

위성자료와 모델 재분석에서 유도된 중간 및 상부 대류권의 전지구 온도 경향

유정문* · 이지은

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

Global Temperature Trends of Middle and Upper Tropospheres Derived from Satellite Data and Model Reanalyses

Jung-Moon Yoo* · Ji-Eun Lee

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

Abstract: Global temperature trends of middle and upper tropospheres have been investigated using the data of satellite-observed Microwave Sounding Unit (MSU) channels 2-3(Ch2, Ch3) during the period of 1980-97 and three GCM (NCEP, ECMWF, GEOS) reanalyses during 1981-93. The global, hemispheric and tropical anomalies, computed from the data during the common period, have been intercompared in the following regions; ocean, land, and both ocean and land. The correlation with MSU in midtropospheric temperatures is the best ($r=0.81\sim 0.95$) in ECMWF, particularly over the tropics. The correlations in upper troposphere are lower ($r=0.06\sim 0.34$) due to poor quality of MSU Ch3 data, consistent with previous result. The midtropospheric trends during 1981-93, obtained from MSU and three GCMs, show the global warming of $0.01\sim 0.18\text{K decade}^{-1}$. The warmest years have been 1987 and 1991 in El Niño while the coolest, 1993 and 1994 in La Niña. The warming ($0.12\sim 0.13\text{K decade}^{-1}$) in MSU over global ocean is similar to that over global land. The largest discrepancy in upper troposphere between MSU and GCMs has been found in the transition period (1984. 12-1985. 1) from NOAA 9 to 10, because of a sizable error in the MSU Ch3. The midtropospheric trends near the Korean peninsula during 1981-93 are almost negligible ($-0.02\text{K decade}^{-1}$) in MSU, but indicate significant warming ($0.25\sim 0.43\text{K decade}^{-1}$) in GCMs. The trends are crosschecked and discussed with other two independent MSU data of Spencer and Christy (1992a, 1992b).

Key words: Temperature trend, Middle troposphere, Upper troposphere, Satellite data, MSU channels 2-3, NCEP, ECMWF, GEOS, GCM, Reanalyses

요약: 중간 및 상부 대류권의 전구 온도 경향을 1980-97년 기간의 위성관측 MSU 직하점 채널2-3의 밝기온도와 1981-93년 기간의 세 종류의 대순환모델(NCEP, ECMWF, GEOS) 재분석 자료를 통하여 조사하였다. 전구, 북반구, 남반구, 열대 지역에 대한 이들 자료의 아노말리가 공통 기간에 대하여 다음 지역에서 세부적으로 계산된 후 비교되었다; 해양, 육지, 해양 및 육지. 중간 대류권의 경우에 MSU에 대한 모델들의 상관은 ECMWF에서 가장 높았으며($r=0.81\sim 0.95$), 이러한 경향은 열대에서 현저하였다. 상부 대류권에서의 상관은 MSU 채널3 자료의 부정확성으로 인하여 낮았으며($r=0.06\sim 0.34$), 이는 기존 연구와 일치하였다. 중간 대류권에서의 전구 온도 경향은 위성관측과 모델들에서 $0.01\sim 0.18\text{K decade}^{-1}$ 의 온난화를 보였다. 여기서 엘니노 기간인 1987, 1991년에 양의 아노말리, 그리고 라니냐 기간인 1993, 1994년에는 음의 아노말리를 보였다. MSU에서 온난화 경향의 세기는 해양과 육지에서 비슷하였다($0.12\sim 0.13\text{K decade}^{-1}$). 상부 대류권에서 MSU와 모델들 사이의 가장 큰 불일치는 MSU 채널3 자료의 오차로 인하여 NOAA 9와 10의 교체 기간(1984. 12-1985. 1)에 나타났다. 한반도 부근의 중간 대류권에서 온도 경향은 1981-93년 기간에 위성관측에서 거의 무시할 만하였으나($-0.02\text{K decade}^{-1}$), 모델들에서 상당한 온난화($0.25\sim 0.43\text{K decade}^{-1}$)를 보였다. 이러한 경향들을 Spencer and Christy(1992a, 1992b)의 독립적인 MSU 결과들과 비교·토의하였다.

주요어: 온도경향, 중간 대류권, 상부 대류권, 위성관측, MSU 채널2-3, NCEP, ECMWF, GEOS, 대기대순환 모델, 재분석

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

서론

기후 시스템이 자연적으로 또는 인간 활동에 의해서 점차 변화하는 기후변동은 최근에 들어 현저하게 지구 온난화 효과, 엘니뇨 세기의 강화, 극심한 가뭄과 홍수 등 이상 기상 현상을 나타내고 있다. 이러한 현상은 인간 생활과 밀접하게 관련되어 있으므로, 기후변동의 열적 측면에서 지구 온도의 증감 경향을 정확하게 파악하고자 하는 다양한 연구가 기존 관측이나 위성관측 자료를 사용하여 진행 중에 있다. 그러나 자료 및 결과의 정확성에 대한 많은 논란이 있으며, 지상과 중간 대류권의 온도 경향들 사이에서 나타난 불일치에 대한 원인 규명에 관심이 높아지고 있다(Hansen *et al.*, 1995). 대류권의 온도 경향에서는 Christy *et al.*(1998)는 1979-97년 기간에 약한 냉각화($-0.05\text{K decade}^{-1}$)를 주장한 반면, Hansen *et al.*(1995)와 Prabhakara *et al.*(1998)은 온난화를 주장하였다.

지상 및 상층의 온도 경향 연구에 사용되는 자료에는 백엽상과 라디오존데 자료, 위성관측, 그리고 모델 재분석 등이 있다. 이 중에 백엽상(또는 라디오존데) 자료는 지표면 중 제한된 육지 그리고 도시에 편중되어 있어 열섬효과와 같은 도시화에 따른 영향을 포함할 수 있다. 따라서 이 자료를 사용하여 전지구적인 대기 열적 상태를 파악하는데 많은 제약이 있다. 그러므로 복사계 점정과 제한된 수명, 적도 통과 시간의 불일치 그리고 궤도의 표류 등의 단점에도 불구하고 하루 동안 지구 지역의 여러 대기층을 측정하는 위성관측이 최근에 활발히 이용되어 왔다. 또한 관측자료가 부족한 지역의 대기시스템 물리 역학과정을 통찰·이해하는데 이점이 있는 대기대순환 모델의 재분석이 독립된 자료로써 위성자료와 함께 이용되어 왔다. 그러나 이들 자료들은 각기 장·단점을 내포하고 있어서 그 시계열의 상호·비교를 통하여 온도 경향의 정확성을 평가하는 것이 중요하다.

Spencer and Christy(1990, 1992a, 1992b)와 Spencer *et al.*(1990)은 중간 대류권의 열적 상태를 반영하는 위성관측 MSU(Microwave Sounding Unit) 채널2(53.74 GHz) 자료로부터 추정된 지구온도가 종래의 지표 관측 값과 높은 상관을 갖는다고 주장한 바 있다. 이들 연구에서 $\pm 0.01\text{K}$ 의 정확도를 갖는다고 보고된 채널2 자료는 Christy(1995)와 Nicholls *et al.*(1996)에서와 같이 전

구 온도의 추세 분석에 활발히 사용되어 왔다.

지난 20여년간 지구 온난화에 관한 많은 논란이 제기되면서, 여러 선행 연구들이 다양한 방법으로 전구의 온도 증감 경향을 측정하였다(e.g., Angell, 1988; Hansen and Lebedoff, 1988; Spencer and Christy, 1990). 이와 관련하여 위성관측 자료로부터 유도한 지구 온도 경향(Spencer and Christy, 1992a, 1992b; 유정문·김경순, 1997), 그리고 지상 및 위성 관측자료를 비교·분석하여 유도한 경년 변동(Hurrell and Trenberth, 1998) 등이 있다. 그러나 위성관측(MSU) 자료와 모델 재분석 자료의 상호 비교를 통하여 중간 및 상부 대류권의 온도 경년 변화를 조사한 연구는 국내외적으로 미약한 편이다.

위성자료와 GCM 결과간의 비교에서 Hurrell and Trenberth(1992)는 1982-89년 기간 동안 MSU와 ECMWF 모델의 월평균 온도변동들이 서로 일치함을 보임으로써 모델자료의 유용성을 지적하였다. 또한 Basist and Chelliah(1997)는 MSU 밝기온도와 NCEP/NCAR 모델 재분석 자료를 비교·분석하여 위성관측과 모델 자료 간의 일치 정도를 평가하였다. Hansen *et al.*(1995)은 MSU 관측과 GISS 모델로부터 각각 추정된 전구의 온도 증감 경향들이 대체로 일치함을 보였다.

본 연구에서는 지구 및 한반도에 대한 온도경향을 파악하기 위해 1980-98년 기간의 MSU 위성자료, 그리고 1980-97년의 NCEP, 1980-93년의 ECMWF, 1981-1994년의 GEOS의 대기대순환 모델의 재분석 자료로부터 재구성된 중간 및 상부 대류권의 월평균 온도를 이용하여 경년 변화를 조사하였다(본 연구에서는 NCEP/NCAR 모델을 편의상 NCEP 모델로 칭함). 또한 이들 자료의 비교를 통하여 온도 경향에 대한 불일치의 원인을 분석하고 위성관측의 오차 및 유용성, 그리고 역으로 모델 개선 가능성을 조사하였다. 추가하면, 중간 및 상부 대류권 온도 경향들의 상호 관련성을 분석하고자 하였다. 이러한 시도들은 현재 자료에서 제시된 온도 변화를 이미 알려진 엘니뇨, 화산폭발, 그리고 오존 감소 등의 이상 기후 현상과 관련시킴으로써 기후 변동에서의 열적 메커니즘을 포괄적으로 이해하는데 도움을 준다.

