소는 기상관측장비를 포함하여 다양한 일사(직달, 전천, 산란), 적외복사 그리고 에어로솔 관측장비들이 설치되어 있다. 관측소는 주변 지형에 의한 차폐를 최소화하기 위해 6층 건물 옥상에 구축되어 있다. GWNU 복사관측소의 위치정보(위도: 37.771°N, 경도: 128.867°E, 고도: 67.23 m)는 Fig. 1과 같다.

#### 2.1.2 수치표고자료

GWNU 복사관측소 환경분석을 위하여 수치표고자료는 환경부에서 제공되는 10 m 해상도의 자료(Jee and Choi, 2014; Yi et al., 2017)를 이용하였다. Figure 2는 강릉지역의 지형고도와 지표이용도이며 GWNU 복사관측소(검은색 점)를 중심으로 표출하였다. Figure



**Fig. 2.** Geological altitude (a) and landuse (b) for Gangneung region. Black dot represents GWNU radiation site.

2a와 같이 동쪽으로 동해안과 인접하여 100 m 이하의 평탄한 지형이 있으며 서쪽으로는 700 m 이상의 대관령이 남북방향으로 분포하고 있다. 또한 강릉은 도시

(저밀도의 주거지)로 분류되며 그 주변은 혼합림 또는 산림지가 넓게 분포한다(Fig. 2b 참조). 지형고도 산출을 위해 측량기를 이용하여 직접적으로 측량하는 것은 인력과 경제적인 문제가 있기 때문에 위성관측 또는 항공라이다 등의 원격탐사기법을 이용한다. 그러나 위성과 항공촬영에는 오차를 유발할 수 있는 관측 오차들이 존재한다. 즉, 계절에 따라 수목의 NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), BRDF (Bidirectional Reflectance Distribution Function)의 오차가 발생할 수 있다. 그리고 촬영된 자료를 이용하여 수목 및 인공구조물을 제거하는 과정에서 발생하는 인위적인 오차가 존재한다(Van Niel et al., 2004; Wilson, 2012). 또한 공개된 DEM 자료는 도시 개발 과정에서 빈번하게 발생하는 고도의 변화를 즉시 반영하지 못하는 단점이 있다(Mouratidis et al., 2010). 따라서 DEM 자료는 지표면의 식생과 인공구조물을 반영하지 못하여 실제와 다를 수 있고, 오래전에 구축된 DEM 자료는 최근의 지표특성 변화를 반영하지 못한다.

**2.1.3 3차원 하늘이미지자료**

반구의 3차원 하늘이미지를 촬영하기 위하여 3차원 카메라(ZS-AC26)와 PREDE사의 Skyview (PSV-100W)로 촬영된 이미지를 이용하였으며 이들의 제원은 Table 1과 같이 정리될 수 있다. 두 장비의 이미지자료는 실체컬러(1,678만 가지 색) 이미지로 JPEG 형식으로 저장되고 적색[Red (R), 0-255], 녹색[Green (G), 0-255], 청색[Blue (B), 0-255] 명암의 자료로 변환이 가능하다. 3차원 카메라와 Skyview 장비를 이용하여 이미지를 얻기 위해서는 중심화소가 정확히 천정방향을 향하고 지리적인 방위가 동서남북(4방위)을 정확히 지향하도록 설치 및 관측되어야 한다. 본 연구에 사용된 장비는 나침반과 GPS를 이용해 방위를 확인 후 설치되었다.

**2.2 연구방법**

**2.2.1 수치표고모델을 이용한 분석**

수치표고모델을 이용하여 GWNU 복사관측소에서

**Table 1.** Specification of sky camera.

Instrument	3D camera	Skyview
Model	ZS-AC26	PSV-100W
FOV (vertical)	220°	180°
FOV (horizontal)	360°	360°
Resolution	3264 × 2448	640 × 480
Image format	JPEG	JPEG
Projection method	$Y = 7.23 f \sin\left(\frac{\theta}{7.23}\right)$	$Y = 1.24 f \sin\left(\frac{\theta}{1.24}\right)$

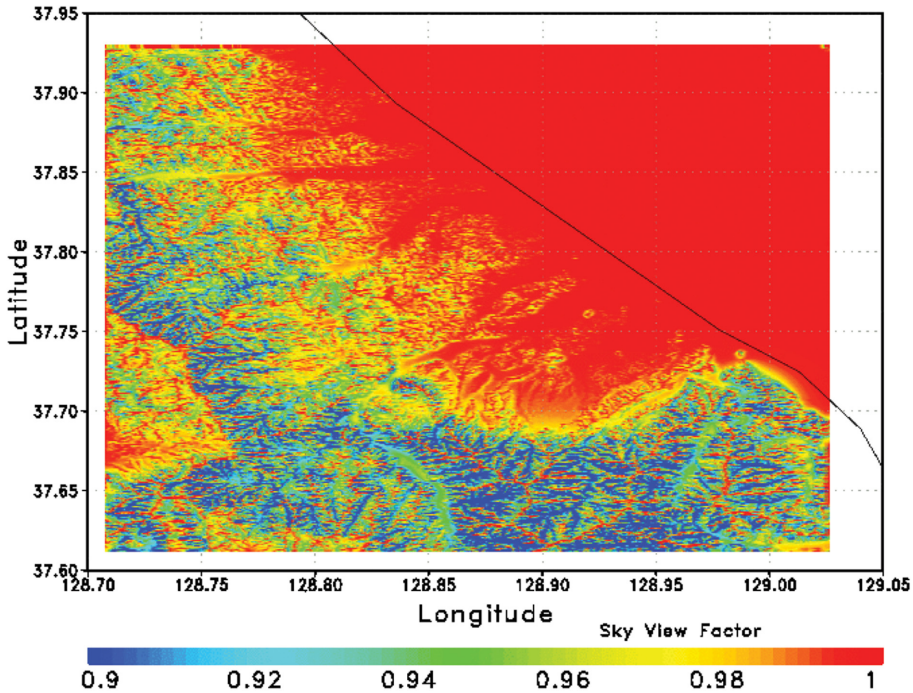


Fig. 3. Skyview factor using 10 m resolution DEM.

주변지형고도를 분석하여 방위별 최대 태양고도각(지형의 최대 그림자각)을 산출한다(Jee et al., 2017). 그리고 이들을 방위각으로 적분하여 SVF (V)을 식(1)을 이용하여 산출하였다.

$$V = \frac{1}{2\pi} \left[ \int_{\phi-\phi_n=\pi/2}^{3\pi/2} \sin^2 \gamma_1 d(\phi_0 - \phi) + \int_{\phi-\phi_n=-\pi/2}^{\pi/2} \sin^2 \gamma_2 d(\phi_0 - \phi) \right] \quad (1)$$

여기서  $\phi$ 는 관측자 위치에서 방위각이고  $\phi_0$ 는 태양의 방위각이다. 그리고  $\gamma_1$ 과  $\gamma_2$ 는 지형의 경사면에서의 차폐각으로서 계산되는  $\gamma_2$ 는  $\pi/2$ 보다 클 수 없고,  $\gamma_1$ 은 0보다는 작을 수 없다.

$$\begin{aligned} \gamma_1 &= \text{Min} \left[ H + \lambda, \frac{\pi}{2} \right] \\ \gamma_2 &= \text{Max} [H + \lambda, 0] \end{aligned} \quad (2)$$

