Journal of the Korean Society of Remote Sensing, Vol.16, No.1, 2000, pp.47~54

한반도 지역의 마이크로파 위성자료와 고층관측자료의 비교

김소현* · 황병준* · 안명환* · 정효상** · 김금란***

기상연구소 원격탐사연구실*, 기상연구소장**, 기상청 위성담당관실***

Comparison of temperature Derived from the Microwave Sounding Unit and Radiosonde Observation Data in Korea

So-Hyun Kim*, Byong-Jun Hwang*, Myoung-Hwan Ahn*, Hyo-Sang Chung, and Kum-Lan Kim*****

Remote Sensing Research Laboratory, Meteorological Research Institute(METRI)

Abstract : We compared the satellite observed temperature with the radiosonde observed temperature in the Korean Peninsula. The radiosonde observed data were obtained from four upper air observation stations in the Korean Peninsula from 1981 to 1998, and were compared with the satellite observed data of the channel-2 and channel-4 of microwave sounding unit(MSU) on board NOAA series of polar-orbiting satellites. The radiosonde data were reconstructed from radiosonde T_b using MSU weighting function. The monthly climatology shows radiosonde T_{b2} is higher than MSU T_{b2} in summer. The correlation between MSU T_{b2} and radiosonde T_{b2} is 0.72 - 0.76 and 0.73 - 0.81 between MSU T_{b4} and radiosonde T_{b4} . The T_{b2} show a positive trend and the T_{b4} has a negative trend during the 18 years.

Key Words : MSU, Radiosonde observation

요 약 : 한반도 기후 분석에 마이크로파 위성자료의 이용을 위해 1981년에서 1998년까지 18년간 한반도 4개의 고층 관측 지점에서 얻어진 온도자료와 위성자료를 비교하였다. 위성자료로 극궤도 위성인 NOAA위성에 탑재되어 있는 MSU(Microwave Sounding Unit) 채널 2와 채널 4 휘도온도를 이용하였다. 고층 관측소의 라디오존데 자료는 MSU 휘도온도와 비교하기위해 MSU 가중함수를 이용하여 고도마다 가중을 두어 월평균 온도 값을 만들어내었다. 월평균 기후값 비교에서 여름철에 라디오존데 온도가 MSU 휘도온도보다 높은 온도를 보였다. 두 온도사이의 상관에서는 채널2의 경우 0.72 - 0.76, 채널 4에서는 0.73 - 0.81정도를 보였다. 18년 동안의 온도경향은 채널 2의 경우는 0.04°C/year의 증가가 있었고, 채널 4의 경우는 -0.07°C /year의 감소가 보였다.

1. 서 론

우리가 살고 있는 지구의 기후계를 이해하고 그 변동양상을 알아보는 데에는 지구대기의 온도를 예측하는 일이 필수적이다. 과거에는 지구 온도측정을 위해 지상 온도 관측자료를 사용하여 왔

2000년 1월 5일 접수 ; 2000년 2월 15일 수리.

으나 지상에 설치된 온도계는 지구의 대부분을 차지하는 바다나 외딴 섬, 사막이나 산맥 등지에서 관측의 한계가 있으며 시간상으로도 많은 제약을 받았다. 그러나 위성을 이용하면 전 지구를 고루 관측할 수 있고, 다양한 고도의 대기층의 열적 상태도 여러 파장의 채널을 통해 관측이 가능하다. 현재 위성에 의한 온도관측이 국내외에서 다방면으로 이용되고 있으며 극궤도를 돌고있는 NOAA 위성에 탑재된 MSU복사계를 이용한 지구대기의 온도 관측이 계속적으로 연구되고 있다. Spencer and Christy(1990, 1992)와 Spencer *et al.*(1990)은 MSU자료와 지상 관측자료의 상관을 연구하였고, Hurrell and Trenberth(1992, 1996)는 MSU 채널2 자료와 ECMWF(European Center for Medium-Range Weather Forecasts)모델, 지상관측자료 등과 비교하였고, Basist *et al.*(1995)는 MSU자료와 GDAS (Global Data Assimilation System)를 비교하였다. 국내 연구(유정문 외 1998; 유정문 · 김소현 1998; 유정문 외 1999)에서는 MSU자료중 직하점 자료로 분석한 해수면 온도, 중간대류권, 하부 성층권에 대한 분석과 지상자료, 기후모델 값과의 비교 등이 수행되었다.

