

마이크로파 위성관측과 모델 재분석에서 조사된 전지구에 대한 하부 성층권 온도의 추세

유정문^{1,*} · 윤선경¹ · 김규명²

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

²NASA/GSFC, SSAI

Global Temperature Trends of Lower Stratosphere Derived from the Microwave Satellite Observations and GCM Reanalyses

Jung-Moon Yoo^{1,*} · Sun-Kyung Yoon¹ · Kyu-Myong Kim²

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

²NASA/GSFC, SSAI

Abstract: In order to examine the relative accuracy of satellite observations and model reanalyses about lower stratospheric temperature trends, two satellite-observed Microwave Sounding Unit (MSU) channel 4 (Ch 4) brightness temperature data and two GCM (ECMWF and GEOS) reanalyses during 1981 ~ 1993 have been intercompared with the regression analysis of time series. The satellite data for the period of 1980 ~ 1999 are MSU4 at nadir direction and SC4 at multiple scans, respectively, derived in this study and Spencer and Christy (1993). The MSU4 temperature over the globe during the above period shows the cooling trend of -0.35 K/decade, and the cooling over the global ocean is 1.2 times as much as that over the land. Lower stratospheric temperatures during the common period (1981 ~ 1993) globally show the cooling in MSU4 (-0.14 K/decade), SC4 (-0.42 K/decade) and GEOS (-0.15 K/decade) which have strong annual cycles. However, ECMWF shows a little warming and weak annual cycle. The 95% confidence intervals of the lower stratospheric temperature trends are greater than those of midtropospheric (channel 2) trends, indicating less confidence in Ch 4. The lapse rate in the trend between the above two atmospheric layers is largest over the northern hemispheric land. MSU4 has low correlation with ECMWF over the globe, and high value with GEOS near the Korean peninsula. Lower correlations ($r < 0.6$) between MSU4 and SC4 (or ECMWF) occur over 30° N latitude belt, where subtropical jet stream passes. Temporal correlation among them over the globe is generally high ($r > 0.6$). Four kinds of lower stratospheric temperature data near the Korean peninsula commonly show cooling trends, of which the SC4 values (-0.82 K/decade) is the largest.

Key words: lower stratospheric temperature trends, regression analysis, satellite observation, MSU, channel 2, channel 4, ECMWF, GEOS, lapse rate, confidence

요약: 하부 성층권 온도의 추세에 대한 위성관측과 모델 결과들의 상대적인 정확성을 평가하기 위하여 두 종류의 위성관측 MSU 채널 4(57.95GHz) 밝기온도 자료들과 1981 ~ 1993년 기간의 두 종류의 대순환 모델(ECMWF and GEOS) 재분석 자료들을 시계열 회귀분석으로 상호 비교하였다. 1980 ~ 1999년 기간의 위성자료는 이 연구에서 유도된 직하점 MSU4와 여러 주사각에서 유도된 SC4(Spencer and Christy, 1993)이다. 위 기간에 전지구에 대한 MSU 하부 성층권 온도는 화산폭발과 관련된 냉각화 경향(-0.35 K/decade)을 보였으며, 이러한 경향은 육지보다 해양에서 1.2배 컸다. 자료들의 공통 기간(1981 ~ 1993년)에 대한 하부 성층권 온도의 아노말리는 두 종류 관측자료와 GEOS에서 전지구적으로 냉각화 경향(-0.14 ~ -0.42 K/decade)을 보였으나, ECMWF는 북반구를 제외하고 온난화(0.06 K/decade)를 보였다. 온도 연추기는 SC4를 제외하고 다른 세 종류 자료에서 유사한 위상과 함께 현저하였다. 온도 추세에 대한 95% 신뢰도 조사에서 MSU 채널 4의 하부 성층권 온도에 대한 신뢰도가 채널 2(53.74GHz)의 중간 대류권 온도보다 더 낮았다. 또한 두 기층 사이의 온도 추세 감율이 북반구 육지에서 가장 컸다. MSU4에 대한 SC4 및 모델 재분석 결과들의 상관은

전지구의 경우에 SC4($r=0.96$)에서 가장 높았고, ECMWF($r=0.61$)에서 가장 낮았다. 한반도의 경우에는 GEOS에서 가장 높았고($r=0.88$), ECMWF에서 가장 낮았다($r=0.73$). MSU4에 대한 SC4, ECMWF의 상관은 아열대 제트류가 위치하는 30° 위도대에서 낮았으나($r<0.6$) 그 외의 지역에서는 대체로 높았다($r>0.6$). 한반도 부근에서 하부 성층권 온도의 냉각화 경향은 모든 자료에서 공통적으로 나타났다. 이러한 추세는 SC4(-0.82K/decade)에서 가장 컸으며, MSU4(-0.38K/decade), GEOS(-0.28K/decade), ECMWF(-0.07K/decade) 순으로 나타났다.

주요어: 하부 성층권의 온도 추세, 회귀분석, 위성관측, MSU, 채널 2, 채널 4, 대순환 모델, 온도 추세 감을, 신뢰도

서 론

기후변화에 영향을 주는 오존층 파괴와 화산폭발, 그리고 대류권과 상층 대기와의 물/에너지 상호작용을 이해하기 위하여 성층권의 기후 변동에 대한 관심이 최근에 더욱 높아지고 있다(Spencer and Christy, 1993). 이러한 기후변동은 인간의 생존과 밀접하게 관련되어 있으므로 온도와 같은 기후 요소를 사용하여 그 원인을 정확하고 객관적으로 분석하는 것은 중요하다(Hartmann, 1994). 더욱이 전통적으로 대기 상층 관측에 사용되는 라디오존데 및 로켓존데 관측도 하부 성층권 온도 자료를 제공하는 데에는 여러 경제적이거나 물리적인 제약을 받으므로, 단기간에 많은 자료를 제공할 수 있는 위성관측이 필요하다.

기후 진단에 필요한 온도 자료는 관측 및 모델 재분석(reanalyses)에서 입수될 수 있다. 지구 극궤도를 돌고 있는 미국의 업무용 NOAA 위성은 1978년부터 현재까지 약 2~3년 간격으로 발사되어 왔다. 이 위성에 탑재된 MSU(Microwave Sounding Unit) 복사계는 대기와 지표에서 방출되는 마이크로파를 채널 1~4에서 각각 다른 파장으로 관측한다. 이 채널 중 57.95GHz의 진동수에서 관측된 채널 4 밝기온도는 약 70hPa 고도 부근의 열적 상태를 주로 반영한다. 따라서 하부 성층권의 기후변화와 온도 경향을 조사하는데, 채널 4 관측값은 유용하게 이용되어 왔다(Spencer and Christy, 1993). 특히 기상위성 관측을 통한 밝기온도는 전구를 고르게 관측할 수 있어서 기존 관측 자료의 시공적 제약을 극복할 수 있고, 여러 파장의 채널을 통해 다양한 고도의 대기층의 열적 상태를 관측할 수 있다. 그러나 위성에 탑재된 복사계의 검정과 제한된 수명의 복사계 수감부의 부정확성, 그리고 위성들의 표본 관측 시간 차이로 인한 일변화(diurnal variation) 효과 때문에 이 자료를 이용하여 장기간의 시계열을 만들 경우에 위에서 언급된 오차들을 보정하여야 한다.

한편, 대기대순환 모델(General Circulation Model; GCM)의 결과는 모델 자체의 해상도 및 불완전한 물리과정의 모수화, 특히 격자 규모의 모수화의 불완전성 등에도 불구하고 기후변동과 그와 연관된 여러 물리 과정의 이해 및 통찰에 활용되어 왔다(Hurrell and Trenberth, 1992). 그러므로 위성관측 자료와 모델 결과 사이의 객관적이고 독립적인 비교·분석을 통하여 상호 불일치에 대한 원인을 조사하여 관측과 모델에 대한 진단 및 개선 가능성을 제시할 수 있다. 따라서 이들 자료간에 객관적인 비교를 통하여 상대적인 정확성을 평가하고 그 원인을 규명하는 것은 관측과 모델링의 개선 뿐만 아니라 기후변화에 대한 이해에도 중요하다. 더욱이 하부 성층권에 대한 관측 자료는 상당히 부족하여, 이에 따라 이 기층에 대한 모델 결과의 신뢰도도 낮으므로 이에 대한 위성자료의 활용이 요구된다. 이 연구에서는 여러 대순환 모델 중에 자료 입수가 가능하고 그 정확도에 대한 신뢰가 높다고 알려진 두 종류 모델(ECMWF와 GEOS)의 재분석 결과가 하부 성층권의 온도 분석에 위성관측 자료와 함께 사용되었다.

지난 20여년간 대류권 온난화와 성층권 냉각화에 관한 많은 논란이 제기되면서, 여러 선행 연구들이 다양한 방법으로 전지구의 온도 추세를 측정하였다(e.g. Hansen *et al.*, 1998; Angell, 1999). Hansen *et al.*(1998)은 하부 성층권의 온도 추세에 영향을 미치는 여러가지 가능한 강제력을 수치실험을 통하여 조사한 결과, 오존 증감이 가장 큰 요인임을 제시하였다. 한편 Angell(1999)의 연구는 1958~1998년 기간의 중간 대류권에서 $0.10\pm 0.09\text{K/decade}$ 의 온난화 경향이 있다고 발표하였다. 모델 결과들을 상호 비교한 연구(Kistler *et al.*, 1999)에 의하면, NCEP(National Centers for Environmental Prediction)과 ECMWF(European Center for Medium Range Weather Forecasting)의 온도 연직 분포들 모두는 중위도에서 성층권의 냉각화, 그리고 대류권의 온난화 경향을 보

였다.

한편, 국내에서는 MSU 위성관측과 모델 재분석 자료로부터 중간 대류권 온도의 추세와 시공간 변동에 관한 조사가 시도된 바 있다(유정문·이지은, 2000; 유정문·이은주, 2000). 또한 MSU 채널 4 밝기온도를 이용한 선행 연구로는 하부 성층권의 온도의 시공간 변동(유정문·김소현, 1998), 그리고 MSU 채널 4 밝기온도와 두 종류 모델(NCEP, GEOS) 재분석 온도들의 시공간 변동에 있어서의 상호비교(유정문·김진남, 2000) 등이 있다. 시공간 변동에 대한 이러한 연구들은 화산폭발, 준2년주기진동(Quasi-Biennial Oscillation; QBO) 그리고 엘니뇨/라니냐 현상 등이 하부 성층권 온도의 변동에 주요 요인임을 제시한다. 그러나 위성자료 자체도 결함을 가질 수 있으므로, 두 종류의 독립적인 위성관측(MSU 채널 4) 자료들 간의 상호 비교를 통한 하부 성층권 온도의 추세 분석이 성층권 기후변동을 정확하게 진단·이해하기 위하여 필요하다.