여기서  $\lambda$ 는 경사면에서의 차폐각( $\lambda = \tan^{-1}[\tan \beta \cos(\phi - \phi_n)]$ )을 의미하고  $H$ 는 태양광을 차폐하는 지형의 고도 각이다. 계산 격자(거리는  $x_0$ 이고 고도는  $z_0$ )로부터  $\phi$  방향으로  $x_i$  거리 만큼 떨어져 있는 지형의 고도가  $z_i$  라고 하면 태양광의 shading angle,  $H_i(\phi)$ 은 식(3)과 같이 계산된다.

$$H_i(\phi) = \tan^{-1} \left( \frac{x_i - x_0}{z_i - z_0} \right) \quad (3)$$

$\theta_0 > H(\phi)$ 는 계산하고자 하는 격자가  $x_i$ 에 위치한 지형에 의하여 태양광이 차폐되는 것(shading)이다. 따라서 계산하고자 하는 격자를 중심으로 영향을 미칠 수 있는 주변 지형들을 조사하여 태양의 방위각과 태양의 천정각에 따라 재계산하는 과정이 필요하다. 본 연구에서는 영역내의 최고 지형고도를 기준으로 영향반경을 정하여 반복 수행하였다. 즉 최고 지형고도인 대관령 주변(약 1.1 km)과 태양광의 직접적인 영향[천정각( $\theta_0$ ) = 88.6°]을 고려하여 주변지형에 의한 영향반경을 45 km [= tan(88°) × 1.1 km]로 제한하였다. 따라서 관측지점에서 45 km 이상 떨어진 지형은 관측소의 관측에는 영향을 미치지 않는 것으로 가정하였다. Figure 2 영역의 지형고도자료를 이용하여 산출된 SVF는 Fig. 3과 같다. 주변의 차폐가 없는 격자에서는 1에 가까운 높은 값을 보이고 산악의 골짜기 등에서는 주변 지형에 의한 감소가 일어났다. 대체로 해안에서 멀어질수록 그리고 대관령에 가까워질수록 SVF는 감소하였다.

Figure 3에서 GWNU 복사관측소 지점의 sky line과 sky line 고도각을 산출하여 Fig. 4에 나타내었다. Figure 4a에서 녹색은 고도각이 0°인 선이고 하늘색은 고도각이 0° 이상인 지형의 고도를 나타낸 sky line이다.

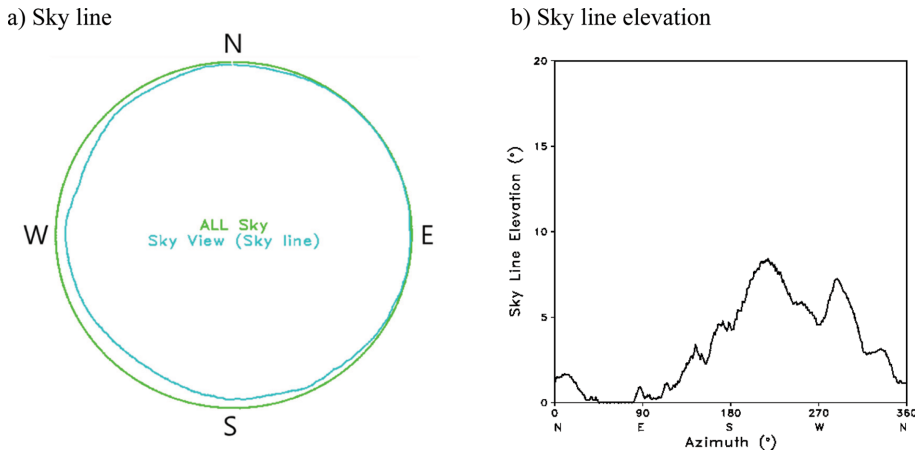


Fig. 4. Sky line (a) and sky line elevation (b) from DEM with 10 m resolution at GWNU radiation site.

서쪽을 중심으로 약  $300^\circ$  이상의 방위에서(동남동-북북동) 관측소보다 높은 고도의 산이 위치하여 sky line 이 분포하는 것을 알 수 있다. 특히, 남서에서 북서쪽의 sky line 고도는 태양 고도각이  $5^\circ$  이하 일 때 지형에 의하여 차폐될 수 있음을 보여준다(Fig. 4b 참조).

### 2.2.2 3차원 카메라를 이용한 분석

3차원 전천이미지를 이용한 GWNU 복사관측소 주변환경 분석은 크게 세가지 과정으로 분리할 수 있다. 첫 번째 과정은 이미지의 각 화소별 위치정보를 산출하고 산출된 위치를 격자로 변환하는 단계이다. 즉, 촬영된 이미지를 획득하면 천정방향의 중심화소를 설정하고 이미지의 화소별 직교좌표에 구면좌표값을 할당한다. 구면좌표를 직교좌표로 변환되는 관계는 식(4)와 (5)로 표현된다.

$$x = r \sin \alpha \cos \phi \quad (4)$$

$$y = r \sin \alpha \sin \phi \quad (5)$$

여기서  $x$ ,  $y$ 는 이미지에서 화소별 위치정보이고  $r$ 은 이미지의 화소간 거리,  $\alpha$ 는 고도각( $= 90^\circ -$  태양천정각),  $\phi$ 는 방위각이다. Table 1에 정리한 것과 같이 Skyview는 해상도는 낮으나 높은 정확도를 가진다. Skyview의 경우 FOV (Filed of View)가 정확히  $180^\circ$ 이며 도법 변환식을 제공하기 때문에 격자화가 비교적 쉽다. 그러나 3차원 카메라의 FOV는  $220^\circ$ 이며 도법 변환식을 제공하지 않기 때문에 Skyview와의 비교를 통하여 계산하였다. 즉 3차원 카메라 이미지에서  $180^\circ$ 가 되는 경계선을 설정하여 도법 변환식을 산출하였고 이를 이용하여 격자를 설정하였다.

두 번째 과정은 이미지에서 화소별 색 정보를 이용

하여 하늘과 주변지형지물을 분리하는 과정이다. 맑은 날 하늘은 상대적으로 주변의 지형과 인공구조물보다 밝은 값을 가진다. 본 연구에서는 RGB 평균값을 계산하였을 때 70 이상의 값은 하늘로 판별하였다  $[(R + G + B)/3 > 70]$ . 상대적으로 어두운 부분은 인공구조물 또는 지형으로 판별하였다. Figure 5에 GWNU 복사관측소에서 관측한 3차원 카메라, Skyview 전천 이미지, 판별된 주변 지형을 나타내었다. Figures 5a, b에서 녹색원은 천정각  $90^\circ$ (수평선)면을 의미하고 노란색과 흰색원은 중심점을 기준으로 10%, 90% 등거리에서 위치한 화소의 위치를 의미한다. 3차원 카메라가 Skyview보다 남쪽으로 2 m 정도 치우쳐 촬영하였기 때문에 북북동 위치에 Skyview가 촬영되었고 이미지 분석에서도 나타난다. 또한 Figs. 5c, d는 이미지에서 하늘 및 고도각  $0^\circ$  이하를 제거한 것이다. Skyview에서는 지형과 하늘의 경계면이 뚜렷이 구분되어 나타나고 있으나 3차원 카메라의 경우 주변 관측기의 고도가 이미지에 포함되어 나타난다. 특히 북북서에 위치한 Skyview가 흰색으로 도색되어 있어 경계부분은 분류되었으나 분체부분이 청천 및 구름의 색과 유사하여 일부 제거된 것을 확인할 수 있다.

