

제주도 고산지역 자외선복사의 월변화 특성과 원인 고찰

김영아^{1)*} · 최우갑²⁾

¹⁾국립기상과학원 환경기상연구과, ²⁾서울대학교 지구환경과학부

(접수일: 2017년 5월 8일, 수정일: 2017년 8월 6일, 게재확정일: 2017년 8월 24일)

A Study on the Monthly Characteristics of Solar UV Radiation in Gosan, Jeju

Young-Ah Kim^{1)*} and Wookap Choi²⁾

¹⁾Environmental Meteorology Research Division, National Institute of Meteorological Sciences, Jeju, Korea

²⁾School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, Seoul, Korea

(Manuscript received 8 May 2017; revised 6 August 2017; accepted 24 August 2017)

Abstract The monthly-mean irradiance of ultra violet (UV)-B and UV-A observed from 2005 to 2014 and 2012 to 2014, respectively, at noon in Gosan, Jeju, South Korea are analyzed. We compare cloudiness, total ozone, visibility, and relative humidity with an emphasis on the four months from May to August (MJJA), which shows the largest UV radiation. While the incoming UV-B radiation at the top of the atmosphere in Gosan is the largest in June due to the small solar zenith angle, the observed surface UV-B shows an unexpected smaller value in June than those in May, July or August. In June, the meteorological conditions affecting Gosan are completely dominated by cloudiness and thus, frequent overcast seems to determine the minimum UV-B. Another important UV-determining factor is the total ozone, which exhibits a monotonic decrease during MJJA without agreeing to the characteristic feature of UV. The ratio of UV-B to UV-A is not generally influenced by cloudiness. Thus, the ratio is a useful indicator of atmospheric turbidity showing larger values for increasing visibility, except in June. A simple model has been used to estimate surface UV by using the observed ozone and visibility in the cloudless condition. The result shows that UV has the lowest value in June with small variation during MJJA. Model estimation also shows that the different characteristic features observed in July between surface UV-B and UV-A is the result of less absorption of UV-B by ozone than that of UV-A by a smaller amount of total ozone.

Key words: UV-B, UV-A, Gosan, cloudiness, total ozone, visibility

1. 서 론

자외선(UV)은 10~400 nm 파장영역의 전자파로 보통 280~400 nm 영역이 지표에 도달하는데 이는 지표에 도달하는 태양 복사 에너지 중 가장 짧은 파장 영역이며, 지구대기에 도달하는 전체 에너지의 약 7.6%

를 차지한다(Gueymard, 2004). 지표 자외선은 생물체의 세포와 섬유조직에 영향을 미치며 특히 DNA 손상을 가져올 수 있는데 파장이 320 nm 이상이 되면 이에 대한 영향이 거의 없는 것으로 알려져 이를 기준으로 UV-B (280~320 nm)와 UV-A (320~400 nm)로 나누어 그 영향을 구분한다. 한편, 인간 피부에 미치는 영향은 UV-A가 UV-B보다 피부 조직 깊숙이 침투가 가능하며(Korea Meteorological Administration (KMA), 2016), 눈에 손상을 주는 것도 주로 깊이 침투가 가능한 UV-A이다(Calbó et al., 2005).

지표에서 관측되는 UV 복사량은 태양천정각의 변

*Corresponding Author: Young-Ah Kim, Numerical Data Application Division, Numerical Modeling Center, 61 Yeouidaebang-ro, 16-gil, Dongjak-gu, Seoul 07062, Korea.
Phone: +82-2-2181-0544, Fax: +82-2-2181-0908
E-mail: kyababy2@korea.kr

화에 따른 광로의 길이(optical path length) 변화와 대기 구성 물질에 의한 흡수 및 산란의 영향을 주로 받는데 특히, 오존에 의한 흡수 영향과 에어로졸에 의한 산란 영향이 크고 강수, 구름 등 날씨의 영향도 많이 받는다. 월별로는 태양 천정각이 작아지는 5~8월 중 오존 전량이 감소하고 에어로졸 영향이 적어지는 7, 8월에 최대가 되는 경우가 많았으며 지역별 차이가 있었다(Oh et al., 1994; Cho et al., 1998; Kim et al., 1998; Cho et al., 2001; Kim et al., 2001; Kim et al., 2011; Kwak and Kim, 2011).

본 연구에서는 기상청 자외선 관측망 중 고산지역의 UV 복사의 월 변화 특성과 그 원인에 대해 고찰하였다. 2절에서는 사용한 자료에 대해 설명하였고, 3절에서는 UV-B 복사량의 월변화 특성을 구름이 없는 상태에서 오존과 시정의 영향과 구름의 영향으로 나누어 설명하였다. 4절에서는 같은 방법으로 UV-A 복사량의 월변화 특성을 살펴보고, 5절에서는 고산지역 6월의 UV 복사량의 특이성에 대해 고찰하였다. 6절에서는 결과를 정리하고 토의하였다.

2. 자 료

본 연구에서 사용한 자료는 고산(33.3°N, 126.2°E)에서 관측된 UV-B, UV-A, 전운량, 시정, 상대습도, 오존전량이다. UV-B는 UV-B Biometer를 이용하여 280~320 nm 파장영역에서 10분 간격으로 관측된 자료로 12시에 관측된 자료를 일 대표값으로 사용하였고, 사용된 자료 기간은 2005~2014년이며, 단위는 MED (Minimal Erythral Dose)이다. 1 MED는 $5.83 \times 10^{-2} \text{ W m}^{-2}$ 와 같으며, 본 연구에서는 $\mu\text{W cm}^{-2}$ 로 나타내었다. UV-B 복사량 자료는 자료의 품질관리를 위해 관측 기기 센서 온도가 25°C로 정상상태일 때의 자료만 사용하였다. 또, 10년 동안 관측된 자료의 매 관측 시간별 통계적 특성을 이용하여 관측 가능한 최고값을 경험적으로 설정하였으며, 0부터 관측 가능한 최고값 사이에 있는 자료만 사용하였다.

UV-A는 UV-A Radiometer를 이용하여 320~400 nm 파장영역에서 10분 간격으로 관측된 자료로 12시에 관측된 자료를 사용하였고, 단위는 $\mu\text{W cm}^{-2}$ 이며 자료 기간은 2012~2014년이다. UV-A 복사량 자료도 UV-B 복사량과 유사한 방법으로 자료 품질관리를 수행하였다. 3년 동안 관측된 자료를 이용하여 관측 가능한 최고값을 통계적 방법으로 결정하였고, 0부터 결정된 최고값 사이의 자료만 사용하였다. 단, UV-A의 경우 관측센서 온도 자료를 이용할 수 없어 기기 오류에 따른 품질관리는 수행하지 못했다.