이 연구의 목적은 전지구적으로 하부 성층권 온도의 추세에 대한 위성관측과 모델 결과들의 상대적인 정확성을 평가하기 위하여 1980~1999년 기간의 두 종류의 MSU 채널 4 밝기온도 자료들과 1981~1993년 기간의 두 종류의 대순환 모델(ECMWF와 GEOS) 재분석 자료들을 시계열 회귀분석으로 통하여 상호·비교하는데 있다. 위성관측 자료는 직하점에서의 MSU4와 여러 주사각에서 유도된 SC4이다. 여기서 MSU4는 이 연구에서 그리고 SC4는 Spencer and Christy (1993) 연구에서 유도되었다. 하부 성층권 온도의 경년 변화를 전구, 북반구, 남반구 그리고 열대 지역에 대하여 조사한 후에 해륙 분포에 대한 온도 추세의 변화를 분석하기 위하여 다시 각각 해양, 육지, 해양 및 육지로 세분화된 지역에 대하여도 조사하였다. 또한 온도 추세에 대한 95% 신뢰도 구간을 분석하고, 하부 성층권과 중간 대류권 사이의 연직적인 온도 추세의 변화 경향을 분석하였다.

자료 및 방법

이 연구에서는 하부 성층권 온도를 반영하는 두 종류의 MSU 위성관측(MSU4, SC4)과 대순환 모델(ECMWF and GEOS) 재분석 자료를 온도 추세 분석에 사용하였다. 모든 자료는 초기 상태의 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 격자에서 2° 위도 \times 3° 경도로 전환되었으며, 각

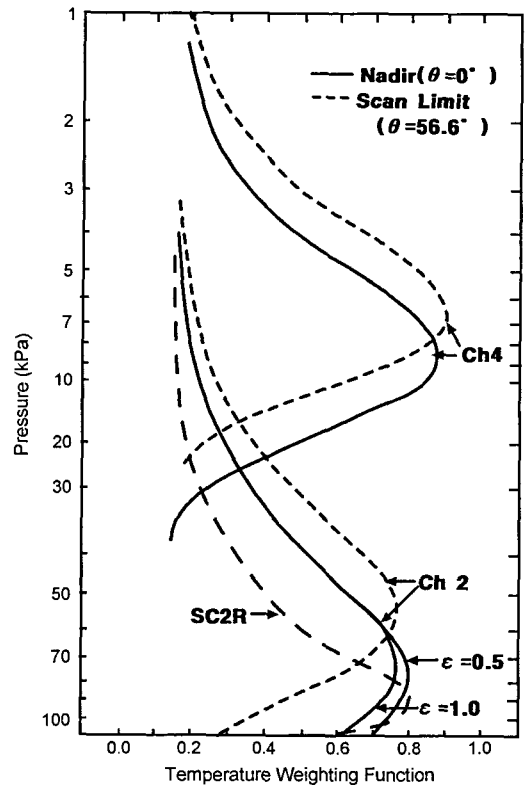


Fig. 1. Normalized temperature weighting functions for MSU Ch 2 (53.74 GHz) and Ch 4 (57.95 GHz), for the nadir (solid) and extreme (dashed) scan positions (after Grody, 1983). Also shown is the difference in the weighting functions for ocean (emissivity, $\epsilon=0.5$) and land ($\epsilon=1.0$) surfaces. SC2R (long-dashed) is described in the text.

격자점에서 월평균값, 월평균값의 아노말리, 그리고 기후값으로 정리되었다.

MSU 복사계는 네개 채널에서 산소 분자에 의해 방출된 마이크로파를 측정하여 각 채널의 밝기온도는 특정 고도의 열적 구조를 반영한다(Fig. 1). 이 복사계는 57.95GHz의 진동수에서 측정된 대기의 산소 분자에 의한 열적 방출을 온도의 연직분포로 전환하여 채널 4 밝기온도를 산출한다(Spencer and Christy, 1993).

1980년 1월부터 1999년 12월까지 19년(240개월) 기간에 대한 하부 성층권 온도의 분석을 위하여 7개의 위성계열 자료를 사용하였다. 1980~1981년에 대하여 NOAA-6, 1982~1984년에 대하여 NOAA-7, 1985~1986년에 대하여 NOAA-9, 1987~1988년에 대하여 NOAA-10, 1989~1991년에 대하여 NOAA-11, 1992~1994년에 대하여 NOAA-12, 그리고 1995~

1999년에 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. 이러한 위성들의 표본 관측 시간의 차이로 인한 일변화 효과를 제거하는 보정을 위하여 2° 위도×3° 경도의 격자에서 서로 다른 두 위성의 동시 관측자료를 이용하였다(유정문·김소현, 1998). 장기간의 위성자료는 앞서 언급된 바와 같이 2년 정도의 제한된 위성 수명으로 인한 복사계 수감부의 불연속, 위성궤도의 표류(drift)에 의한 오류, 그리고 위성간에 관측 시간의 불일치 등의 요인을 포함하기 때문에 잘못된 온도 경향을 제공할 수 있다. MSU는 위성 궤도를 가로지르는 주사형(cross track scanning) 복사계로서 직하점을 중심으로 주사선 양쪽에 각각 5개씩, 총 11개의 시계(field of view)를 약 11° 간격으로 갖는다.

이 연구에서 하부 성층권 온도 분석에 사용된 직하점 MSU 자료(MSU4)는 SC4에 비하여 자료 양은 적은 반면에, 주사 자료를 직하점에 경험적으로 관련시키는 주변감광 보정(limb-darkening correction) 과정을 피할 수 있다. 또한 직하점 자료는 시간이 경과함에 따라 위성 궤도의 하강으로 주사 자료의 밝기 온도에 나타나는 오차를 배제할 수 있다(Wentz and Schabel, 1998). 그러나 직하점에서 밝기온도는 그 가중함수 중심의 위치가 전체 주사 자료에 비하여 상대적으로 낮기 때문에 다른 주사각 자료에 비하여 구름 및 강수에 의한 비열적(non-thermal) 효과를 많이 포함하게 된다. 위성관측의 중복 기간을 이용한 자료 보정에 있어서 Prabhakara and Iacovazzi(1998)은 전구 온도 경향을 조사할 목적으로 전구 해양 또는 육지의 평균값을 이용한 데 반하여, 이 연구는 보정값의 공간 변화를 고려하여 2° 위도×3° 정도 격자값을 사용함으로써 지역별 분석에 중점을 두었다. 한편 Spencer and Christy(1993)는 직하점 근처의 5개 다른 주사각도 자료를 사용하여 하부 성층권의 밝기 온도를 유도하였다.

모델 재분석은 어떤 시점에서 시간에 따라 고정된 분석·예보 시스템을 사용하기 때문에, 자료동화 시스템에서의 인위적인 변화와 관련된 잘못된 기후변동을 제거하는데 효과적이다. 따라서 재분석은 관측 자료가 적은 지역의 대기 순환의 특성을 이해하는데 도움을 주며, 모수화를 통한 물리적인 값을 더욱 일관

성있게 산출한다. 이것은 위성자료 및 기존의 가능한 모든 자료를 초기 조건으로 하여 유도되므로 위성자료와 완전히 독립적이지는 않지만, 상호 비교를 통하여 위성자료의 정확성을 진단하고 모델을 개선하는데 유용하게 사용될 수 있다.

이 연구에서 사용된 ECMWF 채널 4 자료는 MSU 채널 4의 가중함수를 이용하여 7개의 층별 자료에서 재구성되었다. ECMWF 재분석 온도에 관한 구체적인 설명은 Gibson *et al.*(1997)과 유정문 등(1999)의 연구에 제시되어 있다. 한편, GEOS 재분석은 Suarez and Takacs(1994)의 연구에서 광범위하게 기술되어 있는 수평 및 수직 차분과 유한 차분 기법을 사용하였으며, Moorthi and Suarez(1992)의 Relaxed Arakawa-Schubert(RAS) 방법으로 적은 대류를 모수화하였다. 이 연구에서의 GEOS 채널 4 자료는 8개의 층별 자료를 MSU 채널 4 가중함수에 따라 가중한 후에 재구성된 것이다(유정문·김진남, 2000).

분석방법

전지구 및 지역별 온도 증감 경향을 조사하기 위하여 위도 2°×경도 3°의 격자 자료는 각각 전구, 북반구, 남반구 그리고 열대(30°N~30°S)의 네 지역에서 조사된 후에 해양, 육지, 해양 및 육지로 세분화되어 조사되었다. 전지구 온도의 경년 변화를 조사하기 위하여 연주기 효과를 제거한 아노말리를 사용하였다. 또한 각 자료가 제공하는 자료 기간이 일반적으로 다르기 때문에 1981~1993년의 공통 기간에 대하여 위성관측과 모델 재분석 자료를 비교하였다. 한 격자내에 50% 이상의 면적이 차지하는 지표의 성질에 따라 육지와 해양으로 분류하였고, 위도에 따른 면적 변화의 효과를 고려하기 위하여 코사인 위도 가중(cosine latitude-weighting)을 적용하였다.

각 자료를 이용하여 온도의 회귀분석을 실시하였고, 이 회귀선의 95% 신뢰도를 가지는 구간은 $1.96\sigma_E$ 로 다음 식 (1)과 (2)로 계산된다.

$$P\left(\mu \in \bar{X} \pm 1.96 \frac{\sigma}{\sqrt{N}}\right) = 0.95 \quad (1)$$

$$1.96\sigma_E = \frac{\sigma}{2.96\sqrt{N}} \sqrt{1-r^2} - 2 \quad (2)$$

위 식들에서 σ 는 MSU4 경우에 20년 기간의 온도

자료에 대한 표준편차이고, r 은 온도자료와 시간 사이의 상관이다. 2.96의 수치는 20년 연평균 자료에서 1~20의 표준편차의 1/2을 의미한다. 계산된 회귀선에서 자료의 변동성은 루트 안의 분자에 나타난다 (Brooks and Carruthers, 1953). N 는 신뢰도 구간의 크기에 관련된 변수으로 시계열의 상관에 영향을 받으며, 다음 (3) 식에 의해 계산된다(Weatherhead *et al.*, 1998).

$$N = 20 \frac{1-r_1}{1+r_1} \quad (3)$$

은 자기상관으로 지연(lag) 시킨 연 수에 따라 다르게 나타난다. 여기서는 제시하지 않았지만, 1~19까지 지연시킬 때, 가장 상관이 높은 지연 1을 r_1 의 계산에 사용하였다. 이러한 과정을 통하여 얻어진 95% 신뢰도 구간은 자료의 불확실성을 설명하는 것으로, 그 구간이 클수록 자료 신뢰도는 낮게 된다.

