

한반도의 일사량 추정을 위한 청천일 모델의 비교 평가 Evaluation of Clear Sky Models to Estimate Solar Radiation over the Korean Peninsula

송아람¹⁾ · 최원석²⁾ · 윤창열³⁾ · 김용일⁴⁾

Ahram Song · Wonseok Choi · Changyeol Yun · Yongil Kim

Abstract

Solar radiation under a clear sky is a important factor in the process by which meteorological satellite images are converted into solar radiation maps, and the quality of estimations depends on the accuracy of clear sky models. Therefore, it is important to select models appropriate to the purpose of the study and the study area. In this instance, complex models were applied using Linke turbidity, including ESRA, Dumortier, and MODTRAN, in addition to simple models such as Bourges and PdBV, which consider only the solar elevation angles. The presence of cloud was identified using the Communication, Ocean, and Meteorological Satellite and the Meteorological imager (COMS MI), and reference data were then selected. In order to calculate the accuracy of the clear sky models, the concepts of RMSE and MBE were applied. The results show that Bourges and PdBV produced low RMSE values, while PdBV had relatively steady RMSE values. Also, simple models tend to underestimate global solar irradiation during spring and early summer. Conversely, in the winter season, complex methods often overestimate irradiation. In future work, the cause of overestimation and other factors will be analyzed and the clear sky models will be adjusted in order to make them suitable for the Korean Peninsula.

Keywords : Clear Sky Model, Solar Energy, Global Solar Irradiance, COMS MI

초 록

구름의 영향 없이 지표면에 도달하는 일사량을 추정하는 것은 일사량 자원지도의 궁극적인 목표이며, 이는 청천일 모델(clear sky model)을 사용하여 이론적으로 추정할 수 있다. 일사량 지도의 정확도는 청천일 모델의 정확도와 연결되기 때문에 연구목적과 연구지역에 적합한 청천일 모델을 선정하고 분석하는 것은 매우 중요하다. 본 연구에서는 대기혼탁 인자를 사용하여 일사량을 추정하는 고차원 모델(ESRA, Dumortier, MODTRAN)과 태양고도를 변수를 하는 일차원 모델(Bourges, PdBV)을 사용하여 한반도의 청천일 일사량을 추정하였으며, 실제 측정 자료와 비교하여 한반도에 적합한 청천일 모델을 분석하고자 하였다. 천리안 기상위성의 가시영상을 사용하여 구름이 없는 청명일을 참조자료로 추출하였으며, RMSE와 MBE를 계산하여 모델별 오차를 분석하였다. 연구결과, Bourges와 PdBV 모델이 실측치와 가장 낮은 RMSE를 가졌으며, PdBV는 계절에 상관없이 비교적 일정한 MBE값을 가졌다. 또한 봄-초여름 기간에 일차원모델은 일사량을 과소 추정하는 경향을 보였으며, 고차원모델은 겨울에 일사량을 과대 추정하는 것으로 나타났다. 추후 모델별로 나타난 오차의 경향 및 계절에 따른 오차를 보정하는 추가 연구를 통하여, 한반도에 최적화된 청천일 일사량 모델을 수정 및 개발할 예정이다.

핵심어 : 청천일 모델, 태양에너지, 전일사량, 천리안 기상위성 영상

Received 2015. 09. 25, Revised 2015. 10. 20, Accepted 2015. 10. 29

1) Member, Department of Civil and Environmental Engineering, Seoul National University (E-mail: aram200@snu.ac.kr)

2) Department of Civil and Environmental Engineering, Seoul National University (E-mail: youn0603@snu.ac.kr)

3) Korea Institute of Energy Research (E-mail: yuncy@kier.re.kre)

4) Corresponding Author, Member, Department of Civil and Environmental Engineering, Seoul National University (E-mail: yik@snu.ac.kr)

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

1. 서론

기상위성에서 취득된 영상은 광범위한 지역에 대한 정보를 주기적으로 얻을 수 있다는 점에서 지표면에 도달하는 태양 에너지를 분석하는데 효과적으로 활용된다. 이 때, 특정한 물리모형을 통하여 영상의 화소값이 일사량으로 변환되는데, 이 과정에서 구름 없이 맑은 날의 일사량(청천일사량)을 추정하는 것은 하나의 입력변수로서 매우 중요하다.

청천일사량은 청천일 모델(clear sky model)을 통해 계산되며, 모델의 정확도에 따라 추정치의 정확도가 달라진다. 청천일사량을 추정하기 위해서는 태양고도를 비롯하여 오존, 에어로졸, 수증기 등 대상지역에 대한 대기정보가 필요한데, 일반적으로 수치예보모델에서 생성된 표준값(standard atmosphere value)을 사용한다. 그러나 실제 지표면에 도달하는 일사량은 실시간으로 변하는 대기의 영향을 받기 때문에, 청천일 일사량 모델로 추정된 일사량과 상이할 수 있다. 특히 대기 중 구름은 지표면에 도달하는 태양에너지를 차단하는 역할을 하기 때문에, 구름의 감쇠효과를 고려한 일사량 추정치가 필요하다.

기상위성의 가시영상은 구름을 비롯한 다양한 대기정보를 포함하고 있기 때문에 일사량을 분석하는데 효과적으로 활용된다. 실제로 선진국의 경우, 자국의 기상위성과 물리모형을 활용한 일사량 추정에 대한 연구가 체계적으로 수행되고 있다. HelioClim은 유럽형 데이터베이스로 1997년 결성된 이후로 유럽의 기상위성인 Meteosat과 Heliosat 모델을 이용하여 유럽전역과 아프리카, 대서양에 이르는 방대한 일사량 자료를 구축하고 있다(Blanc *et al.*, 2011). Heliosat 모델은 1982년 처음 개발된 이후로 Meteosat과 환경 변화에 따라 현재까지 꾸준한 개선이 이루어지고 있으며 Meteosat에서 추정된 구름인자(cloud index)를 계산하여 구름으로 인한 감쇠효과를 분석한다. 이 과정에서 청천일 일사량을 도출하는 것은 매우 중요한 단계이며, ESRA 청천일 모델(Grief and Scharmer, 1999)을 사용하여 청천일사량을 추정한다. ESRA는 다양한 연구를 통하여 유럽전역과 Meteosat에 가장 적합한 모델로 검증되었으며, 실제로 지상관측소의 실측치와 유사한 추정치를 갖는다(Rigollier *et al.*, 2000).

