

Article

지표 자외선 복사 변화에 미치는 오존 전량, 구름 및 적설 효과

이윤곤¹ · 김 준¹ · 이방용^{2*} · 조희구¹¹연세대학교 대기과학과/지구환경연구소

(129-749) 서울시 서대문구 신촌동 134

²한국해양연구원 부설 극지연구소

(425-600) 경기도 안산시 안산우체국 사서함 29호

Effects of Ozone, Cloud and Snow on Surface UV Irradiance

Yun Gon Lee¹, Jhoon Kim¹, Bang Yong Lee^{2*}, and Hi Ku Cho¹¹Department of Atmospheric Sciences/Global Environment Laboratory

Yonsei University, Seoul 120-749, Korea

²Korea Polar Research Institute, KORDI

Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea

Abstract : Total solar irradiance (TSO), total UV irradiance (TUV) and erythral UV irradiance (EUV) measured at King Sejong station (62.22°S, 58.78°W) in west Antarctica have been used together with total ozone, cloud amount and snow cover to examine the effects of ozone, cloud and snow surface on these surface solar irradiance over the period of 1998-2003. The data of three solar components for each scan were grouped by cloud amount, n in oktas ($0 \leq n < 3$, $3 \leq n < 4$, $4 \leq n < 5$, $5 \leq n < 6$, $6 \leq n < 7$ and $7 \leq n < 8$) and plotted against solar zenith angle (SZA) over the range of 45° to 75°. The radiation amplification factor (RAF) is used to quantify ozone effect on EUV. RAF of EUV decreases from 1.51 to 0.94 under clear skies but increases from 0.94 to 1.85 under cloudy skies as SZA increases, and decreases from 1.51 to 1.01 as cloud amount increases. The effects of cloud amount and snow surface on EUV are estimated as a function of SZA and cloud amount after normalization of the data to the reference total ozone of 300 DU. In order to analyse the transmission of solar radiation by cloud, regression analyses have been performed for the maximum values of solar irradiance on clear sky conditions ($0 \leq n < 3$) and the mean values on cloudy conditions, respectively. The maximum regression values for the clear sky cases were taken to represent minimum aerosol conditions for the site and thus appropriate for use as a normalization (reference) factor for the other regressions. The overall features for the transmission of the three solar components show a relatively high values around SZAs of 55° and 60° under all sky conditions and cloud amounts $4 \leq n < 5$ and $5 \leq n < 6$. The transmission is, in general, the largest in TUV and the smallest in EUV among the three components of the solar irradiance. If the ground is covered with snow on partly cloudy days ($6 \leq n < 7$), EUV increases by 20 to 26% compared to snow-free surface around SZA 60°-65°, due to multiple reflections and scattering between the surface and the clouds. The relative difference between snow surface and snow-free surface slowly increases from 9% to 20% as total ozone increases from 100 DU to 400 DU under partly cloud conditions ($3 \leq n < 6$) at SZA 60°. The snow effects on TUV and TSO are relatively high with 32% and 34%, respectively, under clear sky conditions, while the effects changes to 36% and 20% for TUV and TSO, respectively, as cloud amount increases.

Key words : 태양복사(Solar irradiance), 세종기지(King Sejong Station), 오존(Ozone), 구름(Cloud), 적설(Snow surface)

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

1. 서 론

최근 오존층의 파괴는 태양으로부터 지표에 도달하는 B파장 자외선(280~320 nm; UV-B) 복사량의 증가에 큰 관심을 갖게 하였다. 지표에 도달하는 이 자외선 복사는 전 태양 복사량의 약 0.1% 이하에 불과하지만, 이것이 오존층에 흡수되지 못하고 지표에 도달하게 되면 인체의 피부와 눈 그리고 면역체에 해를 끼치게 됨은 물론 그 밖의 생태계에 커다란 악영향을 준다.

자외선 복사(UV radiation)는 생물학적으로 UV-A(320~400 nm), UV-B(280~320 nm)와 UV-C(200~280 nm) 복사로 나누고 있다. UV-C 복사는 인체와 생태계에 해가 되나 현 오존층에 의하여 완전히 흡수되어 지표에 도달하지 않는다. UV-B 복사는 생명체에 해가 되며 현 오존층의 변화에 따라 세기가 변한다. 그리고 UV-A 복사는 생명체에 거의 피해를 주지 않으며 현 오존층을 거의 통과하여 지표에 도달한다. 그러므로 우리가 관심을 갖고 있는 지표 자외선 복사는 오존층 변화에 영향을 받고 있는 UV-B 복사이다. 오존층의 감퇴에 따르는 지표 유해 자외선 복사의 증가에 관한 연구는 최근 많이 수행되고 있다(Madronich 1993a,b; Weiler et al. 1994; 조 등 1998; Taalas et al. 2000; IOC 2000). 지표 자외선 복사의 변화는 태양과 지구간의 거리, 태양 천정각의 기하학적 요소 외에 주로 구름, 오존 전량(McKenzie et al. 1996), 에어러솔과 지표면 알베도에 의한다.

이 연구에서는 지표 자외선 복사의 변화에 영향을 주는 오존, 구름 그리고 적설 효과를 태양 천정각과 운량에 따라 밝히고자 한다. 이를 위하여 남극 세종기지(62.22°S, 58.78°W)에서 측정된 전천 일사량(total Solar irradiance; TSO)(285~3000 nm), 전 자외선 복사량(total UV irradiance; TUV)(295~385 nm), 홍반 자외선 복사량(erythemal UV irradiance; EUV)(280~320 nm) 그리고 오존 전량을 사용하였다. 지표 자외선 복사의 변화에 오존 효과는 복사 배율인자(Radiation Amplification Factor; RAF)(Madronich 1993a,b)로 설명하였고 구름효과는 매우 맑은 날의 태양 복사량에 대하여 운량에 따르는 감소량을 구름에 의한 태양 복사 투과율로 정의하였다. 그리고 적설 효과(지표 알베도; surface albedo)는 지표에 적설이 없는 경우와 있는 경우의 차이로 나타내었다.

2. 자료 및 방법

관측 자료

관측자료는 1998년 1월부터 2003년 12월까지 6년간 남극 세종기지에서 관측한 값이다.

오존 전량과 일사량

오존 전량은 Brewer 오존분광 광도계(SCI-TEC #122)로 파장 303.2 nm, 306.3 nm, 310.1 nm, 313.5 nm, 316.8 nm와 320.1 nm의 직달 일사를 일별로 측정하여 구하였다. 이 중 303.2 nm는 자체 검정용으로 사용되었다.

TSO(단위: ly/min)는 Eppley Precision Pyranometer(285~3000 nm), 그리고 TUV(단위: mly/min)은 Eppley UV Photometer(295~385 nm)로 매일 10분 간격으로 관측한 값을 일적산한 자료를 사용하였다. EUV는 Robertson-Berger형 UV-Biometer(Solar Light Co., Model 501)를 사용하여 5분 간격으로 측정된 값이다. 이 EUV의 물리적 의미는 다음과 같다.

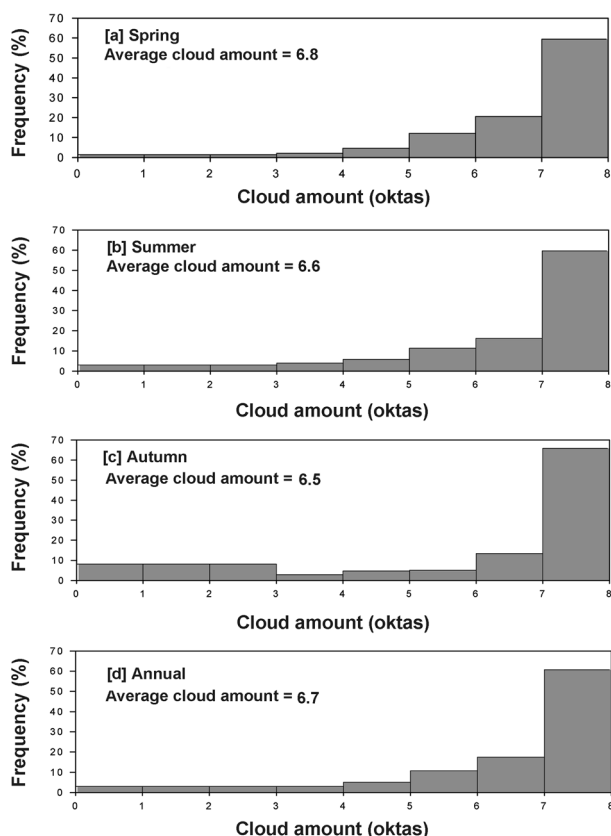
$$EUV = \int_{280 \text{ nm}}^{320 \text{ nm}} W_E(\lambda) L(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

여기에서 $L(\lambda)$ 는 분광 자외선 복사량(spectral UV irradiance), $W_E(\lambda)$ 는 UV-Biometer 수감부의 홍반 작용 스펙트럼(erythemal weighting function: erythemal action spectrum)에 해당하는 분광 반응 값(detector response)을 의미한다. 홍반 자외선 복사는 파장 280~320 nm 범위의 자외선 복사량에 피부가 자외선에 노출되었을 때, 인체의 피부에 홍반이 발생할 수 있는 작용 스펙트럼(action spectrum)을 가중시킨 값이다.

