

## Article

**대기 복사 모형에 의한 남극 세종기지에서의 복사학적 특징 :  
지표면에서 UV-A와 Erythemal UV-B 자외선 양 변화**

이규태<sup>1</sup> · 이방용<sup>\*2</sup> · 원영인<sup>2</sup> · 지준범<sup>1</sup> · 이원학<sup>1</sup> · 김윤정<sup>1</sup>

<sup>1</sup>강릉대학교 대기환경과학과

(210-702) 강원도 강릉시 지변동 123번지

<sup>2</sup>한국해양연구원 극지연구본부

(425-600) 경기도 안산시 안산우체국 사서함 29

**Radiative Properties at King Sejong Station in West Antarctica  
with the Radiative Transfer Model :  
A Surface UV-A and Erythemal UV-B Radiation Changes**

Kyu-Tae Lee<sup>1</sup>, Bang Yong Lee<sup>\*2</sup>, Young-In Won<sup>2</sup>, Joon-Bum Jee<sup>1</sup>,  
Won-Hak Lee<sup>1</sup>, and Youn-Joung Kim<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Atmospheric and Environmental Sciences, Kangnung National University  
123 Jibyeon-dong, Gangneung-si, Gangwon-do 210-702, Korea

<sup>2</sup>Polar Sciences Laboratory, KORDI  
Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea

**Abstract :** A solar radiation model was used to investigate the UV radiation at the surface of King Sejong Station in West Antarctica. The results calculated by this model were compared with the values measured by UV-Biometer and UV-A meter during 1999-2000. In this study, the parameterization of solar radiative transfer process was based on Chou and Lee(1996). The total ozone amounts measured by Brewer Ozone Spectrophotometer and the aerosol amounts by Nakajima *et al.*(1996) was used as the input data of the solar radiative transfer model. And the surface albedo is assumed to be 0.20 in summer and 0.85 in winter. The sensitivity test of solar radiative transfer model was done with the variation of total ozone, aerosol amount, and surface albedo. When the cosine of solar zenith angle is 0.3, Erythemal UV-B radiation decreased 73% with the 200% increase of total ozone from 100 DU to 300 DU, but the decrease of UV-A radiation is about 1%. Aslo, for the same solar zenith angle, UV-A radiation was decreased 31.0% with the variation of aerosol optical thickness from 0.0 to 0.3 and Erythemal UV-B radiation was decreased only 6.1%. The increase of Erythemal UV-B radiation with the variation of surface albedo was twice that of UV-A increase. The surface Erythemal UV-B and UV-A radiation calculated by solar raditive transfer model were compared with the measured values for the relatively clear day at King Sejong Station in West Antarctica. The model calculated Erythemal UV-B radiation at the surface coincide well with the measured values except for cloudy days. But the difference between the model calculated UV-A radiation and the measured value at the surface was large because of cloud scattering effect. So, the cloud property data is needed to calculate the UV radiation more exactly at King Sejong Station in West Antarctica.

**Key words :** UV-A, 흥반 자외선-B(erythemal UV-B), 태양 복사 모형(solar radiation model), 세종기지(King Sejong Station), 성층권 오존(stratospheric ozone).

\*Corresponding author. E-mail : bylee@kordi.re.kr

## 1. 서 론

지구의 대기 상한(top of atmosphere)에 도달하는 태양 복사 에너지의 90% 이상은 가시광선 및 적외선 영역에 포함되고 약 10% 미만은 자외선 영역에 속한다. 가시광선 및 적외선 영역의 태양 복사 에너지는 지구 대기와 지표면에서 흡수 및 산란 과정 등을 거치며 지구 대기와 지표면을 가열시킨다. 자외선 영역의 태양 복사 에너지는 전체 태양 복사 에너지에 비교하여 그 양이 매우 적고 대부분 대기 상층에서 기체 분자 및 원자 등에 의하여 흡수된다. 그러나 성층권 오존층의 변화에 따라 지표면에도 도달하는 자외선 양의 변화는 매우 민감하기 때문에 지구 대기의 기후 계에서 자외선의 효과는 무시될 수 없고, 특히 지상 생물의 생존에 직접적으로 영향을 미치므로 중요한 부분이다. 그리고 자외선 영역은 파장에 따른 흡수 특성이 매우 다르기 때문에 지구 대기에서 자외선의 파장별 흡수 특성에 따라 UV-A(320-400 nm), UV-B(280-320 nm) 그리고 UV-C(200-280 nm)의 세 부분으로 나뉘어진다.

이들 중에서 UV-C 영역의 복사 에너지는 매우 강하기 때문에 인공적으로 발생시킨 UV-C는 일부 미생물을 죽이는데 이용되며 또한 이 영역의 에너지는 생물학적으로 돌연변이의 원인이 되기도 한다(Resnick 1970; Witkin 1976; Harm 1980). 그러나 다행히도 이러한 UV-C는 대기 상층의 산소 원자 및 분자 등에 의하여 흡수되어 지표면에는 거의 도달하지 않기 때문에 지상 생물들에게 미치는 영향이 매우 적다. 태양으로부터 방출되어 대기의 상한에 도달한 자외선 양 중에서 UV-A는 UV-C와 B에 비교하여 그 강도는 약하지만, 많은 양이 지표면에 도달하기 때문에 지상 생물들에 대한 피해 효과는 작지 않다. 그리고 UV-C와 UV-A의 중간 파장 영역에 위치한 UV-B 영역의 자외선은 상당 부분이 성층권 이상의 고도에서 오зон에 의하여 흡수되나 일부는 지상에 도달하여 생물의 세포 속에 있는 DNA와 RNA를 파괴할 수 있고(Smith 1966; Rahn 1972; Parson and Gross 1980), 지상 생물이나 인체에 피부암과 백내장 등의 질병을 유발시킬 수 있기 때문에 관심의 대상이 된다(Jagger 1985). 따라서 지표면에 도달하는 자외선(UV-A와 UV-B) 양의 관측이 전 세계적으로 증가 추세에 있고 남극 세종기지( $62.2^{\circ}\text{S}$ ,  $58.8^{\circ}\text{W}$ )에서도 Erythemal UV-B 자외선과 UV-A 자외선을 관측하고 있다. 이 연구에서는 태양 복사 모형에 의한 세종기지 지표면에서의 Erythemal UV-B와 UV-A 자외선 복사 특성들을 밝히고, 이 모형에 의한 계산 결과와 관측 자료를 비교 분석할 것이다.

## 2. 연구 자료

### UV-Biometer와 UV-A meter 관측 자료

세종기지에서의 지표면에 도달하는 UV-B 자외선(파장 280-320 nm) 관측은 1998년부터 현재까지 UV-Biometer (Model 501)를 이용하여 수행하여왔고, UV-A 자외선(파장 320-400 nm) 관측은 1999년부터 UV-A meter(Model 501A)를 이용하여 실시해오고 있다. 이들 기기 중 UV-Biometer(Model 501)만 단면도를 Fig. 1에 나타내었는데, 수감부의 필터부분만 다른 뿐 UV-A meter와 작동 원리는 비슷하다. 즉, 유리 돔 속의 수감부에 의하여 관측된 UV-A와 Erythemal UV-B 자외선 에너지는 매 5분간 누적된 값으로 자동 저장되고 UV-A 자외선 단위는  $\text{Wm}^{-2}$ 이며 UV-B의 관측 단위는 MED이다. 1 MED는 한 시간 정도의 자외선을 쬐었을 경우 피부에 홍반(Erythema)이 발생 할 수 있을 만한 양의 자외선을 의미하고 이 값을 일반적인 에너지의 단위로 환산하면  $210 \text{ Jm}^{-2}$ 에 해당한다. 이들 기기에 의하여 관측되는 Erythemal UV-B 자외선 강도는 다음과 같이 정의된다.

$$\text{Dose Rate} = \int B(\lambda)F(\lambda)d\lambda. \quad (1)$$

이 식에서  $B(\lambda)$ 는 생물체에 피부암 등의 효과를 일으킬 수 있는 파장별 생물학적 작용 스펙트럼(action spectrum)으로 단위는 없으며,  $F(\lambda)$ 는 파장별 복사 휘도(spectral

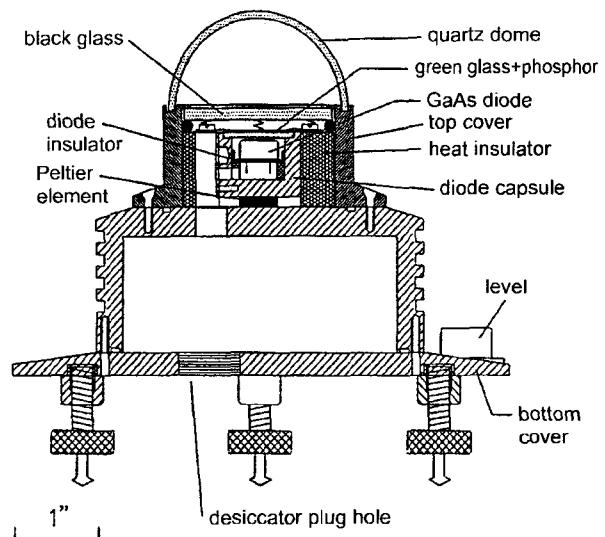


Fig. 1. A schematic diagram of UV-Biometer(model 501) detector which has used for measuring UV-B radiation at King Sejong Station.