청천일일사량의 정확도는 사용되는 청천일 모델에 따라 달라지기 때문에, 연구목적과 실험대상지역에 적합한 청천일 모델의 선정은 기상위성을 이용한 일사량 추정연구에 기반이 된다. Noorian *et al.*(2008)은 경사진 표면에서 정확한 산란일사량(diffuse irradiation)을 추정하기 위하여 12가지 청천일 일사량 모델을 비교하여 실측치와의 정확도 평가를 수행하

였으며, Reno *et al.*(2012)는 청천일 모델을 일차원모델과 고차원모델로 구분하여 적용 대상지역과 시기에 따른 적용성을 분석하였다. Sengupta and Gotseff(2013)는 위성영상을 기반으로 하는 청천일 추정 모델과 Bird 모델의 비교평가를 수행하여, 입력변수의 종류와 전반적인 정확도를 고려한 모델의 효율성을 분석하는 연구를 진행하였다. 다양한 선행 연구에서 알 수 있듯이, 연구의 목적과 관측 대상지역에 적합한 청천일 모델을 선정하는 것은 기상위성을 이용한 일사량 추정에 있어서 추정치에 대한 정확도를 향상시키는 역할을 한다.

그러나 국내의 경우, 한반도에 적용할 수 있는 청천일 모델에 대한 연구가 부족한 실정이며, 국내에서 개발된 정지궤도 통신해양기상위성인 천리안(COMS: Communication, Ocean and Meteorological Satellite)이 운용되고 있음에도 일사량에 대한 정보는 지상관측소의 실측치에 의존하고 있다.

따라서 본 연구에서는 천리안 기상위성을 활용한 일사량 추정의 선행 단계로서, 다양한 청천일 모델을 비교하여 한반도의 일사량 추정에 가장 적합한 모델을 분석하고자 한다. 이를 위하여 실제 지상관측소에서 취득된 일사량과 다양한 청천일 모델의 일사량 추정치를 비교하였으며, 계절과 위치에 따른 모델 별 RMSE(Root Mean Square Error)와 MBE(Mean Bias Error)를 분석하였다.

2. 청천일 모델(Clear Sky Model)

청천일 모델은 입력변수에 따라 일차원모델(simple model)과 고차원모델(complex model)로 나눌 수 있다. 일차원모델은 태양 천정각(solar zenith angle), 태양 고도각(solar altitude angle) 등 최소한의 요소를 이용하여 일사량을 추정하는 반면, 고차원 모델은 에어로졸(aerosols), 수증기(water vapor), 오존(ozone) 등의 대기인자와 해당 지역의 고도(elevation of the site) 등 보다 다양한 환경 조건을 고려하여 일사량을 추정한다.

본 연구에서는 Bourges, PdBV(Perrin de Brichambaut and Vauge) 등의 일차원모델과 대기혼탁인자(Linke turbidity)를 주요변수로 하는 ESRA, Dumortier, MODTRAN 등의 고차원모델을 사용하여 한반도 지역의 일사량을 추정하였다. 일반적으로 청천일 일사량 추정에 많이 사용되는 Perez(1987), Iqbal(1983) 등의 고차원모델은 오존, 알베도, 수증기 등 실시간으로 취득하기 어려운 대기 정보를 요구하기 때문에 기상위성을 기반으로 하는 일사량 추정 모델에 적용하기 어렵다(Rigollier *et al.*, 2000). 따라서 본 연구에서는 대기혼탁인자를 주요변수로 하는 모델을 선정하였으며, ESRA를 비롯하여

기존 연구에서 정확도가 검증된 모델을 사용하였다.

2.1 일차원 모델

일차원모델은 태양고도를 주요 변수로 하여 일사량을 추정한다. 일사량은 태양의 고도와 시간에 따라 달라지기 때문에 태양고도는 일사량 추정에 있어서 가장 중요한 변수 중 하나이다. 일차원모델은 계산과정이 용이하고 고도가 낮은 지역에서 높은 정확도로 일사량을 추정한다는 선행연구가 존재하나(Rigolleir *et al.*, 2000), 대기 변수를 고려하지 않기 때문에 실제 대기환경을 반영하기 어렵다는 근본적인 문제가 있다.

2.1.1 Bourges(1979)

Bourges 모델은 초기 Heliosat 일사량 추정 모델에 사용된 청천일 모델로 태양 고도각(γ_s)을 이용하여 수평면 전일사량을 추정한다(Eq. (1)). Bourges 모델은 대기 혼탁 인자가 5~7 일 경우, ESRA 모델과 유사한 추정치를 갖는다고 알려져 있다(Rigolleir *et al.*, 2009).

$$G_c(\text{Bourges}) = 0.70 I_0 \varepsilon (\sin \gamma_s)^{1.15} \quad (1)$$

I_0 는 태양상수(the solar constant)로 일반적으로 1367 W.m^2 값으로 정의하며, ε 는 태양과 지구 사이의 거리에 관한 보정상수(correction value of Sun-Earth distance)이다.

2.1.2 PdBV(Perrin de Brichambaut and Vauge, 1982)

PdBV 모델은 고차원모델인 Iqbal과 ESRA 모델과 유사한 추정 패턴과 정확도를 갖는다(Moussu *et al.*, 1989). 또한 Bourges모델과 동일하게 태양 고도를 입력변수로 받지만 계수에서 차이가 있으며, Bourges모델의 추정치 보다 높은 값을 갖는 특징이 있다(Eq. (2)).

$$G_c(\text{PdBV}) = 0.81 I_0 \varepsilon (\sin \gamma_s)^{1.15} \quad (2)$$

2.2 고차원 모델

실제 환경을 반영한 일사량을 추정하기 위하여 해당 지역의 높이 정보와 기상인자가 활용될 수 있다. 그 중 대기혼탁 인자(Linke turbidity)는 대기 중 부유물이 햇빛을 산란시켜 약해진 정도를 수치로 나타낸 것으로, 대기 미립자로 인한 일사량의 감소정도를 평가할 수 있다. 대기혼탁인자는 수증기, 에어로졸의 양과 관련이 있으며 2(깨끗한 공기)~8(오염된 공기) 사이 값을 갖는다. 본 연구에서는 SoDa(Solar Radiation

Data)에서 제공하는 값을 사용하였으며(SoDa, 2011), 해당 자료는 전 세계를 위도와 경도를 기준으로 각각 0.083° 간격으로 나누어 총 2160×4320 개의 구역으로 구분하여 고도에 따른 대기혼탁도를 제공한다(Fig. 1). 대기혼탁인자는 고차원모델의 가장 중요한 변수로서, 실제로 기상위성을 사용하여 일사량을 추정하는 Heliosat 모델의 추정치의 정확도를 향상한다는 연구 결과도 존재한다(Fontoyntont *et al.*, 1998).

