대전지역에서 법선면직달일사량을 이용한 광합성유효 복사량의 직달 성분 추정 모델 개발

최경배* · 이윤곤*** · 김창기***

*충남대학교 우주·지질학과 대기과학전공, 석사과정

**충남대학교 우주·지질학과, 교수

***한국에너지기술연구원 신재생자원지도연구실, 책임연구원

Development of an Empirical Model for Photosynthetically Active Radiation Direct Normal Irradiance using Spectral Direct Normal Irradiance in Daejeon

Choi Kyung Bae* · Lee Yun Gon*** · Kim Chang Ki***

*Master Candidate, Department of Astronomy, Space Science and Geology, Chungnam National University

**Professor, Department of Astronomy, Space Science and Geology, Chungnam National University

***Principal Researcher, New and Renewable Energy Resource Map Laboratory, Korea Institute of Energy Research

†Corresponding author: yglee2@cnu.ac.kr

Abstract

Photosynthetically active radiation (PAR; wavelength 400 – 700 nm) is the spectral range of solar radiation used by plants for photosynthesis. It is necessary to use PAR data in various fields, such as the surface vegetation growth, light energy – chemical energy conversion process, and terrestrial carbon cycle. In this study, a direct normal irradiance (DNI) spectroradiometer installed at the Korea Institute of Energy Research was used to observe direct insolation over the whole wavelength ranges including PAR. The variabilities in solar radiation and wavelength sensitivity according to the solar zenith angle and the clearness index (an indicator of atmospheric turbidity), were analyzed using data collected during June – October, 2020. As the optical path increased, PAR DNI—having a short wavelength—showed greater attenuation than the near-infrared radiation (NIR). Additionally, an increase in the clearness index under the same optical path increased the PAR DNI relatively more. These results mean that the attenuation effect of atmospheric constituents under optical path can be different depending on the wavelength range. Based on the empirical model presented in previous studies and the observation data in Daejeon, the PAR DNI estimation model using DNI in the entire wavelength range were developed and evaluated. Although it was a short analysis period, each model showed an R^2 of 90% or more, and the model with the clearness index, an indicator of atmospheric conditions, presented higher estimation accuracy. We expect that further data collection will enhance the accuracy of the model despite seasonal variability. Thus, this research will encourage broader applications of the model in other regions.

Keywords: 수평면전일사량(Global Horizontal Irradiance), 광합성유효복사(Photosynthetically Active Radiation, PAR), 청천지수(Clear index), 태양천정각(Solar zenith angle), 경험추정모델(Empirical estimation model)

Journal of the Korean Solar Energy Society
Vol.40, No.6, pp.175-185, December 2020
<https://doi.org/10.7836/kjes.2020.40.6.175>

pISSN : 1598-6411

eISSN : 2508-3562

Received: 20 November 2020

Revised: 16 December 2020

Accepted: 16 December 2020

Copyright © Korean Solar Energy Society

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution NonCommercial License which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

기호설명

R_G	: Broadband Global Horizontal Irradiance [W m^{-2}]
R_D	: Broadband Direct Normal Irradiance [W m^{-2}]
R_{DF}	: Broadband Diffuse Horizontal Irradiance [W m^{-2}]
PAR_G	: Photosynthetically Active Radiance Global Horizontal Irradiance [W m^{-2}]
PAR_D	: Photosynthetically Active Radiance Direct Normal Irradiance [W m^{-2}]
NIR_D	: Near-Infrared Direct Normal Irradiance [W m^{-2}]
θ_z	: 태양천정각
K_T	: 수평면전일사량에 대한 청천지수
K_{TD}	: 법선면 직달일사량에 대한 청천지수
ϕ	: 위도
δ	: 태양적위
ω_i	: 시간각
K_{PAR}	: PAR 영역에 대한 청천지수
$K_{PAR,clear}$	: 청천에서의 PAR 투과율
$PAR_{D,clear}$	: 청천에서의 PAR 법선면직달일사량
R_0	: 대기외상한에서의 수평면전일사량
PAR_0	: PAR 영역에서의 대기외상한 값