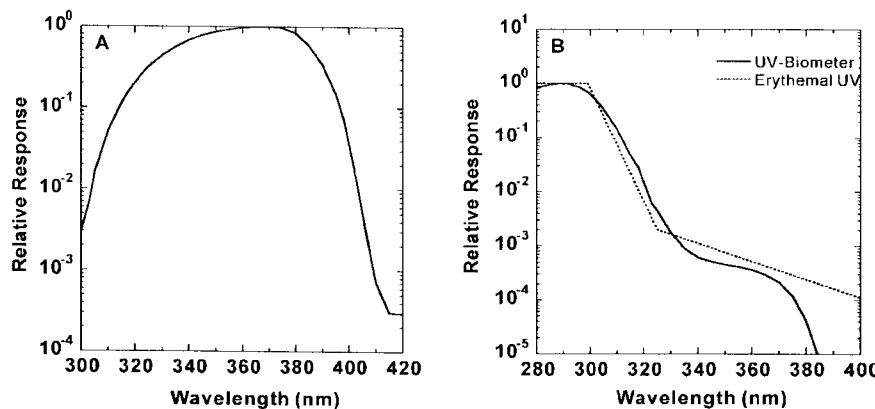


Fig. 2. The spectral response of wavelength of UV-A meter(A), and that of UV-Biometer detector and Erythemal UV-B(B).

irradiance)로 단위는  $\text{Wm}^{-2}\text{nm}^{-1}$ 이다. 따라서 파장별 도스율(spectral dose rate)은  $B(\lambda)F(\lambda)$ 로 정의되고 단위는 파장별 복사 휙도의 단위와 같다. 주어진 파장 영역에 대하여 식 (1)과 같이 파장별 도스율을 파장에 따라 적분한 것이 도스율(dose rate)이며 단위는  $\text{Wm}^{-2}$ 이다. 도스율은 식 (1)과 같이 임의의 순간에 관측되어지는 값이므로 시간의 함수가 된다. 따라서 위 식을 주어진 시간 영역에 대하여 다음과 같이 적분한 값을 도스(dose)라 정의하며 단위는  $\text{Jm}^{-2}$ 이다.

$$\text{Dose} = \int \int B(\lambda)F(\lambda)d\lambda dt. \quad (2)$$

따라서, UV-Biometer로 5분 동안 관측된 값은 식 (2)에 의하여 5분간 적분한 값과 같은 의미를 가진다. Fig. 2(A)는 UV-A meter의 고유 작용 스펙트럼이고, Fig. 2(B)는 Erythemal UV-B의 정의와 세종기지에서 관측되고 있는 UV-Biometer의 고유 작용 스펙트럼이다. 이 그림에서 보는 바와 같이 Erythemal UV-B 자외선은 파장이 280-298 nm까지 고유 작용스펙트럼이 1.0이고 파장이 길어질수록 반응도가 급격히 감소한다. 이와 같이 UV-Biometer는 Erythemal UV-B 자외선에 근접한 값을 측정한다. 즉 이 기기는 270-400 nm의 파장 영역에서 반응하고 290 nm파장의 자외선에 대한 기기의 반응도가 1.0으로 최대이다. 300-330 nm의 영역에서는 Erythemal UV-B 자외선 정의에 의한 반응도보다 크게 나타나고, 330 nm 이상의 파장에서는 작게 나타나나 이 파장 영역에서는 그 반응도가 매우 작기 때문에 Erythemal UV-B 자외선과 UV-Biometer의 반응도 차이는 거의 무시할 정도이다. 또한 UV-A meter의 고유 작용 스펙트럼은 370 nm 부근에서 반응도가 1.0에 근접하고 파장이 짧거나 길어질수록 자외선에 대한 반응도가 급격히 감소한다.

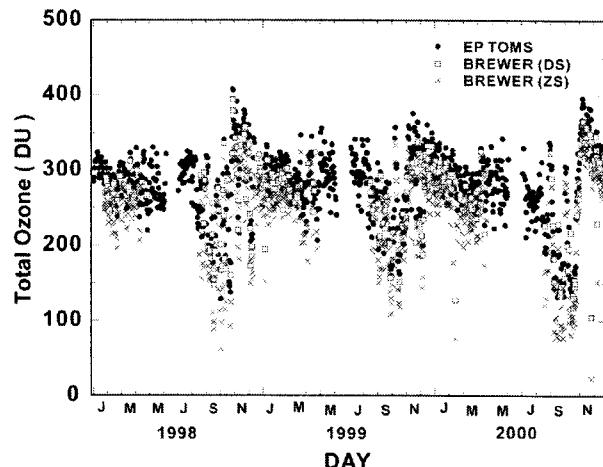


Fig. 3. Time series of daily total ozone(Dobson Unit) measured by Brewer Ozone Spectrophotometer and EP TOMS over King Sejong Station during 1998-2000. DS and ZS mean the direct-sun observation and the zenith-sky observation for ozone measurement, respectively.

이 연구에서는 이상과 같은 기기를 이용한 세종기지에서의 Erythemal UV-B와 UV-A 자외선 관측 자료 중에서, Erythemal UV-B는 1998년 1월부터 2000년 12월까지의 자료를 이용하였고 UV-A는 1999년 1월부터 2000년 12월까지의 자료를 사용하였다.

#### 오존 전량(total ozone amount) 자료

태양 복사 모형의 입력 자료로 사용하기 위한 오존 관측 자료는 세종기지에서 Brewer 오존분광광도계로 측정한 적달 및 천공(direct-sun observation; DS, zenith-sky observation; ZS) 자료와 인공위성 EP TOMS(Earth Probe

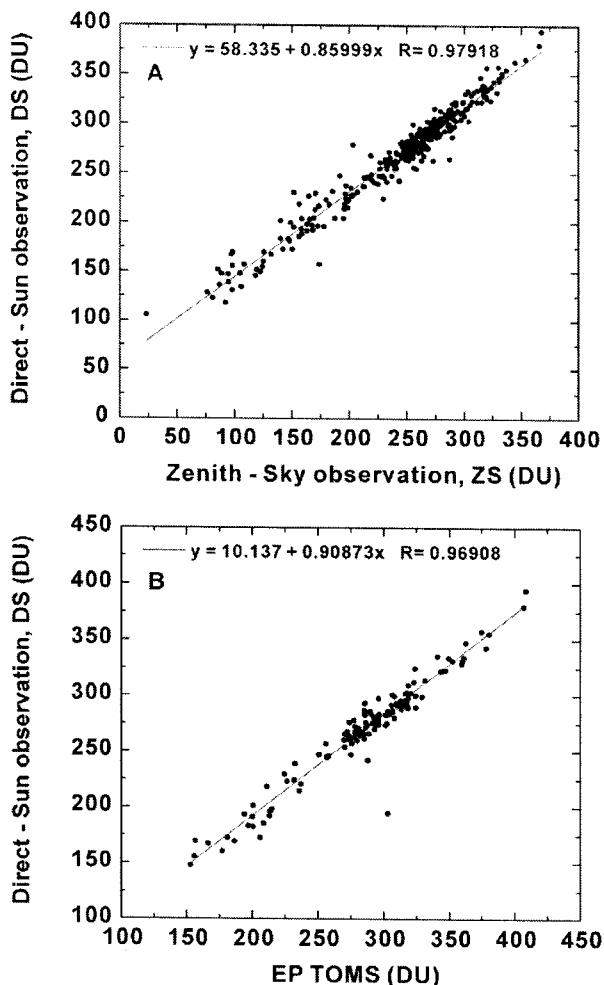


Fig. 4. The relationship between Brewer DS and ZS(A), and between Brewer DS and EP TOMS(B).