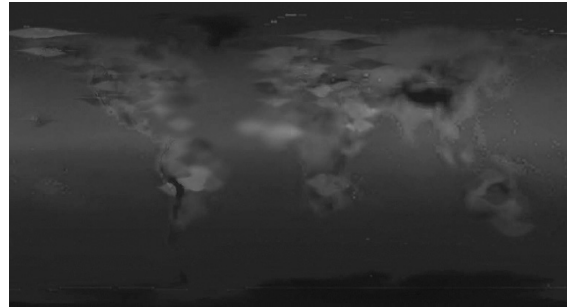


Fig. 1. Example of global map of Linke turbidity

본 연구에서 사용된 세 가지 고차원모델(ESRA, MODTRAN, Dumortier 등)은 대기혼탁 인자와 관심지역의 높이 값을 주요 변수로 하여 일사량을 추정한다. 고차원모델에서 수평면 전 일사량(global horizontal irradiance)은 직달 일사량(beam irradiance)과 산란일사량(diffuse irradiance)의 합으로 나타나는데(Eq. (3)), 세 가지 모델에서 직달일사량을 추정하는 방법은 동일하며, 산란일사량을 구하는 방법에 차이가 있다.

$$G_c = B_c + D_c \quad (3)$$

2.2.1 직달일사량

직달일사량은 구름이나 먼지 등에 산란되지 않고 태양으로부터 지표에 도달하는 복사에너지의 양으로, Eq. (4)와 같이 정의된다. 이 때 $T_L(AM2)$ 는 대기혼탁도이며 대기질량(air mass)이 2일 때를 가정하며, m 은 상대적인 광학 대기질량(relative optical air mass)을 뜻한다.

$$B_c = I_0 \varepsilon \sin \gamma_s \exp(-0.8862 T_L(AM2) m \delta_R(m)) \quad (4)$$

Fig. 2는 고차원 모델로 추정된 대기혼탁도와 태양고도에 따른 직달일사량을 설명한다. 일반적으로 태양의 고도가 높고, 대기혼탁도가 낮을수록 직달일사량이 증가한다. 이는 태

양의 고도가 90°에 가까워질수록 지구표면과의 거리가 가까워지며, 대기의 부유물질이 적을수록(대기혼탁인자가 낮을수록) 산란되지 않고 지표에 도달하는 에너지가 증가하기 때문이다.

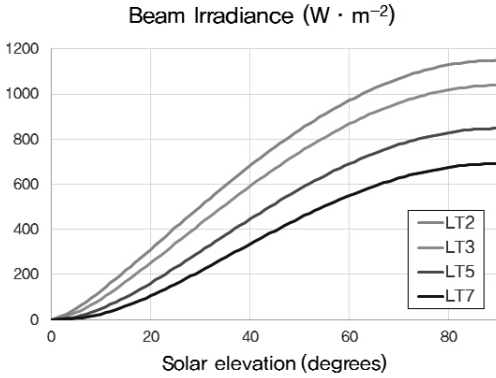


Fig. 2. Beam irradiance for a clear sky using different Linke turbidity values

2.2.2 산란일사량

산란일사량 구름, 먼지 등에 산란되어 지표에 도달하는 복사광선을 뜻한다. 대기에 존재하는 부유입자가 많을수록 태양광의 산란 현상이 많이 일어나기 때문에 산란일사량은 대기혼탁도와 밀접한 관계를 갖는다. 일반적으로 대기혼탁도가 커질수록, 태양의 고도가 높을수록 산란일사량이 증가한다 (Fig. 3).

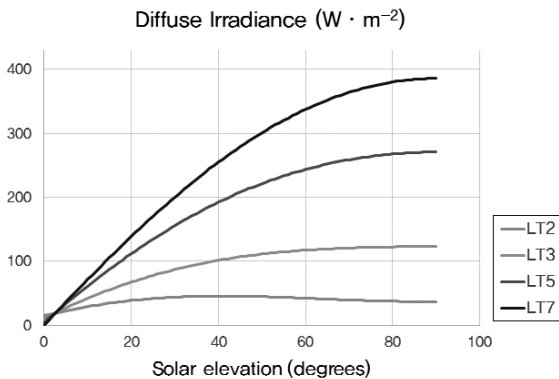


Fig. 3. Diffuse irradiance evaluated by ESRA model using different Linke turbidity values

(1) ESRA (1999)

ESRA는 Meteosat을 활용하여 일사량을 추정하는 Heliosat 에서 사용되는 청천일 모델로서 유럽 전역에 대하

여 높은 정확도로 일사량을 추정한다(Grief and Scharmer, 1999). ESRA의 산란일사량은 산란 투과함수(diffuse transmittance function, T_{rd})와 산란각도 함수(diffuse angular function, F_{rd})으로 정의된다(Eq. (5)). 일반적으로 청천일 모델은 맑은 날을 가정하기 때문에, 산란 투과량은 매우 낮은 값을 가지며, 산란각도함수는 태양 고도와 대기혼탁인자에 의해 결정된다.

$$D_c = I_0 \varepsilon T_{rd}(T_L(AM2)) F_d(\gamma_s T_L(AM2)) \quad (5)$$

(2) Dumortier (1995)

Dumortier와 MODTRAN 모델은 ESRA 모델과 마찬가지로 대기혼탁인자를 주요 변수로 하여 산란 일사량을 추정한다. Dumortier 모델의 산란일사량은 태양 고도각이 70°이하에서 정의되며 Eq. (6)과 같이 정의된다.

$$D_c = I_0 \varepsilon (0.0065 + (-0.045 + 0.0646 T_L(AM2)) \sin \gamma_s - (-0.014 + 0.0327 T_L(AM2)) \sin^2 \gamma_s) \quad (6)$$

(3) MODTRAN (1996)

MODTRAN 모델은 Oldenburg 대학교에서 개발한 알고리즘으로 MODTRAN 3.5 버전을 개선한 모델이다. ESRA, Dumortier 모델과 함께 영상에 기반한 일사량 추정 모델에서 자주 사용되는 청천일 모델로, 산란일사량은 Eq. 7과 같이 계산된다.

$$D_c = I_0 \varepsilon (a + b T_L(AM2) + c T_L^2 + (d + e T_L(AM2) + f T_L(AM2)^2) \sin \gamma_s + (g + h T_L(AM2) + i T_L(AM2)^2) \sin^2 \gamma_s) \quad (7)$$

3. 일사량 추정치 비교

3.1 대기 혼탁 인자에 따른 산란 일사량

Fig. 4는 대기혼탁도와 태양고도에 따른 고차원 모델의 산란일사량을 나타낸다. 일반적으로 태양고도가 높고 대기혼탁도가 높을수록 산란일사량도 증가한다. Dumortier과 ESRA 모델의 일사량 추정치는 비교적 유사한 값을 갖는 반면, MODTRAN 모델은 태양고도가 낮을 때는 다른 모델의 추정치와 큰 차이가 없으나 태양 고도가 높아질수록 두 모델에 비해 산란일사량을 높게 추정한다. 반면 대기가 가장 맑을 경우($T_L(AM2)=2$)에는 상대적으로 산란일사량을 낮게 추정하는 것을 볼 수 있다. 이는 MODTRAN 모델이 Dumortier

