

전지구에 대한 TOMS 오존전량과 반사율의 경년 변화

유정문* · 전원선

이화여자대학교 과학교육과, 120-750 서울시 서대문구 대현동 11-1

Interannual Variation of the TOMS Total Ozone and Reflectivity over the Globe

Jung-Moon Yoo* · Won-Sun Jeon

Department of Science Education, Ewha Womans University, Seoul 120-750, Korea

Abstract: In order to investigate interannual variation of total ozone and reflectivity over the globe, Nimbus-7/TOMS data were used on the monthly mean and its anomaly for the period of 1979-92. This study also examined MSU channel 4(Ch4; lower-stratosphere) brightness temperature data and two model reanalyses of NCEP and GEOS to compare the ozone variation with atmospheric thermal condition. In addition, the MSU channel 1(Ch1; lower-troposphere) brightness temperature was used to compare with the reflectivity. The ozone showed strong annual cycle with downward trend(-6.3 ± 0.6 DU/decade) over the globe, and more distinct response to volcanic eruption than El Niño. The relationship between total ozone and MSU Ch4 observation, and between the ozone and model reanalyses of lower stratosphere temperature showed positive correlation(0.2-0.7) during the period of 1980-92. Reflectivity increased interannually by 0.2 ± 0.06 %/decade over the globe during the above period and reflected El Niño(1982-83, 1991-92) well. Its variability in annual cycle was remarkably smaller in tropics than in higher latitudes. This is inferred due to cloud suppression and tropical upwelling regions. Reflectivity correlated negatively(-0.9) to the Ch1 temperature over the globe, but positively(0.2) over tropical ocean. The positive value over the ocean results from the effect of microwave emissivity which increases the Ch1 temperature with enhanced hydrometeor activity. Significant correlations between total ozone and the Ch4 temperature, and between reflectivity and the Ch1 suggest that the TOMS data may use valuably to better understand the feedback mechanism of climate change.

Key words: Nimbus-7/TOMS, Ozone, Reflectivity, MSU Channel 1, Channel 4, Volcanic Eruption, El Niño, NCEP, GEOS

요약: 전지구(全地球)에 대한 오존전량과 반사율의 경년(經年) 변화를 조사하기 위하여 1979-92년 기간의 Nimbus-7/TOMS 자료의 월평균과 그 아노말리 값을 사용하였다. 여기서 대기 열적 변화에 따른 오존의 경년 변화를 분석하기 위하여 TOMS 자료 외에 위성관측 MSU채널4(하부성층권) 밝기온도와 두 개의 대기대순환 모델(NCEP, GEOS) 재분석 온도를 이용하였다. 또한 대기의 열적 및 강수(구름) 변화에 따른 반사율의 경년 변화를 분석하기 위하여는 MSU 채널1(하부 대류권) 밝기온도를 이용하였다. 오존전량의 시계열은 뚜렷한 계절 변화와 함께 전구적으로 감소 경향(-6.3 ± 0.6 DU/decade)을, 그리고 엘니뇨보다는 화산폭발이 있었던 기간에 더 뚜렷한 변동을 보였다. 오존전량과 위성관측 및 모델 재분석의 하부 성층권 온도는 1980-92년 기간의 경년 변화에 있어서 서로 양의 상관(0.2-0.7)을 보였다. 반사율은 같은 기간에 전구적으로 다소 증가 경향(0.20 ± 0.06 %/decade)을 보였으며 1982-83년, 1991-92년의 엘니뇨 특징을 잘 반영하였다. 열대 지역에서의 반사율의 연주기 변동은 양반구의 고위도에 비하여 작게 나타났으며, 이는 아열대 고압대 및 열대 융송 지역에서 대기 침강으로 인하여 구름이 소산되거나 하층운의 발달로 인하여 낮은 반사율과 함께 그 변동도 작기 때문인 것으로 추정되었다. 전구에 대한 반사율과 MSU 하부 대류권 온도는 경년 변화에 있어서 서로 음의 상관(-0.9)을 보였으나, 대류활동이 활발한 열대 해양에서는 낮은 양의 상관(0.2)을 보였다. 이러한 양의 상관은 해양에서 구름 및 강수의 증가에 따라 채널1 밝기온도를 증가하게 하는 마이크로파 방출율의 효과를 반영하였다. 오존과 하부 성층권 온도 사이에, 그리고 반사율과 하부 대류권 온도 사이에 존재하는 유의적인 상관은 오존 및 반사율의 위성관측 자료가 기후변동에서의 피이드백 작용을 이해하는데 유

* E-mail: yjm@mm.ewha.ac.kr

용하게 사용될 수 있음을 본 연구는 제시한다.

주요어: 오존전량, 반사율, 경년변화, Nimbus-7/TOMS, MSU 채널1, 채널4, 화산폭발, NCEP, GEOS, 엘니뇨

서론

오존층 파괴는 1970년대부터 남극을 비롯하여 전지구적으로 심각한 환경문제로 대두되고 있으며 엘니뇨, 지구온난화와 같은 기후변화와 함께 중요 관심사가 되고 있다. 기존 연구들에 의하면, 성층권 오존은 전지구적으로 감소 추세에 있으며(Gribbin, 1988; Bojkov *et al.*, 1990), 오존층의 파괴는 대기에 방출된 염화불화탄소(CFC)에서 형성된 염소(CI)의 직접적인 결과 뿐만 아니라 이산화탄소 등의 온실기체의 간접적인 결과일 가능성도 있다는 지적이 제기되고 있다(Shindell *et al.*, 1998). 성층권 및 대류권 내의 오존 전량을 전지구적으로 제공하는 Nimbus-7/TOMS(Total Ozone Mapping Spectrometer) 위성관측 자료를 이용한 선행연구로서 한반도 또는 전지구적인 오존전량의 변동경향(Kerr, 1991; Niu *et al.*, 1992; Ho *et al.*, 1999; 조희구 외, 1994), 오존전량과 성층권 온도와의 관계(오재호 외, 1994), 오존전량에 대한 경험적교합수 분석과 함께 MSU (Microwave Sounding Unit) 채널2 및 채널4 밝기 온도의 상관(유정문 · 이혜란, 2000)에 관한 분석들이 있다.

한편, TOMS 복사계로부터 유도된 반사율은 자외선 파장역에서 유도된 것으로(McPeters *et al.*, 1996) 구름, 지형 그리고 생태계의 변화에 따라 변하기 때문에 기후 변화의 단면을 보여준다. 반사율에 관한 대부분의 선행 연구(Betts and Ball, 1997; Herman and Bhartia, 1997; Yang and Liou, 1997)는 TOMS관측의 특정 파장영역에 초점을 맞추어서 반사율과 지형, 식생, 구름, 복사 등과의 관련성을 조사한 것으로, 그 경년 변화에 관한 연구는 거의 전무하다. 이러한 반사율의 경년 변화와 대기 열적 상태와의 비교 · 분석을 통하여 대기순환 및 기후계의 상호작용에 관련된 정보를 추정할 수 있다. 수문학적인 요소(*i.e.*, 구름 및 강수)와 대류활동과 관련하여 반사율에 대한 MSU 채널1 밝기온도, 또는 해수면 온도와 상관에 대한 조사는 유정문 · 배정남(1999) 연구에서 부분적으로 수행된 바 있으나 경년 변화 관점에서 실시되지 않았다.

이상에서 언급된 바와 같이, TOMS 오존전량과 반사율에 대한 변동 및 증감경향이 부분적으로 활발하게 조사되었으나, 이들 자료의 시계열을 전지구, 북반구, 남반구, 열대, 한반도 부근 지역의 해양, 육지, 해양 및 육지에 대한 것으로 세분화하여 대기대순환 모델 재분석 온도 자료와 함께 포괄적으로 비교 · 분석하는 것이 기후계의 상호 작용 관점에서 추가적으로 필요하다. 본 연구의 목적은 1979-92년 기간의 TOMS 오존 및 반사율과 대기 열적 상태와의 관계를 경년 변화의 관점에서 조사하는데 있다.

오존 경년 변화와의 열적 비교 · 분석을 위하여 TOMS 자료 외에 위성관측 MSU 채널4(하부 성층권) 밝기온도와 두 개의 대순환 모델(NCEP, GEOS) 재분석 온도의 자료를 이용하였다. 또한 반사율의 경년 변화와의 비교 · 분석을 위하여는 MSU 채널1(하부 대류권) 밝기온도의 자료를 이용하였다.

자료 및 방법

오존전량은 고도에 따른 오존 분포에 관계없이 오존의 수 밀도를 고도에 대해 누적시킨 양으로, 오존 분자가 주로 재분배를 이루는 하부 성층권의 순환에 의해 그 양이 의존한다. 본 연구에서는 Goddard Space Flight Center의 Distributed Active Archive Center (DAAC)로부터 수집된 Nimbus-7 · Version 7/TOMS 위성관측 오존전량 및 반사율 자료를 사용하였다. 하루에 지구의 대부분을 관측할 수 있는 Nimbus는 정오부근에 적도를 통과하며, 약 100분 주기, 950km 고도를 갖는 극궤도 위성이다. Nimbus는 1에서 7까지 1964-78년 기간에 발사되었는데, 본 연구에서는 이 중 1978-92년 기간의 관측자료를 제공하는 Nimbus-7 위성에 탑재된 TOMS 복사계의 1979년 1월부터 1992년 12월까지의 월 평균 오존전량과 반사율 자료를 사용하였다. Nimbus-7에 의한 자료 외에도 METEOR3(1991년 9월-1994년 11월), ADEOS(1996년 10월-1997년 6월), 그리고 EPTOMS(1996년 9월-2000년 8월) 등의 최근 자료가 있으나 Nimbus-7이 가장 장기간의 시계열을 제공한다.