전운량(1/10), 시정(dam), 상대습도(%)는 지상에서 매시 관측된 자료 중 12시 관측자료를 사용하였으며,

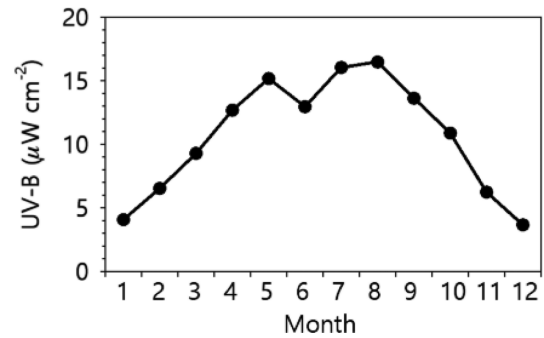


Fig. 1. Monthly-mean UV-B irradiance for 10 years from 2005 to 2014 observed at noon in Gosan.

자료 기간은 2005~2014년이다. 오존 전량은 Brewer Spectrophotometer로 관측된 일평균 자료를 이용하였고, 단위는 DU (Dobson Unit)이며 사용된 자료 기간은 2011~2015년이다.

본 연구에서는 관측 시간을 일치시켜 UV 복사량과 다른 변수와의 관련성을 보고자 하였으며, 관측 시간은 고산의 남중 시각이 12시 35분경인 점을 고려하여 자외선 복사량이 많은 12시를 선택하였다. 또, 12시 관측 UV 복사량의 월 변화 경향은 일 최대 UV 복사량의 월 변화 경향과 유사하여(not shown) 월 변화 특성 고찰에 무리가 없어 보였다. 그리고, 자료 기간을 2014년까지로 한 이유는 전운량 자료를 사용할 수 있는 기간과 일치시키기 위해서였다. 단, 오존 전량은 일평균 자료를 이용하여 계산한 월 변화만을 사용하였으므로 자료 기간을 2015년까지로 하였다.

3. UV-B 복사량의 월변화 특성

2005~2014년의 10년 동안 UV-B 복사량의 월평균 변화(Fig. 1)는 1월부터 점차 커져 8월에 $16.5 \mu\text{W cm}^{-2}$ 로 최대가 되고 이후 점차 작아져 12월에 $3.7 \mu\text{W cm}^{-2}$ 로 최소가 되는, 1년을 주기로 하는 변화 경향을 보였다. 그런데, 6월은 예외적으로 UV-B 복사량이 많아지는 5~8월 중 가장 적었으며 그 값은 $13.0 \mu\text{W cm}^{-2}$ 였다. 고산지역에서 6월은 월평균 태양천정각이 가장 작고 따라서 대기밖에서 입사되는 UV-B 복사량이 가장 많은 때이므로 이러한 결과는 다소 의외였으며, 이는 고산지역의 대기특성과 관련되므로 그 구체적 원인에 대해 고찰하였다.

3.1 구름이 없을 때 오존과 시정의 영향

지표에서 관측된 자외선 복사량은 구름, 오존, 시정(에어로졸) 등에 의한 영향이 모두 반영된 결과로, 관측값으로부터 개별 영향을 정량적으로 파악하기는 어

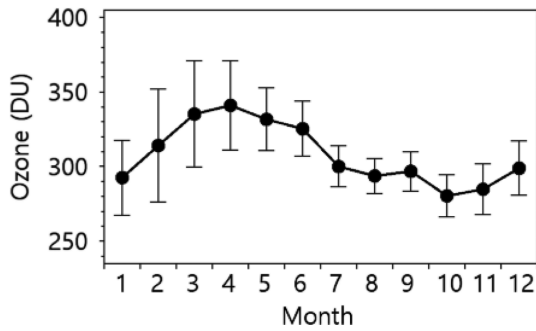


Fig. 2. Monthly-mean total ozone from 2011 to 2015 in Gosan. The vertical bar denotes one standard deviation.

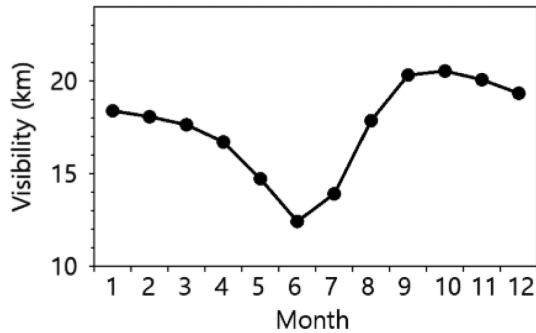


Fig. 3. Monthly-mean visibility for 10 years from 2005 to 2014 observed at noon in Gosan.

럽다. 본 연구에서는 구름이 없을 때 6월의 UV-B 복사량에 미치는 오존과 에어로졸의 영향을 정량적으로 고찰해보기 위하여 자외선 복사 전달 과정을 계산하는 간단한 경험 모델(Brine and Iqbal, 1983)에 기초하여 오존에 의한 흡수와 시정에 따른 대기혼탁도의 영향을 계산하였다.

계산에 사용된 오존 전량과 시정의 월 평균 값은 고산지역에서 관측된 값으로, 오존 전량의 월변화 경향은(Fig. 2) 4월이 341 DU로 가장 높았고 10월이 280 DU로 가장 낮았으며, UV-B 복사량이 많아지는 5~8월 기간에는 5월, 6월, 7월, 8월 순으로 그 값이 작아졌다. 시정의 월 변화 경향은(Fig. 3) 가을철인 10월에 약 20.5 km로 가장 좋았고 여름철인 6월에 약 12.4 km로 가장 나빴으며, 5~8월 기간 동안에는 6월, 7월, 5월, 8월의 순서로 시정이 좋아졌다.

구름이 없는 상태에서 파장별로 지표면에 수직으로 도달하는 복사조도(direct spectral irradiance, E_{λ})는 다음과 같이 계산하였다(Leckner, 1978).

$$E_{\lambda} = E_{0\lambda} \tau_{r\lambda} \tau_{oz\lambda} \tau_{a\lambda} \quad (1)$$

여기서, $E_{0\lambda}$ 는 대기밖에 도달하는 태양복사조도이고,

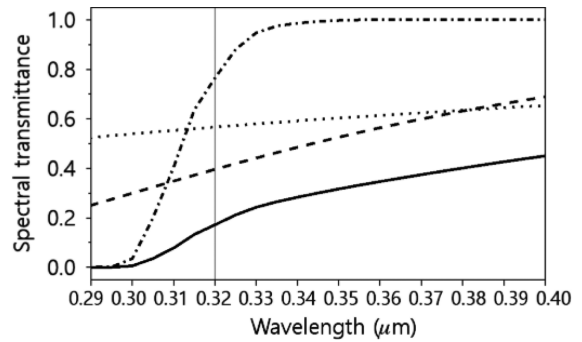


Fig. 4. Spectral transmittance calculated based on by ozone-absorption (dash-dotted line), by turbidity (dotted line), by Rayleigh scattering (dashed line), and by total extinction effects (solid line). The thin vertical line located at 0.32 μm denotes the boundary between the UV-B (left) and the UV-A (right).