1. 서론

태양복사 중 가시광선(Visible radiation; 400 ~ 700 nm)은 식물 광합성과 관련된 파장 범위로 광합성유효복사 Photosynthetically Active Radiation (이후, PAR)로 표현한다. PAR 일사량은 지표식생 성장, 빛에너지-화학에너지 전환과정, 육상탄소순환 등 다양한 분야에 중요한 지표로 활용되고 있다. 또한 최근 저탄소신재생에너지에 대한 관심이 증가하면서 그에 맞게 태양광, 풍력 등에 큰 관심을 받고 있다. 그 중, 태양광패널이 많이 설치되고 있고 대부분 실리콘 태양광패널로 400 ~ 1100 nm에서 작동한다. 이러한 패널 파장 범위에 광합성유효복사가 포함되어 있고, 전일사량 중 산란일사량보다 직달일사량의 세기가 강하기 때문에 태양광패널을 통한 전력생산량을 추정하기 위해서 PAR의 직달일사량을 추정할 필요가 있다. 그러나, 국내에서 PAR 일사량을 관측할 수 있는 지상관측 지점은 제한적이기 때문에 다수의 관측 지점을 확보하고 운영 중인 법선면직달일사량을 이용한 PAR 일사량 추정 모델 개발 연구가 필요하다.

PAR는 구름에 상당히 많은 영향을 받는데, 이는 파장이 짧은 PAR가 산란에 영향을 받기 때문이다. 하지만

구름관측량은 순간값이고, 복사관측값은 관측시간 동안의 평균값으로, 구름이 시간에 따라 크게 변할 때 복사량과의 매칭에서 혼동을 일으킬 수 있다¹⁾. 또한 PAR는 구름이 없는 맑은 날씨에서 대기 중의 에어로졸에 영향을 받는다. 그래서 구름과 에어로졸에 의한 영향을 모의하는 것이 PAR를 추정하는데 필수적이다.

국내외 선행연구들에서는 수평면전일사량을 기반으로 대기 중 구름, 수증기, 에어로졸, 미량 기체 등이 지표에 도달하는 일사량에 미치는 감쇄효과를 반영한 경험모델이 제시되었다. 그 중에서 널리 사용되는 간단한 방법으로 수평면전일사량(이후, R_G)과 PAR 수평면전일사(이후 PAR_G)의 비가 일정하다는 가정 하에 R_G 에서 PAR_G 를 추정하는 것이다. 하지만 두 값의 비율은 대기 상태와 사공간적 범위에 따라 달라질 수 있다²⁾. 따라서 해당 지역의 대기 상태를 나타낼 수 있는 기상, 기후학적인 인자들과 일사량의 관계를 지표로 정의한 청천지수²⁻⁵⁾를 PAR 일사량 추정 모델에 적용하는 것이 중요하다. Hu et al.⁵⁾에서는 한국에 인접한 중국 지역에 대해서 PAR 추정 경험모델을 다양한 방법으로 개발하고, 모델의 추정 정확성을 검증하였다. 따라서 본 연구에서는 대전 지역에서 동시에 관측된 법선면직달일사량과 PAR 일사량을 이용하여, Hu et al.⁵⁾에서 제시한 다양한 경험모델 방법을 적용 및 검증하고, 다른 지역에서의 활용 가능성을 평가하고자 한다.

2. 자료 및 분석방법

2.1 연구지역 및 자료

본 연구에서 사용된 자료는 대전에 위치한 한국에너지기술연구원에서 관측된 R_G , 법선면 직달일사량(이후 R_D), PAR 법선면 직달일사량(이후 PAR_D) 값을 기반으로 하였다. R_G (285 ~ 2800 nm)는 CM11 pyranometer 복사계(Kipp & Zonen), R_D (200 ~ 4000 nm)는 CHP1 pyrhemliometer 복사계(Kipp & Zonen)를 통해 관측되었다. PAR_D 는 MS711-DNI (EKO)를 통해 관측되었으며, 전체 파장 범위 300 ~ 1100 nm, 0.4 nm 간격의 파장해상도로 파장별 법선면 직달일사량을 측정하고, 가시광 영역에 해당하는 값을 적산하여 PAR 일사량으로 산출하였다. 모든 관측값은 1분 간격으로 측정되며 본 연구에서는 10분 평균값($W m^{-2}$)을 사용하였다. 자료의 기간은 2020년 6월 18일부터 10월 15일까지로 총 120일의 관측값이 사용되었으며, 자료 전체에서 무작위 선별한 70%로 경험모델을 개발하고 나머지 30%로 검증하는데 사용하였다. 사용된 자료의 품질 관리 기준은 Kim et al.⁶⁾에서 제시한 아래의 방법론이 적용되었으며, 이 기준에 부합하지 않은 자료는 모두 제외하였다.