본 연구의 목적은 중간 및 상부 대류권의 열적 상태를 각각 나타내는 MSU 채널2, 채널3(54.96 GHz)의 밝기온도와 세 종류의 대순환모델 재분석 자료들로부터

전구 온도의 경년 변화를 조사하고 자료들간의 상대적인 정확성을 평가하는데 있다. 추가하면, 한반도에 대한 조사에서는 본 연구에서 유도된 직하점에서의 밝기온도(MSU2), Spencer and Christy(1992a)가 여러 주사 자료를 사용하여 유도한 밝기온도(SC2), 그리고 Spencer and Christy(1992b)가 하부 대류권 온도를 위하여 유도한 밝기온도(SC2R; 성층권 효과가 제거됨)들을 비교·분석하는데 있다.

자료 및 방법

본 연구에서는 전구 지역에 대한 중간 및 상부 대류권의 밝기온도 자료로 위성관측(MSU) 직하점 자료와 세 개의 GCM(NCEP, ECMWF, GEOS) 재분석 자료가 사용되었다. 재분석은 어떤 시점에서 시간에 따라 고정된 분석·예보 시스템을 사용하기 때문에, 자료동화 시스템에서의 변화와 관련된 잘못된 기후변동을 제거하

는데 효과적이다. 이것은 위성자료 및 기존의 가능한 모든 자료를 초기 조건으로 하여 유도되므로 위성자료와 완전히 독립적이지는 않지만, 상호 비교를 통하여 위성자료의 정확성을 진단하고 모델을 개선하는데 사용될 수 있다. MSU와 GCM 자료들은 전구, 북반구, 남반구, 열대에 대하여 각각 해양, 육지, 해양 및 육지에서의 밝기온도로 분류된 후에 각 자료의 지역별 경년 변화가 위성과 모델의 공통 기간(1981-93년)에 대하여 비교·분석되었다.

MSU 밝기온도

1978년 후반부터 현재까지 약 2년 간격으로 발사되어 지구의 극궤도를 돌고 있는 업무용 극궤도 위성 NOAA 계열에 탑재된 MSU 복사계는 60GHz부근의 네 가지 진동수(또는 채널)에서 대기의 산소분자에 의한 열적 방출을 측정한다. 각 채널에서의 밝기온도는 해당 가중함수(weighting function) 중심이 위치하는 고도의

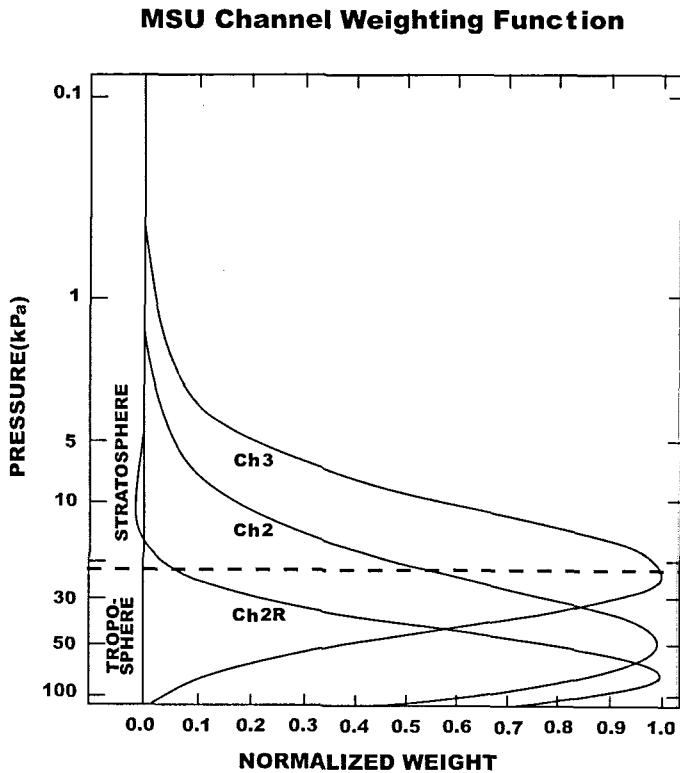


Fig. 1. Temperature weighting functions for MSU channel 2(Ch2; 53.74 GHz) and channel 3(Ch3; 54.96 GHz) for the nadir and channel 2R from a 22° view angle through a U. S. Standard atmosphere(after Hurrell and Trenberth, 1998; Spencer and Christy, 1992a). The dashed line represents the level of the tropopause.

열적 구조를 반영한다. 이 연구에서 사용된 채널2와 채널3 밝기온도는 각각 중간대류권(850-400hPa), 그리고 상부대류권(200hPa) 부근의 열적 상태를 반영한다(Fig. 1). 가중합수 최대값이 하부 대류권에 존재하는 채널1(50.3GHz) 밝기온도는 표면 방출률과 구름 및 강수에 민감하기 때문에 전구 온도경향을 보다 정확하게 조사하기 위하여는 이들 변수에 덜 민감한 채널2 밝기온도를 이용하는 것이 바람직하다(채널1 가중합수는 Fig. 1에서 제시되지 않았음). 그러나 장기간의 위성자료는 2년 정도의 제한된 위성 수명으로 인한 복사계 수감부의 불연속, 위성궤도의 표류(drift)에 의한 오류, 그리고 위성간에 관측시간의 불일치 등을 포함하기 때문에 온도 경향에 오차를 줄 수 있다. 또한 채널2 시그널은 600hPa 부근에 대하여 최대이지만, 성층권도 일부(15~25%; Spencer and Christy, 1992b) 포함하고 있다. 특히 대류권계면은 중·고위도에서 저위도에 비하여 낮게(200~300hPa) 위치함으로(Hoinka *et al.*, 1996), 채널2는 고위도에서 더 큰 오차를 내포할 수 있다.

본 연구의 MSU 채널2-3 밝기온도는 주변감광(limb-darkness)으로 인한 오차를 제거하기 위해 11개 주사(scan) 중에 직하점 자료에서 유도되었으며 Prabhakara *et al.*(1998)의 것과 유사하다. 그러나 기존 연구가 위성간에 관측시간과 수감부의 차이로 발생하는 자료에서의 일변화 효과와 복사계의 검정오차 등을 전구별로 보정한 반면에, 본 연구는 각 격자마다 보정하였다.

NOAA 위성의 경우에 계열의 번호가 짝수인 위성은 오전, 오후 7시 30분에, 홀수 위성은 오전, 오후 2시 30분에 적도를 통과하며 관측한다. 따라서 위성간에 관측시간이 중복되는 월별 온도자료를 이용해 위성들간의 차이를 일으키는 두 가지 근본적인 원인을 제거할 수 있다. 그 중의 하나는 각각의 위성에 다른 수감부들이 탑재되어 있기 때문에 발생하며, 다른 원인은 위성들이 특정 지역을 서로 다른 태양시에서 관측한다는 데서 생긴다. 예를 들면, MSU 채널2 밝기온도(T_2)는 표면상태 변화에 대해 덜 민감함에도 불구하고, 여전히 육지에 대한 오후 2시 반의 T_2 는 오후 7시 반보다 더 높게 관측될 수 있다. 그러므로 오후 2시 반에 관측을 하는 홀수 위성의 밝기온도값은 같은 날짜에 같은 장소를 관측해도 오후 7시 반에 관측하는 짝수 위성보다 높게 나타난다.

7개의 위성계열로 구성된 1980-98년 기간의 자료가

본 연구에서 사용되었는데, 하나의 장기간 시계열을 마련하기 위해서 연속적인 두 개 위성들의 중복기간 시계열들을 비교하여 보정하였다. 여기서 관측 기간이 중첩된 약 1년의 자료를 이용하였다. 그러나 NOAA-9과 10의 경우는 그 중첩 기간이 1986년 12월에서 1987년 2월까지 약 50일밖에 되지 않아 자료의 보정 및 연속성에 많은 문제점을 내포하고 있다. 다음에 비교적 관측수명이 길고 또한 본 연구 관측자료의 초기 부분을 형성하는 NOAA-6를 기준으로 다시 보정하여 최종 자료를 얻었다(유정문·김경순, 1997). 이러한 과정을 통하여 위성들의 표본 관측 시간의 차이로 인한 오차를 보정할 수 있다. 사용된 7개 위성계열들은 유정문·김소현(1998) 연구에 자세히 설명되어 있다.