오존 경년 변화와의 열적 비교·분석을 위하여 1980-92년 기간동안 위성관측 MSU 채널4(하부 성층권) 밝기온도와 두 개의 대순환 모델(NCEP, GEOS) 재분석 온도의 자료를 사용하였다. 또한 반사율의 경년 변화와의 비교·분석을 위하여는 MSU 채널1(하부 대류권) 밝기온도의 자료를 이용하였다.

MSU 복사계는 60GHz 부근의 네 가지 진동수에서 대기 중 산소분자에 의한 마이크로파 열적 방출을 측정하도록 고안되었다. 이 복사계는 1978년 후반부터 NOAA 위성의 TIROS-N 계열에 탑재되어 지표와 대기에서 방출되는 마이크로파를 각각 네 개의 채널로 관측함으로써 대기 하층을 물론 대기 상층까지 전지구의 온도를 모니터링하는데 유용하게 사용되어 왔다 (Spencer and Christy, 1990, 1992a, 1992b, 1993; Spencer *et al.*, 1990). 특정 채널에서의 가중함수 (weighting function)는 고도에 따른 투과율의 연직 변화로 정의되기 때문에, 각 채널에서의 밝기온도는 가중함수의 최대값이 위치하는 고도에서의 대기의 열적 상태를 가장 많이 반영한다. 채널1 밝기온도(50.30 GHz)는 지상부근, 그리고 채널4 밝기온도(57.95 GHz)는 90 hPa 부근의 하부 성층권의 열적 상태를 주로 나타낸다 (Spencer and Christy, 1990).

현재 사용된 채널1과 채널4의 밝기온도 자료는 Prabhakara *et al.*(1998) 연구에서 사용된 것과 유사하다. 그러나 자료 보정에 있어서 중복 기간의 MSU 관측 자료를 사용하여 기존의 연구가 전지구 해양 또는 육지의 평균값을 이용한 데 반하여, 본 연구에서는 보정값도 공간에 의존함을 고려하여 위도 $2^{\circ} \times$ 경도 3° 격자의 평균값을 사용하였다. 위성의 수명이 평균 2년 정도인 현재의 여건하에서 하나의 위성이 장기간의 연속적인 시계열 자료 전체를 마련할 수 없다. 따라서 자료의 연속을 위한 보정을 위하여 또다른 위성이 얼마간의 중복기간을 두고 발사된다. 이 중복기간에 각각의 두 개의 위성자료의 시계열을 비교해서 보정한 다음, 최종적으로 NOAA-6를 기준으로 다시 보정하여 연속된 장기간의 자료를 얻는다.

본 연구에 사용된 1980-97년 기간의 NCEP 모델의 재분석 온도는 위·경도 $2^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 격자 간격의 초기 자료를 GrADS(Doty, 1992) 그래픽 프로그램을 이용하여 위·경도 $2^{\circ} \times 3^{\circ}$ 격자로 전환된 전지구 자료이다. 여기서는 채널4에 해당하는 온도를 재구성하기 위해 17개

의 고도층 중에서 하부 성층권에 영향을 주는 상부 9 개층 자료를 사용하였다(유정문·김진남, 2000; 이들의 Table 1 참조). 1981-94년 기간의 GEOS(Goddard Earth Observing System; GEOS-1) 대순환 모델의 재분석 온도자료는 초기 격자에서 3° 경도 \times 2° 위도 격자로 전환된 후, 18층(1000, 950, 900, 850, 800, 700, 600, 500, 400, 300, 250, 200, 150, 100, 70, 50, 30, 20 hPa) 중 8층 자료를 이용하여 채널4 온도로 재구성된 것이다.

TOMS, MSU 그리고 재분석 자료들을 전지구, 북반구, 남반구, 열대(30N-30S), 그리고 한반도 부근의 해양, 육지, 해양 및 육지에 대한 것으로 세분화하였다. 모든 자료는 위·경도 $2^{\circ} \times 3^{\circ}$ 의 격자로 정리된 후에 전지구 여러 지역에 대한 경년 변화의 조사에 사용되었으며, 한반도 부근의 경우에 9개 격자(33.5-39.5N, 123.0-132.0E)에서 위성관측 밝기온도와 비교되었다.

TOMS 자료의 경년변화 및 MSU 밝기온도와의 상관

오존전량

북반구, 남반구, 전지구, 열대(30N-30S) 그리고 한반도 지역들에 대한 1979-92년 기간의 TOMS 오존전량 및 그 아노말리의 경년변화를 조사하였다. 몇몇 경년 변화의 결과에 대하여는 Angell(1999) 연구에서 사용된 95% 신뢰도 구간을 추가하였다. 신뢰도 구간의 계산에는 한달 지연(lag-one) 자기상관(autocorrelation)과 유효(effective) 표본 크기가 사용되었다. 각 지역의 자료를 다시 해양, 육지, 해양 및 육지로 나누어 세분화함으로써 오존전량 또는 반사율의 해륙 의존도를 분석하였다.

오존전량의 경년변화는 모든 조사 지역을 통하여 뚜렷한 연주기와 감소 경향을 보였으며, 전지구 감소 경향은 -6.3 ± 0.6 DU/decade 이었다(Fig. 1, Table 1). 이 결과는 오존전량이 전지구적으로 감소 추세에 있다고 주장한 Gribbin(1988)과 Bojkov *et al.*(1990)의 보고와도 일치하였다. 양반구 모두는 봄에 오존의 최대값(320-327 DU), 그리고 가을에 그 최소값(275 DU)을 갖는 연주기를 보였다. 이러한 사실은 겨울 동안 비단열 순환에 의해 오존이 적도에서 극쪽으로 수송되면서 증가하여 봄에 최대가 되고 다른 계절에는 감소하는

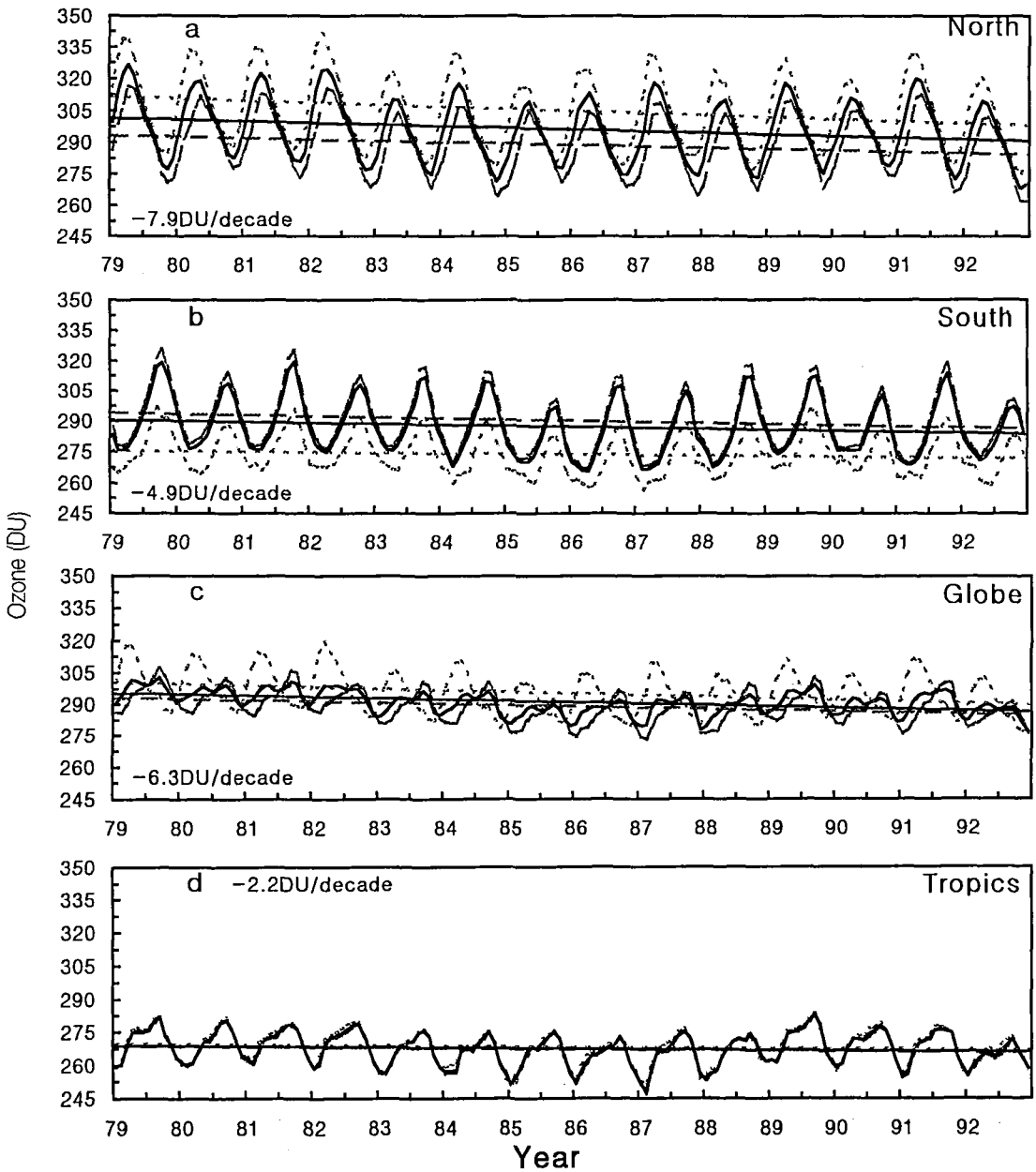


Fig. 1. Time series of monthly TOMS total ozone(DU) during 1979-92 averaged over (a) northern hemisphere, (b) southern hemisphere, (c) globe, and (d) tropics. Each region is subdivided by ocean(long dashed), land(short dashed), and the ocean and land(solid), respectively. The trend values over the ocean and land, and three regression lines are given in each panel.