세 번째 과정에서는 두 번째 과정을 통하여 분류된 이미지를 이용하여 고도각  $0^\circ$ (또는 천정각이  $90^\circ$ ) 선을 적용하고 하늘/지형 경계면의 방위각과 고도각을 산출한다. 여기서 고도각과 방위각의 산출은 식(4)와 (5)를 이용한다. 그리고 산출된 고도각과 방위각을 식(1)에 적용하여 SVF를 계산할 수 있다. Figure 6은 Fig. 5의 3차원 카메라 이미지를 이용하여 산출된 sky line과 sky line 고도각을 나타낸 것이다. Figure 6a의 경우 3차원 카메라 이미지에서 Skyview 촬영부분을 제거하였고 반시계 방향으로  $5^\circ$  회전하여 이미지를 일

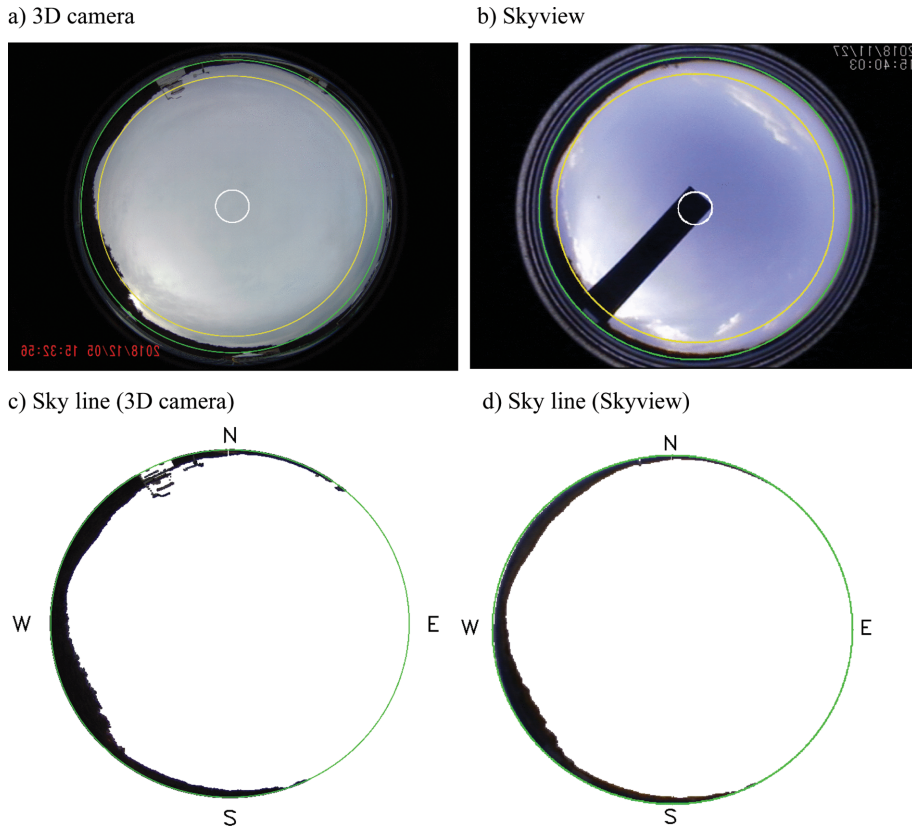


Fig. 5. Whole sky images and these sky lines from 3D camera and Skyview at GWNU radiation site.

치시킨 후 sky line과 sky line 고도각을 산출하였다. Figure 4의 산출결과와 비교하였을 때 남서쪽의 위치한 산의 고도각이 5~7° 이상 높게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이러한 차이는 DEM 자료의 지형고도에 지표면의 산림과 인공구조물의 고도는 포함되지 않기 때문인 것으로 분석된다. 즉, 지표이용도, 산림 분포도, 지적도 등을 활용하여 산림과 인공구조물 등의 고도를 추가 적용하여 산출해야 더욱 정확할 것으로 판단된다. 그러나 대체로 복잡한 구조의 산악이나 고도차이가 큰 지형 등의 영향은 DEM에 잘 반영되어 있기 때문에 간접적인 관측환경 조사에는 활용이 가능할 것으로 판단된다.

### 2.2.3 복사모델을 이용한 분석

특정지점에서 태양의 위치정보와 복사량은 관측지점의 지리적 위치(위도, 경도 및 고도)와 시간정보를 이용하여 계산이 가능하다. 따라서 지표면에 도달하는 태양 복사량을 모의하기 위하여 Gangneung-Wonju National University (GWNU) 단층 복사모델을 사용하였다(Jee et al., 2010). 이 모델에서 대기는 단일기층

을 가정하였고 다층복사모델(Chou and Suarez, 1999)을 이용하여 보정하였다(Jee et al., 2011). GWNU 복사모델은 에어로졸 광학두께, 기온, 기압, 고도, 태양 천정각, 총 오존량, 지표면 알베도, 가강수량 그리고 운량 등을 입력자료로 이용한다(Jee et al., 2010; Zo et al., 2014; Park et al., 2017). 그러나 본 연구는 일사량 관측자료에 대한 분석을 포함하지 않고 GWNU 복사관측소 관측환경에 따른 복사량의 차폐 영향만을 분석하기 위해 이상적인 상태를 가정하였다. 즉, 연중 변화가 있는 기온(288.15 K), 기압(1010 hPa), 에어로졸 광학두께(0.1), 총 오존량(0.35 cm-atm), 가강수량(0.25 cm-atm) 그리고 구름(30%)은 단일값으로 입력하여 태양복사량을 산출하고 분석하였다.

복사관측소의 태양 복사량은 일반적으로 수평면에서 관측된다. 이는 지형의 차폐가 없음을 고려하여 관측되는 것이다. 따라서 2.2.1절과 2.2.2절의 지형의 고도각이 태양의 경로에 위치한다면 직달 태양에너지는 0으로 차폐된다. 그리고 지형에 의한 하늘영역이 좁아진다면 산란일사는 SVF에 반비례하여 계산될 수 있다(Jee et al., 2017). 따라서 지형을 고려한 지표면

