

하부 성층권 온도에 대한 위성자료와 모델 재분석들과의 비교

유정문¹ · 김진남¹

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

Intercomparison of Satellite Data with Model Reanalyses on Lower-Stratospheric Temperature

Jung-Moon Yoo¹ · Jin-Nam Kim¹

¹Department of Science Education, Ewha Womans University, Seoul 120-750, Korea

Abstract: The correlation and Empirical Orthogonal Function (EOF) analyses over the globe have been applied to intercompare lower-stratospheric (~70hPa) temperature obtained from satellite data and two model reanalyses. The data is the 19 years (1980-98) Microwave Sounding Unit (MSU) channel 4 (Ch4) brightness temperature, and the reanalyses are GCM (NCEP, 1980-97; GEOS, 1981-94) outputs. In MSU monthly climatological anomaly, the temperature substantially decreases by ~21K in winter over southern polar regions, and its annual cycle over tropics is weak. In October the temperature and total ozone over the area south of Australia remarkably increase together. High correlations ($r \geq 0.95$) between MSU and reanalyses occur in most global areas, but they are lower ($r \sim 0.75$) over the 20-30N latitudes, northern America, and southern Andes mountains. The first mode of MSU and reanalyses for monthly-mean Ch4 temperature shows annual cycle, and the lower-stratospheric warming due to volcanic eruptions. The analyses near the Korean peninsula show that lower-stratospheric temperature, out of phase with that for troposphere, increases in winter and decreases in summer. In the first mode for anomaly over the tropical Pacific, MSU and reanalyses indicate lower-stratospheric warming due to volcanic eruptions. In the second mode MSU and GEOS present Quasi-Biennial Oscillation (QBO) while NCEP, El Niño. Volcanic eruption and QBO have more impact on lower-stratospheric thermal state than El Niño. The EOF over the tropical Atlantic is similar to that over the Pacific, except a negligible effect of El Niño. This study suggests that intercomparison of satellite data with model reanalyses may estimate relative accuracy of both data.

Key words: Lower-Stratospheric Temperature, EOF, MSU, Channel 4, NCEP, GEOS, volcanic eruption, QBO, El Niño

요약: 관측과 모델에서 각각 유도된 하부 성층권의 온도를 비교·분석하기 위하여 전구에 대한 1980-98년 기간의 위성관측 MSU 채널4 (하부 성층권) 밝기온도와 두 개의 대기대순환 모델(NCEP, 1980-97년; GEOS, 1981-94년) 재분석 자료를 상관 및 경험적직교함수 분석을 통하여 조사하였다. 월평균 기후값의 아노말리에서 MSU 온도는 남반구 겨울에 고위도 지역에서 현저하게 감소하였으나 (20-22K), 남반구 봄인 10월에는 오스트레일리아의 이남 지역에서 하부 성층권 온도 및 오존 전량이 주목할만하게 동시에 상승하였다. 열대지방에서는 온도 연주기 중·고위도에 비하여 뚜렷하지 않았다. 지구 대부분의 지역에서 관측과 모델 사이에 상관은 높았으나 ($r \geq 0.95$), 아열대 제트기류가 통과하는 20N-30N 지역, 북미 대륙 그리고 안데스산맥 남단지역에서 낮았다($r \sim 0.75$). MSU 및 모델 재분석들의 월평균값에 대한 모드 1은 연주기와 함께 화산 폭발시에 하부 성층권의 온도 상승을 나타냈다. 한반도 지역에 대한 분석은 하부 성층권 온도가 대류권과 대조적으로 여름에 하강하고 겨울에 상승하는 형태를 보였다. 열대 태평양에 대한 MSU 및 재분석들의 아노말리 모드 1은 화산폭발에 의한 하부 성층권 온도 상승을 나타냈다. 모드 2는 MSU와 GEOS에서 준2년 주기진동 (QBO), 그러나 NCEP에서 엘니뇨 특징을 보였다. 엘니뇨 특징은 MSU와 GEOS의 경우에 모드 3에서 나타났다. 관측과 모델 모두에서 하부 성층권 온도에 대한 기여율이 대체로 화산폭발, QBO, 엘니뇨 순으로 높았다. 열대 대서양의 결과도 무시할 만한 엘니뇨 기여를 제외하고 열대 태평양과 비슷하였다. 본 연구는 하부 성층권 온도에 대한 위성관측과 모델 재분석 자료와의 비교를 통하여 상호 정확성을 진단할 수 있음을 보여준다.

주요어: 하부 성층권 온도, MSU, 채널4, NCEP, GEOS, 경험적직교함수, 화산폭발, 준2년 주기진동, 엘니뇨

서론

기후 변화에 영향을 주는 오존층 파괴와 화산폭발, 그리고 대류권과 상층대기와의 열적 상호작용을 이해하기 위하여 성층권의 기후 변화에 대한 관심이 최근에 더욱 높아지고 있다(Spencer and Christy, 1993). 온도는 이러한 변화를 정량적으로 평가하는데 있어서 중요한 요소이므로, 이것을 정확하고 객관적으로 분석하는 것은 대기의 변동 및 그 변동 원인을 규명하는데 필요하다.

기후 진단에 필요한 온도 자료는 관측 및 모델 재분석(reanalysis)에서 얻을 수 있다. 상층대기에 대한 온도 관측은 라디오존데(레원존데)나 기상위성에서 실시되는데, 라디오존데 관측은 관측소의 설치 분포의 비균질성으로 전지구적인 기후 평가에 있어서 시공적 제약을 받게 된다. 그러나 기상위성은 단기간에 전지구의 열적 상태를 고루 측정할 수 있다. 지구의 극궤도를 돌고 있는 업무용 NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration) 위성은 1978년부터 현재까지 약 2년 간격으로 발사되어 왔다. 이 위성에 탑재된 TOVS(TIROS Operational Vertical Sounder) 연직 관측기구(HIRS-2, MSU, SSU로 구성) 내의 MSU(Microwave Sounding Unit) 복사계는 대기와 지표에서 방출되는 마이크로파를 채널1-4에서 각각 다른 파장으로 관측한다. 이 중에 57.95GHz 진동수에서 관측된 채널4 밝기온도는 70 hPa 부근의 열적 상태를 주로 반영한다. 따라서 하부 성층권의 기후 변화와 온도 경향을 조사하는데 채널4 관측값은 유용하게 이용되어 왔다(Spencer and Christy, 1993).

위성자료의 고유한 장점에도 불구하고 NOAA 위성은 각각 2년 정도의 제한된 수명을 가지고 있어서, 여러 위성에서 관측된 자료를 결합하여 장기간의 시계열을 만들 경우에 오차가 발생할 수 있다. 장기간의 위성자료는 위성 계열에 따라 다를 수 있는 특정 지역에 대한 표본 수집시간의 불일치, 위성궤도 하강이나 표류, 알고리즘의 변화, 그리고 복사계 자체의 노후에 의해 발생하는 관측결합 등의 오차를 가질 수 있다. 이를 보완하기 위하여 MSU 경우에 중복기간을 두어 관측자료를 결합하여 보정하여 왔지만, 그 정확성에 있어서는 아직 많은 논란이 있다(Hansen *et al.*, 1995; Hurrell and Trenberth, 1998).

한편, 대기대순환 모델(General Circulation Model; GCM)의 결과는 모델자체의 해상도 및 불완전한 물리과정의 모수화, 특히 격자 규모 운동의 모수화의 불완전성 등에도 불구하고 기후 변동과 그와 연관된 여러 물리 과정의 이해 및 통찰을 높이는데 활용되어 왔다(e.g., Hurrell and Trenberth, 1992). 그러므로 위성관측자료와 모델결과 사이의 객관적이고 독립적인 비교·분석을 통하여 상호 불일치에 대한 원인을 추정하여 관측과 모델에 대한 정확한 진단 및 가능한 개선을 시도하는 것은 기후 변동 연구에 중요하다.

현재 기후 변동을 진단 및 예측하기 위하여 사용되는 대순환 모델들은 상당수가 있으나, 본 연구에서는 자료입수가 가능하고 모델 정확도에 대한 신뢰가 높다고 알려진 다음 두 개의 모델 재분석 결과가 하부 성층권의 온도 분석에 사용되었다; NCEP(National Centers for Environmental Prediction)과 NCAR(National Center for Atmospheric Research)의 두 연구 기관이 공동으로 개발한 NCEP/NCAR 모델(Kalnay *et al.*, 1996), 그리고 NASA(National Aeronautics and Space Administration) DAO(Data Assimilation Office)의 GEOS(Goddard Earth Observing System) 모델(Schubert *et al.*, 1993)(본 연구에서는 편의상 NCEP/NCAR 모델을 NCEP 모델로 약칭). 이들 모델들을 운용하는 관련 기관들은 기후 변동의 평가 및 예측에 있어서 모델에서 발생하는 자료동화 시스템과 물리 과정의 변화로 인한 불확실성을 줄이기 위하여 재분석 자료를 산출하였다. 이 재분석 과정에서 모델들은 그 당시의 이용가능한 대부분 자료의 동화 시스템을 사용하였으며, 시간에 따라 연속적이고 균질한 자료를 제공하였다(Straus and Yang, 1997).

관측과 모델 결과와의 비교에 관한 선행연구에서 Shah and Rind(1998)는 MSU 위성관측, GFDL/Oort 라디오존데 관측, CIRA(COSPAR International Reference Atmosphere) 모델, 그리고 NCEP 모델 재분석의 자료들을 이용하여 관측과 모델에서 제시된 계절별 하부 성층권의 온도를 상호 비교하였다. 이 결과에 의하면, 기후값들은 하부 성층권에서 대체로 서로 잘 일치하였으나 80hPa 부근에서 NCEP과 MSU는 열대에서 약 2K 정도의 차이를 보였으며, 남반구 겨울에 극 위도대에서는 NCEP이 MSU보다 5K 정도 높았다. 또한 열대 지방의 하부 성층권에서 관측과 모델은 서로 약 2K 정도의 차이를 보이는데, 이는 자료 동화과정에서 하부 성층권을

위한 라디오존데 입력 자료가 부족한 경우에 NCEP 모델이 위성관측 자료를 회귀방법으로 적절히 보충하지 못하여 발생하였다고 그들은 주장하였다.

모델결과들을 상호 비교한 연구(Kistler *et al.*, 1999)에 의하면, NCEP과 ECMWF(European Center for Medium-range Weather Forecasts)의 온도 연직 분포들은 성층권과 극지방의 300 hPa 부근에서 냉각경향을 보였으나, 중위도 대류권과 열대지방 성층권의 100-50 hPa 부근에서 온난화 경향을 보였다. 대류권 온도에 대한 MSU와 NCEP(또는 ECMWF) 재분석, NCEP과 GEOS 재분석, 그리고 NCEP과 ECMWF의 결과들을 각각 비교한 연구들이 국외에서 상당히 진행되었으나(Hurrell and Trenberth, 1992; Hansen *et al.*, 1995; Higgins *et al.*, 1996), 하부 성층권에 대한 MSU 위성관측과 대순환 모델 재분석 자료에 대한 각각의 경험적교함수(Empirical Orthogonal Function; EOF) 분석을 통하여 여러 지역에 대하여 각 모드별로 비교·진단한 연구는 국내외에 거의 전무한 실정이다. 본 연구의 목적은 관측과 모델에서 각각 제시된 하부 성층권의 열적 상태를 비교·분석하기 위하여 1980~1998년 기간의 위성관측 MSU 채널4 밝기온도와 이 기간내의 두 대기대순환 모델들(NCEP, GEOS) 재분석 자료에 대한 상관 및 경험적교함수 분석을 태평양, 대서양, 그리고 한반도 부근에 대하여 실시하는데 있다.

자료 및 방법

위성관측(MSU) 자료와 두 개의 대기대순환 모델(NCEP, GEOS) 재분석 자료가 본 연구의 상관 및 경험적교함수 분석에 따른 비교에 사용되었다. 재분석 결과는 관측자료가 적은 지역의 대기 순환의 특성을 이해하는데 도움을 주며, 모수화를 통한 물리적인 값을 재분석 과정으로 처리되지 않은 경우보다 더 정확하게 산출한다(Straus and Yang, 1997). 이러한 모델 재분석은 위성관측 및 기존의 이용 가능한 모든 자료를 초기 조건으로 하여 유도되므로 위성관측 결과와 완전히 독립적이지는 않지만, 상호 비교를 통하여 두 결과 사이의 상대적인 불일치 및 정확성을 평가할 수 있다. 그러나 재분석은 서로 다른 체계를 가진 여러 곳에서의 자료를 동화시키고 질을 관리해야 하는 어려움을 가지고 있다(Saha and Chelliah, 1993). 관측시스템의 시·공간적

비균질성과 변화, 발산지역이나 수증기 순환에 의해 생길 수 있는 관측과 재분석 자료에서의 불일치, 그리고 입력 자료 처리시 인간이 만들어낼 수 있는 오차들은 여전히 재분석 자료에서의 문제점으로 남아있다(Kistler *et al.*, 1999).

MSU 채널4 밝기온도

대기 중에 존재하는 산소분자는 시·공간적으로 안정하므로 특정 대기층이 방출하는 열선을 추적하면 그 층 온도를 탐사할 수 있다(Spencer and Christy, 1990). MSU 복사계는 하부 성층권의 온도를 추정하기 위하여 57.95GHz의 채널에서 산소 분자에 의해 방출된 마이크로파를 측정하며, 복사전달 방정식을 통하여 특정 진동수에 대한 마이크로파의 산소 민감도를 온도의 연직분포로 전환하여 해당 마이크로파에 대한 밝기온도를 산출한다(Spencer and Christy, 1993). 그들은 전체 11개의 주사각(scan angle)의 자료를 2.5°위도×2.5°경도로 격자화하여 사용하였다.