재분석 온도; NCEP, ECMWF, GEOS

NCEP 및 GEOS 재분석 온도에 대한 구체적인 내용은 유정문·김진남(2000)에 서술되어 있다(Schubert *et al.*, 1993; Kalnay *et al.*, 1996). 본 연구에 사용된 NCEP 재분석은 1980-97년 기간에 대해 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 격자 간격의 전구 자료를 GrADS(Doty, 1992) 그래픽 프로그램을 이용하여 위도 $2^\circ \times$ 경도 3° 격자로 전환된 자료이다. 여기서는 가중합수를 기초로 17개의 표준 고도층(1000, 925, 850, 700, 600, 500, 400, 300, 250, 200, 150, 100, 70, 50, 30, 20, 10hPa) 중 채널2와 채널3에 해당하는 온도를 재구성하기 위해 각각 14개, 17개층의 자료를 사용하였다(Tables 1 and 2). 1981-94년 기간의 GEOS 재분석은 초기 위도 $2^\circ \times$ 경도 2.5° 에서 위도 $2^\circ \times$ 경도 3° 격자로 전환된 후, 18층(1000, 950, 900, 850, 800, 700, 600, 500, 400, 300, 250, 200, 150, 100, 70, 50, 30, 20 hPa) 중 16층과 18층 자료를 이용하여 각각 채널2와 채널3 온도로 재구성된 것이다.

ECMWF 재분석 온도에 관한 구체적인 설명은 Gibson *et al.*(1997)과 유정문 등(1999a)의 연구에 제시되어 있다. 본 연구에서 사용된 자료는 초기 상태의 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 격자를 위도 $2^\circ \times$ 경도 3° 로 전환된 것이며, 이는 17층(1000, 925, 850, 775, 700, 600, 500, 400, 300, 250, 200, 150, 100, 70, 50, 30, 10 hPa)의 기압면에서 이용가능하다(Tables 1 and 2). 여기서는 17층 기압면 중에서 14층과 17층 자료로부터 각각 채널2와 3의 온도를 재구성하였다.

Table 1. The weighted values and layer thicknesses(ΔP ; hPa) used for the calculation of corresponding MSU Ch2 temperature from the NCEP, ECMWF and GEOS reanalyses.

Pressure altitude	Weighted value						Layer thickness (ΔP)		
	NCEP		ECMWF		GEOS		NCEP	ECMWF	GEOS
	Land	Ocean	Land	Ocean	Land	Ocean			
50	1.5	1.5	.	.	1.5	1.5	20	.	20
70	3.5	3.5	1.5	1.5	3.5	3.5	25	20	25
100	6	6	3.5	3.5	6	6	40	25	40
150	12.5	12.5	6	6	12.5	12.5	50	40	50
200	20	20	12.5	12.5	20	20	50	50	50
250	26.5	26.5	20	20	26.5	26.5	50	50	50
300	33.5	33.5	26.5	26.5	33.5	33.5	75	50	75
400	46.5	46.5	33.5	33.5	46.5	46.5	100	75	100
500	57	58.5	46.5	46.5	57	58.5	100	100	100
600	61	63.5	57	58.5	61	63.5	100	100	100
700	60.5	64.5	61	63.5	60.5	64.5	125	100	100
775	.	.	60.5	64.5	.	.	.	125	.
800	.	.	.	.	57.5	62.5	.	.	75
850	55	61.5	55	61.5	55	61.5	112.5	112.5	50
900	.	.	.	.	52.5	60	.	.	50
925	52	60	52	60	.	.	75	75	.
950	.	.	.	.	49.5	59	.	.	50
1000	47	58	47	37.5	47	58	37.5	37.5	25

Table 2. The weighted values and layer thicknesses(ΔP ; hPa) used for the calculation of corresponding MSU Ch3 temperature from the NCEP, ECMWF and GEOS reanalyses.

Pressure altitude	Weighted value			Layer thickness (ΔP)		
	NCEP	ECMWF	GEOS	NCEP	ECMWF	GEOS
10	3	3	.	10	10	.
20	7.5	.	7.5	10	.	15
30	13	13	13	15	15	15
50	28	28	28	20	20	20
70	49	49	49	25	25	25
100	78	78	78	40	40	40
150	115	115	115	50	50	50
200	139	139	139	50	50	50
250	140	140	140	50	50	50
300	130	130	130	75	75	75
400	92	92	92	100	100	100
500	55.5	55.5	55.5	100	100	100
600	35	35	35	100	100	100
700	20	20	20	125	87.5	100
775	.	13	.	.	70	.
800	.	.	11	.	.	75
850	9	9	9	112.5	70	50
900	.	.	5	.	.	50
925	4	4	.	75	75	.
950	.	.	3	.	.	50
1000	2	2	2	37.5	37.5	25

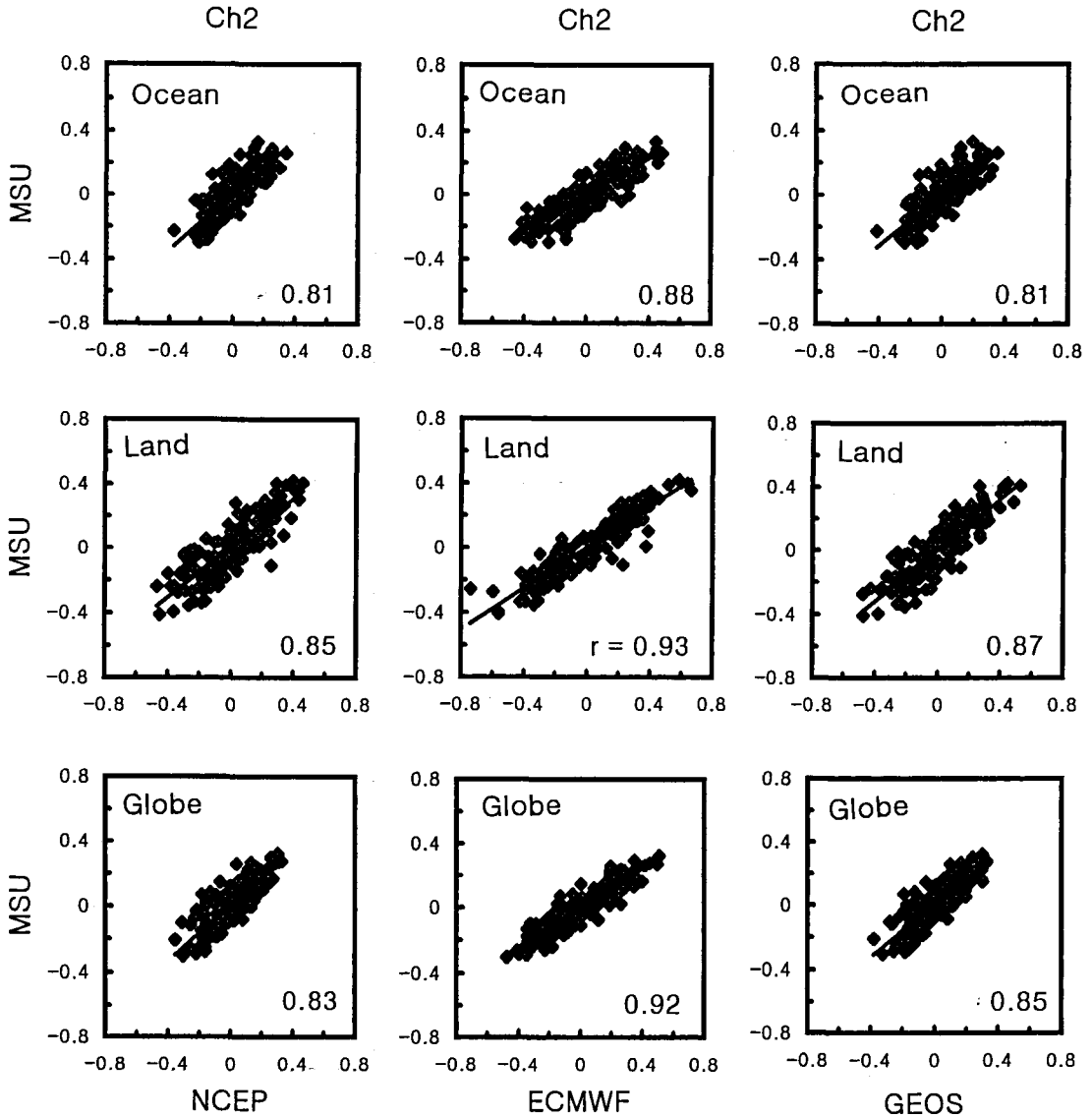


Fig. 2. Scatter diagrams of monthly mean Ch2 MSU temperature anomalies versus corresponding NCEP, ECMWF, GEOS reanalyses over the globe. The number in the figure means correlation coefficient.

상관 및 시계열 분석 방법

전구 및 지역별 온도 증감 경향을 조사하기 위하여 위도 $2^\circ \times$ 경도 3° 의 격자 자료는 전구, 북반구, 남반구, 열대(30N-30S) 지역에 대해 분류된 후, 다시 각각 해양, 육지, 해양 및 육지에 대해 세분화되었다. 온도의 경년 변화를 조사하는데 있어서 연주기를 제거한 아노말리를 이용하였다. 또한 위성관측과 모델 재분석간의 상관을 1981-93년의 공통 기간에 대하여 계산하였다.