$\tau_{r\lambda}$, $\tau_{oz\lambda}$, $\tau_{a\lambda}$ 는 각각 레일레이 산란, 오존 흡수, 대기혼탁도에 따른 투과비(transmittance)이다. 대기밖에 도달하는 태양복사조도는 World Radiation Center 스펙트럼(Fröhlich and Wehrli, 1981)을 이용하였고, 미국 표준대기(Atmosphere U. S., 1976) 상태를 가정하였다. 단, λ 는 280~400 nm 범위에서 5 nm 간격으로 계산하였다. 각각의 투과비를 계산하는 방법은 부록에서 보았다.

먼저, 자외선 파장역에서 파장에 따라 레일레이 산란, 오존 흡수, 대기혼탁도의 영향 등이 어떻게 나타나는지 보았다. 고산지역의 6월의 평균 태양 천정각 10.2도, 오존 전량 330 DU, 시정 20 km 상태일 때를 가정하고 파장 별 투과도를 계산하였다(Fig. 4). 그림에서 가는 수직선으로 나타낸 0.32 μm 를 기준으로 그 왼쪽 부분이 UV-B, 오른쪽 부분이 UV-A 영역이다. 오존의 흡수 영향을 나타내는 투과도(쇄선)는 UV-B 영역의 짧은 파장 쪽은 0에 가까웠고 차츰 증가하여 UV-A 영역에서는 투과도가 1에 가까워 파장에 따른 변화가 가장 컸다. 레일레이 산란에 의한 투과도(파선)도 UV-B 영역에서 더 작았고 파장이 증가하면서 커졌다. 대기 혼탁도와 관련된 투과도(점선)는 파장에 따른 변화가 비교적 작지만 역시 파장이 증가하면서 커졌다. 그림에서 검은 실선은 세가지 영향을 모두 고려한 투과도로, UV-B 영역의 짧은 파장 부분은 투과도가 0에 가까워 지표에 거의 도달하지 않았다.

지표에 도달하는 UV 복사량의 비율을 레일레이 산란, 오존 흡수, 대기혼탁도의 영향에 대해서 각각 비교하면(Table 1), UV-B는 레일레이 산란, 오존 흡수, 대기 혼탁도 순으로 그 영향이 컸고, UV-A는 레일레이 산란, 대기 혼탁도, 오존의 순서로 그 영향이 커서 차이가 있었다. 세 영향을 모두 고려하면 UV-B는 대

Table 1. Percentage of the UV-B and UV-A irradiances reaching at the surface calculated by including the effects of Rayleigh scattering, ozone absorption, atmospheric turbidity and all the above extinction effects. The conditions for the calculation are described in the text.

	UV-B (%)	UV-A (%)
Rayleigh scattering	34	58
Ozone absorption	38	99
Turbidity	55	62
Total	8	36

기를 통과하면서 대부분 소산되고 약 8% 만이 지표에 도달하였고, UV-A는 약 36%가 지표에 도달하는 것으로 계산되었다.

같은 방법으로 고산지역에서 관측된 월평균 오존전량과 시정 자료를 이용하여 구름이 없는 상태에서 자외선 복사량의 월변화를 계산하였다. 고산 지역에서 계절에 따른 태양천정각 변화를 고려하여 매일 12시에 대기밖에 도달하는 UV-B 복사량을 계산하면 Fig. 5a와 같으며, 태양천정각이 가장 작은 6월의 값이 가장 크다. 대기를 통과하면서 레일레이 산란, 오존 흡수, 에어로졸 산란 등의 영향을 고려했을 때 나타나는 UV-B 복사량의 월별 값의 변화를 Fig. 5b에서 보였다. Figure 5b의 가장 위에 위치한 파선은 레일레이 산란을 고려했을 때의 월평균 변화로, 5~8월의 값들을 비교하면 6월, 7월, 5월, 8월의 순서로 큰 값을 보여 태양 천정각에 따른 광학길이의 영향을 반영하며 6월이 가장 크다. 위에서 두번째로 위치한 점선은 레일레이 산란과 오존 흡수의 영향을 함께 고려한 결과로 7월, 6월, 8월, 5월의 순서로 큰 값을 보여 6월이 7월에 이어 두번째가 되었다. 위에서 세번째에 위치한 굵은 실선은 레일레이 산란과 오존 흡수 및 시정에 따른 대기 혼탁도의 영향을 모두 고려하여 계산한

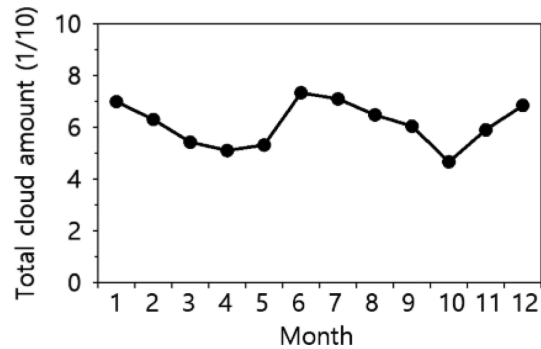


Fig. 6. Monthly-mean total cloud amount for 10 years from 2005 to 2014 observed at noon in Gosan.

결과로 5~8월 중 8월, 7월, 5월, 6월의 순서로 큰 값을 보여 작은 차이지만 6월이 가장 작아 관측과 유사하였다. 이러한 결과는 고산지역에서의 오존과 시정의 월변화가 UV-B 복사량의 월변화 및 6월의 값이 작아지는 데 상당정도 영향을 미쳤음을 알게 해 준다.

3.2 구름의 영향

2005~2014년의 10년 동안 관측된 전운량의 월평균 변화(Fig. 6)를 살펴보면 10월이 약 4.7로 가장 적었고 6월이 약 7.3으로 가장 많았으며, 5~8월 기간을 비교하면 6월, 7월, 8월, 5월의 순서로 적어졌다.