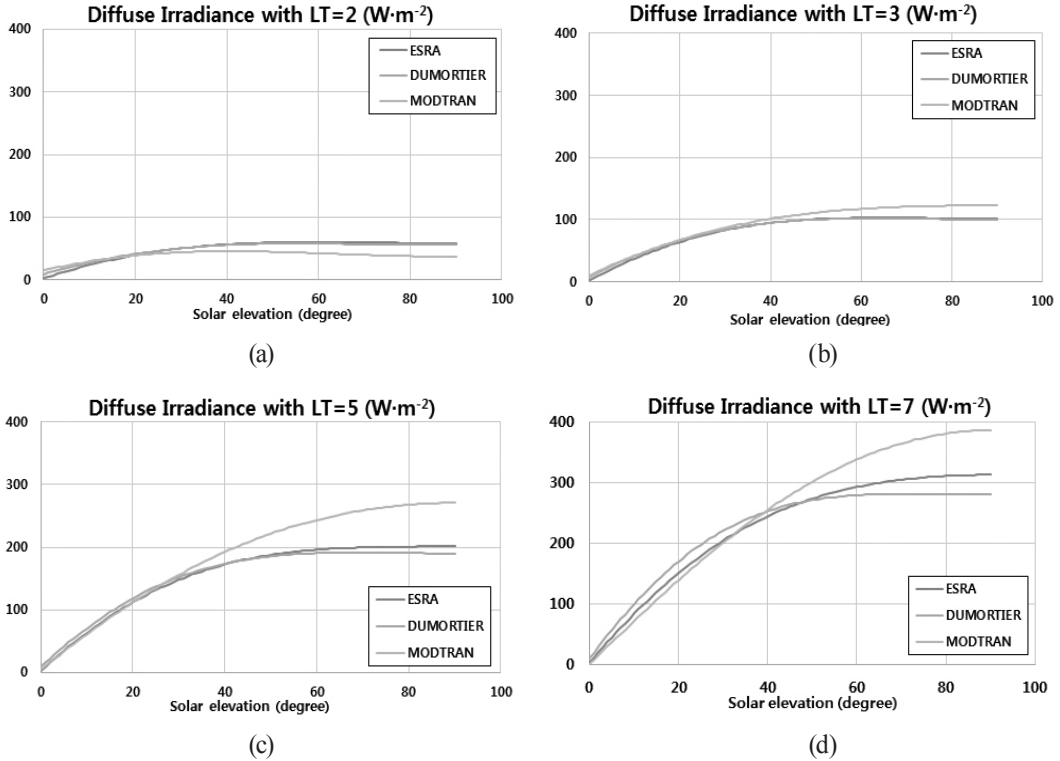


Fig. 4. Diffuse components of the ESRA model, the Dumortier model, and the MODTRAN model using different values of $(T_l(AM2))$

와 ESRA 모델보다 대기 혼탁인자에 민감하게 변한다고 할 수 있다. 일반적으로 구름 없이 맑은 하늘일 경우, 산란일사량은 매우 낮은 값을 가지며 대기의 부유물질이 많을수록 산란 일사량이 증가한다.

3.2 전 일사량 비교

Fig. 5는 본 연구에 사용된 일차원모델과 고차원모델로 추정된 태양고도에 따른 전일사량 추정치를 나타낸다. 태양고도가 10°이하일 경우 일차원모델과 고차원모델의 추정치는 거의 동일하다. 그러나 태양고도가 점차 증가하면서 고차원모델의 전일사량 추정치가 일차원 모델의 일사량 추정치보다 높게 나타난다. 실제로 유럽전역을 대상으로 한 연구에서, 일차원모델은 태양의 고도와 지구 표면의 고도가 낮을 때 고차원모델과 유사한 값을 보이며, 비교적 정확하게 일사량을 추정한다는 결과가 있다(Rigoller *et al.*, 2000). 전체 모델 중, Bourges 모델이 가장 낮은 추정치를 가졌으며 PdBV는 태양의 고도가 높을 때 고차원모델의 추정치와 비교적 유사한 값을 가졌다.

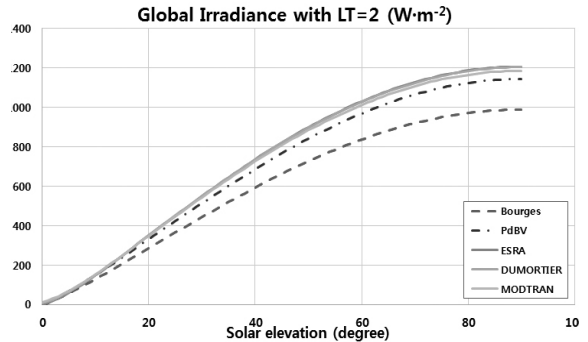


Fig. 5. Global irradiance in the clear sky model

4. 정확도 평가

4.1 사용 데이터

본 연구에서는 기상청에서 운영하는 지상관측소 중, 지리적 분포를 고려한 총 6개 지점(대관령, 서울, 원주, 대전, 포항, 진주)에서 측정된 일사량 데이터를 참조자료로 사용하여 청

천일 일사량 모델로 추정된 추정치와 실측 데이터간의 차이를 분석하였다(Fig. 6).

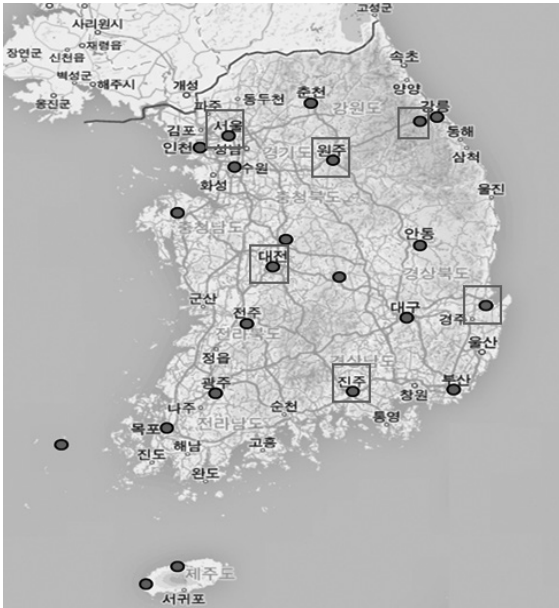


Fig. 6. Observation sites

청천일 일사량 모델의 정확도를 평가하기 위해서는 실제로 구름이 없이 맑은 날 취득된 지상데이터를 이용해야 한다. 구름의 여부를 판단하기 위해서 동일 기간 동안 취득된 천리안 기상위성의 가시광선 영상(COMS MI)을 사용하여 구름의 여부를 판단하였다. 지상관측소의 참조 자료는 시간당 일사량으로 제공되며 COMS MI는 15분 간격으로 취득된다. 따라

서 COMS MI 영상 중 관측소가 위치한 주변지역을 확대하여 6개의 관측지점에서 구름이 존재하지 않는 시간대를 분석하여, 해당 시간대의 지상관측소의 일사량을 참조자료로 선정하였다. 지상관측소의 일사량 자료 및 COMS MI 영상의 획득 시기는 2013년 1월 1일~2013년 12월 31일이며, 이 중 구름이 많은 여름(6-8월)을 제외하고 1월, 2월, 3월, 4월, 5월, 9월, 10월, 11월, 12월 데이터에서 11시~2시 사이 총 63장을 추출하여 비교하였다.