1978년부터 약 2년 간격으로 발사되어 지구의 극궤도를 돌고 있는 NOAA위성에 탑재되어있는 MSU복사계는 각각 다른 4개의 채널에서 대기와 지표에서 방출되는 마이크로파를 관측한다. 4개의 채널에는 50.3GHz의 채널1, 53.74GHz의 채널2, 54.96GHz의 채널3, 57.95GHz의 채널4가 있는데 이는 산소분자에 의한 강한 흡수역이다. 가장 최근인 1998년 5월에 발사된 NOAA-15에 탑재된 대기온도를 측정하기 위한 마이크로파 복사계 AMSU-A(Advanced Microwave Sounging Unit)는 15개의 채널을 가지고 더욱 정확하게 대기온도 수직 구조를 파악하고 있다. 이 채널들에서는 대기 중 산소에 의한 복사 열방출을 주로 탐지하는데 이는 대기 중 산소 분포는 시간적 공간적으로 균일하기 때문에 산소분자는 믿을만한 온도의 tracer가 되기 때문이다(Spencer and Christy 1990). MSU는 두 개의 주사형 안테나로 직하점으로부터 좌우로 11개의 각으로 나누어서, 한번 scan할 때 ±47.4°의 범위를 측정할 수 있다. 복사계의 시직경이 7.5°이므로 직하점의 경우 약 109km의 범위를 한번에 볼 수 있다. 각 채널의 휘도온도는 각 채널에서의 가중함수의 극대값이 위치하는 고도에서의 온도를 주로 반영한다(Fig. 1). 채널1은 하부 대류권인 지표근처의 온도를 반영하며, 지표면과 강수현상에 크게 영향을 받는다. 채널2는 산소분자에 의해 강하게 흡수되는 마이크로파 영역이다. 따라서 구름과 강수가 없는 경우에는 이 채널에서 직하점 방향으로부터 대기 상부까지 투과하는 지표면의 복사는 8%에 불과하다(Yoo, 1992). 이러한 흡수성질 때문에 대류권 하부에 존재하는 수증기, 구름 그리고 강수와 같은 변동성분에 의해 채널2에서의 오차가 상당히 적다. 채널3은 권계면 하층에서 방사되는 최대 복사량으로부터 계산된 평균적인 휘도온도를 나타낸다. 채널4의 경우는 70hPa부근의 하부 성층권의 열적 상태를 반영한다.

본 연구에서는 MSU 복사계의 휘도온도 관측자료로부터 한반도 주변역의 온도를 도출하여 4개 지역의 고층관측자료와의 상관을 살펴봄으로써

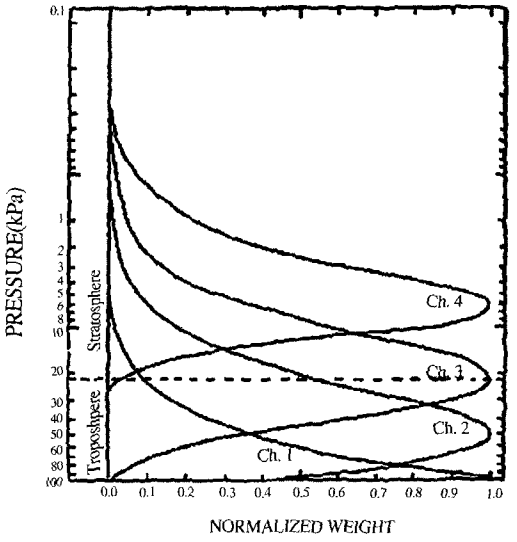

Fig. 1. Weighting functions for MSU channels 1(50.3GHz); 2(53.7GHz); 3(54.96GHz); 4(57.95GHz) for 22° view angle through the U.S. Standard Atmosphere(After Spencer and Christy 1992a).

위성자료의 정확도를 파악하고 장기적으로 고층 관측자료의 시간적 공간적인 한계를 위성관측자료로 극복하여 장기예보와 기후변화분석에 이를 이용할 수 있도록 하는데 있다.