TOMS) 관측 자료를 사용하였고, 이들을 Fig. 3에 나타내었다. 이 그림에서 보는 바와 같이 1998년부터 2000년까지 세종기지에서의 오존 전량은 남반구의 여름철에 약 400 DU(Dobson Unit)로서 최대이었고, 남반구의 봄철에는 100 DU 이하이었으며, 또한 남반구의 겨울철에는 태양 광선이 희박하기 때문에 오존 관측 자료의 공백이 있다. 그리고 Brewer 오존분광광도계로 측정한 DS와 ZS 및 EP TOMS에 의한 오존 관측 자료들의 상관 관계는 Fig. 4에 나타내었다. 이 그림에서 Brewer DS와 ZS의 상관 계수는 0.98로서 Brewer DS와 EP TOMS의 0.97 보다 약간 크게 나타났다. 따라서 이 연구에서는 세종기지의 오존 자료로서 Brewer DS 자료를 우선적으로 사용하였고, Fig. 3에 나타낸 바와 같이 Brewer DS 자료가 결측되었을 경우는 Fig. 4(A)에 나타낸 Brewer DS와 ZS의 회귀식(Brewer DS=0.8599×Brewer ZS+58.335)을 이용하였다.

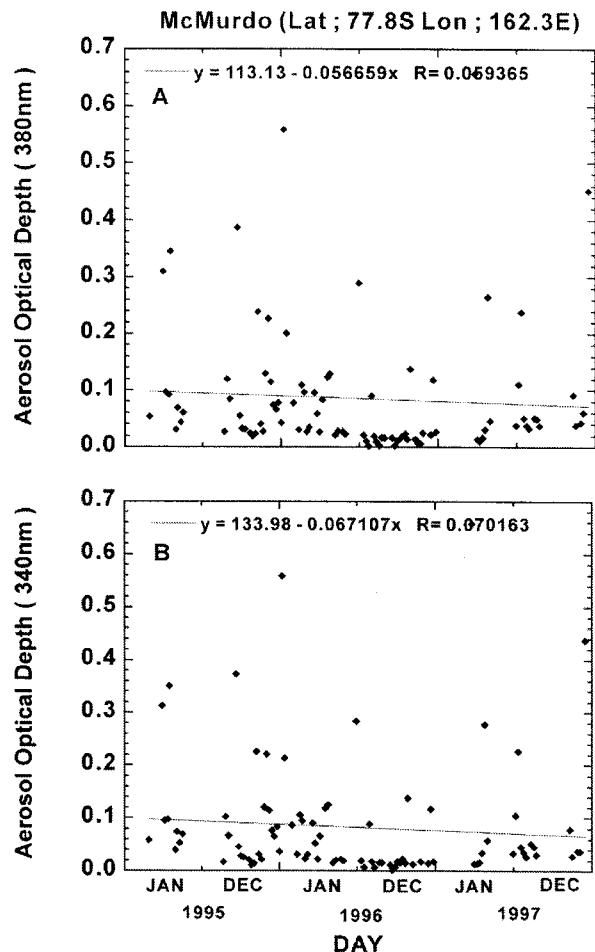


Fig. 5. Daily variations of aerosol optical depth at 380 nm (A) and 340 nm(B) of wavelength at McMurdo Station in Antarctica during 1995-1997.

#### 에어로졸 자료

이 연구에서 태양 복사 모형의 입력 자료인 에어로졸 자료는 Nakajima *et al.*(1996)의 방법을 사용하였다. 그의 방법에 의한 자료들 중에서 세종기지에 가장 근접한 미국의 남극 McMurdo 기지( $77.8^{\circ}\text{S}$ ,  $162.3^{\circ}\text{E}$ )의 자료를 원용하였고, 340 nm와 380 nm의 파장에 대하여 에어로졸 광학 두께는 Fig. 5에 나타내었다. 1995년부터 1997년까지 McMurdo 기지의 에어로졸 광학 두께는 380 nm와 340 nm에 대하여 최대 0.57이었고 평균적으로는 약 0.1 이하이었다. 또한 에어로졸 광학 두께는 시간이 경과할수록 다소 감소하는 경향을 보였고 380 nm와 340 nm의 두 파장에 따른 변화는 크지 않았다. 따라서 이 연구에서는 태양 복사 모형의 입력 자료로 사용할 세종기지에서 연직 공기 기둥에 대한 에어로졸 광학 두께로서 0.1(340 nm)을 가정하였으며, 자외선 영역의 다른 파장에 대한 에어로졸 광학 두께

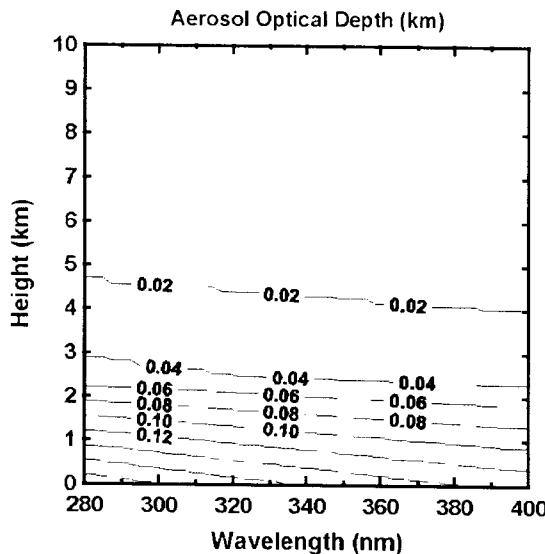


Fig. 6. Spectral and vertical distribution of aerosol optical depth by Elterman(1968).

와 그들의 연직 분포는 Fig. 6과 같은 Elterman(1968)에 의한 분포를 가정하였다. Elterman(1968)은 340 nm에 대하여 지표면에서부터 고도 50 km까지 매 km 당 에어로졸의 광학 두께를 관측 결과로부터 얻었고 이 결과를 파장별로 내·외삽하였다. 그 결과에 의하면 파장이 짧을수록 에어로졸의 광학 두께는 증가하여 지표면 근처에서 최고 0.20 이었으며 고도 5 km 이상에서는 0.01 이하로 나타났다. 그리고 340 nm에 대하여 이 결과를 연직 적분한 결과, 전체 공기 기둥에 대한 에어로졸의 광학 두께는 0.38이었다. 이러한 이유로 이 연구에서는 340 nm에 대하여 세종기지에서의 에어로졸 광학 두께를 0.38 대신 0.1로 사용하였다.

### 3. 지표면에서 자외선 양 계산을 위한 태양 복사 모형

평행 평면 대기에서 광학 두께가  $\tau_v$ 인 기층에서 복사 휘도( $I_v$ )의 변화를 나타내는 일반적인 복사 전달 방정식은 다음과 같다.

$$\mu \frac{dI_v(\tau_v, \mu, \phi)}{d\tau} = -I_v(\tau_v, \mu, \phi) + J_v(\tau_v, \mu, \phi) \quad (3)$$

여기에서  $\mu = \cos\theta$ 이고,  $\theta$ 와  $\phi$ 는 복사의 진행 방향에 대한 천정각과 방위각이며 원천 함수  $J_v$ 는 다음과 같다.

$$J_v(\tau_v, \mu, \phi) = \frac{\omega_v(\tau_v)}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_{-1}^1 d\mu' d\phi' P_v(\tau_v, \mu, \phi; \mu', \phi') \times I_v(\tau_v, \mu', \phi') + Q_v(\tau_v, \mu, \phi). \quad (4)$$

식 (4)에서  $\omega(\tau_v)$ 는 단일 산란 알베도(single scattering albedo)이고  $P_v(\tau_v, \mu, \phi; \mu', \phi')$ 는 위상 함수이며  $Q_v(\tau_v, \mu, \phi)$ 는 원천 함수이다.