1. $\theta_z < 75^\circ$
2. $R_G > 0$ and $R_{DF} > 0$, $R_D \geq 0$
3. $R_D < 1100 + 0.03 \times H$
4. $R_D < E_{0n}$
5. $R_{DF} < 0.95 \times E_{0n} \times \cos^{1.2}\theta_z + 50$

$$6. R_G < 1.50 \times E_{0n} \times \cos^{1.2} \theta_z + 100$$

$$7. Abs(Closr) < 5\%$$

$$8. \frac{R_{DF}}{R_G} < 1.05 \text{ for } R_G > 50 \text{ and } \theta_z < 75^\circ$$

$$9. \frac{R_{DF}}{R_G} < 1.10 \text{ for } R_G > 50 \text{ and } \theta_z > 75^\circ$$

H는 고도(m)이며, E_{0n} 는 태양-지구간 거리가 보정된 대기외상한 복사량, θ_z 는 태양천정각, $Closr=100 \times (R_D \times \cos \theta_z + R_{DF} - R_G) / R_G$ 로 확률로 나타나는 폐색오차(Closure error)이다. 조건 1은 한국에너지기술연구원에서 관측되는 자료들을 바탕으로 경험적으로 얻어진 주변지형에 의한 가림현상을 고려한 것으로, 낮은 태양 고도에서 표면에 반사되거나 가림현상에 의해 사용할 수 없는 자료를 제거하기 위함이다⁷⁾.

PAR_D 또한 자료 품질 관리를 실시하였다. R_G , R_D 와 동일한 장소에서 관측된 자료이므로, 앞서 언급한 Kim et al.⁶⁾의 조건 1을 사용하여 θ_z 이 75도보다 큰 경우의 관측값은 제외하였다. 또한 PAR_D 는 R_D 안에 포함되기 때문에 반드시 PAR_D 가 R_D 보다 작아야한다. 많은 선행연구에서는 PAR_G 와 R_G 를 사용한 추정모델이 분석되었고, Hu et al.⁵⁾에서는 PAR_G/R_G 의 값을 0.29 ~ 0.62 범위로 제시하였다. 또한 본 연구의 연구기간 동안 관측값의 산포도를 확인해본 결과, 이상치를 제외한 대부분의 값들이 0.2에서 0.6사이에 분포하는 것을 확인하였다. 대기외상한 PAR_0 은 R_0 의 39%에 해당하는데^{8,9)}, 대기를 통과하며 산란과 흡수가 파장에 따라 다르게 작용하므로 이 값에서 $\pm 20\%$ 를 적용하여 $0.2 \leq PAR_D/R_D \leq 0.6$ 에 해당하는 값만 본 연구에서 사용하였다.

분석된 자료의 기간이 다소 제한적이거나, 법선면직달일사량과 PAR 일사량을 동시에 관측하는 지점의 희소성 및 짧은 기간에 대한 경험모델 구성 가능성도 평가하고자 수행되었다.

2.2 PAR 추정모델

선행연구들에서는 PAR_G/R_G 와 기상요소를 동시에 적용한 경험모델이 정확한 PAR 추정치를 나타낼 수 있다고 제시하였다^{2,4,5)}. 앞서 언급한 바와 같이, PAR_G/R_G 값은 시공간적으로 변화가 크게 나타나기 때문에 해당 지역 자료에 대한 분석이 필요하다. 이러한 문제가 최대한 보완하기 위한 경험모델 방법론은 Hu and Wang⁴⁾에 의해 제안되었으며, Hu et al.⁵⁾에서 이를 검증하였다. 많은 선행연구들은 R_G 에서 PAR_G 를 추정하였지만, 특히 이 연구는 PAR_D 를 추정하는 모델로 R_D 를 이용하여 개발하였다.

가장 간단한 모델(MODEL-A)은 PAR_D/R_D 관계를 이용하여 개발되었고, 다음 식(1)과 같다.

$$\text{MODEL-A : } PAR_D = a \cdot R_D \quad (1)$$

a 는 회귀계수이고, 분석된 지역과 기간에 따라 달라질 수 있다.