운량과 적설량

운량은 세종기지에서 일반 종관측의 목측 단위(1/8; oktas)로 관측된 값이다. 이 운량을 맑음($0 \leq n < 3$)으로부터, $3 \leq n < 4$, $4 \leq n < 5$, $5 \leq n < 6$, $6 \leq n < 7$ 과 $7 \leq n \leq 8$ 로 분류(구간별 순서는 0~5)하였다. Fig. 1은 1998년 1월부터 2003년 12월까지 운량 $n(1/8; \text{oktas})$ 을 계급에 따라 분류하여 계절별과 연 평균 히스토그램을 나타낸 것이다. 이 그림에서 알 수 있는 바와 같이 연 평균 운량이 6.7로 나타나, 세종기지에서의 완전 흐린 날(overcast, $7 \leq n \leq 8$)이 전체의 약 60%를 차지하고 있다. 계절별로는 크게 차이가 있지는 않지만, 남극의 봄에 해당하는 경우에 평균 운량이 조금 높게 나타났다.

이 연구에서 지표면 알베도 효과를 알아보기 위해서 일별 적설 자료를 이용하였다. 일별 적설량은 지표면에 눈이 3 cm 이상 있는 경우를 택하였고, 이 일별 적설량을 Fig. 2에 나타내었다. 적설량은 전 기간(1998-2003) 평균은 23.66 cm이고 계절별로 남극의 여름인 12월부터 2월까지의 지표에 눈이 없고, 남극의 겨울인 6월부터 11월까지의 평균 약 40 cm 이상의 적설량이 관측되었다. 2000년 9월 16일부터 25일은 최심 적설량 225 cm를 기록하였다.



King Sejong Station (Jan. 1998 - Dec. 2003)

2000. 9. 16. - 25.
Max Snow Cover=225cm

Surface Snow Cover [cm]

Month

EUV에 대한 오존 효과를 구하여 주어진 태양 천정각 (solar zenith angle; SZA)에서 오존층 감퇴(ozone layer depletion)에 따르는 지표 자외선 복사량의 증가를 나타내는 RAF(Madronich 1993a,b; Booth and Madronich 1994)를 멍법칙(power law)에 의하여 분석하였다. 이

EUV를 부분 흐린 날($4 \leq n \leq 5$)에 SZA 50°, 60°와 70°에서 적설이 있을 때, 오존 전량에 따라 Fig. 3과 같이 표시하였다. 이 그림에서 보는 바와 같이 EUV는 오존 전량에 크게 의존하고 있음을 알 수 있다. 이 관계를 식 (5)의 먹법칙에 근거하여 식 (6)의 회귀 분석으로 RAF를 SZA와 운량에 따라 계산하였다. 이들 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 이 Fig. 4(a)에서 보는 바와 같이 SZA의 증가에 따

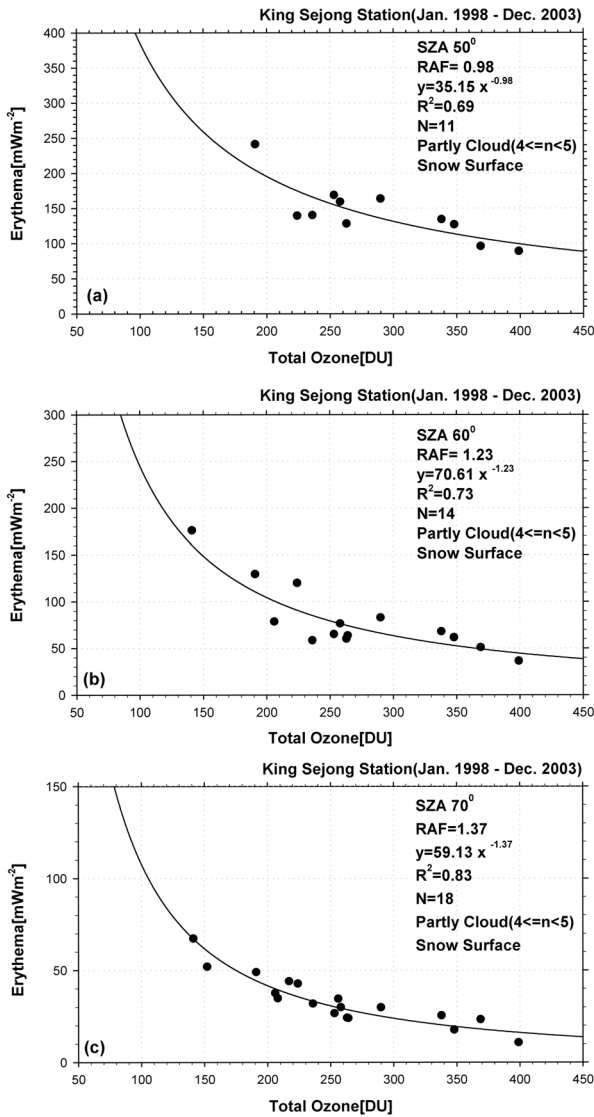


Fig. 3. Relation between erythemal UV irradiance and total ozone (EUV irradiance power law regression under partly cloud conditions at SZAs (a) 50°, (b) 60°, (c) 70°).

라 맑은 날의 경우는 SZA 55°와 60°에서 모두 약 1.5로 최대를 나타내고 그 밖의 SZA에서는 0.9~1.0으로 거의 일정하였다. 부분 흐린 날 ($3 \leq n < 6$)의 경우에는 SZA 50°의 1.0에서 SZA 75°의 1.5로 증가를 나타내었다. 완전 흐린 날 ($6 \leq n \leq 8$)의 경우는 SZA 50°의 0.40에서 제일 낮고 55°의 1.0으로부터 서서히 증가하여 SZA 75°의 1.27까지 증가하였다. 그리고 Fig. 4(b)에 의하면 운량이 증가함에 따라 SZA 55°에서 맑은 날 ($0 \leq n < 3$)의 1.51로부터 감소하기 시작하여 부분 흐린 날 ($5 \leq n < 6$)의 0.84에서 최저가 되고 그 후 완전 흐린 날 ($7 \leq n \leq 8$)의 1.0까지로 서서히 증가하였다. 역시 SZA 60°에서는 맑은 날 ($0 \leq n < 3$)의

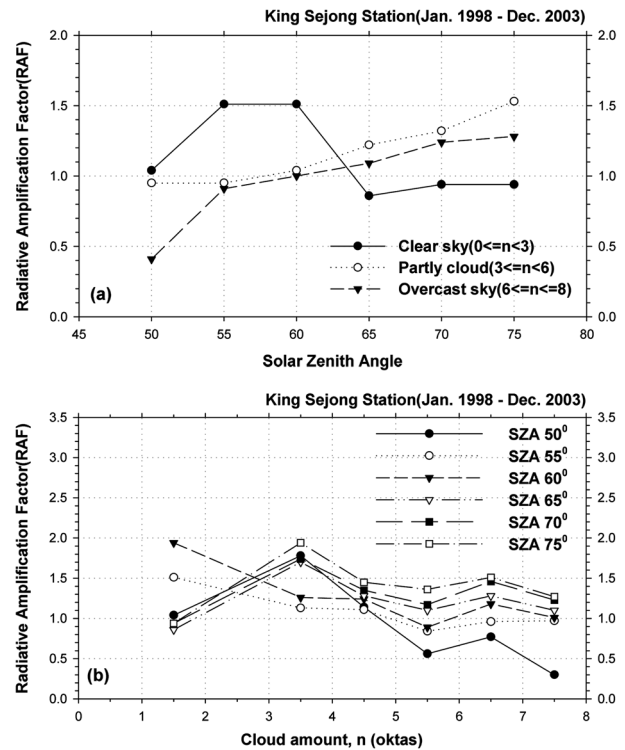


Fig. 4. EUV RAF as a function of (a) solar zenith angle and (b) cloud amounts (1998-2003).

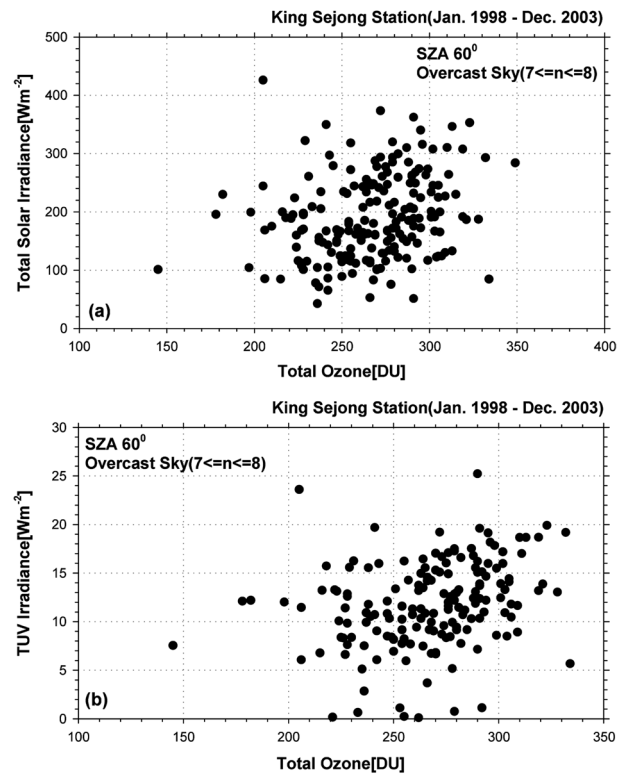


Fig. 5. Relations of (a) total solar irradiance and (b) total UV irradiance against to total ozone under overcast sky conditions at SZA 60° (1998-2003).