하부 성층권의 온도 추세

MSU 관측 자료(1980 ~ 1999년)

Table 1은 1980~1999년 기간의 MSU4 자료를 전구, 북반구, 남반구, 열대의 네 지역 자료로 분류한 후에 다시 각 지역을 해양, 육지, 해양 및 육지로 세분하여 하부 성층권의 온도 추세를 조사한 것이다. MSU4 아노말리 값의 경년 변화는 모든 지역에서 온도 하

강 경향을 보였으나, 1982~1984년, 1991~1993년의 기간에는 높은 온도 상승을 보였다(Fig. 2). 이는 1982년 4월의 엘치촌 화산(17.4°N, 93.2°W)과 1991년 6월의 피나투보 화산(15.14°N, 120.35°E) 폭발로 많은 양의 화산가스가 하부 성층권에 유입되어 일어난 것으로 추정된다. 이 기간에 태양에너지의 일부는 이러한 물질에 흡수·반사되어 성층권의 온도를 증가시켰다(Newell, 1970). 그러나 황산가스가 태양광선의 효과적인 반사물질로 작용하여 지표가 태양에서 받을 수 있는 에너지를 차단하므로 전구적으로 지표 부근의 온도는 하강하였다(Ahrens, 1994).

화산 폭발에 의한 하부 성층권의 온도 상승은 적도 부근의 30~50hPa 고도에서 1996년 9월에 4°C 정도로 나타났고, 0~30°N 위도대에서는 같은 해 9~10월에 동안 20년 월평균보다 3.5°C 정도의 온도 상승이 나타났다(Labitzke and McCormik, 1992). 두 화산폭발을 규모면에서 비교해 볼 때, 피나투보 화산이 엘치촌 보다 컸으나, 엘치촌 화산폭발을 뒤따라서 QBO 바람장은 동풍에서 서풍으로의 변이가 있었다. 이러한 QBO 형태는 하부 성층권 온도 상승을 계속 지속시켜 주었으나 피나투보때는 서풍에서 동풍으로의 변이로 인해 성층권의 온도 상승을 둔화시켜서 엘치촌 화산폭발로 인한 온도 상승이 피나투보보다 더 크게 나타났다(Christy and Drouilhet, 1994).

Table 1과 Fig. 3에서 1980~1999년 기간의 세 종류 위성자료(MSU4와 MSU2, SC4와 SC2, SC4와

Table 1. Trends (K/decade) and 95% confidence intervals for MSU 2, 4 and SC 2, 2R, 4 during the period of 1980~1999 over the regions of 'Ocean', 'Land', and 'Ocean and Land'. The words of 'North' and 'South' stand for northern and southern hemispheres, respectively.

	MSU2	MSU4	SC2	SC2R	SC4
Globe					
Ocean	0.12±0.013	-0.33±0.069	0.01±0.011	0.04±0.011	-0.49±0.110
Land	0.16±0.018	-0.39±0.058	0.08±0.018	0.13±0.022	-0.59±0.090
Ocean & Land	0.13±0.015	-0.35±0.068	0.04±0.012	0.07±0.014	-0.53±0.111
North					
Ocean	0.16±0.018	-0.31±0.060	0.08±0.015	0.12±0.016	-0.53±0.101
Land	0.21±0.024	-0.40±0.052	0.12±0.021	0.19±0.026	-0.62±0.076
Ocean & Land	0.18±0.020	-0.35±0.058	0.10±0.017	0.16±0.021	-0.58±0.094
South					
Ocean	0.09±0.010	-0.34±0.058	-0.04±0.009	-0.02±0.009	-0.47±0.089
Land	0.03±0.009	-0.37±0.073	0.01±0.014	-0.01±0.016	-0.52±0.110
Ocean & Land	0.08±0.010	-0.35±0.062	-0.02±0.009	-0.02±0.010	-0.48±0.095
Tropics					
Ocean	0.14±0.017	-0.27±0.059	0.06±0.016	0.02±0.013	-0.41±0.084
Land	0.12±0.013	-0.31±0.060	0.10±0.017	0.05±0.018	-0.44±0.085
Ocean & Land	0.13±0.015	-0.29±0.060	0.07±0.016	0.02±0.014	-0.42±0.084

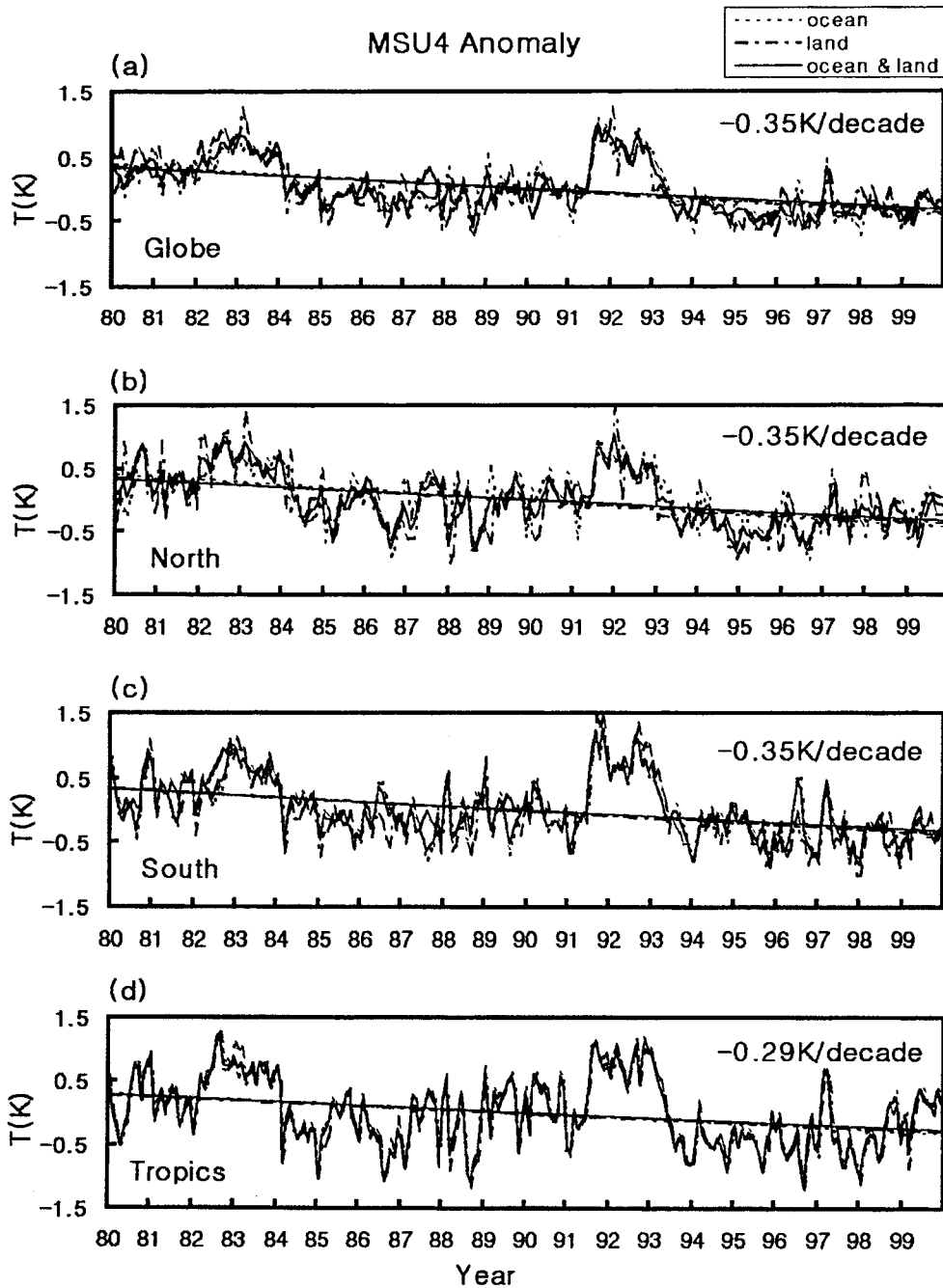


Fig. 2. Time series of MSU Ch 4 brightness temperature anomaly during the period of 1980~1999 for the ocean (dotted), land (dashed), ocean and land (solid). The (a) Globe, (b) North, (c) South, and (d) Tropics in the figure stand for globe, northern hemisphere, southern hemisphere, and tropics (30°N~30°S), respectively. The values of trend over the 'ocean and land' are also given in the figures.

SC2R)의 온도변화 경향의 95%의 신뢰도 구간을 비교하였다. 여기서 MSU2는 MSU4와 유사하게 이 연구에서 유도된 중간 대류권 온도를 반영하는 MSU 채널

2 밝기온도, 그리고 SC2는 SC4와 유사하게 Spencer and Christy(1992a)에 의해 유도된 MSU 채널 2 밝기온도이다. SC2R은 채널 2 가중합수에 성층권 기여 부

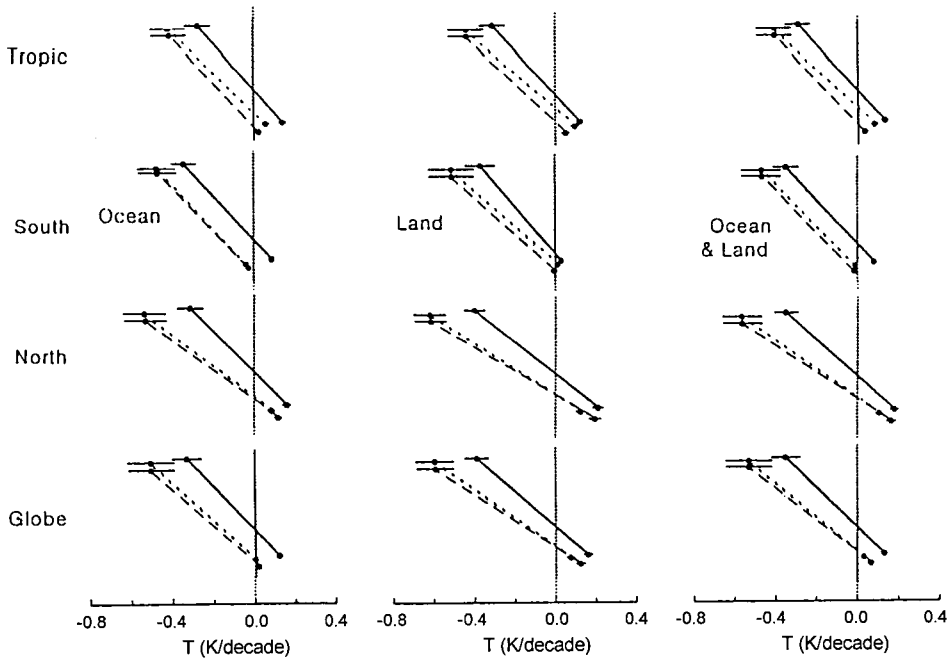


Fig. 3. Lapse rate between low stratospheric and midtropospheric temperature trends (K/decade) for tropics, northern and southern hemispheres, and globe, 1980~1999. The trend values are also given over the 'Ocean', 'Land' and 'Ocean and Land'. The horizontal bars extending 2 standard errors of estimate either side of the trends determined by linear least-squares regression are 95% confidence intervals for the trends, taking into account the serial correlation in the data. MSU2~MSU4 (solid), SC2~SC4 (dotted) and SC2R~SC4 (dashed).