태양 복사에 대하여 여러 기층에 의한 다중 산란이 포함된 식 (3)의 정확한 해를 구하기가 쉽지 않다. 따라서 이식의 근사적인 해를 구하는 여러 가지의 방법이 있으나 그 중에서 두 흐름 가산 근사(two stream adding approximation)(Lacis and Hansen 1974)와 불연속 세로 근사(discrete ordinate approximation)(Stamnes et al. 1988) 등이 일반적인 방법이다. 또한 식 (3)의 간단한 일반 해를 구하기 위하여 식 (4)에서 위상 함수  $P_v(\tau_v, \phi)$ 가 방위각  $\phi$ 에 따라 변화하지 않는 것으로 가정하면,  $\tau$  기층에서 상향 및 하향 태양 복사 속 밀도는 다음과 같다.

$$S_v \uparrow (\tau) = 2\pi \int_0^1 I_v(\tau, \mu) \mu d\mu. \quad (5)$$

$$S_v \downarrow (\tau) = 2\pi \int_0^1 I_v(\tau, \mu) \mu d\mu + \mu_0 \pi I_0 e^{-\tau/\mu_0}. \quad (6)$$

이식들에서 우변 첫째 항은 태양 복사의 산란 성분에 대한 것으로 이 연구에서는 Sagan과 Pollac(Lacis and Hansen 1974)의 방법을 사용하였고 식 (6)의 둘째 항은 태양 복사의 하향 적달 성분이다. 식 (5)와 (6)의 계산에서 자외선에 대한 각 기층의 투과율(transmission)과 반사율(reflection)의 계산은 델타-에딩턴(delta-eddington) 근사(King and Harshvardan 1986)를 사용하였고, 각 기층에 포함된 에어로졸과 공기 분자들의 다중 단란에 의한 식 (5)와 (6)의 복사 속 밀도 계산은 두 흐름 가산 근사(Lacis and Hansen 1974)를 이용하였다. 또한 이 연구에 사용된 모형 대기의 연직 구조로서 지표면부터 대기의 상한까지를 60개의 기층으로 나누었다. 그리고 파장별로는 자외선 영역을 272-420 nm까지 5 nm 간격으로 분류하여 각 파장 영역 별로 지표면에 도달하는 자외선 량을 계산하였다.

구름 없는 맑은 대기에 대하여 지표면에 도달하는 UV-B 영역의 자외선은 연직 공기 기둥에 포함된 오존 전량과 태양의 천정각에 따라 크게 변화하고, UV-A 영역에서는 공기 분자 및 에어로졸 분포가 주요한 변수이다. 이 연구에서는 임의의 지점 및 시간에 대하여 태양의 천정각( $\theta_0$ )과 지구-태양 사이의 거리 보정은 다음과 같은 식으로 계산하였다.

$$\cos \theta_0 = \sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos t_h. \quad (7)$$

이식에서  $\phi$ 는 위도이고 시간각  $t_h$ 와 태양의 적위  $\delta$ 는 다음과 같이 계산된다.

$$t_h = \pi(GMT/12 - 1 + \psi/180) + EQT. \quad (8)$$

$$EQT = 0.000075 + 0.001868\cos\theta_n - 0.032077\sin\theta_n \\ - 0.014615\cos2\theta_n - 0.040849\sin2\theta_n \quad (9)$$

$$\theta_n = 2\pi d_n 365. \quad (10)$$

$$\delta = 0.006918 - 0.399912\cos\theta_n + 0.070257\sin\theta_n \\ - 0.006768\cos2\theta_n + 0.000907\sin2\theta_n \\ - 0.002697\cos3\theta_n + 0.001480\sin3\theta_n. \quad (11)$$

여기에서  $GMT$ 는 그리니치 표준시,  $\psi$ 는 경도,  $EQT$ 는 시 간방정식 그리고  $d_n$ 은 날수(day number)이다. 그리고 태양과 지구 사이의 거리 보정은 다음 식을 이용하였다.

$$(R_0/R_n)^2 = 1.00011 + 0.034221\cos\theta_n + 0.001280\sin\theta_n \\ + 0.000719\cos2\theta_n + 0.000077\sin2\theta_n. \quad (12)$$

이 식에서  $R_0$ 은 지구와 태양 사이의 평균 거리로서 1 천 문 단위( $1.496 \times 10^{11}$  m)이고  $R_n$ 은 임의의 날에 지구와 태양의 실제 거리이다.

#### 4. 결과 및 토의

##### 태양 복사 모형의 반응도

이 연구에서 사용한 태양 복사 전달 과정의 모수화는 Chou and Lee(1996)에 근거하였으며, UV-A(320-400 nm) 와 UV-B(280-320 nm)의 파장 영역에 대하여 지표면에 도달하는 자외선 양을 계산하였다. 대기의 상한에 도달한 태양 자외선이 지표면에 도달하는 동안에는 대기 중의 오존에 의한 흡수, 공기 분자와 에어로졸 및 구름에 의한 산란 등에 의하여 감쇠된다. 따라서 이론적인 모형에 의하여 지

표면에 도달하는 자외선 양을 계산하기 위해서는 다음의 과정을 거친다. 즉, 위도와 시간의 변화에 따른 태양의 천 정각 및 지구와 태양의 거리 효과 계산, 그리고 대기 중에서 오존에 의한 흡수 효과와 공기 분자 및 에어로졸 그리고 구름에 의한 산란 효과 계산 과정이 필요하다. 이들 중에서 위도와 시간에 따른 태양의 천정각 및 지구와 태양 사이의 거리 효과 계산은 3항에서 서술한 바와 같고, 대기의 일사량은 175-400 nm의 파장 영역에 대하여 위성 관측된 0.1-0.3 nm의 간격의 자료를 2-5 nm간격으로 다시 적분하여 71개의 자료로 만들어 사용하였으며 그 결과는 Fig. 7과 같다. 이 그림에서 보는 바와 같이 대기 상한에 도달하는 자외선 양은 UV-A와 UV-B 파장 영역에서 파장의 변화에 따라  $0.5-10.0 \text{ Wm}^{-2}\mu\text{m}^{-1}$ 의 범위에서 다소 변화한다.

이 연구에서는 태양 복사 모형의 입력 자료 중에서 오존 양의 연직 분포 자료는 2항에서 밝힌 바와 같이 세종 기지의 Brewer DS와 ZS 자료를 이용하였다. 일반적으로 공기 입자들에 의한 복사의 흡수는 기압과 기온의 함수이나 오존 흡수 계수는 기압과 기온의 영향이 매우 작기 때문에 오존의 연직 분포의 변화는 크게 중요하지 않다. 따라서 이 연구에서는 Brewer 오존분광광도계에 의한 오존 전량 관측 값을 아극 겨울철 표준 대기(U.S. Air Force 1976)의 오존 연직 분포에 따라 비례적으로 계산하여 사용하였다.

에어로졸은 2항에서 설명한 바와 같이 Nakajima et al. (1996)의 자료를 근거로 340 nm에서 연직 공기 기둥에 대한 에어로졸의 광학 두께를 0.1로 가정하였으며, 에어로졸의 단일 산란 알베도(single scattering albedo)와 비 대칭 인자(asymmetry factor)는 각각 0.999와 0.610을 사용하였다. 또한 지표면 알베도는 세종기지에서 계절별 변화가 크기 때문에 남반구 겨울철은 0.85 그리고 여름철은 0.20으로 가정하였고 봄과 가을은 이들을 내삽하여 월별 변화를 주었다.

이상과 같은 태양 복사 모형의 입력 자료를 이용하여 태양 복사 모형을 가동하였고, 오존 전량과 에어로졸 및 지표면 알베도 변화에 따른 남극 세종기지의 지표면에서 계산된 UV-A와 Erythemal UV-B 자외선의 반응도를 살펴보았다. 이들 중에서 오존 전량과 에어로졸에 의한 반응도를 Fig. 8과 9에 나타내었다.

Fig. 8의 계산을 위하여 지표면 알베도는 0.2를 사용하였고 에어로졸 광학 두께는 340 nm의 파장에 대하여 0.1 을 가정하였으며 위도와 경도는 세종기지의 값을 사용하였다. Fig. 8(B)에 나타낸 바와 같이 지표면에서의 Erythemal UV-B는 오존 전량의 증가에 따라 급감하고 이러한 경향은 태양 천정각의 코사인 값이 증가할수록 다소 감소 한다. 즉, 태양 천정각의 코사인 값이 0.3일 경우와 0.9일

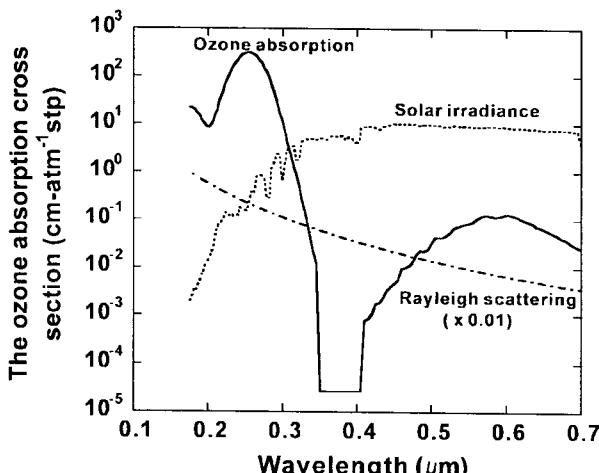


Fig. 7. Spectral distributions of ozone absorption coefficient, Rayleigh scattering coefficient( $\times 10^{-4} \text{ hPa}^{-1}$ ), and extra solar irradiance( $\text{W/m}^2$ ) in the short-wave region.