1.94로부터 감소하기 시작하여 부분 흐린 날($5 \leq n < 6$) 0.89에서 최저가 되고 그 다음은 완전 흐림의 1.16까지 서서히 증가하였다. 그 밖의 SZA에서는 맑은 날 1.0에서 증가하여 부분 흐린 날($3 \leq n < 4$) 1.8에서 최대가 되고 그 이후에 완전 흐린 날의 0.34~1.24로 서서히 감소하였다. 특히, 모든 SZA에서 부분 흐린 날($5 \leq n < 6$)에서 비교적 낮은 값을 나타내었다. TSO와 TUV는 Fig. 5(a),(b)에서 보는 바와 같이 오존 전량에 영향을 거의 받지 않기 때문에 이 두 성분의 오존 효과는 무시하였다.

구름 효과

EUV 투과율

구름의 EUV 투과율을 구하기 위하여 앞에서 설명한 RAF를 이용하여 먼저 오존 효과(이 2004)를 제거하였다. 오존 효과를 보정한 EUV를 주어진 운량에서 Fig. 6과 같이 표시하였다. Fig. 6(a)과 같이 맑은 날($0 \leq n < 3$)의 경우에 최대 값 $EUV_0(\theta)_{\max}$, 평균값 $EUV_0(\theta)_{\text{mean}}$ 과 최소 값 $EUV_0(\theta)_{\min}$ 을 SZA의 함수로 나타내었다. 그리고 주어진 운량 n 에서도 $EUV_{cn}(\theta)$ 를 최대 값 $EUV_{cn}(\theta)_{\max}$, 평균값 $EUV_{cn}(\theta)_{\text{mean}}$ 과 최소 값 $EUV_{cn}(\theta)_{\min}$ 을 SZA의 함수로 Fig. 6(b)에 역시 나타내었다. 이 연구에서 같은 운량일지

라도 $EUV_{\max}$ 의 경우는 구름 두께가 얇은(thin cloud layer) 경우이고 $EUV_{\min}$ 의 경우는 두터운(very thick cloud layer) 경우로 보았다. 이들 EUV의 SZA 함수를 각 운량에 따라 $SZA = \theta$ 의 3차 다항 회귀식으로 식 (7)과 같이 각각 구하였다.

EUV Irradiance

$$\text{Clear sky conditions}(0 \leq n < 3) \quad (7a)$$

$$EUV_0(\theta)_{\max} = 5.60 - 0.25\theta + 3.66e - 3\theta^2 - 1.84e - 5\theta^3$$

$$R^2 = 0.99 \text{ (a) reference}$$

$$\text{Overcast sky conditions}(7 \leq n \leq 8) \quad (7b)$$

$$EUV_{cs}(\theta)_{\max} = 0.32 + 1.61e - 3\theta - 1.36e - 4\theta^2 + 8.06e - 7\theta^3$$

$$R^2 = 0.98 \text{ (b) thin cloud}$$

$$EUV_{cs}(\theta)_{\text{mean}} = 0.57 - 0.02\theta + 1.39e - 4\theta^2 - 3.70e - 7\theta^3$$

$$R^2 = 0.99 \text{ (c) mean cloud}$$

$$EUV_{cs}(\theta)_{\min} = 0.49 - 0.02\theta + 2.45e - 4\theta^2 - 1.07e - 6\theta^3$$

$$R^2 = 0.98 \text{ (d) thick cloud}$$

이들 회귀식들의 결정계수($R^2 \geq 0.98$)는 매우 높았다. 아주 맑은 날의 최대 $EUV_0(\theta)_{\max}$ 복사(식 7a)는 관측지점에서 에어러솔과 그 밖의 UV 흡수 기체들의 효과가 거의 없었다고 볼 수 있다. 이 연구에서 구름의 EUV 투과율을 맑은 날의 최대 $EUV_0(\theta)_{\max}$ 의 값을 기준(reference)으로 하고 이 기준값에 대하여 주어진 운량 n 에서 회귀식 계산 $EUV_{cn}(\theta)$ 값(흐린 날)의 비로서 다음과 같이 정의하였다.

$$T_{EUV}(n, \theta) = \frac{EUV_{cn}(\theta)}{EUV_0(\theta)} \quad (8)$$

여기에서 $T_{EUV}(n, \theta)$ 는 주어진 SZA에서 구름의 EUV 투과율을 의미하고, $EUV_{cn}(\theta)$ 은 주어진 운량 n 과 SZA에서 EUV를 의미하고 이 복사를 Fig. 6(b)와 같이 최대(thin cloud layer), 평균(mean cloud layer), 최소(thick cloud layer)로 나누었다. 이와 같은 투과율, $T(n, \theta)$ 을 Josefsson and Landelius (2000)는 구름 효과(cloud effect)로 정의하였고 Renaud *et al.*(2000)은 자외선 복사의 구름 강제비(UV cloud forcing ratio)라고 불렀다. 그리고 Schwander *et al.*(2002)은 구름 경감 인자(cloud modification factor)라고 정의하였다.

구름의 $EUV_{cn}(\theta)$ 투과율 $T_{EUV}(n, \theta)$ 을 얇은 구름층, 평균 구름층 및 두터운 구름층으로 나누어 SZA와 운량에 따라 구하였다. 이들 결과 중에 EUV 투과율을 SZA와 운량 n 의 함수로 Fig. 7에 표시하였다. Fig. 7(a)에 의하면 이 투과율은 SZA 45°와 75°사이에 55°~60° 부근에서 모든 운량에서 높았고 특히 운량 $3 \leq n < 6$ 부근에서는 70%~80%로 가장 높게 나타났다. SZA에 따라 55° 부근까지

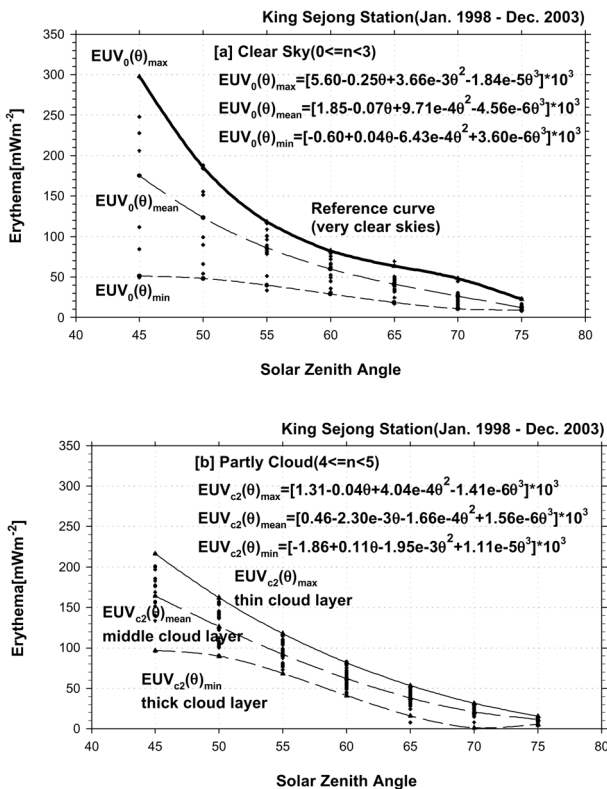


Fig. 6. Erythemal UV-B irradiance as a function of solar zenith angle (45°-75°) under (a) clear sky and (b) partly cloudy conditions (1998-2003).

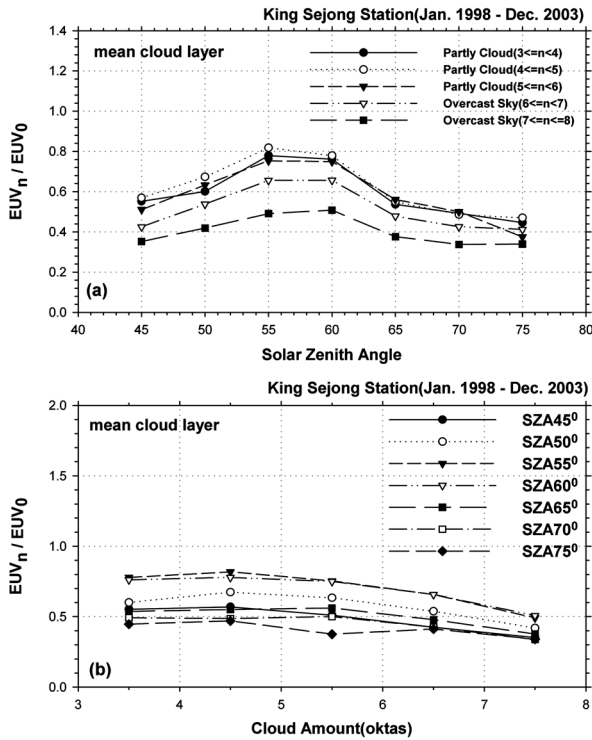


Fig. 7. EUVB transmission of mean cloud layer for maximum value under clear sky conditions as a function of (a) SZA and (b) cloud amount.