Table 1. Linear trends(decade⁻¹) of monthly ozone(DU) and reflectivity(%) and their anomalies over the northern and southern hemispheres, the globe, the tropics and the Korean peninsula for the period from January 1979 to December 1992.

Region	Ozone (DU decade ⁻¹)		Reflectivity (% decade ⁻¹)	
	Total	Anomaly	Total	Anomaly
Northern				
Ocean	-6.52	-5.29	0.35	0.32
Land	-9.68	-7.38	0.23	-0.01
Ocean & Land	-7.94	-6.23	0.08	0.17
Southern				
Ocean	-5.40	-7.24	0.40	-0.40
Land	-2.71	-3.86	-0.47	0.36
Ocean & Land	-4.91	-6.60	0.24	0.23
Globe				
Ocean	-5.74	-6.32	0.38	0.35
Land	-7.51	-6.25	-0.30	-0.12
Ocean & Land	-6.30	-6.30	0.17	0.20
Tropics				
Ocean	-2.16	-2.70	0.28	0.20
Land	-2.14	-2.51	-0.08	-0.08
Ocean & Land	-2.15	-2.64	0.17	0.12
Korea	-13.50	-9.80	0.80	0.98

것과 관련이 있다(Fusco and Salby, 1999). 양반구의 해륙 분포에 따라 전지구적으로 육지는 경년변화에 있어서 북반구의 경향, 그리고 해양은 남반구의 경향을 보였다. 북반구 육지는 상대적으로 큰 감소 경향(-9.7 DU/decade) 그리고 열대지역은 작은 연주기 변동폭(약 25 DU)과 함께 작은 감소 경향(-2.2 DU/decade)을 보였다. 해양 및 육지에서 북반구에서의 감소(-7.9 DU/decade)는 남반구(-4.9 DU/decade)에 비해 더 컸으며, 이는 Niu *et al.*(1992) 결과와 일치하였다.

해양과 육지의 경년 변화를 비교해 보면, 북반구에서는 육지가 더 큰 감소 경향(-9.7 DU/decade), 남반구에서는 해양이 육지보다 더 큰 감소 경향(-5.4 DU/decade)을 나타냈다(Fig. 1, Table 1). 열대지역에서는 육지와 해양의 경향이 거의 비슷하며(-2.1~-2.2 DU/decade), 전지구에서는 육지(-7.5 DU/decade)가 해양(-5.7 DU/decade)보다 더 큰 감소를 나타냈다. 열대 해양에서는 해수면 온도의 상승 및 대류활동의 증

가에 따른 잠열의 방출로 인하여 대류권계면 고도가 상승하게되고, 이 때 오존 농도가 낮은 공기가 하부 성층권으로 유입됨으로 인해 오존전량이 감소하는 경향이 있다(Kayano, 1997; Ahn and Shin, 1998).

오존전량 아노말리값의 경년변화는 엘니뇨 기간에 비하여 1982년 4월의 엘치촌 화산(17.3N, 93.3W)과 1991년 6월의 피나투보 화산(15.14N, 120.35W)이 폭발한 시기에 더 현저한 극소값들을 보였다(Fig. 2). 이러한 결과는 화산폭발 후의 오존감소 현상이 폭발시에 발생한 이산화황과 먼지 등이 성층권으로 유입하여 형성된 에어러솔입자(특히, 황산화물)와 관련이 있다는 Ahrens(1994)의 주장을 뒷받침한다. 에어러솔이 존재한 기간이 엘치촌에 비해 피나투보의 경우에서 더 지속적이었는데, 이는 1992년 여름에 추가적으로 스퍼(Spurr) 화산폭발이 있었기 때문이다(Madison *et al.*, 1996). 그러나 Nimbus-7·Version 7/TOMS 오존전량 및 반사율 자료에서는 에어러솔에 대한 보정이 이루어지지 않았으므로(김재환, 2000, personal communication), 이들 자료의 경년 변화에 대한 화산폭발 효과의 정량적 평가는 에어러솔 보정과 관련된 오차를 내포한다. 1978년 11월부터 1990년 5월까지 기간에 위도와 경도에 따른 오존전량의 추세는 Niu *et al.* (1992)의 연구에서 언급된 바 있으며, 본 연구의 양반구 지역 경향과 대체로 일치한다. 한반도 부근에 대한 오존전량의 경년변화(-13.5 DU/decade)는 전지구와 같은 감소 경향을 보이나, 그 크기에 있어서 전지구(-6.3 DU/decade)에 비해 2배 정도 컸다(Fig. 3, Table 1). 그러나 아노말리의 시계열에서는 한반도의 감소경향(-9.8 DU/decade)이 전지구(-6.3 DU/decade)보다 1.5배 컸다.

오존과 대기 열적 상태와의 관계를 조사하기 위하여 1980-92년 기간에 대한 TOMS 오존전량, 그리고 위성관측 및 모델에서 유도된 하부 성층권 온도를 사용하였다. 여기서 하부 성층권 온도 자료는 MSU 채널4 밝기 온도, 그리고 NCEP 및 GEOS 대순환 모델의 재분석 온도로부터 재구성된 채널4에 해당하는 온도이다. 북반구, 남반구, 전지구, 열대, 그리고 한반도 부근 지역들에 대해 각각 조사된 오존전량과 세 종류의 하부 성층권 온도들과의 분산도표에서 전지구적으로 양의 상관(0.43-0.69)이 나타나므로, 기존의 모델 실험 분석(e.g.,

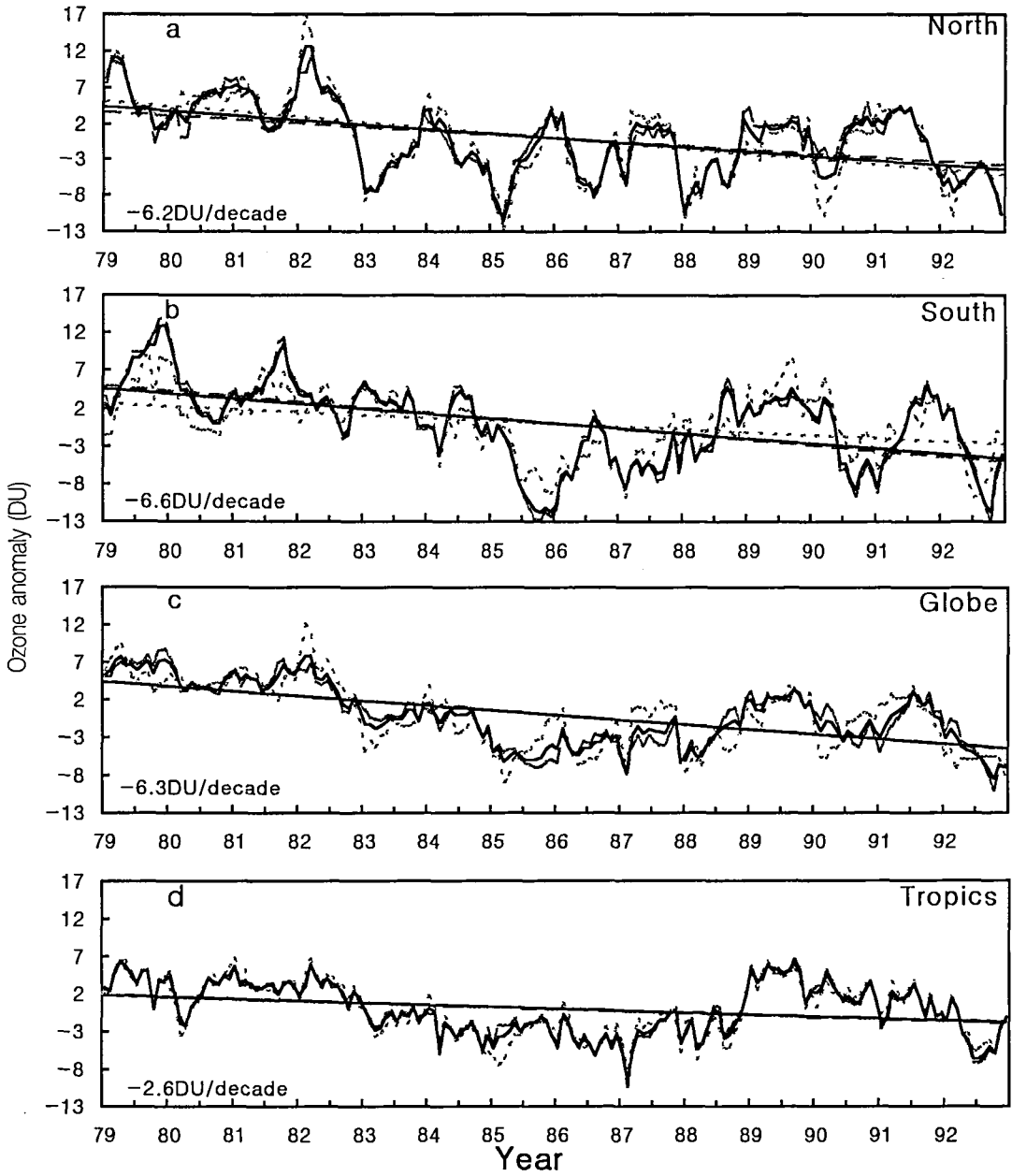


Fig. 2. Same as in Fig. 1 except for ozone anomaly.