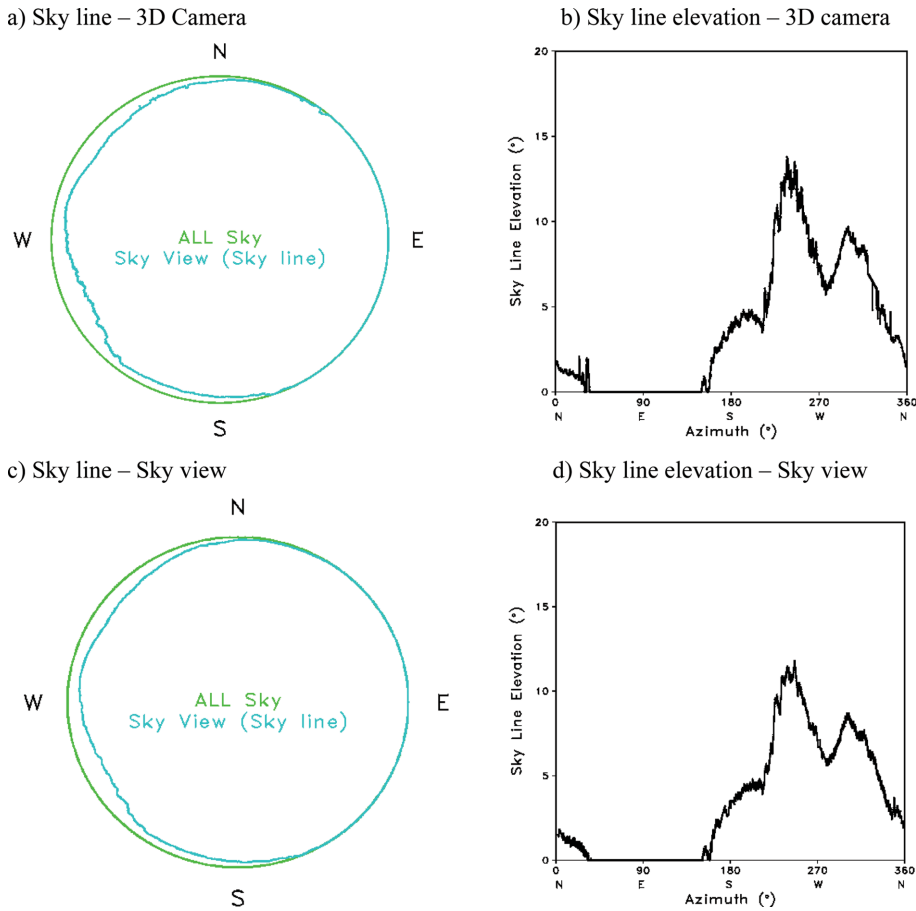


Fig. 6. Same as Fig. 4 except for from 3D camera and Skyview.

도달 태양 복사량( $B_{global}$ )은 이론적으로 평탄한 지형면에서 계산된 직달 태양복사량( $I_{dir}$ )과 산란 태양복사량( $I_{diff}$ )을 이용하여 계산된다.

$$B_{global} = \kappa(\theta_o, \phi_o) I_{dir} \cos \theta_o + V I_{diff} \quad (6)$$

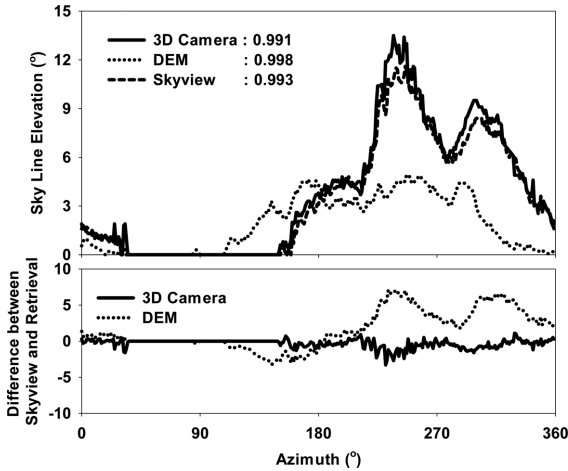
여기서  $\kappa(\theta_o, \phi_o)$ 는 태양 천정각( $\theta_o$ )과 방위각( $\phi_o$ )에 따른 지형의 차폐유무이며 2.2.1과 2.2.2절에서 산출되는 sky line 고도각을 적용하였다.  $V$ 는 식(1)로 계산되며 2.2.1절과 2.2.2절의 All sky에 대한 Skyview 영역의 비율로 나타낼 수 있다. 즉, 관측소의 모든 방향에서 지형 등의 차폐물에 의하여 산란 태양 에너지가 차폐되지 않을 경우는 1이고 차폐가 많아질수록 0에 가깝게 계산된다.

### 3. 결 과

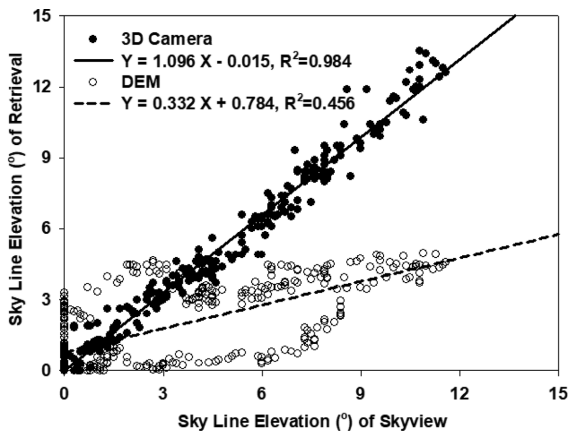
#### 3.1 Sky line과 Skyview factor 산출

3차원 카메라, Skyview와 DEM을 이용하여 산출된

sky line 고도각과 SVF 그리고 방위별 Skyview와의 편차를 Fig. 7에 나타내었다. 3차원 카메라의 경우 Skyview와 비교하여 다소 높은 sky line 고도각을 나타내고 있다. 이것은 해상도의 차이로 볼 수 있으며 (Table 1 참조) 3차원 카메라는 Skyview와 비교하여 해상도가 약 5배 높다. 즉, Skyview 1개 화소는 3차원 카메라에서는 25개 화소로 나타나게 되어 세밀한 표현과 계산이 가능하다. 따라서 Skyview와 3차원 카메라의 sky line 고도각 편차는  $\pm 3^\circ$  이내로, 이는 두 장비 사이의 설치 지점(약 2m) 및 화소 차이 때문인 것으로 분석된다. 그러나 DEM을 이용하여 산출된 sky line 고도각의 편차는  $\pm 7^\circ$ 로 차이가 있었다. 방위각별로 유사한 sky line의 분포를 보였으나 DEM에서 나타나고 있는 남동쪽 방향의 sky line은 3차원 카메라와 Skyview에서는 나타나지 않고 있다. 그리고 남서쪽부터 북쪽방향의 산악은 3차원 카메라와 Skyview의 sky line 고도각과 비교하여  $5\sim 7^\circ$  낮게 나타났다. DEM의 sky line 고도각이 낮은 이유는 2.1.2절에서

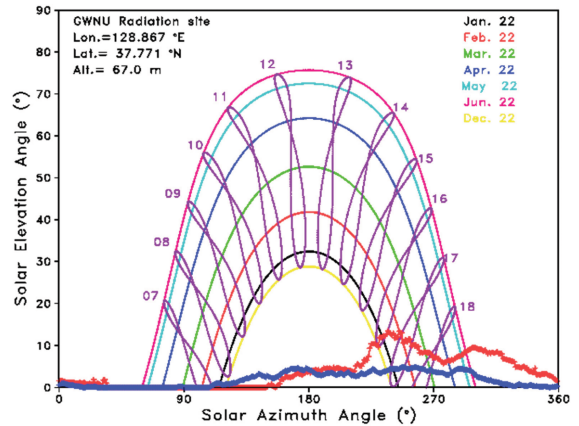


**Fig. 7.** Sky line elevations and these differences with azimuth. Sky line elevations are retrieved from 3D camera, DEM and Skyview. In the upper panel, the values in legend are represented skyview factors. Difference of sky line elevation between Skyview and 3D camera and DEM, respectively.



**Fig. 8.** Relationship of sky line elevation between Skyview and 3D camera and DEM, respectively. The line represents linear regression line.

설명한 것과 같이 구축된 DEM 자료의 오차 때문인 것으로 판단된다. Figure 5에서와 같이 GWNU 복사 관측소 주변에는 소나무 등 침엽수가 주종을 이루는 산림이 위치하며 이들 침엽수의 수고는 약 20m에 달한다. 이러한 소나무의 고도가 DEM에 적용되지 않았기 때문에 sky line이 상대적으로 낮게 나타나는 것으로 분석된다. 3차원 카메라, DEM 그리고 Skyview에서 산출된 SVF는 각각 0.991, 0.998, 0.993으로 DEM에서 산출된 SVF가 가장 크게 나타났고 3차원 카메라



**Fig. 9.** Solar map at GWNU radiation site. Thick red and blue line represent the sky line elevations retrieval from 3D camera and DEM, respectively.