PAR_G/R_G 의 비는 수증기와 구름에 따라 증가하고, 에어로졸과 태양천정각(θ_z)에 따라 감소한다^{5,10,11}. 이러한 결과는 지표에 도달하는 일사량이 대기광학경로 상에 존재하는 수증기량, 구름, 에어로졸에 의한 흡수, 산란, 투과되는 정도가 파장 범위에 따라 다르게 나타날 수 있음을 보여주는 것이다. 즉, 전체 파장영역 일사량보다 가시광영역(PAR)에서 수증기, 구름에 의한 감쇄가 상대적으로 약하다는 것을 의미하는 반면, 에어로졸, 대기광학경로 길이에 의한 감쇄는 상대적으로 크다는 것을 의미한다. 청천지수 K_T 는 태양복사가 대기를 통과하며 산란과 흡수과정을 종합적으로 나타낼 수 있다는 것을 보였다^{2,3}. 그래서 MODEL-B에선 MODEL-A와는 달리 태양복사 중 직달 성분에 대한 청천지수 K_{TD} 를 새롭게 정의하여 대기에서의 산란과 흡수과정을 나타내어 PAR_D 추정의 정확성을 향상시켰다. MODEL-B는 다음 식(2)와 같다.

$$\text{MODEL-B : } PAR_D = a \cdot R_D + b \cdot K_{TD} + c \quad (2)$$

a , b , c 는 회귀계수다. 그리고 K_T 와 K_{TD} 는 다음 식(3), (4)과 같이 구할 수 있다.

$$K_T = \frac{R_G}{R_0} \quad (3)$$

$$K_{TD} = \frac{R_D}{R_0} \quad (4)$$

R_0 는 대기외상한 전천복사량을 나타내며, 지구와 태양사이의 기하학 관계 등으로부터 계산될 수 있다¹². 이 중 PAR_0 은 PAR 영역의 대기외상한 값으로, R_0 의 약 39%를 나타낸다⁸. 대기외상한 값은 다음 식(5)과 같다.

$$X_0 = I_{sc}(G)L_0 \left[\sin\phi \sin\delta + \frac{24}{\pi} \sin\left(\frac{\pi}{24}\right) \cos\phi \cos\delta \cos\omega_i \right] \quad (5)$$

$I_{sc}(G)$ 는 R_G 의 대기외상한 값으로 4.1796 kJm^{-2} 이다. L_0 는 태양궤도보정인자고, ϕ 는 위도, δ 는 태양적위, ω_i 는 시간각이다.

자외선을 경험적으로 추정하는 연구에서는 자외선 영역의 청천지수 K_{UV} 를 사용하여 정확성 향상을 제시한 바 있다^{13,14}. 이와 유사하게 Hu and Wang⁴)에서도 PAR 영역의 청천지수 K_{PAR} 를 PAR 추정모델에 사용하여

지표에 도달하는 PAR 일사량을 보다 정확하게 추정할 수 있음을 보였다. PAR_G/R_G 의 비는 시공간적 변동성이 아주 커, 이를 이용한 MODEL-A와 MODEL-B는 각 관측소에서만 사용이 가능하다. 하지만, 일반적으로 무차원의 매개변수는 지역적인 특성에 영향을 크게 받지 않는다. 다음모델(MODEL-C)에서는 무차원의 매개변수인 K_{TD} 와 태양복사가 지구 대기를 통과하는 직접적인 광학경로길이인 상대광학대기질량(relative optical airmass; m)을 사용하여 나타내었고, 다음 식(6)과 같다.

$$\text{MODEL-C : } K_{PAR} = a \cdot K_{TD}^b \cdot m^c \quad (6)$$

a, b, c는 회귀계수다. 상대광학공기질량(relative optical airmass, m)은 태양복사가 지구 대기를 통과하는 직접적인 광학경로길이를 정의된다. m은 Kasten and Young¹⁵⁾의 방법론을 사용하고 다음 식(7)과 같다.

$$m = 1 / [\cos \theta_z + 0.050572(96.0795 - \theta_z)^{-1.6364}] \quad (7)$$

식(6)에서의 K_{PAR} 는 식(8)과 같이 정의될 수 있으며, 이론적으로 계산된 PAR_0 을 통해서 PAR_D 를 추정할 수 있다.