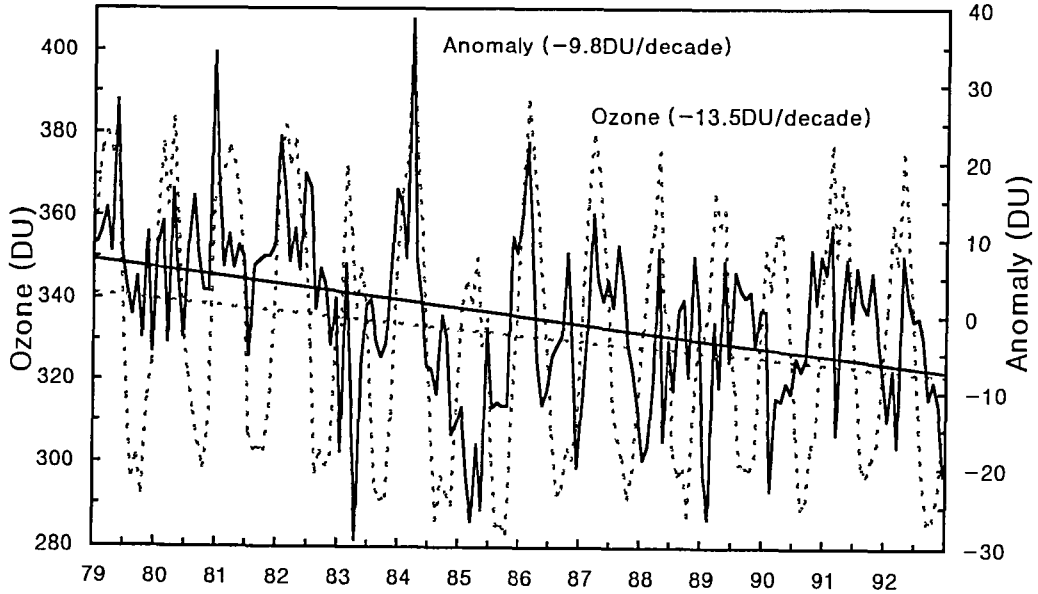


Fig. 3. Time series of monthly mean TOMS data(dashed) and their anomalies(solid) during 1979-92 over the Korean peninsula for total ozone. The trend values of the monthly mean data and their anomalies are shown in each panel.

Hansen *et al.*, 1995)을 함께 고려할 때 오존전량이 감소하면 하부성층권 온도도 대체로 하강함을 알 수 있다(Figs. 4-6 and Table 2). 두 변수들 사이의 이러한 양의 상관은 기후모델을 이용하여 조사된 Hansen *et al.*(1995)과 Ramaswamy *et al.*(1996)의 연구 결과와 일치한다. Hansen *et al.*(1995)의 경우에 관측된 TOMS 오존 자료를 입력 자료로 사용한 GISS(Goddard Institute for Space Studies) 대기대순환 기후모델 실험에서 오존 감소시에 하부 성층권 및 대류권계면 부근의 온도는 뚜렷이 감소하며, 이러한 효과는 대류권 하부로 갈수록 점차 약해진다. Shindell *et al.*(1998)에 따르면, 오존의 감소 경향은 지표 온난화 및 성층권 냉각화에 영향을 준다.

전지구 해양 및 육지에서의 오존전량에 대한 하부 성층권 온도들의 상관에 있어서 MSU는 0.43, NCEP은 0.52, 그리고 GEOS는 0.69의 상관을 보여 오존과 GEOS 온도와의 값이 가장 높았다(Figs. 4-6). MSU와의 상관에서 해양은 0.23, 육지는 0.19의 상관을 보여 해양의 상관이 육지보다 다소 높았다(Fig. 4). (유의수준 5%에서 표본 크기 156에 대한 유의적인 상관값은 0.13이

다). NCEP과의 상관에서는 해양이 0.25, 육지가 0.29를 보여 육지에서의 상관이 해양보다 약간 높았으며, 두 경우 모두 MSU와 마찬가지로 해양 및 육지에서의 상관(0.52)보다 낮았다(Fig. 5). GEOS는 MSU와 NCEP의

Table 2. Temporal correlation(*r*) over 156 months from 1980 to 1992 between the total ozone and MSU, NCEP, and GEOS channel 4 corresponding temperature data over five different regions.

	Northern hemisphere	Southern hemisphere	Globe	Tropics	Korea
Ocean					
MSU	0.52	0.20	0.23	0.84	
NCEP	0.57	0.22	0.25	0.86	
GEOS	0.57	0.23	0.42	0.86	
Land					
MSU	0.19	0.26	0.19	0.83	
NCEP	0.23	0.12	0.29	0.85	
GEOS	0.21	0.12	0.28	0.85	
Ocean & Land					
MSU	0.36	0.21	0.43	0.85	0.64
NCEP	0.42	0.21	0.52	0.87	0.58
GEOS	0.41	0.22	0.69	0.86	0.48

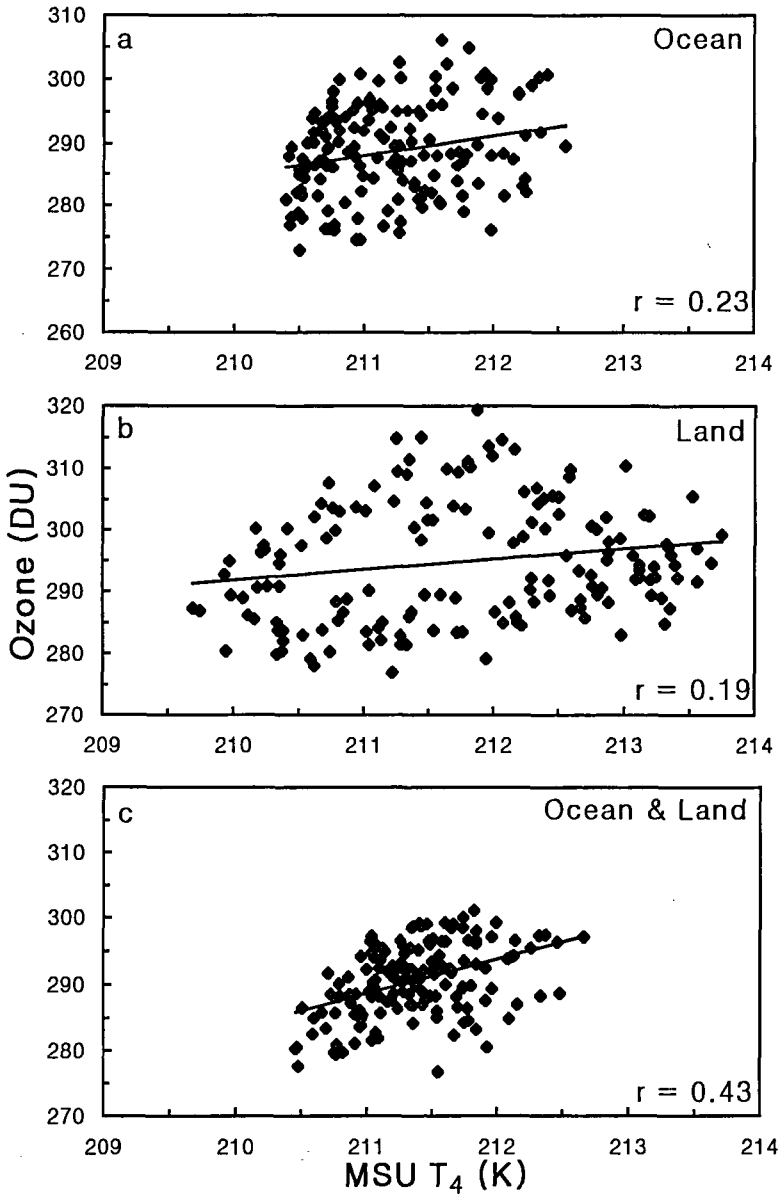


Fig. 4. Scatter diagrams of TOMS ozone versus MSU Ch4 brightness temperature(MSU T₄) over the global (a) ocean, (b) land, and (c) ocean and land during 1980-92. The 'r' means correlation coefficient.