전운량과 UV-B 복사량의 관계를 보기 위하여 하늘 상태를 구름이 없는 맑은 하늘(전운량 = 0), 전운량이 각각 1~3, 4~6, 7~9인 3구간, 또 차폐된 하늘(전운량 = 10)의 5구간으로 나누고, 각각의 구간에서 평균 UV-B 복사량을 계산하여 비교하였다(Fig. 7a). 평균에 사용된 자료는 2005~2014년 5~8월 기간의 자료로, 구간별 평균 UV-B 복사량은 맑은 하늘 상태부터 차폐된 하늘 상태까지 차례로 각각 18.5, 21.0, 19.7, 16.0, 8.4 $\mu\text{W cm}^{-2}$ 였다. 계산 결과, 전운량이 1~3인 구간의

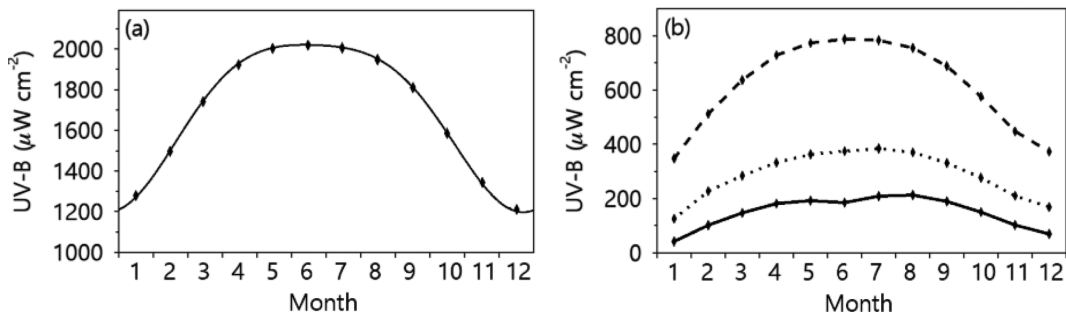


Fig. 5. (a) Monthly-mean UV-B irradiance at the top of the atmosphere, and (b) monthly-mean UV-B irradiance reaching at the surface calculated by Rayleigh scattering (dashed line), by Rayleigh scattering plus ozone absorption (dotted line), and by all the extinction effects (solid line). The conditions for the calculation are described in the text.

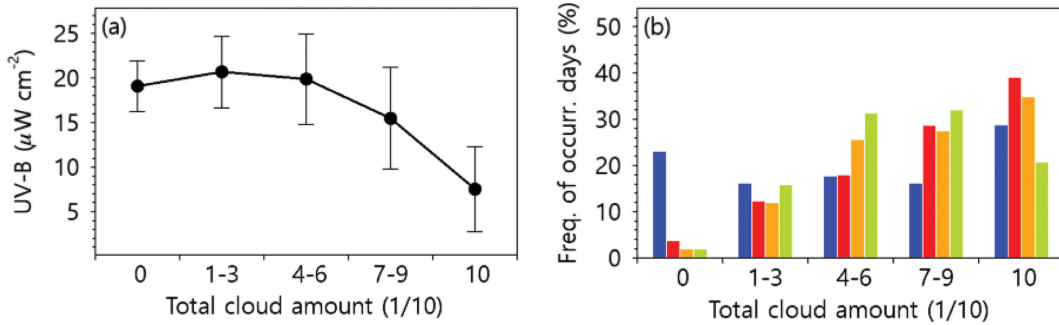


Fig. 7. (a) Average UV-B irradiance observed at noon in Gosan for the each range of the total-cloud amount for 10 years from 2005 to 2014. The vertical bar denotes one standard deviation. (b) Frequencies for each total-cloud range in May (blue), June (red), July (yellow), and August (green).

UV-B 복사량 값이 가장 컸으며 맑은 하늘 상태일 때의 약 114%였다. 전운량이 4~6인 구간도 맑은 하늘 상태일 때의 약 106%로 그 값이 오히려 커졌다. 구름에 의해 지표 복사량이 증가하는 현상은 구름에 의한 반사(reflection)와 전방 산란(forward scattering)의 증가 효과로 설명되며, 연구 결과에 따라 편차는 있지만 대체로 전운량이 4 이하일 때는 지표 자외선 복사량에 미치는 영향이 크지는 않다(Calbó et al., 2005). 한편, 전운량이 7~9인 구간은 맑은 하늘 상태일 때의 약 86% 정도로 줄어 들었고, 전운량이 10인 경우는 약 45% 정도로 급격히 작아져 하늘이 차폐됐을 때 구름에 의한 UV-B 복사의 차단 효과가 매우 커졌다.

Figure 7b에서는 5구간으로 나눈 하늘 상태에 따른 월별 현상일 수 비율을 5월(파랑), 6월(빨강), 7월(노랑), 8월(녹색)의 순서로 비교하였다. 그 결과, 전운량이 10인 차폐된 하늘 상태의 현상일 수 비율은 6월이 가장 높았다. 또, 6월은 전운량이 7~9인 현상일 수 비율도 높았지만 전운량이 0인 맑은 하늘 상태의 현상일 수 비율은 매우 낮아 구름에 의한 UV-B 복사량의 차단 효과가 매우 컸음을 알 수 있었다. 이에 비해 5월은 맑은 하늘의 현상일 수 비율이 가장 높았고 전운량이 7~9인 현상일 수 비율은 가장 낮았다. 한편, 8월은 맑은 하늘 현상일 수 비율은 가장 낮았지만 차폐된 하늘 상태의 현상일 수 비율도 가장 낮아 구름에 의한 차단 효과가 상대적으로 작았다. 즉, 6월은 고산지역의 오존과 시정의 월변화에 따른 영향으로 UV 복사량 값이 적어졌고, 이에 더하여 구름에 의한 차단 효과가 가장 컸기 때문에 관측과 같이 매우 적은 값을 보였다고 생각한다.

4. UV-A 복사량의 월변화 특성

UV-A 복사량의 월평균 분포를 보면(Fig. 8, 검은선),

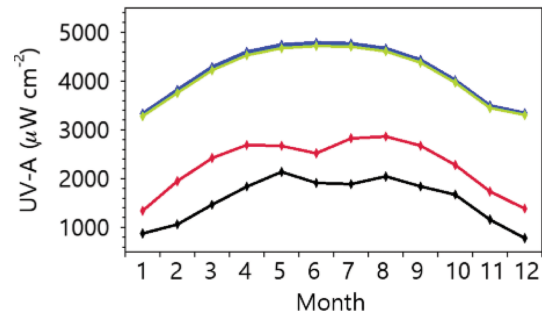


Fig. 8. Monthly-mean UV-A irradiance reaching at the surface calculated by Rayleigh scattering (blue), by Rayleigh scattering plus ozone absorption (green), and by all the extinction effects (red). The conditions for the calculation are described in the text. The black line denotes monthly-mean UV-A irradiance observed at noon from 2012 to 2014 in Gosan.

1월부터 5월까지 커져 5월에 $2137 \mu\text{W cm}^{-2}$ 로 최대가 나타났고, 6월과 7월에 작아졌다가 8월에 다시 커져 $2014 \mu\text{W cm}^{-2}$ 로 두번째로 큰 값이 나타났고 이후 12월까지 계속 작아져 12월에 $779 \mu\text{W cm}^{-2}$ 로 최소값이 나타났다. 5~8월 동안의 값을 비교해보면 5월, 8월, 6월, 7월의 순서로 큰 값을 보였다. 다만 UV-A의 평균 값이 상대적으로 짧은 기간(2012~2014년)의 자료로 결정되었음은 앞에서 언급한 바 있다.