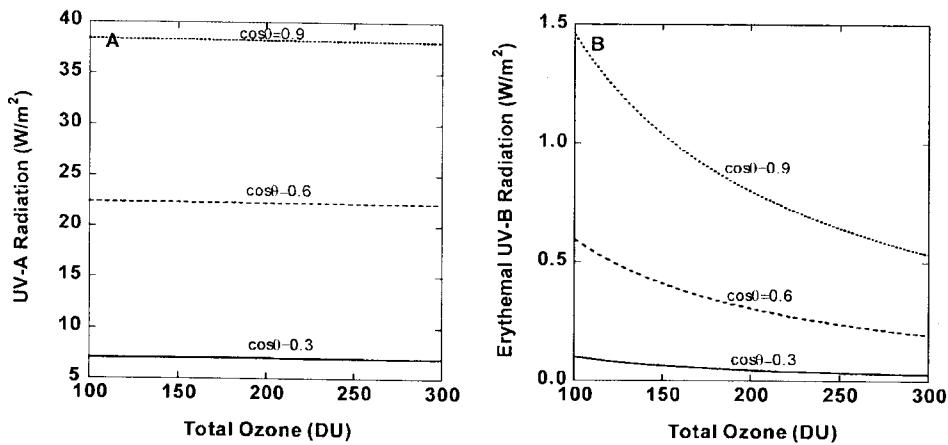


Fig. 8. Sensitivity of UV-A radiation(A) and Erythemal UV-B radiation(B) to total ozone amount by solar radiation model.

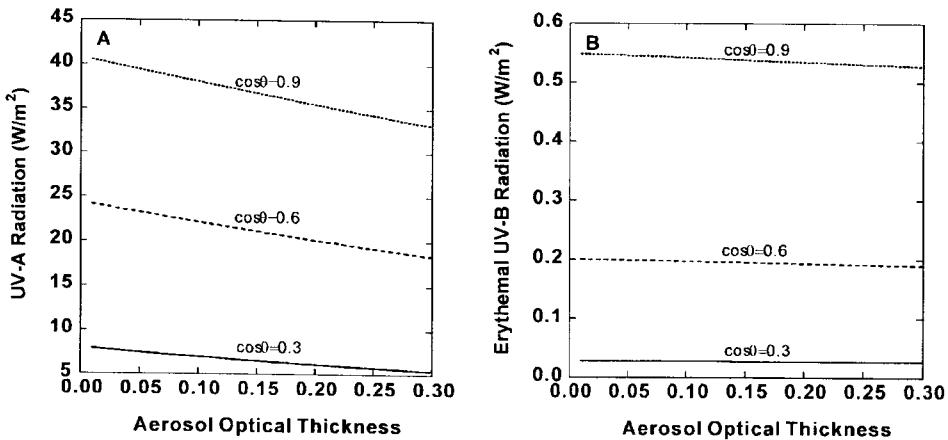


Fig. 9. Same as Fig. 8, except for the aerosol optical depth with the fixed total ozone amount of 295 DU.

경우 오존 증가에 따른 지표면에서의 Erythemal UV-B 자외선 변화는 각각 73%와 64%이었다. 그러나 Fig. 8(A)와 같이 UV-A 자외선은 오존 전량의 증가에 따라 약 1% 정도가 감소할 뿐이다.

Fig. 9는 Fig. 8의 계산 방법과 마찬가지이나 오존 전량을 295 DU로 가정하여 에어로졸 광학 두께의 변화에 대한 반응도를 나타낸 것이다. Fig. 9(B)에 나타낸 것처럼 에어로졸의 광학 두께를 0.0에서 0.3까지 변화 시켰고, 이 경우 지표면에 도달하는 Erythemal UV-B는 0.3과 0.9의 태양 천정각의 코사인 값에 대하여 각각 6.1%와 4.0%만이 감소하였다. 그러나 에어로졸 광학 두께가 증가할수록 지표면에 도달하는 UV-A의 자외선은 태양 천정각의 코사인이 0.3일 경우 31.1%로 크게 감소하였으며 태양 천정각의 코사인 값이 0.9일 경우는 18.3%가 감소하였다(Fig. 9(A)). 따라서 구름 없는 밝은 날의 경우 지표면에 도달하

는 Erythemal UV-B는 태양 천정각과 오존 전량에 따라 변화하는 반면, UV-A는 태양 천정각과 공기 분자 및 에어로졸 산란 효과가 중요함을 알 수 있다.

Fig. 9(A)의 에어로졸에 의한 UV-A 자외선의 산란 효과는 비 대칭 인자와 에어로졸의 단일 산란 알베도에 의하여 결정되며 때문에 이들의 변화에 따른 모형의 반응도를 Fig. 10에 나타내었다. 이 그림에서 비 대칭 인자의 값은 0.4에서 0.8까지 변화 시켰고, 이를 값의 증가에 따른 지표면에서의 UV-A 자외선은 태양 천정각의 코사인 값이 0.3일 경우 1.4% 증가하였으며 태양 천정각의 코사인 값 증가에 따라 UV-A의 증가율이 감소하였다. 마찬가지로 단일 산란 알베도 변화에 따른 지표면의 UV-A 자외선 변화는 비 대칭 인자의 경우보다 크게 나타나고 태양 천정각의 코사인 값이 0.3일 경우 10.3% 증가하였다.

지표면에서 반사된 자외선은 대기 중에서 공기 분자

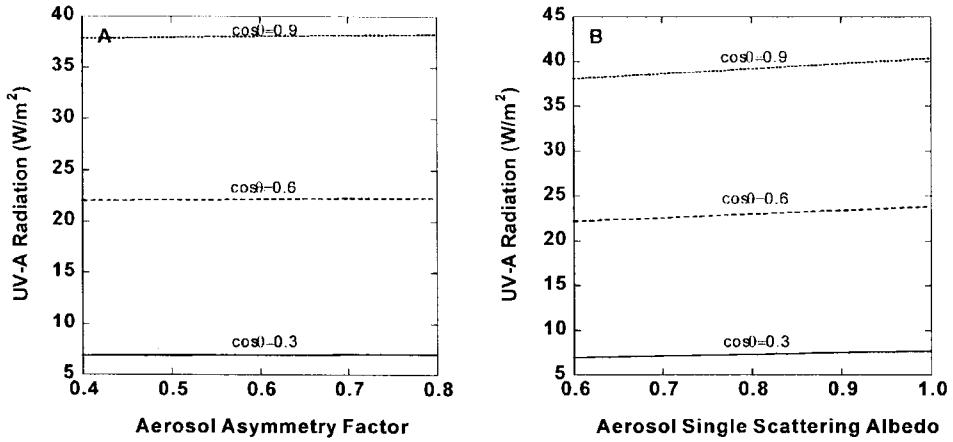


Fig. 10. Same as Fig. 8, except for the asymmetry factor(A) and single scattering albedo(B) in the UV-A spectral region.

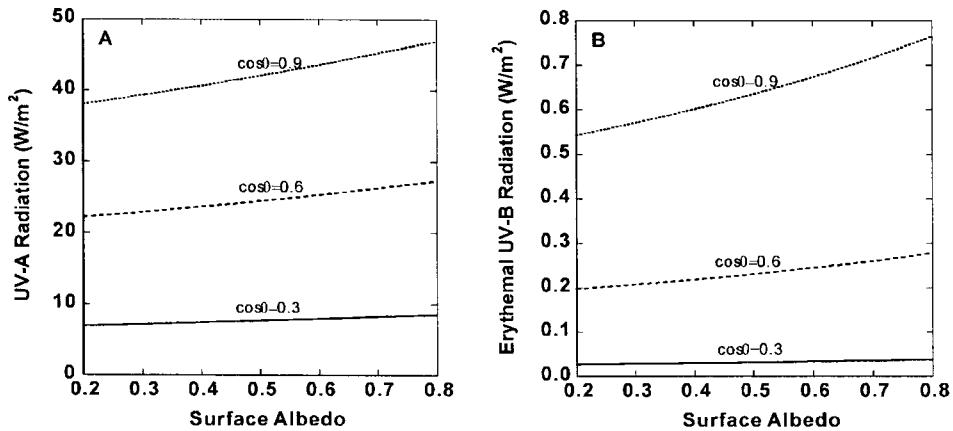


Fig. 11. Same as Fig. 8, except for the surface albedo.