$$K_{PAR} = \frac{PAR_D}{PAR_0} \quad (8)$$

지표면에 도달하는 PAR_D 는 에어로졸이나 구름과 같은 많은 감쇄요인에 의해서 세기가 감소한다. MODEL-D는 맑은 날씨에서의 모든 감쇄효과를 정량화하여 나타낸 청천에서의 PAR 투과율 $K_{PAR,clear}$ (식(10))과 거의 전반적인 상태를 나타내는 K_{TD} 를 사용하여 PAR_D 를 추정할 수 있고, 다음 식(9)과 같다.

$$\text{MODEL-D : } K_{PAR} = a \cdot K_{PAR,clear}^b \cdot K_{TD}^c \quad (9)$$

$$K_{PAR,clear} = \frac{PAR_{D,clear}}{PAR_0} \quad (10)$$

a, b, c는 회귀계수다. 식(10)에서 $PAR_{D,clear}$ 는 맑은 날씨에서 관측된 지표에 도달하는 PAR_D 일사량 값이고, m의 함수로 추정할 수 있다. 이 과정에서 Hu et al.⁵⁾에 따라 K_T 가 0.7을 기준으로 그보다 클 때를 맑은 날씨로 정의하였다. 맑은 날씨의 관측값 중에서 70%가 $PAR_{D,clear}$ 의 경험모델 개발에, 나머지 30%로 모델 검증에

사용되었다. Fig. 1은 m 값의 변화에 따른 지표에 도달하는 PAR_D 의 변화를 나타낸 것이며, m 이 증가함에 따라 $PAR_{D,clear}$ 감소가 뚜렷하게 나타난다. 이러한 관계를 $PAR_{D,clear}$ 와 m 의 함수로 구성하였다.

각 모델들의 회귀계수는 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Estimation model parameters generated from KIER 10-min measured data

	a	b	c
MODEL-A	0.39		
MODEL-B	0.41	-23.61	1.50
MODEL-C	0.93	0.88	0.08
MODEL-D	0.97	0.90	0.02

Fig. 1 The relation between PAR_D and relative optical air mass under clear sky conditions (red points) and for all sky conditions (black points)

3. 결과 및 토의

3.1 대전에서의 PAR 변동성

Fig. 2는 한국에너지기술연구원에서 관측한 6월 18일부터 10월 15일까지의 PAR_D 와 R_D 사이의 관계성 및 PAR_D 와 태양천정각(θ_z), K_{TD} 와의 민감도를 나타낸 것이다. Fig. 2a에서는 PAR_D 와 R_D 사이의 slope가 0.39로 나타났으며, 이는 앞서 언급한 $PAR_0/R_0 = 0.39$ 라는 선행연구의 결과와 일치하는 것이다⁸⁾. 이 값을 중심으로 대기에서 흡수, 산란의 파장별 차이에 따라 변동될 수 있음을 의미한다. 일반적으로 PAR_D 와 R_D 의 변화는 θ_z 과 구름에 의해 발생한다. θ_z 이 커짐에 따라서 태양복사가 대기를 통과하는 광학경로가 길어진다. 태양복사의 에어로졸에 의한 감쇄효과는 파장과 음의 상관관계를 나타낸다¹⁶⁾. 이는 Fig. 3에서 확인할 수 있다. Fig. 3(a)에서는 광학경로에 따른 PAR_D 와 R_D 의 비율이 크게 변하지 않았지만, Fig. 3(b)에서 보면 태양광학경로가 길어지면서($\cos\theta_z$ 이 작아지면서) 근적외선 법선면 직달일사량(이후, NIR_D)의 비는 커짐을 볼 수 있다. 이는 대기광학경로가 길어져도(태양천정각 증가), 가시광 영역보다 긴 파장 범위인 근적외 영역의 대기 투과도가 상대적으로 높게 나타나며(Fig. 3(b)), 이 결과는 대기광학경로에 따른 파장별 일사량의 흡수, 산란, 투과 정도가 다르게 나타남을 관측을 통해 확인하였다.