본 연구에서는 직하점(nadir) 자료만을 사용하여 태평양, 대서양, 한반도 부근을 포함하는 지역들에 대하여 2°위도×3°경도의 격자로 정리하였다. 직하점 자료만의 사용은 주사시에 상대적으로 두꺼운 대기층을 통과하면서 생길 수 있는 주변광량 효과를 배제할 수 있다. 채널4 밝기온도의 시계열에서 보다 정확한 연속적인 결과를 얻기 위하여, 위성들간의 관측 시간과 수감부의 차이로 발생하는 각각의 일변화 효과와 복사계의 검정 오차 등을 각 격자자료에서 보정하였(유정문·김소현, 1998). 1980년 1월부터 1998년 12월까지 19년(228개월) 기간에 대한 하부 성층권 온도의 분석을 위하여 7개의 위성 자료를 사용하였다. 1980-81년에 대하여 NOAA-6, 1982-84년에 대하여 NOAA-7, 1985-86년에 대하여 NOAA-9, 1987-88년에 대하여 NOAA-10, 1989-91년에 대하여 NOAA-11, 1992-94년에 대하여 NOAA-12, 그리고 1995-98년에 대하여는 NOAA-14의 자료를 사용하였다. NOAA-8과 NOAA-13 자료는 작동상 문제로 제외되었다. NOAA-14를 제외하고 위성 계열의 숫자가 짝수인 위성은 오전, 오후 7시 반에, 홀수 위성은 2시 반에 적도를 통과하며 관측한다.

NCEP 재분석 온도

1989년부터 NCEP과 NCAR에서는 기후자료 동화체계

(Climate Data Assimilation Systems; CDAS)를 마련하기 위해 기후모델 재분석을 실시하였다(Kalnay *et al.*, 1998). 이 체계는 고정된(frozen) 시스템을 사용함으로써 여러 기후예측 작동체계에서의 변화나 발전에 영향을 크게 받지 않는다. 또한 NCEP 모델 재분석은 기상이나 기후 연구자들이 널리 쓰는 대기의 4차원 격자장과 50년 기간의 재분석을 위해 지표와 대기의 관측으로부터 얻어진 BUFR(Binary Universal Format Representation) 자료를 산출하였다(Schemm *et al.*, 1996).

NCEP 재분석 자료는 T62(210km)의 해상도를 가지며 28개의 기층을 포함한 전구 스펙트럴 모델이다. 이들 층 중에서 다음의 17층(1000, 925, 850, 700, 600, 500, 400, 300, 250, 200, 150, 100, 70, 50, 30, 20, 10 hPa)에서의 온도가 이용 가능하다(Kalnay *et al.*, 1996). 스펙트럴 통계 내삽법(Spectral Statistical Interpolation; SSI)과 3차원 변분 자료 동화분석 기법(3 Dimensional-Variational Scheme; 3D-VAR)이 재분석에서 실시되었다(Parish and Derber, 1992). 상층 대기에서의 라디오존데 자료, NOAA 극궤도 위성의 마이크로파 자료(강수로 인한 오염 때문에 20N-20S 지역은 제외), 정지위성에서의 구름 측정, 비행기에서의 바람과 온도 자료, 지상기압에 대한 지표면 보고서, 그리고 해표면 기압, 온도, 비습을 포함하는 해양 보고서의 자료들이 자료 동화에 이용되었다. 이러한 자료들은 최적 내삽 질 관리(Optimal Interpolation Quality Control; OIQC) 시스템에 의해 통제되었다. OIQC는 자료에서의 정확도와 동화과정에서 생길 수 있는 오류를 감지하고 억제한다. OIQC는 분석 예보 시스템에 적절히 분해되지 않는 시간·공간 규모도 표현할 수 있다(Straus and Yang, 1997).

적은 대류 과정의 수치적분은 Grell(1993)을 기초로 하여 Pan and Wu(1994)가 개발한 Simplified Arakawa-Schubert 모수화를 사용하였다. 강수의 재증발 과정은 Caplan(1988), 장파 복사의 모수화는 Schwarzkopf and Fels(1991), 그리고 단파 복사 경우는 Lacis and Hansen(1974)의 연구에 기초를 두고 있다. 단파에 대한 구름의 광학 두께는 구름층 두께와 온도에 따라 결정되어 구름-복사 상호작용에 사용되었다. 대기 경계층의 모수화에는 Troen and Mahrt(1986)의 연구 결과가 이용되었다. 경계 조건 중 하나인 해수면 온도는 개선된

Table 1. The layer thicknesses(ΔP ; hPa) and weighted values used for the calculation of corresponding MSU Ch4 temperature from the NCEP and GEOS reanalyses.

Pressure altitude	Weighted value		NCEP, ΔP	GEOS, ΔP
	NCEP	GEOS		
10	1.5	.	7.5	.
20	9.5	9.5	10	10
30	19.5	19.5	15	15
50	47	47	20	20
70	66	66	25	25
100	71.5	71.5	40	40
150	40	40	50	50
200	11	11	50	50
250	2	2	50	50
300	.	.	75	75
400	.	.	100	100
500	.	.	100	100
600	.	.	100	100
700	.	.	125	100
800	.	.	.	75
850	.	.	112.5	50
900	.	.	.	50
925	.	.	75	.
950	.	.	.	50
1000	.	.	37.5	25

Reynolds and Smith(1994)의 내삽 기법을 이용하여 유도되었다.

본 연구에 사용된 NCEP 모델의 재분석 온도는 1980-97년 기간에 대하여 2.5°위도×2.5°경도 격자 간격의 초기 전구 자료를 GrADS(Doty, 1992) 그래픽 프로그램을 이용하여 2°위도×3°경도 격자로 전환된 자료이다. 여기서는 MSU 채널4에 해당하는 온도를 재구성하기 위하여 모델의 17개 표준 고도층 중 하부 성층권에 영향을 주는 9개층 자료를 사용하였다(Table 1).

GEOS 재분석 온도

NASA/DAO의 재분석 자료는 Goddard Earth Observing System(GEOS-1) 대순환 모델을 사용하여 최적의 내삽 분석기법(Optimal Interpolation, OI)으로 구성된 고정된 동화체계에서 만들어졌다(Pfaendtner *et al.*, 1995). GEOS 모델은 2°위도×2.5°경도의 수평해상도와 20개인 시그마층의 수직해상도를 되어있다. GEOS 역학의 핵심인 수평 및 수직 차분과 유한 차분 기법은

Suarez and Takacs(1994)의 연구에서 광범위하게 기술되어 있다.

이 모델의 적은 대류 모수화에서 Moorthi and Suarez (1992)의 Relaxed Arakawa-Schubert(RAS) 방법을 사용하는 반면에, 이미 언급된 NCEP의 경우는 Simplified Arakawa-Schubert 방법을 사용한다. 강수의 재증발 과정은 Kessler형 방법을 사용한 Sud and Molod(1988)의 연구에, 그리고 복사 과정은 Harshvardhan *et al.*(1987) 연구에 각각 기초를 두고 있다. 구름-복사 상호작용의 계산에 필요한 구름 비율은 적은 및 대규모 구름의 모수화, 구름 중첩율과 유효 광학 두께를 결합하여 진단적으로 결정된다(Takacs *et al.*, 1994). 대기 경계층과 상층 난류 모수화는 Helfand *et al.*(1991)과 Helfand and Labraga(1988)의 2.5층 종결 모델에 기초를 둔다. 해수면 온도 자료는 Reynolds(1988)의 월평균 자료를 이용하여 선형적으로 내삽된다. 모델에서는 여러 자료를 통합시키기 위하여 Incremental Analysis Updating(IAU)을 사용한다. 이 모델과 관련된 구체적인 내용은 Schubert *et al.*(1993)에 기술되어 있다.

본 연구에서 사용된 1981-94년 기간의 GEOS 재분석 온도자료는 초기 격자에서 2°위도×3°경도 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 (Table 1).

경험직교함수 분석

경험직교함수 분석은 기상 요소의 시간과 공간 분포를 의미있게 연결시켜 주는 방법으로 자료의 시간적인 분산을 고유벡터라고 부르는 직교 공간 분포의 형태로 분리시킨다. 즉, 고유벡터의 수가 증가할수록 물리적으로 설명하기 어려운 잡음(noise)에 의해 영향을 받으며, 이것과 관련된 공간 분포의 형태는 해석하기 힘들어진다. 각 고유벡터는 시간 분포를 갖게 되는데, 이 두 개의 공간 및 시간 분포를 함께 비교하여 그 공간 분포의 형태를 설명할 수 있다. 본 연구에서 사용된 경험직교함수 분석에 대한 이론식은 Kutzbach(1967)와 Wilks(1995)의 기본과정을 따른다. 채널4 온도의 분석을 위하여 사용된 MSU 자료의 기간은 1980-98년의 228개월, NCEP의 재분석 모델의 경우는 1980-97년의 216개월, GEOS의 경우는 1981-94년의 168개월이다.

본 연구에서는 Table 2에서 제시된 네 개 지역을 대상으로 온도 월평균값과 그 아노말리의 시계열에 대하여 각각 경험직교함수 분석이 적용되며, 여기서 월평균 아노말리는 월평균값에서 연주기가 제거된 것을 의미한다. 이러한 분석 결과는 일반적으로 태평양에서도 조사지역 범위의 크기에 의존한다. 이러한 공간적인 민감도 뿐만 아니라 연구 관심 지역인 태평양 및 대서양, 그리고 엘니뇨가 한반도에 미치는 열적 효과를 반영할 수 있는 구역 등을 고려하여 위의 지역들을 선택하였다. 월평균값이나 아노말리값은 전기간에 대한 평균값이 제거된 후, 다시 해당 기간에 대한 표준편차로 나눔으로써 정규화(normalization) 되었다. 또한 위도에 따른 면적변화의 효과를 고려하기 위하여, 각 자료에 해당 위도(ϕ)의 $\cos\phi$ 를 곱한 결과가 직교함수 분석을 위한 최종 입력자료로 사용되었다.

MSU 위성자료, 그리고 NCEP 및 GEOS 재분석 결과에서 유도된 채널4 온도의 월평균값과 아노말리값에 대한 EOF 분석 결과를 네번째 모드까지 나타내었다 (Tables 2 and 3). Tables에서 괄호안의 값은 고유값의 오차 범위(error bar)를 의미한다(North *et al.*, 1982). 이들 결과를 종합해 볼 때, EOF의 각 모드는 서로 독립적으로 잘 분리되어 있으며, 이 모드로부터 주요 기후 변동의 추출이 가능하다. 위성관측과 두 모델 재분석 결과의 고유 벡터값은 대체로 서로 유사한 결과를 보여 준다.

월평균 MSU 채널4 밝기온도 기후값의 아노말리

직하점에서 관측된 1980-98년 기간의 MSU 하부 성층권 밝기온도에 대한 월별 기후값의 아노말리 분포를 조사하였다(Fig. 1). 채널4 밝기온도의 월별 기후값으로부터 연평균을 뺀 아노말리의 공간 분포에서 계절적 변동을 보다 쉽게 알 수 있다. 1월 아노말리값에서 북반구의 다른 지역과 달리 한반도와 일본을 포함하는 중앙아시아 지역의 하부 성층권 온도는 연평균에 비하여 1-3K 정도 상승하였다(Fig. 1a). 등온선은 북반구 경우에 40N 이북 지역에서 조밀하였으며 최대 온도 하강(16K)은 스칸디나 반도 이북에서 나타났다. 대조적으로 남반구 40S 이남의 온도는 약 1-22K 정도 상승하였으며, 위도 70S 부근의 극지방에서 최대로 상승하였다(22K).

Table 2. Percentage of total variance explained by the first 4 EOF's of MSU Channel 4(Ch4) brightness temperature for the period 1980-98. The percentage values of the NCEP and GEOS Ch4 corresponding temperatures are also shown. The words 'Pac' and 'Atl' stand for the Pacific and Atlantic Oceans, respectively. The values in parentheses stand for the error bars of eigenvalues, according to the formula of North et al.(1992). The 'N' in the first column means total number of spatial grid array in a given domain.

Region	Domain	Mode 1				Mode 2				Mode 3				Mode 4			
		MSU	MCEP	GEOS	MSU	NCEP	GEOS	MSU	NCEP	GEOS	MSU	NCEP	GEOS	MSU	NCEP	GEOS	
Pac 1	121.5E-79.5W,	70.3	70.5	72.3	10.2	9.5	9.6	3.8	4.0	3.5	2.3	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	
N=2299	45.5S-60.5N	(2.07)	(2.08)	(2.13)	(0.30)	(0.28)	(0.28)	(0.11)	(0.12)	(0.10)	(0.07)	(0.07)	(0.07)	(0.07)	(0.07)	(0.07)	
Pac 2	61.5E-169.5W,	71.6	72	73	9.2	9.5	8.9	6.1	5.1	5.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.7	2.7	
N=2068	21.5S-70.5N	(2.23)	(2.24)	(2.27)	(0.28)	(0.30)	(0.28)	(0.19)	(0.16)	(0.17)	(0.08)	(0.08)	(0.08)	(0.08)	(0.08)	(0.08)	
Pac 3	121.5E-79.5W,	89.7	87.9	90.1	2.8	3.4	2.8	2.1	2.5	1.8	1.3	1.4	1.4	1.4	1.5	1.5	
N=1110	21.5S-22.5N	(3.80)	(3.73)	(3.82)	(0.12)	(0.14)	(0.12)	(0.09)	(0.11)	(0.08)	(0.06)	(0.06)	(0.06)	(0.06)	(0.06)	(0.06)	
Atl 1	100.5W-16.5E,	85.5	81.2	82.7	5.0	7.9	6.9	2.5	3.0	3.4	1.6	2.2	2.2	2.2	2.1	2.1	
N=596	29.5S-30.5N	(4.95)	(4.70)	(4.79)	(0.35)	(0.46)	(0.40)	(0.14)	(0.17)	(0.20)	(0.09)	(0.13)	(0.13)	(0.13)	(0.12)	(0.12)	
Average		79.3	77.9	79.5	6.8	7.6	7.1	3.6	3.7	3.6	2.0	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	

Table 3. Same as in Table 2 except for monthly mean Ch4 temperature anomalies.