분을 제거하기 위하여 MSU 채널 2의 여러 주사 자료들을 선형 결합함으로써 유도되었다(Fig. 1; Spencer and Christy, 1992b). 전체적으로 중간 대류권보다 하부 성층권에서 구간이 더 크게 나타나므로, 중간 대류권보다 하부 성층권의 온도 추세가 불확실성을 더 많이 내포하고 있음을 알 수 있다(Fig. 3). 중간 대류권에서 세 종류 모두의 신뢰도 구간은 남반구에서 가장 작고, 북반구에서 가장 컸다. 하부 성층권에서는 신뢰도 구간이 가장 큰 지역은 전구로 MSU4와 SC4 모두에서 동일하였으나, 가장 작은 지역은 MSU4에서는 북반구이고, SC4는 열대였다. MSU2는 지표면의 성질에 따라 신뢰도 구간이 전구와 북반구의 중간 대류권 온도에서 그리고 해양보다 육지에서 크게 나타났다. MSU2의 남반구와 열대에서는 육지보다 해양의 구간이 크게 나타났으나, 두 종류의 전체 주사 자료(SC2, SC2R)의 경우에 네 지역(전구, 북·남반구 그리고 열대) 모두에서 육지의 신뢰도 구간이 상대적으로 크게 나타났다. 하부 성층권의 신뢰도 구간은 직하점과 전체 주사 자료 모두에서 해양의 경우에 전구와 북반구에서, 그리고 육지의 경우에 남반

구와 열대에서 크게 나타났다. 95% 신뢰도 구간의 크기는 불확실성을 의미하는 것으로 MSU2 중간 대류권의 경우에 남반구 육지의 자료를 가장 신뢰할 수 있고, MSU4의 하부 성층권에서는 남반구 육지의

Table 2. Trends (K/decade) for stratospheric temperature over the globe. The period of data are 1981~1993 in MSU4, SC4, ECMWF and GEOS.

	MSU4	SC4	ECMWF	GEOS
Globe				
Ocean	-0.09	-0.35	0.10	-0.13
Land	-0.26	-0.58	-0.12	-0.19
Ocean & land	-0.14	-0.42	0.03	-0.15
North				
Ocean	-0.11	-0.59	-0.01	-0.23
Land	-0.33	-0.70	-0.16	-0.25
Ocean & land	-0.21	-0.64	-0.08	-0.24
South				
Ocean	-0.07	-0.18	0.17	-0.07
Land	-0.08	-0.28	-0.01	-0.04
Ocean & land	-0.07	-0.20	0.14	-0.06
Tropics				
Ocean	0.00	-0.30	0.11	-0.15
Land	-0.02	-0.28	0.04	-0.07
Ocean & land	-0.01	-0.29	0.08	-0.13

자료에 대한 신뢰도가 가장 낮다.

Angell(1999)의 연구에 의하면, 1958 ~ 1998년 기간에 중간 대류권에서는 $0.10 \pm 0.09 \text{K/decade}$ 의 온난화가 나타났다. 이 연구에서 조사된 최근 20년 동안의 중간 대류권의 온난화 크기($0.13 \pm 0.015 \text{K/decade}$)와 비교해 볼 때, 이 연구의 결과에 대한 신뢰도 구간이 더 작았

다. 표본 수의 효과만을 고려할 때, Angell(1999) 연구의 41에서 이 연구의 20으로 더 줄어든 것의 영향으로 이 연구에서 신뢰도 구간이 커야 됴도 불구하고 다른 요인에 의해 작게 나타났다. 따라서 라디오존데 관측이 주로 사용된 Angell(1999) 결과에 비해 MSU 위성관측 자료가 사용된 이 연구의 온도 추

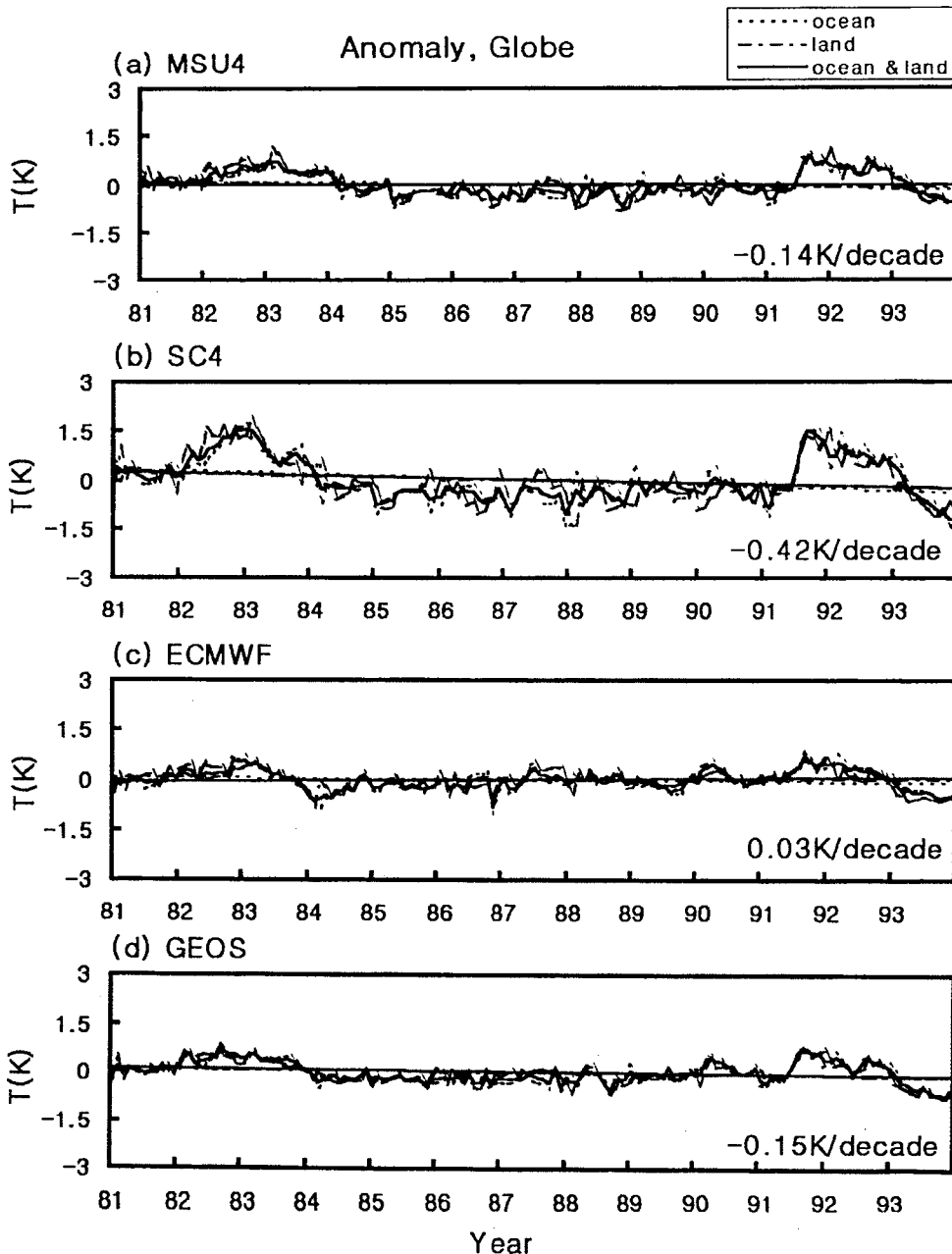


Fig. 4. Time series of MSU Ch 4 brightness temperature anomaly during the period of 1981 ~ 1993 for the ocean (dotted), land (dashed), ocean and land (solid). The values of (a) MSU4, (b) SC4, (c) ECMWF and (d) GEOS are given in the globe.

세에 대한 통계적 신뢰도가 더 높다고 해석된다.

관측 및 모델의 비교

관측(MSU4, SC4)과 모델(ECMWF와 GEOS) 자료가 이용가능한 1981~1993년 공통기간에 네 지역의 하부 성층권 온도는 두 종류의 관측자료와 GEOS에서

냉각화 경향을 보였다(Table 2). ECMWF 경우는 북반구에서만 약한 냉각화 경향(-0.08K/decade) 그리고 다른 지역에서는 온난화 경향을 보였다. 특히 냉각화(-0.70K/decade)는 SC4의 북반구 육지에서 가장 컸다. 위 기간 중 1982~1984년, 1991~1992년 기간에 하부 성층권 온도가 뚜렷하게 상승하는데(Fig. 4), 이는

