전천일사를 이용한 남한 지역 홍반자외선 추정 경험 모델 구성 및 평가

김재민* · 이윤곤*** · 김현구***

*충남대학교 우주·지질학과, 박사과정

**충남대학교 우주·지질학과, 교수

***한국에너지기술연구원 신재생에너지자원·정책센터, 책임연구원

Construction and Evaluation of Empirical Model for Estimating UV Erythema Irradiance using Global Horizontal Irradiance in South Korea

Kim Jaemin* · Lee Yun Gon*** · Kim Hyun-Goo***

*Department of Astronomy, Space Science and Geology, Chungnam National University, Ph.D. Candidate

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

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

[†]Corresponding author: yglee2@cnu.ac.kr

Abstract

Ultraviolet (UV; 100~400 nm) radiation, which is a short-wavelength part of the solar spectrum, has harmful effects on the human body, such as skin aging, sunburn, and skin cancer. Because overexposure to UV causes erythema in human skin, the UV erythema irradiance (UVER) is provided to people as an index of the risks of UV irradiation. In this study, statistical empirical models for estimating surface UVER were developed and evaluated at Gangneung, Pohang, Mokpo, and Gosan sites in South Korea, where UVER and global horizontal irradiance (GHI) observation data have been collected for a long period. For the establishment of an empirical model, the clearness index of the GHI (K_T), total column ozone, and solar zenith angle were used as independent variables. The underestimations of the empirical models were improved by grouping the dataset with K_T . The improved models exhibited an average R^2 of 90% at the four sites during the validation period. The atmospheric transmittance of the UVER was reconstructed using the empirical model at the GHI observation network during past 5 year data in South Korea, and the monthly variation showed seasonality with high values in May – August and low values in December – January.

Keywords: 자외선(Ultraviolet), 홍반자외선(Erythema UV), 전천일사(Global horizontal irradiance), 청천지수(Clearness index), 경험모델(Empirical model)

기호설명

K_T : GHI의 청천지수

Journal of the Korean Solar Energy Society
Vol.40, No.6, pp.95-103, December 2020
<https://doi.org/10.7836/kses.2020.40.6.095>

pISSN : 1598-6411

eISSN : 2508-3562

Received: 05 October 2020

Revised: 19 November 2020

Accepted: 20 November 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.

$K_{TUV\overline{ER}}$	: 홍반자외선의 청천지수
$UVER_0$	: 맑은 날씨의 홍반자외선량
m_r	: 광학 경로(Optical path)
M1	: 경험모델 1
M2	: 경험모델 2
Improved-M1	: 개선된 경험모델 1
Improved-M2	: 개선된 경험모델 2
R^2	: 결정계수
UV	: 자외선(Ultraviolet)
UVER	: 홍반자외선 복사량(UV Erythral Irradiance) (W/m^2)
GHI	: 전천일사(Global Horizontal Irradiance) (W/m^2)
TOC	: 오존전량(Total Ozone Column)
SOC	: 광학경로상 오존량(Slant Ozone Column)
RMSE	: Root Mean Square Error
MBE	: Mean Bias Error

1. 서론

태양 복사는 지구의 기상 현상, 기후 시스템, 생태계 등을 변화·유지시키는 주요 에너지원이다. 지표에 도달하는 전체 파장의 태양 복사 에너지, 전천일사(Global horizontal irradiance; GHI) 중 파장 100 ~ 400 nm 영역의 복사를 자외선 복사(Ultraviolet radiation; UV)라고 한다. UV는 파장에 따라 다시 UV-A, B, C로 나뉘며 이 중 UV-A와 UV-B의 일부는 지표에 도달하여 지상의 생명체에 영향을 미친다. 특히 UV-B (280 ~ 320 nm)는 지표 도달 전천일사 중 극히 일부이지만 장시간 노출될 경우 홍반(erythema), 백내장, 피부암 등의 질병을 야기한다. McKinley and Diffey¹⁾는 UV의 파장별 홍반 발생 정도에 따라 홍반가중함수를 제시하였으며, 이 함수를 파장별로 적용 및 적산한 값을 홍반자외선복사(Erythral UV radiation; UVER)로 정의한다. 세계보건기구의 권고에 따라 세계 각국에서는 UVER을 ‘자외선 지수(UV Index)’로 변환하여 관측 및 예측에 관한 정보로 제공하고 있다.

