

남극 세종기지에서 최근 태양 복사, 기온과 운량의 변화

이방용¹ · 조희구² · 김준^{2,*} · 정연진² · 이윤곤²

¹한국해양연구원 부설 극지연구소

²연세대학교 지구환경연구소/대기과학과

(2006년 8월 11일 접수; 2006년 12월 19일 승인)

Recent Changes in Solar Irradiance, Air Temperature and Cloudiness at King Sejong Station, Antarctica

Bang Yong Lee¹, Hi Ku Cho², Jhoon Kim^{2,*}, Yeon Jin Jung² and Yun Gon Lee²

¹Korea Polar Research Institute, KORDI

²Global Environment Laboratory/Department of Atmospheric Sciences, Yonsei University, Seoul

(Manuscript received 11 August 2006; in final form 19 December 2006)

Abstract

The long-term trends of global solar irradiance, air temperature, specific humidity and cloudiness measured at King Sejong station, Antarctica, during the period of 1988-2004, have been investigated. A statistically insignificant decrease, $-0.21 \text{ Wm}^{-2}\text{yr}^{-1}$ (-0.26 \%yr^{-1} , $P < 0.5$) in global solar irradiance was found in an analysis from the time series of the monthly mean values, except for the increasing trends only in two months of January and June. The trends in irradiance are directly and inversely associated with the cloudiness trends in annual and monthly means. The trends in surface air temperature show a slight warming, $0.03^{\circ}\text{Cyr}^{-1}$ (1.88 \%yr^{-1} , $P < 0.5$) on the annual average, with cooling trend in the summer months and the warming in the winter. The exact relationship, if any, between the irradiance and temperature trends is not known. No significant tendency was found in specific humidity for the same periods. Recent (1996-2004) erythermal ultraviolet irradiance shows decreasing trend in annual mean, $-0.15 \text{ mWm}^{-2}\text{yr}^{-1}$ (-1.18 \%yr^{-1} , $P < 0.1$) which is about five times the trends of global solar irradiance. The ratio of erythermal ultraviolet to global solar irradiance shows remarkable seasonal variations with annual mean value of 0.01 % and a peak in October and November, showing the increase of ultraviolet irradiance resulting from the Antarctic ozone hole. The sensitivity of global solar irradiance to the change in cloudiness is roughly 13 \%oktas^{-1} which is about twice of the value at the South Pole due to the difference in the average surface reflectance between the two stations. Much more sensitive values of 59 \%oktas^{-1} was found for erythermal UV irradiance than for the global solar irradiance.

Key words: global solar irradiance, erythermal ultraviolet irradiance, cloudiness, Antarctica

1. 서 론

극지방은 지구 온난화와 오존 구멍 등 지구 규모의 기후 · 환경 변동의 요인을 나타낼 뿐만 아니라 최근

인간 활동에 의한 기후와 지구 환경 변화가 민감하게 나타나는 지역으로서 지구의 기후계에서 매우 중요한 역할을 하고 있다. 따라서 극지 대기와 지표 사이의 열 교환은 지구 기후 변화에 크게 관계되므로 현재 남극 대기가 지구 기후에서 열의 싱크 역할을 어떻게 하고 있는지는 중요한 과제로 되어있다 (Stuedinger, 2005).

1959년부터 1988년까지 남극 대륙에서는 기온의 증가로 온난화가 광범위하게 나타났다 (Jones and Briffa, 1992; King, 1994). 그러나 남극 극점 부근의 고지에서는 1967년부터 1986년까지는 오히려 기온의 감소가 나타났다 (Jones, 1988). Stanhill and Cohen (1997)

*Corresponding Author: Jhoon Kim, Global Environment Laboratory/Department of Atmospheric Sciences, Yonsei University, 134 Sinchon-dong, Seodaemoon-gu, Seoul 120-749, Rep. of Korea.
Phone : +82-2-2123-5682, Fax : +82-2-365-5163
E-mail: jkim2@yonsei.ac.kr

은 남극 대륙의 강한 온난화 경향이 복사 강제력에 의한다면 지표 에너지 평형에서 순 장단파 복사 속의 증가가 있어야 함을 언급하고 이 온난화를 복사 강제력 만으로는 설명하지 못하였다. 그리고 이들은 남극 대륙의 전천 일사량이 1957년과 1994년 사이에 연평균 $-0.28 \text{ Wm}^{-2}\text{yr}^{-1}$ 로 광범위하게 감소하였다고 발표하였다. 이 감소 원인이 확실히 밝혀지지는 않았으나 운량 뿐만 아니라 대기 혼탁도 변화에도 영향이 있을 것으로 보았다. 구름은 에너지 수지에서 일사 성분에 대해서 냉각과 적외선 복사 성분에 대해서는 가열 효과를 갖고 있다 (Ramanathan *et al.*, 1989). Dutton *et al.* (1991)은 남극 극점에서 1976년부터 1987년 사이의 남극 늦여름 (Jan-Mar)의 일사량은 일정한 비율로 감소하였고 이는 운량 증가와 연관된다고 하였다. 그러나 이들 연구는 대부분 고위도 ($>65^{\circ}\text{S}$)에서 부분적으로 이루어져왔다.

최근들어 장기간에 걸친 태양복사 관측자료에 의한 지구의 밝아짐 (brightening)과 어두워짐 (dimming)에 관한 연구가 활발해지고 있다 (예 : Pinker *et al.*, 2005; Wild *et al.*, 2005). Wild *et al.*(2005)은 장기간의 지상 복사 관측자료들로부터 1960년에서부터 1990년 기간 동안의 감소되던 추세가 그 이후에 연간 0.68 Wm^{-2} 의 증가 변화경향으로 바뀌었음을 밝히고, Pinker *et al.* (2005)는 1983년부터 2001년 기간동안 0.16 Wm^{-2} 의 증가 변화경향이 있음을 밝혀 많은 관심을 불러일으켰다. 이렇듯 복사관측 자료의 장기변화경향은 대기층의 가장 중요한 에너지원의 상태변화로서의 자체적인 의미와 더불어, 기후변화, 수문사이클, 대기권-생권의 상호작용 등에 있어서 매우 중요한 의미를 갖는다. 또한 Meywerk and Ramanathan (2002)의 연구 등에서도 같이 지구 다른 지역에서는 자연적, 그리고 인위적인 에어러솔에 의해 복사관측자료가 많은 영향을 받으나, 남극 세종기지는 연중 매우 낮은 에어러솔 광학깊이 값을 보이고 있어, 여기에서의 복사에너지 관측자료는 이러한 방해요소로부터 자유롭다. 복사량을 결정하는 주요요소는 태양위치의 기하학적인 요소 이외에도 구름과 수증기 등이 있으며, 이러한 결과는 결국 대기층 온도에 반영되게 된다.