증가하는 경향은 투과율의 크기 차이는 다소 있으나 Schafer *et al.*(1996)의 결과와 비슷하다. 완전 흐린 날 ($7 \leq n \leq 8$; overcast)일 때 평균 구름층의 EUV 투과율은 SZA에 따라 33%~50%로 차이가 비교적 작다. Renaud *et al.*(2000)은 스위스 Davos에서 완전 흐린 날에 적설이 없을 때 EUV 투과율은 구름의 두께에 따라 8%~70%에 달한다고 발표하였다. Fig. 7(b)에서 운량이 증가함에 따라 EUV 투과율은 운량 $4 \leq n < 5$ 에서 비교적 높고 그 후에는 서서히 감소한다. 이와 같이 구름의 EUV 투과율은 SZA에 따라 뚜렷하게 변하고 운량에 따라서는 변화가 비교적 작다. 운량 $3 \leq n < 4$ 의 투과율이 SZA 50°와 65° 사이에서 운량 보다 작다는 사실은 매우 흥미 있는 결과이다. 이 결과는 맑은 날보다 구름이 부분적으로 있을 때 구름과 구름사이의 산란 효과로 산란 일사량이 증가한다(Mims and Frederick 1994; Cho *et al.* 2003)는 사실로 해석할 수 있다.

구름에 의한 TSO와 TUV의 투과율

구름에 의한 TSO와 TUV의 투과율을 EUV의 투과율과 같은 방법으로 SZA와 운량에 따라 분석하였다. Fig. 8과 9는 Fig. 6과 같이 맑은 날과 부분 흐림($4 \leq n < 5$)의 경우 TSO와 TUV를 SZA의 함수로 나타내었다. 이들 그림에서 보는 바와 같이 Fig. 6과는 달리 SZA에 따라 상한과 하한

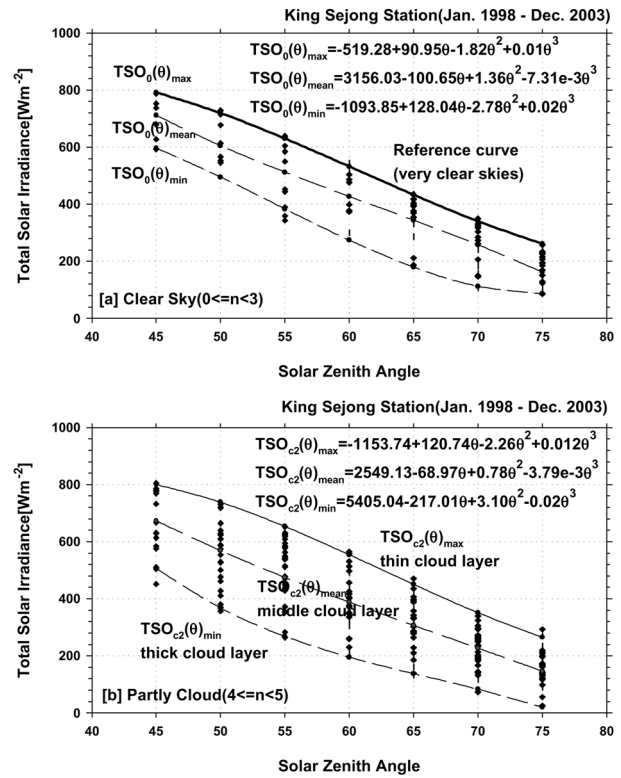


Fig. 8. Same as Fig. 6 except for total solar irradiance.

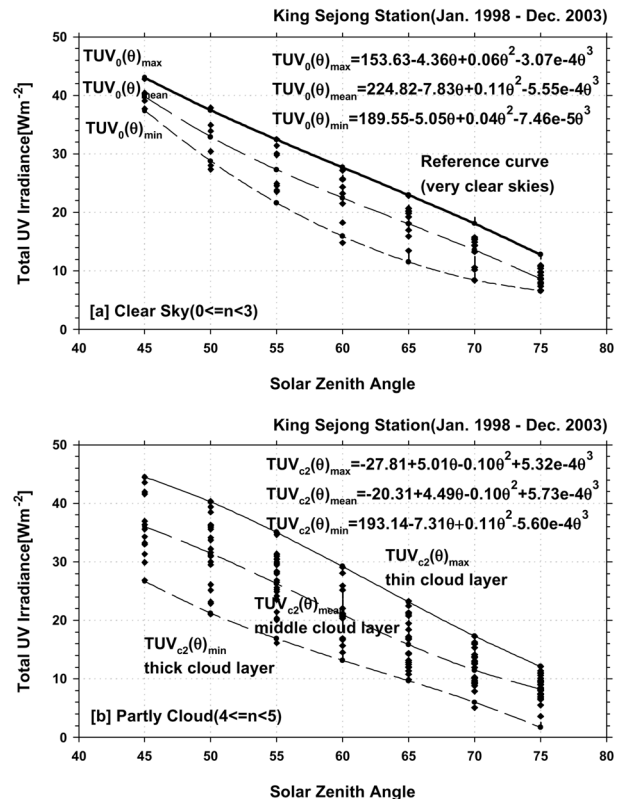


Fig. 9. Same as Fig. 6 except for total UV irradiance.

곡선의 차가 거의 일정함을 알 수 있다. TSO와 TUV를 각 운량에 따라 $SZA=\theta$ 의 3차 다항 회귀식으로 분석한 결과 중 맑은 날과 완전 흐린 날의 경우를 다음 통계 모형으로 각각 나타내었다.

Total Solar Irradiance(TSO)

Clear sky conditions($0 \leq n < 3$) (9a)

$$TSO_0(\theta)_{\max} = -519.28 + 90.95\theta - 1.82\theta^2 + 0.015\theta^3$$

$$R^2 = 0.97 \quad (a) \quad \text{reference}$$

Overcast sky conditions($7 \leq n \leq 8$) (9b)

$$TSO_{cs}(\theta)_{\max} = -4094.68 + 277.43\theta - 5.00\theta^2 + 0.03\theta^3$$

$$R^2 = 0.99 \quad (b) \quad \text{thin cloud}$$

$$TSO_{cs}(\theta)_{\text{mean}} = 1443.16 - 43.01\theta + 0.54\theta^2 - 2.74e - 3\theta^3$$

$$R^2 = 0.98 \quad (c) \quad \text{mean cloud}$$

$$TSO_{cs}(\theta)_{\min} = 490.73 - 8.95\theta - 0.03\theta^2 + 8.02e - 4\theta^3$$

$$R^2 = 0.98 \quad (d) \quad \text{thick cloud}$$

Total UV Irradiance(TUV)

Clear sky conditions($0 \leq n < 3$) (10a)

$$TUV_0(\theta)_{\max} = 153.63 - 4.36\theta + 0.06\theta^2 - 3.07e - 4\theta^3$$

$$R^2 = 0.97 \quad (a) \quad \text{reference}$$

Overcast sky conditions($7 \leq n \leq 8$) (10b)

$$TUV_{cs}(\theta)_{\max} = 395.83 - 16.30\theta + 0.25\theta^2 - 1.39e - 3\theta^3$$

$$R^2 = 0.98 \quad (b) \quad \text{thin cloud}$$

$$TUV_{cs}(\theta)_{\text{mean}} = 22.82 - 0.51\theta + 0.02\theta^2 - 8.50e - 5\theta^3$$

$$R^2 = 0.99 \quad (c) \quad \text{mean cloud}$$

$$TUV_{cs}(\theta)_{\min} = 10.63 + 0.55\theta - 0.02\theta^2 + 163e - 4\theta^3$$

$$R^2 = 0.99 \quad (d) \quad \text{thick cloud}$$

이들 회귀식의 결정 상관 계수($R^2 > 0.97$)는 EUV 회귀식과 마찬가지로 매우 높았다. 평균 구름층의 TSO와 TUV 투과율을 SZA와 운량의 함수로 구한 결과를 Fig. 10과 11에 각각 나타내었다. TSO 투과율은 Fig. 10(a)에서 보는 바와 같이 각 운량 모두 SZA의 증가에 따라 서서히 감소하였다. SZA 45°와 75°에서 운량 $3 \leq n < 4$ 의 투과율은 88%와 65%로 각각 나타났고 완전 흐린 경우에는 각각 42%와 35%로 낮았다. SZA 50°~60°에서는 운량 $4 \leq n < 5$ 의 투과율이 운량 $3 \leq n < 4$ 의 투과율보다 2~3 % 더 크게 나타났다. 이것은 운량 $3 \leq n < 4$ 의 투과율이 SZA 50°~60° 부근에서 비교적 낮게 나타나고 운량 $4 \leq n < 5$ 의 투과율이 이들 SZA에서 비교적 높게 나타났기 때문이라고 생각된다. 후자의 경우는 운량 $5 \leq n < 6$ 의 경우에도 같은 결과가 나타났다. 운량이 증가함에 따라 TSO 투과율은 Fig. 10(b)에서 보는 바와 같이 대체로 감소하였다.