Region	Domain	Mode 1				Mode 2				Mode 3				Mode 4			
		MSU	MCEP	GEOS	MSU	NCEP	GEOS	MSU	NCEP	GEOS	MSU	NCEP	GEOS	MSU	NCEP	GEOS	
Pac 1	121.5E-79.5W,	44.7	50.6	47.2	8.3	8.1	9.6	6.2	4.6	5.2	3.9	3.3	3.3	3.3	3.5	3.5	
N=2299	45.5S-60.5N	(1.32)	(1.49)	(1.39)	(0.24)	(0.24)	(0.28)	(0.18)	(0.14)	(0.15)	(0.12)	(0.10)	(0.10)	(0.10)	(0.10)	(0.10)	
Pac 2	61.5E-169.5W,	53.5	55.9	55.2	10.2	8.5	8.7	6.7	5.9	7.0	3.3	3.3	3.3	3.3	3.2	3.2	
N=2068	21.5S-70.5N	(1.66)	(1.74)	(1.72)	(0.32)	(0.26)	(0.27)	(0.21)	(0.18)	(0.22)	(0.10)	(0.10)	(0.10)	(0.10)	(0.10)	(0.10)	
Pac 3	121.5E-79.5W,	66.1	72.4	69.5	8.9	6.3	7.4	6.1	4.8	6.1	2.7	2.9	2.9	2.9	2.3	2.3	
N=1110	21.5S-22.5N	(2.81)	(3.07)	(2.95)	(0.38)	(0.27)	(0.31)	(0.26)	(0.20)	(0.26)	(0.11)	(0.12)	(0.12)	(0.12)	(0.10)	(0.10)	
Atl 1	100.5W-16.5E,	63.6	67.4	65.3	10.2	10.4	12.3	4.6	4.7	4.5	2.5	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	
N=596	29.5S-30.5N	(2.68)	(3.90)	(3.78)	(0.59)	(0.60)	(0.71)	(0.27)	(0.27)	(0.26)	(0.14)	(0.13)	(0.13)	(0.13)	(0.13)	(0.13)	
Average		57.0	61.6	59.3	9.4	8.3	9.5	5.9	5.0	5.7	3.1	3.0	3.0	3.0	2.8	2.8	

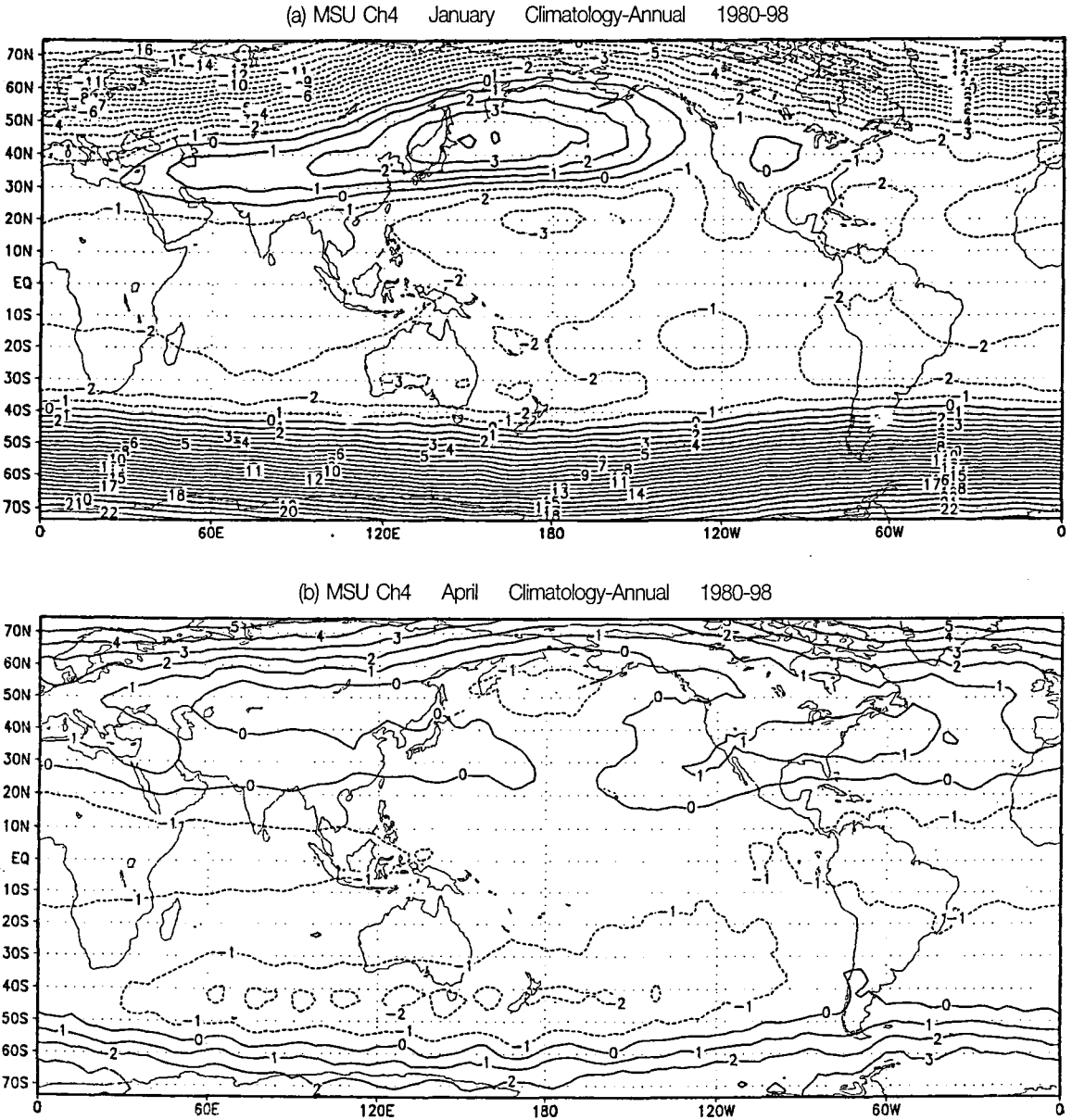
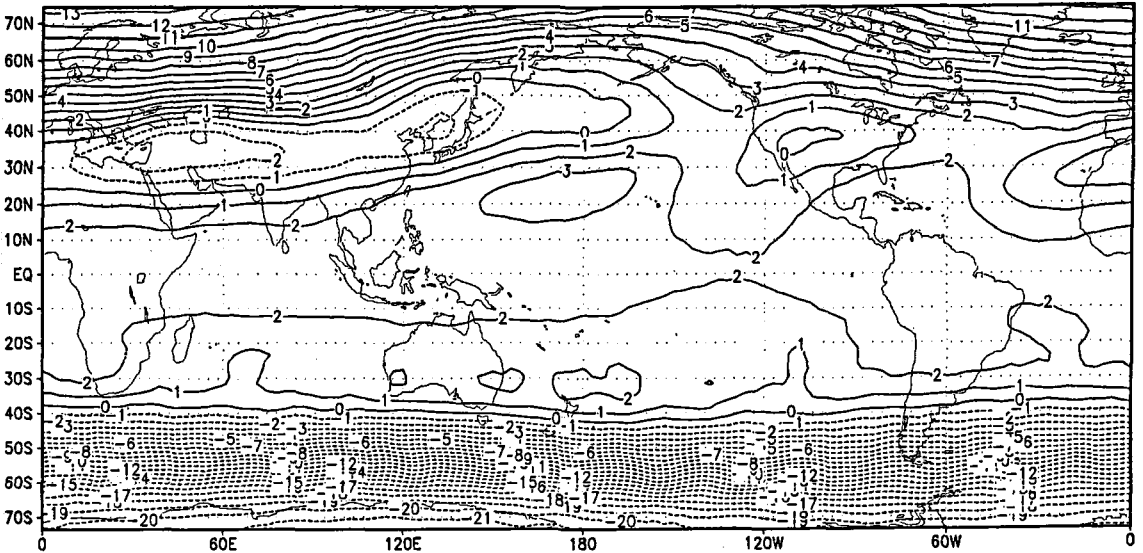


Fig. 1. Climatological monthly anomaly distributions of MSU Ch4 brightness temperatures(K) derived from the data (1980-98) over the globe for (a) January, (b) April, (c) July, and (d) October. Contour interval is 1K.

4월의 아노말리값 분포에서 위도에 따른 온도경도가 1월에 비하여 작게 나타났다(Fig. 1b). 20N 이북 지역에서 베링해 주변을 제외하고는 모든 지역에서 연평균에 비하여 하부 성층권 온도가 상승하였고 극지방으로 갈수록 이러한 경향은 현저하였다. 10S-10N 열대지역과 오스트레일리아 이남 지역의 온도는 약 1-2K 정도 하강하였다.

7월의 아노말리 경우에 한반도 주변 아시아 지역의 하부 성층권 온도는 북반구 다른 지역과 달리 1-2K 정도 하강하였는데, 이러한 경향은 이 기간에 대류권의 기온 상승과 대조적이었다(Fig. 1c). 또한 이 시기는 남반구 겨울에 해당되는데 여기 고위도에서의 위도에 따른 온도 감소가 북반구의 같은 위도 지역에 비하여 두 배 정도 컸다.

(c) MSU Ch4 July Climatology-Annual 1980-98



(d) MSUS Ch4 October Climatology-Annual 1980-98

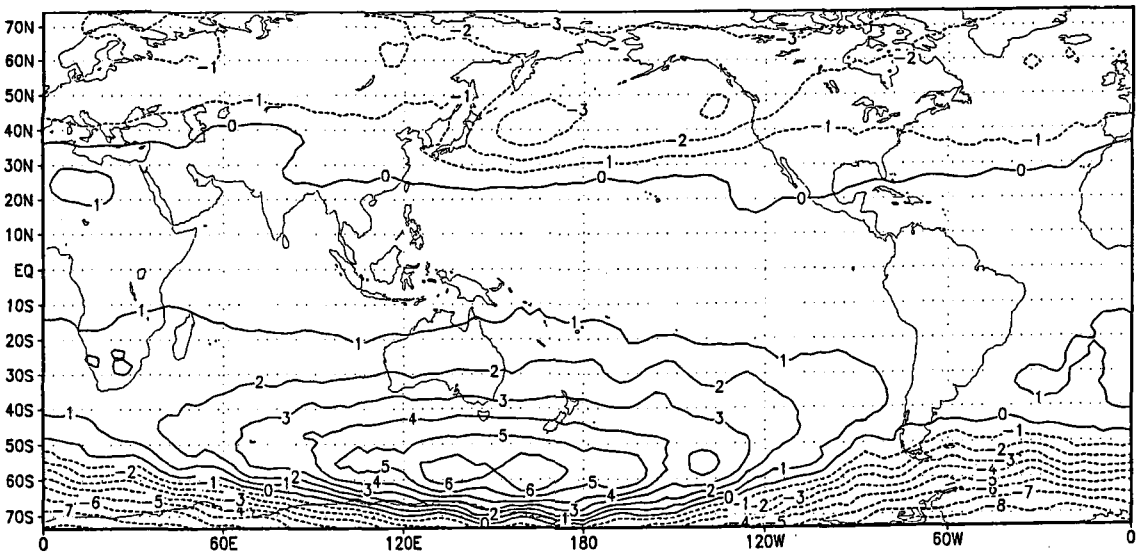


Fig. 1. Continued.

10월의 아노말리값은 4월의 경우와는 반대의 증감 경향, 즉 역위상을 보여주었다(Fig. 1d). 대략 40N-60S 지역의 하부 성층권 온도는 연평균에 비하여 상승하였고, 그 외의 지역의 경우는 하강하였다. 최대 온도 상승은 오스트레일리아 이남(140E, 55S)에서 약 6K로 나타났으며, 이는 이 시기에 같은 지역의 오존전량이 최대로 나타나는 것과 일치하였다(유정문·이혜란, 1999;

their Fig. 1c). 이는 성층권의 대기 대순환은 대류권과는 달리 여름 반구의 적도지방에서 오존층의 가열에 의한 상승기류 그리고 겨울 반구 고위도지방에서 하강기류가 있는 양반구에 걸친 순환을 하기 때문에, 겨울 반구의 고위도 지방에서는 하강기류에 수반되는 단열압축으로 온도가 상승하는 것으로 추정된다(곽중흠·소선섭, 1995).

Correlation in Ch4 between MSU & NCEP, 1980-1997

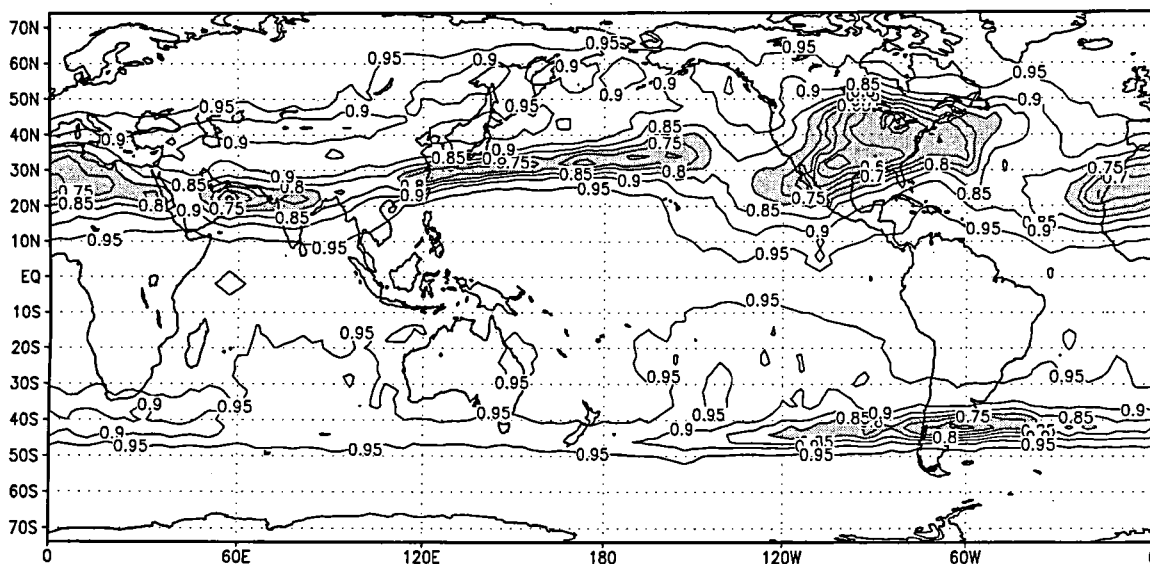


Fig. 2. Temporal correlation over 216 months from 1980 to 1997 of monthly MSU Ch4 and corresponding NCEP mean temperatures. The contour interval is 0.05. The values less than 0.8 are shaded.