한 격자 내에 50% 이상의 면적이 육지인 경우에 그 격자 내의 관측값을 육지 온도, 그리고 반대 경우에는 해양 온도로 가정하였다. 이런 방법으로 각각의 격자가 육지와 해양으로 분류한 후에, 예를 들면, 북반구 경우에 북반구 내의 육지와 해양 자료들만의 평균을 각각 계산하였다. 그 다음에 같은 방법으로 구한 남반구의 것과 함께 평균해 전구의 육지, 해양에 대한 온도 평균값을 구하였다. 이 과정에서 위도에 따른 면적 변화의

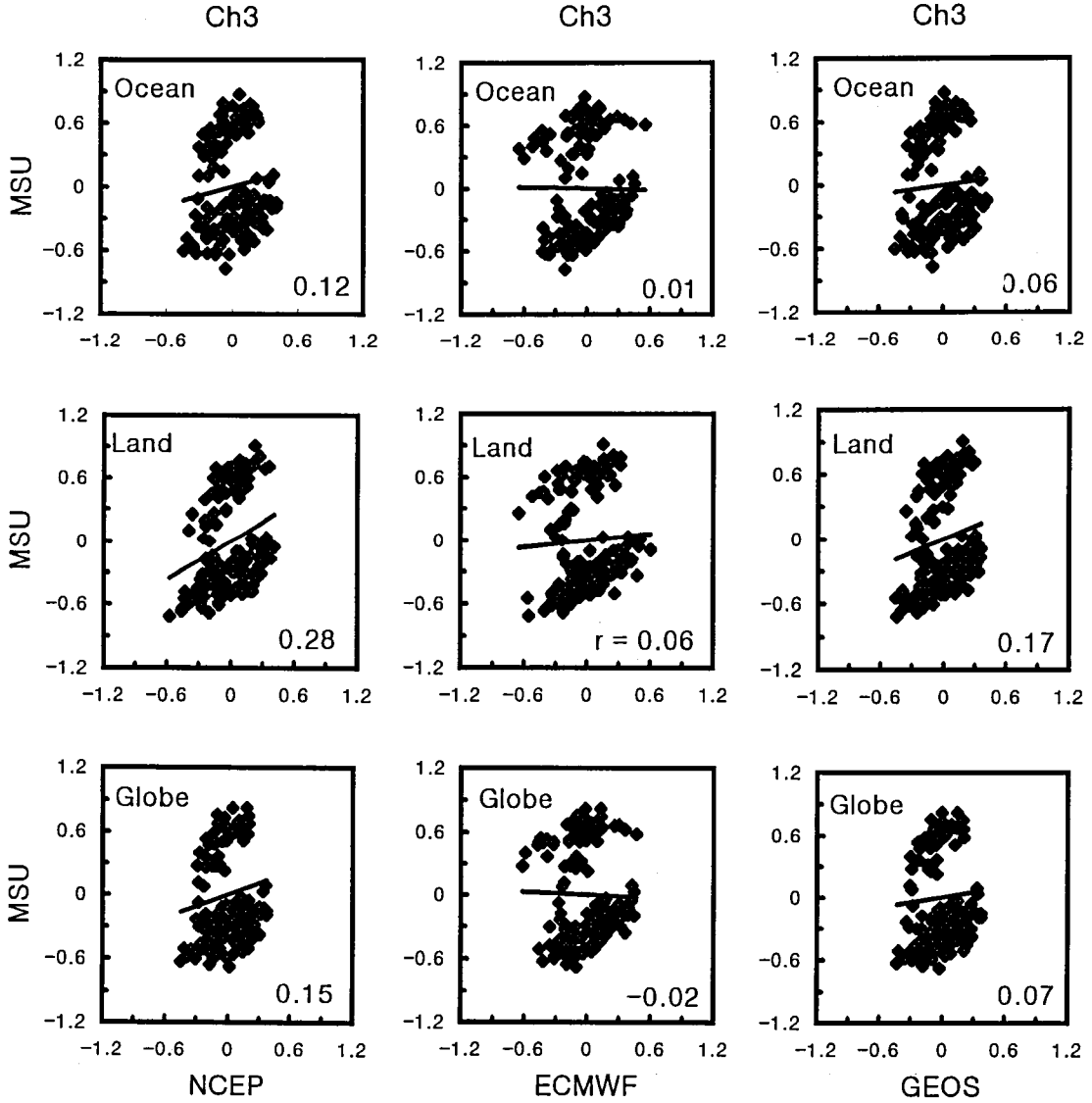


Fig. 3. Same as in Fig. 2 except for Ch3.

효과를 고려하기 위하여 코사인 위도 가중(cosine latitude-weighting)을 적용하였다.

위성자료와 모델 재분석 사이의 상관

1981-93년 기간의 월평균 중간(채널2) 및 상부 대류권(채널3) 온도 아노말리에 대한 위성자료와 모델 재분석 사이의 상관을 분산도표(Figs. 2-3)로 나타내었다.

중간 대류권의 온도

위성자료인 MSU와 대기대순환 모델(NCEP, ECMWF, GEOS) 재분석 자료 사이의 관계에서 ECMWF가 모든 지역에서 다른 모델보다 MSU와의 높은 상관($r=0.88 \sim 0.93$)을 보였다(Fig. 2). 이러한 경향은 해양, 육지, 해양 및 육지 모두에서 일관되게 나타났으며, MSU에 대한 GEOS 상관은 $0.81 \sim 0.87$, 그리고 NCEP은 $0.81 \sim 0.85$ 로 나타났다. 이들 값은 일반적으로 해양보다 육지에서 높았다. 라디오존데 등으로 관측자료가 풍부한 육

Table 3. Correlation coefficients between MSU Ch2 brightness temperature and model reanalyses during the period of 1981-93 over the regions of 'ocean', 'land', and 'ocean and land'. The words of 'North' and 'South' stand for northern and southern hemispheres, respectively.

	NCEP	ECMWF	GEOS
Globe			
Ocean	0.81	0.88	0.81
Land	0.85	0.93	0.87
Ocean & Land	0.83	0.92	0.85
North			
Ocean	0.83	0.92	0.86
Land	0.81	0.88	0.84
Ocean & Land	0.82	0.93	0.87
South			
Ocean	0.77	0.81	0.74
Land	0.86	0.89	0.84
Ocean & Land	0.79	0.83	0.78
Tropics			
Ocean	0.88	0.93	0.87
Land	0.87	0.95	0.89
Ocean & Land	0.88	0.93	0.88

지에 비하여 해양에서 부족한 것이 이에 대한 부분적인 원인으로 추정된다.

전구뿐만 아니라 북반구, 남반구, 열대 지역에서도 MSU에 대한 모델 재분석들의 상관은 ECMWF에서 가장 높았고, 다음으로 해양의 경우 NCEP에서 그리고 육지의 경우 GEOS에서 높았다(Table 3). 유의수준 0.05 (0.01)에서 검정한 결과에 의하면, 중간 대류권에서 위성관측과 모델 재분석 온도간의 상관값은 모두 0.13 (0.19)보다 커서 유의적이었다.

상부 대류권의 온도

중간 대류권 경우와는 대조적으로 상부 대류권 온도에서 ECMWF는 가장 낮은 상관(-0.02~0.06)을 보였다(Fig. 3). 여기서 온도값들은 추세선을 기준으로 양분되는데, 이것은 Christy *et al.*(1995)에서도 지적된 바와 같이 MSU 채널3 자료의 부정확성에 기인한 것으로 추정된다. MSU에 대한 모델 상관의 최대값(0.34)은 NCEP의 열대 해양 및 북반구 육지, 그리고 가장 낮은 상관(-0.02)은 ECMWF의 전구 해양 및 육지에서 나타났다(Table 4). 현재의 상관분석에서 표본의 수는 156개(1981-93년의 156개월)이므로, 유의수준 0.05에서 유의

Table 4. Same as in Table 3 except for the MSU Ch3. Values in bold are significant at the 95% level.

	NCEP	ECMWF	GEOS
Globe			
Ocean	0.12	-0.01	0.06
Land	0.28	0.06	0.17
Ocean & Land	0.15	-0.02	0.07
North			
Ocean	0.28	0.10	0.19
Land	0.34	0.12	0.22
Ocean & Land	0.28	0.07	0.18
South			
Ocean	0.12	0.04	0.09
Land	0.24	0.08	0.19
Ocean & Land	0.13	0.03	0.10
Tropics			
Ocean	0.34	0.23	0.33
Land	0.31	0.17	0.30
Ocean & Land	0.33	0.21	0.31

적인 값은 ±0.13의 절대값보다 큰 값이다.

중간 및 상부 대류권의 온도 경향

Figs. 4-6는 위성관측 또는 세 종류의 모델 재분석 자료의 월평균 중간 대류권 온도 아노말리로부터 조사된 시계열 및 온도경향이다. 그러므로 연주기가 제거된 현재 시계열들은 경년 변화를 나타낸다.

중간 대류권의 온도

1980-98년 기간의 위성관측 MSU 채널2 온도의 시계열들을 전구, 북반구, 남반구 그리고 열대 지역에 대하여 조사하였다(Fig. 4). 시계열들은 전지역에서 공통적으로 엘니뇨 기간인 1983, 1987, 1991, 1998년에 양의 아노말리, 그리고 라니냐 기간인 1982, 1985, 1989, 1996년에 음의 아노말리를 보였다. 위상들은 위의 네 지역의 시계열에서 거의 유사한 형태를 보였다. 북반구와 남반구는 1998년 엘니뇨시에 가장 큰 온도 상승을 보인 반면에 열대 지역은 1983년과 1987년 엘니뇨시에 큰 상승을 보였다.