자외선 정보의 제공을 위해 지속적인 UV 모니터링이 필요하지만 자외선 관측 기기를 공간적으로 조밀하게 설치하고 유지하는 데 비용적 제한성이 크다. 이에 비해 기상관측소의 기본 관측요소인 GHI 관측 자료는 공간적으로 조밀하게 구성되어있기 때문에 많은 선행연구들에서는 GHI를 이용한 UVER 추정을 진행해왔다. UV는 GHI와 높은 상관성이 존재하지만 오존에 의한 강한 흡수 파장대(약 315 nm)를 포함하고 있고²⁾, 특히 UVER의 경우 홍반가중함수가 오존 흡수 파장대역에 높은 가중치를 가지기 때문에 GHI와의 선형적 관계를 가

지지 않는다. 따라서 GHI 뿐만 아니라 오존, 태양 천정각 등의 영향을 추가로 고려하여 UVER을 추정하는 경험 모델 개발이 스페인, 태국 등에서 이루어져왔다³⁻⁷⁾. Anton et al.⁴⁾에서는 스페인 남서부 지방에서 UVER의 대기 투과도를 추정하여 Badajoz, Caceras, Plasencia 등 세 지역에서 평균 97%의 설명성을 얻었으며, Buntoung et al.⁶⁾는 태국에 분포해있는 네 개 지역의 UVER과 GHI 자료를 이용하여 경험적 비선형회귀모델을 통해 95%의 성능으로 UVER을 추정하였다.

한국 역시 현재 40여개 이상의 GHI 관측망을 운영하고 있는 반면 UVER 관측소는 15개로 적은 수이며, 이 중 8개소는 2018년부터 관측이 시작되어 UVER의 기후학적 분석을 수행하기에 시공간적 한계가 존재한다. 본 연구에서는 국외 선행연구에서 사용된 경험모델을 기반으로 장기간 UVER 및 GHI 관측이 이루어진 한국의 4개 지점에 대해 전천일사의 청천지수(Clearness index), 오존량 및 태양 천정각을 이용한 UVER 추정모델을 구성 및 검증하고자 하며, 검증된 경험모델로 39개 전천일사 관측망의 최근 5년간 평균 홍반자외선 대기투과도의 계절적 특성을 확인하는 것을 목적으로 한다.

2. 자료

2.1 지표 복사량

UVER 추정 경험모델 구성을 위해 강릉, 포항, 목포, 고산 지점에서 CMP-21 (Kipp & Zonen, Netherlands)로 측정된 GHI자료를 사용하였다. GHI의 품질 관리(Quality Control)는 Jung et al.⁸⁾에 따라 대기의상한에 대한 전천일사의 비율이 1보다 크거나 0.03 이하인 경우를 제외하였다. UVER은 네 지점에서 UV-Biometer (Model 501, Solar Light Co.)로 측정된 자료를 사용하였다. UV-Biometer는 홍반가중합수와 유사한 파장 반응으로 자외선 복사량을 측정하여 이를 280 ~ 320 nm 범위에 대해 적산하여 매 10분마다 최소홍반량(Minimal Erythral Dose; MED, 1MED=210 J/m²)의 단위로 제공한다⁹⁾. 이 기기는 Solar Light 사에 의해 1년에 두 번씩 검보정 작업을 통해 기기 정확도가 유지되고 있다. 이밖에 경험모델 확대 적용을 위해 39개 전천일사 관측망의 GHI 자료를 활용하였으며, GHI 및 UVER 자료는 1시간 평균 값(단위: W/m²)으로 변환 후 사용되었다.

2.2 복사량 감쇄 인자

UVER 추정 경험 모델에 오존에 의한 감쇄 효과 적용을 위해 Aura 위성의 Ozone Monitoring Instrument (OMI)와 Suomi-National Polar-orbiting Partnership (NPP) 위성의 Ozone Mapping and Profiler Suite (OMPS) 오존 전량(Total Ozone Column; TOC) 자료를 사용하였다. OMI와 OMPS TOC 자료는 위·경도 1° × 1°의 공간해상도를 가지며 분석 지점과 가까운 격자 값을 추출해 사용하였다. 또한 경험모델 구성 시 구름에 의한 효과를 고정시키기 위해 관측지점에서 제공되는 목측 전운량(1 ~ 10) 자료를 사용하였다. 대기 중 수증기 또한 복사량을 감쇄시키는 인자 중 하나이지만 수증기는 근적외선 영역의 복사를 주로 흡수하며²⁾, UVER의 대기 투과 정도에는 GHI에 비해 매우 작은 영향을 미치므로⁶⁾ 본 연구에서는 UVER 추정을 위한 인자에서 제외하였다.