남극 세종기지 ($62^{\circ}13'\text{S}$, $58^{\circ}47'\text{W}$)는 George King 섬에 위치하여 온난 해양성 한대기단 (maritime polar air mass)과 차고 건조한 남극기단 (Antarctic air mass) 사이에 남극 전선이 형성되는 고위도 저압대에 속한다. 그러므로 고위도 ($>65^{\circ}\text{S}$) 남극 대륙의 해안과 내륙

에서 기온과 일사량 등의 변화 특성은 세종기지의 저위도와 현저한 차이가 있을 것으로 예상된다. 이 연구의 목적은 남극 세종기지에서 1988년부터 2004년까지 17년 동안 관측한 월평균 전천 일사량, 운량, 기온 그리고 비습을 사용하여 이들의 장기 변화 경향을 밝히고 최근 9년간 (1996-2004)의 흥반 자외선 복사와 함께 이들 변화의 원인을 논하고자 한다.

2. 기후

남극 세종기지는 Figure 1에서 보는 바와 같이 서남극 남극 반도에 평행하게 발달한 남쉐틀랜드 군도 (South Shetland Island)의 킹조지섬과 벨슨 섬으로 둘러싸인 맥스웰만 (Maxwell Bay) 연안에 있다.

기후학적으로 세종기지는 고위도 저압대에 속하며 대체로 중위도 편서풍 지역으로부터 유입되는 비교적 온난한 해양성 한대 기단 (maritime polar air mass)과 남극 대륙의 눈이나 얼음으로 덮여 있는 지역으로부터 차고 건조한 남극 기단 (Antarctic air mass)이 만나 남극 전선 (Antarctic front)이 형성되는 곳이다. 그러므로 남극 전선은 차가운 남극 대륙과 주변 남극해의 온난한 해양의 남-북 온도차에 의하여 형성된다. 계절에 따라 남반구 여름에는 60°S 부근에 형성되고 겨울에는 30°S 까지 저위도 쪽으로 내려가서 형성되기도 한다 (Rumney, 1970).

남반구 고위도 지역의 평균 기압배치를 보면, 해면 기압은 저위도로부터 고위도로 갈수록 점차 낮아져 65°S 부근에서 극소가 되며, 이곳에서부터 남극 대륙 쪽으로는 고압부가 된다. 따라서 킹조지섬은 전반적으로 기압이 낮고 습도가 높으며, 강수량, 운량과 흐린 날이 많은 해양 기후의 특성을 나타내고 있으며, 빈번한 기압골의 통과로 기상 변화가 심하다.

17년간 (1988-2004)의 평균 기온은 여름 (12,1,2월)에 1.7°C , 겨울 (6,7,8월)에 -5.0°C 로 연평균 -1.6°C 이며 연교차는 7.6°C 로 나타난다. 운량 (n, oktas)은 세종기지가 남극 전선대에 속해 있으므로 Table 1d에서 보는 바와 같이 연평균 6.7 (서울 4.0)로 나타나 완전 흐린 날씨 ($7 \leq n \leq 8$)가 전 날씨의 60%를 차지하고 있다. 상대 습도는 연평균 88 %로 계절 변화가 거의 없다. 비습은 겨울에 2.2 g kg^{-1} , 여름에 4.0 g kg^{-1} 로 연평균 3.1 g kg^{-1} 이다. 연평균 강수량은 540.6 mm 로 봄에 107.3 mm 로 제일 적고 여름이 166.0 mm 로 제일 많다. 연평균 풍속은 8.0 ms^{-1} 로 비교적 강하며 계절 변화

가 거의 없고 풍향은 주로 여름에 북서풍계가, 겨울에 남동풍계가 우세하게 나타나지만 전반적으로 탁월풍은 북서풍계이다.

세종기지에서 태양 고도가 제일 높은 값은 동지 남중시간에 약 50° (서울 하지 77°, 동지 30°)이다. 따라서 가조시간은 동지 때 약 19시간, 하지 때 약 5시간(서울 하지 15시간, 동지 9시간)이 된다. 전천 일사량과 전자외선 복사량 (1996-2004)은 연평균 값은 81.8 Wm⁻²와 5.7 Wm⁻²로 각각 나타났다. 에어로솔의 광학깊이 (AOD)는 맑은 날씨에 5개 파장 (306.3, 310.1, 313.5, 316.8, 320.1 nm)에 대해서 평균 봄 0.20, 여름 0.19, 가을 0.10 으로 파장에 따라서는 큰 차이가 없다. 남극 겨울은 일조시간이 짧고, 맑은 날씨가 거의 없어 AOD 분석이 불가능하다. 적외선 복사량 (1996-2004)은 연평균 279.9 Wm⁻²로 여름은 295.5 Wm⁻², 겨울은 264.0 Wm⁻²이다.

3. 관측

세종기지는 세계기상기구 (WMO)의 등록 Index No. 89251로서 자동 기상관측 장비 (Automatic Meteorological Observation System)를 갖추고 1988년 2월 말부터 종관 기상 관측 업무를 시작하였다. 세종기지에서의 자동 기상 관측 장비는 높이 10m의 관측탑에 설치한 풍향 · 풍속계, 1 m 높이의 백엽상 내에 설치한 온 · 습도계와 노점 온도

계, 노장에 설치한 강수량계, 수평면 전천 일사량계, 자외선 일사량계, 적외선 복사량계 그리고 실내 기압계 등으로 되어있다. 이들 관측 자료는 기록계 (data logger)에 의해 10초마다 스캐닝 (scanning)되어 10분마다 컴퓨터에 저장된다. 이외에 구름의 형태나 양, 시정 (visibility), 육상과 바다의 상태, 바다 유빙의 유무와 분포상태, 블리저드 현상의 시작과 끝 그리고 지속시간, 그리고 계절현상 등 수시로 발생하는 기상현상에 대해서는 세계기상기구의 관측 규정에 따라 관측자가 목측으로 매시간 또는 수시로 관측하고 있다. 그밖에 다른 기상 요소도 동시에 관측하고 있다.

1988년부터 현재까지 전천 일사량은 Eppley Precision Pyranometer로 유효 파장범위 285-2800 nm 그리고 홍반 자외선 복사량 (280-320 nm)은 Robert-Berger형 UV-Biometer (Solar Light Model 501)로 5분-10분 간격으로 각각 매일 측정하고 있다. 이들 측정기는 거의 2년마다 각각 제작 회사로 보내어 정밀 재검증을 받고 있다. 검증기간 동안 결측을 막기 위하여 준비한 여분 측기를 설치하여 운영함으로써 자료의 충실을 기하고 있다. 그리고 1998년부터는 Brewer 분광 광도계 (SCI-TEC #122)를 설치하여 오존 전량과 파장별 자외선 복사량 (290-325 nm)을 0.5 nm 간격의 스펙트럼을 자동으로 측정하고 있다. 이 연구에서 전천 태양 복사량은 1988년부터 그리고 홍반 자외선 복사량은 1996년부터 2004년까지의 관측 자료를 각각 사용하였다.