해양과 육지 사이의 시계열 비교에서 전구 온도 변화폭이 해양보다 육지에서 비열차로 인하여 전반적으로 컸으나, 엘니뇨인 1983년 초반과 1992년에는 예외

적으로 작았다(Fig. 4a). 중간 대류권 온도는 그 변동에 있어서 해양과 육지에서 대체로 유사하나 1984년 후반과 1986년 중반에 육지에서 감소, 해양에서 증가하였으며 1989년에는 그 반대 현상을 보였다. 특히 현재의 아노말리 시계열들에서 1982년의 엘치촌이나 1991년의 피나투보 화산 폭발에 의한 온도 하강은 뚜렷하지 않았다. 따라서 화산활동은 중간 대류권보다는 하부 성층권의 열적 상태에 영향을 줌으로써 기후변동에 점진적으로 반영되는 것으로 추정된다(유정문·김소현, 1998).

MSU 온도 경향에서 중간 대류권의 전구 온도는 1980-98년 기간에 10년당 0.16K 상승하였다(Fig. 4 and Table 5). 지역별로 북반구는 가장 높은 상승(0.22K), 그리고 남반구는 낮은 상승(0.12K)을 보였다. 이러한 중간 대류권의 온난화에 있어서 북반구 경우에 육지의 온도 상승(0.23K decade⁻¹)이 해양(0.21K decade⁻¹)보다 더 큰 반면에, 남반구에서는 해양의 상승(0.12K decade⁻¹)이 육지(0.06K decade⁻¹)보다 약 2배 컸다. 육지에서의 변동폭은 북반구에서 가장 컸으며 남반구에서 가장 작았다. 열대 지역의 경우에 육지와 해양의 위상이 다른 지역에 비해 서로 유사하며, 남반구와 마

찬가지로 해양의 온난화(0.21K decade⁻¹)가 육지(0.16K decade⁻¹)보다 컸다.

Fig. 5는 1981-93년 공통 기간에 앞서 보인 위성관측과 모델 재분석의 중간 대류권 온도의 아노말리 시계열들 중에서 전구 결과만을 제시한 것이다. 중간 대류권에서의 전구 온도 경향은 이들 자료에서 0.01~0.18K decade⁻¹의 온난화를 보였으며 위성관측 MSU는 대략 중간값(0.12K decade⁻¹)을 보였다. 온난화 세기는 ECMWF에서 가장 강하였다(0.18K decade⁻¹), NCEP에서 가장 약하였다(0.01K decade⁻¹). 시계열들의 위상 및 변동폭은 전반적으로 유사하였으며, 위성관측은 위상에서는 NCEP 그리고 변동폭에서는 ECMWF와 가장 잘 일치하였다.

Table 5. Trends(K decade⁻¹) for midtropospheric temperature over the globe. The period of data are 1981-93. The values in parentheses mean the MSU trends during the period of 1980-98.

	MSU	NCEP	ECMWF	GEOS
Globe				
Ocean	0.12(0.16)	0.04	0.20	0.06
Land	0.13(0.19)	-0.06	0.13	0.01
Ocean & Land	0.12(0.16)	0.01	0.18	0.04
North				
Ocean	0.16(0.21)	0.01	0.26	0.07
Land	0.17(0.23)	-0.06	0.10	0.00
Ocean & Land	0.16(0.22)	-0.02	0.19	0.04
South				
Ocean	0.10(0.12)	0.06	0.16	0.05
Land	0.04(0.06)	-0.05	0.20	0.04
Ocean & Land	0.08(0.12)	0.05	0.17	0.04
Tropics				
Ocean	0.16(0.21)	-0.01	0.30	-0.01
Land	0.12(0.16)	-0.04	0.19	-0.01
Ocean & Land	0.14(0.19)	-0.02	0.26	-0.01

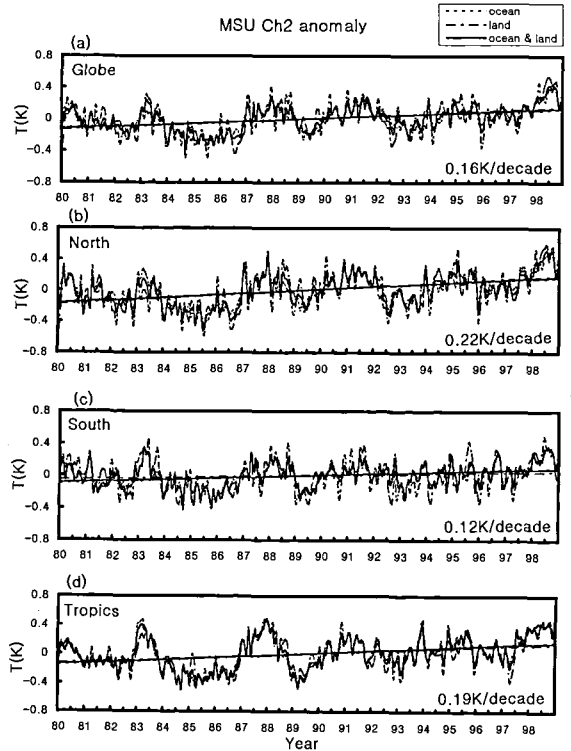


Fig. 4. Time series of the anomalies of monthly mean MSU Ch2 brightness temperatures(K) during the period of 1980-98 for the ocean (dotted), land (dashed), ocean and land (solid). The (a) 'Globe', (b) 'North', (c) 'South', and (d) 'Tropics' in the figures stand for globe, northern hemisphere, southern hemisphere and tropics(30N-30S), respectively. The values of temperature trends over the 'ocean and land' are also given. A smoothing function of (0.25, 0.5, 0.25) is used on the time series.

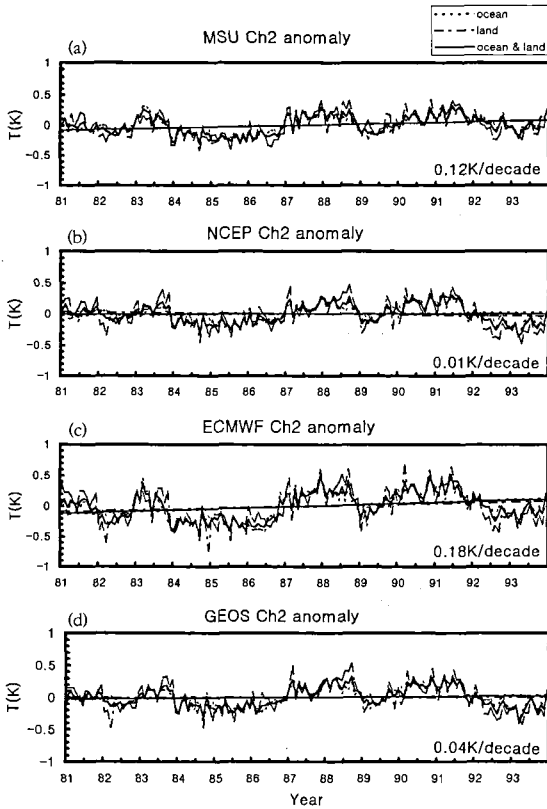


Fig. 5. Time series of the anomalies of (a) MSU, (b) NCEP, (c) ECMWF and (d) GEOS monthly mean Ch2 temperatures during the common period of 1981-93 for ocean(dotted), land(dashed), ocean and land(solid). A smoothing function of (0.25, 0.5, 0.25) is used on the time series.

위성관측 MSU의 1980-98년 자료에서 나타난 지구 온난화는 19년간 0.12K로 유정문 · 김경순(1997)의 연구에서 1980-88년 자료로부터 얻은 9년간 0.2K에 비하여 작았다(이 논문에는 제시되지 않았음). 그러나 지난 10년 동안 지구 온난화가 여전히 지속되고 있음을 알 수 있다.

상부 대류권의 온도

MSU 상부 대류권의 온도 시계열에서 가장 큰 특징은 NOAA7에서 NOAA9으로의 교체 시기인 1984년과 1985년 사이에 주목할 만한 급격한 온도 변동이 나타나는 것이다(Fig. 6a). 이러한 변동은 실제의 기후변화와는 무관한 인위적인 것으로써 두 위성간이 50일의

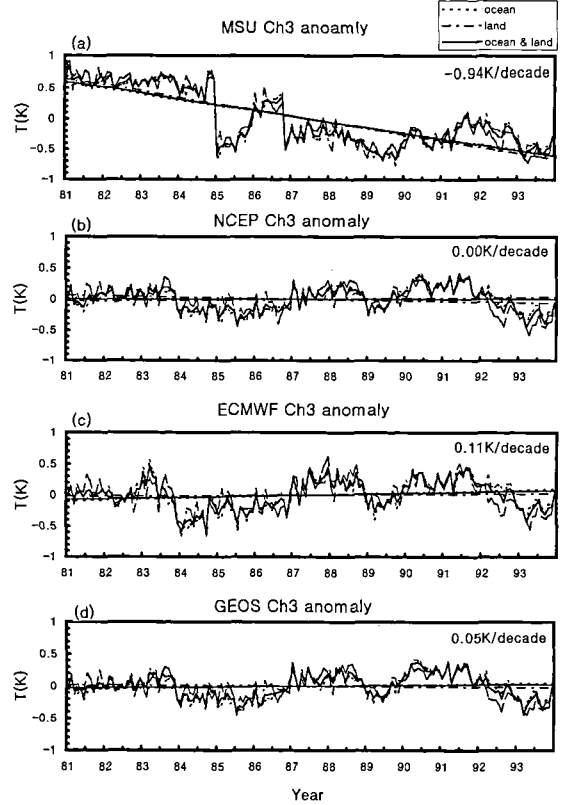


Fig. 6. Same as in Fig. 5 except for Ch3.