Fig. 2 The relation between PAR_D and (a) R_D , (b) θ_z and (c) K_{TD}

Fig. 3 The relation between θ_z and (a) PAR_D/R_D , (b) NIR_D/R_D

3.2 PAR 추정 모델 결과

각 경험모델들의 추정정확성을 평가하기 위해, 관측값과 추정값의 관계를 Fig. 4에 나타내고, 자세한 통계값을 Table 2에 요약하였다. MODEL-A는 두 일사량의 비율만 적용된 간단한 모델임에도 불구하고, 0.98의 R^2 로 높은 추정정확성을 보여준다. 이는 Hu et al.⁵⁾에서도 간단한 회귀식을 통해 좋은 결과를 나타낸 것과 유사하다. 하지만, 다른 모델에 비해서 Mean Bias Error (MBE)에서 낮은 정확성을 보이는데, 대기상태를 나타내는 지표가 반영되지 않았기 때문으로 판단된다. 특히, 대기상태 지표는 공간, 계절에 따라 큰 변동성을 나타내지만, 본 연구에서의 대전지역 그리고 짧은 분석 기간으로 인해 그 정도는 약했던 것으로 보인다.

Table 2 Statistical estimators of each empirical models

	slope	yintercept	R^2	RMSE (rRMSE)	MBE (rMBE)
MODEL-A	0.98	1.32	0.983	17.474 (15.31%)	-1.029 (-0.90%)
MODEL-B	0.98	2.74	0.982	17.533 (15.17%)	0.462 (0.40%)
MODEL-C	0.98	2.75	0.983	17.314 (15.01%)	0.212 (0.18%)
MODEL-D	0.98	2.51	0.983	17.425 (15.11%)	0.191 (0.17%)

Fig. 4 A comparison between measured and estimated PAR_D using (a) MODEL-A, (b) MODEL-B, (c) MODEL-C and (d) MODEL-D. Dashed line is one to one line and blue line is regression line

MODEL-B는 구름, 에어로졸, 수증기 등의 모든 대기감쇄효과가 포함되어있는 청천지수 K_{TD} 가 적용되어 MODEL-A보다 Root Mean Square Error (RMSE), MBE의 향상을 보였다. MODEL-C에서는 MODEL-B보다 R^2 , RMSE, MBE 모두 향상을 나타내었다. 또한, MODEL-D에서는 다른 3개의 모델에 비해서 MBE가 가장 낮게 나타났지만, Hu et al.⁵⁾과 비교해 볼 때 추정정확성의 향상이 낮는데 이는 m의 함수로 구성된 $PAR_{D,clear}$ 추정모델에서의 문제로 판단된다. 즉, 경험모델의 특성상 장기간 자료로부터 분석된 기후학적 적용이 중요하다는 것을 반영한다. 전체적으로 살펴보면, 타 지역에서의 개발된 경험모델 방법론이 한국 지역에 대해서도 적용될 수 있는 가능성을 보여주고 있으며, 현재의 방법론을 기반으로 향후 장기간의 자료가 확보되면 법선면직달일사량, 대기상태지표 등을 종합적으로 고려한 PAR 일사량 추정 모델의 성능을 향상될 수 있음을 시사한다.

4. 결론

대전지역에 위치한 한국에너지기술연구원에서 관측된 파장별 법선면 직달복사와 법선면 전직달일사의 관계를 확인하였고, 이러한 결과를 가지고 관측된 R_D 을 가지고 PAR_D 을 추정해보았다. 선행연구에서 제시된 경험

모델의 방법론에 이를 변형해 법선면 직달복사를 이용한 방법론을 적용하여 그 결과를 확인하였다.

특히, MODEL-A와 같은 단순 상수로 모수화를 하는 방법보다 대기에서 일어나는 모든 감쇄효과를 나타내는 K_{TD} 를 고려하였을 때, 더 좋은 설명성을 나타내었다. 보다 긴 기간의 자료가 확보되면 더 많은 효과를 고려한 모델에서 훨씬 더 좋은 결과가 뚜렷하게 발견될 것이다.

또한 Hu et al.⁵⁾에선 MODEL-C와 MODEL-D가 사용한 무차원의 매개변수가 타지역에서의 사용가능성을 확인하였을 때 좋은 결과를 나타내는데, 이는 무차원의 매개변수(K_T , m , $K_{PAR,clear}$)가 지역적인 기후 변동성을 제거하여 다른 기후를 가지는 타지역에서도 큰 영향을 받지 않기 때문이다. 이를 이용하여 앞으로 향후 이뤄질 연구에서는 타지역에서의 사용가능성을 확인하는 연구가 필요하다.