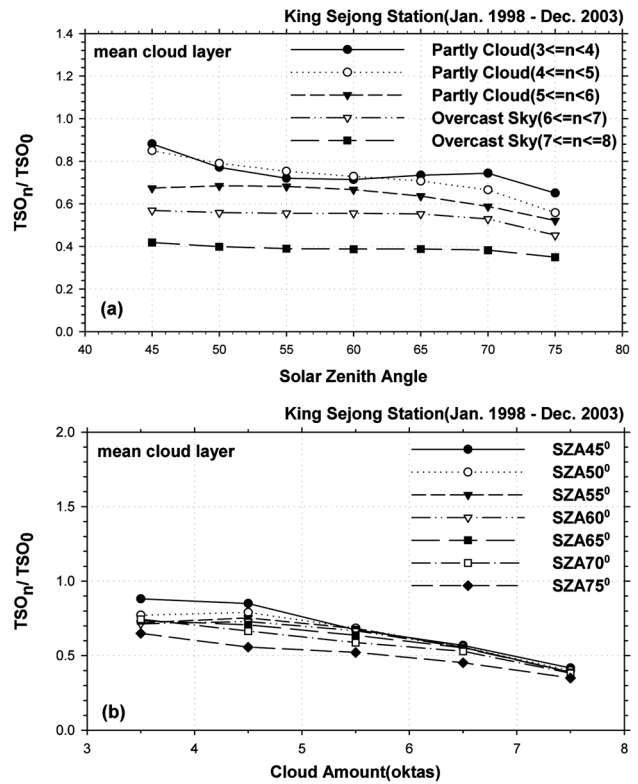


Fig. 10. Same as Fig. 7 except for total solar irradiance.

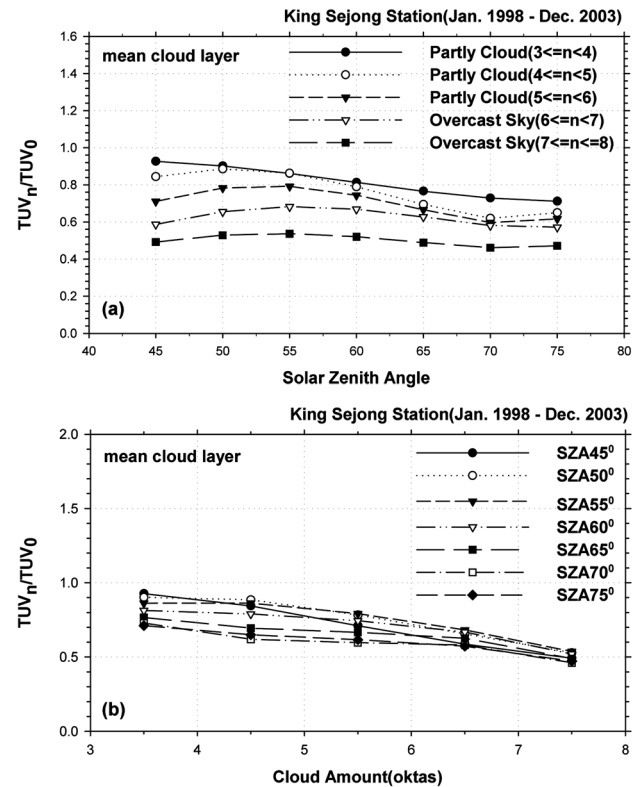


Fig. 11. Same as Fig. 7 except for total UV irradiance.

SAZ 60°의 경우 운량 $3 \leq n < 4$ 의 71%와 운량 $4 \leq n < 5$ 의 73%로부터 완전 흐림($7 \leq n \leq 8$)의 39%까지 감소하였다. TUV 투과율을 SAZ에 따라 Fig. 11(a)에 나타내었다. 이 그림에서 보는 바와 같이 SAZ의 증가에 따라 이 투과율은 전체적으로 서서히 감소하였다. 운량 $3 \leq n < 4$ 의 경우는 SAZ 45°의 93%로부터 75°의 71%까지 감소하였다.

특히 운량 $4 \leq n < 5$, $5 \leq n < 6$ 과 $6 \leq n < 7$ 의 경우에는 SAZ 50°~60°에서 TSO의 경우와 비슷하게 투과율이 비교적 높다. Fig. 11(b)에서 이 TUV 투과율은 운량이 증가함에 따라 모든 SAZ에서 대체로 감소하고 있다. 특히 SAZ 45°의 경우는 운량 $3 \leq n < 4$ 의 93%부터 완전 흐림($7 \leq n < 8$)의 49%까지 감소하여 운량 증가에 따르는 TUV 투과율의 감

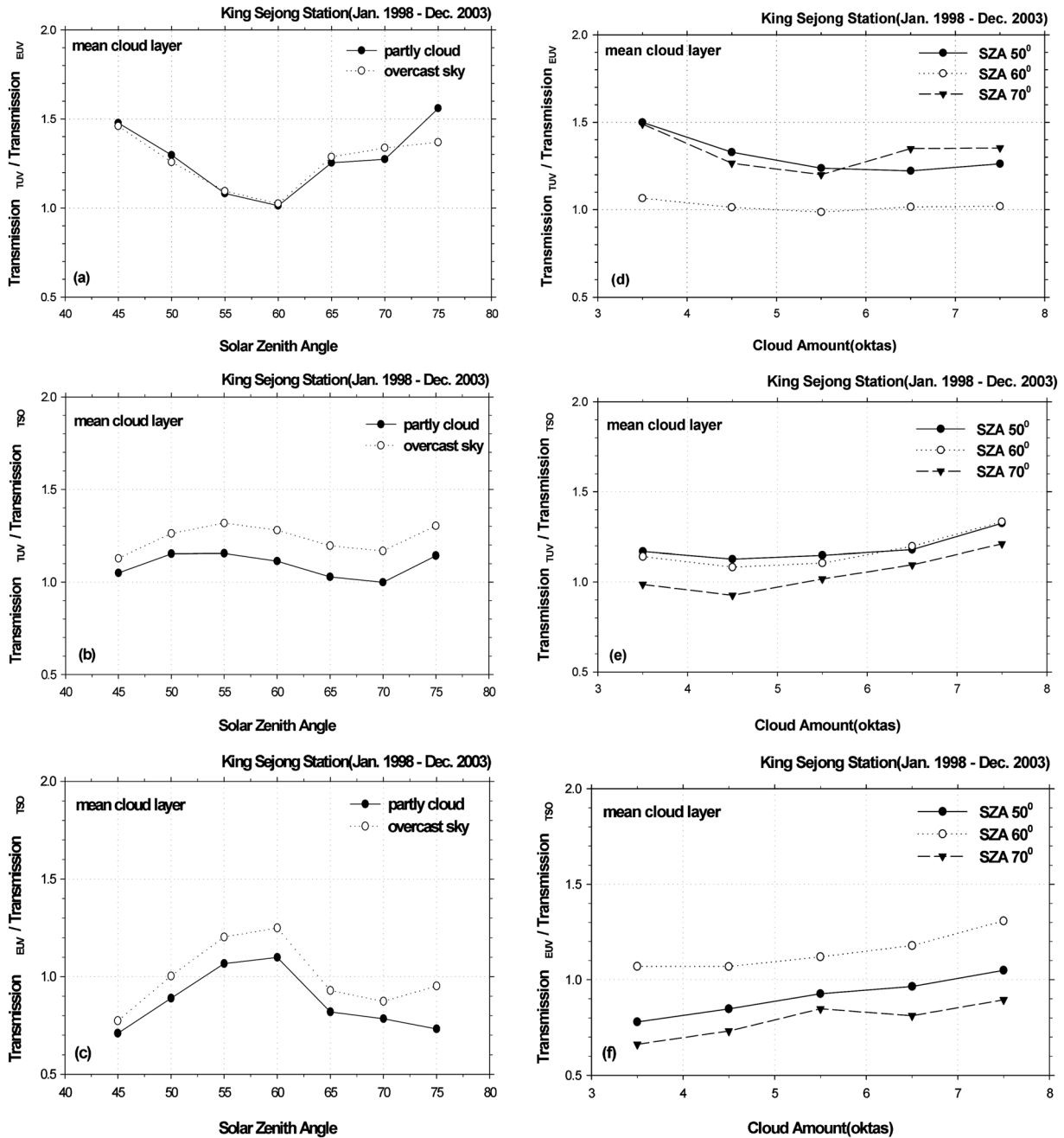


Fig. 12. Ratios between the EUV, TSO and TUV transmission; (a)(d) $\frac{TUV/TUV_0}{EUV/EUV_0}$, (b)(e) $\frac{TUV/TUV_0}{TSO/TSO_0}$ and (c)(f) $\frac{EUV/EUV_0}{TSO/TSO_0}$ as a function of SAZ and cloud amount.