앞서 UV-B의 월평균 분포를 계산할 때와 같은 조건 즉, 표준 대기 상태를 가정하고 고산 지역에서 관측된 오존, 시정의 월평균 값을 이용하여 UV-A 복사량의 월변화를 계산하였다(Fig. 8). 그림에서 가장 위에 위치한 UV-A 값(파란색)은 레일리 산란만을 고려한 값으로 6월, 7월, 5월, 8월의 순서로 큰 값을 보여 태양 천정각의 크기를 반영하였다. 두번째에 위치

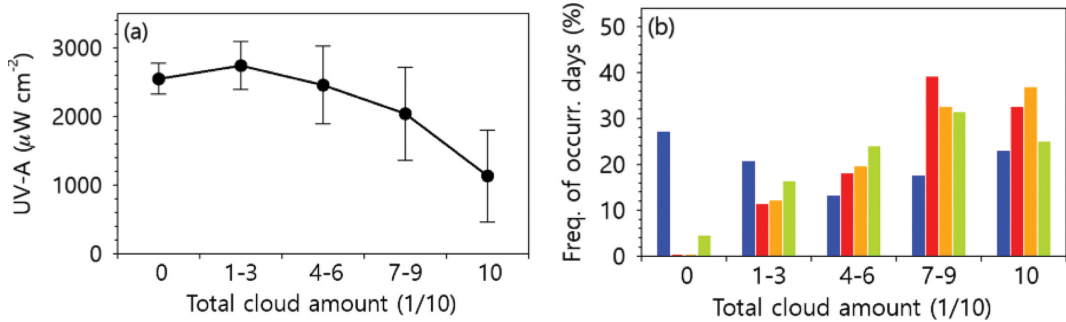


Fig. 9. (a) Average UV-A irradiance observed at noon in Gosan for each range of the total-cloud amount from 2012 to 2014. The vertical bar denotes one standard deviation. (b) Frequencies for each total-cloud range in May (blue), June (red), July (yellow), and August (green).

한 녹색 선은 레일레이 산란과 오존에 의한 흡수 영향을 고려한 값으로 파란색 선과 큰 차이가 없이 중첩되어 보여 오존의 영향이 매우 적음을 알 수 있었다. 세번째에 위치한 빨간색 선은 레일레이 산란과 오존 흡수 영향 및 시정에 따른 대기혼탁도의 영향을 모두 고려한 값으로 8월, 5월, 7월, 6월의 순서로 큰 값을 보였다. 계산된 UV-A 복사량의 월 변화 경향은 오존에 의한 흡수 영향이 매우 적어 상대적으로 시정에 따른 대기혼탁도의 영향이 컸으며 관측과는 달랐다.

UV-A 복사량과 전운량과의 관계를 보기 위하여 UV-B의 경우와 같이 하늘상태를 5구간으로 나누고 각 구간별 평균 UV-A 복사량을 계산하였다(Fig. 9a). 각 구간별 평균값을 차례로 살펴보면 각각 2547, 2740, 2456, 2039, 1132 $\mu\text{W cm}^{-2}$ 이다. 전운량이 1~3일 때의 복사량이 맑은 하늘 상태일 때의 약 108%로 가장 컸으며, 전운량이 4~6, 7~9일 때는 각각 약 96%, 약 80%로 감소했고, 전운량이 10인 차폐된 하늘 상태일 때는 약 44%로 큰 폭으로 감소했다. UV-A 복사량의 크기도 구름이 약간 있을 때 오히려 커져 UV-B와 유사하였지만 전체적으로 UV-B보다 구름에 의해 조금 더 많이 감소하고 있었으며, 이러한 차이는 구름 상부에서 대기로 후방산란된 후 다시 구름을 투과하여 지표에 도달하는 양이 파장이 짧을수록 커지기 때문인 것으로 알려져 있다(McCormick and Suehrcke, 1990; Kylling et al., 1997).

하늘상태 구간별 현상일 수 비를 5~8월에 대해 각각 비교해보면(Fig. 9b), 5월(파랑)은 맑은 하늘 상태일 때가 가장 많고 차폐된 하늘 상태일 때는 가장 적었다. 8월(녹색)은 차폐된 하늘 상태일 수는 5월에 이어 두번째로 적었지만 맑은 하늘 상태일 때가 5월보다 훨씬 적고 전운량이 7~9인 구간일 때는 많아 구름에 의한 UV-A 복사량 차단 효과가 5월보다 컸다. 구름이 많았던 6월과 7월의 경우, 7월(노랑)은 차폐된

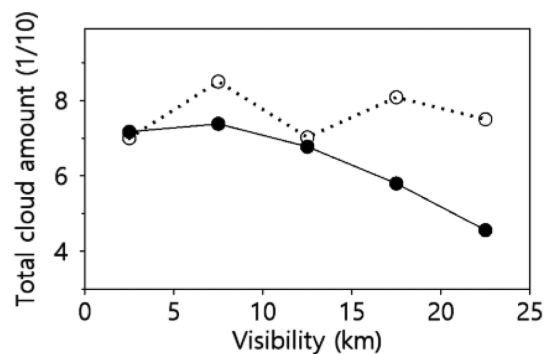


Fig. 10. Average total-cloud amount for the 5 different ranges of the visibility during MJJA (solid line) and June (dotted line) observed at noon from 2012 to 2014 in Gosan.

하늘 상태일 때가 가장 많았고 6월(빨강)은 전운량 구간이 7~9일 때가 가장 많았다. 따라서 구름에 의한 UV-A 복사량 감쇄효과는 5월, 8월, 6월, 7월 순으로 컸으며, 관측된 월평균 UV-A 복사량이 5월에 가장 크고 7월에 가장 작은 분포를 보이는 것과 관련이 큰 것으로 보였다. 한편, UV-B와 UV-A의 월평균 복사량 분포에서 UV-B는 6월이 가장 낮았지만 UV-A는 7월이 가장 낮았던 것은 7월의 오존 전량이 6월보다 적은데 UV-A는 오존의 영향을 거의 받지 않는 것에도 관련된다.

5. 고산지역 6월 자외선복사의 특이성

앞에서 계산을 통해 시정에 따른 대기혼탁도가 UV 복사량에 상당정도 영향을 미치는 것을 보았다. 여기에서는 관측자료를 이용하여 시정에 따라 지표 자외선 복사량이 어떻게 변하는 지 살펴보았다. 시정을 0~

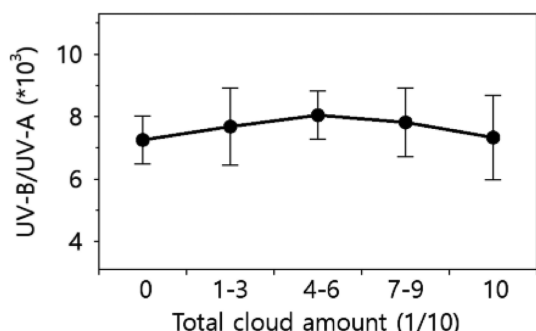


Fig. 11. Average ratio of the UV-B and UV-A irradiances observed at noon in Gosan for each range of the total-cloud amount from 2012 to 2014. The vertical bar denotes one standard deviation.