2. 자료 및 분석 방법

본 연구에서 사용된 자료는 CTD(Condensed TOVS Data)에서 추출한 MSU 채널2와 채널4 휘도온도 자료와 오산, 포항, 광주, 제주의 4개 지역에서 관측된 고층자료이다(Fig. 2). MSU 4개의 채널 중에서 대류권과 하부 성층권의 열적 상태를 잘 나타내는 두 개의 채널만 선택하여 비교하였다. 연구기간은 1981년부터 1998년까지 18년간(216개월)이고, MSU 자료는 고층관측자료와의 비교를 위해서 고층관측소를 중심위치로 2.5°×2.5° 격자 범위(Fig. 2)의 자료만 취했으며 그 자료가 시간별로 충분한 양이 되지 못해 격자 안의 관측된 모든 시간을 월평균하였다. 위성이 한번 scan할 때 11개의 지점을 주사하기 때문에 직하점 이외의 주사점에서는 보다 더 많은 대기를 통과하기 때문에 보정을 해 주어야 한다. 또한 2년 정도의 수명을 가진 위성간의 연속적인 자료를 위해서도 위성간 자료에 보정이 필요하다.

고층자료는 우리 나라 기상청과 공군에서 표준등압면 고도의 고층기상자료를 관측하여 기온, 이슬점온도, 풍향, 풍속 등을 제공한다. 이 자료의 보정에는 태양광선에 의한 온도변화, 기압계의 저온효과 지구곡률에 따른 상층풍 오차 등을 고려하였다(고층기상월보). 이 연구에 사용된 자료의 수집·분석된 기간과 관측소의 위치가 Table 1에 정리되어있다.

고층관측 자료로부터 MSU 채널에 해당하는 온도를 만들어내기 위해 관측된 00UTC와 12UTC자료를 각 채널의 MSU가중함수 그래프에 맞추어 다음 식을 사용하여 고도에 따라 가중을 주어 계산하였다(Spencer and Christy, 1993).

여기서 i는 관측 및 모델 값의 기압고도, N은

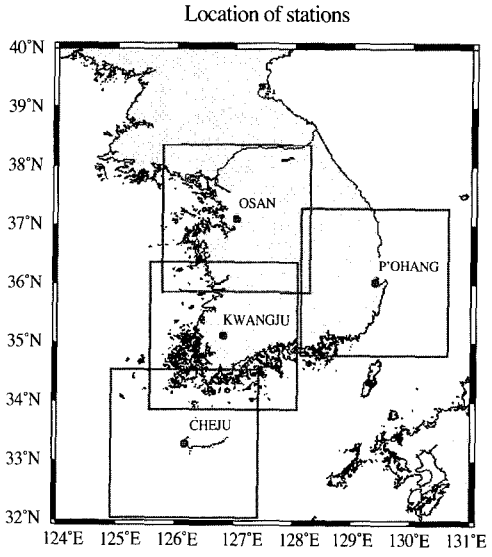

Fig. 2. Location of observation stations of Osan, Pohang, Kwangju, and Cheju in the Korean peninsula. Four boxes are MSU analysis areas.

$$T = \frac{\sum_{i=1}^{N} w_i T_i \ln(p_1/p_2)}{\sum_{i=1}^{N} i = 1\ N\ w_i \ln(p_1/p_2)}$$

기압고도의 개수, T_i 는 $_i$번째 관측 기압고도의 평균온도, w_i는 평균 가중값, 그리고 p_1과 p_2는 해당 기압고도에서의 각각 상하층 경계값이다. 예외적으로 오산은 06UTC와 18UTC 자료도 함께 사용하였다. MSU 채널2와의 상관분석을 위해서 채널2

Table 1. List of stations

Station	OSAN	POHANG	KWANGJU	CHEJU
Lat. (N)	37° 06′	36° 02′	35° 07′	33° 17′
Lon. (E)	127° 02′	129° 23′	126° 49′	126° 10′
Height above Mean Sea Level	52m	6m	13m	72m
Analysis Period	Jan. 1981 ~Dec. 1998 (216months)	Jan. 1981 ~Dec. 1998 (216months)	Jan. 1981 ~Dec. 1998 (216months)	May1988 ~Dec. 1998 (128months)
Analysis Data	00, 06, 12, 18UTC mean	00, 12UTC mean	00, 12UTC mean	00, 12UTC mean

의 가중함수의 최대치가 위치한 약 500hPa를 중심으로 925hPa에서 250hPa까지 가중을 하였다. 고층자료와 MSU 채널4와의 상관분석을 위해서는 채널4의 가중함수가 최대인 약 70hPa 고도를 중심으로 250hPa에서 10hPa까지의 범위를 가중하였다.