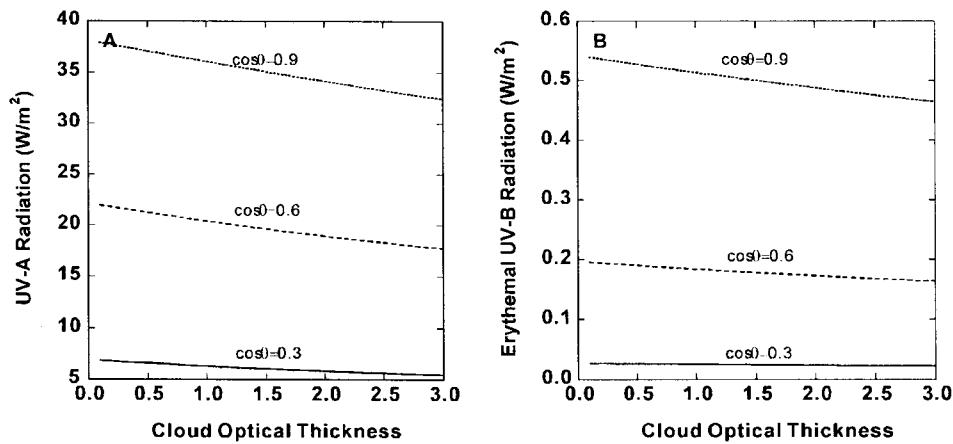


Fig. 12. Same as Fig. 8, except for the cloud optical thickness.

및 에어로졸 산란에 의하여 일부는 다시 지표면에 영향을 미치기 때문에 지표면 알bedo의 증가는 지표면에 도

달하는 자외선의 증가를 예상할 수 있다. 따라서 지표면 알bedo 변화에 따른 태양 복사 모형의 반응도는 Fig. 11

에 나타내었다. 이 경우 지표면 알베도 효과는 Erythemal UV-B 자외선은 UV-A 보다 크게 나타나고, 태양 천정각의 코사인 값이 0.6일 경우 Erythemal UV-B는 지표면 알베도 증가에 따라 약 40.61% 증가하였으며 UV-A는 23.1% 증가하였다. 이러한 Erythemal UV-B와 UV-A의 증가 효과는 태양 천정각의 코사인 값에 따라 1% 정도 변화하였다.

한편, 지표면에서의 자외선 양은 구름 입자의 산란 효과에 의하여 크게 감소한다. 그러나 이 연구에서는 이와 같은 구름 효과에 대하여 직접적인 계산을 포함시키지는 않았고, 구름이 모형 대기의 288-311 hPa에 존재하는 것으로 가정하여 태양 복사 모형의 반응도를 시험하였으며

그 결과는 Fig. 12와 같다. Fig. 12의 계산을 위하여 지표면 알베도와 오존 전량은 앞에서와 마찬가지로 0.2와 295 DU를 사용하였고, 구름 입자의 비 대칭 인자는 0.843을 가정하였다(Chou *et al.* 2002). 이 그림에서와 같이 구름의 광학 두께는 0.1부터 3.0까지 변화시켰고, UV-A 자외선은 Erythemal UV-B 자외선 보다 구름 광학 두께 증가에 대하여 감소 정도가 더 크게 나타났다. 즉, UV-A는 태양 천정각의 코사인 값이 0.3일 경우 구름 광학 두께의 증가에 따라 20.5% 감소하였으나 Erythemal UV-B는 17.0% 이었고, 태양 천정각의 코사인 값이 0.9일 경우는 UV-A가 14.6% 그리고 Erythemal UV-B는 13.9% 감소하였다.

#### 태양 복사 모형에 의한 세종기지 지표면에서의 자외선 양 계산 결과와 관측 자료의 비교

태양 복사 모형의 입력 자료 중 오존 전량은 세종기지에서 관측된 Brewer DS와 ZS에 의한 Fig. 13(A) 자료를 사용하였고, 태양 복사 모형에 의하여 지표면에서의 자외선 양 계산 결과와 비교 분석하기 위한 UV-A와 Erythemal UV-B 자외선 관측 자료를 각각 Fig. 13(B) 및 (C)에 나타내었다.

Fig. 13(A)의 일별 오존 전량은 Fig. 3에 근거한 자료들이기 때문에 1998년부터 2000년까지의 변화 경향은 Fig. 3의 설명과 같다. 그리고 Fig. 13(B)의 UV-A는 1999년부터 2000년까지 2년 동안의 자료를 이 연구에서 사용하였다. 이 그림에서 UV-A 자외선 양은 5분간 누적 관측된 값을 평균하여  $\text{mWcm}^{-2}$ 의 단위로 저장되기 때문에 이 값을 하루동안 누적한 것이다. 따라서 하루동안 세종기지 지표면에 도달하는 UV-A 자외선 양은 이 자료에 300초(5분)를 곱하면 되고 이 경우의 단위는  $\text{mJcm}^{-2}$ 이 된다. 이 그림에서와 같이 세종기지에서의 일별 UV-A 자외선 양은 남반구의 겨울철에  $5 \text{ mWcm}^{-2}$ 이하이고, 여름철에는 구름의 광학 두께에 따라  $10\text{-}100 \text{ mWcm}^{-2}$ 까지 변화하였다. 그리고 이 그림에서 1999년 여름에 비교하여 2000년의 여름은 지표면에 도달하는 UV-A 자외선 양이 크게 증가하였음을 볼 수 있고, 이것은 2000년 여름이 1999년 여름에 비교하여 밝은 날이 많았음을 의미한다. Fig. 13(C)는 하루동안 누적된 Erythemal UV-B 자외선 양으로서 단위는 MED이다. 이 그림에서 Erythemal UV-B 자외선 양은 UV-A의 경우와 마찬가지로 남반구의 겨울철에 최소이고 여름철에 최대 값을 나타낸다. 그러나 1999년 여름과 비교하여 2000년의 여름철 UV-A 자외선 양은 크게 증가한 반면, 마찬가지 경우의 Erythemal UV-B 자외선 증가는 크지 않다. 그 이유는 Fig. 12에서 설명한 바와 같이 Erythemal UV-B가 UV-A에 비교하여 구름 광학 두께의 영향을 적게 받기 때문이다. 그리고 Erythemal UV-B는 UV-A에 비교하여 오존 전량의 영향을 크게 받는데, Fig.

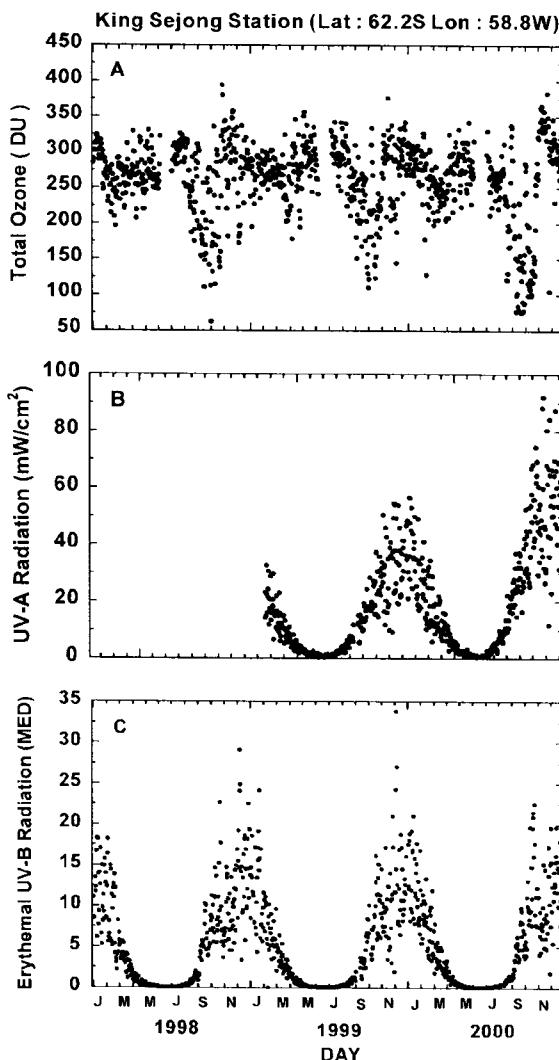


Fig. 13. Daily total ozone(Dobson Unit)(A), UV-A radiation( $\text{mW/cm}^2$ )(B), and Erythemal UV-B radiation (MED)(C) at King Sejong Station during 1998-2000.