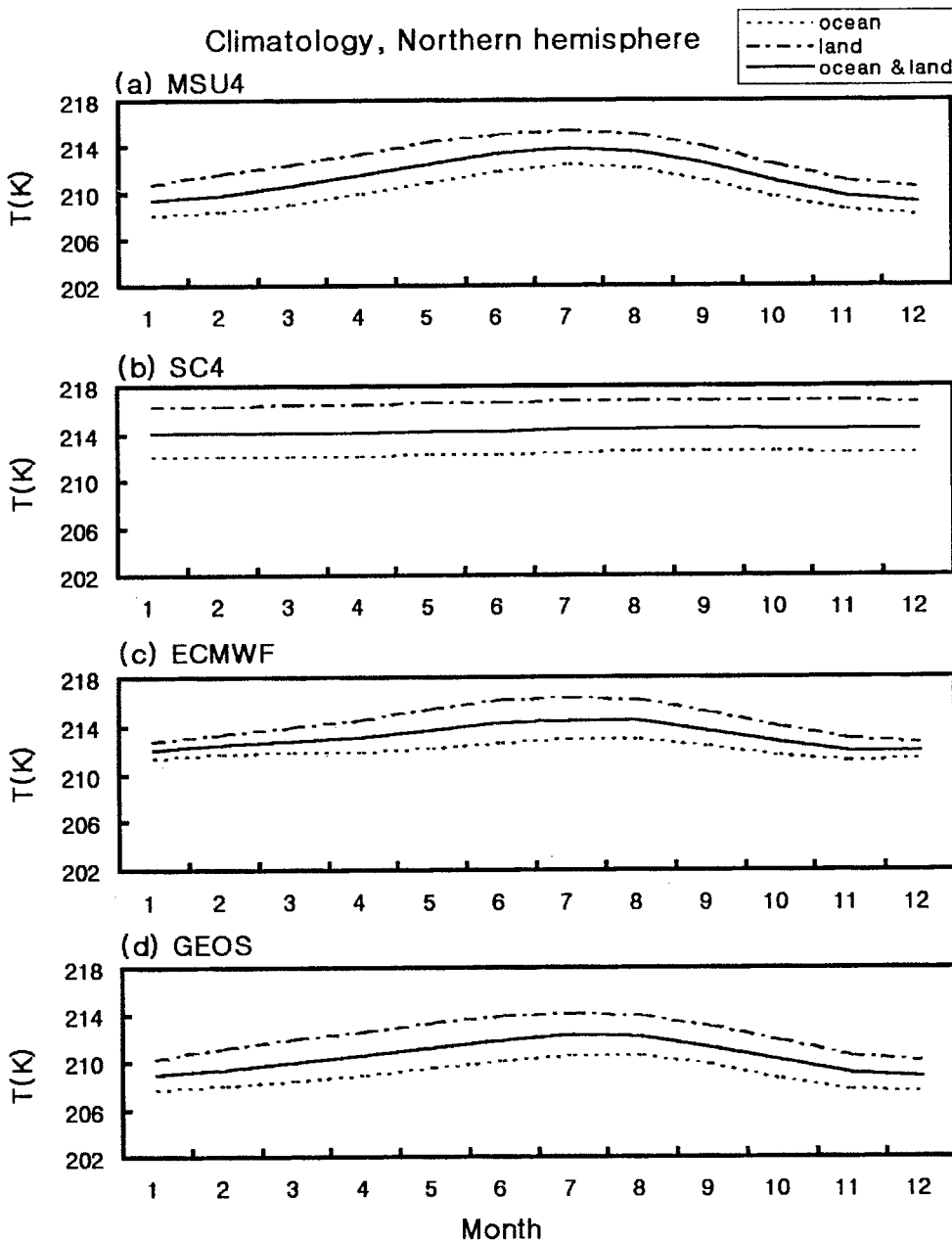


Fig. 5. Lower stratospheric temperature climatology during the period of 1981~1993 for the ocean (dotted), land (dashed), ocean and land (solid). The values of (a) MSU4, (b) SC4, (c) ECMWF and (d) GEOS are given over the northern hemisphere.

Table 3. The same as in Table 1 except for MSU, ECMWF and GEOS during the period of 1981 ~ 1993.

	MSU		ECMWF		GEOS	
	Ch 2	Ch 4	Ch 2	Ch 4	Ch 2	Ch 4
Globe						
Ocean	0.12±0.024	-0.09±0.095	0.20±0.042	0.10±0.040	0.06±0.029	-0.13±0.069
Land	0.13±0.032	-0.26±0.083	0.13±0.045	-0.12±0.035	0.01±0.030	-0.19±0.051
Ocean & Land	0.12±0.026	-0.14±0.092	0.18±0.043	0.02±0.038	0.04±0.029	-0.16±0.063
North						
Ocean	0.16±0.032	-0.11±0.089	0.26±0.055	-0.01±0.039	0.07±0.033	-0.23±0.064
Land	0.17±0.045	-0.33±0.075	0.10±0.049	-0.16±0.031	0.00±0.033	-0.25±0.040
Ocean & Land	0.16±0.034	-0.21±0.079	0.19±0.052	-0.08±0.034	0.04±0.033	-0.25±0.051
South						
Ocean	0.10±0.019	-0.07±0.081	0.16±0.033	0.17±0.040	0.05±0.026	-0.07±0.065
Land	0.05±0.019	-0.08±0.107	0.20±0.039	-0.01±0.050	0.04±0.024	-0.04±0.097
Ocean & Land	0.08±0.018	-0.07±0.088	0.17±0.010	0.14±0.041	0.04±0.025	-0.06±0.070
Tropics						
Ocean	0.16±0.032	0.00±0.091	0.30±0.045	0.11±0.053	-0.01±0.023	-0.15±0.085
Land	0.12±0.026	-0.02±0.103	0.19±0.038	0.04±0.054	-0.01±0.022	-0.07±0.093
Ocean & Land	0.14±0.029	-0.01±0.095	0.26±0.042	0.08±0.083	-0.01±0.023	-0.13±0.087

1982년 4월 엘치촌과 1991년 6월 피나투보 화산폭발에 기인한 것으로 사료된다(Labitzke and McCormick, 1992).

지역별 냉각화 크기를 비교할 때, 냉각화는 네 종류 자료 모두에서 북반구(-0.29K/decade)에서 가장 크고, 전구(-0.17K/decade), 열대(-0.13K/decade), 남반구(-0.12K/decade) 순으로 나타났다(Table 2와 Fig. 4). 또한 전구 지역에서 위 14년 기간에 대한 온도 변동폭은 SC4(0.23K)에서 가장 크게 나타났으며, ECMWF(0.22K), MSU4(0.06K), GEOS(0.06K) 순이었다. 열대 지역의 SC4와 GEOS 경우에는 해양에 비해 육지에서 냉각화 경향이 작았으나, 다른 자료에서는 육지에서 해양에 비해 냉각화가 컸다.

Fig. 5는 1981 ~ 1993년 기간에 MSU4, SC4, ECMWF와 GEOS의 북반구 하부 성층권 온도에 대한 월평균 기후 값을 조사한 것이다. 세 종류 자료에서 양반구와 열대에서는 해륙 비열차로 인하여 해양에 비해 육지에서 온도가 여름에 높고, 겨울에 낮은 연주기가 SC4를 제외하고 뚜렷하게 나타났다(여기서는 북반구 결과만 제시하였음). 연주기는 SC4의 경우에 약하였으며, 특히 열대 해양과 육지에서 거의 일치하였다(여기서는 북반구 결과만 제시하였음).

각 자료의 95% 신뢰도 구간의 조사에서 MSU와 GEOS 값은 중간 대류권 보다 하부 성층권에서 3~4 배 정도 컸으나, ECMWF 값은 전구와 북반구의 중간 대류권에서 더 컸다(Table 3). 따라서 하부 성층권

의 온도 추세를 분석하는 데 있어 자료 간의 불일치 그리고 ECMWF 결과에 대한 원인은 좀 더 근본적으로 검토되어야 할 필요가 있다. 북반구의 중간 대류권 온도에서 세 자료(MSU, ECMWF와 GEOS)는 다른 지역에 비하여 최대 신뢰도 구간을 보였으나, 하부 성층권 온도의 경우에 MSU와 GEOS는 남반구 육지에서 그리고 ECMWF는 열대에서 최대를 보였다.

중간 대류권과 하부 성층권의 온도 추세들 사이에 연직 변화

1980 ~ 1999년 기간에 전구 육지 및 해양에 대한 중간 대류권과 하부 성층권의 온도 추세들 사이의(고도에 따른) 위성관측 추세 감율(K/decade/430hPa)을 비교하면, SC2R ~ SC4(0.60K), SC2 ~ SC4(0.57K), MSU2 ~ MSU4(0.48K)의 순으로 크게 나타났다 (Table 4와 Fig. 3). 대류권 온난화와 성층권 냉각화와 관련된 이러한 상·하층 온도 추세의 차가 상대적으로 클 경우에 대기는 불안정해지는 것을 의미하며, 이때 더 활발한 대류활동을 기대할 수 있다. 지표면의 성질에 따라서는 MSU2 ~ MSU4 남반구를 제외한 세 자료의 모든 지역에서 육지에서의 기온기가 해양보다 크다. 지역별로 비교해 보면, 추세 감율은 MSU2 ~ MSU4와 SC2R ~ SC4의 경우에 북반구(≥0.47K)에서 가장 크고, 전구(≥0.45K), 남반구와 열대(≥0.40K) 순으로 나타났다. 추세 감율은 전체적으로 남반구 육지에서

Table 4. The same as in Table 1 except for trend lapse rate (K/decade/430 hPa) between low stratosphere and midtroposphere.

	MSU2 ~ MSU4	SC2 ~ SC4	SC2R ~ SC4
Globe			
Ocean	0.45	0.50	0.53
Land	0.55	0.67	0.72
Ocean & Land	0.48	0.57	0.60
North			
Ocean	0.47	0.61	0.65
Land	0.61	0.74	0.81
Ocean & Land	0.53	0.68	0.74
South			
Ocean	0.43	0.43	0.45
Land	0.40	0.53	0.51
Ocean & Land	0.43	0.46	0.46
Tropics			
Ocean	0.41	0.47	0.43
Land	0.43	0.54	0.49
Ocean & Land	0.42	0.49	0.44

Table 5. Trend lapse rate between lower stratosphere and middle troposphere during the period of 1981 ~ 1993.

	MSU2 ~ MSU4	ECMWF2 ~ ECMWF4	GEOS2 ~ GEOS4
Globe			
Ocean	0.21	0.10	0.19
Land	0.39	0.25	0.20
Ocean & Land	0.26	0.16	0.20
North			
Ocean	0.27	0.27	0.30
Land	0.50	0.26	0.25
Ocean & Land	0.37	0.27	0.29
South			
Ocean	0.17	-0.01	0.12
Land	0.13	0.21	0.08
Ocean & Land	0.15	0.03	0.10
Tropics			
Ocean	0.16	0.19	0.14
Land	0.14	0.15	0.06
Ocean & Land	0.15	0.18	0.12

가장 작고, 북반구 육지에서 가장 컸다.