경우와는 달리 해양의 상관(0.42)이 육지(0.28)에 비하여 현저하게 높았다(Fig. 6). 이러한 양의 상관 결과는 양반구 중위도에서 1979-95년 기간에 오존전량의 감소(4-5%/decade)와 함께 하부 성층권(17-22km)의 전지구 평균기온이 0.34°C/decade 감소한 사실과도 일치한다(IPCC, 1995). 열대에서의 오존전량과 MSU와의 상관에서 해양이 0.84, 육지가 0.83, 해양 및 육지가 0.85

를 보여 세 지역 모두에서 그 값들이 비슷하였으며, 전지구 경우(0.19-0.52)에 비해 높은 양의 상관을 보였다(Table 2). 위의 세 지역에 대한 오존전량과 NCEP 온도와의 상관은 0.85-0.87, 그리고 오존전량과 GEOS와의 상관은 0.85-0.86으로 나타나, 오존전량과 MSU와의 경우에 비해 거의 차이가 없었다. 다시 말해, 열대 지역에서의 오존전량과 위성관측 및 모델 재분석에서 유도된

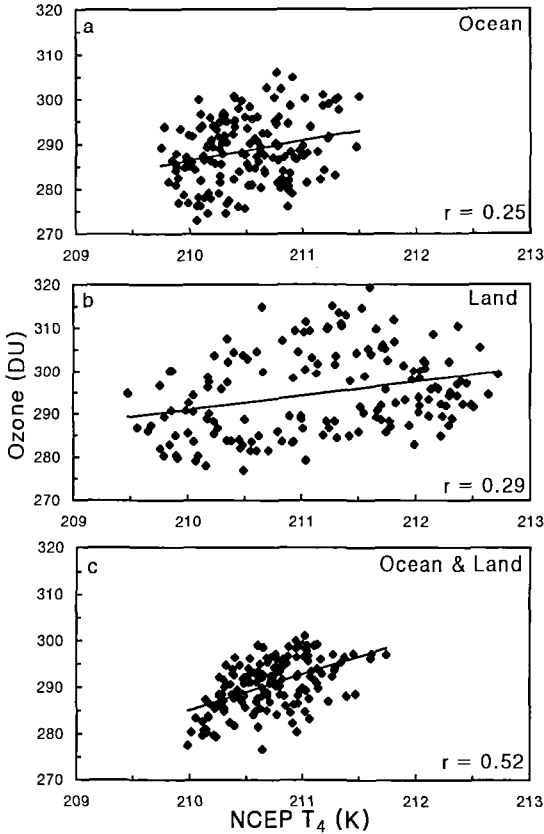


Fig. 5. Same as in Fig. 4 except for NCEP Ch4 equivalent temperature(NCEP T_4).

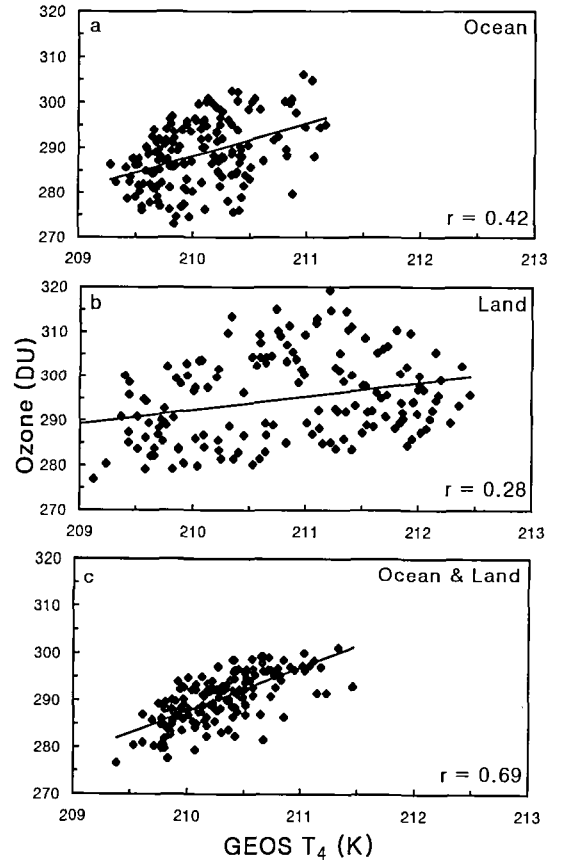


Fig. 6. Same as Fig. 4 except for GEOS Ch4 brightness temperature(GEOS T_4).

하부 성층권 온도와 상관(0.83-0.87)은 전지구 경우 (0.19-0.69)에 비해 높았다. 이러한 사실은 중·고위도에서의 오존전량은 앞서 지적한 하부 성층권 온도 외에 다른 메커니즘(예를 들면, 중위도 경압파)에 의해서도 영향을 받을 수 있음을 암시한다.

그러나, 열대지역에서 상대적으로 높은 상관(0.85)은 두 변수의 아노말리값을 사용할 경우 0.5으로 감소하였다(이 논문에서는 아노말리 경우에 그림을 제시하지 않았음). 한반도 부근에 대한 오존전량과 세종류의 하부성층권 온도 간의 상관(약 0.56)은 전지구 평균(0.55)과 거의 비슷하였다(Table 2). 이러한 상관값들은 유의수준 5%에서 유의적이었다. 한반도 부근에서 오존에 대한 위성관측 온도의 상관(0.64)이 오존에 대한 모델 재분석 경우(0.48-0.58)보다 높았다. 전지구의 경우와는 달리, 한반도 부근 지역의 경우에 오존과 하부 성층권 온도의 아노말리들 간의 상관에서 오존과 GEOS와

의 상관(0.02)은 거의 없으나 오존에 대한 MSU 및 NCEP은 유의적인 상관(0.59-0.64)을 보여 이 지역에서의 GEOS 자료는 상대적으로 부정확한 듯 보인다(이 논문에서는 표를 제시하지 않았음).

Stanford and Ziemke(1996)의 연구에 의하면, 한반도를 포함한 중위도에서는 4000-7000km의 규모인 연직 행성파가 경압 불안정으로 인해 발생한다. 이러한 파의 활동이 북반구 여름, 남반구 봄에 성층권 영역에 활발하게 영향을 준다. 5-10일 시간규모에서 중위도 하부 성층권의 오존 농도는 보존되며, 단열과정이 지배적인데 이 때 대기의 상승(하강) 운동은 오존전량 및 온도의 감소(증가)를 유도한다. 이처럼 오존전량과 온도의 두 변수가 동시에 감소 또는 증가하는 이유는 하부 성층권에서 오존 혼합비와 온도가 고도 증가에 따라 함께 증가하기 때문이다. 결과적으로, 중위도 행성파는 두 변수 간에 양의 상관을 유도한다.

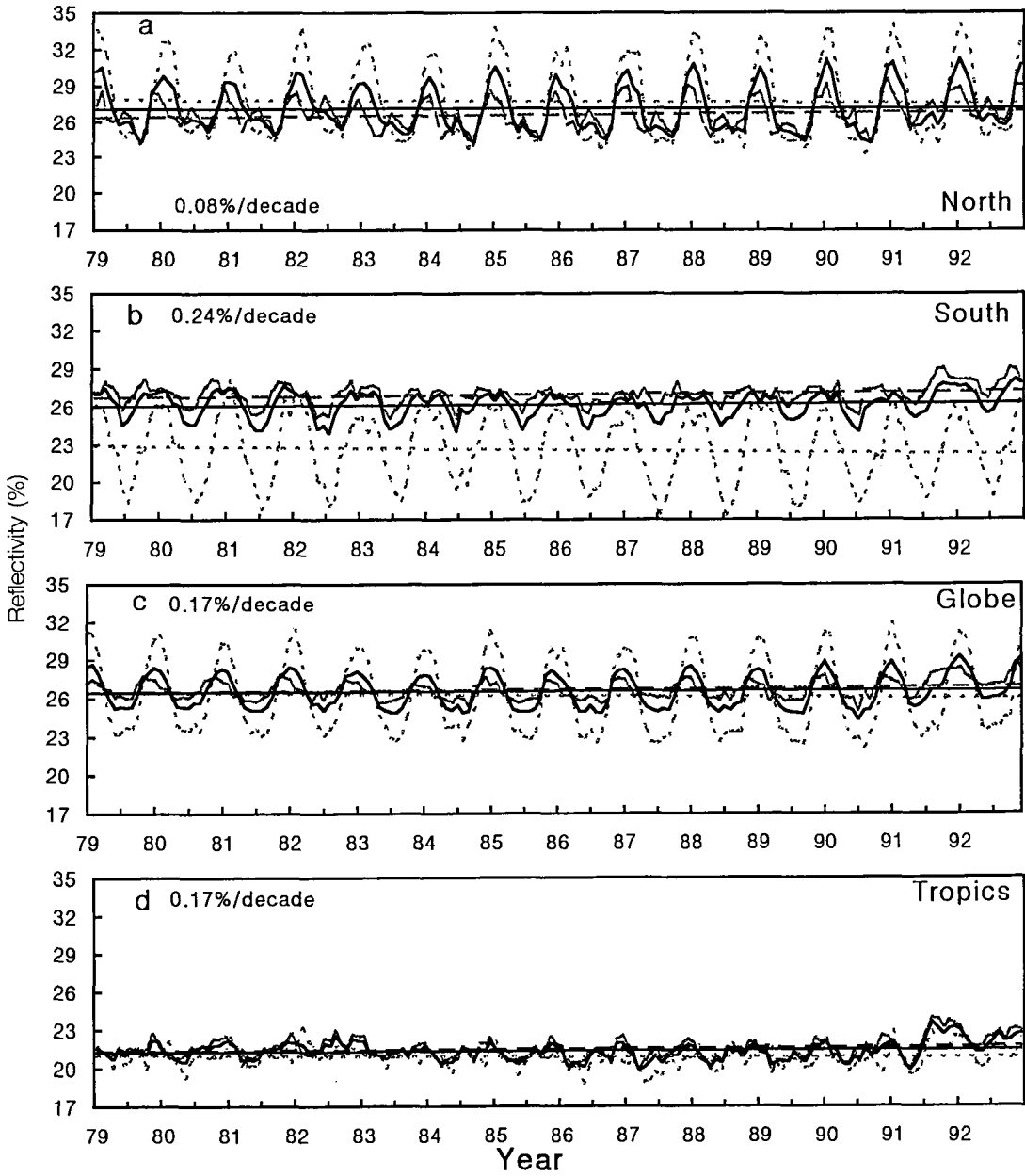


Fig. 7. Same as in Fig. 1 except for reflectivity(%).