후기

본 연구는 2020년도 한국에너지기술연구원의 재원으로 UV, PAR 파장 영역별 일사량 및 DNI 추정 경험모델 개발 사업의 연구비 지원으로 수행한 연구입니다(과제번호 : 2020-0081-01).

REFERENCES

1. Calbó, J., Pagès, D., and González, J., Empirical Studies of Cloud Effects on UV Radiation: A Review, *Reviews of Geophysics*, Vol. 43, No. 2, RG2002, 2005.
2. Alados, I., Foyo-Moreno, I. Y., and Alados-Arboledas, L., Photosynthetically Active Radiation: Measurements and Modelling, *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 78, No. 1-2, pp. 121-131, 1996.
3. Tsubo, M. and Walker, S., Relationships between Photosynthetically Active Radiation and Clearness Index at Bloemfontein, South Africa, *Theoretical and Applied Climatology*, Vol. 80, No. 1, pp. 17-25, 2005.
4. Hu, B. and Wang, Y., Comparison of Multi-empirical Estimation Models of Photosynthetically Active Radiation under All Sky Conditions in Northeast China, *Theoretical and Applied Climatology*, Vol. 116, No. 1-2, pp. 119-129, 2014.
5. Hu, B., Yu, Y., Liu, Z., and Wang, Y., Analysis of Photosynthetically Active Radiation and Applied Parameterization Model for Estimating of PAR in the North China Plain, *Journal of Atmospheric Chemistry*, Vol. 73, No. 4, pp. 345-362, 2016.
6. Kim, C. K., Kim, H. G., Kang, Y. H., Yun, C. Y., and Kim, S. Y., Probabilistic Prediction of Direct Normal Irradiance Derived from Global Horizontal Irradiance over the Korean Peninsula by Using Monte-Carlo Simulation, *Solar Energy*, Vol. 180, pp. 63-74, 2019.
7. Mathiesen, P. and Kleissl, J., Evaluation of Numerical Weather Prediction for Intra-day Solar Forecasting in the Continental United States, *Solar Energy*, Vol. 85, No. 5, pp. 967-977, 2011.
8. Smith, E. V. and Gottlieb, D. M., Solar Flux and Its Variations, *Space Science Reviews*, Vol. 16, No. 5-6, pp. 771-802, 1974.
9. Gueymard, C. A., The Sun's Total and Spectral Irradiance for Solar Energy Applications and Solar Radiation Models, *Solar energy*, Vol. 76, No. 4, pp. 423-453, 2004.
10. Papaioannou, G., Nikolidakis, G., Asimakopoulos, D., and Retalis, D., Photosynthetically Active Radiation in

Athens, Agricultural and Forest Meteorology, Vol. 81, No. 3-4, pp. 287-298, 1996.

11. Jacovides, C. P., Timvios, F. S., Papaioannou, G., Asimakopoulos, D. N., and Theofilou, C. M., Ratio of PAR to Broadband Solar Radiation Measured in Cyprus, Agricultural and Forest Meteorology, Vol. 121, No. 3-4, pp. 135-140, 2004.
12. Iqbal, M., An Introduction to Solar Radiation; Academic Press: Toronto, ON, Canada, 1983.
13. Foyo-Moreno, I., Vida, J., and Alados-Arboledas, L., A Simple All Weather Model to Estimate Ultraviolet Solar Radiation (290-385 nm), Journal of Applied Meteorology, Vol. 37, No. 7, pp. 1020-1026, 1999.
14. Hu, B., Wang, Y., and Liu, G., Variation Characteristics of Ultraviolet Radiation Derived from Measurement and Reconstruction in Beijing, China, Tellus B: Chemical and Physical Meteorology, Vol. 62, No. 2, pp. 100-108, 2010.
15. Kasten, F. and Young, A. T., Revised Optical Air Mass Tables and Approximation Formula, Applied Optics, Vol. 28, No. 22, pp. 4735-4738, 1989.
16. Eck, T. F., Holben, B. N., Dubovik, O., Smirnov, A., Goloub, P., Chen, H. B., Chatenet, B., Gomes, L., Zhang, X.-Y., Tsay, S.-C., Ji, Q., Giles, D., and Slutsker, I., Columnar Aerosol Optical Properties at AERONET Sites in Central Eastern Asia and Aerosol Transport to the Tropical Mid-Pacific, Vol. 110, D06202, 2005.