1981 ~ 1993년 기간에 위성관측 및 모델 재분석에서 유도된 중간 대류권과 하부 성층권 사이의 추세 감율들을 비교할 때, 세 자료(MSU, ECMWF와 GEOS) 모두의 값들은 전구에서 해양에 비하여 육지

에서 컸으나, 남반구와 열대 지역에서는 대체로 그 반대 경향이 나타났다(Table 5와 Fig. 6). 북반구에서는 자료에 따라 다르게 나타났다. 지표면의 성질에 따른 조사에서 해양에서는 전구와 남반구에서 MSU, GEOS, ECMWF 크기 순으로 나타났다. 또한 북반구 해양에서는 GEOS(0.14K)가 가장 컸지만, 열대 해양

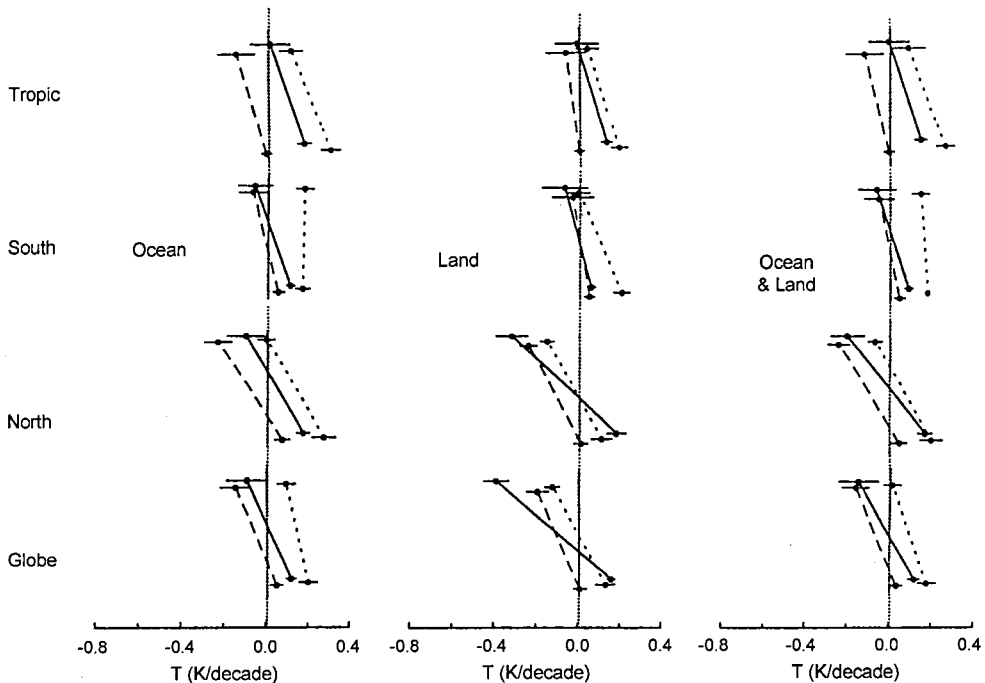


Fig. 6. The same as in Fig. 3 except for MSU4 (dotted), ECMWF (dashed) and GEOS (solid) during the period of 1981 ~ 1993.

에서는 GEOS(0.14K)가 가장 작았다. 육지에서는 전구와 북반구의 추세 감율은 MSU4, ECMWF와 GEOS의 순으로 그리고 남반구와 열대는 ECMWF, MSU, GEOS 순으로 컸다. GEOS 값은 모든 지역의 육지에서 다른 두 종류의 자료보다 가장 작았다($\leq 0.25K$). 육지와 해양을 구분하지 않은 조사에서 전구와 양반구에서는 MSU가 가장 크고 GEOS, ECMWF 순이었으나, 열대 지역에서는 ECMWF, MSU, GEOS 순으로 나타났다(Table 5). ECMWF에서 남반구 해양에 대한 추세 감율은 음의 값으로 다른 자료와 반대 경향을 보였다.

상관분석

MSU4에 대한 다른 세종류 자료 상관

Table 6와 Fig. 7는 관측과 모델의 공통기간인

Table 6. Correlation coefficients between MSU4 and SC4, and between MSU4 and model reanalyses during the period of 1981~1993 over the regions of 'Ocean', 'Land', and 'Ocean and Land', respectively.

	SC4	ECMWF	GEOS
Globe			
Ocean	0.96	0.63	0.90
Land	0.95	0.62	0.88
Ocean & Land	0.96	0.61	0.89
North			
Ocean	0.95	0.62	0.90
Land	0.96	0.66	0.87
Ocean & Land	0.96	0.66	0.89
South			
Ocean	0.94	0.67	0.89
Land	0.93	0.63	0.91
Ocean & Land	0.95	0.67	0.89
Tropics			
Ocean	0.96	0.60	0.92
Land	0.96	0.65	0.91
Ocean & Land	0.97	0.62	0.92

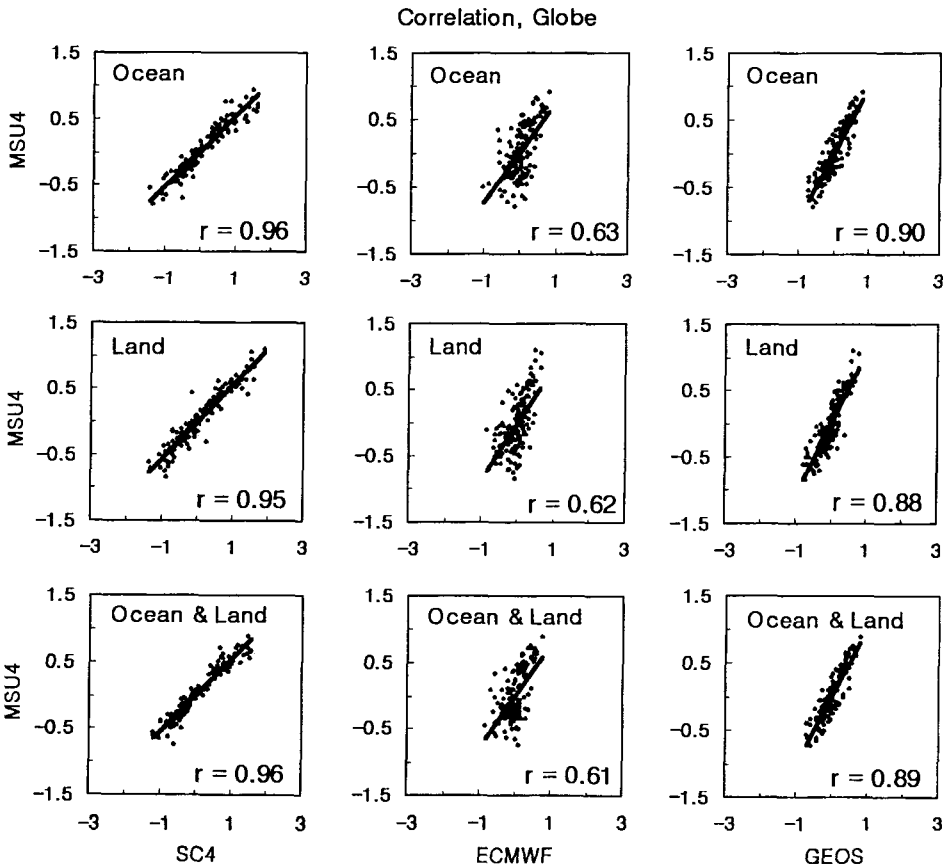


Fig. 7. Scatter diagrams of MSU4 temperature anomalies versus corresponding SC4, ECMWF and GEOS over the globe. The 'r' means correlation coefficient.

1981~93년에 전구의 지역에 대해 육지, 해양, 육지 및 해양에 대한 MSU4와 다른(SC4, ECMWF와 GEOS) 자료의 아노말리값들 간의 상관관을 조사한 것이다. MSU4에 대한 위의 세 자료의 상관관은 지표면의 성질과 지역에 따라서는 크게 변하지 않았으나 자료의 종류에 따라서는 뚜렷한 차이를 보였다. MSU4와 SC4 사이의 상관($r > 0.93$)이 MSU4와 다른 자료들과의 상관보다 높았으며, MSU4와 ECMWF 간의 상관관은 0.67 이하로 가장 낮았다. 전구 지역에서 MSU4에 대한 세 자료의 상관 모두는 육지보다 해

양에서 높았으나 양반구에서는 해륙 분포와 관련된 뚜렷한 특징을 보이지 않았다. 북반구에서는 MSU4에 대한 SC4, ECMWF의 상관관이 해양보다 육지에서 높았고, GEOS 경우는 그 반대를 보였다. 이에 반하여 남반구에서는 MSU4에 대한 상관관이 SC4와 ECMWF 경우에 해양에서, 그리고 GEOS 경우에 육지에서 더 높았다. 열대에서는 MSU4에 대한 SC4, GEOS의 상관관이 육지와 해양에서 거의 비슷했으나, ECMWF 경우에는 해양보다 육지에서 현저하게 높았다.