요약하면, 하부 성층권 온도는 월평균 아노말리에서 여름반구에서 상승하였고 겨울 반구에서 하강하였는데, 특히 남반구 고위도 지역의 7월에 그 하강폭이 가장 크게(약 21K) 나타났다. 그러나 국지적으로 한반도 부근의 지역은 예외적이었다. 또한 열대지방에서는 계절별 온도변동이 약하므로 대류권과 마찬가지로 연중기가 뚜렷하지 않음을 알 수 있다(유정문 등, 1999). 또한 열대에서 극 지방으로 갈수록 공간에 따른 온도 경도가 크게 나타나므로, 고위도로 갈수록 하부 성층권 온도의 계절 변동폭이 큼을 알 수 있다.

MSU 위성관측과 모델 재분석 온도와의 상관

1980-97년 기간의 월평균 하부 성층권 온도에 대한 MSU 위성자료와 NCEP 재분석 결과에서 북반구의 고위도 지역, 10N-30S인 열대 지역, 그리고 남반구 중위도 지역 등 대부분의 지역에서 높은 상관($r \geq 0.95$)이 나타났다(Fig. 2). 그러나 20-30N 지역, 북미 대륙, 안데스 산맥 남단 주변에서는 낮은 상관($r \sim 0.75$)이 나타났다. 이들 일부 지역들의 하부 성층권은 아열대 제트기류가 통과하는 기층의 상부에 위치함으로써 여기서 존재하는 큰 온도 경도가 낮은 상관과 관련있다고 추정된다.

다시 말해, 온도가 급격히 변하는 제트기류 통과 지역에서 모델 재분석의 정확도가 상대적으로 낮을 수 있다고 추정된다. 한편 MSU 위성자료의 경우에도 Spencer and Christy(1993, their Fig. 4) 연구에서 지적된 바와 같이 채널4 월평균값의 잡음에 대한 시그널(Signal to Noise) 값이 아열대 지역, 일본 동쪽 해상, 그리고 북미대륙에서 낮게 나타난다. 이것은 이들 지역에서 MSU 위성자료에 내포된 기후 시그널 특징이 약하고, 이 자료에 잡음이 많이 포함되었다는 것을 의미한다. 이 곳은 MSU와 NCEP과의 낮은 상관 지역과도 잘 일치한다.

Shah and Rind(1998, see Fig. 5)는 NCEP 재분석 자료와 MSU 채널4 기후값을 각 계절별로 비교한 후에 NCEP과 MSU의 차이를 조사한 바 있다. 이들 결과에 의하면, 하부 성층권에서 위성관측과 모델결과는 대체로 잘 일치하나, 열대지역의 경우에 NCEP 온도가 MSU보다 높았으며, 특히 열대 해양에서 현저하게 높았다. 또한 NCEP은 남반구 고위도 지역에서 겨울에 MSU보다 4-6K 정도 높았다. 이러한 차이는 MSU 채널4 결과에서는 해양과 육지의 지표 경계조건 영향이 구별되어 나타나지 않으나 모델재분석에 입력된 레원존데나 육지표면 중관자료는 육지와 해양의 영향을 다르게 반영

Correlation in Ch4 between MSU & GEOS, 1981-1994

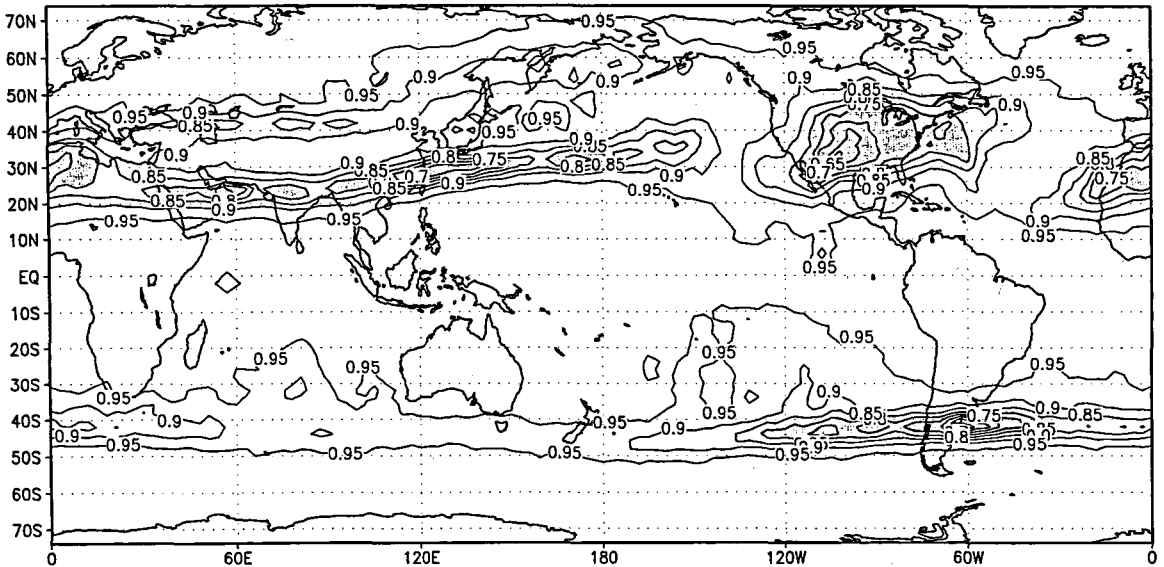


Fig. 3. Temporal correlation over 168 months from 1981 to 1994 of monthly MSU Ch4 and corresponding GEOS mean temperatures. The contour interval is 0.05. The values less than 0.8 are shaded.

하고 있어서 나타난다고 그들은 주장하였다.

1981-94년 기간에 대한 MSU 하부 성층권 온도 관측값과 GEOS 재분석 결과와의 상관은 이미 언급된 NCEP 결과(Fig. 2)와 비슷한 공간적인 형태를 나타내었으나, NCEP 경우에 비하여 다소 높게 나타났다(Fig. 3). 이는 GEOS 자료의 유도 과정에서 MSU 관측자료의 포함 정도가 NCEP보다 높기 때문으로 추정된다 (Pfaendtner *et al.*, 1995).

관측과 모델의 하부성층권 온도에 대한 경험적교합수 분석

하부 성층권 온도를 나타내는 MSU 위성관측과 모델 재분석(NCEP, GEOS) 자료에 대한 EOF 분석은 온도의 시공간 변동을 모드별 공간분포와 그에 해당하는 주성분 진폭 시계열로 분리하여 나타낸다. 월평균 온도에 대한 분석에서 연주기를 나타내는 모드1은 모든 지역에서 가장 큰 값($\geq 70.3\%$)을 보이며, 이러한 경향은 열대태평양에서 가장 현저하다(Table 2). 연주기가 제거된 월평균 아노말리값에 대한 모드1은 월평균값에 대한 것보다 상대적으로 작다(Table 3). MSU는 모드별로 평균 $\pm 5\%$ 이내에서 두 모델 재분석과 일치하며, NCEP보다

는 GEOS에 더 일치한다(Tables 2 and 3).

하부 성층권 온도의 월평균값

태평양(Table 2의 Pac1)의 하부 성층권 온도에 대한 분석에서 모드1은 MSU 관측과 두 모델(NCEP, GEOS) 재분석 결과들의 공간 분포에서 한반도와 일본의 동쪽 해역을 제외하고 공통적으로 같은 변동 경향을 나타내고 있다(Fig. 4). 뚜렷한 연주기를 보이는 시계열에서, 한반도 부근의 하부 성층권 온도는 여름에 하강하고 겨울에 상승하는 경향을 나타낸다. 하부 성층권 온도와 오존전량이 경년 변화에 있어서 양의 상관이 있음을 고려할 때(Hansen *et al.*, 1995), 이것은 한반도 부근에서 오존전량이 여름에 감소하고 겨울에 증가하는 것과 관련이 있는 듯 보인다(유정문·이혜란, 2000). 관측과 모델의 시계열에서 온도 변동의 극값은 1982년 8월과 1991년 8월에 나타난다. 시계열과 고유벡터 공간 분포를 함께 고려할 때, 이는 멕시코의 엘치촌 화산(17.4N, 93.2W) 폭발이 있던 1982년 8월과 필리핀의 피나투보 화산(15.1N, 120.4E) 폭발이 있었던 1991년 8월 이후에 한반도와 일본 부근을 제외한 태평양상의 하부 성층권에서 광범위하게 온도 증가가 있었으며, 특히 20N-20S 열대태평양에서 가장 크게 나타난 것과 관련이 있다고

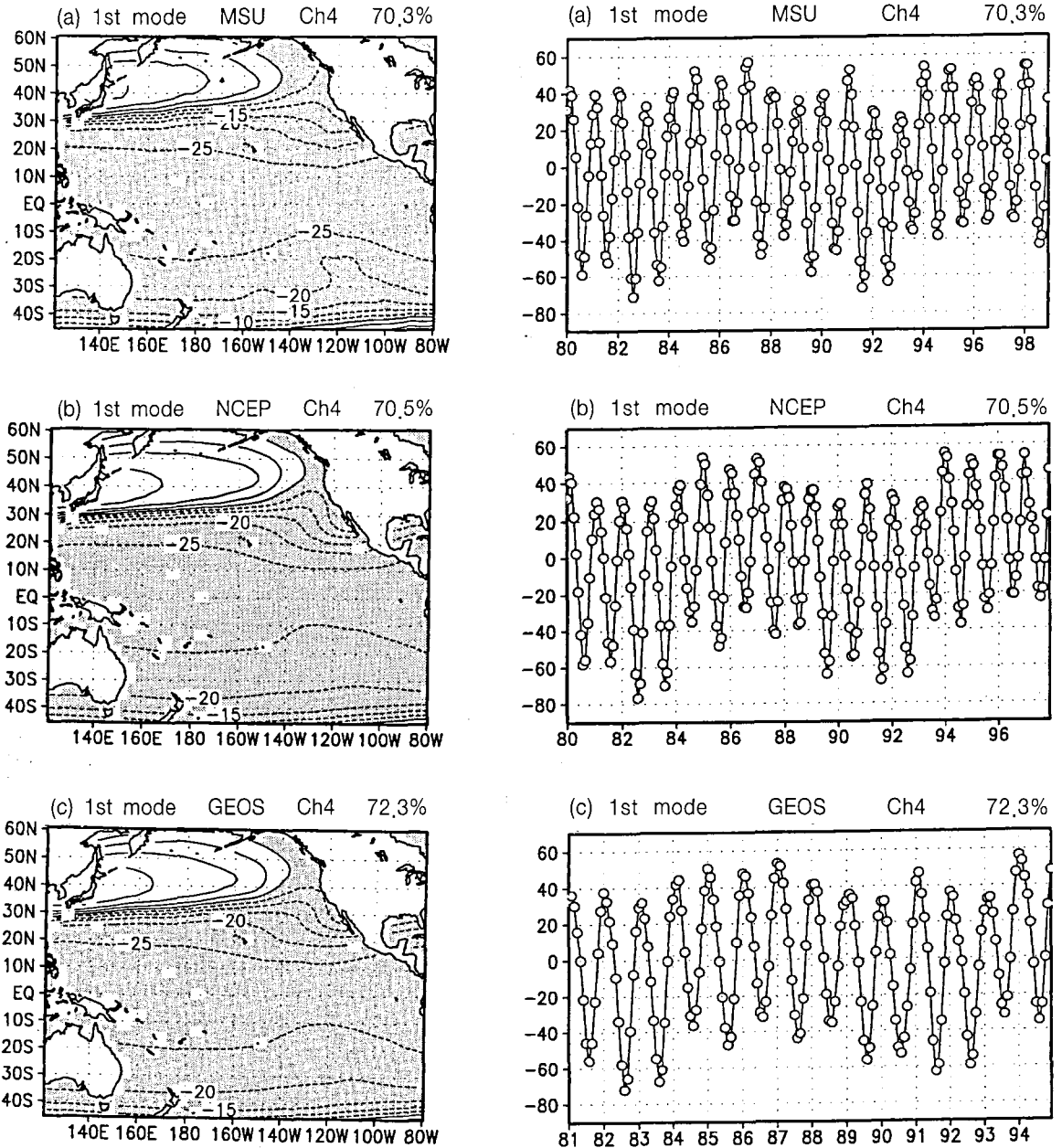


Fig. 4. The first mode of EOFs of the covariance matrix in left panel and corresponding principal component time series in right panel of monthly mean MSU Ch4 brightness temperature in the Pacific Ocean of (121.5E-79.5W, 45.5S-60.5N) of (a) MSU, (b) NCEP, and (c) GEOS. The time series in the right side represent the projections of the temperature patterns at each time on the EOF patterns shown in the left side. A smoothing function of (0.25, 0.5, 0.25) is used on the time series.