소율이 제일 높음을 알 수 있다. Fig. 12는 구름에 의한 EUV, TUV와 TSO 투과율을 SZA의 함수와 SZA 50°, 60°와 70°일 때 운량의 함수로 비교한 결과이다. Fig. 12(a)에서 TUV 투과율은 SZA 60° 부근에서는 EUV 투과율과 거의 같으나 SZAs 45°와 75° 부근에서는 약 1.5배로 높게 나타났다. TUV 투과율과 TSO 투과율을 Fig. 12(b)에 비교하였다. 이 그림에서 TUV 투과율은 TSO 투과율보다 부분 흐림에서 약 1.1~1.2배로 높게 나타났고 완전 흐림의 경우에는 SZA에 따라 부분 흐림의 변화분포와 비슷하나 1.2~1.4배로 더 높았다. Fig. 12(c)에서 EUV 투과율과 TSO 투과율을 비교하였다 이 그림에서 보는 바와 같이 부분 흐림과 완전 흐림의 투과율 분포는 서로 거의 비슷하고 SZA 55°와 60° 부근에서 최대가 나타나 EUV 투과율은 TUV 투과율보다 부분 흐림과 완전 흐림에 대하여 약 1.0과 1.2배로 나타났으나 그 밖의 SZA에서는 오히려 EUV 투과율이 TUV의 경우보다 약 0.8배로 낮게 나타났다. Fig. 12(d)에서 알 수 있는 바와 같이 TUV 투과율과 EUV 투과율과의 비는 SZAs 50°, 60°와 70°에서 운량에 따라 거의 일정하다. TUV 투과율은 EUV 투과율과 비교하였을 때 SZA 60°에서 거의 같으나 SZAs 50°와 70°에서는 운량에 따라 1.3~1.5배로 많음을 알 수 있다. 이 TUV 투과율을 TSO 투과율과 비교하였을 때(Fig. 12(e)) 이 들 비가 운량이 증가함에 따라 세 SZAs에서 모두 서서히 증가하였다. TUV 투과율은 TSO 투과율보다 SZA 50°와 60°에서 1.2~1.3배 그리고 SZA 70°에서는 1.0~1.2배로 큰 편이다. EUV 투과율은 TSO 투과율과 비교하였을 때(Fig. 12(f)) 이들 비가 운량이 증가함에 따라 모두 서서히 증가하였다. EUV 투과율은 TSO 투과율보다 SZA 60°에서 1.1~1.3배로 컸으나 오히려 SZAs 50°에서 0.8~1.1배 그리고 70°에서 0.7~0.9배로 작았다.

이와 같이 태양 복사량의 구름 투과율은 전체적으로 TUV, TSO 그리고 EUV의 크기 순서로 나타났다. Bernhard *et al.*(1997)과 Josefsson and Landelius(2000)는 스웨덴에서 EUV 투과율은 TSO의 경우보다 작음을 밝힌바 있으나 이 연구에서는 구름의 EUV 투과율은 SZAs 55°와 60°에서만 TSO의 투과율보다 크게 나타났다.

적설 효과

태양 복사는 지면, 대기, 구름에 다중 반사된다. 이로 인해 지면에 달하는 태양 복사량을 증가시킨다. 자외선의 경우, 눈이 덮인 지표면의 알베도는 지표면에 눈이 없는 경우의 1~5%보다 매우 큰 60~95%의 값을 갖는다(Blumthaler and Ambach 1988; Ambach and Eisner 1986; McKenzie *et al.* 1996; Feister and Grewe 1995). 일반적으로 관측 주변 지역의 10 km 반경에서는 지표 알베도 효과가 자외선 복사량에 영향을 크게 준다(Madron-

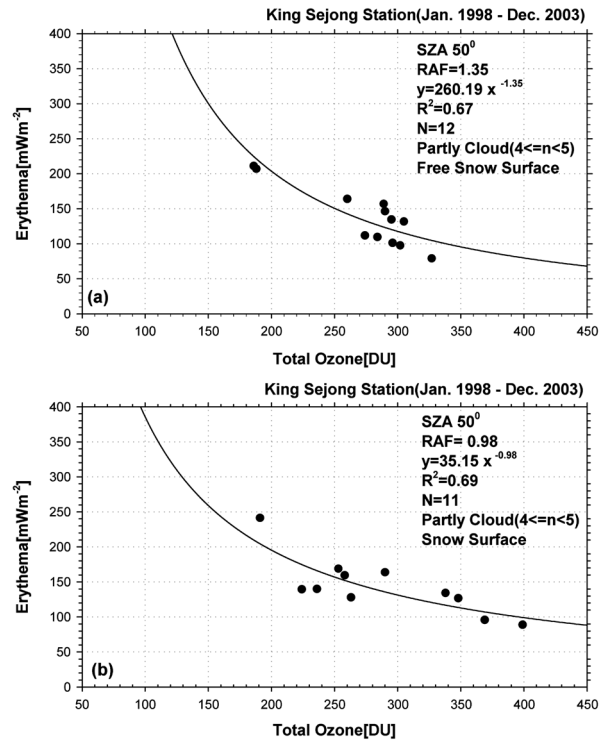


Fig. 13. Power law regression between erythemal UV-B irradiance at SZA 50° and Brewer total ozone for (a) snow free surface and (b) snow surface under partly cloud ($4 \leq n < 5$).

ich 1993a,b; Degunther *et al.* 1998).

구름과 지표면 사이에 태양 복사의 상호작용은 지표 태양 복사량에 매우 큰 변화를 가져올 수 있다(Blumthaler *et al.* 1994; Ambach *et al.* 1995; Schafer *et al.* 1996; Koepke *et al.* 1997; Madronich 1993a). 눈이 덮인 지표면에서의 지표 자외선 복사량은 맑은 날씨의 경우보다는 상대적으로 구름이 많은 경우에 지표면과 구름 밑(cloud bottom) 부분 사이의 다중 반사(multiple reflections)로 크게 증가된다(Renaud *et al.* 2000).

먼저, EUV의 지표면 알베도의 영향을 분석하기 위해서 EUV를 기준 오존 전량 300 DU에 보정하였다. 그리고 RAF를 적설이 없는(Snow Free Surface, 눈 깊이 = 0 cm) 상태와 적설이 있는(Snow Cover, 눈 깊이 > 3 cm) 상태의 두 가지 경우로 나누어서 각각 계산하였다. SZA 50°, 운량이 $4 \leq n < 5$ 인 경우 적설 없는 상태와 적설 있는 상태의 RAF를 Fig. 13(a)와 (b)에 각각 나타내었다. 이 그림에서 보는 바와 같이 SZA 50°와 운량이 $4 \leq n < 5$ 인 경우에 RAF가 적설 없는 상태에서는 1.35이고 적설 있는 상태에서는 0.98로 나타났다. 그리고, 그림으로 나타내지 않았지만, 이 RAF가 SZA 70°와 운량이 $5 \leq n < 6$ 인 경우에는 적설 없는 상태에서 1.54이고 적설 있는 상태에서 1.09로 적