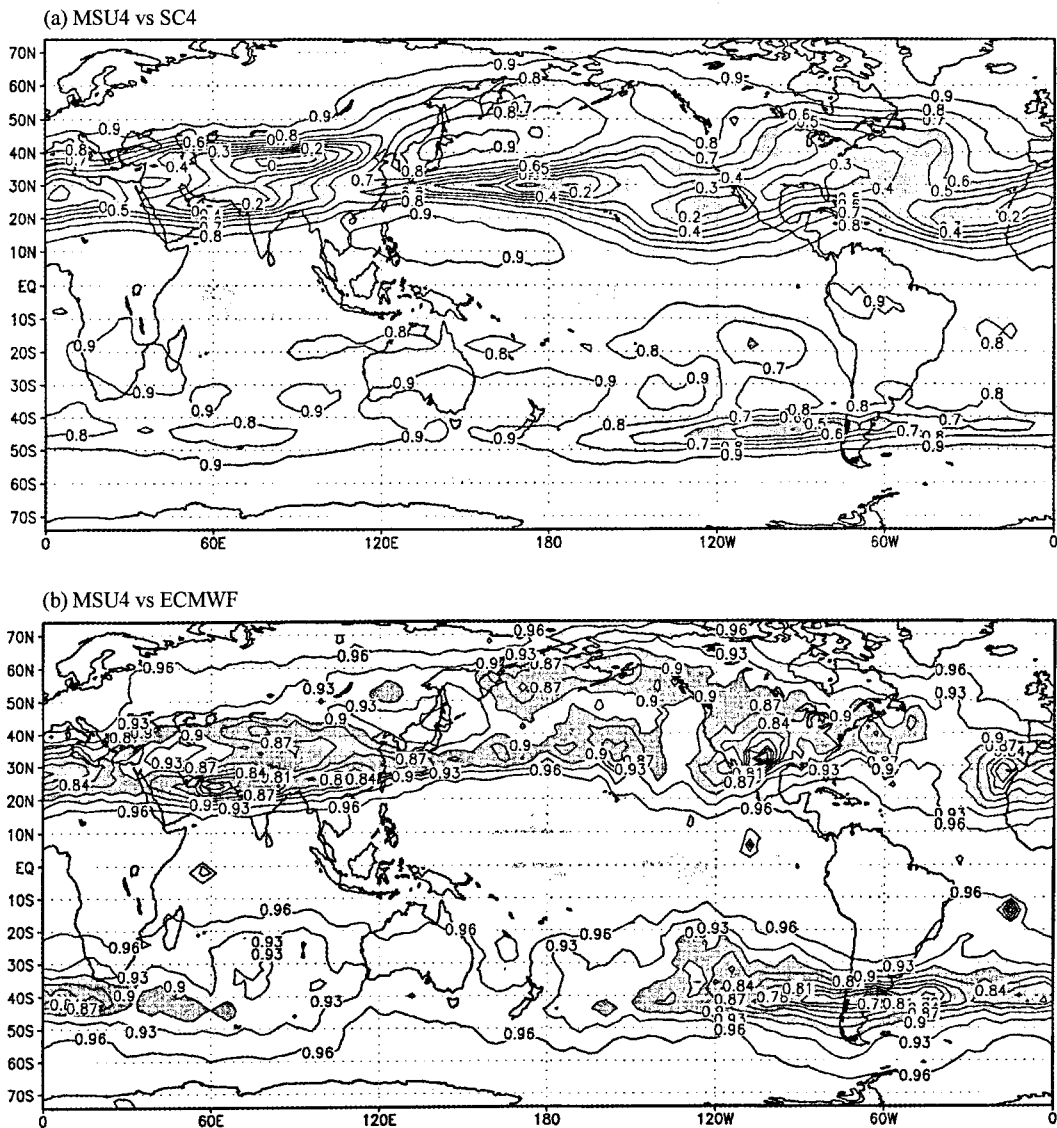


Fig. 8. Temporal correlation between three kinds of monthly MSU Ch 4 brightness temperature data over 168 months from 1980 to 1993. (a) MSU4 vs SC4 and (b) MSU4 vs ECMWF.

시계열 상관의 공간 분포

1980 ~ 1993년 기간에 두 종류의 위성관측들(MSU4, SC4) 사이의 상관, 그리고 MSU4와 ECMWF 모델 재분석 사이의 시계열 상관의 공간 분포를 조사하였다(Fig. 8). Fig. 8a에서 두 종류 위성관측 간의 상관은 전구 대부분의 지역에서 높았으나($r > 0.9$), 30°N 위도대의 북반구 아열대 지역과 남반구 안데스 산맥의 남단 지역 부근의 위도대에서 낮았다($r < 0.7$). 이들 지역에서는 MSU4와 모델(NCEP과 GEOS) 재분석 자료와의 상관도 낮았다(유정문 · 김진남, 2000). 또한 Spencer and Christy(1993)의 연구에 의하면, MSU 위성자료가 기후 신호를 반영하는데 있어서 채널 2에 비하여 채널 4월 평균값의 신호에 대한 잡음값은 낮아 채널 4가 상대적으로 많은 잡음을 포함 한다.

MSU4와 ECMWF와의 상관은 위의 두 위성자료들 간의 결과와 비슷한 공간 분포를 보이나, 전반적으로 낮았다(Fig. 8b). 특히 티벳 고원의 북쪽 지역에서의 상관은 거의 영으로 나타나는데, 이는 이 지역의 대류권계면 부근에서 나타나는 아열대 제트류에 의하여

Table 7. Low stratospheric thermal trends (K/decade) in Ch 4 anomalies of MSU observations and model reanalyses, and correlation coefficients (r) between MSU4 and other Ch 4 temperatures (SC4, ECMWF and GEOS) during the period of 1981 ~ 1993 near the Korean peninsula.

	MSU4	SC4	ECMWF	GEOS
Trend (K/decade)	-0.38	-0.82	-0.07	-0.28
Correlation coefficient		0.81	0.73	0.88

하부 성층권의 온도 경도가 커서 발생하는 것으로 추정된다. 이러한 모델 재분석에는 육상의 레윈존데나 종관 자료가 해상보다 많아 해륙 특징이 입력되지만, 채널 4 위성관측 자료에는 해양과 육지의 영향이 인위적으로 포함되지 않으므로 위성관측과 모델 재분석의 상관에 차이가 나타난다(Shah and Rind, 1998).

한반도 부근의 하부 성층권 온도

Table 7은 1981 ~ 1993년 기간의 두 종류 위성관측

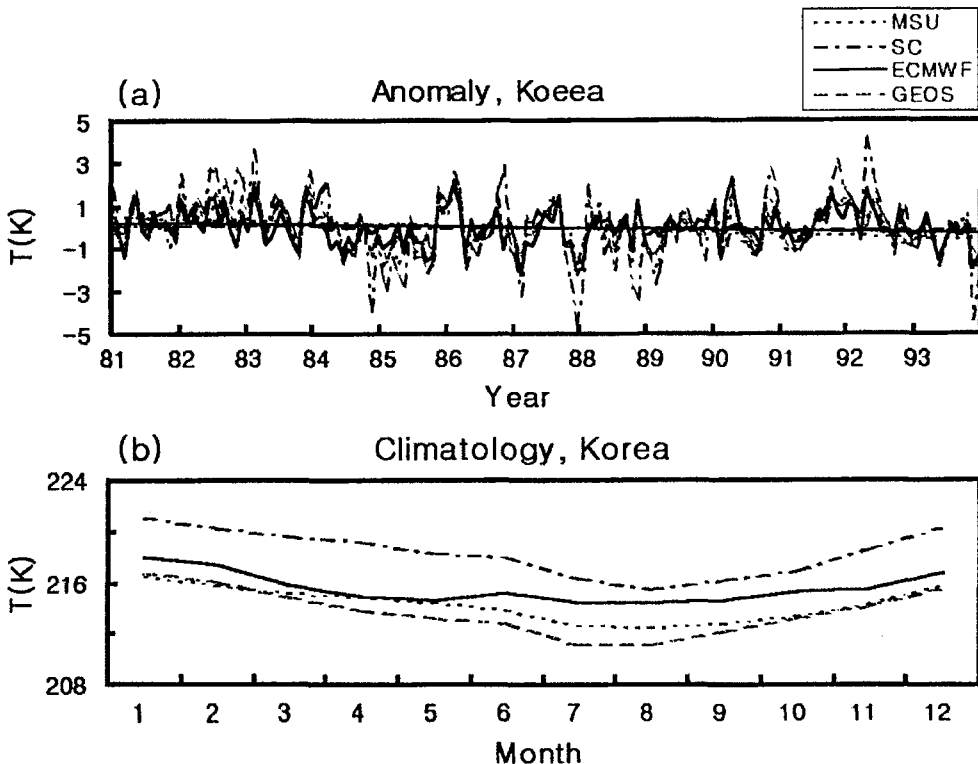


Fig. 9. Low stratospheric temperature values during the period of 1981 ~ 1993 near the Korean peninsula for (a) Anomaly and (b) Climatology.

(MSU4, SC4)과 두 종류 모델 재분석(ECMWF and GEOS) 자료를 사용하여 한반도 부근의 6° 위도×9° 경도 격자 지역(123.0~132.0°E, 33.5~39.5°N; 유정문 외, 1999)에 대한 하부 성층권 온도의 추세를 조사한 것이다. 위 기간에 MSU4 아노말리 시계열에서 조사된 한반도 부근의 하부 성층권 온도는 -0.38K/decade의 냉각화 경향을 보였다. 이는 같은 기간에 나타난 전구 지역의 냉각화 세기(-0.14K/decade)의 2.7배에 해당한다. 이 지역에 대한 다른 자료의 결과에서 냉각화는 SC4(-0.82K/decade)에서 가장 컸고, ECMWF(-0.07K/decade)에서 가장 작았다(Fig. 9a). 네 종류의 자료들의 위상은 서로 비슷하나, SC4(8.69K)의 변동폭이 MSU(4.28K), ECMWF(4.51K), GEOS(3.79K)에 비하여 가장 컸다.

전구의 경우와 유사하게 한반도 부근에서의 하부 성층권 온도의 월별 기후값은 SC4에서 가장 높게 나타나며, ECMWF, MSU4, GEOS 순으로 나타났다(Fig. 9b). MSU 채널 2 자료에서 계산된 중간 대류권의 기후값에서는 직하점 자료와 전체 주사의 연변화 시계열들이 거의 일치한데 비하여(유정문 · 이지은, 2000), 이 연구에서의 하부 성층권 온도의 기후값은 직하점과 전체주사 자료들 사이에 차이(4~5K)를 보였다. 두 종류의 위성관측(MSU4, SC4)과 GEOS의 하부 성층권 온도는 북반구 평균과는 달리(Fig. 5) 한반도 부근에서 여름에 낮고 겨울에 높은 대류권과 반대인 연주기를 보이나, ECMWF 경우에는 이러한 경향이 약하다. 또한 ECMWF의 변동폭(3.65K)은 SC4(5.72K), GEOS(4.86K), MSU4(4.06K)에 비하여 가장 작았다.

Fig. 10는 한반도 부근에서의 하부 성층권 온도의 위성관측과 모델 자료들간의 상관관을 나타낸 것이다. 전구 지역의 결과와는 달리 MSU4와 GEOS와의 상

관이 0.88로 가장 높았다(Tables 6~7). 전구와 한반도 부근의 결과들을 비교하면, MSU4에 대한 GEOS의 상관은 큰 차이를 보이지 않았으나, 한반도 부근에서의 MSU4와 SC4와의 상관은 전구 경우에 비하여 0.15 작았으며, MSU4와 ECMWF와의 상관은 0.12 정도 컸다.

결론

최근 20년 동안의 MSU 위성관측(MSU4, SC4)과 모델 재분석(ECMWF와 GEOS) 자료를 이용하여 전구 및 한반도 부근의 하부 성층권 온도에 대한 추세와 상관 분석을 실시하였다. 하부 성층권 온도를 반영하는 위성관측 직하점 자료인 MSU4는 1980~1999년, 여러 주사 자료를 사용하여 유도한 SC4는 1980~1999년, 모델 재분석 자료인 ECMWF는 1980~1993년, 그리고 GEOS는 1981~1994년 기간에 대하여 위도 2°×경도 3° 격자 자료로 정리된 후 사용되었다. 온도 시계열의 추세 및 상관 분석을 위하여 각 자료들을 지역별로 전구, 북반구, 남반구, 열대 지역에 대하여 분류한 후, 다시 지표면의 성질에 따라 각각 해양, 육지, 해양 및 육지에서의 온도로 세분화하였다.