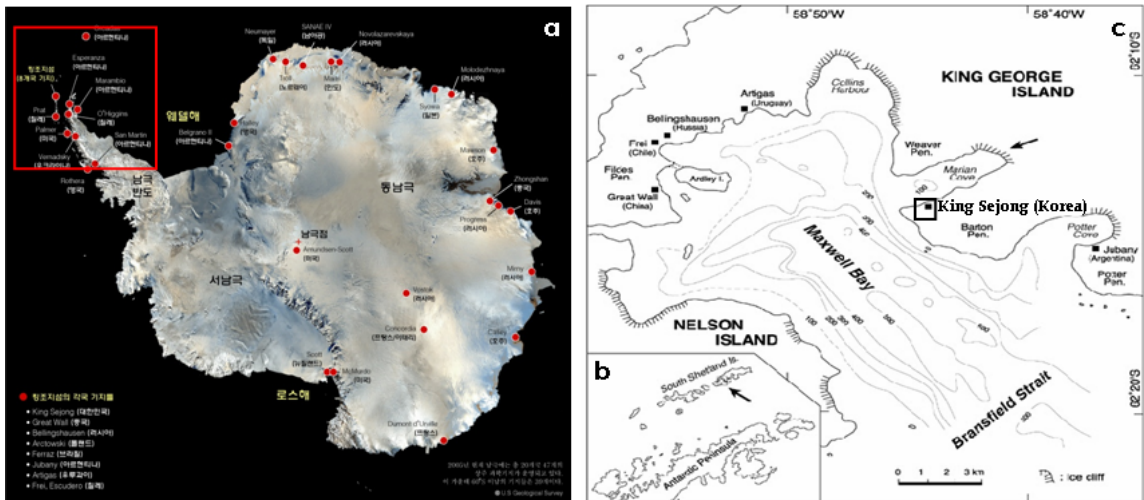


Fig. 1. The location of King Sejong Station (62°13'S, 58°47'W) in the King George Island (c), Antarctic Peninsula (b), Antarctica (a).

Table 1. Monthly linear trends and statistics of global solar irradiance, air temperature, specific humidity and cloudiness, 1988-2004 (SL is significance level).

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Year
(a) Global Solar Irradiance													
Slope ($\text{Wm}^{-2}\text{yr}^{-1}$)	1.22	-0.56	-0.42	-0.22	-0.02	0.05	-0.05	-0.44	-0.97	-0.32	-0.35	-0.30	-0.21
SL	0.15	0.18	0.12	0.09	0.43	0.35	0.35	0.03	0.03	0.25	0.28	0.31	0.12
Mean value (Wm^{-2})	164.4	117.2	73.8	32.7	13.5	8.2	11.4	29.3	69.1	119.4	160.0	186.8	81.8
(b) Air temperature													
Slope ($^{\circ}\text{C yr}^{-1}$)	-0.01	-0.01	0.004	0.16	0.12	0.05	0.02	0.12	-0.06	-0.01	0.002	-0.03	0.03
SL	0.31	0.42	0.46	0.02	0.16	0.37	0.45	0.14	0.26	0.46	0.48	0.22	0.20
Mean value ($^{\circ}\text{C}$)	2.2	2.0	0.7	-1.3	-2.9	-4.9	-5.4	-4.8	-3.7	-2.2	-0.3	0.9	-1.6
(c) Specific humidity													
Slope ($\text{gkg}^{-1}\text{yr}^{-1}$)	-0.002	-0.02	-0.02	0.03	0.02	0.002	-0.01	0.02	-0.02	-0.004	-0.008	-0.002	0.0003
SL	0.42	0.11	0.19	0.07	0.22	0.47	0.40	0.21	0.21	0.43	0.32	0.45	0.41
Mean value (gkg^{-1})	4.0	4.0	3.6	3.1	2.7	2.3	2.2	2.3	2.6	2.9	3.3	3.6	3.1
(d) Cloudiness													
Slope (oktas yr^{-1})	-0.01	0.04	0.02	0.02	0.03	-0.005	0.04	0.04	0.03	0.03	0.01	0.04	0.02
SL	0.25	0.03	0.25	0.19	0.15	0.42	0.04	0.02	0.19	0.14	0.20	0.32	0.00
Mean value (oktas)	6.9	6.8	6.7	6.8	6.5	6.5	6.7	6.6	6.6	6.6	6.8	6.8	6.7

4. 결과 및 토의

4.1 전천 일사량, 운량 및 비습

1988년부터 2004년까지 17년간 전천 일사량의 월 평균 값의 시계열을 Table 1a와 Figure 2a에서 나타내었다. 이 그림에서 선형 회귀 분석한 결과 연평균 변화 경향은 $-0.21 \pm 0.14 \text{ Wm}^{-2}\text{yr}^{-1}$ ($-0.26 \pm 0.17 \text{ \%yr}^{-1}$)의 감소율 (유의수준 $P > 0.1$)을 나타냈다. 남극 대륙의 12개 관측소에서 전천 일사량의 연평균 변화 경향은 1957년과 1994년 사이에 $-0.28 \text{ Wm}^{-2}\text{yr}^{-1}$ 로 기간은 다를지라도 세종기지의 감소율과 비슷하다 (Stanhill and Cohen, 1997). 월별로 평균 변화 경향을 분석한 결과 Table 1a와 Figure 3에서 보는 바와 같이 1월과 6월을 제외하고 모든 월에서 감소 경향을 나타내었다. 특히 8월과 9월에 $-0.44 \pm 0.22 \text{ Wm}^{-2}\text{yr}^{-1}$ ($-1.50 \pm 0.75 \text{ \%yr}^{-1}$), $-0.97 \pm 0.46 \text{ Wm}^{-2}\text{yr}^{-1}$ ($-1.40 \pm 0.67 \text{ \%yr}^{-1}$)로 각각 감소

하여 이들 경향은 통계적으로 유의하였다 ($P < 0.05$). 1월은 $1.22 \pm 1.11 \text{ Wm}^{-2}\text{yr}^{-1}$ ($0.74 \pm 0.68 \text{ \%yr}^{-1}$)로 뚜렷한 증가를 보였으며 6월은 $0.05 \pm 0.11 \text{ Wm}^{-2}\text{yr}^{-1}$ ($0.61 \pm 1.34 \text{ \%yr}^{-1}$)로 매우 약한 증가 경향을 보였다. 이들 두 증가 경향은 통계적으로 유의하지 않았다.