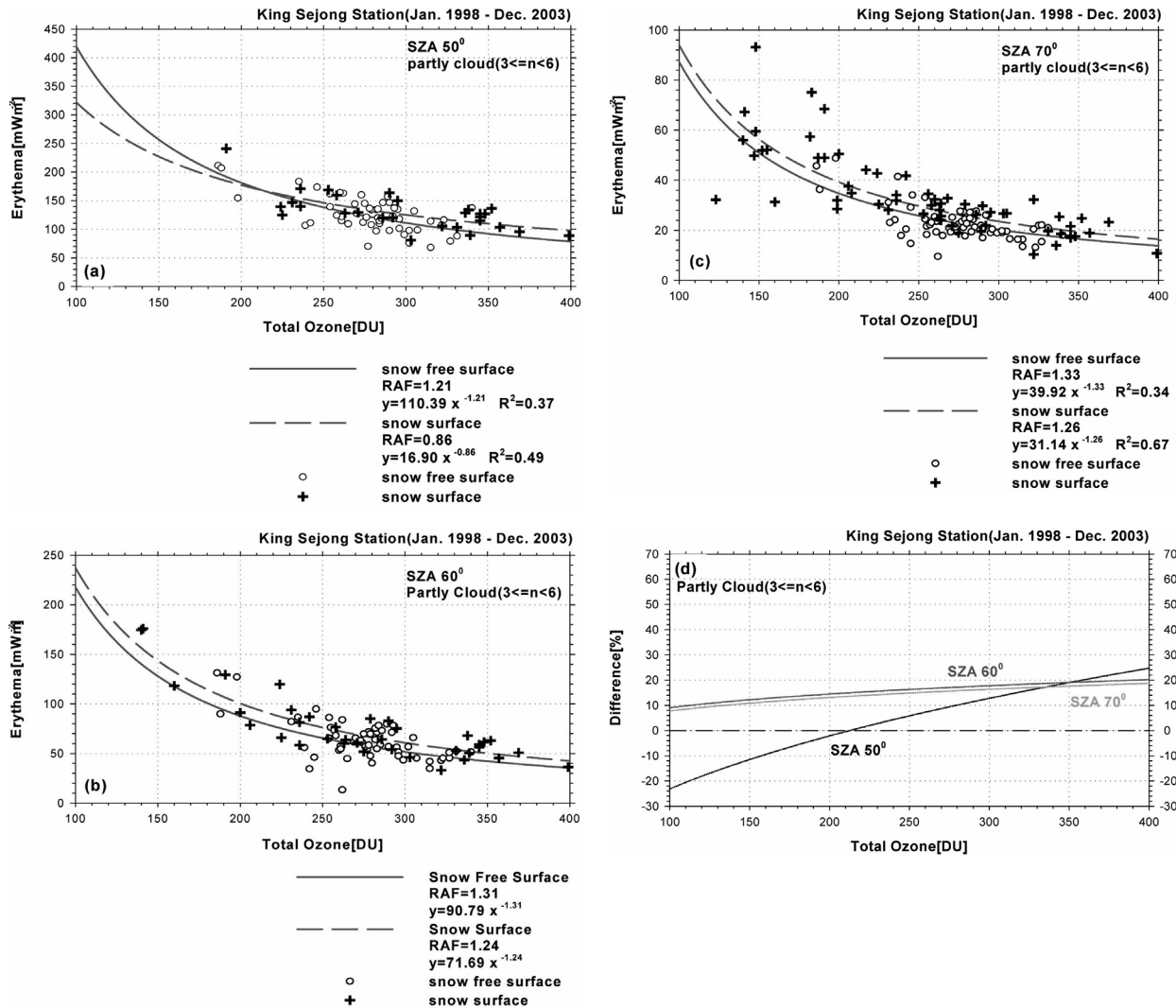


Fig. 14. Power law regression between EUV irradiance and total ozone for snow free surface and snow surface under partly cloud ($3 \leq n < 6$) and SZAs (a) 50°, (b) 60° and (c) 70°, and (d) relative difference of EUV irradiance between snow free surface and snow surface.

설 없는 경우가 적설 있는 경우보다 크게 나타났다. 이 결과는 EUV가 무적설 상태가 적설 상태보다 오존에 대한 의존도가 높음을 의미한다. 이것은 지표에 눈이 있는 경우에 지표에 눈에 의해서 반사되어 구름에 의해서 다시 들어오는 증가된 지표 흥반 자외선 복사량 때문에 오존 의존도가 낮아지기 때문이라고 생각한다.

Fig. 14(a), (b)와 (c)는 부분 흐린 날($3 \leq n < 6$)에서 SZAs 50°, 60°와 70°일 때 적설이 없는 경우와 적설이 있는 경우에 EUV를 오존 전량의 함수로 표시한 경우이다. 이들 그림에서 EUV는 적설이 있는 경우가 없는 경우보다 뚜렷하게 많음을 알 수 있다. 따라서 적설효과를 두 경우의 상대 차(%)를 구하고 Fig. 14(d)에 나타내었다. 이 그림에서 SZA 60°, 70°의 경우에 EUV는 오존 전량이 100 DU에서 400 DU로 증가함에 따라 약 10%에서 약 20%까

지 크게 나타나고 있다. SZA 50°에서는 오존 전량 200 DU를 기준으로 이보다 적은 경우는 음의 값으로 적설이 있는 경우가 오히려 작고 이보다 많은 경우는 적설 상태에서 EUV가 없는 상태보다 많았다. 즉 -22%에서 +25%까지 크게 증가하고 있음을 알 수 있다. 전체적으로 모든 천정각에 대해서 오존 전량이 증가함에 따라 적설이 있는 경우의 EUV가 더 높게 나타나는 경향을 보이고 있다. 이것은 낮은 오존 전량에서 오존 감퇴에 따른 지표 EUV의 증가 때문이라고 생각한다.

EUV의 적설 효과는 자료 부족으로 두 운량($4 \leq n < 5$, $6 \leq n < 7$)의 경우에 대해서만 SZA에 따르는 변화를 확인할 수 있었다. Fig. 15는 이 두 경우의 적설 효과를 나타낸 것이다. 이 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 EUV는 적설이 있는 상태가 없는 상태보다 더 많게 나타났으며

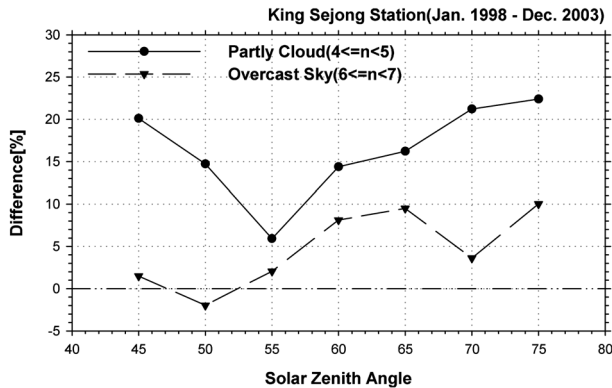


Fig. 15. Difference (%) of EUV between snow free surface and snow surface under two partly cloudy conditions ($4 \leq n < 5$ and $6 \leq n < 7$).

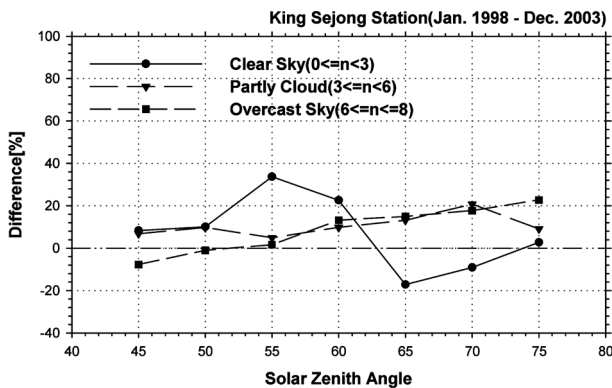


Fig. 16. Difference (%) of total solar irradiance between snow free surface and snow surface under three sky conditions.

그 효과는 부분 흐린 날($4 \leq n < 5$)에서 거의 완전 흐린 날($6 \leq n < 7$)보다 큼을 알 수 있다. 부분 흐린 날의 경우는 SZA가 증가함에 따라 SZA 45°의 20%에서 감소하여 최저 SZA 55°의 6%이고 이로부터 증가하여 SZA 75°에서 최대 22%까지 증가하였다. 거의 흐린 날의 경우도 SZA의 증가에 따라 대체로 증가하였으며 -2.0%에서 10%까지 변화였다.

Fig. 16에 TSO의 적설 효과를 크게 세 날씨 상태(clear, partly cloud, overcast)로 나누어 SZA에 따라 나타내었다. 이 그림에서 보는 바와 같이 맑은 날에는 SZA 45°의 8%에서 증가하여 SZA 55°의 34%까지 달하고 그 후 감소하여 SZA 65°의 -17%로 최저에서 다시 SZA 75°의 1%까지 증가하였다. 부분 흐린 날($3 \leq n < 6$)에는 SZA 45°의 8%에서 서서히 증가하여 SZA 70°의 16%까지 증가한 후 SZA 75°의 8%까지 감소하였다. 그리고 완전 흐린 날($7 \leq n \leq 8$)에는 SZA 45°의 -8%에서 증가하여 SZA 75°의 20%까지 달하였다.

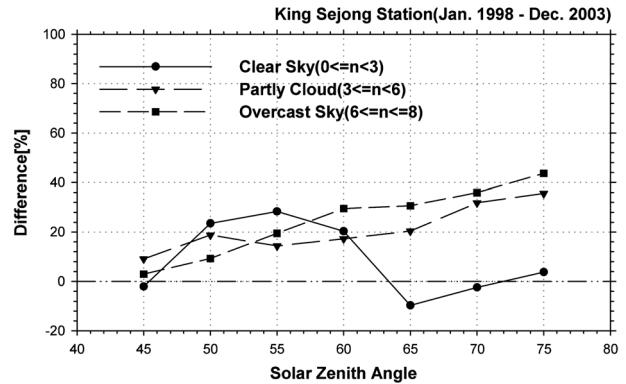


Fig. 17. Same as Fig. 16 except for total UV irradiance.

TUV의 적설 효과를 Fig. 17에 표시하였다. 이 그림에 의하면 맑은 날의 경우는 SZA에 따른 TSO의 분포와 비슷하였다. SZA 55°의 32%가 최대이고 SZA 65°의 -10%가 최저로 나타났다. 그리고 부분 흐린 날과 완전 흐린 날의 경우에는 SZA의 증가에 따라 모두 서서히 증가하였다. 완전 흐린 날에는 SZA 45°의 8%에서 36%까지 달하였다.

맑은 날에 TSO와 TUV의 적설 효과는 SZA 55°에서 최대로 나타나고 SZA 65°에서 최저 역효과로 나타났다. 흐린 날의 경우는 SZA가 증가함에 따라 증가하였다. EUV의 적설 효과는 SZA 50°와 55° 부근에서 최저로 나타나고 이 외 SZA에는 대체로 증가하였다. 이와 같이 일사량의 적설 효과는 투과율과 마찬가지로 TUV가 제일 크고 다음이 TSO, EUV의 순서로 나타났다.