추정된다.

한반도에 영향을 주는 하부 성층권 온도의 시공간 형태를 조사하기 위하여 육지가 함께 포함된 열대 및 중위도의 서태평양과 인도양(Table 2에서 Pac2)에 대한

월평균 자료의 EOF 분석을 실시하였다(Fig. 5). 모드 1은 MSU와 재분석들에서 공통적으로 한반도와 일본을 포함한 20N-50N 위도대와 그 이외의 지역이 하부 성층권 온도의 변동에 있어서 서로 반대 위상을 보인다(Fig.

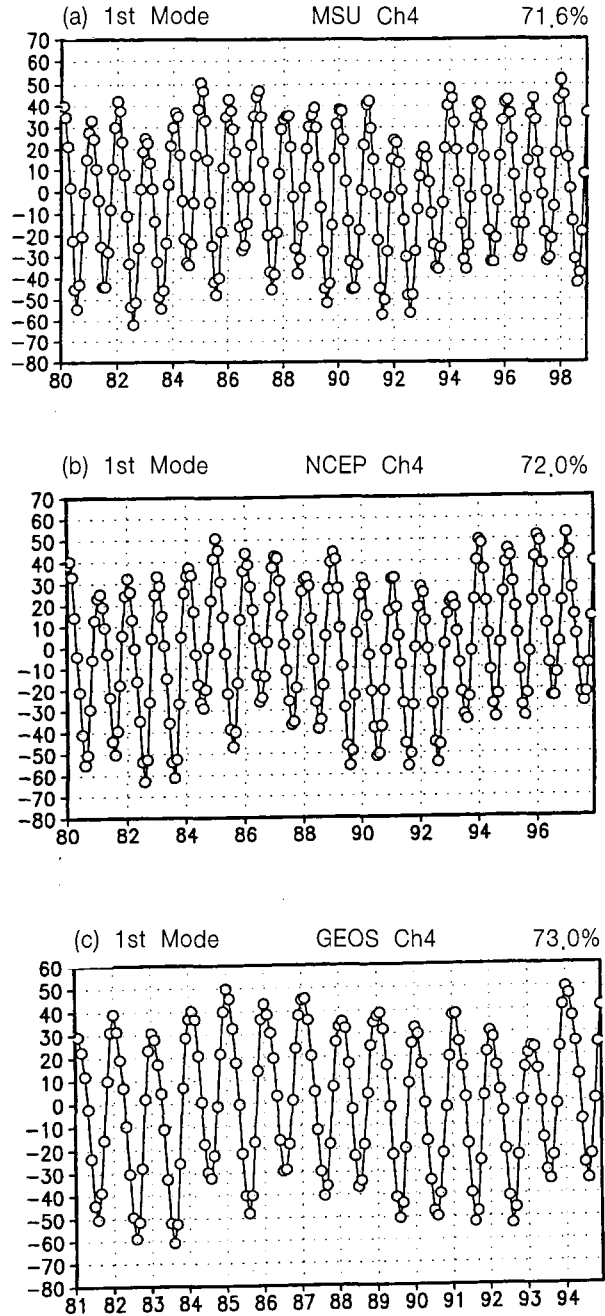
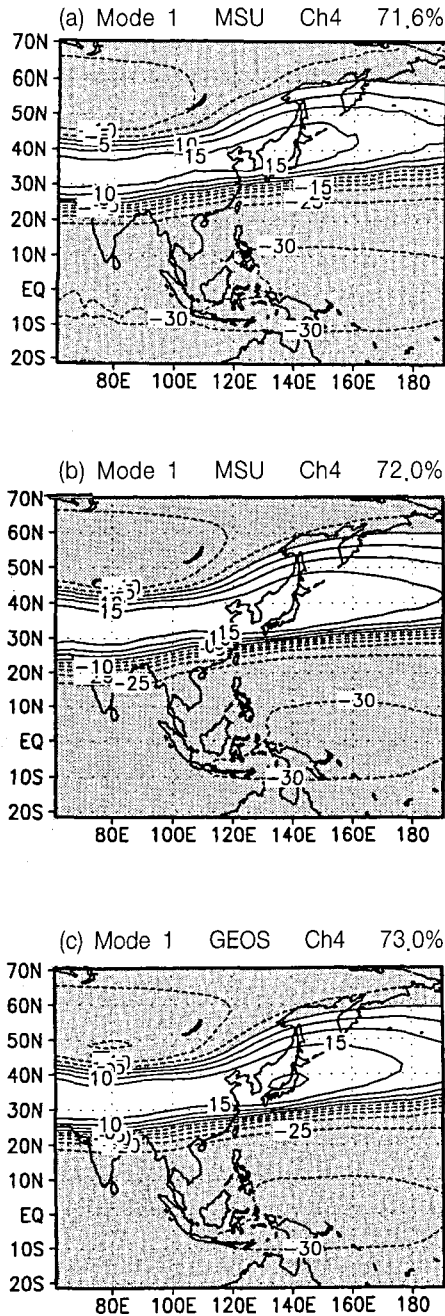


Fig. 5. Same as in Fig. 4 except for the region of (61.5E-169.5W, 21.5S-70.5N).

5). 이러한 사실은 오존 전량의 변동 경향과 유사하다 (유정문·이혜란, 2000). 연주기를 나타내는 모드 1의 시계열에서 쿠로시오 해류가 통과하는 일본 동쪽 해양의 하부 성층권 온도는 겨울에 높아지고 여름에 낮아지는 경향을 보이는데, 이는 중간 대류권에서 나타나는

온도 경향과는 반대이다(유정문 등, 1999)

하부 성층권 온도의 아노말리

Figs. 6~10은 MSU 위성관측과 두 개의 모델 재분석 자료로부터 유도된 하부 성층권 온도의 월평균 아노말

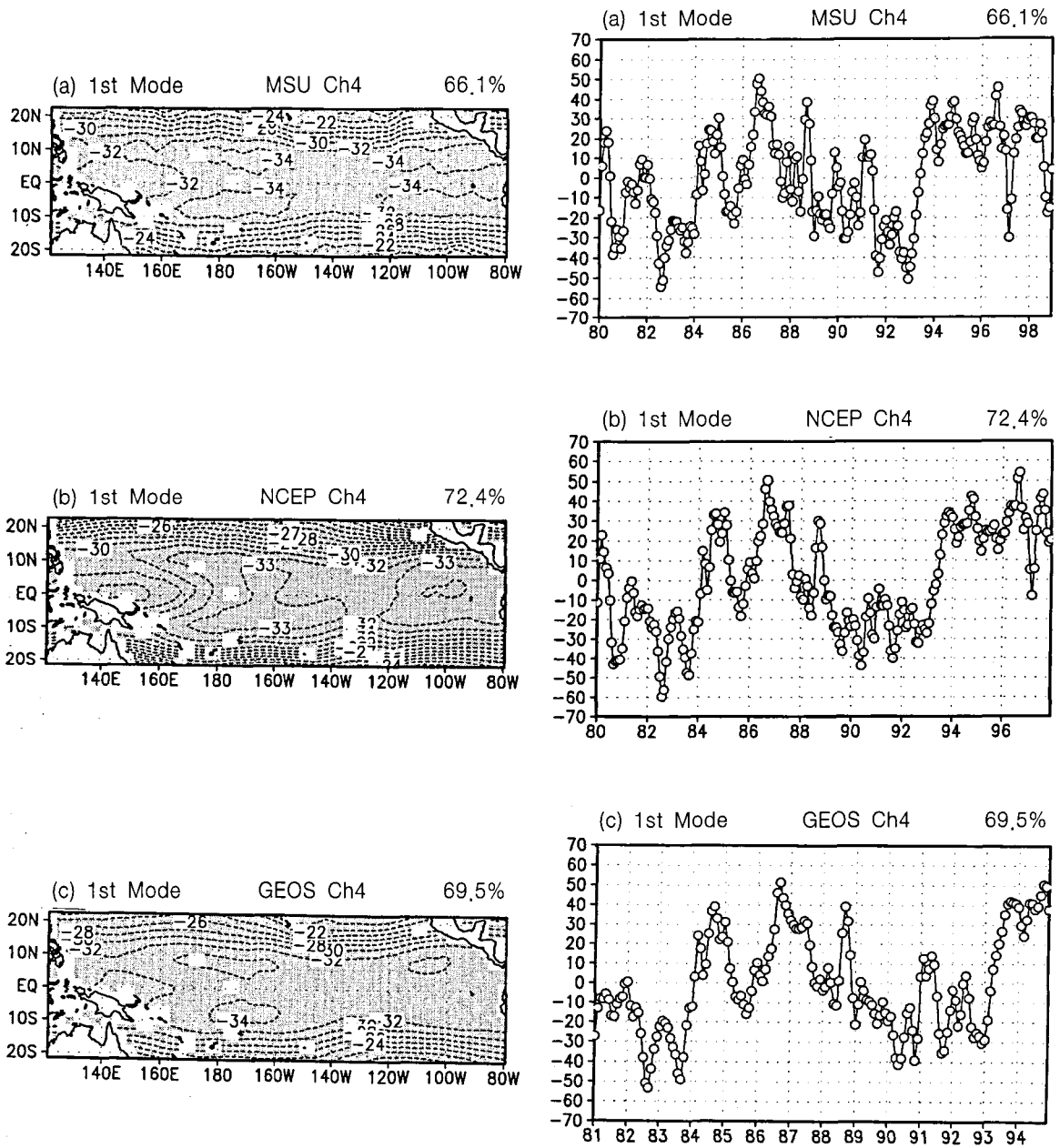


Fig. 6. The first mode of EOFs of the covariance matrix in left panel and corresponding principal component time series in right panel of monthly mean MSU Ch4 brightness temperature anomaly in the tropical Pacific Ocean of (121.5E-79.5W, 21.5S-22.5N) of (a) MSU, (b) NCEP, and (c) GEOS. The time series in the right side represent the projections of the temperature patterns at each time on the EOF patterns shown in the left side. A smoothing function of (0.25, 0.5, 0.25) is used on the time series.

리값에 대한 EOF 분석이다.

열대 태평양(Table 3의 Pac3)에서의 월평균 아노말리 값에 대한 모드1에서 위성과 모델 재분석 결과 모두는

열대 태평양의 전 지역에서 같은 방향의 온도 증감 경향을 보인다(Fig. 6). 공간 분포와 시계열을 함께 고려할 때, 1982년 8월과 1991년 9월에 이 지역에서 온도 상승

이 컸음을 알 수 있다. 이는 1982년 4월의 엘치촌 화산과 1991년 6월의 피나투보 화산의 분화에 따라서 많은 양의 화산가스가 하부 성층권에 유입된 것과 관련이 있다고 추정된다. 15~25km에 해당되는 성층권 고도에서 강한 바람은 화산물질을 전구로 수송하였으며, 화산에 의해 방출된 주요 가스인 이산화황은 몇 주가 지나 산소와 수증기와 결합하여 황산가스를 형성하였다(Ahrens, 1994; Hansen *et al.*, 1996). 또한 이 가스는 응결하면서 미세한 물방울이나 에어러솔이 되어 두꺼운 연무(haze)를 생성하였다. 이러한 연무는 성층권에 몇 년 동안 머물면서 광학적 두께를 증가시킬 뿐만 아니라 태양에너지의 일부도 흡수·반사하여 이곳의 온도를 상승시킬 수 있다(Newell, 1970). 화산 폭발에 의한 성층권(30-50 hPa)의 온도 상승은 적도에서 1996년 9월에 4°C 정도로 나타났고, 0~30N 위도대에서는 같은 해 9~10월 동안에 20년 월평균에 비하여 3.5°C 정도 크게 나타났다(Labitzke and McCormik, 1992).

한편 이러한 황산가스는 태양복사의 효과적인 반사물질로 작용하면서 지표가 태양에서 받을 수 있는 에너지를 일부 차단하여 전구적으로 지표 부근의 온도를 하강하게 한다(Ahrens, 1994). 피나투보 화산은 북반구의 필리핀에 위치해 있으나 이 화산에서 방출된 황산 같은 화산 에어러솔 농도의 최대값은 약 반년이 지난 후에 적도에서 나타나고, 에어러솔 분포는 양 반구에 대해서 거의 대칭의 형태를 이룬다(Hansen, 1996). 특히 화산 폭발의 규모에 있어서 엘치촌 경우가 피나투보보다 작았음에도 불구하고, 1982년 8~9월의 하부 성층권 온도가 엘치촌과 관련하여 더 크게 상승하였는데, 이는 화산폭발 외에 준2년 주기진동(Quasi-Biennial Oscillation; QBO) 영향도 함께 고려할 때 설명될 수 있다. 엘치촌 화산폭발 후에 준2년 주기진동이 지배적인 하부 성층권 바람장은 동풍에서 서풍으로 전환되면서 온도 상승을 더욱 지속시켰다(Christy and Drouilhet, 1994). 그러나 피나투보 경우에는 서풍에서 동풍으로의 전환으로 인하여 화산폭발에 따른 성층권의 온도 상승이 일부 약화되었다.

열대 태평양의 모드 2에서 MSU와 GEOS 시계열들은 QBO를 나타낸다(Figs. 7a, 7c). 일반적으로 QBO는 50 hPa 고도, 하층에서는 급격히 소멸하기 때문에 하부 성층권에서는 중간 성층권에 비하여 작은 변동을 보여준다(Holton and Tan, 1980). 성층권의 자오면 순환은 여

름 반구 적도지방에서 상승하여 겨울 반구 극지방에서 하강하는 양반구에 걸친 대순환을 특징으로 한다(곽종흠·소선섭, 1995). 그러나 적도를 중심으로 위도에 평행하게 동풍과 서풍이 24~26개월의 주기로 교대로 나타나는 준2년 주기진동은 연직으로 전파되는 켈빈파(Kelvin wave)와 혼합 로스비-중력파(mixed Rossby gravity wave)로 인하여 주로 발생한다(Holton and Lindzen, 1972).