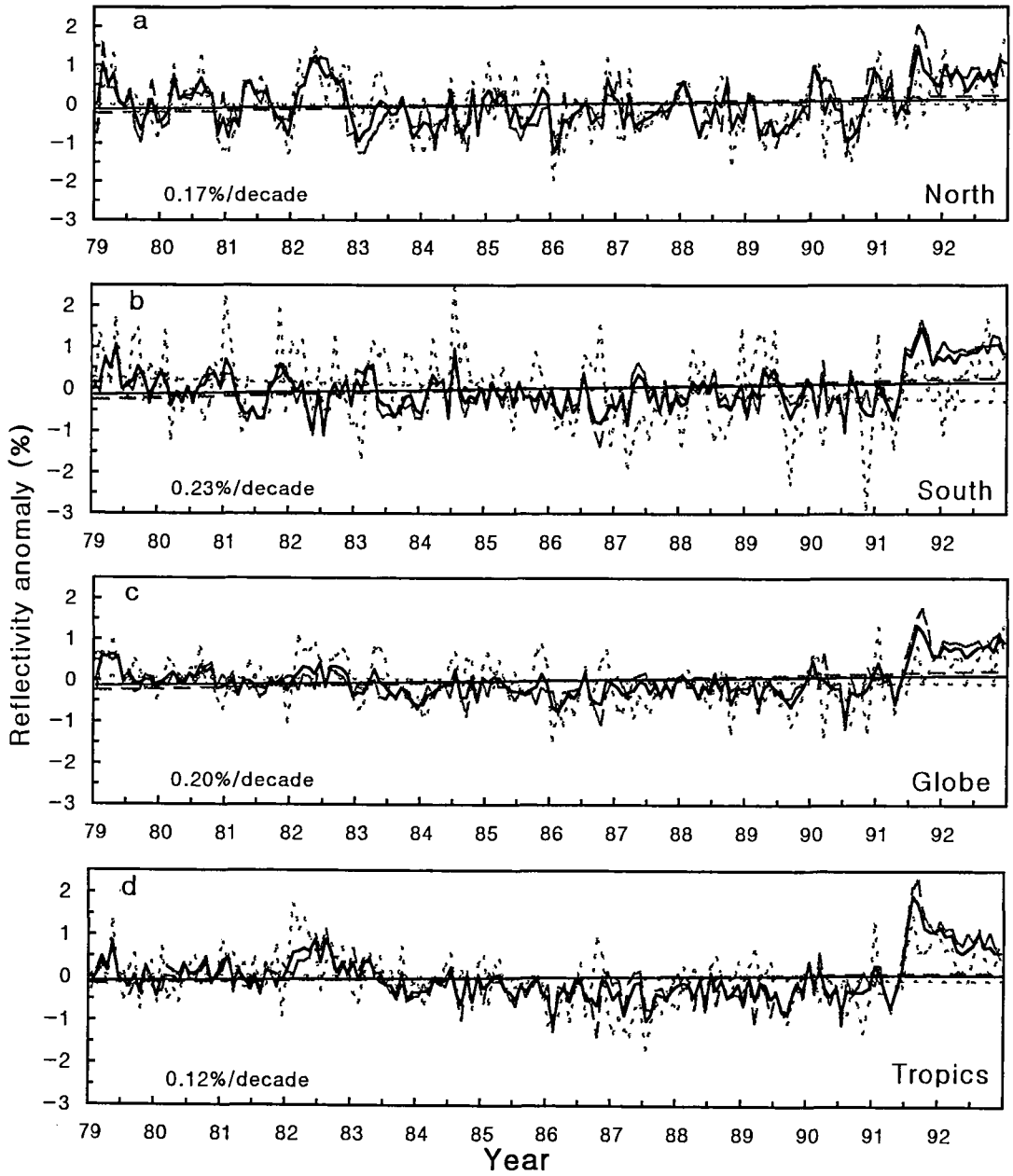


Fig. 8. Same as in Fig. 1 except for reflectivity anomaly.

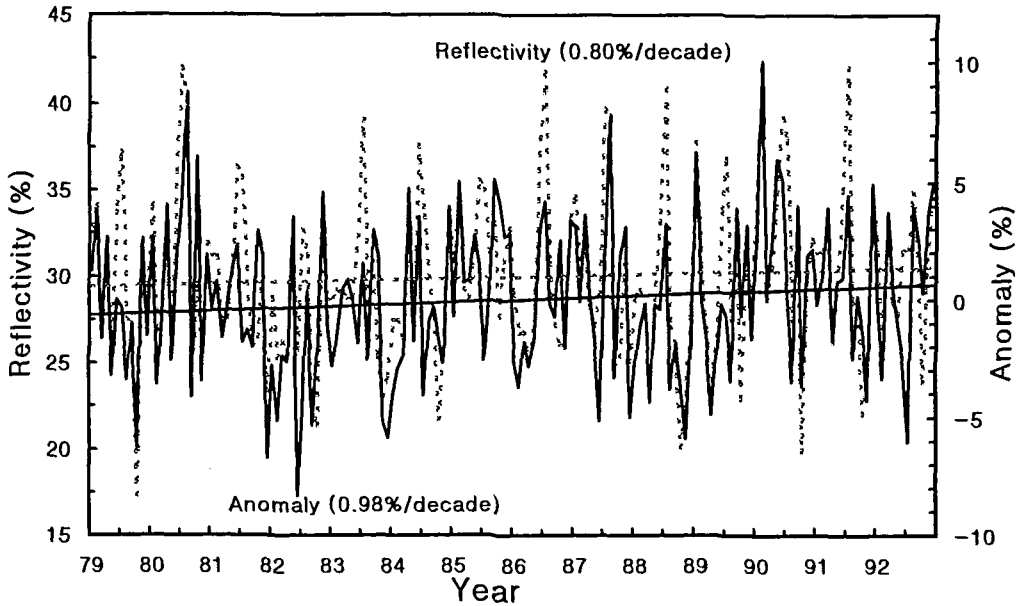


Fig. 9. Same as in Fig. 3 except for reflectivity(%).

반사율

본 연구에서는 1979-92년 기간에 대한 TOMS 월평균 자료를 이용하여 북반구, 남반구, 전지구, 열대, 한반도 지역들에 대한 반사율의 경년변화를 앞서 제시한 오존 전량의 경우와 같은 방법으로 조사하였다. 그러나 반사율은 하부성층권 온도보다는 하부대류권의 온도 및 강수(구름)에 더 크게 의존하므로, 이러한 변수에 대한 반사율의 관계를 조사하기 위하여 MSU 채널1 밝기온도를 도입하였다. 같은 기간의 60S-60N 지역에 대한 TOMS 반사율의 경험적교합수 분석은 유정문·배정남(1999) 연구에서 시도된 바 있으며, 본 연구에서는 경년 변화 관점에서 반사율 자료를 분석하였다.

반사율 월평균값은 경년변화에 있어서 전 조사 지역에서 공통적으로 증가하였다($0.08-0.24\%/decade$)(Fig. 7). 전지구에 대한 경년변화는 $0.17\%/decade$ 의 증가 추세와 함께 겨울에 최대(약 32%), 여름에 최소(약 23%)를 나타내는 연주기를 보였다(Fig. 7c). 반사율이 양반구 고위도에서 겨울에 최대로 나타나는 이유는 이 기간에 북반구의 빙하와 눈, 그리고 남반구 해빙의 증가에 있다고 추정되었다(Herman and Celarier, 1997). 일반적으로 해빙의 반사율(30-40%)은 눈의 반사율보다 작다(Ahrens, 1994).

북반구와 남반구에서의 연주기들의 상(phase)은 반사율에 대한 계절적 요인에 의해 서로 반대로 나타났다(Figs. 7a-b). 육지가 반사율의 변동폭에 있어서 해양에 비해 3배 정도 컸다. 전지구적으로 해양이 증가 추세($0.38\pm 0.19\%/decade$)를 보이는 반면에 육지는 감소($-0.30\pm 0.03\%/decade$)를 보였다(Table 1, Fig. 7c). 그러나, 반사율은 전지구적으로 해양에서의 추세와 가깝게 증가 경향($0.17\%/decade$)을 보였다. 열대지역에서의 반사율 변동폭이 북반구나 남반구의 중·고위도 지역에 비해 현저하게 작은 것은 열대의 상당 부분을 점유하고 있는 위도 $20^{\circ}-30^{\circ}$ 부근의 아열대 고압대 및 열대 융승 지역에서 대기 칩강으로 인한 구름의 소산 또는 하층운의 발달과 관련이 있는 것으로 추정된다. 이와 같이 특정 지역에서 발생하는 구름의 종류와 양에 따라 반사율의 크기가 변하고, 결과적으로 반사율의 변화는 지구 복사평형 온도에 영향을 준다(Hartmann and Short, 1980; Stephen and Webster, 1981; 유정문·박경옥, 1994).