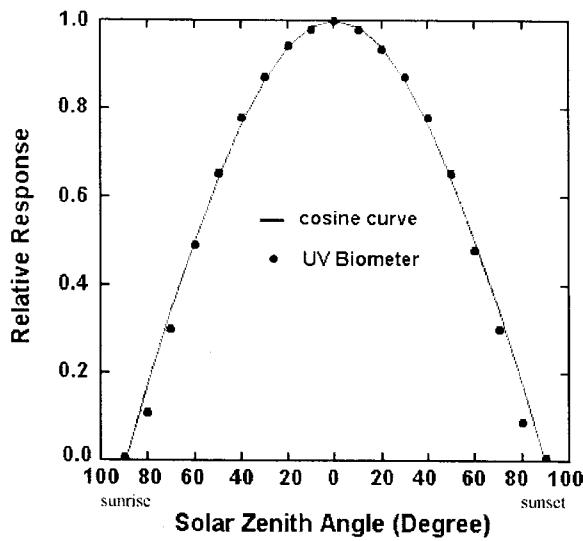


Fig. 14. Sensitivity of UV-Biometer(model 501) detector with solar zenith angle.

13(A)에서처럼 1999년 여름 보다 2000년 여름의 오존 전량이 더 많기 때문에 2000년의 여름철 Erythemal UV-B는 UV-A의 경우와 같이 1999년에 비교하여 크게 차이가 나지 않는다.

UV-Biometer와 UV-A meter는 태양 천정각에 따라 수감부의 반응도가 다르기 때문에 태양 복사 모형에 의한 계산 값과의 비교를 위하여 Fig. 14와 같이 보정하였다. 즉, 지표면에 도달하는 자외선은 이론적으로 태양 천정각의 코사인 함수로 나타나는데, 이 그림에 의하면 태양의 천정각이 0°일 경우 수감부의 반응도는 1로서 정확하다. 그러나 태양의 천정각이 증가할수록 태양 천정각의 코사인 함수에 대한 오차가 증가하여 천정각이 80°일 때 최고 63% 작게 나타난다. 따라서 이 연구에서는 태양 복사 모형의 계산 값에 Fig. 14의 결과만큼 보정하였다.

앞에서 설명한 것처럼 지표면에 도달하는 자외선은 대기 중에서 오존의 흡수, 구름과 에어로졸 및 분자 산란이 중요한 물리적 과정이다. 그러나 이 연구에서는 구름이 없는 맑은 경우에 대하여 태양 복사 모형을 가동하였다. 따라서 Fig. 13의 자료들 중에서 비교적 맑은 날에 해당하는 Erythemal UV-B와 UV-A 자외선 관측 자료들을 태양 복사 모형에 의한 계산 값과 비교하였다.

세종기지는 위치상 남반구의 고위도 저압대에 있어 구름 없는 맑은 날이 많지 않다. 따라서 Fig. 13의 Erythemal UV-B 자료들 중에서 비교적 맑은 날은 12일 정도되었고 이들 중에서 6일을 선택하여 Fig. 15에 나타내었다. 이 그림은 매 5분 동안 누적된 Erythemal UV-B 자외선 양(MED 단위)을  $\text{W/m}^2$ 의 단위로 평균하여 일출부터 일몰까지 나타낸 것이고, 이 그림을 위하여 태양의 천정각,

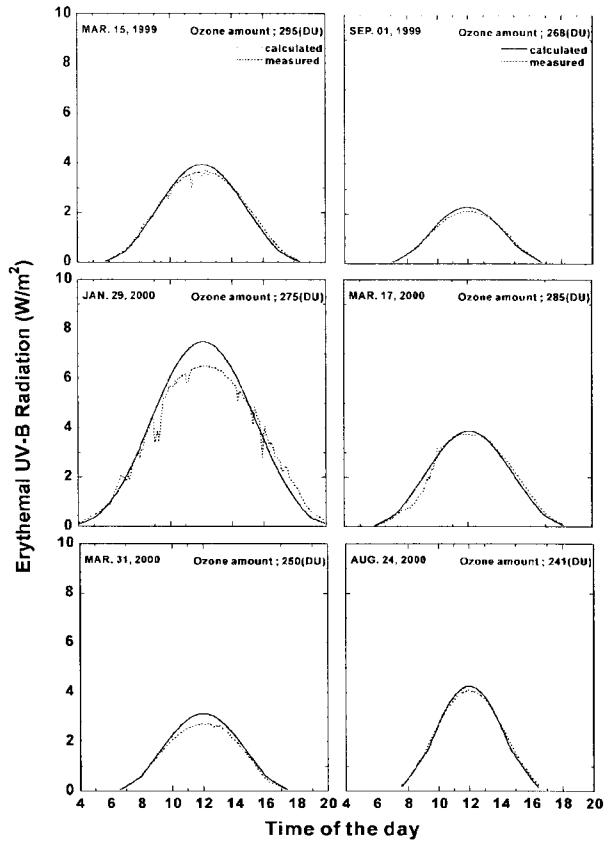


Fig. 15. The measured and calculated Erythemal UV-B radiation under relatively clear sky over King Sejong Station during 1999-2000.

연직 오존 분포, 그리고 에어로졸 양 및 지표면 알베도 등은 2장에서 설명한 값을 사용하였다. 이 그림에서 보는 바와 같이 일출에서 일몰까지 하루종일 비교적 맑은 날은 1999년 9월 1일과 2000년 3월 31일 그리고 2000년 8월 24일의 3일 정도이고 이들 3일 동안의 지표면에서 관측된 Erythemal UV-B 자외선은 계산 값과 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 즉, 지표면에 도달하는 Erythemal UV-B 자외선은 오존 전량과 태양 천정각에 따라 변화하는데 Brewer 오존분광광도계로 측정된 오존 전량 자료와 이 연구에서 사용한 에어로졸 양 및 지표면 알베도 등의 가정이 합리적임을 알 수 있다. 이 그림에서 1999년 3월 15일과 2000년 1월 29일 그리고 2000년 3월 17일은 일출부터 일몰까지 부분 운량이 있는 경우의 자료들이다. 이 경우에 태양 복사 모형에 의한 계산 값은 구름 효과를 고려하지 않은 것이기 때문에 관측 값과 태양 복사 모형 값의 차이는 구름에 의한 산란 효과로 나타난다. 이는 향후 구름의 산란 효과에 대한 정량적 분석이 필요함을 의미한다.

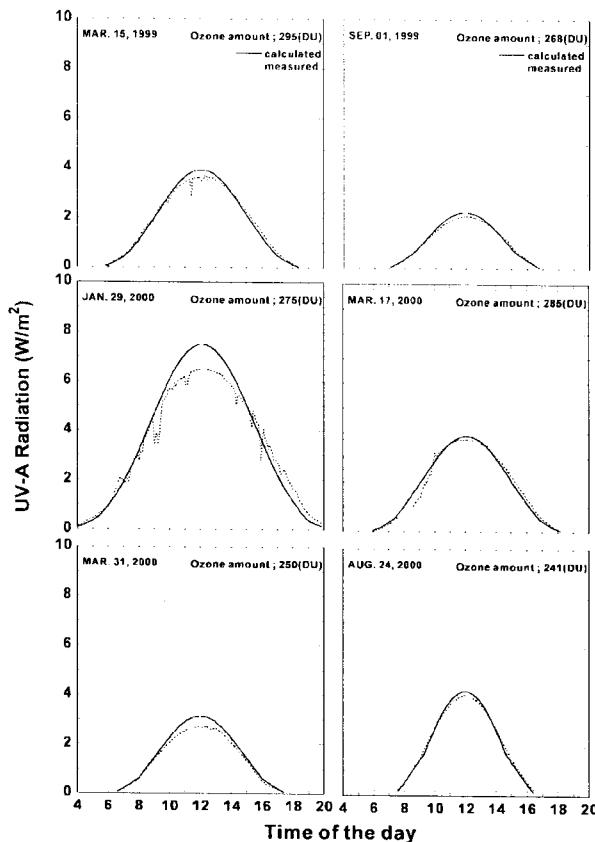


Fig. 16. Same as Fig. 15, except for the UV-A radiation.