위성 자료와 비교하기 위해 가중함수가 존재하는 모든 고도에 걸쳐 전체적으로 가중을 해야 하나 높은 고도의 고층 자료는 중간 대류권자료에 비해 상대적으로 드물게 관측값이 존재하여 MSU 채널2와의 상관에서는 고층자료로 대류권을 포함하는 925-250hPa자료만 사용하여 가중을 두었다.

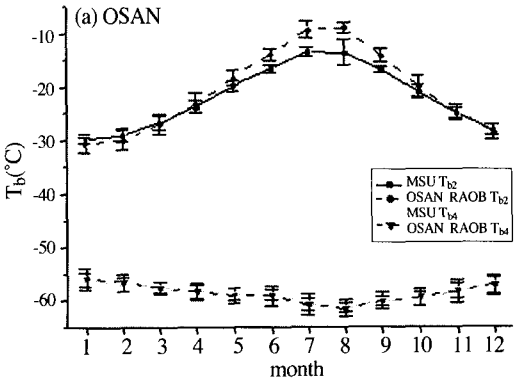

Fig. 3. 18year(1981-98) monthly mean climate value of MSU channel 2, 4 and weighted radiosonde data in OSAN.

3. MSU자료와 라디오존데 자료의 비교 분석

1) 기후값 분석

Table 1에서 제시한 4개 고층관측지역의 전체 분석기간에 대하여 월별로 MSU 월평균 자료와 고층자료의 기후값을 비교하였다. 두 자료 모두 전 분석기간의 자료에서 각 연도의 같은 월별로 묶어 각각 평균하여 자료를 생산하였다. 그래프의 윗쪽에 분포하는 MSU 채널2와 고층관측자료의 기후값을 살펴보면 오산과 그 외 3지역에서 7, 8월에 가장 높은 온도 값을 1, 2월에 가장 낮은 온도 값을 보이며 지상 온도에서 보여지는 계절적인 특징을 나타내었다(Fig. 3). 4지역 공통적으로 고층관측 자료가 MSU 채널2 온도값보다 전체적으로 높은 온도 값을 보이며 7, 8월경의 여름철에 위성자료와 큰 편차를 보였다. 반면 겨울철에는 위성자료와 고층자료가 여름철에 비해 작은 편차값을 나타내며 일부 고층자료는 위성자료보다 더욱 낮은 값을 보였다. 이는 겨울철에 비해 비가 많이 오는 여름철에는 구름과 강수에 의해 위성에서 측정된 온도값이 영향을 받는 것으로 생각된다. 구름의 운량과 두께가 증가할 때 해양에서 채널1의 온도는 증가하는 반면 채널2의 온도는 구름 및 강수에 의한 소산으로 인하여 맑은 날에 비해 감소하기 때문이다(Yoo, 1992). 4지역 모두에서

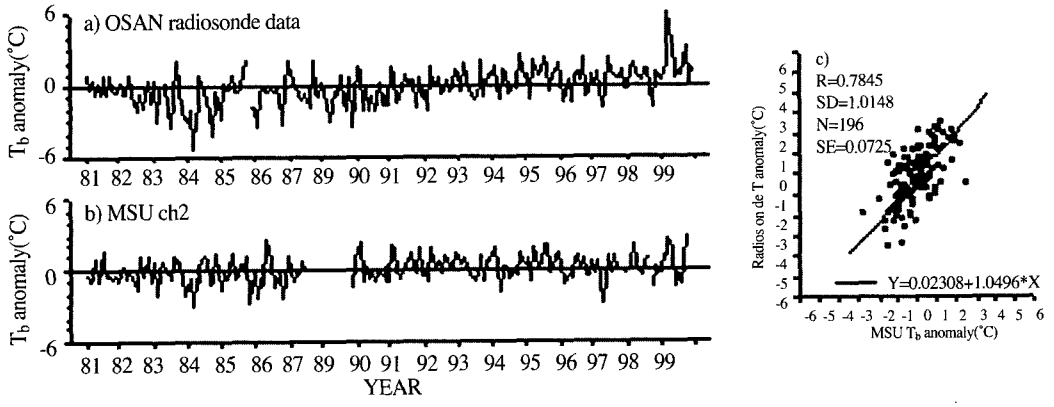

Fig. 4. Time series of monthly radiosonde weighted Tb2 anomalies a) and MSU channel 2 Tb anomalies b) for the period 1981 to 1998 in Osan. Their scatterplot c) has a correlation coefficient(R) of 0.73.