QBO에 관한 Plumb(1985) 연구에 의하면, 동쪽으로 전파되는 켈빈파는 서풍 운동량에 필요한 원천을 제공하고 서풍의 시어(shear) 지역을 증가시킨다. 그 후에 대기의 시어 지역이 서풍으로 강화되면 켈빈파는 약화되고 혼합 로스비-중력파가 상층으로 전파된다. 혼합 로스비-중력파는 동풍 운동량을 상층으로 전달하고 동풍 시어 지역을 증가시킨다. 시어 지역이 동풍으로 강해지면 대기에서 혼합 로스비-중력파가 약화되고 켈빈파가 상층으로 전파되며, 이러한 순환이 대략 2년 주기로 반복되어 QBO가 발생한다.

MSU와 GEOS 결과의 공간분포(Figs. 7a, 7c)에서 10S-10N의 위도대를 따라 평행한 띠 형태가 나타나며, 인터넷에서 입수된 해당 지역의 바람장(Naito and Hirota, 1997)과 비교하였을 때 26-29개월의 주기로 동풍과 서풍이 교대로 나타남을 알 수 있다. 적도 부근에서 동풍시에 하부성층권의 온도는 하강하며 서풍 시에는 상승하는 경향이 나타나지만, 북반구의 고위도 지역에서는 적도의 경우와 반대의 경향이 나타난다(Labitzke and van Loon, 1988). NCEP에서는 MSU와 GEOS와는 달리 엘니노 시에 열대 동태평양에서 적도를 중심으로 아령 모양의 남·북 대칭 공간 형태가 나타난다(Fig. 7b; Lau *et al.*, 1998). 공간 분포와 시계열을 함께 고려할 때, 엘니노가 있었던 1986-87년, 1992-93년 그리고 1997년에 열대 동태평양의 하부성층권 온도가 하강함을 보여준다. 특히 온도 하강은 1997년에 가장 크게 나타났으나, 1982-83년의 엘니노 특징은 뚜렷하지 않다.

열대 태평양에 대한 모드 3은 위성관측과 모델 결과들에서 모두에서 적도 대칭의 형태를 보이는데 이는 중간 대류권에서 엘니노 시기에 나타나는 공간적인 특징과도 유사하다(Fig. 8; Yulaeva and Wallace, 1994). 열대 동태평양의 하부 성층권 온도는 MSU와 재분석 모두에서 1982-83년, 1987-88년, 그리고 1991-92년의 엘

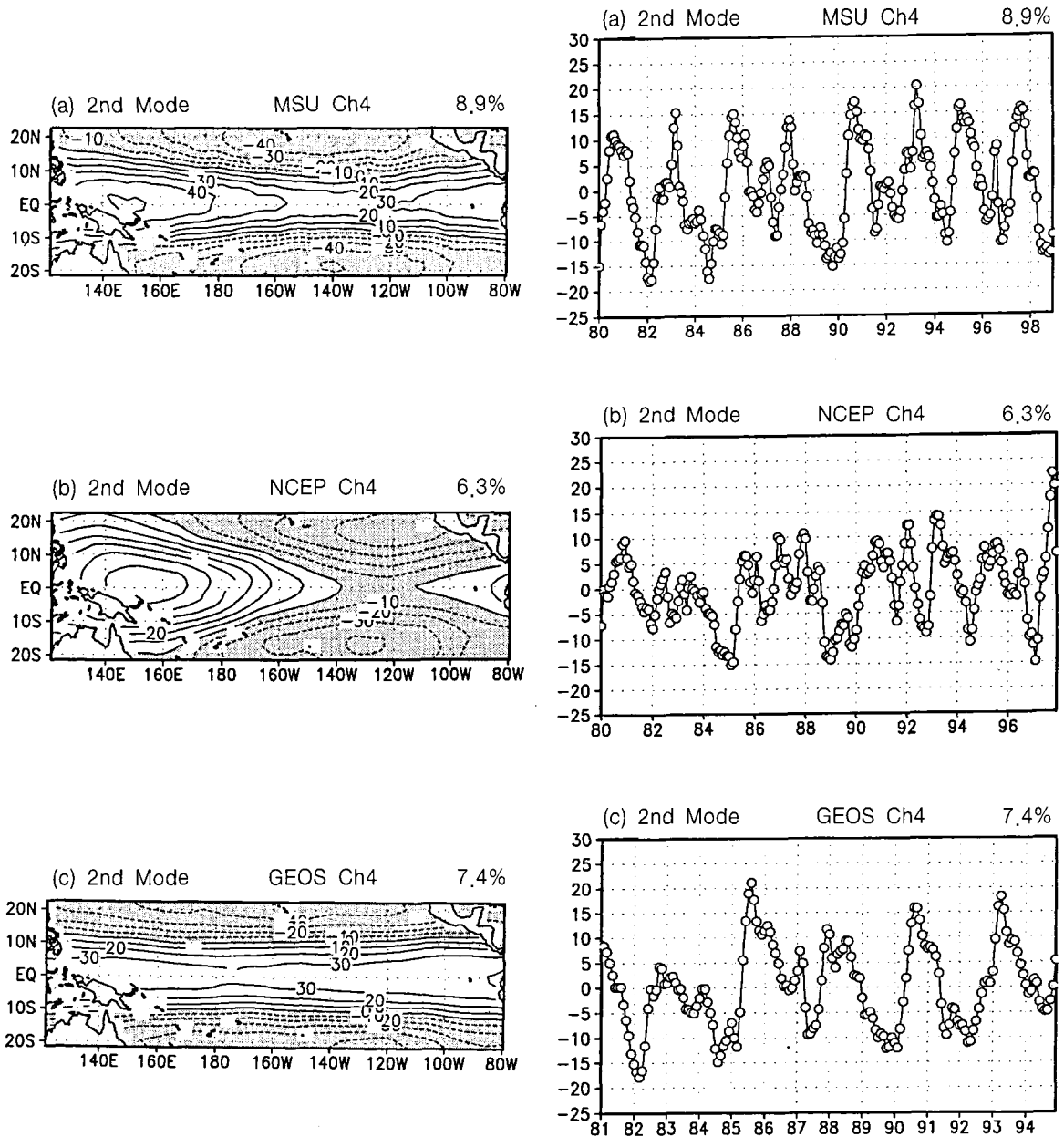


Fig. 7. Same as in Fig. 6 except for the second mode.

니노 시기에 해수면 온도와 달리 하강하였다. 연구 조사 기간이 최대 1998년까지로 가장 긴 MSU 경우에는 1997-98년 엘니뇨 기간에도 이 지역의 하부 성층권 온도가 현저하게 감소하였음을 알 수 있다(Fig. 8a). 특히 관측과 두 모델 모두의 하부 성층권 온도는 1992년의 엘니뇨 기간에 이 지역에서 최대로 하강하였다. 세 종류 자료 결과의 공간분포들은 공통적으로 대략 날짜

변경선을 중심으로 온도 변동에 있어서 동서 대비를 보인다.

열대 중앙 및 동 태평양에서의 하부 성층권 온도는 엘니뇨 시기에 평년에 비하여 3K 이상 하강하는데 반하여 열대 서태평양의 경우는 상대적으로 약하게 1~2K 정도 하강한다(Randel and Cobb, 1994). 이러한 엘니뇨 시의 하부 성층권 온도 하강의 원인을 조사해 보

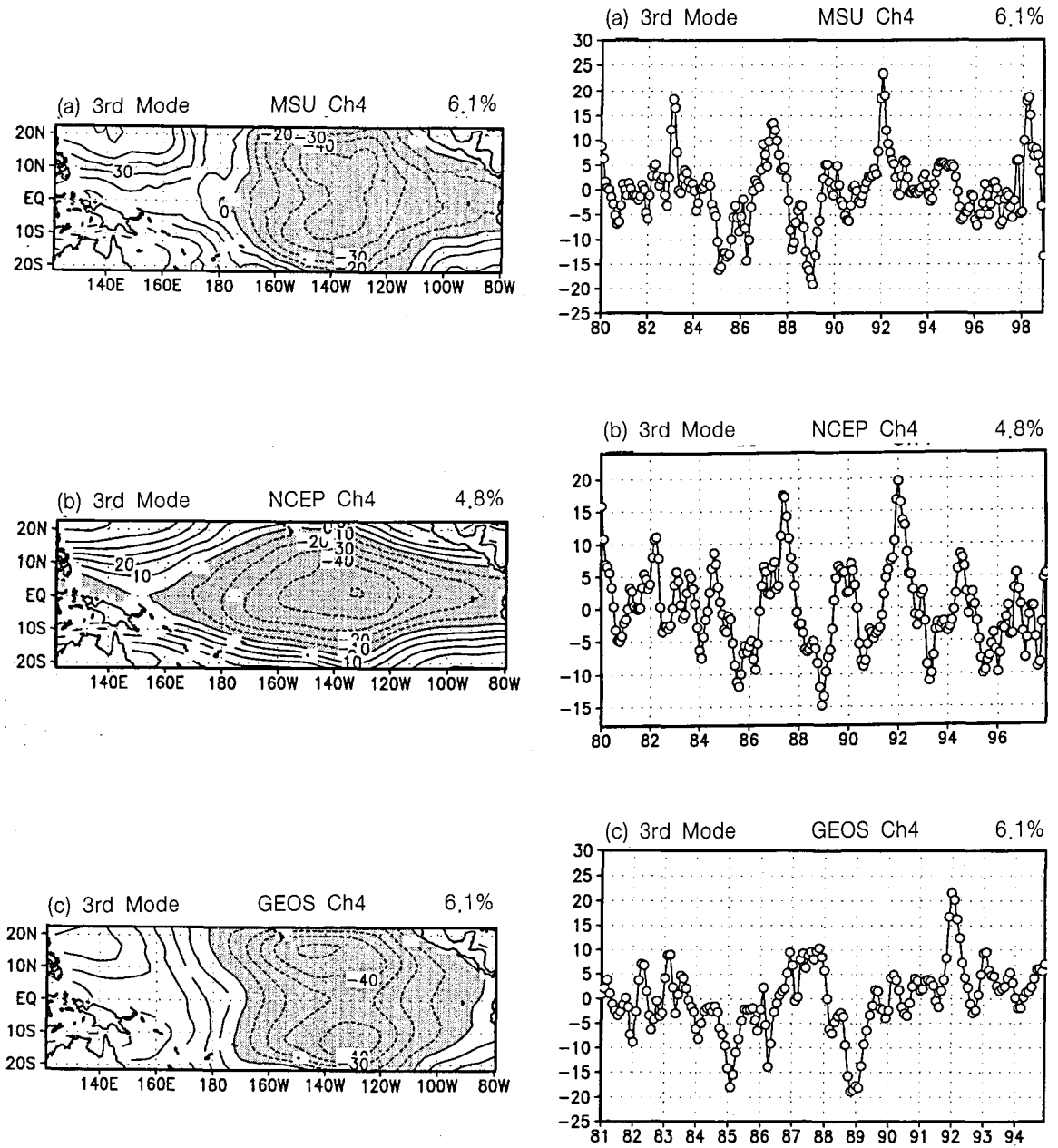


Fig. 8. Same as in Fig. 6 except for the third mode.

면, 이 기간에 열대 동태평양 부근의 수온 상승은 대류성 구름의 발달을 유도하며, 이때 방출된 잠열은 연직 속도를 증가시킨다. 이로 인하여 남북 기압차의 증가가 결국 동서 제트기류를 강화시키고, 대류권계면도 높아져 단일 팽창과 함께 이 부근의 온도가 낮아진다(Lau et al., 1998). 이상에서 언급된 하부 성층권 온도와 엘니

노 현상과의 관계에 추가하여, Maruyama and Tsuneoka (1988)은 성층권에서 QBO로 인한 서풍의 빠른 강화와 엘니노가 서로 연관되어 있다고 주장하였다. 이들 연구에 의하면, 엘니노에 의해 강화되면서 동진하는 퀵빈파는 서풍 운동량에 에너지를 전달한다.