반사율 아노말리값은 전지구적으로 엘니뇨 시기(1982-83, 1986-87, 1991-92년)에 증가한 반면에 라니냐 시기(1988-89년)에 감소하였다($0.20\pm 0.06\%/decade$; Fig. 8c). 특히 아노말리값은 열대 지역에서 1982년과 1991-92년에 현저하게 증가하여 해수면 온도의 상승에

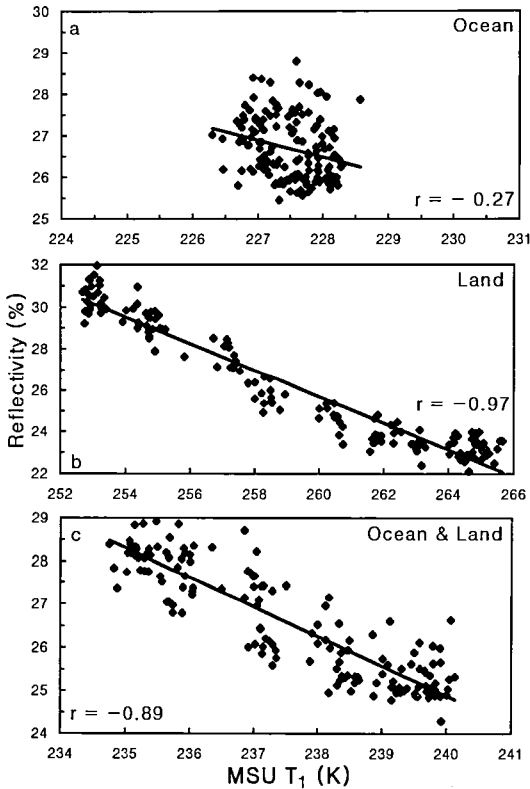


Fig. 10. Scatter diagrams of TOMS reflectivity versus MSU Ch1 brightness temperature (MSU T₁) during 1980-92 over the global (a) ocean, (b) land, and (c) ocean and land. The 'r' means correlation coefficient.

다른 구름 및 대류 활동의 증가를 반영하였다(Fig. 8d). 북반구 반사율의 시계열은 남반구나 전지구에 비해 1982-83년 엘니노 시기에 뚜렷한 증가를 보였다(Figs. 8a-c). 남반구 육지는 반사율의 월평균값 뿐만 아니라 그 아노말리의 변동에 있어서도 해양에 비해 현저하게 컸다(Figs. 7b, 8b). 또한 1991년 6월의 필리핀 피나투보 화산폭발 후에 전 지역에서 반사율 증가가 지속적으로 나타났다(Figs. 8a-d). 이것은 화산폭발 후에 생성되는 에어러솔 구름의 성층권 유입과 관련이 있는 것으로 추정된다(Ardanuy *et al.*, 1992). 그러나 1991년 6월의 엘니노 기간에 화산폭발과 엘니노가 반사율에 미친 상대적인 효과를 각각 정량화하기 위하여는 더 많은 연구가 필요하다. 한반도의 경우도 월평균 반사율과 그 아노말리의 시계열에 있어서 증가 추세(0.80-0.98%/decade)를 보였으며, 그 크기에 있어서 전지구

(0.17-0.20%/decade)보다 4-5배 컸다(Fig. 9).

반사율에 대한 MSU 채널1 온도와 관계에서, 전지구 해양의 음의 상관(-0.27)에 비해 전지구 육지에서 값(-0.97)이 높았으며 전지구의 해양 및 육지의 평균은 육지의 경우처럼 높은 상관(-0.89)을 나타냈다(Fig. 10 and Table 3). 이것은 해양에서 약 0.5, 육지에서 약 1.0인 마이크로파 방출율의 차이, 그리고 대류성 구름 발생이 활발한 해양 지역이 전지구적으로 제한적인 면적을 차지하고 있음을 반영한다. 육지의 경우 구름 발생시에 채널1 온도는 감소하는 반면에 반사율은 증가해 음의 상관을 나타내나, 해양의 경우에는 구름 발생 시에 채널1 온도와 반사율 모두가 증가하여 양의 상관을 나타낸다.

북반구에서 육지는 낮은 음의 상관(-0.21), 그리고 다른 두 지역(즉, 해양 그리고 해양 및 육지)은 무시할 만한 상관을 보였다(Table 3). 남반구에서는 육지가 양의 상관(0.20)을 나타내는 것으로 비추어 남극 주변의 해빙이 존재하는 곳에서는 구름 효과 뿐만 아니라 얼음 표면 방출 효과가 두 변수의 상관에 영향을 주는 것으로 추정된다. 얼음에 대한 MSU 채널1 마이크로파 방출율은 일반적으로 해양에 대한 것보다 크고 육지에 대한 것보다 작다(유정문 등, 1998). 열대지방에서 해양, 그리고 해양 및 육지 지역들은 유의적인 양의 상관(0.21-0.28)을 보이나 육지에서의 상관은 무시할만 하였다. 전지구 지역의 음의 상관에 비해 열대 지역이 양의 상관을 보이는 것은 대류가 활발한 열대 난수역 등에서의 높은 해수면 온도가 대류 및 구름 발생을 유도하면서 반사율을 높이는데 있는 것으로 추정된다(유정문·배정남, 1999). 한반도에서는 반사율과 하부 대류권 온도 사이에 양의 상관(0.32)이 나타나, 이 곳을 포함한 중위도 지역에서 경압과 통과로 인한 구름 및 강

Table 3. Temporal correlation over 156 months from 1980 to 1992 between the TOMS reflectivity and MSU channel 1 temperature data over five different regions.

	Northern hemisphere	Southern hemisphere	Globe	Tropics	Korea
Ocean	0.08	-0.01	-0.27	0.28	
Land	-0.21	0.20	-0.97	0.02	
Ocean & Land	-0.13	0.03	-0.89	0.21	0.32

수의 발달이 반사율을 증가시키는 것으로 추정된다.

결론

본 연구에서는 1979-92년의 기간의 Nimbus-7/TOMS 오존과 반사율 월평균값과 그 아노말리의 경년변화를 북반구, 남반구, 전지구, 열대, 그리고 한반도 부근 지역에 대하여 조사하였다. 또한, 1980-92년 기간의 오존에 대한 위성관측 MSU 채널4 (하부 성층권) 밝기온도 및 대기대순환 모델(NCEP, GEOS) 재분석 온도와의 상관, 그리고 반사율에 대한 위성관측 MSU 채널1 (하부 대류권) 밝기온도와의 상관을 각각 조사하였다.

오존전량은 봄에 최대, 가을에 최소인 뚜렷한 계절 변화와 함께 전지구적으로 감소 경향(-6.3 DU/decade), 그리고 엘니뇨보다는 화산 폭발시에 더 현저한 변동을 보였다. 특히, 오존전량 아노말리의 시계열은 엘치촌과 피나투보의 화산 폭발 후에 상당한 감소 경향을 보여, 화산 폭발시의 에어리솔에 의한 성층권 오존 파괴 메커니즘(Ahrens, 1994)을 뒷받침한다. 오존 경향과 관측 및 모델의 하부 성층권 온도 경향은 1980-92년 기간에 대하여 서로 양의 상관(0.2-0.7)을 보였으며, 기존의 모델 연구(Hansen *et al.*, 1995)와 일치하였다. 한반도 경향(-9.8~-13.5 DU/decade)은 전지구와 같은 감소 경향을 보이나, 그 크기에 있어서 전지구에 비해 1.5~2배 정도 컸다.

반사율 월평균값은 1979-92년 기간에 전지구적으로 다소 증가 경향(0.17%/decade)을 보였으며 1982-83년, 1991-92년의 엘니뇨의 특징을 잘 반영하였다. 반사율은 겨울에 극대(약 32%), 여름에 극소(약 23%)를 나타내는 연주기를 보였다. 반사율이 양반구 고위도에서 겨울에 최대로 나타나는 이유는 이 기간에 북반구의 빙하나 눈, 그리고 남반구 해빙의 증가에 있다고 추정되었다. 열대지역에서의 반사율 변동은 양반구의 고위도에 비하여 작게 나타났으며, 이는 아열대 고압대 및 열대 융승 지역에서 대기 침강으로 인하여 구름이 소산되거나 하층운의 발달로 인하여 낮은 반사율과 함께 그 변동도 작기 때문인 것으로 추정되었다.

반사율 아노말리값은 전지구적으로 엘니뇨 시기(1982-83년, 1991-92년)에 증가한 반면에 라니냐 시기(1988-89년)에 감소하여, 해수면 온도 상승(하강)에 따른 구름 및 대류활동의 증가(감소)를 반영하였다. 아노

말리 시계열은 1982년 엘치촌에 비해 1991년 피나투보 화산폭발 후에 전지구적으로 지속적인 반사율 증가를 보였다. 한반도의 경우도 반사율과 그 아노말리의 경년 변화에 있어서 전지구와 같은 증가 경향(약 0.90%/decade)을 보이나, 그 크기에서 전지구(0.17-0.20%/decade) 보다 4~5배 컸다.