Table 1d와 Figure 2d에서 운량의 연평균 변화 경향은 $0.02 \pm 0.01 \text{ oktas yr}^{-1}$ ($0.32 \pm 0.15 \text{ \%yr}^{-1}$)로 매우 유의한 ($P \ll 0.001$) 증가를 나타내었다. 월별 운량은 2월, 7월과 8월에는 유의 수준 $P < 0.05$ 에서 모두 $0.04 \pm 0.02 \text{ oktas yr}^{-1}$ ($0.60 \pm 0.30 \text{ \%yr}^{-1}$)의 증가율을 보였다. 그러나 전천 일사량이 증가한 1월과 6월에서만 $-0.01 \pm 0.02 \text{ oktas yr}^{-1}$ ($-0.14 \pm 0.29 \text{ \%yr}^{-1}$)과 $-0.005 \pm 0.02 \text{ oktas yr}^{-1}$ ($-0.077 \pm 0.31 \text{ \%yr}^{-1}$)로 약한 감소율을 보였다. Figure 4는 전천 일사량과 운량의 장기 변화 경향을 세기간 (1988-1995, 1996-2004, 1988-2004)별로 서로 비교한 것이다. 이 그림에서 운량과 전천 일사량은 서로 역변화 경향을 기간과 관계없이 잘 나타내고 있다. 그러므

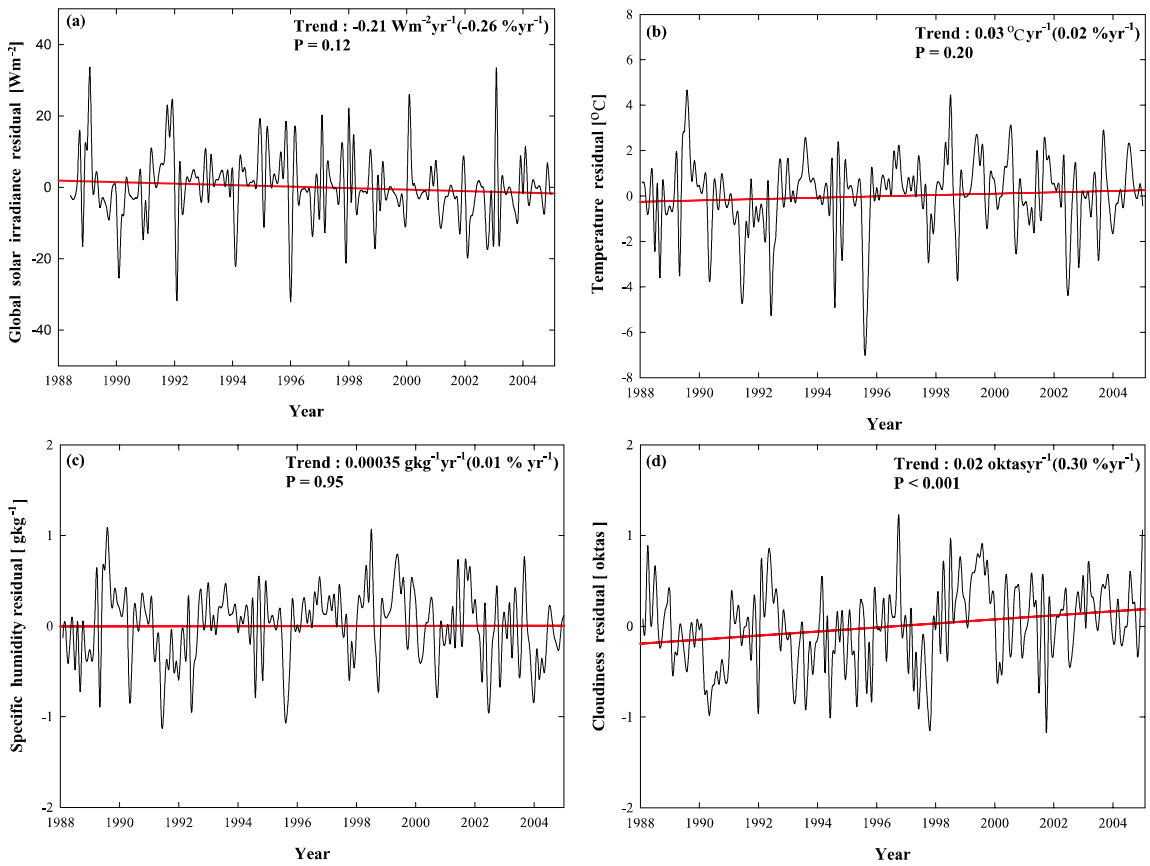


Fig. 2. Time series and linear trends of deseasonalized monthly mean (a) global solar irradiance, (b) air temperature, (c) specific humidity and (d) cloudiness, 1988-2004.

로 전천 일사량의 변화는 운량 변화에 직접 영향을 받고 있다. 그러나 세종기지에서 전천 일사량의 계절변화는 운량과 관계없이 주로 가조시간 또는 태양 고도에 의하여다. 왜냐하면 운량은 계절에 따라 거의 일정하기 때문이다 (Table 1). 구름은 태양 복사에 대하여 냉각 효과를 나타내며 하향 적외 복사에 대하여 가열 효과를 나타낸다. 전 지구적으로 태양 복사에 대한 구름 증가의 냉각 효과는 적외복사에 대한 구름 증가의 온난효과 보다 크다. 그러나 고위도의 지면 반사율이 높은 지방에서는 이와 반대가 된다 (Ramanathan *et al.*, 1989). 그런 까닭에 지표 태양 복사의 감소는 지면을 냉각시키는 반면에 운량 증가는 하향 적외 복사를 증가시킨다 (Dutton *et al.*, 1991).