4. 요약 및 결론

남극 세종기지에서 6년간(1998-2003) 관측한 일별 홍반 자외선 복사량(EUV, 280~320 nm), 전 자외선 복사량(TUV, 295~385 nm) 및 전천 일사량(TSO, 285~3000 nm) 그리고 오존 전량, 운량 및 적설량을 사용하여 세 성분의 태양 복사량 변화에 오존 전량, 운량 및 적설의 영향을 태양 천정각(SZA 45°~75°)과 운량에 따라 분석하였다. 태양 복사의 세 성분 중에 전 자외선 복사와 전천 일사는 오존 전량에 영향을 거의 받지 않았다. 그러므로 오존 효과를 EUV에 한하여 오존 전량 1%의 변화율에 EUV의 변화율을 나타내는 복사배율인자(RAF)로 평가하였다.

EUV RAF는 운량이 증가함에 따라 대체로 1.51에서 1.01로 감소하는 경향을 보였고, 태양 천정각(SZA)이 증가함에 따라서는 맑은 날에 1.51에서 0.94로 감소하는 한편, 흐린 날에는 반대로 0.94에서 1.45로 증가하였다.

구름의 EUV 투과율은 태양 천정각 55°~60° 부근에서 그리고 운량 $4 \leq n < 6$ 부근에서 75%~82%로 가장 높게 나타났다. 이 EUV 투과율은 태양 천정각과 운량이 증가함

에 따라 84%부터 34%까지 감소한다. TSO 투과율은 태양 천정각과 운량이 증가함에 따라 최대 88%에서 최저 35%까지 감소하였다. 특히 이 투과율은 SZA 50°~60°의 운량 $4 \leq n < 5$ 에서 비교적 높은 편이다. TUV 투과율은 TSO와 같이 태양 천정각과 운량이 증가함에 따라 최대 93%에서 최저 46%로 감소하였다. 이들 세 성분의 태양 복사 투과율을 서로 비교하였을 때 TUV와 EUV 투과율은 SZA 60° 부근에서는 거의 같으나 SZAs 45°와 75°에서는 TUV가 EUV보다 1.5배로 많았다. 따라서 TUV 투과율은 TSO 보다 1.1~1.3배 많았으나 그 밖의 SZAs에서는 오히려 0.7~0.9배로 적었다. 이와 같이 구름에 의한 태양 복사량의 투과율은 대체로 TUV, TSO, 그리고 EUV의 크기 순서로 나타났다.

EUV의 적설 효과는 무적설 상태에 대해 적설 상태에서 태양 복사량의 증가율로 나타내었다. 운량이 $4 \leq n < 5$ 인 경우에는 태양 천정각이 증가함에 따라 적설 상태가 무적설 상태보다 대체로 1.5%에서 24%가 더 많았고, 운량이 $6 \leq n < 7$ 인 경우에는 태양 천정각 60°에서 65°부근에서 최대 20%~26%까지 더 많았다. 이 증가 효과는 부분 흐린 날($3 \leq n < 6$)의 태양 천정각 60°에서 오존 전량이 100 DU에서 400 DU로 증가함에 따라 9%에서 20%까지 달하였다. TSO의 적설 효과는 맑은 날에는 태양 천정각 45°의 8%에서 증가하여 태양 천정각 55°에서 최대 34%까지 달하였다. 부분 흐린 날에는 태양 천정각 45°의 8%에서 서서히 증가하여 태양 천정각 70°에서 최대 16%까지 증가하였다. 그리고 완전 흐린 날($7 \leq n \leq 8$)에는 태양 천정각에 따라 증가하여 태양 천정각 75°의 20%까지 달하였다. TUV의 적설 효과는 맑은 날에 태양 천정각에 따르는 변화 분포가 TSO와 비슷하였다. 태양 천정각 55°에서 32%가 최대로 나타났다. 그리고 부분 흐린 날과 완전 흐린 날의 경우에는 태양 천정각의 증가에 따라 모두 서서히 증가하였다. 특히 완전 흐린 날에서는 적설 효과가 8%에서 36%까지 변화였다.

사 사

이 연구는 한국해양연구원 부설 극지연구소의 ‘지구대기 연직구조별 대기환경 특성 및 빙하연구(PP04105)’ 사업, ‘북극 환경특성 연구(PP04108)’ 사업과 ‘북극 대기환경 및 광물자원 연구(PN51200)’ 사업의 지원을 받아 수행하였다. 이 논문의 향상을 위해 조언해주시고 심사하여 주신 심사위원들께 감사드린다.

참고문헌

이윤곤. 2004. 남극 세종기지에서 오존 전량, 구름, 지표알베

- 도 변화에 따른 지표 자외선 복사 변화. 연세대학교 석사 학위 논문, 142 p.
- 조희구, 권효정, 최치영. 1998. 오존층 감소에 따르는 지표 흥반 자외선 복사의 증가. *한국기상학회지*, 34, 272-281.
- Ambach, W. and H. Eisner. 1986. Albedo verschiedener Schneeoberflächen für erythemwirksame solare Strahlung. *Wetter und Leben*, 38, 1-4.
- Ambach, W., M. Blumthaler, and A. Cede. 1995. Attenuation of solar UVB- and total irradiance by cloudiness. *Meteorol. Zeitschrift*, 4, 213-217.
- Bernhard, G., B. Mayer, and G. Seckmeyer. 1997. Measurements of spectral solar UV irradiance in tropical Australia. *J. Geophys. Res.*, 102, 8719-8730.
- Blumthaler, M. and W. Ambach. 1988. Solar UVB-albedo of various surfaces. *Photochem. Photobiol.*, 48, 85-88.
- Blumthaler, M., W. Ambach, and M. Salzgeber. 1994. Effects of cloudiness on global and diffuse UV irradiance in a high mountain area. *Theor. Appl. Climatol.*, 50, 23-30.
- Booth, C.R. and S. Madronich. 1994. Radiation amplification factors - improved formulation accounts for large increases in ultraviolet radiation associated with Antarctic ozone depletion. p. 39-42. In: *Ultraviolet radiation in Antarctica: Measurements and biological effects*. eds. by C.S. Weiler and P.A. Penhale, AGU Antarctic Research Series, Vol. 62.
- Cho, H.-K., M.J. Jeong, J. Kim, and Y.J. Kim. 2003. Dependence of diffuse photosynthetically active solar irradiance on total optical depth. *J. Geophys. Res.*, 108(D9), 4267.
- Degunther, M., R. Meerkotter, A. Albold, and G. Seckmeyer. 1998. Case study on the influence of inhomogeneous surface albedo on UV irradiance. *Geophys. Res. Lett.*, 25, 3587-3590.
- Feister, U. and R. Grewe. 1995. Spectral albedo measurements in the UV and visible region over different types of surfaces. *Photochem. Photobiol.*, 62, 736-744.
- IOC. 2000. Proceedings of the Quadrennial Ozone Symposium, IAMAS, Hokkaido Univ., Sapporo, Japan, 3-8 July, 2000.
- Josefsson, W. and T. Landelius. 2000. Effects of clouds on UV irradiance: As estimated from cloud amount, cloud type, precipitation, global radiation and sunshine duration. *J. Geophys. Res.*, 105(D4), 4927-4935.
- Koepke, P., A. Ruggaber, H. Schwander, E. Tamm, and E. Thomalia. 1997. Aspekte der Bewertung biologisch wirksamer UV-Strahlung, 3. Fachtagung BIOMET am 4. und 5. Dezember 1996 in München, Ann. Meteorol. 33.
- Madronich, S. 1993a. The atmosphere and UV-B radiation at ground level. p. 1-39. In: *Environmental UV photobiology*. eds. by Björn L.O. and Young. Plenum Press, New

- York.
- Madronich, S. 1993b. UV radiation in the natural and perturbed atmosphere. p. 17-69. In: *Environmental effects of UV (ultraviolet) radiation*. ed. by M. Tevini. Lewis Publisher, Boca Raton.
- McKenzie, R.L., M. Kotkamp, and W. Ireland. 1996. Upwelling UV spectral irradiances and surface albedo measurements at Lauder, New Zealand. *Geophys. Res. Lett.*, 23, 1757-1760.
- Mims, F.M.III. and J.E. Frederick. 1994. Cumulus clouds and UV-B. *Nature*, 371, 291.
- Renaud, A., J. Staehelin, C. Frohlich, R. Philipona, and A. Heimo. 2000. Influence of snow and clouds on erythema UV radiation: Analysis of Swiss measurements and comparison with models. *J. Geophys. Res.*, 105(D4), 4961-4969.
- Schafer, J., V. Saxena, B. Wenny, W. Barnard, and J. De Luisi. 1996. Observed influence of clouds on ultraviolet-B radiation. *Geophys. Res. Lett.*, 23, 2625-2628.
- Schwander, H., P. Koepke, A. Kaifel, and G. Seckmeyer. 2002. Modification of spectral UV irradiance by clouds. *J. Geophys. Res.*, 107(D16), 4296.
- Taalas, P., J. Kaurola, A. Kylling, D. Shindell, R. Sausen, M. Dameris, V. Grewe, J. Herman, J. Damski, and B. Steil. 2000. The impact of greenhouse gases and halogenated species on the future solar UV radiation doses. *Geophys. Res. Lett.*, 27, 1127-1130.
- Weiler, C.S. and P.A. Penhale (editors). 1994. Ultraviolet Radiation in Antarctica: Measurements and Biological Effects. American Geophysical Union Antarctic Research Series Vol. 62.

Received Aug. 2, 2004

Accepted Sep. 10, 2004