MSU 채널2값에 비해 그 변동폭이 현저히 작은 MSU 채널4와 고층자료는 전체적으로 8월경에 가장 낮은 값을 보이고 1월에 가장 높은 값을 보이며 채널2와는 역위상의 온도경향을 나타낸다. 이는 MSU 채널4 온도가 반영하는 고도(약 20km)가 하부 성층권에 해당하기 때문에 채널2가 반영하는 중간 대류권과는 다른 계절적 변동성을 보이기 때문이다. 태양의 영향을 많이 받는 대류권과는 다르게 성층권은 다른 영향을 받는 것으로 보인다. MSU 채널4 온도값과 고층자료값은 거의 비슷한 값을 나타낸다. 겨울철에 비해 여름철에 고층자료가 위성자료보다 약간 낮은 값을 보인다.

2) Anomaly 분석

최대 1981-1998년의 18년간 한반도 부근의 MSU 채널2와 채널4의 휘도온도 값과 각 채널에 따라 고도에 가중을 둔 고층관측 값과의 월평균 anomaly 분석을 하였다. 여기서 월평균 anomaly는 월평균 값에서 연주기 값(annual cycle) 또는 기후값이 제거된 것을 의미한다.

MSU 채널2 휘도온도 값과 고층자료와의 상관분석에서 오산은 두 자료의 시계열 분포가 서로 유사한 변동을 그리며, 두 자료가 0.73정도의 상관을 보였다(Fig. 4). 나머지 3지역에서도 두 자료가 유사한 변동을 보이며 포항은 0.72, 광주는 0.76, 제주는 0.73정도의 상관을 나타내었다. 4지역의 상관값과 두 자료 분포의 기울기와 절편값이 Table 2에 정리되었다. 국외에서 연구된 바에 의하면 라디오존데 자료와 위성자료간의 온도차이가 약 1°C 정도 차이를 나타내며, 이러한 고층자료와 MSU위성자료의 차이의 원인으로 여러 요인을 지적하였다(Spencer and Christy 1990). Sampling범위의 불일치, 고층관측 장비를 가동 전에 온도계의 검정상의 오차, MSU관측의 random noise 때문에 생기는 약 0.3°C의 오차, 마지막으로 MSU와 고층자료의 관측 시간상의 불일치 등이다. 이번 연구에서는 이러한 원인뿐만 아니라 고층자료에 위도에 따라 다른 가중함수를 사용하지 못했고, 위성의 scan angle에 따라 가중함수가 달라지지만 한가지 가중함수만을 사용함으로 오차가 발생했다. 이 연구에서도 평균 0.5-1.5도 정도 차이가 있었다. 그럼에도 불구하고 위성자료와 고층자료는 높은 상관을 보이며 18년간의 유사한 온도경향을 보여주었다.

Table 2. The summary of the scatter plot analysis about MSU and Radiosonde data. R is correlation coefficient, SD is standard deviation, a is slop, b is y offset.

Station		Osan	Pohang	Kwangju	Cheju	mean
T_{b2}	R	0.73	0.72	0.76	0.73	0.74
	SD	1.01	0.97	0.93	0.75	0.92
	a	1.10	1.07	1.13	0.94	1.06
	b	-0.13	-0.26	-0.07	-0.22	-0.17
T_{b4}	R	0.78	0.78	0.81	0.73	0.78
	SD	0.97	1.05	0.85	0.76	0.91
	a	1.05	1.11	1.03	0.87	1.02
	b	0.23	-0.12	0.03	0.27	0.10

MSU 채널4 휘도온도 값과 고층자료와의 상관분석에서는 평균적으로 채널2 값의 비교보다 높은 상관을 보인다(Table 2). 오산은 0.78, 포항은 0.78, 광주는 0.81, 제주는 0.73정도의 상관을 보였다. 4개 지역 모두 위성자료와 유사한 경향을 보이며 92년 4월에 공통적으로 극값을 가지는데, 이는 필리핀에서 91년 중순에 발생한 피나투보 화산(15.14N, 120.35E)의 영향을 받은 것으로 보인다(Fig. 5). 1991년 6월에 발생한 이 화산의 분화에 따라 많은 양의 황산을 포함한 화산 에어로졸이 성층권에 유입되었는데 이러한 화산 가스들이 수증기와 결합하여 두꺼운 연무를 만들고 태양에너지 일부를 흡수·반사하여 성층권의 온도를 증가시킨다(Ahrens, 1994). 약 반년이 지난 후에는 화산 에어로졸의 분포가 양 반구에 영향을 미치는 것으로 조사되었다(최우갑·이현아, 1996).