일사량의 변화는 운량뿐만 아니라 대기 혼탁도에도 영향을 받는다. 세종기지에서는 1998년부터 Brewer 분광 광도에 의하여 파장별 자외선 복사 (UV)를 측정

하고 있다. 이 자료에 의하여 맑은 날씨에 한하여 4 채널의 일별 에어로솔 광학 깊이를 분석한 결과를 Figure 5에 나타내었다. 이 그림에서 보는 바와 같이 자료가 충분하지 않지만 장기 변화 경향은 뚜렷이 나타나지 않았다. 그러므로 세종기지에서는 전천 일사량의 감소는 주로 운량의 증가에 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 운량 변화에 따른 전천 일사량의 연평균 감응도는 13.0 %oktas⁻¹로 나타났다. Dutton (1991)은 남극에서 최대 7월의 감응도가 7.3 %tenth⁻¹ (9.1 %oktas⁻¹)로 나타나 지표면 알베도 때문에 유럽 북부 Estonia의 약 절반이 된다고 보고한 바 있다. 즉, 지표 알베도가 높으면 지면과 구름 사이에 일사의 다중 반사 때문에 이 감응도는 낮아진다. 남극 대륙 내부의 연평균 알베도는 85-90% (Broeke *et al.*, 2004)로 세종기지의 47% (김준 등, 2006)보다 약 두 배로 높다. 그러므로 세종기지는 남극 대륙 내부보다 구름에 대한 일사의 감응도가

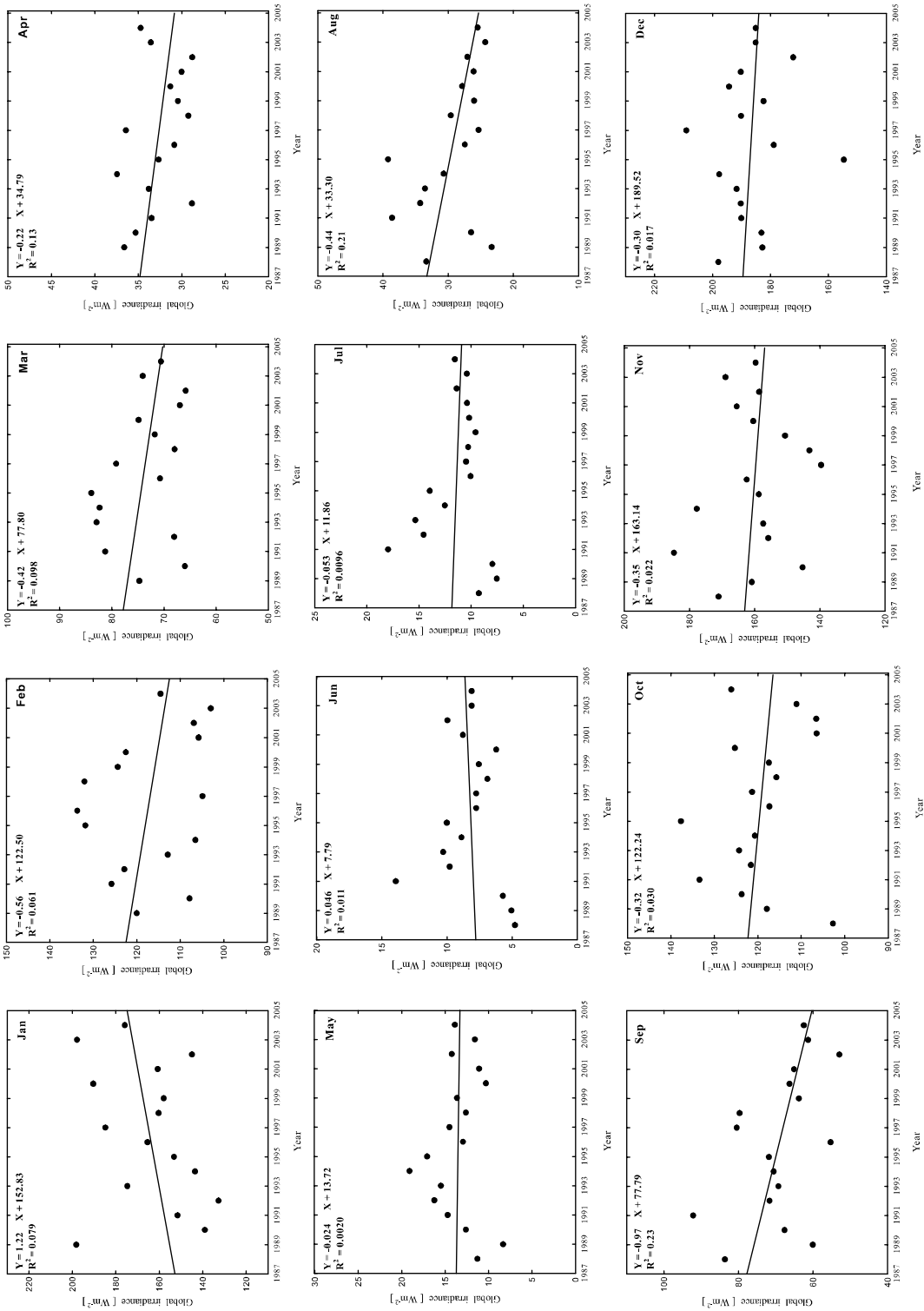


Fig. 3. Time series and linear trends of monthly mean global solar irradiance versus year (1988–2004). One time series is plotted for each month. Note that each month is scaled differently according to the range in the data. See table 1 for statistics.

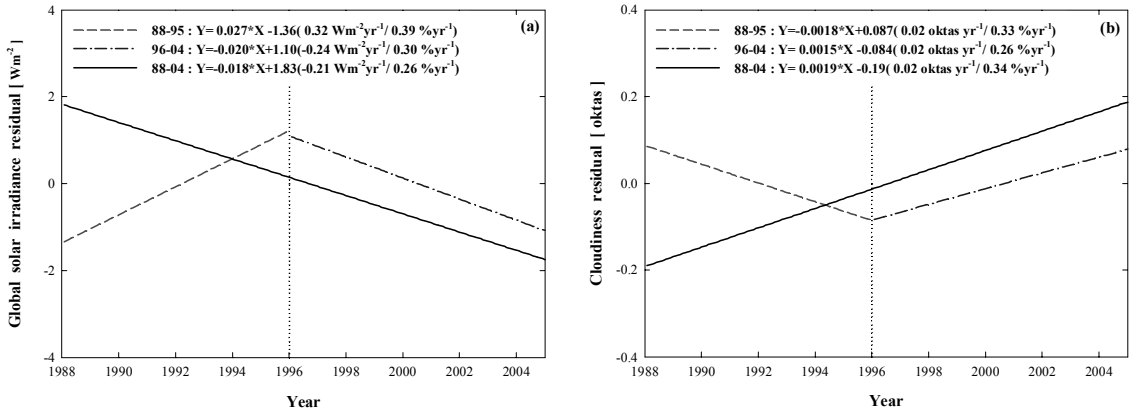


Fig. 4. Comparison of (a) global solar irradiance trend and (b) cloudiness trend for 3 different time periods(1988-1995, 1996-2004 and 1988-2004).