라의 SVF가 가장 작게 산출되었다.

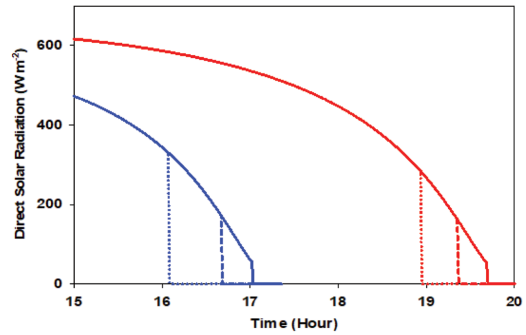
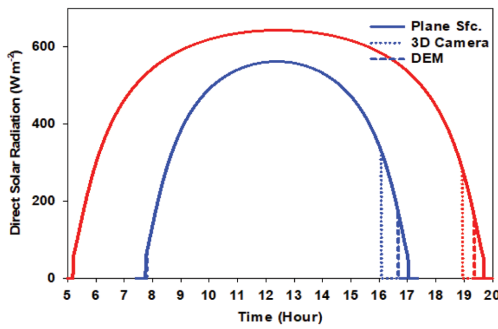
3차원 카메라와 DEM의 산출결과를 Skyview와 각각 비교하여 Fig. 8에 나타내었다. 3차원 카메라의 sky line 고도각 크기는 Skyview와 결정계수 0.98로 유사하게 나타났으며 회귀식의 기울기가 1.09로 3차원 카메라가 다소 크게 산출되는 것으로 분석된다. 그러나 DEM의 sky line 고도각은 결정계수 0.46으로 유사성이 비교적 낮았으며 Skyview와 비교하여 약 30% 정도 낮게 산출되었다.

### 3.2 태양 경로와 지형의 차폐

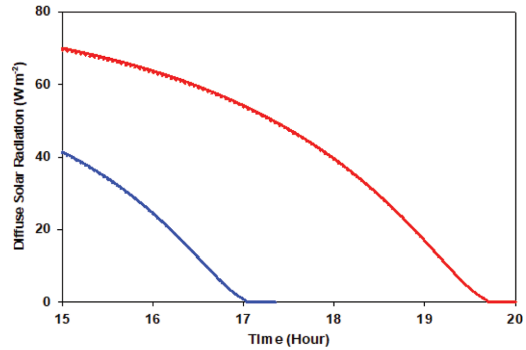
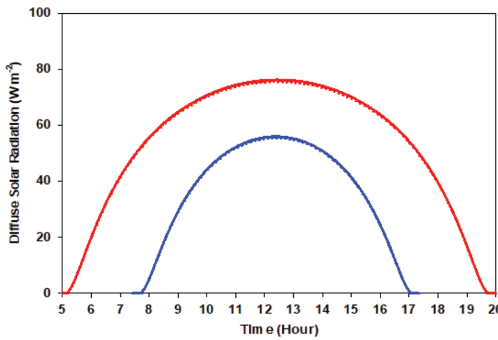
2.2.3절의 일사량 계산에서 천문지리적인 요소인 태양의 천정각과 방위각을 이용하여 천기도를 나타낼 수 있다. 천기도는 시간별 태양의 위치 등을 한눈에 확인 가능하다. Figure 9는 GWNU 복사관측소의 위치정보를 이용하여 산출된 천기도와 DEM과 3차원 카메라에서 산출된 지형의 고도각을 나타낸 것이다. 표출된 태양의 경로는 일출부터 일몰까지 나타내었으며 매월 22일을 기준으로 나타내었다. 하지만 6월 22일 태양 고도각이 가장 높게 나타났고 동지인 12월 22일 가장 낮게 나타났다. 또한 하지에서 일출과 일몰 시각이 각각 가장 빠르고 가장 느리게 나타난다. 태양 고도각의 경우 12시를 기준으로 최대 74°(하지)였고 최소 26°(동지)로 약 48°의 편차를 보였다. 관측소에서는 주변지형에 의한 태양 복사의 영향은 적었으나 아침과 저녁시간에 연중 차폐가 계속적으로 나타난다. 차폐는 태양의 고도각이 낮은 10월부터 2월 사이에 최대 14°까지 나타났다. 이는 겨울철 수평면과 비교하면 일몰 1시간 전부터 주변 지형에 의하여 직달일사가 차폐된다. 그리고 그 외의 월에서는 태양 고도각



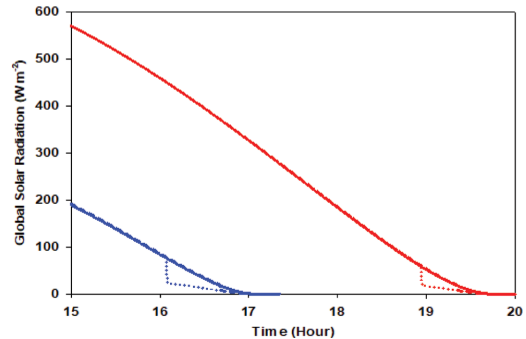
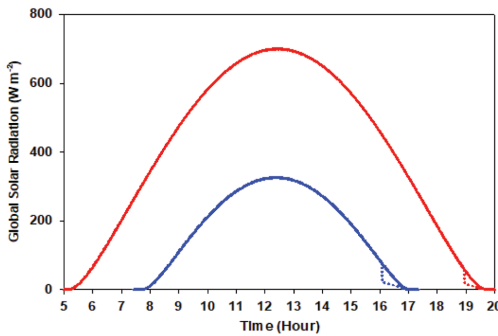
## a) Direct Solar Radiation



## b) Diffuse Solar Radiation



## c) Global Solar Radiation



**Fig. 10.** Solar radiation with and without topographic shading using GWNU solar radiation model on GWNU radiation site for June 22 (Red) and December 22 (Blue). With and without topographic shading calculated using 3D camera (SVF = 0.991), DEM (SVF = 0.998) and plane surface (SVF = 1.000).

이  $5^\circ$  이하일 때 차폐가 발생되었다. 태양의 고도각이  $10^\circ$  이하일 때는 대기에 의한 태양에너지의 이동경로가 길어지기 때문에 태양 복사량은 급격하게 감소된다. 그러므로 본 관측소에서 관측된 복사량자료를 분석할 때 차폐되는 시간 자료에 대한 주의가 필요하다.

### 3.3 지형의 차폐를 고려한 일사량 계산

2.2.3절의 방법을 적용하여 복사관측소의 일사량을

계산하였다. 3.2절의 지형 차폐를 고려하고 2.3절의 단층 태양복사모델을 이용하여 요소별 태양 복사량을 분단위로 계산하였다. Figure 10은 낮의 길이가 가장 긴 하지(6월 22일)와 가장 짧은 동지(12월 22일)의 결과를 표출한 것이다. 동남쪽의 낮의 sky line 고도각이 나타나고 있어 일부 월에서 차폐가 발생되며 남서 또는 서쪽의 지형은 연중 일몰시 태양경로에 위치하기 때문에 차폐가 발생한다. 직달일사의 경우 하지에