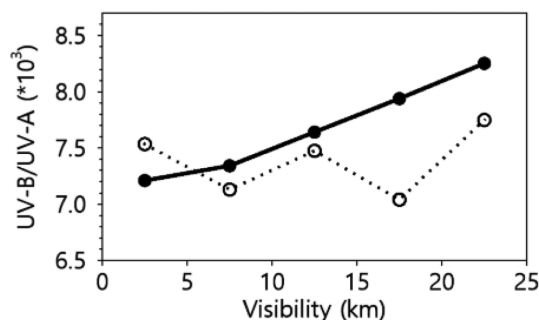


Fig. 12. Average ratio of the UV-B and UV-A irradiances for the 5 different ranges of the visibility during MJJA (solid line) and June (dotted line) observed at noon from 2012 to 2014 in Gosan.

5, 5~10, 10~15, 15~20, 20 km 이상의 5 구간으로 나누고 각 구간별 UV-B와 UV-A의 평균값을 구해보면, 시정이 좋아질수록 UV-B와 UV-A 복사량이 모두 많아졌다(not shown). 그런데 시정은 대기 중 에어로졸에 의한 대기혼탁도의 영향 뿐만 아니라 날씨 상태의 영향도 받으므로 시정이 좋아질 때 자외선 복사량이 증가하는 것을 대기혼탁도의 영향으로만 생각할 수는 없다. 앞서 살펴 본 바와 같이 자외선 복사량에 미치는 구름의 영향이 크므로, 먼저 시정 구간별 평균 전운량값을 비교하였다(Fig. 10). 그림에서 5~8월의 평균값(실선)은 시정이 5 km 미만일때 7.2이고 시정이 5~10 km 사이일 때 7.4로 약간 상승하여 가장 많아졌다가 이후 시정이 증가하면서 감소하였다. 따라서 시정에 따른 UV-B와 UV-A의 증가에는 전운량이 감소하면서 자외선 복사량이 증가하는 영향도 포함되었다고 볼 수 있다.

전운량에 따른 자외선 복사량의 영향을 제거하기 위하여, UV-B, UV-A 모두 운량에 따라 감소되는 정도가 유사하고(not shown) 구름에 의한 산란은 파장의 영향이 크지 않다는 특성을 이용하여 UV-B와 UV-A의 비를 운량의 영향이 제거된 양으로 이용하였다(Bais et al., 1993; Bartlett and Webb, 2000). Figure 11은 전운량 구간별 UV-B와 UV-A의 비를 보인 것으로, 그 값이 일정하지 않고 약간의 증감이 있지만 변화 범위가 7.25~8.05 (*10⁻³)로 변화폭이 최대 11% 내에 있어 구름의 영향이 상당부분 제거되었다고 보았다. Figure 12는 시정에 따른 UV-B와 UV-A의 비를 보여주는 것으로 5~8월의 평균(실선)은 시정이 좋아질수록 비 값도 커지고 있었다. 이는 시정에 따른 대기혼탁도의 영향으로 UV-B 복사량이 UV-A 복사량보다 더 많이 변화하고 있음을 의미한다.

한편, 고산지역 6월의 경우에는 5~8월의 평균과는

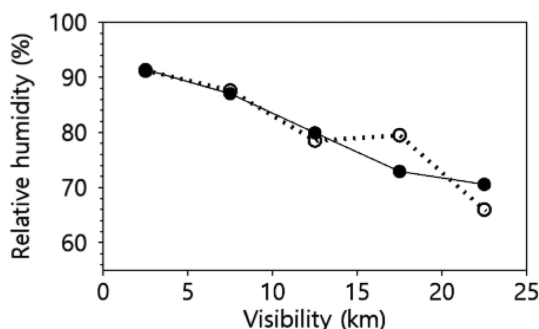


Fig. 13. Average relative humidity for the 5 different ranges of visibility during MJJA (solid line) and June (dotted line) observed at noon from 2012 to 2014 in Gosan.

구분되는 특성이 있어 이에 대해 언급하고자 한다. 먼저 시정과 전운량과의 관계(Fig. 10)에서 6월(점선)은 둘 사이의 관계가 뚜렷하지 않았고 시정이 좋아져도 전운량이 감소하지 않고 여전히 많이 차이가 있었다. 또, 시정에 따른 UV-B와 UV-A의 비(Fig. 12)에서도 6월(점선)은 5~8월 평균과 비교할 때 시정이 5 km 미만인 구간을 제외하고 모든 구간에서 작았고 특히, 시정이 15~20 km인 구간에서 가장 작았다. 6월의 시정 구간별 월평균 UV-B와 UV-A 복사량의 각각의 변화 경향은 유사하였으며(not shown), 따라서 UV-B와 UV-A의 비 값이 작다는 것은 UV-B와 UV-A의 복사량이 모두 감소하였지만 UV-B 복사량의 감소가 상대적으로 더 많았다는 의미이다. UV-B와 UV-A의 비 값을 구름의 영향이 제거된 양으로 볼 때 그 값이 작아지는 것은 대기 중 에어로졸의 영향이며 특히, 6월의 대기 중에 다량 존재하는 수증기의 영향으로 보였다. Figure 13은 시정과 상대습도의 관계를 보인 것으로, 5~8월의 평균(실선)은 시정이 좋아질수록 상대습도가

급격히 낮아졌는데, 6월(점선)도 전체적으로는 시정이 좋아지면 상대습도가 낮아지는 경향을 보였지만, 시정이 15~20 km 범위일 때는 상대습도가 더 높아졌다.