18년간 두 자료의 전체적인 온도경향을 살펴볼 때 중간 대류권의 온도는 약간 증가했고, 하부성층권의 온도는 그 반대로 하강했음을 보여준다(Fig. 6, 7). 제주를 제외한 3지역에서 위성자료는 중간대류권에서는 0.04°C/year, 하부성층권에서는 -0.07°C/year의 변동값을 보였다. 라디오존데 자료는 보다 큰 변동값을 나타내어 각각 0.11°C/year, -0.13°C/year의 증감경향을 보였다. 지역별로 온도

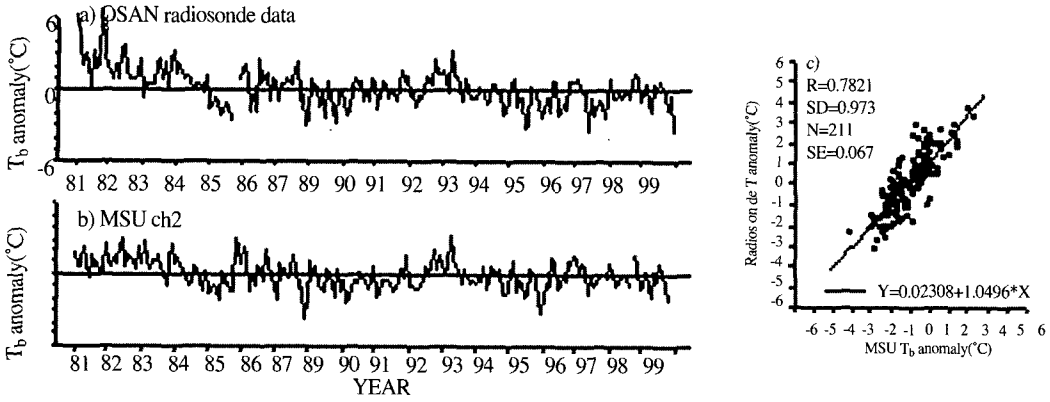

Fig. 5. Time series of monthly radiosonde weighted Tb4 anomalies a) and MSU channel 4 Tb anomalies b) for the period 1981 to 1998 in Osan. Their scatterplot c) has a correlation coefficient(R) of 0.78.

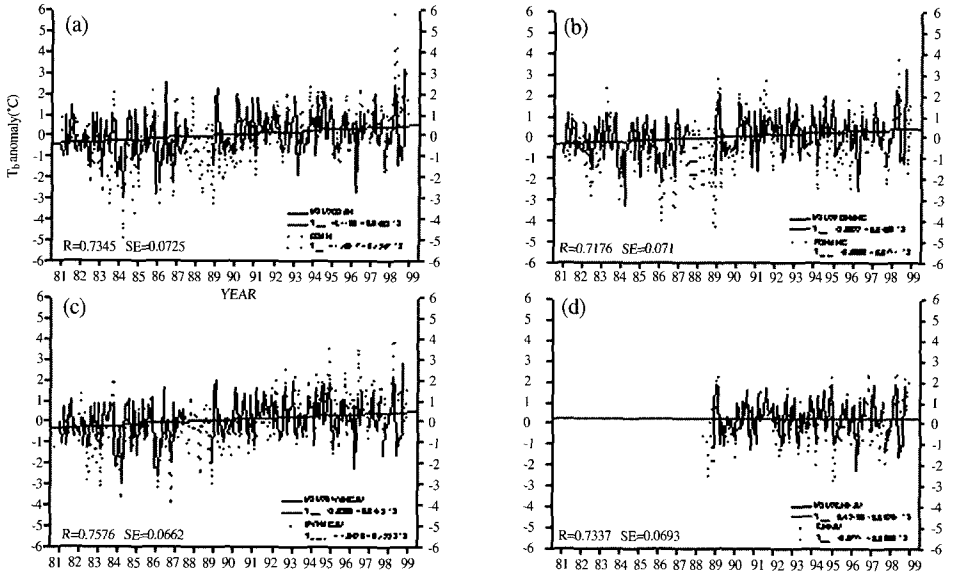

Fig. 6. Trends of MSU channel2 data(solid line) and Radiosonde data(dot line) during 18years, (a) OSAN, (b) POHANG, (c) KWNAGJU, (d) CHEJU.