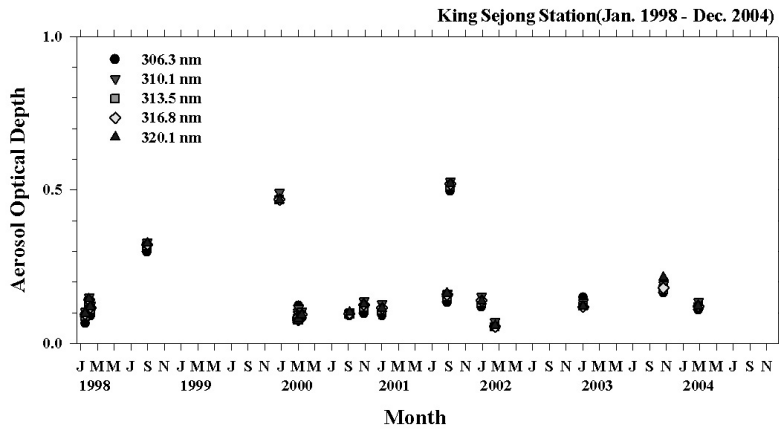


Fig. 5. Time series of daily aerosol optical depths for five UV channels.

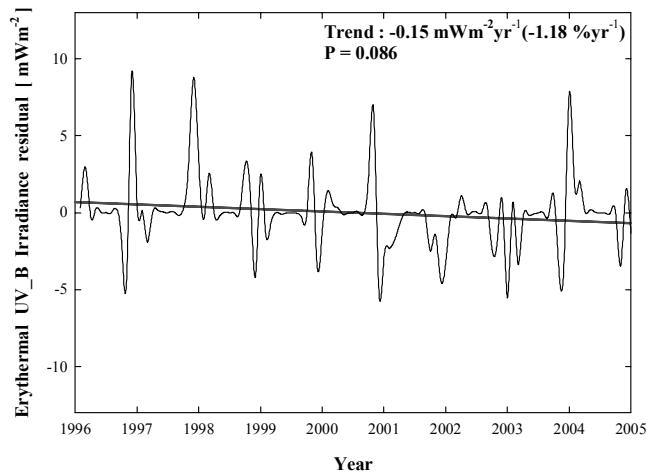


Fig. 6. Same as Figure 2 except for erythemal UV_B irradiance (1996-2004).

높게 나타났다.

비습의 연평균 경향은 Table 1c와 Figure 2c에서 보는 바와 같이 $0.0003 \pm 0.006 \text{ g kg}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ ($0.01 \pm 0.19 \text{ \%yr}^{-1}$)로 매우 미약한 증가를 보여 거의 변화가 없다. 월별 변화 경향은 Table 1c에서 보는 바와 같이 9월에서 3월까지와 7월은 약한 감소를 나타내었고 4월, 5월, 6월 그리고 8월은 약한 증가를 나타내었다. 비습의 변화 경향은 통계적으로 모두 유의하지 않았다.

최근 9년간 (1996-2004)의 전천 일사량과 운량은 과거 17년간의 연평균 변화 경향과 큰 차이가 없었다. 그러나 기온과 비습은 과거와 달리 최근 9년간에는 $-0.07 \pm 0.05 \text{ }^{\circ}\text{Cyr}^{-1}$ ($-5.00 \pm 3.57 \text{ \%yr}^{-1}$, $P < 0.1$)과 $-0.04 \pm 0.01 \text{ g kg}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ ($-1.42 \pm 0.42 \text{ \%yr}^{-1}$, $P < 0.01$)의 감소율로 각각 나타났다 (조희구 등, 2006).

4.2 홍반 자외선 복사량

최근 (1996-2004) 홍반 자외선 복사량 (EUV)의 연평균 변화 경향을 Figure 6에 표시하였다. 이 그림에서 EUV의 변화 경향은 $-0.15 \pm 0.09 \text{ mWm}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ ($-1.18 \pm 0.71 \text{ \%yr}^{-1}$, $P = 0.09$)로 급격히 감소하였다. 이 경향은 전천 일사량의 경우 ($-0.30 \pm 0.36 \text{ \%yr}^{-1}$) 보다 약 4배가 더 감소하였다. EUV의 감소경향은 이 기간의 운량 증가율 $0.02 \pm 0.02 \text{ oktas yr}^{-1}$ ($0.26 \pm 0.24 \text{ \%yr}^{-1}$)뿐만 아니라 최근 오존 전량의 증가 경향 0.22 \%yr^{-1} (김준, 2005)이 가세한 것으로 해석된다. 따라서 운량 변화에 대한 EUV의 연평균 감응도는 $59.0 \text{ \%oktas}^{-1}$ 로 매우

높게 나타나 전천 일사 ($13.0 \text{ \%oktas}^{-1}$) 보다 약 5배 더 예민함을 알 수 있다.

전천 일사량 (G)에 대한 EUV 복사량 (E)의 연평균 비는 약 0.01%로 나타났으며 월별 평균비 ($\frac{E}{G}$)는 Figure 7에 나타난 바와 같이 남극 오존 구멍이 발생하는 10월과 11월에 주로 최대 ($\approx 0.02 \text{ \%}$)가 되고 6월에 거의 0이 되어 계절 변화가 뚜렷하다. 이 변화는 E와 G의 변화율이 계절에 따라 서로 다를 수 있다. Table 1에서 알 수 있는 바와 같이 운량의 계절 변화는 뚜렷하지 않다. 구름에 의하여 전천 일사량은 비교적 많이 감소되고 EUV는 적게 감소될 뿐만 아니라 남극 봄에서 초여름까지 오존 구멍으로 인해 전천 일사량보다 더 강하게 증가한다. 그러므로 $\frac{E}{G}$ 비는 계절 변화를 현저하게 나타낸다.

4.3 기온

기온의 연평균 변화 경향은 Table 1b와 Figure 2b에서 알 수 있는 바와 같이 유의 수준 $P > 0.1$ 에서 $0.03 \pm 0.02 \text{ }^{\circ}\text{Cyr}^{-1}$ ($1.88 \pm 1.25 \text{ \%yr}^{-1}$)로 증가하였다. 이 경향은 Jacka and Budd (1992)가 1959년과 1988년 사이에 남극 대륙 연안 15개 관측소의 기온 경향을 분석한 결과 연평균 $0.028 \text{ }^{\circ}\text{Cyr}^{-1}$ 의 경향과 기간은 다를지라도 매우 일치한다. 그 밖에 남극 대륙의 온난화와 얼음 선반 (ice shelves)의 감소에 관하여 많이 발표한 바 있다 (e.g., Jones, 1990; Braeten and Dresckhoff, 1992; King, 1994와 Vaughan and Doake, 1996). 그러나 남