6월의 시정이 5 km 미만인 구간은 안개 현상일 수가 많았다. 안개로 인해 시정이 매우 낮았지만 자외선 복사량에는 크게 영향을 미치지 않아 UV-B와 UV-A의 비 값은 크게 나타났던 것으로 보인다. 한편, 시정이 15~20 km인 구간은 비 온 후 박무 상태일 때가 가장 많았다. 비 온 뒤에 시정이 다소 좋아졌지만 상대습도가 높은 가운데 대기 중 매우 작은 크기의 수적이 다량 존재하여 자외선 복사량을 감소시켰으며 특히, UV-B 복사량을 많이 감소시켰던 것으로 추정된다. Lee et al. (2010)은 고산지역에서 6월에 황산염 입자가 가장 많아지고 박무 현상이 빈번하며 이 때문에 시정이 낮다고 밝힌 바 있다. 그런데, 상대습도가 높아지는 6월에 미세입자 영역에 주로 분포하는 흡습성이 강한 황산염입자의 증가는 자외선 복사량 감소에 기여할 것으로 판단된다(Lee et al., 2013; Xia et al., 2016). 그 외에 고산지역에서 지표오존의 농도가 상대적으로 높아 시정에 미치는 영향이 있을 수 있으나, 질소산화물의 농도는 낮아서 지표오존에 의한 에어로졸 생성 영향은 크지 않을 것으로 판단된다. 그렇지만 최근 지표오존과 질소산화물의 농도가 약간씩 증가하는 경향을 보여(KMA, 2016) 이에 대한 관심도 필요하다고 생각된다. 앞으로 6월의 자외선 복사량의 특성을 더 잘 이해하기 위해서는 고산지역 에어로졸의 종류와 크기 분포 및 지표오존과 대기 중 수적의 역할에 대한 연구가 더 필요하다.

6. 결과 및 토의

고산지역에서 2005~2014년 동안 관측된 UV-B 복사량의 월평균 변화는 8월에 최대가 되었으며, 그 양이 많아지는 5~8월 기간을 비교하면 6월이 가장 적었다. 그런데, 6월은 1년을 주기로 볼 때 태양천정각이 가장 작아지고 대기밖에 도달하는 자외선 복사량이 최대가 되는 때이므로 지표 자외선 복사량이 작아지는 이유를 고산지역 6월의 대기 특성과 관련하여 고찰하였다.

고산지역에서 대기밖에 도달하는 UV-B 복사량이 구름이 없을 때 표준 대기 상태에서의 레일레이 산란, 오존에 의한 흡수 및 시정에 따른 대기혼탁도의 영향으로 감쇄되는 정도를 관측된 오존 전량과 시정 값을 이용하여 계산한 결과, 8월, 7월, 5월, 6월의 순서로 그 값이 작아졌다. 이는 관측된 월평균값과 같은 크기 순서로, 6월의 평균 UV-B 복사량이 작은 차이지만 가장 작은 값을 보여 지표에 도달하는 UV-B 복사량에 미치는 오존과 시정의 영향이 컸음을 알 수 있었다.

한편, 6월은 월평균 전운량이 최대가 되는 때로 전운량에 따른 UV-B 복사량의 크기를 비교하였다. 관측된 UV-B 복사량은 구름이 없을 때 보다 구름이 약간 있을 때 구름의 반사 및 산란 효과로 인해 더 많아졌고, 전운량이 1~3일 때와 4~6일 때 각각 맑은 하늘 상태일 때의 약 114%, 106%였다. 그러나, 전운량이 7~9일 때에는 맑은 하늘 상태일 때의 약 86%로 감소하였고 특히, 하늘이 구름으로 차폐된 경우(전운량=10)에는 약 45%로 큰 폭으로 감소하였다. 그런데 6월은 전운량이 10인 날이 5~8월 중 가장 많아 구름에 의한 지표 자외선 복사량의 감쇄 효과가 컸던 것으로 보이며 그 결과, 관측된 6월의 UV-B 복사량이 매우 적었던 것으로 보인다.

같은 방법으로 대기 밖 UV-A 복사량이 지표에 도달하는 양을 계산한 결과 오존에 의한 흡수 영향은 매우 적었고 시정에 의한 대기혼탁도의 영향이 상대적으로 컸다. 5~8월의 값을 비교하면 8월, 5월, 7월, 6월의 순서로 UV-A 복사량이 작아졌고, 관측된 월평균값의 크기 순서와는 달랐다. 한편, 구름의 양에 따른 영향은 UV-B와 매우 유사하여 구름이 적을 때는 지표 UV-A 복사량이 오히려 약간 증가하였지만, 전운량이 7~9일 때는 맑은 하늘 상태일 때의 약 80%였고, 하늘이 차폐된 경우에는 약 44%로 매우 작아졌다. 그런데 2012~2014년의 5~8월 기간 중 하늘이 차폐된 날은 7월이 가장 많았고, 전운량이 7~9인 날은 6월이 가장 많았다. 따라서 관측된 UV-A의 5~8월 월평균 값이 5월, 8월, 6월, 7월의 순서로 그 값이 작아지는 것은 구름에 의한 영향이 반영된 결과로 보인다.

관측자료로부터 시정의 영향을 파악하기 위하여 UV-B와 UV-A의 구름에 의한 산란 효과가 과장과 관련이 없는 특성을 이용하였다. 즉, UV-B와 UV-A의 비 값을 구름의 영향이 제거된 값으로 간주하였고, 시정에 따라 UV-B와 UV-A의 비 값의 변화를 살펴보았다. 그 결과, 시정이 증가할수록 UV-B와 UV-A의 비 값도 증가하였는데 이는 대기혼탁도의 영향을 UV-B가 더 많이 받고 있음을 의미한다. 그런데, 6월은 5~8월 평균과는 다소 다른 특징을 보였다. 시정이 0~5 km 일 때를 제외하고 UV-B와 UV-A의 비 값이 5~8월 평균값보다 적었고 특히, 시정이 15~20 km로 좋아질 때 가장 적어졌다. 시정이 15~20 km 일 때 기상 상태는 비 온 후 박무가 낀 경우가 대부분으로, 비가 온 후 시정은 약간 좋아지지만 박무 현상을 보이므로 습도가 높고 대기 중 미세한 수적이 많아 UV 복사량에 영향을 미치는 것으로 추정되며 특히, UV-B 복사량을 더 많이 감쇄시키는 것으로 보인다. 또, 고산지역에서 6월에 습도가 높은 상태에서 황산염입자가 가장 많아지는 것과는 관련이 클 것으로 보여, 6월의 자외

선 복사 특성을 더 잘 이해하기 위해서는 앞으로 수직을 포함하여 지표오존 및 에어로졸의 종류, 크기 분포, 농도 등에 대한 관측 자료를 이용한 연구가 더 필요하다.

와 관련되는 β 는 α 와 시정(Vis)을 이용하여 다음과 같이 계산하였다.

$$\beta = (0.55)^\alpha (3.912/Vis - 0.01162) [0.02472(Vis - 5) + 1.132] \quad (A6)$$

감사의 글

이 연구는 기상청 국립기상과학원 기상업무지원 기술개발사업(NIMS-2016-3100)의 지원으로 수행되었습니다.