Fig. 9은 열대 대서양(Atl1)의 월평균 아노말리값에

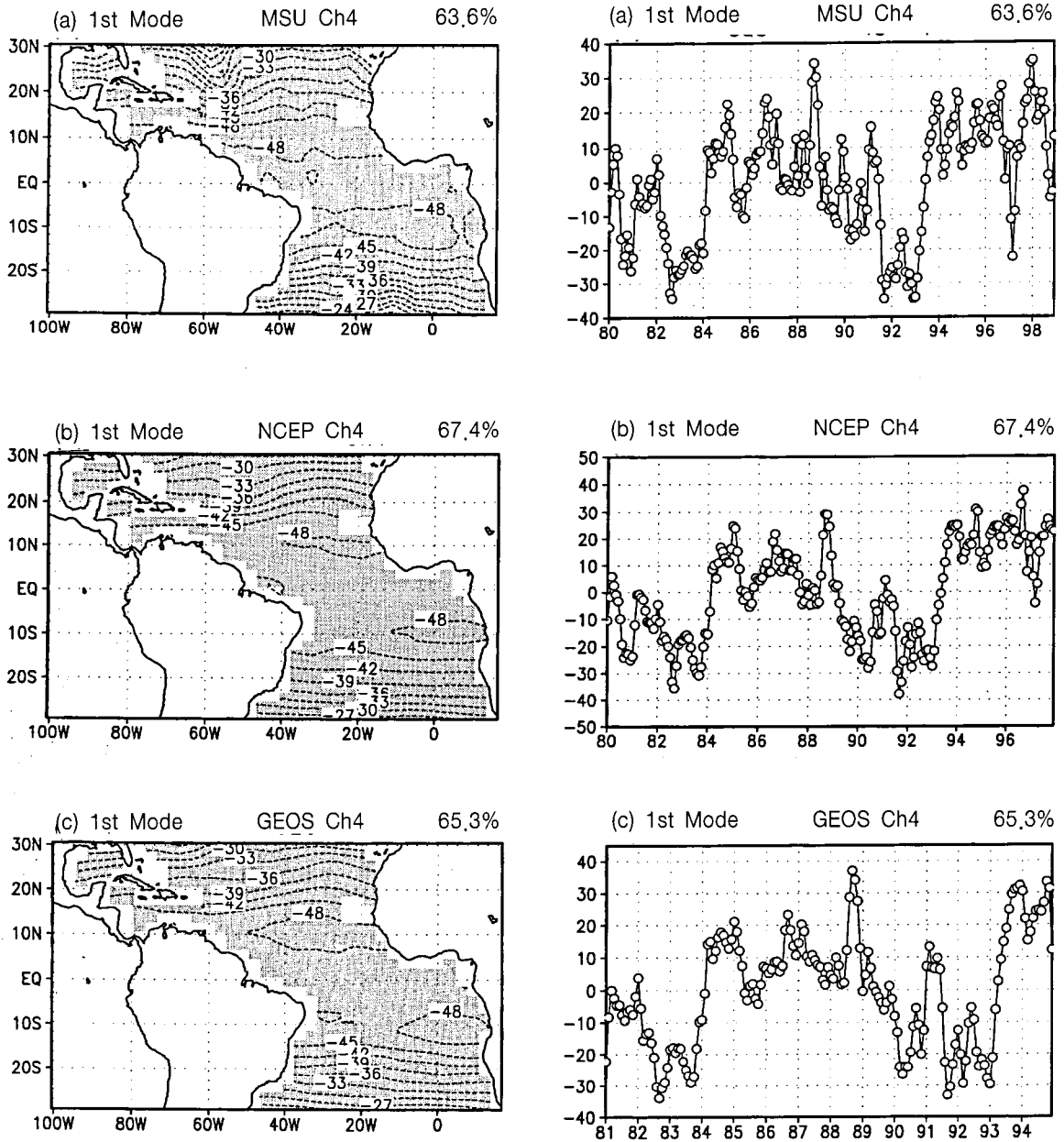


Fig. 9. Same as in Fig. 6 except for the tropical Atlantic Ocean of (100.5W-16.5E, 29.5S-30.5N).

대한 EOF 분석의 모드 1이다. 관측과 모델 모두는 열대 태평양 모드 1의 경우(Fig. 6)와 마찬가지로 전 지역에서 같은 부호의 하부 성층권 온도의 변동 경향을 나타낸다. 공간 분포와 시계열을 함께 고려할 때, 엘치존과 피나투보의 화산폭발 영향으로 각각 1982년 9월과 1991년 9~11월에 전 지역에서 하부 성층권 온도가 상

승하였음을 추정할 수 있다. 특히 10S-10N의 지역에서 온도 상승이 가장 크고, 이 지역에서 고위도로 갈수록 그 상승 정도가 약하다.

열대 대서양에 대한 모드 2의 시계열에서 위성관측과 모델 재분석 모두는 24~27개월의 준2년 주기를 변동을 나타낸다(Fig. 10). 또한 라니냐 현상이 있었던 1984

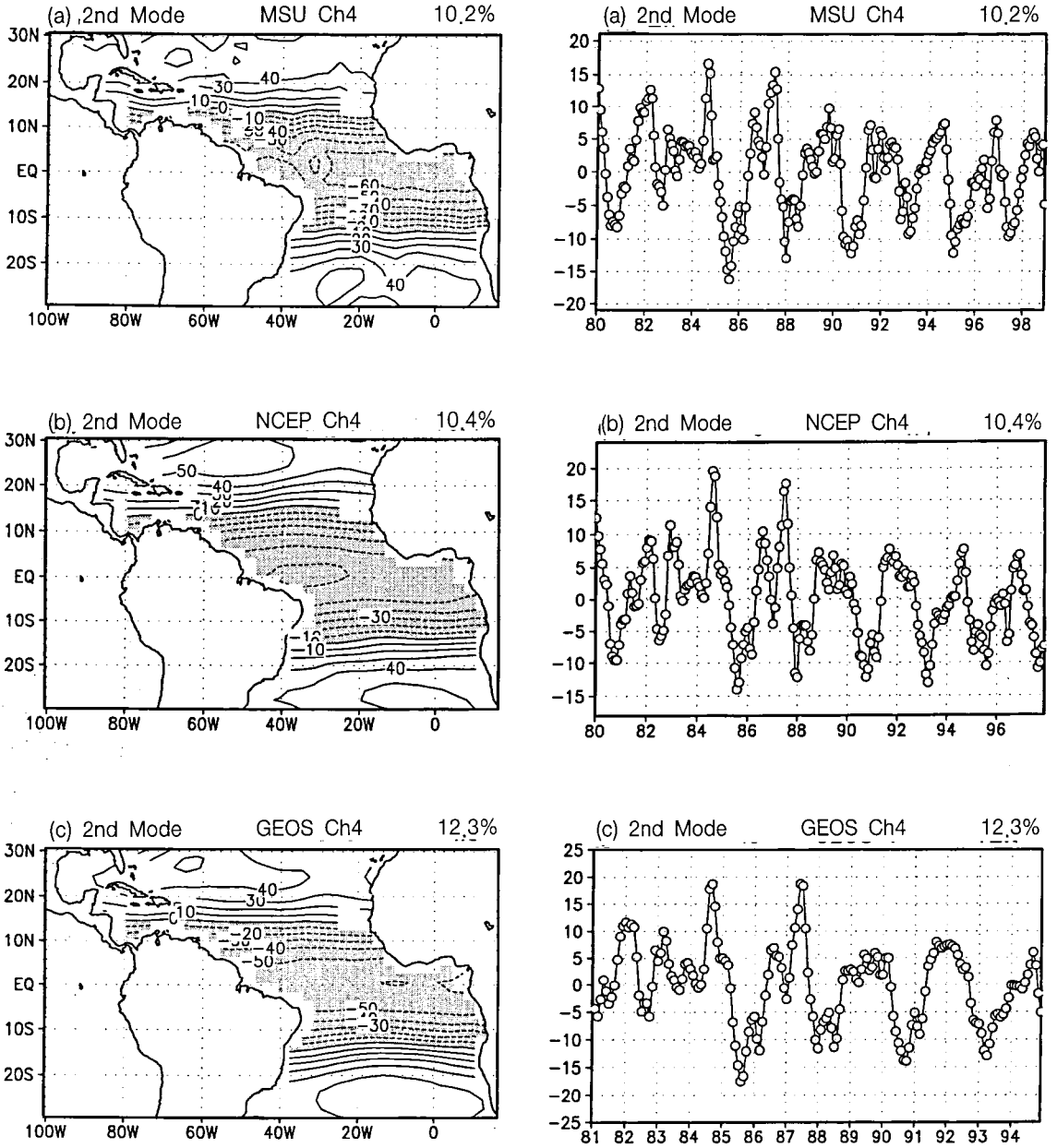


Fig. 10. Same as in Fig. 9 except for the second mode.

년 8월~1985년 8월 기간의 변동이 세 종류 자료 모두에서 공통적으로 가장 크게 나타난다. 공간분포에서 15N-15S와 그 이외 지역의 온도 변동이 그 증감 방향에 있어서 서로 반대임을 알 수 있다. 관측 및 모델의 모드 3 시계열에서는 열대 태평양의 경우와는 다르게 엘니뇨 특징들이 나타나지 않으며, 그 공간 분포에서는

열대 대서양에서 북서·남동 지역이 대비하는 쌍극자 형태가 나타난다(이 논문에는 제시되지 않았음).

결론

본 연구에서는 MSU 채널4 위성관측과 두 모델

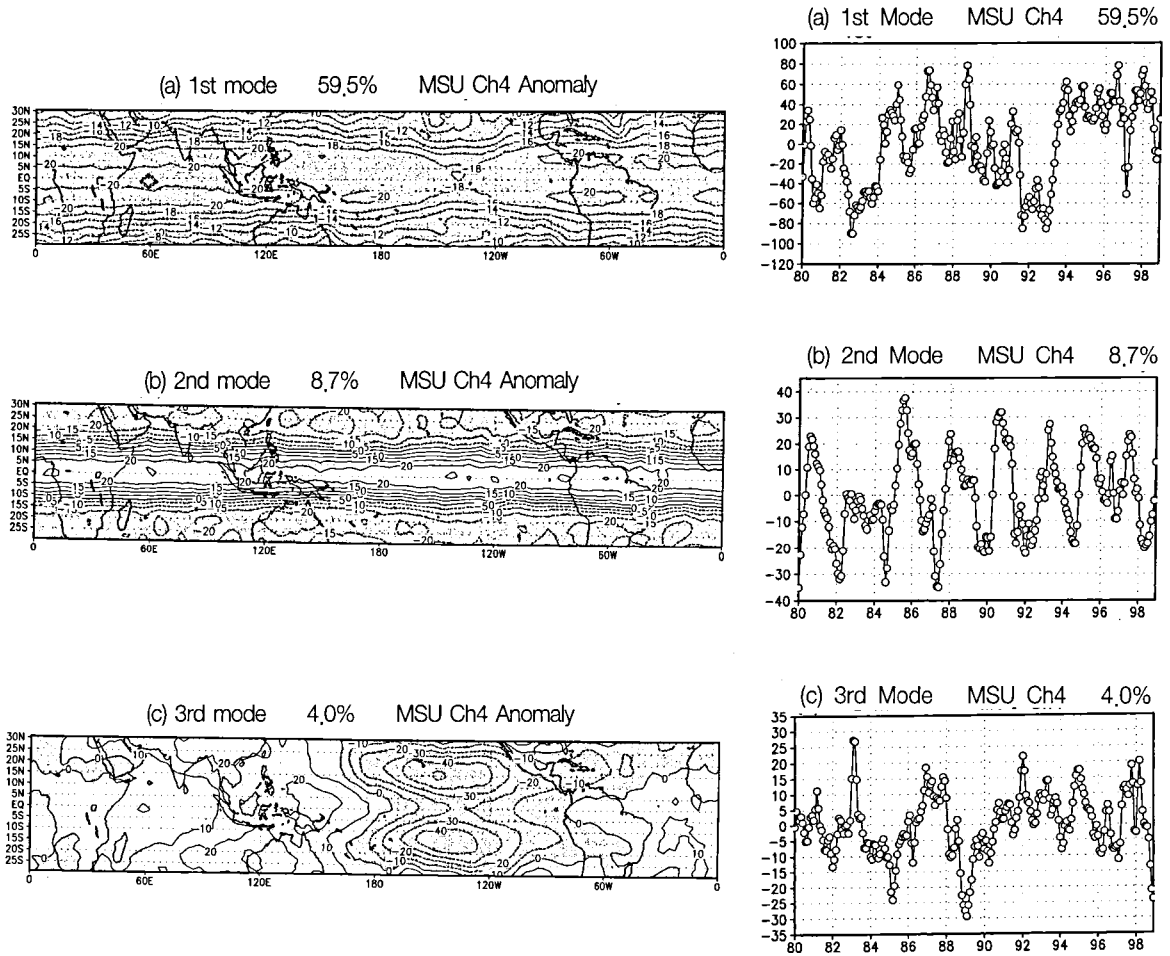


Fig. 11. The EOFs of the covariance matrix in left panel and corresponding principal component time series in right panel of monthly mean MSU Ch4 brightness temperature over the 30S-30N region of (a) mode 1, (b) mode 2, and (c) mode 3. The time series in the right side represent the projections of the temperature patterns at each time on the EOF patterns shown in the left side. A smoothing function of (0.25, 0.5, 0.25) is used on the time series.

(NCEP, GEOS) 재분석 자료로부터 얻은 하부 성층권의 온도들을 상관 및 경험직교함수 분석을 통하여 비교 분석하였다. MSU 자료는 1980-98년, NCEP은 1980-97년, 그리고 GEOS는 1981-94년 기간에 대하여 태평양, 대서양, 그리고 한반도 부근의 분석을 위하여 2°위도×3°경도 격자로 정리된 후에 사용되었다.

MSU 하부 성층권 온도의 월평균 기후값 아노말리는 여름반구에서 증가하였고, 겨울반구에서 감소하였다. 특히 온도하강 폭은 겨울에 남반구 고위도 지역에서 ~22K로 가장 컸다. 열대지역에서는 계절적인 온도 변동이 중·고위도에 비하여 작아 대류권의 경우와 같이

연주기가 뚜렷하지 않았다. 한반도 주변과 중앙 아시아 지역은 북반구 다른 지역과 달리 하부 성층권 온도가 겨울에 상승하고 여름에 하강하는(대류권과 다른) 경향을 보였다. 또한 오스트레일리아 이남(140E, 55S) 지역에서 10월의 온도 상승(6K)은 같은 시기에 이 지역에서 오존 전량의 상승과 일치하였다.

MSU 위성관측과 NCEP 모델 재분석과의 상관은 대부분의 지역에서 높았다($r \geq 0.95$). 그러나 아열대 제트 기류가 통과하는 20N-30N 지역, 북미대륙, 그리고 안데스산맥 남부에서는 상대적으로 낮은 상관($r \sim 0.75$)이 나타났다. MSU와 GEOS와의 상관은 MSU와 NCEP 사이

의 결과와 비슷하였으나, 전자가 그 크기에 있어 다소 높게 나타났다. 이는 GEOS 재분석 자료가 그 유도 과정에서 NCEP보다 MSU 관측자료를 더 많이 활용했기 때문으로 추정되었다(Pfaendtner *et al.*, 1995).