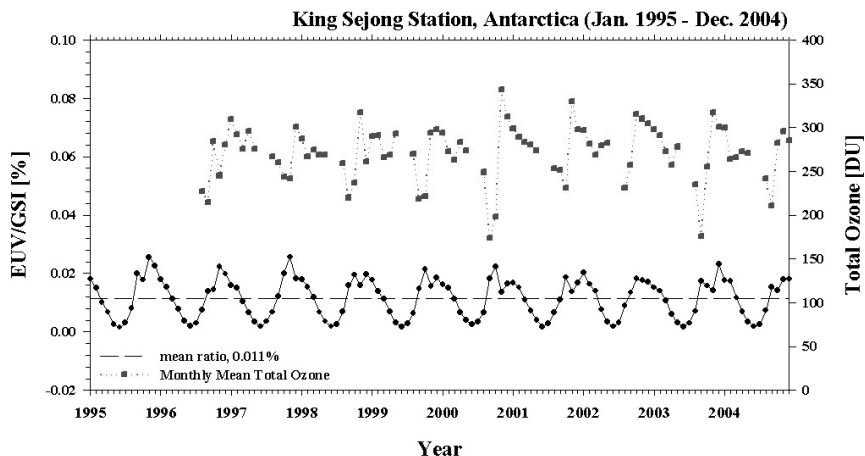


Fig. 7. Comparison of time series in monthly total ozone (right) and ratio of erythermal UV (left) to global solar irradiance.

극 극점에서는 기온의 증가가 나타나지 않았다 (Hana, 1989; Dutton *et al.*, 1991). Table 1b에서 보는 바와 같이 세종기지의 월별 평균 기온 변화경향은 11월을 제외한 여름(9월-2월)에 감소를 나타낸 반면 겨울(3월-8월)에는 증가를 나타냈다. 특히 4월은 유의수준 $P < 0.05$ 에서 $0.16 \pm 0.08 \text{ }^{\circ}\text{Cyr}^{-1}$ ($12.3 \pm 6.15 \text{ } \%\text{yr}^{-1}$)의 증가 경향을 보였다. Henderson-Sellers (1986)는 운량의 증가가 최근 온난화 경향과 연관성이 있을 것으로 보았다. Lee *et al.* (2002)은 남극 반도에 있는 9개 관측소 ($60^{\circ}\text{S} \sim 73^{\circ}\text{S}$, $40^{\circ}\text{W} \sim 70^{\circ}\text{W}$)에서 세종기지를 포함한 최근 (1988-2001) 기온 변화를 분석한 결과 4월-6월 사이에 $0.2 \text{ }^{\circ}\text{Cyr}^{-1}$ 이상의 온난화 경향을 보였다. 이 연구에서는 4월-8월 사이에 $0.05\text{-}0.16 \text{ }^{\circ}\text{Cyr}^{-1}$ 의 변화를 보여 세종기지 주변과 비슷한 경향이 나타났다. 이정순 등 (2003)은 이와 같은 남극 반도 주변에 최근 온난화가 일어나고 있는 원인을 양의 피드백 메커니즘 (positive feedback mechanism)으로 다음과 같이 설명하였다. 가을과 겨울 남극반도의 남동 지역에서 해면 기압의 감소 경향으로 Weddell Sea의 북서 지역에서 남서풍의 빈도가 줄어들고 북서풍의 빈도가 증가하는 경향이 나타나 온난화가 나타나고 따라서 이 온난화는 남동 지역의 해면기압을 감소시키는 결과가 되어 북서풍을 더욱 증가시켜 온난화를 계속 강화시키게 된다고 보았다. 이와 같이 남극 반도의 온난화는 Henderson-Sellers (1986)의 운량 증가에 의한 하향 적외 복사력 (Ramanathan *et al.*, 1989)과 Lee *et al.* (2002)의 해면기압 변화에 의한 지역적 대기 순환으로 설명하기도 한다.

기온과 태양 복사의 변화 경향 사이에 뚜렷한 상관관계는 발견하지 못했으나 전천 일사량과 기온의 월 최대값은 12월 (186.8 Wm^{-2})과 1월 (2.2°C)에 월 최소값은 6월 (8.2 Wm^{-2})과 7월 (-5.4°C)에 각각 나타나 기온의 최대값과 최소값은 전천 일사량보다 1개월 늦게 나타나는 결과를 보였다. 최근 (1996-2004) 기온 변화는 과거 장기 변화경향 ($0.03 \pm 0.02 \text{ }^{\circ}\text{Cyr}^{-1}$)과는 달리 연평균 $-0.07 \pm 0.05 \text{ }^{\circ}\text{Cyr}^{-1}$ ($P=0.09$)로 오히려 감소하였다 (조희구 등, 2006).

5. 요약 및 결론

복사관측 자료의 장기변화경향은 대기층의 가장 중요한 에너지원의 상태변화로서의 자체적인 의미와 더불어, 기후변화, 수문사이클, 대기권-생권의 상호작용

등에 있어서 매우 중요한 의미를 갖는다. 남극 세종기지는 연중 매우 낮은 에어러솔 광학깊이 값을 보이고 있어, 이 지역에서 관측된 복사에너지 자료는 청정대기에서의 변화경향을 나타내어 주는 중요한 의미를 갖는다. 운량과 비습은 복사에너지를 결정하는 주요한 인자이며, 이들의 변화경향 또한 복사에너지 변화경향과 더불어 매우 중요한 의미를 갖는다. 이 논문에서는 남극 세종기지에서 17년간 (1988-2004년) 관측한 전천 일사량, 기온, 비습 그리고 운량의 장기 변화경향을 살펴보고 최근 9년간 (1996-2004)의 홍반 자외선 복사의 변화도 함께 분석하였다.

전천 일사량의 연평균 변화 경향은 $-0.21 \text{ Wm}^{-2}\text{yr}^{-1}$ ($-0.26 \text{ } \%\text{yr}^{-1}$)로 감소하였다. 그러나 1월과 6월의 경우에는 오히려 $1.22 \text{ Wm}^{-2}\text{yr}^{-1}$ ($0.74 \text{ } \%\text{yr}^{-1}$), $0.05 \text{ Wm}^{-2}\text{yr}^{-1}$ ($0.61 \text{ } \%\text{yr}^{-1}$)로 각각 증가하였다. 반면 운량은 연평균 $0.02 \text{ oktasyr}^{-1}$ ($0.30 \text{ } \%\text{yr}^{-1}$)의 변화율로 매우 유의한 ($P < 0.0001$) 증가를 하였으나 1월과 6월은 $-0.01 \text{ oktasyr}^{-1}$ ($-0.14 \text{ } \%\text{yr}^{-1}$)와 $-0.005 \text{ oktasyr}^{-1}$ ($-0.077 \text{ } \%\text{yr}^{-1}$)로 각각 감소하였다. 이와 같이 전천 일사량의 장기 변화는 운량 변화에 주로 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 비습은 뚜렷한 변화 경향이 없었다. 그리고 기온은 연평균 $0.03 \text{ }^{\circ}\text{Cyr}^{-1}$ ($1.88 \text{ } \%\text{yr}^{-1}$)로 증가하였고 특히 겨울에 상승하고 여름에 하강하는 경향이 나타났다. 기온의 연평균 장기 증가 경향은 남극 반도의 다른 관측소의 경우와 비슷하였다. 태양 복사량과 기온의 변화 경향 사이에 특별한 관계를 발견하지 못하였다. 그리고 비습은 뚜렷한 변화 경향이 없었다.