MSU4에서 조사된 1980~1999년 기간의 하부 성층권 온도는 전구 지역에서 냉각화 경향(-0.35K/decade)을 보였다. 전구 및 양반구 지역은 지표면의 성질에 따라 그 차이를 보였으나 열대 지역은 해양과 육지에서의 온도 추세가 거의 일치하였다. 하부 성층권 온도 아노말리의 경년 변화에서는 전구, 양반구, 열대 지역 모두에서 엘치촌과 피나투보 화산폭발의 영향이 뚜렷하게 나타났다. 위성관측과 모델 재분석 자료들의 공통 기간(1981~1993년)에 대한 아노말리 온도의 추세는 MSU4(-0.14K/decade)와 SC4(-0.42K/

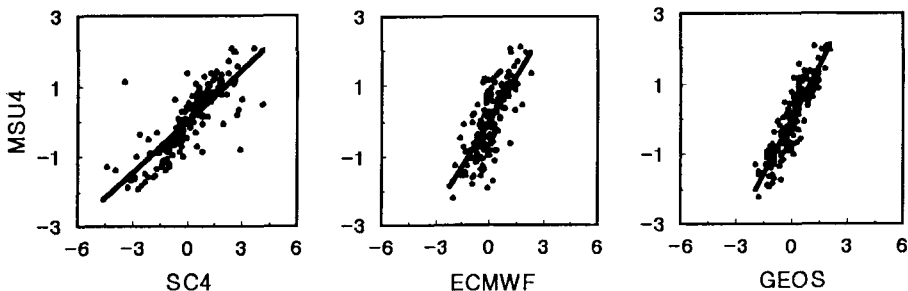


Fig. 10. The same as in Fig. 7 except for correlation coefficients between MSU4 and three kinds of other Ch 4 corresponding temperatures near the Korean peninsula.

decade), GEOS(-0.15K/decade)에서 전구적으로 냉각화 경향을 보였으나, ECMWF는 북반구를 제외하고 다소 온난화 경향(0.06K/decade)을 보였다. 또한 냉각화 경향은 SC4에서 가장 뚜렷하였으며, 모델보다 관측자료에서 더 뚜렷하였다. 지역별로는 북반구에서 그 정도가 가장 컸다. 추가하면, MSU4는 열대에서 그리고 SC4, ECMWF와 GEOS는 남반구에서 이러한 경향이 가장 약하였다.

지표면의 성질에 따라서는 열대를 제외한 전구 지역에서 해양에 비하여 육지에서의 하부 성층권 온도의 냉각화 추세가 크게 나타났다. 하부 성층권 온도의 기후값은 MSU4, ECMWF와 GEOS에서 뚜렷한 연주기를 보이며 서로 유사한 위상을 가지나, SC4에서의 양반구의 하부 성층권 온도에 대한 연주기는 약하였다.

온도 추세에 대한 95% 신뢰도 구간의 조사에서 신뢰도는 중간 대류권의 전구 해양에서 가장 컸으며, 하부 성층권의 남반구 육지에서 가장 낮았다. 또한 중간 대류권보다 하부 성층권의 온도 추세에 대한 신뢰도가 낮았다. 대기층 온도의 추세를 중간 대류권과 하부 성층권 온도 자료를 이용하여 연직적으로 조사한 결과, 고도에 따른 추세 감율이 북반구 육지에서 가장 커서, 이 지역에서 대류활동의 강화 가능성을 제시하였다.

자료들의 공통 기간에 대한 상관 분석에서, 두 종류의 위성관측들 사이의 상관성이 위성관측과 모델들과의 상관보다 높았다. 전구 지역에서는 MSU4에 대한 상관성이 세 종류 자료(SC4, ECMWF와 GEOS) 모두가 육지에 비하여 해양에서 높았으나, 양반구에서는 해륙 분포에 따라 다르게 나타났다. 또한 SC4와 GEOS와 다르게 ECMWF에서는 지역별로 상관성이 다르게 나타났다. MSU4와 SC4와의 상관은 전구 대부분의 지역에서 0.9 이상의 높은 상관, 그리고 아열대 제트류의 영향을 받는 30° 위도대와 북미 지역, 안데스 산맥 남단 지역에서 낮은 상관을 나타냈다. MSU4와 ECMWF 간의 상관의 경우에는 두 위성관측 결과와 유사하나, 전반적으로 낮았다.

한반도 부근의 하부 성층권 온도는 이 연구에서 사용한 네 종류(MSU4, SC4, ECMWF 그리고 GEOS) 자료 모두에서 공통적으로 중간 대류권의 연주기와는 반대인 여름에 하강하고 겨울에 상승하는 연주기를 보였다. 이것은 이 지역에서 여름에 감소하고 겨울에 증가하는 오존의 영향과도 관련이 있는 듯 보인다(유

정문·이혜란, 2000). 한반도 부근의 하부 성층권 온도는 네 종류 자료 모두에서 냉각화 경향을 보였다. 이러한 경향은 SC4(-0.82K/decade)에서 가장 컸고, ECMWF(-0.07K/decade)에서 가장 작았다.

이 연구에서는 서로 독립적으로 유도된 위성관측 자료들과 모델 자료들이 하부 성층권의 온도 추세에서 지역에 따라 정량적으로 불일치를 보이고 있으나, 냉각화 경향에 있어서는 대체로 일치하였다. 이러한 비교를 통하여 하부 성층권의 장기간의 기후변화 경향과 원인을 진단하고, 위성관측들과 모델자료들의 상호 정확성을 분석할 수 있음을 제시하였다. 이 연구에서 사용된 네개 채널의 MSU 자료 보다 1998년부터 시작된 20개 채널의 AMSU(Advanced Microwave Sounding Unit: Mo, 1996) 자료를 사용한다면, 성층권 및 대류권의 온도 추세에 대한 더 정확한 정보 및 이해를 얻을 수 있을 것이다.

사 사

이 연구는 한국과학재단이 지원하는 SRC 기후환경시스템 연구센터의 지원으로 이루어졌으며, 이에 감사드린다. 또한 본 논문에 대하여 좋은 지적을 주신 두 분의 심사위원께 감사드린다. 원고정리를 도와 준 이화여자대학교 과학교육과 한지연, 송희영에게도 감사를 표한다.

참고문헌

- 유정문·김소현, 1998, 마이크로파 위성자료의 하부성층권 온도에 대한 경험적교합수 분석. 한국지구과학회지, 19(6), 649-663.
- 유정문·김진남, 2000, 하부 성층권의 열적 상태에 대한 위성관측(MSU)과 모델 재분석 자료와의 비교. 한국지구과학회지, 21(2), 137-158.
- 유정문·이홍란·김경의·정미경, 1999, 관측과 모델로부터 조사된 한반도 부근의 대류권 및 하부 성층권의 온도 경향. 한국기상학회지, 35(4), 599-612.
- 유정문·이은주, 2000, MSU와 ECMF에서 유도된 중간 및 하부 대류권 온도의 시·공간 변동. 한국지구과학회지, 21(5), 503-524.
- 유정문·이지은, 2000, 위성관측과 모델 재분석 자료에서 유도된 중간 및 상부 대류권의 전지구 온도 경향. 한국지구과학회지, 21(5), 525-540.
- 유정문·이혜란, 2000, 오존 전량의 시·공간 변동 및 대기 열적 상태와의 상관. 한국기상학회지, 36(1), 75-86.
- Ahrens, C.D., 1994, Meteorology Today, 5th ed., West Publishing Company, 591 p.

- Angell, J.K., 1999, Comparison of surface and tropospheric temperature trends estimated from a 63-station radiosonde network, 1958 ~ 1998. *Journal of Geophysical Research*, 26, 2761-2764.
- Brooks, C.E.P. and Carruthers, N., 1953, *Handbook of Statistical Methods in Meteorology*, Her Majesty's Stationery Office, 412 p.
- Christy, J.R. and Drouilhet, S.J., 1994, Variability in daily, zonal mean lower-stratospheric temperatures. *Journal of Climate*, 7, 106-120.
- Grody, N.C., 1983, Severe storm observation with microwave sounding unit. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 22, 609-625.
- Gibson, J.K., Kallberg, P., Upala, 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., Ruedy, R., Sato, M., and Reynolds, R., 1998, *Global climate data and models: A reconciliation*, Science, 281, 930-932.
- Hartmann, D.L., 1994: *Global Physical Climatology*. New York, Academic Press, 411 p.
- 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, 1424-1440.
- Kistler, R., Kalnay, E., and coauthors, 1999, The NCEP/NCAR 50-year reanalysis. Submitted to *Bull. Amer. Meteor. Soc.* [<http://sgi62.wwb.noaa.gov/wd23gw/close/reanal2.htm>].
- Labitzke, K. and McCormick, M.P., 1992, Stratospheric temperature increases due to Pinatubo aerosols. *Geophysical Research Letters*, 19, 207-210.
- Mo, T., 1996, Prelaunch calibration of the Advanced Microwave Sounding Unit-A for NOAA-K. *IEEE Transaction Microwave Theory and Technique*, 44, 1460-1469.
- Moorthi, S. and Suarez, M.J., 1992, Relaxed Arakawa-Schubert: A parameterization of moist convection for general circulation models. *Monthly Weather Review*, 120, 978-1002.
- Newell, R.E., 1970, Stratosphere temperature change from Mt. Agung volcanic eruption of 1963. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 27, 977-978.
- Prabhakara, C. and Iacovazzi, R., 1998, Comments on "Analysis of the merging procedure for the MSU daily temperature time series". *Journal of Climate*, 12, 3331-3334.
- 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. *Journal of Geophysical Research*, 103, 31569-31592.
- 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.
- _____ and _____, 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.
- _____ and _____, 1993, Precision lower stratospheric temperature monitoring with the MSU: Technique, validation and results 1979 ~ 1991. *Journal of Climate*, 6, 1194-1204.
- 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.
- Weatherhead, E.C., Reinsel, G.C., and coauthors, 1998, Factors affecting the detection of trends: Statistical considerations and applications to environmental data. *Journal of Geophysical Research*, 103, 17149-17161.
- Wentz, F.J. and Schabel, M., 1998, Effects of satellite orbital decay on MSU lower tropospheric temperature trends. *Nature*, 394, 661-664.

2001년 6월 19일 원고 접수
2001년 9월 4일 수정원고 접수
2001년 10월 12일 원고 채택