4.2 정확도 평가 지수

각 모델 별 추정치와 실측치와의 정확도를 평가하기 위하여 RMSE와 MBE값을 계산하였다. RMSE는 전체적인 정확도를 평가할 수 있으며 MBE는 모델의 과/소 추정여부를 판단할 수 있다. RMSE, MBE 등의 검증값은 0에 가까울수록 관측치와 추정치가 서로 유사함을 의미한다. 또한 MBE의 경우 그 값이 양일 경우 과대평가(추정치>관측값)를 의미하며 음의 값을 가질 경우 과소평가(추정치<관측값)를 의미한다.

$$RMSE = \frac{\sqrt{\text{mean}((\text{clearSkyModel} - \text{measuredGHI})^2)}}{\text{mean}(\text{measuredGHI})} \quad (8)$$

$$MBE = \frac{\text{mean}(\text{clearSkyModel} - \text{measuredGHI})}{\text{mean}(\text{measuredGHI})} \quad (9)$$

GHI는 global horizontal irradiance의 약자로서 수평면 전 일사량을 뜻한다.

4.3 정확도 평가 결과

Table 1~6은 6가지 관측지점에 대하여 본 연구에서 사용된

Table 1. Monthly RMSE and MBE for site 1(Daegwallyeong)

	Bourges		PdBV		ESRA		Dumortier		MODTRAN	
	RMSE	MBE	RMSE	MBE	RMSE	MBE	RMSE	MBE	RMSE	MBE
1월	0.32	-0.07	0.31	0.07	0.75	0.68	0.76	0.69	0.74	0.68
2월	0.39	-0.38	0.28	-0.25	0.16	0.13	0.16	0.12	0.15	0.11
3월	0.35	-0.61	0.25	-0.43	0.23	0.00	0.19	0.33	0.19	0.32
4월	0.29	-0.55	0.18	-0.33	0.21	0.38	0.22	0.40	0.23	0.41
5월	0.19	-0.26	0.07	-0.09	0.15	0.19	0.19	0.24	0.20	0.26
9월	0.19	0.20	0.36	0.38	0.62	0.65	0.72	0.75	0.77	0.81
10월	0.20	0.19	0.39	0.37	0.83	0.80	0.87	0.84	0.90	0.87
11월	0.17	0.14	0.35	0.30	0.90	0.78	0.92	0.80	0.93	0.80
12월	0.39	0.17	0.23	0.19	0.74	0.88	0.74	0.89	0.64	0.69

Table 2. Monthly RMSE and MBE for site 2(Seoul)

	Bourges		PdBV		ESRA		Dumortier		MODTRAN	
	RMSE	MBE	RMSE	MBE	RMSE	MBE	RMSE	MBE	RMSE	MBE
1월	0.11	-0.02	0.16	0.13	0.81	0.77	0.82	0.77	0.80	0.76
2월	0.27	-0.26	0.16	-0.14	0.34	0.31	0.34	0.32	0.33	0.31
3월	0.20	-0.26	0.08	-0.08	0.39	0.56	0.40	0.57	0.41	0.58
4월	0.15	-0.23	0.03	-0.01	0.39	0.61	0.40	0.64	0.42	0.66
5월	0.08	-0.06	0.13	0.15	0.34	0.45	0.39	0.51	0.43	0.57
9월	0.33	0.37	0.54	0.60	0.83	0.92	0.93	1.04	1.00	1.11
10월	0.37	0.36	0.58	0.58	1.06	1.07	1.12	1.13	1.15	1.16
11월	0.35	0.31	0.56	0.50	1.18	1.05	1.21	1.08	1.22	1.09
12월	0.23	0.22	0.42	0.41	1.21	1.19	1.22	1.20	1.20	1.18

Table 3. Monthly RMSE and MBE for site 3(Wonju)

	Bourges		PdBV		ESRA		Dumortier		MODTRAN	
	RMSE	MBE	RMSE	MBE	RMSE	MBE	RMSE	MBE	RMSE	MBE
1월	0.13	-0.11	0.08	0.04	0.72	0.68	0.72	0.69	0.71	0.67
2월	0.29	-0.29	0.18	-0.18	0.30	0.27	0.30	0.27	0.30	0.26
3월	0.23	-0.34	0.12	-0.15	0.34	0.51	0.35	0.52	0.35	0.52
4월	0.20	-0.32	0.08	-0.10	0.32	0.52	0.34	0.55	0.35	0.58
5월	0.11	-0.13	0.08	0.07	0.27	0.36	0.32	0.42	0.36	0.47
9월	0.22	0.24	0.40	0.46	0.66	0.77	0.76	0.89	0.81	0.95
10월	0.15	0.16	0.32	0.36	0.74	0.85	0.78	0.91	0.81	0.93
11월	0.12	0.12	0.29	0.30	0.85	0.87	0.87	0.90	0.87	0.89
12월	0.12	0.00	0.20	0.19	0.81	0.96	0.82	0.97	0.81	0.96

Table 4. Monthly RMSE and MBE for site 4(Daejeon)

	Bourges		PdBV		ESRA		Dumortier		MODTRAN	
	RMSE	MBE	RMSE	MBE	RMSE	MBE	RMSE	MBE	RMSE	MBE
1월	0.37	-0.21	0.31	-0.05	0.72	0.59	0.72	0.59	0.71	0.58
2월	0.39	-0.39	0.29	-0.29	0.13	0.08	0.14	0.09	0.13	0.08
3월	0.33	-0.57	0.22	-0.38	0.17	0.29	0.18	0.30	0.18	0.31
4월	0.31	-0.62	0.20	-0.40	0.15	0.24	0.17	0.27	0.18	0.30
5월	0.24	-0.33	0.12	-0.16	0.08	0.07	0.11	0.13	0.15	0.18
9월	0.09	0.09	0.25	0.28	0.48	0.52	0.57	0.63	0.62	0.68
10월	0.09	0.08	0.25	0.25	0.62	0.64	0.68	0.70	0.70	0.72
11월	0.09	0.08	0.26	0.23	0.78	0.70	0.81	0.72	0.81	0.73
12월	0.07	-0.05	0.13	0.15	0.72	0.93	0.73	0.94	0.72	0.93