짧은 중복 관측기간(다른 위성 계열에서는 1년 이상)으로 인한 오차로 추정된다(Prabhakara *et al.*, 1998). MSU 채널3 자료의 문제점은 Spencer and Christy (1990)에서 지적한 바 있다. 육지와 해양에서의 위상들은 대체로 일치하며 양의 아노말리가 엘니뇨 기간인 1986-87, 1991-92년에 나타났다. 그러나 시계열에서 엘니뇨 영향과는 거의 무관하게 1981-84년에 0.5K 이상의 양의 아노말리가 나타났으며, 이는 자료의 부정확성으로 보인다. MSU 채널3 관측자료에서의 10년간 온도 감소율은 네 지역에서 1981-93년 기간에 0.9~1.0K이었다(Table 6). 상부 대류권 온도의 감소율이 큰 북반구 육지는 10년간 1.04K의 냉각화, 그리고 감소율이 가장 낮은 남반구 해양은 0.88K의 냉각화를 나타내었다.

MSU 위성관측과는 대조적으로 ECMWF와 GEOS의 상부 대류권 온도 시계열들은 지구 지역에 대하여 1981-93년 기간에 0.05~0.11K decade⁻¹의 온난화를 보였다(Figs. 6c-d). NCEP의 온도 추세는 같은 기간에 무시할 만하였다. 세 종류의 모델 재분석에서의 상부

대류권의 온난화(0.00~0.11K decade⁻¹)는 중간 대류권(0.01~0.18K decade⁻¹)과 큰 차이를 보이지 않았다(Figs. 5b-d, 6b-d). NCEP 시계열은 1990, 1991년에 양의 아노말리, 그리고 1985, 1993년에 음의 아노말리를 보였다(Fig. 6b). 여기서 육지는 1991년에, 그리고 해양은 1990년에 가장 큰 양의 아노말리를 나타내었다. 해양과 육지는 공통적으로 1983, 1988, 1990-91년에 양의 아노말리, 그리고 1984-86, 1993년에 음의 아노말리를 보였다.

ECMWF의 상부 대류권 온도 변동폭(1.2K)은 전구 지역에서 중간 대류권(1.0K)과 거의 유사하였다(Figs. 5c and 6c). 상부 대류권의 위상도 중간 대류권과 비슷하였다. ECMWF 시계열에서 전구 온도 상승이 큰 기간은 1987-88, 1990-91, 1983년이며 하강은 1984-85, 1993년에 나타났다(Fig. 6c). 네 지역에서 온난화(0.10~0.30K decade⁻¹)를 보인 중간 대류권에 비하여 상부 대류권에서는 온난화 세기(0.04~0.16K decade⁻¹)가 다소 약하였으나, 두 기층 모두가 공통적으로 온난화를 보였다(Tables 5 and 6). 다시 말해, ECMWF에서는 1981-93년 기간에 상층으로 갈수록 온난화 경향이 둔화되었다.

GEOS 상부 대류권 온도의 아노말리 시계열에서 전구 온도 증감 경향은 육지(-0.04K decade⁻¹)와 해양(0.08K decade⁻¹)에서 서로 다르게 나타났으며, 전구

평균값은 해양이 지배적인 관계로 0.05K decade⁻¹의 온난화를 보였다(Fig. 6d and Table 6). 이러한 온난화는 MSU 위성관측(-0.94K decade⁻¹), ECMWF 모델(0.11K decade⁻¹)에 비하여 약하였다. GEOS 시계열은 엘니노 시기인 1987년 초와 1988년 중반부에는 육지에서, 1990-91년에는 해양에서 양의 아노말리를 보였다. 음의 아노말리는 육지와 해양에서 공통적으로 1993년과 라니냐 기간인 1995년에 현저하게 나타났다.

위성관측과 모델 재분석으로부터 조사된 추세의 비교에서 MSU 채널3 자료는 상당한 오차를 포함하고 있었으며, 특히 이러한 오차는 1984년 후반과 1985년 전반, 그리고 1986년 후반기의 시계열에 현저하였다. 시계열에서 1984-85년의 온도 변동은 위성 교체(NOAA-7 to NOAA-9)에 의한 인위적인 것으로 추정되며, MSU 채널3을 온도 추세 분석에 사용하기 위하여는 추가적인 보정이 필요하다.

한반도 부근의 중간 및 상부 대류권의 온도 경향

한반도 부근의 9개 위도 2°×경도 3° 격자 지역(123.0~132.0 E, 33.5~39.5 N)에 대한 관측과 모델의 중간 및 상부 대류권 온도의 아노말리 시계열로부터 18년간의 온도 경향을 조사하였다(Figs. 7-8). 특히 Spencer and Christy(1992b)에서 제시된 MSU 하부 대류권 온도(SC2R)의 아노말리 시계열도 함께 비교·분석에 사용되었다.

위성관측과 모델 재분석의 시계열

위성관측과 모델 재분석 자료와의 공통 기간의 조사를 위하여 분석기간을 1981-93년, 그리고 MSU 위성관측들(MSU2, SC2, SC2R) 경우에는 1980-97년으로 제한하였다. 본 연구에서 사용된 세 종류의 MSU 자료는 'MSU'로 나타낸 본 연구에서 유도된 직하점에서의 밝기온도, 'SC2'로 나타낸 Spencer and Christy(1992a)가 MSU의 여러 주사자료를 사용하여 유도한 밝기온도, 그리고 'SC2R'로 나타낸 Spencer and Christy(1992b)가 성층권의 효과를 제거하기 위하여 유도한 하부 대류권의 밝기온도이다.

한반도 부근에서 1981-93년 기간에 대한 중간 대류

Table 6. Same as in Table 5 except for the MSU Ch3.

	MSU	NCEP	ECMWF	GEOS
Globe				
Ocean	-0.90(-0.58)	0.05	0.14	0.08
Land	-1.02(-0.59)	-0.11	0.04	-0.04
Ocean & Land	-0.94(-0.58)	0.00	0.11	0.05
North				
Ocean	-0.95(-0.55)	-0.01	0.14	0.05
Land	-1.04(-0.59)	-0.13	0.01	-0.05
Ocean & Land	-0.98(-0.56)	-0.07	0.08	0.00
South				
Ocean	-0.88(-0.59)	0.10	0.16	0.11
Land	-0.96(-0.59)	-0.02	0.10	0.01
Ocean & Land	-0.89(-0.59)	0.07	0.14	0.10
Tropics				
Ocean	-0.90(-0.50)	0.00	0.14	0.01
Land	-0.95(-0.52)	-0.05	0.11	-0.04
Ocean & Land	-0.91(-0.50)	-0.01	0.13	0.00

권 온도의 시계열에서 MSU 만이 약간의 하강 경향 ($-0.02\text{K decade}^{-1}$)을 보일 뿐 다른 세 종류의 모델 자료 모두 는 온난화를 보였다($0.25\sim 0.43\text{K decade}^{-1}$) (Table 7 and Fig. 7a). 이들 관측 및 모델 자료의 위상 변화는 대체로 비슷하며, 중간 대류권 온난화 및 온도 변동폭이 ECMWF에서 가장 크게(0.43K decade^{-1}) 나타났다(Fig. 7a). 이들 자료에서 양의 아노말리는 1987,

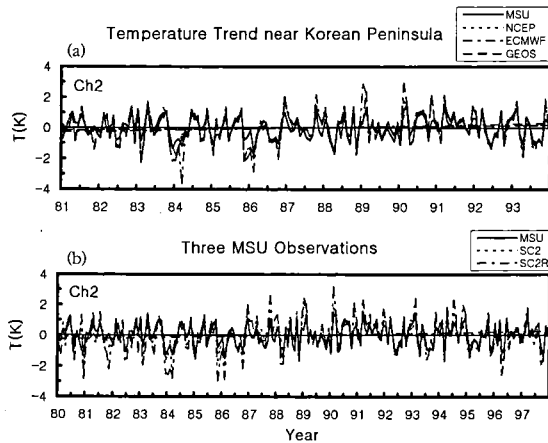


Fig. 7. Time series for monthly mean Ch2 anomalies near the Korean peninsula of (a) the MSU, NCEP, ECMWF and GEOS temperatures during the period of 1981-93, and of (b) the MSU, SC2 and SC2R during the period of 1980-97.

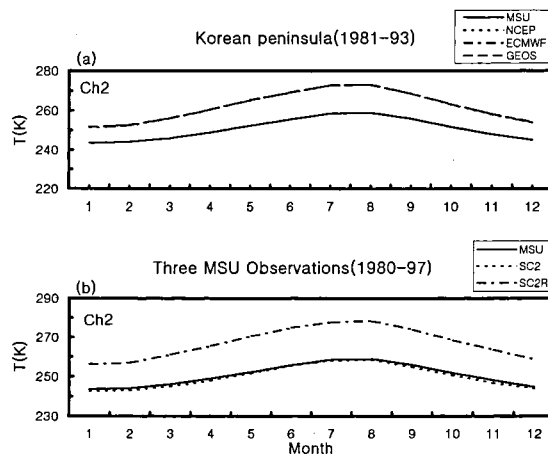


Fig. 8. Annual variations for climatological monthly mean Ch2 values near the Korean peninsula of (a) the MSU, NCEP, ECMWF and GEOS temperatures during the period of 1981-93, and of (b) three independent satellite observations for the MSU, SC2, and SC2R during the period of 1980-97.