하부 성층권 온도의 월평균과 아노말리값에 대한 경험적교합수 분석에서 위성관측 및 모델 결과의 시공간 분포들은 대체로 서로 유사하게 나타났다. MSU는 모드 별로 평균 $\pm 5\%$ 이내에서 두 모델 재분석과 일치하였으며, NCEP보다는 GEOS에 더 일치하였다. 태평양 지역의 하부 성층권 온도의 월평균값에 대한 모드 1은 연 주기를 나타냈다. 한반도를 포함한 아시아에 대한 모드 1은 관측 및 모델에서 공통적으로 한반도 지역의 하부 성층권 온도가 1월에 최대이고 7월에 최소임을 보여 주었다.

열대 태평양 지역의 하부 성층권 온도 아노말리에 대한 분석에서 모드 1은 화산폭발에 의한 하부 성층권 온도 상승을 관측 및 모델 자료에서 공통적으로 보였다. 또한 화산폭발과 관련하여 1982년의 온도 변동이 1991년보다 크게 나타났는데, 이는 화산폭발 뿐만 아니라 QBO도 하부 성층권 온도의 변동에 중요한 변수임을 보여주었다. 1982년 엘치촌 화산폭발 후에 동풍에서 서풍으로 전환된 QBO의 형태는 하부 성층권 온도 상승을 더욱 지속시켜 주었다. 아노말리의 모드 2에서 MSU와 GEOS는 QBO 특징을 보이나, NCEP은 적도를 중심으로 남·북 대칭의 아령 모양 공간 형태로 나타나는 엘니노 특징을 열대 동태평양에서 보였다. 모드 3은 관측과 모델 모두에서 엘니노 특징을 공통적으로 반영하나 변동 크기에 있어서는 서로 일치하지 않았다. 결과적으로 하부 성층권의 열적 상태 기여도에서 화산 폭발의 영향이 가장 컸으며 QBO, 엘니노 순으로 나타났다. 이러한 기여도는 30N-30S의 열대지방 위도대에 대한 MSU 위성관측 분석에서도 비슷하게 나타났다(Fig. 11). 여기서 모드 1은 화산폭발, 모드 2는 QBO, 그리고 모드 3은 엘니노 특징을 반영하였다. 한편, 열대 대서양의 하부 성층권 온도 경우에는 화산폭발 및 QBO가 지배적인 역할을 하였으며, 엘니노 효과는 나타나지 않았다.

본 연구는 하부 성층권 온도에 대한 위성관측과 모델 재분석 자료와의 상호 비교를 통하여 자료의 상대적인 정확성을 평가할 수 있으며, 이들 자료가 개선 가능성과 함께 기후 변동에 대한 이해와 통찰을 높이는데 활용될 수 있음을 보여준다. 앞으로 MSU 위성관측보다

더 많은 채널을 가진, 정교한 AMSU(Advanced Microwave Sounding Unit)를 이용하면, 각 위도별로 다르게 나타나는 하부 성층권의 온도를 보다 정확하게 고도에 따라 측정할 수 있을 것으로 기대된다.

사 사

이 연구는 1999년도 한국학술진흥재단 선도 연구자 지원 연구비(과제번호; KRF-99-041-D00445 D6201)의 지원으로 이루어졌으며, 이에 감사드린다. 본 논문을 위하여 좋은 지적을 해주신 심사위원께도 감사드린다.

참고문헌

- 곽종흠, 소선섭, 1995, 일반기상학, 교문사, 347 p.
- 유정문, 김소현, 1998, 마이크로파 위성자료의 하부성층권 온도에 대한 경험적교합수 분석. 한국지구과학회지, 19, 649-663.
- 유정문, 박은정, 김규명, 허창희, 1999, 중간 대류권 열적 상태에 관한 위성자료와 모델 재분석 결과 사이의 비교. 한국기상학회지, 35, 549-564.
- 유정문, 이혜란, 2000, 오존전량의 시·공간 변동 및 대기 열적 상태와의 상관. 한국기상학회지, 36, 인쇄중.
- Ahrens, C. D., 1994, *Meteorology Today*, 5th ed., West Publishing Company, 591 p.
- Caplan, P., 1988, Precipitation and diffusion processes. *Documentation of the Research Version of the NMC Medium Range Forecasting Model*, National Meteorological Center.
- Christy, J. R. and Drouilhet, S. J., 1994, Variability in daily, zonal mean lower-stratospheric temperatures. *J. Climate*, 7, 106-120.
- Doty, B. E., 1992, *Using the Grid Analysis and Display System(GrADS)*, Center for Ocean-Land-Atmosphere Interactions, Maryland, USA, 41 p.
- Grell, G. A., 1993, Prognostic evaluation of assumptions used by cumulus parameterization. *Mon. Wea. Rev.*, 121, 764-787.
- Hansen, J. E., Wilson, H., Sato, M., Ruedy, R., Shah, K. P. and Hansen, E., 1995, Satellite and surface temperature data at odds? *Clim. Change*, 30, 103-117.
- Hansen, J. E., 1996, A Pinatubo climate modeling investigation. *NATO ASI Series Vol. I* 42, 233-272.
- Harshvardhan, Davies, R., Randall, D. A and Corsetti, T. G., 1987, A fast radiation parameterization for atmospheric

- circulation models. *J. Geophys. Res.*, 92, 1009-1016.
- Helfand, H. M. and Labraga, J. C., 1988, Design of a non-singular level 2.5 second-order closure model for the prediction of atmospheric turbulence. *J. Atmos. Sci.*, 45, 113-132.
- Helfand, H., Fox-Rabinovitz, M., Takacs, L., and Molod, A., 1991, Simulation of the planetary boundary layer and turbulence in the GLA GCM. *Proc. Ninth Conf. on Numerical Weather Prediction*, Denver, CO, Amer. Meteor. Soc., 514-517.
- Higgins, R. W., Yao, Y., Chelliah, M., Ebisuzaki, W., Janowiak, J. E., Ropelewski, C. F., and Kistler, R. E., 1996, *Intercomparison of the NCEP/NCAR and the NASA/DAO reanalysis(1985-1993)*, NCEP/Climate Prediction Center Atlas No. 2, U.S. Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, and National Weather Service, 169 p.
- Holton, J. R. and Lindzen, R. S., 1972, An updated theory for the quasi-biennial oscillation of the tropical stratosphere. *J. Atmos. Sci.*, 29, 1076-1080.
- Holton, J. R. and Tan, H.-C., 1980, The influence of the equatorial quasi-biennial oscillation on the global circulation at 50 mb. *J. Atmos. Sci.*, 37, 2200-2206.
- Hurrell, J. W. and Trenberth, K. E., 1992, An evaluation of monthly mean MSU and ECMWF global atmospheric temperature for monitoring climate. *J. Climate*, 5, 1424-1440.
- Hurrell, J., 1998, Difficulties in obtaining reliable temperature trends: Reconciling the surface and satellite microwave sounding unit records. *J. Climate*, 11, 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. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77, 437-471.
- Kalnay, E., Lord, S., and McPherson, R., 1998, Maturity of numerical weather prediction: The medium range. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 79, 2753-2769.
- Kistler, R., Kalnay, E., Collins, W., Saha, S., White, G., Woollen, J., Chelliah, M., Ebisuzaki, W., Kanamitsu, M., Kouski, V., van del Dool, H., Jenne, R., and Fiorino, M., 1999, The NCEP/NCAR 50-year reanalysis. Submitted to *Bull. Amer. Meteor. Soc.* [<http://sgi62.www.noaa.gov.../wd23gw/close/rean12.htm>]
- Kutzbach, J. E., 1967, Empirical eigenvectors of sea-level pressure, surface temperature and precipitation complexes over North America. *J. Appl. Meteor.*, 6, 791-802.
- Labitzke, K. and van Loon, H., 1988, Associations between the 11-year solar cycle, the QBO and the atmosphere Part I: The troposphere and stratosphere in northern hemisphere winter. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 50, 197-206.
- Labitzke, K. and McCormick, M. P., 1992, Stratospheric temperature increases due to Pinatubo aerosols. *Geophys. Res. Lett.*, 19, 207-210.
- Lacis, A. A. and Hansen, J. E., 1974, A parameterization for the absorption of solar radiation in the earth's atmosphere. *J. Atmos. Sci.*, 31, 118-133.
- Lau, K.-M., Ho, C.-H., and Kang, I.-S., 1998, Anomalous atmospheric hydrologic processes associated with ENSO: Mechanism of hydrologic cycle-radiation interaction. *J. Climate*, 11, 800-815.
- Maruyama, T. and Tsuneoka, Y., 1988, Anomalous short duration of the easterly wind phase of the QBO at 50 hPa in 1987 and its relationship to an El Niño event. *J. Meteor. Soc. Japan.*, 66, 629-634.
- Moorthi, S. and Suarez, M. J. 1992, Relaxed Arakawa-Schubert: A parameterization of moist convection for general circulation models. *Mon. Wea. Rev.*, 120, 978-1002.
- Naito, Y. and Hirota, I., 1997, Interannual variability of the northern winter stratospheric circulation related to the QBO and the solar cycle. *J. Meteor. Soc. Japan*, 75, 925-933. [<http://www-mete.kugi.kyoto-u.ac.jp/naito/study/intro/QBO.gif>]
- Newell, R. E., 1970, Stratosphere temperature change from Mt. Agung volcanic eruption of 1963. *J. Atmos. Sci.*, 27, 977-978.
- North, G. R., Bell, T. L., Cahalan, R. F., and Moeng, F. J., 1982, Sampling errors in the estimation of empirical orthogonal functions. *Mon. Wea. Rev.*, 110, 699-706.
- Pan, H.-L. and Wu, W.-S., 1994, Implementing a mass flux convective parameterization package for the NMC medium-range forecast model. *10th Conf. on Numerical Weather Prediction*, Portland, OR, Amer. Meteor. Soc., 96-98.
- Parish, D. and Derber, J., 1992, The National Meteorological Center's spectral statistical-interpolation analysis system. *Mon. Wea. Rev.*, 120, 1747-1763.
- Pfaendtner, J., Bloom, S., Lamich, D., Seablom, M., Sienkiewicz, M., Stobie, J., and da Silva, A., 1995, *Documentation of the Goddard Earth Observing System(GEOS) Data Assimilation System-version 1*, NASA

- Tech. Memo. 104606, Vol. 4, 58 pp. [Available from Data Assimilation Office, GSFC, Greenbelt, MD 20771.]
- Plumb, R. A., 1985, On the three-dimensional propagation of stationary waves. *J. Atmos. Sci.*, 42, 217-229.
- Randel, W. J. and Cobb, J. B., 1994, Coherent variation of monthly mean total ozone and lower stratosphere temperature. *J. Geophys. Res.*, 99, 5433-5447.
- Reynolds, R. W., 1988, A real-time global sea surface temperature analysis. *J. Climate*, 1, 75-86.
- Reynolds, R. W. and Smith, T. M., 1994, Improved global sea surface temperature analysis using optimum interpolation. *J. Climate.*, 7, 929-948.
- Saha, S. and Chelliah, M., 1993, Automatic monitoring system for the atmospheric reanalysis project at NMC. *Proc. of Clim. Diagn. Workshop, Boulder, CO 1-5 Nov 1993*. [Available from NOAA/NMC CAC, Washington DC 20233.]
- Schemm, J. E., van den Dool, H., and Saha, S., 1996, Application of a multi-year DERF experiment toward week 2 and monthly climate prediction. *Proc. of the 21st annual climate diagnostics and prediction workshop*. Huntsville, Alabama, Oct 28 - Nov 1 1996, 166-169.
- Schubert, S. D., Rood, R. B., and Pfaendner, J., 1993, An assimilated dataset for earth science applications. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 74, 2331-2342.
- Schwarzkopf, M. and Fels, S., 1991, The simplified exchange method revisited: An accurate, rapid method for computation of infrared cooling rates and fluxes. *J. Geophys. Res.*, 96, 9075-9096.
- Shah, K. P. and Rind, D., 1998, Comparing upper tropospheric and lower stratosphere temperatures: Microwave Sounding Unit, radiosonde, COSPAR International Reference Atmosphere, and National Center for Environment Prediction/National Center for Atmospheric Research reanalysis monthly-mean climatologies. *J. Geophys. Res.*, 103, 31569-31592.
- Spencer, R. W. and Christy, J. R., 1990, Precise monitoring of global temperature trends from satellites. *Science*, 247, 1558-1562.
- Spencer, R. W., 1993, Precision lower stratospheric temperature monitoring with the MSU: Technique, validation and results 1979-1991. *J. Climate*, 6, 1194-1204.
- Straus, D. M. and Yang, Q., 1997, Vertical structure and dominant horizontal waves in the NASA DAO and NCEP reanalyses. *Mon. Wea. Rev.*, 125, 3266-3278.
- Suarez, M. J., and Takacs, L. L., 1994, *Documentation of the Aries/GEOS Dynamical core Version 2*, NASA Tech. Memo. 104606, NASA, GSFC, Greenbelt, MD 20771.
- Sud, Y. J., and Molod, A., 1988, The roles of dry convection, cloud-radiation feedback processes and the influence of recent improvements in the parameterization of convection in the GLA GCM. *Mon. Wea. Rev.*, 116, 2366-2387.
- Takacs, L., Molod, A. and Wang, T., 1994, *Documentation of the Goddard Earth-Observing System(GEOS) General Circulation Model-Version 1*, NASA Tech. Memo. 104606, 1, 114 p. [Available from Data Assimilation Office, GSFC, Greenbelt, MD 20771.]
- Troen, I., and Mahrt, L., 1986, A simple model of the boundary layer: Sensitivity to surface evaporation. *Bound.-Layer Meteor.*, 37, 129-148.
- Wilks, D. S., 1995, *Statistical Methods in the Atmospheric Science*. New York, Academic Press, 467 p.
- Yulaeva, E. and Wallace, J. M., 1994, The signature of ENSO in global temperature and precipitation fields derived from the microwave sounding unit. *J. Climate*, 7, 1719-1736.

2000년 1월 5일 원고 접수
2000년 3월 25일 원고 채택