3. 방법론

본 연구에서는 Foyo-Moreno et al.³⁾과 Antón et al.⁴⁾의 방법을 따라 UVER 추정 경험모델을 구성하였다. 두 경험모델은 연중 지표도달 일사량이 높은 스페인에 대해 제안된 모델이며 GHI의 청천지수 및 오존량을 경험모델의 입력 변수로 사용하였다. 청천지수는 대기외상한(Top of atmosphere) 일사량에 대한 지표 도달 일사량의 비율로 정의한다. GHI의 청천지수는 K_T 로, UVER의 청천지수는 K_{TUVER} 로 명명하였다. 이때 복사량의 시간 적산 대기외상한일사량 계산은 $I_{qbal}^{(2)}$ 을 참고하였으며 시간 평균값으로 변환 후 GHI 및 UVER의 지표 관측 값을 적용해 각각의 청천지수를 계산하였다.

Foyo-Moreno et al.³⁾에서는 K_T 와 맑은 날씨의 홍반자외선량($UVER_0$) 이 지표 UVER과 갖는 경험적 관계로부터 UVER을 추정하였다. Foyo-Moreno et al.³⁾이 제시한 경험모델을 M1이라고 명명하며, UVER 추정 식은 식(1)과 같다.

$$UVER = A(K_T \times UVER_0)^B \quad (A, B: \text{empirical coefficients}) \quad (1)$$

$UVER_0$ 는 자외선이 오존층 통과 후 지표에 도달하기 전 구름의 영향을 받지 않았을 때의 복사량으로, 분석 기간 동안 맑은 날씨의 UVER이 태양 천정각(θ)에 의한 광학 경로(Optical path; $m_r = 1/\cos(\theta)$)와 갖는 멱법칙(power law) 관계식($UVER_0 = a(m_r)^b$)을 통해 경험적으로 산출된다. 이때 m_r 과 $UVER_0$ 의 관계에서 오존량에 대한 의존성 고려를 위해 자료를 오존 전량으로 그룹화(20 Dobson Unit 간격) 하여 그룹마다 $UVER_0$ 을 산출하였다.

Antón et al.⁴⁾은 K_T 및 광학 경로상 오존량(Slant ozone column; $SOC = TOC \times m_r$)과 K_{TUVER} 이 갖는 비선형 관계식을 통해 지표 UVER을 추정하였다. 이 모델은 다음의 식(2)로 구성되며, 본 연구에서는 M2로 명명하였다.

$$K_{TUVER} = A(SOC)^B(K_T)^C \quad (A, B, C: \text{empirical coefficients}) \quad (2)$$

식(2)로 얻어진 K_{TUVER} 에 대기외상한 홍반자외선 복사량을 곱해 최종적으로 UVER을 산출한다. 본 연구에서는 경험모델 구성을 위해 2005 ~ 2016년 기간 동안 자료의 50% 자료를 사용하였고 나머지 50%는 검증에 활용하였다.

4. 결과

4.1 홍반자외선 추정 결과

Fig. 1은 경험모델 M1, M2로부터 검증 기간 동안 네 지점에서 추정 및 관측된 UVER의 산점도이다. M1은

네 지점 평균 0.89의 R^2 을 보였으며, Root Mean Square Error (RMSE)는 17.62 W/m^2 , Mean Bias Error (MBE)는 -2.02 W/m^2 의 성능을 보였다(Table 1의 M1, M2). M2는 네 지점 평균 R^2 이 0.86으로 M1보다 약 3% 낮은 설명성을 보였고 RMSE와 MBE는 각각 18.96 W/m^2 , -1.80 W/m^2 으로 나타났으며, M1, M2 모두 지점별로는 포항에서 가장 높은 성능을 보였다. 지점에 따른 성능 차이는 지역에 따른 대기질, 기후학적 특성, 오존량 등의 차이로 유발된 것으로 판단된다.