최근 9년간 (1996-2004)의 전천 일사량과 운량은 과거 17년간의 변화 경향과 큰 차이가 없었으나 기온과 비습은 과거 장기 변화 경향과는 달리 오히려 현저하게 감소하였다. 최근 홍반 자외선 복사량 (EUV)은 연평균 $-0.15 \text{ mWm}^{-2}\text{yr}^{-1}$ ($-1.18 \text{ } \%\text{yr}^{-1}$)로 유의하게 전천 일사량보다 약 4배 더 감소하였고 월별 경향에는 전천 일사량의 경우와 같이 1월과 6월을 제외하고 모든 달이 감소 경향을 나타냈다. 따라서 전천 일사량에 대한 홍반 자외선 복사량의 비는 연평균 약 0.01 %로서 남극 오존 구멍이 발생하는 10월과 11월이 비교적 높아 약 0.02 %로 이 비는 계절 변화가 현저하였다. 그리고 운량 변화에 전천 일사량과 홍반 자외선 복사량의 감응도는 $13 \text{ } \%\text{oktas}^{-1}$ 와 $59 \text{ } \%\text{oktas}^{-1}$ 로 각각 나타나 홍반 자외선 복사는 전천 일사량보다 구름에 대하여 약 5배나 더 민감하다. 세종기지에서 과거 17년 사이에 약한 온난화 경향이 나타난 것은 해면기압 변화에

의한 지역적 대기 순환의 영향뿐만 아니라 운량 증가 등으로 인한 복사 강제력 역시 일부 작용한 것으로 해석된다.

사 사

본 연구는 극지연구소 기본 연구사업 “극지 대기 및 기후변화 연구 (PE06030)”와 2단계 두뇌한국 21 사업에 의해 지원되었습니다.

참고문헌

- 김준, 조희구, 이윤곤, 이방용, 2005 : 세종기지 상공의 오존층 변화에 의한 지표 홍반 자외선 복사의 변화. 한국해양연구원, 93pp.
- 김준, 조희구, 정연진, 이윤곤, 이방용, 2006 : 남극 세종기지의 에너지 평형. *대기*, **16**, 111-124.
- 이정순, 권태영, 이방용, 윤호일, 김정우, 2003 : 남극반도의 최근 온난화와 관련된 지역적 대기 순환의 변화. *Ocean Polar Res.*, **25**, 503-518.
- 조희구, 이방용, 이준석, 박선우, 2001 : 한국 전역의 지표 홍반 자외선 복사의 계절기후. *한국기상학회지*, **37**, 525-539.
- 조희구, 김준, 정연진, 이방용, 2006 : 남극 세종기지에서 최근 하향 적외 복사의 감소. 투고 예정.
- Braaten, D. A. and G. A. M. Dresckhoff, 1992 : Maximum and minimum temperature trends at McMurdo Sound station. *Antarctic J.*, **27**, 282-283.
- Broeke, M. V. D., C. Reijmer and R. V. D. Wal, 2004 : Surface radiation balance in Antarctica as measured with automatic weather stations. *J. Geophys. Res.*, **109**, D09103.
- Dutton, E. G., R. S. Stone, D. W. Nelson and B. G. Mendonca, 1991 : Recent interannual variations in solar radiation, cloudiness, and surface temperature at the South Pole. *J. Climate*, **4**, 848-858.
- Hana, K. J., 1990 : The South Pole station temperature chronology and the global warming problem. *Antarctic J. U.S.A.*, **25**, 247-249.
- Henderson-Sellers, A., 1986 : Increasing cloud in a warmer world. *Climate Change*, **9**, 267-309.
- Jones, P. D., 1988 : Hemispheric surface air temperature variation : Recent trends and an update to 1987. *J. Climate*, **1**, 654-660.
- Jones, P. D., 1990 : Antarctic temperatures over the present century - A study of the early expedition record. *J. Climate*, **3**, 1193-1203.
- Jones, P. D., and K. R. Briffa. 1992. Global surface air temperature variations over the twentieth century: Part 1. Spatial, temporal and seasonal details. *Holocene*, **2**, 174-188.
- King, J. C., 1994 : Recent climate variability in the vicinity of the Antarctic Peninsular. *Int. J. Climatol.*, **14**, 357-369.
- Lee, B.-Y., T.-Y. Kwon, J.-S. lee and Y.-I. Won, 2002 : Surface air temperature variations around the Antarctic Peninsula : Comparison of the west and east sides of the peninsula. *Ocean Polar Res.*, **24**, 267-278.
- Meywerk, J., and V. Ramanathan, 2002: Influence of anthropogenic aerosols on the total and spectral irradiance on the sea surface during INDOEX 1999. *J. Geophys. Res.*, **107**(D19), 8018, doi:10.1029/2000JD000022.
- Pinker, R.T., B. Zhang, E.G. Dutton, 2005 : Do Satellites detect trends in surface solar radiation? *Science*, **308**, 850-854.
- Radianov, V. F., 1994 : Variability of aerosol extinction in Antarctica. *Antarct. Sci.*, **6**, 419-424.
- Ramanathan, V., R. D. Cess, E. F. Harrison, P. Minnis, B. R. Barkstrom, E. Ahmad and D. Hartman, 1989 : Cloud radiative forcing and climate : Results from the earth radiation budget experiment. *Science*, **243**, 57-63.
- Rumney, G. R., 1970 : *Climatology and World's Climates*. Macmillian Company, 656 pp.
- Stanhill, G. and S. Cohen. 1997 : Recent changes in solar irradiance in Antarctica. *J. Climate*, **10**, 2078-2086.
- Studinger, M., 2005 : Science opportunities for a long-range Antarctic research aircraft. *EOS*, **86**, 39-40.
- Vaughan, D. and C. S. N. Doake, 1996 : Recent atmospheric warming and retrieval of ice shelves on the Antarctica Peninsula. *Nature*, **79**, 328-331.
- Wild, M., H. Gilgen, A. Roesch, A. Ohmura, C. N. Long, E. G. Dutton, B. Forgan, A. Kallis, V. Russak, A. Tsvetkov, 2005 : From dimming to brightening: Decadal changes in solar radiation at Earth's surface. *Science*, **308**, 847-850.