경향의 기울기를 Table 3에 정리하였다. 제주는 짧은 관측기간으로 인해 다른 세 지역과 다른 결과를 보였다.

4. 결 론

근래에 우리나라 대기 온도의 장기적인 분석을 위해 위성자료가 광범위하게 이용되고 있으며, NOAA 위성에 탑재된 MSU 복사계를 이용한 대기온도의 수직적 분석 또한 국내외적으로 많이 연구되고있다. MSU 복사계 온도자료를 우리나라 기후변화 연구에 효율적으로 사용할 수 있도록 우리나라 4개 고층관측소에서 관측한 고층 대기 온도자료를 이용하여 MSU 복사계 온도자료와 비교분석하였다. 1981년에서 1998년까지 18년 동안의 MSU 자료를 관측소 중심으로 2.5°×2.5°격자범위의 자료를 취해서 월평균하고, 고층자료는 표준등압면 고도에 MSU 각 채널에 해당하는 가중 값

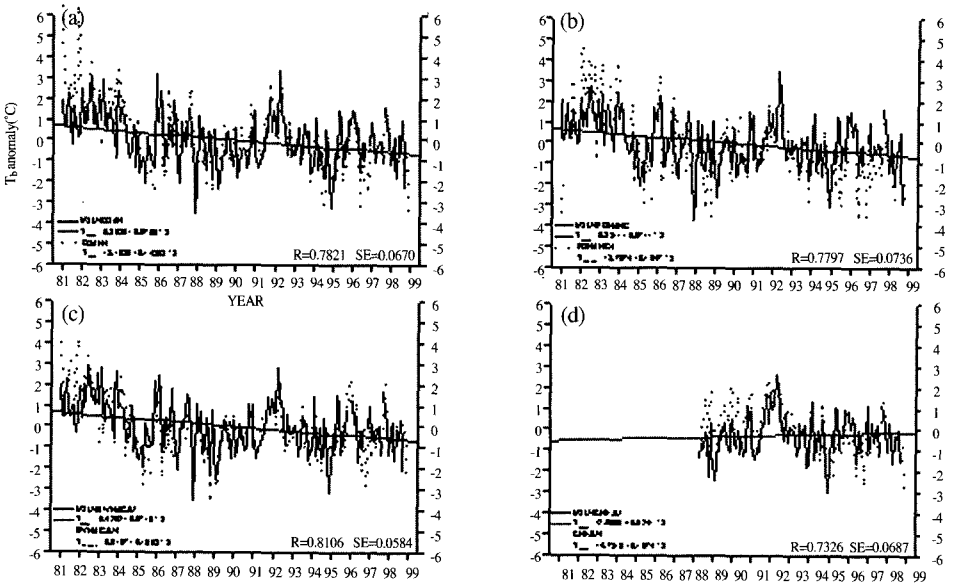

Fig. 7. Trends of MSU channel4 data(solid line) and Radiosonde data(dot line) during 18years. (a) OSAN, (b) POHANG, (c) KWANGJU, (d) CHEJU.

Table 3. The summary of the trend analysis.

°C/year ±error		Osan	Pohang	Kwangju	Cheju	Mean (except Cheju)
Ch2	MSU	0.05 ±0.01	0.04 ±0.01	0.04 ±0.01	0.00 ±0.03	0.04 ±0.01
	Radio sonde	0.13 ±0.02	0.07 ±0.02	0.13 ±0.02	1.06 ±0.03	0.11 ±0.02
Ch4	MSU	-0.07 ±0.01	-0.07 ±0.01	-0.07 ±0.01	0.02 ±0.03	-0.07 ±0.01
	Radio sonde	-0.14 ±0.02	-0.15 ±0.02	-0.11 ±0.02	-0.16 ±0.03	-0.13 ±0.02