반사율과 하부 대류권 온도는 경년 변화에 있어서 전지구적으로 서로 음의 상관(-0.89)을 보였으나, 대류 활동이 활발한 열대 지역에서는 낮은 양의 상관(0.2)을 보였다. 해양에서의 이러한 양의 상관은 구름 및 강수의 증가에 따라 채널1 밝기온도를 증가하게 하는 마이크로파 방출율의 효과를 반영하였다. 한반도 부근에서는 반사율과 하부 대류권 온도 사이에 양의 상관(0.32)이 나타나, 이 곳을 포함한 중위도 지역에서 경압과 통과로 인한 구름 및 강수의 발달이 반사율을 증가시키는 것으로 추정되었다.

본 연구에서는 1979-92년 기간의 TOMS 자료만이 오존전량 및 반사율의 경년변화 분석에 사용되었으나, 1992년 이후에도 불연속이지만 두 변수에 대한 다른 위성자료(METEOR3, ADEOUS, EPTOMS)들이 존재한다. 장차 연구에서는 이들 자료를 포함한 시계열 분석이 시도될 예정이다. 오존과 하부성층권 온도 사이에, 그리고 반사율과 하부대류권 온도 사이에 유의적인 상관은 오존 및 반사율의 위성관측 자료가 기후변동에서의 피이드백 작용 이해에 유용하게 사용될 수 있음을 제시한다.

사사

이 연구는 1999년도와 2000년도 학술진흥재단 선도 연구자 지원 연구비(과제번호; KRF-99-041-D00445 D6201)의 지원으로 이루어졌으며, 이에 감사드린다. 본 논문을 위하여 좋은 지적을 해주신 부산대학교 김재환 교수와 기상연구소 안명환 박사께 감사드린다. 그 동안 원고정리를 도와준 이화여자대학교 과학교육과 문수현, 한지연, 김태연에게도 감사를 표한다.

참고문헌

오재호·정준희·김정우, 1994, 성층권 오존 감소가 대기의 수직적 기온 분포와 지표면 UV-B 복사량에 미치는 영향.

- 한국기상학회지, 30(2), 261-287.
- 유정문 · 김진남, 2000, 하부성층권 온도에 대한 위성자료와 모델 재분석들과의 비교. 한국지구과학회지, 21(2), 137-158.
- 유정문 · 박경숙, 1994, 일차원 에너지평형 모델에 의한 권운의 온실효과. 한국지구과학회지, 15(2), 73-80.
- 유정문 · 배정남, 1999, TOMS 반사율의 시·공간 변동 및 하부 대류권 열적 상태와의 상관. 한국지구과학회지, 20(5), 520-533.
- 유정문 · 이재연 · 김경익, 1998, 마이크로파 영역에서 대기물 현상의 산란효과; 위성관측 밝기온도와 레이더 강수율과의 비교. 한국기상학회지, 34(4), 509-522.
- 유정문 · 이혜란, 2000, 오존 전량의 시·공간 변동 및 대기 열적 상태와의 상관. 한국기상학회지, 36(1), 75-86.
- 조희구 · 김혜경 · 이규태, 1994, 서울의 오존전량 변동과 경향. 한국기상학회지, 30(2), 219-234.
- Angell, J.K., 1999, Comparison of surface and tropospheric temperature trends estimated from a 63-station radiosonde network, 1958-1998. *Geophysical Research Letters*, 26(17), 2761-2764.
- Ahn, J.-B. and Shin, D.-W., 1998, Response of total ozone to ENSO in the tropical region. *Korean Journal of Atmospheric Science*, 1, 70-77.
- Ahrens, C.D., 1994, *Meteorology Today*, 5th ed., West Publishing Company, 591 p.
- Ardanuy, P.E., Kyle, H.L., and Hoyt, D., 1992, Global relationships among the earth's radiation budget, cloudiness, volcanic aerosols, and surface temperature. *Journal of Climate*, 5, 1120-1139.
- Betts, A.K. and Ball, J.H., 1997, Albedo over the boreal forest. *Journal of Geophysical Research*, 102, 28901-28909.
- Bojkov, R., Bishop, L., Hill, W.J., Reinsel, C., and Tiao, G.C., 1990, A statistical analysis of revised Dobson total ozone data over the northern hemisphere. *Journal of Geophysical Research*, 90, 7967-7976.
- Doty, B.E., 1992, Using the Grid Analysis and Display System (GrADS), Center for Ocean-Land-Atmosphere Interactions, Maryland, USA, 41 p.
- Fusco, A.C. and Salby, M. L., 1999, Interannual variations of total ozone and their relationship to variations of planetary wave activity. *Journal of Climate*, 12(6), 1619-1629.
- Gribbin, J.R., 1988, *The Hole in the Sky*, Bantam books, Academic Press, 192 p.
- Hansen, J., Wilson, H., Sato, M., Ruedy, R., Shah, K., and Hansen, E., 1995, Satellite and surface temperature data at odd? *Climatic Change*, 30, 103-117.
- Hartmann, D.L. and Short, D.A., 1980, On the use of earth radiation budget statistics for studies of clouds and climate. *Journal of the Atmospheric Science*, 37, 1233-1250.
- Herman, J.R. and Bhartia, P.K., 1997, Global distribution of UV-absorbing aerosols from Nimbus 7/TOMS data. *Journal of Geophysical Research*, 102, 16911-16922.
- Herman, J.R. and Celarier, E.A., 1997, Earth surface reflectivity climatology at 340-380 nm from TOMS data. *Journal of Geophysical Research*, 102, 28003-28011.
- Ho, C.-H, Kim, K.-M., Han, D.-S., and Ahn, M.-H., 1998, A stratosphere-troposphere temperature seesaw and its connection with total ozone over Korea. *Journal of the Korean Meteorological Society*, 34(1), 122-127.
- IPCC, 1995, *Climate Change 1995-The Science of Climate Change*, Houghton, J.T., Filho, L.G., Callander, B.A., Harris, N., Katlenberg, A., and Maskell, K. (eds.), Cambridge University Press, New York, USA, 572 p.
- Kayano, M.T., 1997, Principal modes of the total ozone on the Southern Oscillation timescale and related temperature variations. *Journal of Geophysical Research*, 102, 25795-25806.
- Kerr, J.B., 1991, Trends in total ozone at Toronto between 1960 and 1991. *Journal of Geophysical Research*, 96, 20703-20709.
- Madison, J.P., Ground, C.J., Weickmann, A. M., Healy, K.R., and Wills, R. J., 1996, Comparison of Mount Pinatubo and El Chichon volcanic events: Lidar observations at 10.6 and 0.69 μ m. *Journal of Geophysical Research*, 101, 3929-3940.
- McPeters, R.D., Bhartia, P.K., Krueger, A.J., and Herman, J.R., 1996, Nimbus 7 Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) Data Products User's Guide. NASA/Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD 20771, USA, 67 p.
- Niu, X., Xufend, N., Frederick, J.E., Stein, M.L., and Tiao, G. C., 1992, Trends in column ozone based on TOMS data: Dependence on month, latitude, and longitude. *Journal of Geophysical Research*, 97, 14661-14669.
- Prabhakara, D., Iacovazzi, R., Yoo, J.-M., and Dalu, G., 1998, Global warming deduced from MSU. *Geophysical Research Letters*, 25, 1927-1930.
- Ramaswamy, V., Schwarzkopf, M.D., Stouffer, R.J., and Tett, S., 1996, A search for human influences on the thermal structure of the atmosphere. *Nature*, 382, 39-46.
- Shindell, D.T., Rind, D., and Lonergan, P., 1998, Increased polar stratospheric ozone losses and delayed eventual,

- recovery due to increasing greenhouse gas concentrations. *Nature*, 392, 589-592.
- Spencer, R.W. and Christy, J.R., 1990, Precise monitoring of global temperature trends from satellite. *Science*, 247, 1558-1562.
- Spencer, R.W. and Christy, J.R., 1992a, Precision and radiosonde validation of satellite gridpoint temperature anomalies, Part I: MSU channel 2. *Journal of Climate*, 5, 847-857.
- Spencer, R.W. and Christy, J.R., 1992b, Precision and radiosonde validation of satellite gridpoint temperature anomalies, Part II: A tropospheric retrieval and trends during 1979-1990. *Journal of Climate*, 5, 858-866.
- Spencer, R.W. and Christy, J.R., 1993, Precision lower stratospheric temperature monitoring with the MSU: Technique, validation and results 1979-1991. *Journal of Climate*, 6, 1194-1204.
- Spencer, R.W. and Christy, J.R., and Grody, N.C., 1990, Global atmospheric temperature monitoring with satellite microwave measurements: Method and results 1979-84. *Journal of Climate*, 3, 1111-1128.
- Stanford, J.L., and Ziemke, J.R., 1996, A practical method for predicting midlatitude total column ozone from operational forecast temperature field. *Journal of Geophysical Research*, 101, 28767-28773.
- Stephens, G.L. and Webster, P.J., 1981, Clouds and climate: Sensitivity of simple system. *Journal of the Atmospheric Science*, 38, 235-249.
- Yang, P. and Liou, K.N., 1997, Extinction efficiency and single-scattering albedo for laboratory and natural cirrus clouds. *Journal of Geophysical Research*, 102, 21825-21835.

2000년 9월 28일 원고 접수
2000년 11월 29일 수정원고 접수
2000년 12월 9일 원고 채택