Fig. 16은 Fig. 15와 같은 날의 UV-A 자외선 양을 나타낸 것이다. 이 그림에서 1999년 9월 1일과 2000년 3월 31일 그리고 2000년 8월 24일의 비교적 맑은 3일 동안의 관측 값과 모형에 의한 계산 값은 Erythemal UV-B의 경우와 달리 약간의 차이가 있음을 볼 수 있다. 지표면에 도달하는 UV-A 자외선은 앞에서 설명한 바와 같이 오존 량에 따른 변화보다는 공기 입자와 에어로졸 및 구름에 의한 산란 효과가 더 크다. 따라서 비교적 맑은 3일 동안의 UV-A 자외선 양이지만 주변에는 부분적으로 얇은 구름이 있는 것으로 판단되고, 또한 이 연구에서 가정한 에어로졸 광학 두께의 오차 때문에 모형에 의한 계산 값과 차이가 나타난다. 그러나 Erythemal UV-B의 경우는 얇은 구름과 에어로졸의 영향이 UV-A 보다 작기 때문에 모형과 관측 값의 차이가 적었던 것으로 판단된다. Fig. 16에서 나머지 3일 동안은 비교적 부분 운량이 많았던 경우로서 이 구름 들의 고도와 광학 두께 등에 관한 정확한 정보없이는 정량적 분석이 어렵다. 따라서 구름에 의한 지표면에서의 UV-A와 Erythemal UV-B 자외선 양의 변화에 대해서는 추가로 인공위성 자료를 이용한 정량적 분석을 필요로 한다.

## 5. 결 론

이 연구에서는 UV-B와 UV-A 파장 영역에 대하여 남극 세종기지의 지표면에서 자외선 양 변화를 조사하였다. 사용한 자료는 1998년부터 2000년까지 지표면에서의 Erythemal UV-B 자외선과 1999년부터 2000년 사이의 UV-A 자외선 관측 값이고, 이를 결과와 비교하기 위하여 태양 복사 모형을 가동하였으며 모형의 주요한 입력 자료인 오존 전량은 세종기지에서 Brewer 오존분광광도계로 측정한 자료를 사용하였다. 한편, 태양 복사 전달 과정의 모수화는 Chou and Lee(1996)에 근거하였고 오존 전량과 에어로졸 및 지표면 알베도 변화에 따른 남극 세종기지의 지표면에서 계산된 UV-A와 Erythemal UV-B 자외선의 반응도를 계산하였다.

이 모형에 의하면 오존 전량이 100 DU에서 300 DU로 200% 증가함에 따라 Erythemal UV-B 자외선은 태양 천정각의 코사인 값이 0.3일 경우 지표면에서 73%로 크게 감소하는 반면, UV-A 자외선은 오존 전량의 증가에 따라 약 1% 정도가 감소할 뿐이었다. 그리고 에어로졸의 광학 두께를 0.0에서 0.3까지 변화시켰을 경우 Erythemal UV-B는 태양 천정각의 코사인 값이 0.3일 때 6.1%이 감소하였으나, UV-A의 자외선은 31.1%로 크게 감소하여 Erythemal UV-B 보다 에어로졸의 영향을 더 많이 받고 있는 것으로 나타났다. 또한 지표면 알베도 변화에 따른 Erythemal UV-B의 증가는 UV-A 보다 약 2배정도 크게 나타났다.

남극 세종기지에서 비교적 구름이 없었던 날의 경우에 대하여 태양 복사 모형으로 계산한 Erythemal UV-B와 UV-A 자외선 양을 관측 결과와 비교하였다. 그 결과 Erythemal UV-B 자외선은 태양 복사 모형으로 계산한 값과 관측 값이 잘 일치하였다. 즉, Brewer 오존분광광도계로 관측된 오존 전량 자료와 이 연구에서 가정한 에어로졸 양 및 지표면 알베도 등을 태양 복사 모형의 입력 자료로 사용하였기 때문에 Erythemal UV-B 자외선의 계산 값과 관측 값이 잘 일치한다는 것은 오존 관측 자료와 에어로졸 및 지표면 알베도 등의 가정이 합리적임을 의미한다. 그러나 UV-A 자외선 양은 구름과 에어로졸 등의 산란 효과가 크게 중요하지만 구름에 관한 정확한 자료를 입수하기가 쉽지 않고, 세종기지가 위치한 곳에서는 구름 없이 맑은 날이 드물기 때문에 구름의 세밀한 관측 자료가 없는 상태에서는 지표면에서의 UV-A 자외선을 정확하게 계산 할 수 없다. 이 연구에서는 세종기지에서 관측된 자외선 관측 자료 중에서 비교적 맑은 날의 자료를 발췌하여 계산 및 분석에 이용하였으나, 이를 자료조차도 부분적으로 얇은 구름의 영향을 받고있기 때문에 Erythemal UV-B 자외선의 경우와 비교하여 UV-A 자외선은 태양 복사 모형

에 의한 계산 값과 관측 값의 차이가 더 크게 나타났다.

## 사    사

이 논문은 한국해양연구원의 ‘극지오존층 변동과 관련한 지구환경변화 및 생태계 변화 연구(PP02105)’ 사업과 ‘북극 대기환경 및 광물자원 연구(PN47500)’ 사업의 일환으로 수행되었다. 원활한 사업수행을 위해 아낌없는 지원을 해주신 관계자분들과 아울러 논문의 질적 수준 향상을 위해 많은 조언을 주신 심사위원분들께 심심한 감사의 말씀을 드린다.

## 참고문헌

- Chou, M.-D. and K.T. Lee. 1996. Parameterization for the absorption of solar radiation by water vapor and ozone. *J. Atmos. Sci.*, 53, 1203-1208.
- Chou, M.-D., K.T. Lee, and P. Yang. 2002. Parameterization of shortwave cloud optical properties for a mixture of ice particle habits for use in atmospheric models. *J. Geophys. Res.*, 107(D21), 1-9.
- Elterman, L. 1968. UV, Visible and IR attenuation for altitudes to 50 km. Report 68-0153, Air Force Cambridge Research Laboratories, Cambridge, MA.
- Harm, W. 1980. Biological effects of ultraviolet radiation. Cambridge University Press.
- Jagger, J. 1985. Solar-UV Actions on Living Cells. Praeger Publishers, New York.
- King, M.D. and Harshvardan. 1974. Comparative accuracy of selected multiple scattering approximations. *J. Atmos. Sci.*, 43, 784-801.
- Lacis, A.A. and J.E. Hansen. 1974. A parameterization for the absorption of solar radiation in the earth's atmosphere. *J. Atmos. Sci.*, 31, 118-133.
- Nakajima, T., G. Tonna, R. Rao, P. Boi, Y.J. Kaufman, and B.N. Holben. 1996. Use of sky brightness measurements from ground for remote sensing of particulate polydispersions. *Appl. Opt.*, 35, 2672-2686.
- Parson, P.C. and P. Gross. 1980. DNA damage and repair in human cell exposed to sunlight. *Photochem. Photobiol.*, 32, 635-641.
- Rahn, R.O. 1972. Ultraviolet irradiation of DNA in concepts in radiation cell biology. G.L. Whitson ed., Academic Press, 1-56.
- Resnick, M.A. 1970. Sunlight-induced killing in saccaromyces cerevisiae. *Nature*, 226, 377-378.
- Smith, K.C. 1966. Physical and chemical changes induced in nucleic acids by ultraviolet light. *Radiant. Res. Suppl.*, 6, 54-79.
- Stamnes, K., S.C. Tsay, W. Wiscombe, and K. Jayaweera. 1988. Numerically stable algorithm for discrete-ordinate-method radiative transfer in multiple scattering and emitting layered media. *Appl. Optics*, 27, 2502-2509.
- U.S. Air Force. 1976. U.S. standard atmosphere. U.S. Air Force, 227pp.
- Witkin, E.M. 1976. Ultraviolet mutagenesis and inducible DNA repair in escherichia coli. *Bacterial. Rev.*, 40, 869-907.

Received Dec. 20, 2002

Accepted Feb. 20, 2003