Table 5. Monthly RMSE and MBE for site 5(Pohang)

	Bourges		PdBV		ESRA		Dumortier		MODTRAN	
	RMSE	MBE	RMSE	MBE	RMSE	MBE	RMSE	MBE	RMSE	MBE
1월	0.26	-0.23	0.14	-0.08	0.62	0.55	0.62	0.56	0.61	0.54
2월	0.38	-0.38	0.29	-0.28	0.10	0.03	0.10	0.03	0.10	0.03
3월	0.35	-0.64	0.25	-0.45	0.06	0.05	0.06	0.07	0.07	0.09
4월	0.32	-0.64	0.21	-0.41	0.13	0.16	0.14	0.19	0.15	0.23
5월	0.22	-0.30	0.11	-0.13	0.10	0.11	0.14	0.17	0.17	0.21
9월	0.29	0.27	0.49	0.45	0.73	0.67	0.84	0.78	0.91	0.85
10월	0.29	0.25	0.50	0.43	0.96	0.83	1.02	0.88	1.05	0.91
11월	0.36	0.26	0.57	0.41	1.22	0.88	1.25	0.90	1.25	0.91
12월	0.21	0.21	0.40	0.41	1.13	1.17	1.14	1.18	1.13	1.17

Table 6. Monthly RMSE and MBE for site 6(Jinju)

	Bourges		PdBV		ESRA		Dumortier		MODTRAN	
	RMSE	MBE	RMSE	MBE	RMSE	MBE	RMSE	MBE	RMSE	MBE
1월	0.30	0.01	0.35	0.17	0.85	0.79	0.85	0.79	0.84	0.78
2월	0.33	-0.33	0.23	-0.22	0.20	0.17	0.20	0.17	0.20	0.17
3월	0.30	-0.51	0.19	-0.32	0.18	0.31	0.19	0.32	0.20	0.34
4월	0.25	-0.48	0.14	-0.26	0.21	0.37	0.22	0.40	0.24	0.44
5월	0.17	-0.22	0.05	-0.05	0.18	0.23	0.23	0.30	0.26	0.34
9월	0.21	0.22	0.40	0.42	0.63	0.66	0.74	0.78	0.81	0.85
10월	0.24	0.22	0.43	0.41	0.82	0.79	0.89	0.86	0.93	0.90
11월	0.22	0.19	0.41	0.35	0.96	0.83	0.99	0.86	1.00	0.87
12월	0.16	0.08	0.28	0.28	0.86	1.02	0.87	1.03	0.87	1.03

5가지 모델에 따른 월별 평균 RMSE와 MBE를 나타낸다. 대기 중 구름이 많아 참조자료를 활용할 수 없는 6월~8월을 제외한 기간에 대한 평균값을 계산하였으며, 일차원모델과 고차원모델, 봄-초여름과 가을-겨울로 구분된 특성을 보인다.

4.3.1 월별 MBE

Fig. 7은 각 지점에 따른 월별 평균 MBE와 전 지점에 대한 전체평균 MBE 값을 나타낸 그래프이다. 평균적으로 고차원모델은 주로 가을-겨울(9월~1월)에 과대 추정하는 경향을 보였으며 일차원모델은 봄-초여름(2월~5월)에 과소 추정

하는 결과를 보였다(Fig. 7(b)). 겨울에는 태양의 고도가 상대적으로 낮아지기 때문에 일사량이 감소한다. 겨울에 모든 고차원모델의 MBE값이 높은 것으로 볼 때, 고차원모델이 고려하는 주요변수인 태양고도와 대기혼탁인자 외에 기타 요인에 의해서 실제 일사량이 감소하는 것으로 판단된다. 또한 대기혼탁인자를 사용하는 고차원모델보다 일차원모델의 MBE값이 낮은 것으로 보아 겨울에는 대기혼탁인자를 고려하지 않고 태양의 고도만을 고려하여 일사량을 추정하는 것이 효과적으로 보인다.