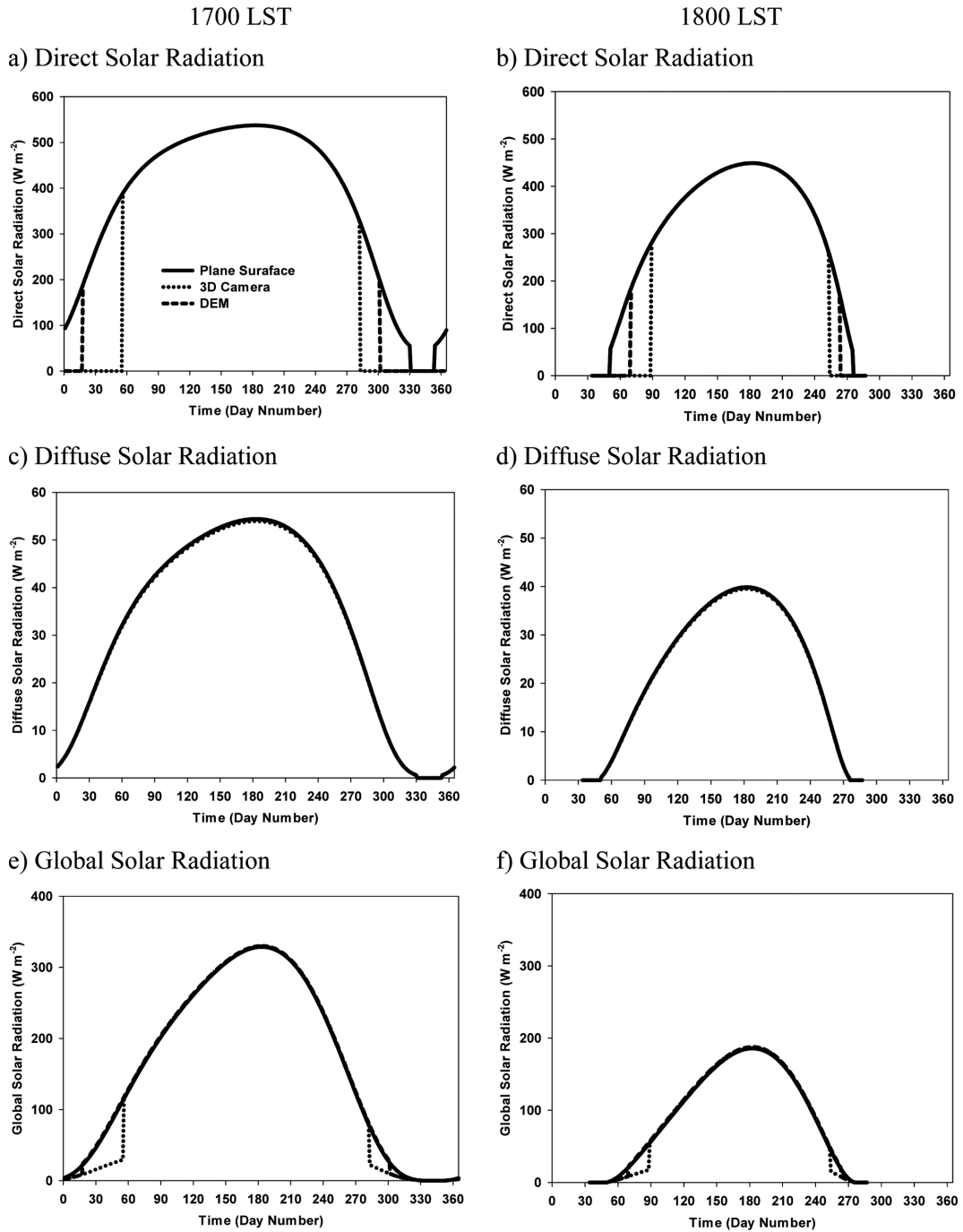


Fig. 11. Direct, diffuse and global solar radiation with and without topographic shading using GWNU solar radiation model on GWNU radiation site for 1700 LST and 1800 LST around year.

는 지형에 의한 차폐가 상대적으로 짧았고(30분) 동지에는 수평면일 때와 비교하여 60분 이상 빠르게 일몰이 진행된다. DEM을 이용한 sky line 고도각이 상

대적으로 낮기 때문에 차폐는 늦게 발생되고 있으나 3차원 카메라의 sky line 고도각이 높아 직달일사가 약 30분 이상 빠르게 차폐가 나타났다. 직달일사량의

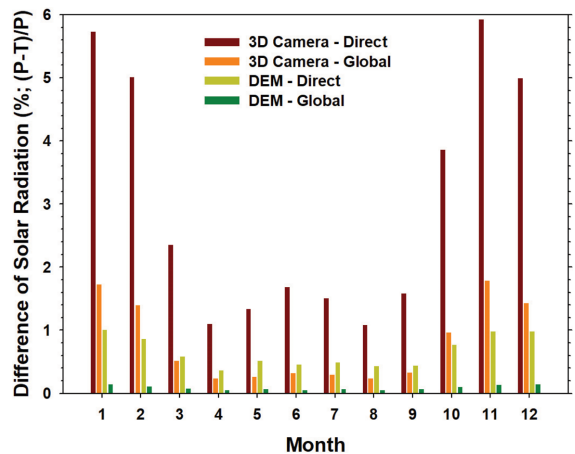
**Table 2.** Summary of solar radiation (unit: MJ m<sup>-2</sup>) with and without topographic shading. SVF means skyview factor.

Time	Plane surface (SVF = 1.000)			3D Camera (SVF = 0.991)			DEM (SVF = 0.998)		
	Global	Direct	Diffuse	Global	Direct	Diffuse	Global	Direct	Diffuse
1	233.027	486.333	44.149	229.021	458.446	43.761	232.706	481.459	44.061
2	289.497	515.297	49.323	285.48	489.499	48.889	289.166	510.877	49.224
3	439.945	668.044	67.127	437.687	652.312	66.536	439.622	664.15	66.993
4	536.793	729.742	75.691	535.543	721.745	75.024	536.536	727.101	75.539
5	632.429	814.073	85.688	630.783	803.279	84.933	632.056	809.908	85.516
6	642.137	812.578	85.891	640.105	798.963	85.135	641.799	808.888	85.719
7	646.943	823.914	86.955	645.077	811.53	86.19	646.576	819.897	86.782
8	583.888	771.502	80.644	582.563	763.177	79.934	583.577	768.189	80.483
9	467.674	672.495	68.646	466.143	661.843	68.042	467.41	669.505	68.509
10	363.063	601.571	58.875	359.561	578.335	58.357	362.704	596.939	58.758
11	250.018	492.725	45.607	245.579	463.537	45.206	249.686	487.881	45.516
12	208.272	458.648	40.866	205.302	435.767	40.506	207.989	454.162	40.784
Annual	5293.614	7847.234	789.474	5262.685	7638.735	782.524	5289.77	7799.274	787.891

차이는 수평면과 비교하여 최대 300 W m<sup>-2</sup> 이상의 차이가 나타났으며 산란일사량은 하늘시계요소를 따르기 때문에 수평면 고려하였을 때보다 최대 2 W m<sup>-2</sup> 이하의 차이를 보였다. 직달일사의 차이는 크게 나타나 보이나 실제 수평면에 도달되는 전천일사량의 차이는 최대 30 W m<sup>-2</sup> 이내였다. 이는 직달일사가 천정각의 방향으로 수평면에 도달하며 대기광학경로가 길어지기 때문인 것으로 판단된다.