Fig. 1 Relationship between observed UVER and estimated UVER by (a-d) M1 and (e-h) M2 at Gangneung, Pohang, Mokpo, and Gosan site during the validation period

Table 1 RMSE (W/m^2), relative RMSE (rRMSE; %), MBE (W/m^2), relative MBE (rMBE; %) and R^2 of M1/M2 and improved M1/M2 during the validation period

	M1					M2				
	Gangneung	Pohang	Mokpo	Gosan	Average	Gangneung	Pohang	Mokpo	Gosan	Average
RMSE	15.75	17.14	19.14	18.47	17.62	17.28	18.83	20.17	19.55	18.96
(rRMSE)	(32.61)	(29.40)	(32.23)	(30.17)	(31.10)	(35.78)	(32.39)	(33.96)	(31.93)	(33.49)
MBE	-2.87	-2.84	-3.07	-2.56	-2.84	-2.42	-1.85	-1.91	-1.02	-1.80
(rMBE)	(-5.93)	(-4.87)	(-5.18)	(-4.19)	(-5.04)	(-5.00)	(-3.17)	(-3.22)	(-1.66)	(-3.26)
R^2	0.89	0.90	0.88	0.89	0.89	0.86	0.88	0.85	0.87	0.86

	Improved-M1					Improved-M2				
	Gangneung	Pohang	Mokpo	Gosan	Average	Gangneung	Pohang	Mokpo	Gosan	Average
RMSE	14.59	15.96	18.03	17.40	16.49	16.01	17.89	19.66	19.52	18.27
(rRMSE)	(24.90)	(25.38)	(25.94)	(25.23)	(25.36)	(33.14)	(30.68)	(33.10)	(31.89)	(32.20)
MBE	-2.16	-2.10	-2.20	-1.61	-2.02	-0.98	-0.63	-0.54	-0.02	-0.54
(rMBE)	(-4.47)	(-3.60)	(-3.71)	(-2.62)	(-3.60)	(-2.04)	(-1.07)	(-0.91)	(-0.03)	(-1.01)
R^2	0.90	0.91	0.89	0.90	0.90	0.88	0.89	0.86	0.87	0.88

두 경험모델 방법론이 제시되었던 스페인 남서부 지역에서는 95% 이상의 모델 설명성이 나타났으나, 남한 지역에서는 이보다 낮은 성능(M1과 M2 각각 89%, 86%)으로 그 차이가 나타나는 원인 중 하나로서 지역의 기후학적 특성 차이를 제시할 수 있다. 스페인은 여름철 고온 건조한 기후학적 특성을 보여 높은 일사량이 특징적이지만 남한 지역의 경우 여름철 고온 다습한 특성으로 높은 강수량 및 운량을 보이며 이에 따른 태양복사 대기 투과도의 시공간적 변동성이 큰 지역이다. 본 연구 결과에서는 두 모델 모두 UVER의 과초 추정 경향을 보이고 있으며 특히 이러한 경향성이 UVER이 높은 경우에 두드러진다. 높은 UVER에 노출 시 홍반, 피부암 등 생물학적으로 부정적인 영향이 나타나므로 남한 지역에 대해 보다 정확한 UVER 추정을 위한 경험모델로의 개선이 요구된다.

4.2 청천지수를 이용한 경험모델의 개선

M1과 M2에는 K_T 가 입력 변수로 사용되며 모델 구성에 사용되는 전체 자료로부터 UVER 및 K_{TUVER} 와 K_T 의 경험적 관계식을 통해 UVER을 추정한다. Kim et al.¹⁰⁾은 한국 지역 UVER, GHI의 대기투과도와 구름 및 에어로졸 변화의 관계성을 분석하였으며, 대기가 구름 및 에어로졸에 의해 혼탁해짐(K_T 감소)에 따라 두 값의 비율 및 파장별 민감도 차이를 제시하였다. 따라서 본 연구에서는 GHI와 UVER의 대기투과도 차이를 고려하기 위해 분석 자료를 K_T 로 그룹화하고, 그에 따른 경험식을 구성하였다. 그 결과 Fig. 2와 같이 관측 및 추정된 UVER 사이의 추세선이 1:1 선에 가까워짐을 확인하였다. 개선된 모델의 MBE는 평균 0.82 W/m² (Improved-M1), 1.26 W/m² (Improved-M2) 만큼 감소하였고 RMSE는 Improved-M1의 경우 최대 1.18

Fig. 2 Relationship between observed UVER and estimated UVER by (a-d) Improved-M1 and (e-h) Improved-M2 at Gangneung, Pohang, Mokpo, and Gosan site during the validation period

W/m^2 (포항), Improved-M2는 1.28 W/m^2 (강릉) 감소하였다. 결정상관계수는 약 1 ~ 2% 정도 향상되는 것으로 나타났으나, 기온기 증가와 과소모의 값 감소를 통해 개선된 효과가 있다고 판단된다(Table 1의 Improved-M1과 Improved-M2).