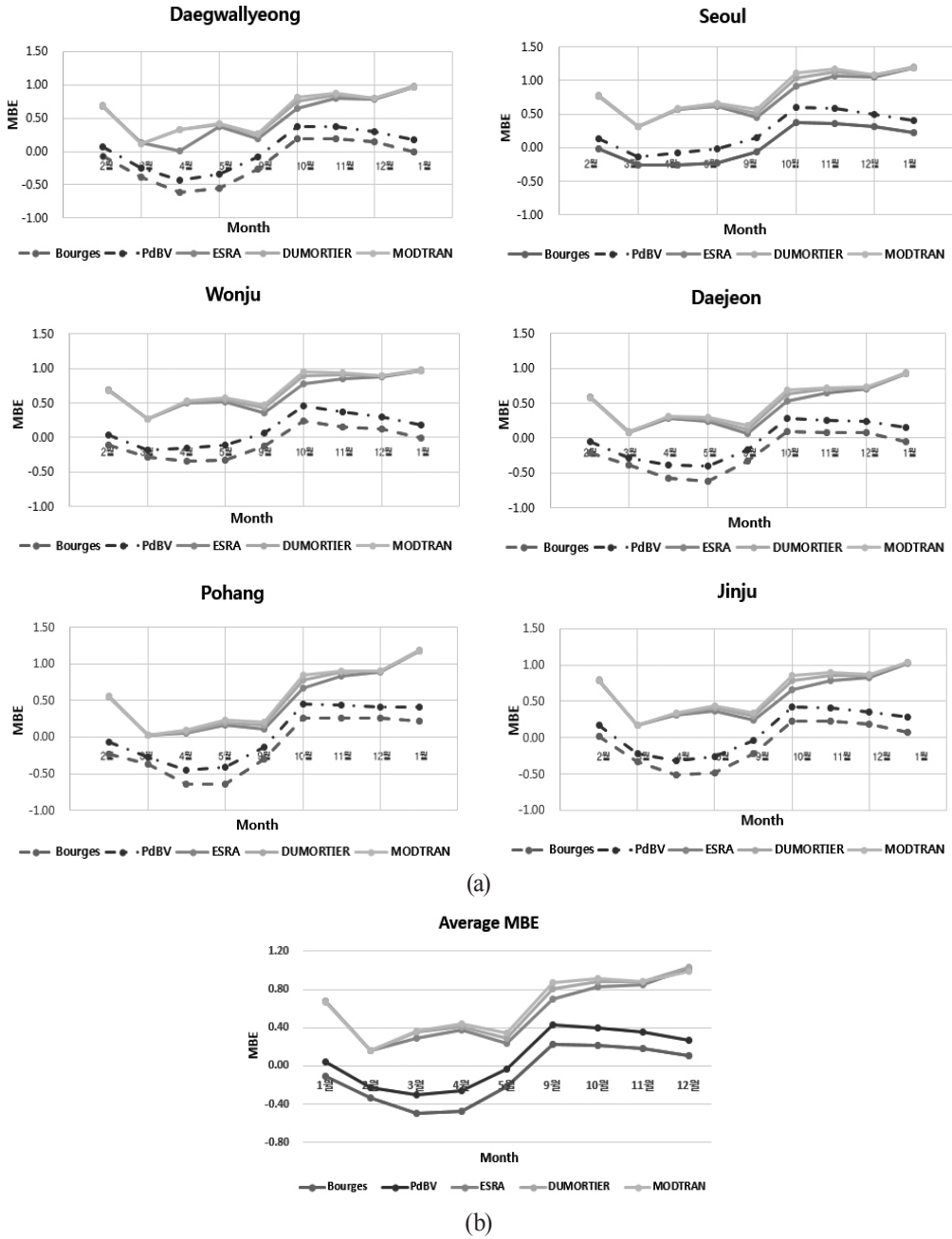


Fig. 7. Average monthly MBE (a) for all sites, and (b) for each sites

4.3.2. 월별 RMSE

Fig. 9은 지상관측소에 따른 월별 평균 RMSE를 그래프로 나타낸 것이다. 지역과 계절에 상관없이 가장 낮은 RMSE를 갖는 모델은 존재하지 않는다. 또한 대체적으로 일차원모

델과 고차원모델이 구분되는 차이를 보이고 있다. 일차원 모델의 RMSE는 계절에 상관없이 일정한 반면, 고차원모델의 RMSE는 2월~5월에는 상대적으로 낮은 값을 갖지만, 9월~1월에 급격히 증가한다. 이는 SoDa에서 제공하는 대기혼탁인

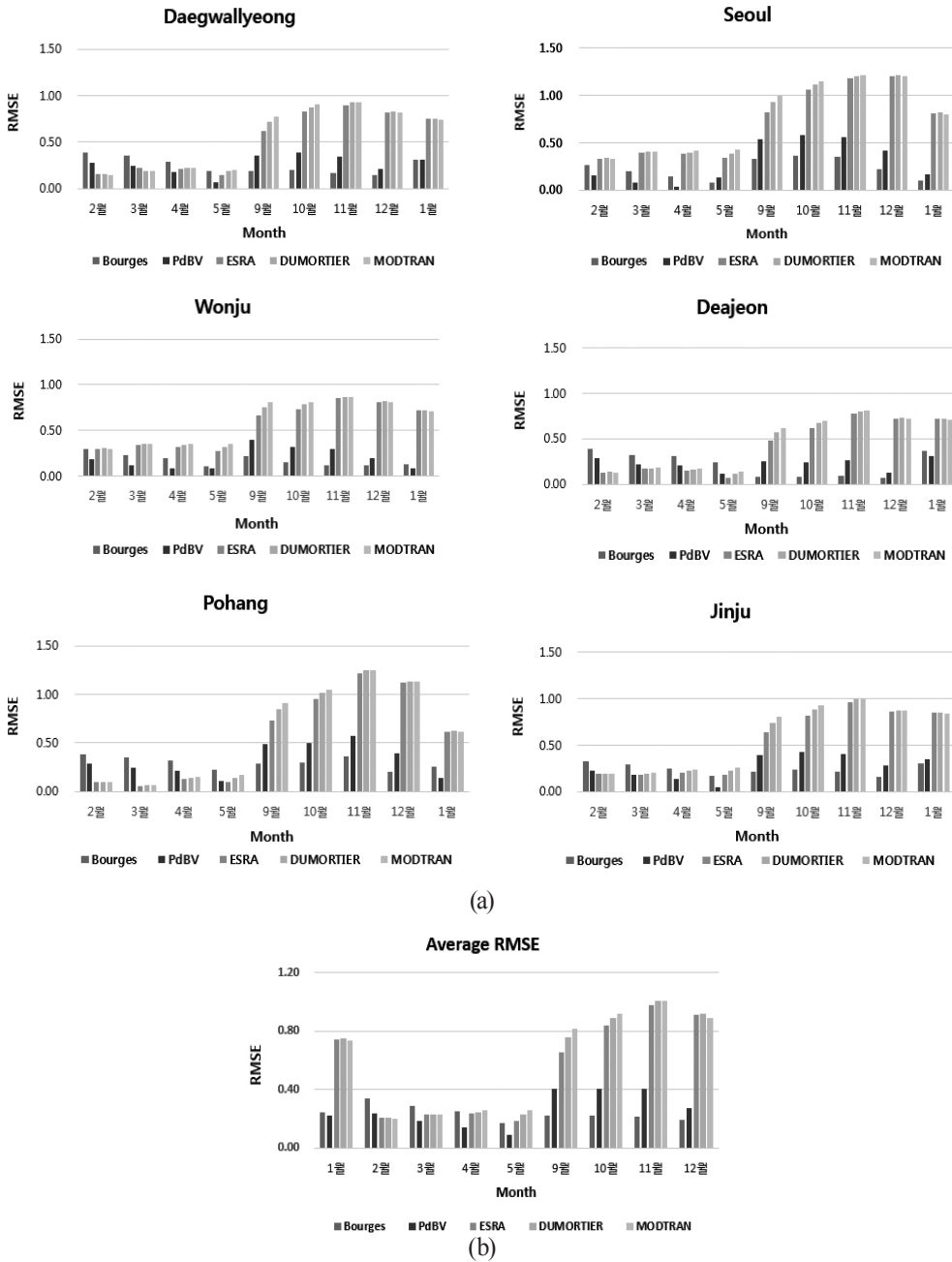


Fig. 8. Average monthly RMSE (a) for all sites, and (b) for each sites

자가 한반도 겨울의 대기상태를 제대로 반영하고 있지 못한 것으로 보인다. Bourges 모델은 계절에 상관없이 비교적 일정한 RMSE를 갖고 있으나 2월~5월 사이에는 오히려 다른 모델에 비해 높은 RMSE를 갖는 경우도 있다(대관령, 대전). 반면

PdBV 모델은 특정 지점에서 고차원 모델과 같이 겨울에 과추정한 결과를 보이기도 하지만 전체적으로 일정하고 가장 낮은 RMSE 추정치를 갖는 것을 볼 수 있다.