지형의 차폐가 있는 1700과 1800 LST의 연중 변화를 복사요소별로 Fig. 11에 나타내었다. 1700 LST 직달일사 차폐의 경우 3차원 카메라는 10월 중순부터 2월 말까지 일어났고 DEM은 11월 초부터 1월 중순까지 발생하였다. 주변지형의 차폐가 없는 수평면에서는 12월 초부터 말까지 일몰이 나타나 일사량이 0 W m<sup>-2</sup>였다. 전천일사량은 직달일사량과 비교하여 그 차이가 작지만 3차원 카메라와 DEM에 의한 차이는 뚜렷하게 나타났다. 특히 지형 차폐로 인한 일사량 차이는 10월 중하순과 1월 중하순에서 2월 말까지 뚜렷하게 나타났다. 그리고 1800 LST의 경우는 9월 중순부터 3월 말에 직달일사에 뚜렷하게 나타났으며 이에 비해 전천일사량의 차이는 작았다.

일몰 근처에서 발생하는 지형 차폐효과는 연중 계속적으로 나타나고 있으나 지표면에 도달하는 에너지의 차이는 그리 크지 않았다. 이를 월별 그리고 연중 적하여 Table 2에 정리하였으며 Fig. 12에 그 차이(단위: %)를 나타내었다. Figure 10과 11에서 나타낸 것과 같이 직달일사량의 차이는 태양의 고도각이 낮은 11월부터 2월에 상대적으로 크게 나타났으며 DEM보다 3차원 카메라에 의한 지형차폐가 다소 크게 나타났다. 3차원 카메라의 계산결과를 수평면과 비교하였



**Fig. 12.** Difference (%) of solar radiation (Direct and Global) between plane surface (P) and topo effect (T; 3D Camera and DEM). The difference of solar radiation were calculated using (P-T)/P.

을 때 월별 누적 직달일사량 차이의 최댓값은 11월 (29.18 MJ m<sup>-2</sup>)에 나타났고 11월에 가까울 수록 증가되었다. DEM 지형을 이용한 차폐에서도 유사한 경향을 보였으나 그 차이는 상대적으로 작았다(최댓값 1월 4.87 MJ m<sup>-2</sup>). 12월에 편차의 최댓값이 나타나지 않는 것은 직달일사량을 차폐하는 sky line 고도각의 최댓값 평균이 11월(3차원 카메라)과 1월(DEM)에 나타났기 때문이다. 산란일사량은 연중 일정하게 SVF에 반비례하게 나타났고 상대적으로 일사량이 큰 여름에 편차가 크고 겨울철에 작게 나타났으며 최댓값은 1월에 나타났다. 최종적으로 지표면에 도달되는

전천일사량의 차이는 월별  $4 \text{ MJ m}^{-2}$ (3차원 카메라)과  $0.4 \text{ MJ m}^{-2}$ (DEM) 이하였다. 연누적 직달일사량의 차이는 3차원 카메라와 DEM을 사용하여 계산하였을 때  $208.50 \text{ MJ m}^{-2}$ 과  $47.96 \text{ MJ m}^{-2}$ 이었고 전천일사량 차이는 각각  $30.93 \text{ MJ m}^{-2}$ 과  $3.84 \text{ MJ m}^{-2}$ 이었다. 3차원 카메라와 DEM을 이용한 지형의 차폐효과는 연누적 수평면 일사량과 비교하여 직달일사량은 2.65%와 0.63%이고 전천일사량은 0.58%와 0.07%였다. DEM 자료의 경우 정량적인 차이는 나타났으나 방향별 차폐효과와 시간별 복사량 등의 정성적인 분석은 3차원 카메라와 유사한 결과를 보였다. 따라서 관측소의 복사환경 분석을 위하여 3차원 카메라와 DEM 자료를 동시에 이용하여 분석한다면 신뢰성 높은 결과를 확보할 수 있을 것으로 분석된다. 또한 3.1절에서 언급하였듯이 DEM 자료의 정확도 확보 및 오차원인에 대한 개선이 이루어진다면 DEM 자료 또한 관측환경 분석에 가치 있는 자료로 활용될 수 있다.

#### 4. 요약 및 제언

3차원 카메라와 DEM 자료를 이용하여 GWNU 복사관측소의 관측환경을 분석하였다. 먼저 복사관측소의 환경분석을 위하여 지형고도와 3차원 이미지자료를 이용하여 sky line과 sky line 고도각을 산출하여 분석하였다. DEM자료를 이용하여 관측소의 sky line과 sky line 고도각 및 SVF를 산출하였다. 그리고 3차원 카메라와 Skyview를 이용하여 관측소에서 촬영한 이미지를 이용하여 sky line과 sky line 고도각을 산출하였다. 이미지자료는 실제 이미지이기 때문에 주변의 차폐를 사진으로 확인 가능하였다. DEM과 3차원 카메라에서 산출된 sky line 고도각은 Skyview를 이용하여 비교 검증하였다. Skyview는 비교적 정확도 높은 3차원 전천 카메라이며 운량 산출과 전천이미지 분석을 목적으로 개발되었다. Skyview와 비교분석 결과, 3차원 카메라의 sky line 고도각 편차는  $\pm 3^\circ$  이내로 유사하게 산출되었고 DEM을 이용하여 sky line 고도각 편차는  $\pm 7^\circ$ 로 차이가 나타났다. 방위각별로 유사한 sky line의 분포를 보였으나 DEM을 이용한 sky line 고도각은 5~7%(Skyview의 30%) 낮게 나타났다. 3차원 카메라, DEM 그리고 Skyview에서 산출된 SVF는 각각 0.991, 0.998, 0.993으로 DEM에서 산출된 SVF가 가장 크게 나타났고 3차원 카메라의 SVF가 가장 작게 산출되었다.

산출된 지형의 차폐효과를 단층 태양복사모델에 적용하여 일사량을 계산 및 분석하였다. GWNU 복사관측소는 주변지형에 의한 일사량 차폐는 적었으나 동남쪽의 낮은 sky line이 있어 일부 월에서 일출시 차폐가 발생되며 남서 또는 서쪽의 지형은 연중 태양경

로에 위치하기 때문에 일몰시 차폐가 발생한다. 직달 일사의 차폐는 sky line 고도각이 높은 10월부터 2월 사이에 태양 고도각이 최대  $14^\circ$ 일 때까지 발생하였다. 직달일사의 경우 수평면으로 이루어진 평탄한 지형과 비교하여 하지에는 30분 일찍 차폐가 있었고 동지에는 60분 이상 빠르게 차폐가 시작되었다. 직달일사량의 차이는 수평면과 비교하여 최대  $300 \text{ W m}^{-2}$  이상의 차이가 나타났고 산란일사량은 SVF에 따르기 때문에 수평면을 고려하였을 때보다 최대  $2 \text{ W m}^{-2}$  이내의 차이를 보였다.

1700 LST의 직달일사량의 경우 3차원 카메라와 DEM에서 각각 10월 중순부터 2월 말까지와 11월 초부터 1월 중순까지 지형의 차폐가 계산되었다. 전천일사량은 직달일사량과 비교하여 그 차이가 작았으나 3차원 카메라와 DEM에 의한 차이는 뚜렷이 나타났다. 지형 차폐로 인한 일사량의 차이는 10월 중하순과 1월 중하순에서 2월말까지 뚜렷하게 나타났다. 3차원 카메라를 이용하였을 때 월별 누적 직달일사량은 최댓값은 11월에  $29.18 \text{ MJ m}^{-2}$ 이었고 6월에서 11월로 이동되면서 감소효과는 증가되었다. DEM을 이용한 차폐에서도 유사한 경향을 보였으나 그 차이의 크기는 상대적으로 작았다(최댓값 1월  $4.87 \text{ MJ m}^{-2}$ ). 전천일사량의 차이는 월별  $4 \text{ MJ m}^{-2}$ (3차원 카메라)과  $0.4 \text{ MJ m}^{-2}$ (DEM) 이하였다. 연누적 직달일사량의 차이는 3차원 카메라와 DEM을 사용하여 계산하였을 때  $208.50 \text{ MJ m}^{-2}$ 과  $47.96 \text{ MJ m}^{-2}$ 이었고 전천일사량 차이는 각각  $30.93 \text{ MJ m}^{-2}$ 과  $3.84 \text{ MJ m}^{-2}$ 이었다. 3차원 카메라와 DEM을 이용한 지형 차폐효과는 연누적 수평면 일사량과 비교하여 직달일사량은 2.65%와 0.63%이고 전천일사량은 0.58%와 0.07%였다. DEM 자료의 경우 3차원 카메라와 정량적인 차이는 나타났으나 방향별 차폐효과와 시간별 복사량 등의 정성적인 분석은 3차원 카메라와 유사한 결과를 보였다.