1989, 1990년, 그리고 음의 아노말리는 1984, 1986년에 크게 나타났다. 엘니뇨 기간인 1982, 1991-92년에는 온도 변동이 뚜렷하지 않았다.

500hPa에서 그 최대값을 갖는 MSU 직하점 자료나 SC2에 비하여 하부 대류권의 열적 상태를 나타내는 SC2R의 가중함수의 최대값은 700hPa로 낮아지며, 그 함수 곡선 모양이 더 예리하게 나타난다. 그러나 성층권의 열적 상태를 일부 포함하는 MSU 직하점 자료나 SC2에 비하여 SC2R의 온도 경향은 상대적으로 큰 계통적인 오차를 포함하고 있음이 Hurrell and Trenberth (1992)에 의해 지적된 바 있다. 대류권계면 고도가 고위도에서 저위도보다 낮기 때문에 SC2R과 관련된 성층권 영향의 보정은 고위도에서 더욱 중요하다.

1980-97년 기간의 세 종류 위성 관측(MSU, SC2 그리고 SC2R)의 온도 경향을 비교해 보면, 관측들은 공통적으로 온난화 경향($0.01\sim 0.22\text{K decade}^{-1}$)을 나타냈으나, MSU(0.01K decade^{-1})의 경우에 이러한 경향이 가장 약하였다(Fig. 7b and Table 8). 세 자료들의 위상은 전체적으로 유사하며 높은 상관($0.80\sim 0.91$)을 보였다. 그러나 MSU나 SC2보다 SC2R이 큰 폭의 온도 상승(0.22K decade^{-1})을 보였는데, 이것은 SC2R이 한반도 부근의 지상에서 실제 진행 중인 온난화(유정문 등, 1999b)에 대하여 지표와 하부 대류권에 더 민감하기 때문인 것으로 추정된다. 추가적으로 MSU와 SC2에서의 온난화 경향이 SC2R에 비하여 약한 것은 냉각화 현상

Table 7. Middle and upper tropospheric thermal trends(K decade^{-1}) of MSU observation and model reanalyses during the period of 1981-93 near the Korean peninsula.

	MSU	NCEP	ECMWF	GEOS
Ch2	-0.02	0.25	0.43	0.28
Ch3	-1.33	-0.18	0.18	-0.05

Table 8. Middle and lower tropospheric thermal trends(K decade^{-1}) of three independent MSU Ch2 observations during the period of 1980-97 near the Korean peninsula.

	MSU midtroposphere 500 hPa	SC2 midtroposphere 500 hPa	SC2R low troposphere 700 hPa
Ch2	0.01	0.09	0.22

이 진행중인 하부 성층권 효과(15~25%; Spencer and Christy, 1992b)를 포함하기 때문이다.

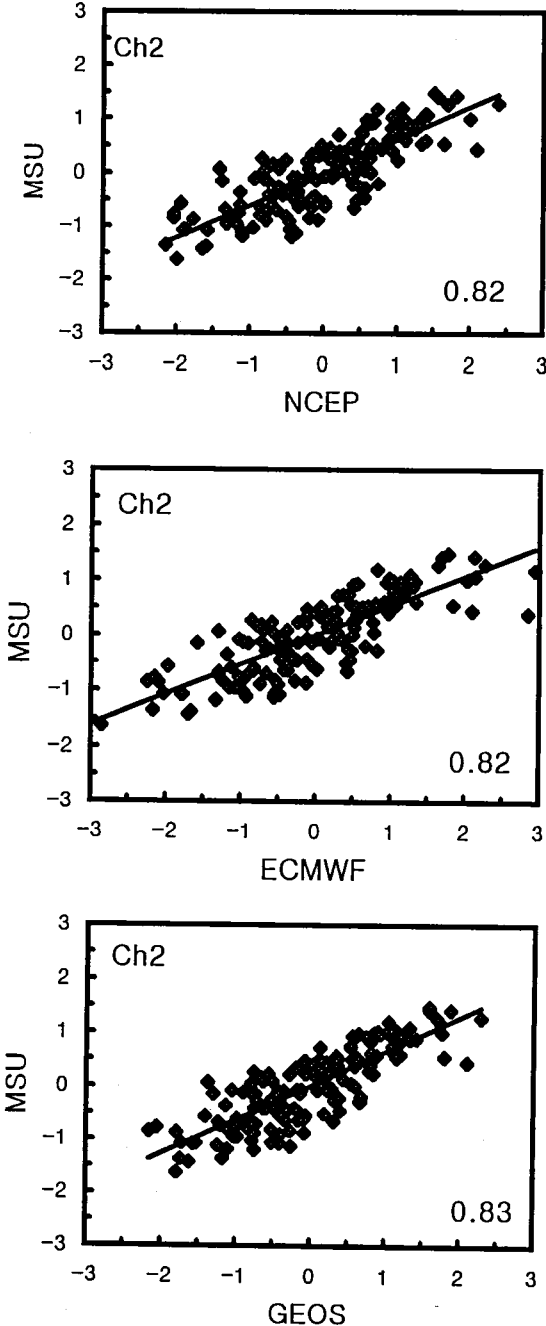


Fig. 9. Scatter diagrams of monthly mean Ch2 temperature anomalies of MSU versus NCEP, ECMWF, GEOS near the Korean peninsula. The number in the figure means correlation coefficient.

위성관측과 모델 재분석의 연변화

한반도 부근에서 중간 대류권 온도의 월별 기후값은 위성관측에 비해 모델 재분석에서 약 10K 정도 높게 나타났으며, 세 종류의 모델들의 결과들은 거의 일치하였다(Fig. 8a). 중간 대류권 온도의 연주기에서 MSU 위성관측과 모델 재분석 온도 사이의 차는 여름에 증가, 그리고 겨울에 감소하였다. 최고기온은 7~8월에 그리고 최저기온은 12~1월에 나타났다. MSU와 모델 재분석 사이의 약 10K의 차는 모델에서 재구성된 온도가 해당 위성관측 밝기온도와 비교시에 상대적으로 약 1~1.5km 낮은 하층 대기를 반영하는 것을 의미한다.

중간 및 상부 대류권에 대한 위성관측 온도들인 MSU, SC2 그리고 SC2R 사이의 비교에서는 SC2R이 MSU와 SC2에 비하여 약 15K 정도 높았으며, 세 종류 자료의 위상들은 서로 일치하였다(Fig. 8b). 중간 대류권과 하부 대류권 사이에 온도 차이는 여름에 컸고(20K) 겨울에 작았다(14K). MSU나 SC2에 비하여 SC2R 온도는 하부 대류권의 열적 상태를 반영하므로 높았다. 표준 대기의 기온감률에 기초를 둘 때, SC2R의 하부 대류권은 MSU와 SC2R의 중간 대류권보다 약 2km 고도가 낮은 지역이다.

한반도 부근에서의 관측과 모델 온도 사이의 상관

Table 9과 Fig. 9은 한반도 부근에서 중간 및 상부 대류권 온도들에 있어서 위성관측과 모델간의 상관을 보여준다. 전구 경우와는 달리 MSU에 대하여 특정 모델의 상관이 현저하게 높지 않았다. 중간 대류권에서 MSU에 대한 모델들의 상관은 GEOS에서 0.83, 그리고 상부 대류권에서의 상관은 NCEP에서 0.37로 가장 높았다(Table 9). MSU 채널3 자료의 오차로 인하여 상부 대류권에서의 상관들은 중간 대류권보다 상당히 낮았으

Table 9. Correlation coefficients in MSU Ch2 and Ch3 equivalent temperature anomalies between MSU and reanalyses(NCEP, ECMWF, GEOS) near the Korean peninsula during the period of 1981-93.

	NCEP		ECMWF		GEOS	
	Ch2	Ch3	Ch2	Ch3	Ch2	Ch3
MSU Ch2	0.82		0.82		0.83	
Ch3		0.37		0.29		0.31

나 유의수준 0.05에서 모두 유의적이었다. 전구의 결과(Figs. 2-3)와 비교했을 때, 한반도 부근에서 중간 대류권 온도들의 상관은 상대적으로 낮았고 상부 대류권의 경우는 높았다.

결론

중간 및 상부 대류권의 열적 상태에 대한 위성관측과 모델 재분석 자료를 이용하여 전구 온도의 증감 경향과 이들 자료의 상대적인 정확성을 평가하기 위하여, 위성관측 MSU 채널2와 채널3 밝기온도, 그리고 세 종류의 대순환모델(NCEP, ECMWF, GEOS) 재분석 온도들을 상호 비교하였다. MSU는 1980-98년, NCEP은 1980-97년, ECMWF는 1980-93년, 그리고 GEOS는 1981-94년 기간에 대하여 위도 $2^\circ \times$ 경도 3° 격자 자료로 정리된 후에 사용되었다. 이들 자료를 지역별로 전구, 북반구, 남반구, 열대 지역에 대하여 분류한 후에, 다시 각각 해양, 육지, 해양 및 육지에서 온도로 세분화하였다.