Fig. 9은 모든 관측소에 대한 각각의 모델들의 전체 RMSE

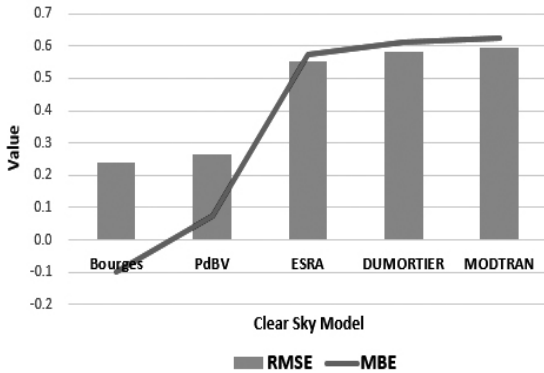


Fig. 9. Average RMSE and MBE

와 MBE를 설명한다. 일차원모델의 경우 참조자료와의 RMSE가 약 20%대로 나타났으며(Bourges=24%, PdBV=26%), 고차원모델은 약 60%의 오차가 발생했다(ESRA=55%, Dumortier=58%, MODTRAN=59%). 이러한 RMSE오차는 MBE의 경향에서 볼 수 있듯이, 가을-겨울 시기에 고차원모델이 일사량을 과추정하기 때문에 발생한다. 반면, 일차원모델의 MBE값은 각각 Bourges=-0.10, PdBV=0.08로 0에 가까운 값을 갖는다. 일차원모델은 봄-초여름에는 과소추정하는 경향을 보이나, 가을-겨울에는 과대추정하는 경향을 보이기 때문에 전체적인 MBE는 0에 가까운 값을 갖는 것이다.

5. 결론

본 연구는 기상위성과 물리모델을 이용하여 일사량을 추정하기 위한 기초연구으로써, 다양한 모델의 비교평가를 통하여 한반도에 적용할 수 있는 청천일 모델을 분석하고자 하였다. 입력변수에 따른 일차원모델(Bourges, PdBV)과 고차원모델(ESRA, Dumortier, MODTRAN)을 사용하여 한반도 지역을 대상으로 일사량을 추정하였으며, 지상관측소에서 취득한 실측 자료와 정확도 평가를 수행하였다. 그 결과, 지역과 시기에 상관없이 가장 낮은 RMSE를 갖는 모델은 존재하지 않았으며, 계절 변화와 모델 특성에 따라 오차의 경향이 다르게 나타났다. 일반적으로 일차원모델보다 고차원모델의 RMSE가 상대적으로 높았으며, 평균적으로 가장 낮은 RMSE를 갖는 모델은 Bourges 모델이었다. PdBV 모델은 지역과 계절변화에 상대적으로 일정한 RMSE 값을 가졌다. 또한 일차원 모델은 2월-5월에 일사량을 과소추정 하는 경향을 보였으며, 고차원모델은 9월-1월에 일사량을 과대추정 하였다. 고차원모델이 가을과 겨울에 높은 RMSE와 MBE값을 갖는 것은 SoDa

에서 제공하는 대기혼탁인자가 한반도 겨울의 대기상황을 적절하게 반영하지 못하고 있거나 태양고도와 대기혼탁인자 외 기타요인에 의해서 실제 일사량이 감소하기 때문으로 판단된다. 추후 모델별로 발생하는 오차를 보정하기 위하여 9월-1월 사이 대기혼탁인자 외에 일사량을 감소시키는 기상 인자를 분석하는 연구를 통하여 과대추정오차를 보정할 예정이며, 계절변화에 따른 한반도에 최적화된 청천일 모델을 개발하는 연구를 진행할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 한국에너지기술연구원의 주요사업으로 수행한 결과입니다. (B5-2429)

References

- Blanc, P., Gschiwind, B., Lefevre, M., and Wald, L. (2011), The HelioClim project: surface solar irradiance data for climate applications, *Remote Sensing*, Vol. 3, No. 2, pp. 343-361.
- Bourges, G. (1979), *Reconstitution des Courbes de Fréquence Cumulées de l'Irradiation Solaire Globale Horaire Recue par une Surface Plane*, Report CEE 295-77-ESF, Centre d'Énergie de l'École Nationale Supérieure des Mines de Paris, tome II, Paris, France, unpaginated CD-ROM.
- Dumortier, D. (1995), *Modelling Global and Diffuse Horizontal Irradiance under Cloudless Skies with Different Turbidities*, Final report JOU2-CT92-0144 Daylight II, Ecole Nationale des Travaux Publics de l'État, Vaulx-en-Velin, France, unpaginated CD-ROM.
- Grief, J. and Scharmer, K. (1999), *ESRA: European Solar Radiation Atlas. Fourth edition*, the Commission of the European Communities by Presses de l'École, Ecole des Mines de Paris, Paris, France, unpaginated CD-ROM
- Fontoynt, M., Dumortier, D., Heinemann, D., Hammer, A., Olseth, J.A., Skartveit, A., Ineichen, P., Reise, C., Page, J., Roche, L., Beyer, H.G., and Wald, L. (1998), Satellite: a WWW server which provides high quality daylight and solar radiation data for Western and Central Europe, *Proceeding of 9th Conference on Satellite Meteorology and Oceanography*, 25-29 May, Paris, pp. 434-437.

- Moussu, G., Diabate, L., Obrecht, D., and Wald, L. (1989), A method for the mapping of the apparent ground brightness using visible images from geostationary satellites, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 10, No. 7, pp. 1207-1225.
- Perez, R. (1987), New simplified version of the Perez diffuse irradiance model for tilted surfaces, *Solar Energy*, Vol. 39, No.3, pp. 221-231.
- Perrin de Brichambaut, C. and Vauge, C. (1982), *Le Gisement Solaire : Evaluation de la Ressource Énergétique*, Technique et documentation, Lavoisier, unpaginated CD-ROM.
- Iqbal, M. (1983), *An Instruction to Solar Radiation*, Academic Press, New York, pp. 107-169.
- Reno, M.J., Hansen, C.W., and Stein, J.S. (2012), *Global Horizontal Irradiance Clear Sky Models: Implementation and Analysis*, Technical report SAND2012-2389, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM. pp. 27-55.
- Rigollier, C., Bauer, O., and Wald, L. (2000), On the clear sky model of the ESRA – European solar radiation atlas with respect to the Heliosat method, *Solar Energy*, Vol. 68, No.1, pp. 33-48.
- Sengupta, M. and Gotseff, P. (2013), *Evaluation of Clear Sky Models for Satellite-based Irradiance Estimates*, Technical Report NREL/TP-5D00-60735, The National Renewable Energy Laboratory, U.S., pp. 13-20.
- SoDa. (2011), *Solar Radiation Data Service*, Available: <http://www.soda-is.com/eng/index.html> (last date accessed: 15 October 2015).
- Noorian, A.M., Moradi, I., and Kamali, G.A. (2008), Evaluation of 12 models to estimate hourly diffuse irradiation on inclined surface, *Renewable Energy*, Vol. 33, No. 6, pp. 1406-1412.