을 두어 자료를 생산하였다. 두 자료의 기후값 분석에서는 서로 유사한 경향을 보이며 계절적인 특징을 나타내었다. 특히 겨울보다는 여름에 큰 편차를 보였고 채널4에서의 연주기의 변동폭은 하층의 채널2보다 작았다. Anomaly값 분석에서는 MSU 채널2와 4개 지역 고층자료의 비교에서 평균적으로 0.74정도의 상관을 보였다. 채널4와 고층자료 분석에서는 그보다 조금 높은 0.78정도의 상관을 보였다. Spencer and Christy(1990)에서 연구된 기존의 radiosonde 자료와의 비교보다는 낮은 상관값이지만 충분히 장기간의 기후분석에 이용될 수 있음을 보였다. 스캔 각도와 위도에 따라 다른 가중을 해주고 관측 시간별로 더욱 세분해서 비교 분석한다면 더욱 높은 상관이 나올것이고, 고층자료의 시간적 공간적 한계를 극복하는 좋은 자료를 산출할 수 있을 것이다.

앞으로 우선적으로 CTD data에관한 보다 구체적인 정보를 조사하고, MSU data의 자세한 오차분석을 통해 어느정도 보정이 가능한 지 조사한다. 또한 MSU 스캔 각도에 따른 가중함수 자료를 확보해서 해당하는 고층관측지점 자료를 다시 가중하여 그 상관을 조사해보고, 육상과 해상에서의 위성자료 정도의 차이를 비교해 보는 것이다. 또한 기후값 분석시 여름과 겨울의 위성값과 고층자료값의 차이를 비교하기 위해 고층관측소의 운량이나 OLR(Outgoing Longwave Radiation)값 또는 강수량값 등과 MSU자료와의 상관을 알아볼 예정이다.

사 사

이 연구는 과학기술부에서 시행하는 중점국가연구개발사업의 하나인 온실가스저감기술개발사업(Project No. 98-N11-02-01-A-01)으로 수행된 것이다.

References

고층기상월보, 1998, 기상청.

유정문, 김규명, 정정옥, 허창회, 1998, 해양에 대한 MSU 채널2(53.74㎓)밝기온도와 해수면 온도와의 관계, 한국기상학회지, 34(2):238-257.

유정문, 김소현, 1998, 마이크로파 위성자료의 하부성층권 온도에 대한 경험직교함수 분석, 한국지구과학회지, 19(6):649-663.

유정문, 박은정, 김규명, 허창회, 1999, 중간대류권 열적 상태에 관한 위성자료와 모델 재분석 결과 사이의 비교, 한국기상학회지, 35(4):549-564.

최우갑, 이현아, 1996, 준 2년 주기 진동과 연관된 적도 하부성층권의 순환, 한국기상학회지, 32:601-617.

Ahrens, C. D., 1994, *Meteorology Today*, 5th ed., West Publishing Company:591

Basist, A. N., C. F. Ropelewski, and N. C. Grody, 1995, Comparison of tropospheric temperature derived from the microwave sounding unit and the National Meteorological Center, *J. Climate*, 8:668-681.

Hurrell, J. W., and K. E. Trenberth, 1992, An evaluation of monthly mean MSU and ECMWF global atmospheric temperature for monitoring climate, *J. Climate*, 5:1424-1440.

Hurrell, J. W., and K. E. Trenberth, 1996, Satellite versus Surface Estimates of Air Temperature since 1979, *J. Climate*, 9: 2222-2232.

Spencer, R. W., J. R. Christy, and N. C. Grody, 1990, Global atmospheric temperature monitoring with satellite microwave measurements: Method and results 1979-84, *J. Climate*, 3:1111-1128.

Spencer, R. W., J. R. Christy, 1990, Precise monitoring of global temperature trends from satellite. *Science*, 247:1558-1562.

Spencer, R. W., J. R. Christy, 1992, Precision and radiosonde validation of satellite gridpoint temperature anomalies, Part I: MSU channel 2, *J. Climate*, 5:847-857.

Spencer, R. W., J. R. Christy, 1993, Precision lower stratospheric temperature monitoring with the MSU: Validation and results 1979-91, *J. Climate*, 6:1194-1204.

Yoo, J. M., 1992. Global warming from satellite microwave measurements, *J. Korean Meteor. Soc.*, 28(1):29-39.