본 연구는 관측소의 복사환경 분석을 위하여 3차원 카메라와 DEM자료를 이용하였다. DEM자료는 구축 과정에서 산림지역의 식생 그리고 인공구조물의 존재 등을 제거하여 구축되기 때문에 오차가 존재한다. 하지만 본 연구 결과 DEM자료는 넓은 영역에 대한 정성적 분석에 활용이 가능하다. 따라서 3차원 카메라와 DEM자료를 동시에 이용하여 분석한다면 복사관측소 환경분석에 높은 신뢰성을 확보한 결과를 생산할 수 있다.

#### 감사의 글

본 논문의 개선을 위해 좋은 의견을 제시해 주신 두 분의 심사위원께 감사를 드립니다. 이 연구는 기상청<기상·지진See-At기술개발연구>(KMI2018-05910)

의 지원으로 수행되었습니다.

## REFERENCES

- Bernard, J., E. Bocher, G. Petit, and S. Palominos, 2018: Skyview factor calculation in urban context: computational performance and accuracy analysis of two open and free GIS tools. *Climate*, **6**, 60, doi:10.3390/cli6030060.
- Chou, M.-D., and M. J. Suarez, 1999: A Solar Radiation Parameterization (CLIRAD-SW) Developed at Goddard Climate and Radiation Branch for Atmospheric Studies. NASA Technical Memorandum. NASA/TM-1999-104606/VOL15, 51 pp.
- Dozier, J., and J. Frew, 1990: Rapid calculation of terrain parameters for radiation modeling from digital elevation data. *IEEE T. Geosci. Remote*, **28**, 963-969.
- Dubayah, R. C., 1994: Modelling a solar radiation topoclimatology for the Rio Grande River Basin. *J. Veg. Sci.*, **5**, 627-640.
- \_\_\_\_\_, and P. M. Rich, 1995: Topographic solar radiation models for GIS. *Int. J. Geogr. Inf. Syst.*, **9**, 405-419.
- Flerchinger, G. N., W. Xaio, D. Marks, T. J. Sauer, and Q. Yu, 2009: Comparison of algorithms for incoming atmospheric long-wave radiation. *Water Resour. Res.*, **45**, W03423, doi:10.1029/2008WR007394.
- Fu, P., and P. M. Rich, 2000: The solar analyst 1.0 user manual. Helios Environmental Modeling Institute, LLC, 53 pp.
- Heinle, A., A. Macke, and A. Srivastav, 2010: Automatic cloud classification of whole sky images. *Atmos. Meas. Tech.*, **3**, 557-567, doi:10.5194/amt-3-557-2010.
- Hsia, Y. J., and W. S. Wang, 1985: Calculation of Potential Solar Irradiance on Slopes (in Chinese with English summary). *Taiwan Forestry Research Institute, Research Note 001*, 28 pp.
- IPCC, 2013: Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. In T. F. Stocker, Eds., *Climate Change 2013: The Physical Basis: Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, 659-740.
- Jee, J.-B., and Y.-J. Choi, 2014: Conjugation of Landsat data for analysis of the land surface properties in capital area. *J. Korean Earth Sciences Society*, **35**, 54-68, doi:10.5467/JKESS.2014.35.1.54 (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. *Journal of Korean Earth Sciences Society*, **31**, 720-737, doi:10.5467/JKESS.2010.31.7.720 (in Korean with English abstract).
- \_\_\_\_\_, W.-H. Lee, I.-S. Zo, and K.-T. Lee, 2011: Correction of One-layer Solar Radiation Model by Multi-layer Line-by-line Solar Radiation Model. *Atmosphere*, **21**, 151-162 (in Korean with English abstract).
- \_\_\_\_\_, M. Jang, C. Yi, I.-S. Zo, B.-Y. Kim, M.-S. Park, and Y.-J. Choi, 2016: Sensitivity analysis of the high-resolution WISE-WRF model with the use of surface roughness length in Seoul Metropolitan Areas. *Atmosphere*, **26**, 111-126, doi:10.14191/Atmos.2016.26.1.111 (in Korean with English abstract).
- \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_, 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, doi:10.14191/Atmos.2017.27.3.331 (in Korean with English abstract).
- Johnson, R. W., and W. S. Hering, 1987: Automated Cloud Cover Measurements with a Solid-state Imaging System. In *Proceedings of the Cloud Impacts on DOD Operations and Systems-1987, Workshop*, 59-69.
- Kim, B.-Y., J.-B. Jee, M.-J. Jeong, I.-S. Zo, and K.-T. Lee, 2015: Estimation of total cloud amount from sky-viewer image data. *J. Korean Earth Sciences Society*, **36**, 330-340 (in Korean with English abstract).
- \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_, 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.
- Long, C. N., D. W. Slater, and T. Tooman, 2001: Total Sky Imager (TSI) Model 880 Status and Testing Results. DOE/SC-ARM/TR-006, 36 pp, doi:10.2172/1020735.
- Mouratidis, A., P. Briole, and K. Katsambalos, 2010: SRTM 3" DEM (versions 1, 2, 3, 4) validation by means of extensive kinematic GPS measurements: a case study from North Greece. *Int. J. Remote Sens.*, **31**, 6205-6222, doi:10.1080/01431160903401403.
- 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.
- Rich, P. M., R. Dubayah, W. A. Hetrick, and S. C. Saving, 1994: Using viewshed models to calculate intercepted solar radiation: applications in ecology. *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing*

*Technical papers*, 524-529.

Shields, J. E., R. W. Johnson, and T. L. Koehler, 1993: Automated Whole Sky Imaging Systems for Cloud Field Assessment. *Fourth Symposium on Global Change Studies*, Amer. Meteor. Soc., 228-231.

\_\_\_\_\_, M. E. Karr, R. W. Johnson, and A. R. Burden, 2013: Day/night whole sky imagers for 24-h cloud and sky assessment: history and overview, *Appl. Opt.*, **52**, 1605-1616, doi:10.1364/AO.52.001605.

Van Niel, K. P., S. W. Laffan, and B. G. Lees, 2004: Effect of error in the DEM on environmental variables for predictive vegetation modeling. *J. Veg. Sci.*, **15**, 747-756.

Wilson, J. P., 2012: Digital terrain modeling. *Geomorphology*, **137**, 107-121, doi:10.1016/j.geomorph.2011.03.012.

Yi, C., Y. Shin, and S. M. An, 2017: A study on a comparison of skyview factors and a correlation with air temperature in the City. *Atmosphere*, **27**, 483-498, doi:10.14191/Atmos.2017.27.4.483 (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 Korea Peninsula. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **50**, 575-584, doi: 10.1007/s13143-014-0047-0.