관측과 모델 자료의 공통 기간인 1981-93년 기간의 중간 대류권 온도에 있어서 위성관측에 대한 모델 재분석들의 상관은 ECMWF 모델에서 가장 높았다($r=0.81 \sim 0.95$). 상관이 높은 지역은 이 모델에서 열대 육지($r=0.95$)이며, 가장 낮은 지역은 GEOS 모델에서 남반구 해양($r=0.74$)이었다. MSU에 대한 모델 상관은 해양보다 라디오존데 관측이 풍부한 육지에서 대체로 높았다. 모델들은 중간 대류권의 MSU 온도에 대하여 높은 양의 상관($r=0.74 \sim 0.95$)을 보였으나, 상부 대류권에서는 낮은 상관($r=-0.02 \sim 0.34$)을 보였다. 이것은 Christy *et al.*(1995)에서도 지적된 바와 같이 상부 대류권 온도를 반영하는 MSU 채널3 밝기온도의 부정확성에 기인한 것으로 추정된다.

위의 13년에 대한 전구 온도 증감 경향에서 NCEP의 전구 육지($-0.06K \text{ decade}^{-1}$)를 제외하고 관측 및 모델 자료는 온난화($0.01 \sim 0.20K \text{ decade}^{-1}$)를 보였다. 이들 자료는 엘니뇨 기간에 양의 아노말리, 그리고 라니냐 기간에는 음의 아노말리를 보였다. 전구에 대한 상부 대류권 온도의 추세에서 MSU는 냉각화($-0.94K \text{ decade}^{-1}$)를 보인 반면에 ECMWF와 GEOS는 온난화($0.05 \sim 0.11K \text{ decade}^{-1}$)를 보였다. NCEP의 온도 추세는 무시할만 하였다. 이와 같은 상부 대류권 온도 추세에

있어서 위성관측과 모델들 사이의 불일치는 MSU 채널 3 밝기온도의 부정확성에 기인하고 있음이 그 시계열에서 발견되었다. 관측과 모델 시계열의 비교로부터 추정된 MSU의 최대 오차는 1984년 후반과 1985년 전반, 그리고 1986년 후반에 나타났으며, 1984-85년의 오차는 단기간의 중복 관측 기간(약 50일)에 따른 위성 교체(NOAA-7 to NOAA-9) 즉, 불완전한 보정에 의한 것으로 판단된다.

한반도 부근에 대한 관측과 모델간의 상관에서는 전구 경우와는 달리 특정 모델에 대한 것이 현저하게 높지 않았다. 중간 대류권 온도에서 MSU 관측에 대한 가장 높은 상관은 GEOS 모델($r=0.83$), 그리고 상부 대류권의 경우는 NCEP 모델($r=0.37$)에서 나타났다. 한반도 지역에서의 MSU 온도 추세에서 중간 대류권은 약한 냉각화나 무시할만한 값($-0.01K \text{ decade}^{-1}$)을 보였으며, 이러한 결과는 유정문 등(1999b)와 일치하였다. 이 지역에서 관측과 모델 자료의 상부 대류권 온도의 변동 폭은 중간 대류권에 비해 작았으나 그 위상들은 일치하였다.

성층권이 대류권에 미치는 영향을 조사한 위성관측들간의 비교, 즉 본 연구에서 유도된 MSU 직하점 자료, Spencer and Christy(1992a, 1992b)에서 유도된 SC2와 SC2R 자료의 비교에서 관측자료 모두는 온난화를 나타냈으며, 1980-97년 기간에 10년간 온난화는 SC2R에서 $0.22K$, SC2에서 $0.09K$ 그리고 MSU에서 $0.01K$ 이었다. 여기서 SC2R은 하부 대류권, 그리고 MSU와 SC2는 중간 대류권의 온도를 반영하므로 한반도 부근에서는 지상에 가까운 대류권에서 온난화가 심화되고 있음을 알 수 있었다. 또한 같은 중간 대류권의 온도를 반영하는 위성관측들, 즉 MSU와 SC2 사이에서도 자료 유도과정의 차이로 인하여 온도 추세에서 $0.08K \text{ decade}^{-1}$ 의 불확실성이 존재하였다.

본 연구는 중간 대류권 온도에 대한 MSU 위성관측, 그리고 NCEP, ECMWF, GEOS 모델 재분석 자료들이 온도 증감 경향에 있어서 전반적으로 일치함을 보여 주었으며, 상부 대류권의 온도 경향에서는 위성관측 MSU 채널3 자료가 상당한 오차를 포함하고 있음을 제시하였다. 관측자료와의 비교를 통하여 모델에 대한 지속적인 진단 및 평가는 현재 기후를 이해하고 그 변화를 예측하는데 있어서 필수적이며, 이러한 모델에 입력되는 라디오존데 등의 기존 관측자료가 부족한 경우에 MSU

채널2 위성자료를 이용하여 보충 또는 일부 대체하는 것이 가능한 것으로 판단된다.

사 사

이 연구는 2000년도 과학기술부 여자대학교 연구기반확충사업 연구비(등록번호; 98-WO-046)의 지원으로 이루어졌으며, 이에 감사드린다. 본 논문의 향상을 위하여 좋은 지적을 해주신 두 분의 심사위원께 감사를 드린다.

참고문헌

- 유정문 · 김경순, 1997, 위성자료로부터 추정된 대기의 열적 상태: 전지구의 온도경향. 한국지구과학회지, 18(1), 40-50.
- 유정문 · 김소현, 1998, 마이크로파 위성자료의 하부성층권 온도에 대한 경험적교합수 분석. 한국지구과학회지, 19(6), 649-663.
- 유정문 · 김진남, 2000, 하부 성층권의 열적 상태에 대한 위성 관측(MSU)과 모델 재분석 자료와의 비교. 한국지구과학회지, 21(2), 137-158.
- 유정문 · 박은정 · 김규명 · 허창희, 1999a, 중간대류권 열적 상태에 관한 위성자료와 모델 재분석 결과 사이의 비교. 한국기상학회지, 35(4), 549-564.
- 유정문 · 이홍란 · 김경익 · 정미경, 1999b, 관측과 모델로부터 조사된 한반도 부근의 대류권 및 하부 성층권의 온도 경향. 한국기상학회지, 35(4), 599-612.
- Angell, J.K., 1988, Variations and trends in tropospheric and stratospheric global temperatures 1958-87. *Journal of Climate*, 1(12), 1296-1313.
- Basist, A.N. and Chelliah, M., 1997, Comparison of tropospheric temperatures derived from the NCEP/NCAR reanalysis, NCEP operational analysis, and the microwave sounding unit. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78(7), 1431-1447.
- Christy, J.R., 1995, Temperature above the surface layer. *Climatic Change*, 31, 445-474.
- Christy, J.R., Spencer, R.W., and McNider, R.T., 1995, Reducing noise in the MSU daily lower tropospheric global temperature data set. *Journal of Climate*, 8, 888-896.
- Christy, J.R., Spencer, R.W., and Lobl, E. S., 1998, Analysis of merging procedure for the MSU daily temperature time series. *Journal of Climate*, 11(8), 2016-2041.
- Doty, B.E., 1992, Using the Grid Analysis and Display System(GrADS), Center for Ocean-Land-Atmosphere Interactions, Maryland, USA, 41 p.
- Gibson, J.K., Kallberg, P., Uppala, S., Hernandez, A., Nomura, A., and Sarrano, E., 1997, ERA description. ECMWF Re-Analysis Project Rep. 1, ECMWF, 72 p.[Available from European Center for Medium-Range Weather Forecasts, Shinfield Park, Reading, Berkshire RG2 9AX, United Kingdom.]
- Hansen, J.E. and Lebedeff, S., 1988, Global trends of measured surface air temperature. *Journal of Geophysical Research*, 92, 13345-13372.
- Hansen, J.E., Wilson, H., Sato, M., Ruedy, R., Shah, K.P., and Hansen, E., 1995, Satellite and surface temperature data at odds? *Climatic Change*, 30, 103-117.
- Hoinka, K.P., Claude, H., and Kohler, U., 1996, On the correlation between tropopause pressure and ozone above central Europe. *Geophysical Research Letters*, 23(14), 1753-1756.
- Hurrell, J.W. and Trenberth, K.E., 1992, An evaluation of monthly mean MSU and ECMWF global atmospheric temperature for monitoring climate. *Journal of Climate*, 5(12), 1424-1440.
- Hurrell, J.W. and Trenberth, K.E., 1998, Difficulties in obtaining reliable temperature trends; Reconciling the surface and satellite microwave sounding unit records. *Journal of Climate*, 11(5), 945-967.
- Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., Deaven, D., Gandin, L., Iredell, M., Saha, S., White, G., Woollen, J., Zhu, Y., Chelliah, M., Ebisuzaki, W., Higgins, W., Janowiak, J., Mo, K.C., Ropelewski, C., Wang, J., Leetmaa, A., Reynolds, R., Jenne, R., and Joseph, D., 1996, The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77(3), 437-471.
- Nicholls, N.N., Gruza, G.V., Jouzel, J., Karl, T.R., Ogallo, L.A., and Parker, D.E., 1996, Observed climate variability and change. *Climate Change 1995*, J. T. Houghton et al., Eds., Cambridge University Press, 133-192.
- Prabhakara, D., Iacovazzi, R., Yoo, J.-M., and Dalu, G., 1998, Global warming deduced from MSU. *Geophysical Research Letters*, 25, 1927-1930.
- Schubert, S.D., Rood, R.B., and Pfandtner, J., 1993, An assimilated dataset for earth science applications. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 74(12), 2331-2342.
- 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(8), 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(8), 858-866.

Spencer, R.W., 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(10), 1111-1128.

2000년 6월 30일 원고 접수

2000년 9월 1일 수정원고 접수

2000년 10월 7일 원고 채택