4.3 남한지역 홍반자외선 투과도

본 연구에서 개발된 경험모델을 이용하여 남한지역 39개 GHI 관측소에서 최근 5년간(2015 ~ 2019)의 UVER을 재구성 하였다. 2015 ~ 2019 기간 동안 한국 지역의 평균 오존전량은 $313(\pm 6) \text{ DU}$ 이며, 청천지수 K_T 는 $0.51(\pm 0.01)$ 의 값을 가진다. UVER 추정을 위해 3% 정도 높은 성능을 보였던 M1을 사용하였고, 경험모델의 전국 확대를 위해 강릉, 포항, 목포, 고산 네 지점의 자료를 취합하여 모델을 구성하였다. Fig. 3은 추정된 UVER에 대기외상한의 홍반자외선량을 적용해 산출한 5년 평균 남한지역 $K_{TUV\text{ER}}$ 의 분포와 및 전천(All sky), 맑은 날씨(Clear sky; 전운량 3 미만), 차폐(Overcast sky; 전운량 7 초과) 조건에서의 월평균 UVER 투과도 ($K_{TUV\text{ER}} \times 100$; %)이다. 지역적으로 $K_{TUV\text{ER}}$ 은 한반도 중남부 지방에서 높게 나타나며 수도권 및 서울과 남해안 및 남동부 해안 지역에서 낮은 값을 보였다(Fig. 3a). Clear sky에서 연평균 투과도는 1.50%로 최대 투과도는 8월에, 최소 투과도는 12월(0.88%)에 나타난다(Fig. 3b). Park et al.¹¹⁾은 Dobson 분광광도계와 Brewer 분광광도계 자료를 이용해 한반도 지역에서 TOC가 봄철(3 ~ 4월) 최대치(서울: 359 DU, 포항: 348 DU)를 보인 후 점차 감소하여 10월 최소값(서울: 291 DU, 포항: 284 DU)을 보인다고 보고하였다. 이러한 오존전량 변동성과 태양 고도각 변동에 의해 늦여름 UVER의 최대 투과도가 야기된 것으로 판단된다. All sky 조건 연평균 $K_{TUV\text{ER}}$ 는 1.18%로 Clear sky에 비해 약 21% 적은 투과도를 보이며, Clear sky와 달리 5월에 최대 투과도

Fig. 3 (a) Spatial distribution of 5-years mean $K_{TUV\text{ER}} \times 100$ [%] and (b) time series of monthly mean $K_{TUV\text{ER}}$ under all sky (dot), clear sky (circle), and overcast sky (cross) conditions during 2015-2019 in the South Korea

(1.64%)를 보인다. 이는 여름철 고온다습한 기상 조건에서 잦은 구름 형성과 강수 현상의 영향을 받아 6 ~ 8월 평균 투과도가 감소하기 때문으로 여겨진다. Overcast sky 조건에서는 All sky와 마찬가지로 5월에 최대 투과도가 나타나며 연평균 $K_{TUV\overline{ER}}$ 는 0.78%로 Clear sky에 비해 약 48% 적은 UVER이 투과된다.