부록. 구름이 없는 상태에서 파장별 복사조도 계산 방법

구름이 없는 상태에서 파장별로 지표면에 수직으로 도달하는 복사조도(direct spectral irradiance, E_λ)는 다음과 같다(Leckner, 1978).

$$E_\lambda = E_{0\lambda} \tau_{r\lambda} \tau_{oz\lambda} \tau_{a\lambda} \quad (A1)$$

단, $E_{0\lambda}$ 는 대기밖에 도달하는 태양복사조도, $\tau_{r\lambda}$, $\tau_{oz\lambda}$, $\tau_{a\lambda}$ 는 각각 레일레이 산란, 오존 흡수, 대기혼탁도에 따른 투과비(transmittance)이며, 레일레이 투과비는 다음과 같다.

$$\tau_{r\lambda} = \exp(-0.0087535\lambda^{-4.08} m_a) \quad (A2)$$

여기서, m_a 는 실제 상대 광학공기질량(actual relative optical air mass)으로, $m_a = m_r(p/p_0)$ 과 같으며, 이때 $p_0 = 1013.25$ hPa, p 는 실제 지상기압이고, 상대 광학 공기질량(m_r)은 태양 천정각(θ_z)를 알면 다음 식으로 계산할 수 있다.

$$m_r = [\cos\theta_z + 0.15(93.885 - \theta_z)^{-1.253}]^{-1} \quad (A3)$$

오존 흡수 투과비는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\tau_{oz\lambda} = \exp(-k_{oz\lambda} l m_r) \quad (A4)$$

여기서, $k_{oz\lambda}$ 는 오존 흡수에 따른 소산 계수, l 은 오존 전량(cm), m_r 은 오존 광학질량이다. 오존 흡수 계수는 Vigroux (1953)의 결과를 이용하여 Leckner (1978)가 제시한 파장별 값을 이용하였다. 한편, 대기 중 수직, 먼지 입자 등 에어로졸에 의한 투과비는 Ångström의 대기혼탁도 공식(turbidity formula)을 이용하여 다음과 같이 계산하였다.

$$\tau_{a\lambda} = \exp(-\beta\lambda^{-\alpha} m_a) \quad (A5)$$

여기서 α 는 0~4 사이의 값으로 에어로졸의 크기 분포와 관련되며 에어로졸의 크기가 클수록 0에 가까운 값이 된다. 본 연구에서는 편의상 가장 일반적으로 사용되는 1.3 값을 이용하였다. 한편, 에어로졸의 농도

REFERENCES

Atmosphere, U. S., 1976: U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., 1976. Available in hard copy from the National Technical Information Office, Springfield, Virginia (Product Number: ADA-035-6000).

Bais, A. F., C. S. Zerefos, C. Meleti, I. C. Ziomas, and K. Tourpali, 1993: Spectral measurements of solar UVB radiation and its relations to total ozone, SO₂, and clouds. *J. Geophys. Res.*, **98**, 5199-5204.

Bartlett, L. M., and A. R. Webb, 2000: Changes in ultraviolet radiation in the 1990s: Spectral measurements from Reading, England. *J. Geophys. Res.*, **105**, 4889-4893.

Brine, D. T., and M. Iqbal, 1983: Diffuse and global solar spectral irradiance under cloudless skies. *Solar Energy*, **30**, 447-453.

Calbó, J., D. Pagès, and J.-A. González, 2005: Empirical studies of cloud effects on UV radiation: A review. *Rev. Geophys.*, **43**, RG2002.

Cho, H.-K., H.-J. Kwon, and C.-Y. Choi, 1998: Increase of the surface erythral ultraviolet-B radiation by the ozone layer depletion. *J. Korean Meteor. Soc.*, **34**, 272-281 (in Korean with English abstract).

_____, B. Y. Lee, J. Lee, and S. Park, 2001: A Seasonal Climatology of Erythral Ultraviolet Irradiance over Korea. *J. Korean Meteor. Soc.*, **37**, 525-539 (in Korean with English abstract).

Fröhlich, C., and C. Wehrli, 1981: Spectral distribution of solar irradiance from 25000 nm to 250 nm. *World Radiation Center, Davos, Switzerland, private communication*.

Gueymard, C. A., 2004: The sun's total and spectral irradiance for solar energy applications and solar radiation models. *Solar Energy*, **76**, 423-453.

Kim, J.-E., S.-Y. Ryu, and Y.-J. Kim, 2001: Variation of the surface UV irradiance with aerosol optical depth at Gwangju. *Atmosphere*, **11**, 430-433 (in Korean).

Kim, J., S. S. Park, N. Cho, W. Kim, and H. K. Cho, 2011: Recent variations of UV irradiance at Seoul 2004~2010. *Atmosphere*, **21**, 429-438 (in Korean with English abstract).

Kim, Y.-K., H.-W. Lee, and Y.-S. Moon, 1998: A study on sensitivities of the damaging UV-B in Pusan area. *J.*

- Korean Meteor. Soc.*, **34**, 190-204.
- Korea Meteorological Administration, 2016: *Report of Global Atmosphere Watch 2015*, Korea Meteorological Administration, 226 pp (in Korean).
- Kwak, M. K., and J. H. Kim, 2011: The radiative characteristics of EUV-B over the Korean peninsula and exposure time for synthesizing adequate vitamin D. *Atmosphere*, **21**, 123-130 (in Korean with English abstract).
- Kylling, A., A. Albold, and G. Seckmeyer, 1997: Transmittance of a cloud is wavelength-dependent in the UV-range: Physical interpretation. *Geophys. Res. Lett.*, **24**, 397-400.
- Leckner, B., 1978: The spectral distribution of solar radiation at the earth's surface—elements of a model. *Solar Energy*, **20**, 143-150.
- Lee, D.-E., W.-H. Kim, H.-J. Ko, Y.-S. Oh, and C.-H. Kang, 2013: Chemical composition characteristics of size-fractionated particles during heavy Asian dust event in Spring, 2010. *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, **29**, 325-337, doi:10.5572/KOSAE.2013.29.3.325.
- Lee, S.-B., C.-H. Kang, D.-S. Jung, H.-J. Ko, H.-B. Kim, Y.-S. Oh, and H.-L. Kang, 2010: Composition and pollution characteristics of TSP, PM_{2.5} atmospheric aerosols at Gosan site, Jeju Island. *Anal. Sci. Tech.*, **23**, 371-382, doi:10.5806/AST.2010.23.4.371 (in Korean with English abstract).
- McCormick, P. G., and H. Suehrcke, 1990: Cloud-reflected radiation. *Nature*, **345**, 773 pp.
- Oh, J.-H., J.-H. Jung, and J.-W. Kim, 1994: Impacts of stratospheric ozone depletion on the vertical atmospheric temperature distribution and UV-B radiation at the surface. *J. Korean Meteor. Soc.*, **30**, 261-287 (in Korean with English abstract).
- Vigroux, E., 1953: Contribution à l'étude expérimentale de l'absorption de l'ozone. *Ann. Phys.*, **8**, 709-762.
- Xia, D., L. Chen, H. Chen, X. Luo, and T. Deng, 2016: Influence of atmospheric relative humidity on ultraviolet flux and aerosol direct radiative forcing: Observation and simulation. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **52**, 341-352, doi:10.1007/s13143-016-0003-2.