5. 요약 및 결론

본 연구에서는 2005 ~ 2016년 기간 동안 강릉, 포항, 목포, 고산 네 지점의 홍반자외선 및 전천일사 자료와 위성 오존전량 자료, 목측 운량 자료를 이용하여 UVER 추정 경험모델을 구성 및 검증하였다. 국외 선행연구에서 제시된 방법으로 구성한 경험모델 M1, M2는 각각 평균 89%, 86%의 추정 성능을 보였으나 공통적으로 과소추정(M1과 M2 각각 MBE -2.84 , -1.80 W/m²) 경향을 보였다. 이에 GHI 및 UVER에서 나타나는 대기투과도의 파장 의존성 고려를 위해 전천일사의 청천지수, K_T 에 따라 자료를 그룹화 하여 경험모델을 재구성하였고, M1과 M2 모두 MBE 및 RMSE가 개선되었다. 개선된 경험모델을 이용하여 최근 5년 동안 국내 39개 전천일사 관측망에 대해 UVER을 추정 및 5년간 남한 지역의 월평균 홍반자외선 투과도 $K_{TUV\overline{ER}}$ 를 산출하였다. 남한 지역에서 Clear sky 조건의 $K_{TUV\overline{ER}}$ 는 5 ~ 8월 기간에 높은 값을 유지하다가 8월에 최대값을 보인 후 겨울철 최소값을 보였다. $K_{TUV\overline{ER}}$ 의 이러한 계절 변동은 북반구 오존전량 및 태양 고도각의 변동에 의한 것으로 판단된다. All sky 조건의 $K_{TUV\overline{ER}}$ 는 여름철(6 ~ 8월) 고온다습한 기상 조건에서 잦은 구름 형성 및 강수 현상에 의해 5월에 최대값을 보인후 점차 감소하는 모습이 나타났다.

본 연구에서는 GHI 관측자료를 이용해 자외선 관측소가 없는 지역에서 UVER을 경험적으로 추정하고 높은 성능을 확인하였으며 과거 기간과 확장된 공간분포에 대해 UVER을 재구성 및 월평균 투과도의 특성을 분석함으로써 경험모델의 활용 가능성을 제시하였다.

후 기

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. McKinlay, A. and Diey, B. L., A Reference Action Spectrum for Ultraviolet Erythema in Human Skin. CIE Journal. Vol. 6, pp. 17-22, 1987.
2. Iqbal, M., An Introduction to Solar Radiation. Academic Press: Toronto, ON, Canada, 1983.
3. Foyo-Moreno, I., Alados, I., and Alados-Arboledas, L., Adaptation of an Empirical Model for Erythemat Ultraviolet Irradiance. Annales Geophysicae. Vol. 25, No. 7, pp. 1499-1508, 2007.
4. Antón, M., Serrano, A., Cancillo, M. L., and García, J. A., An Empirical Model to Estimate Ultraviolet Erythemat Transmissivity. Annales Geophysicae. Vol. 27, No. 4, pp. 1387-1398, 2009.

5. Esteve, A. R., Martínez-Lozano, J. A., Marín, M. J., Estellés, V., Tena, F., and Utrillas, M. P., The Influence of Ozone and Aerosols on The Experimental Values of UV Erythral Radiation at Ground Level in Valencia. *International Journal of Climatology*. Vol. 29, No. 14, pp. 2171-2182, 2009.
6. Buntoung, S., Janjai, S., Nunez, M., Choosri, P., Pratummasoot, N., and Chiwpreecha, K., Sensitivity of Erythral UV/global Irradiance Ratios to Atmospheric Parameters: Application for Estimating Erythral Radiation at Four Sites in Thailand. *Atmospheric Research*. Vol. 149, pp. 24-34, 2014.
7. Gurrea, G., Blanca-Giménez, V., Pérez, V., Serrano, M.-A., and Moreno, J.-C., Statistical Study and Prediction of Variability of Erythral Ultraviolet Irradiance Solar Values in Valencia, Spain. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*. Vol. 54, No. 4, pp. 599-610, 2018.
8. Jung, Y., Lee, H., Kim, J., Cho, Y., Kim, J., and Lee, Y., Spatiotemporal Characteristics in the Clearness Index Derived from Global Solar Radiation Observations in Korea. *Atmosphere*. Vol. 7, No.4, 2016.
9. Solar Light, UV-Biometer User's Manual; Solar Light Co.: Glenside, PA, USA, 1993.
10. Kim, J., Lee, Y. G., Koo, J. H., and Lee, H., Relative Contributions of Clouds and Aerosols to Surface Erythral UV and Global Horizontal Irradiance in Korea. *Energies*. Vol. 13, No. 6, pp. 1504, 2020.
11. Park, S. S., Kim, J., Cho, N., Lee, Y. G., and Cho, H. K., The Variations of Stratospheric Ozone Over the Korean Peninsula, 1985-2009. *Atmosphere*. Vol. 21, No. 4, pp. 349-359, 2011.