

위성관측에서 유도된 중간 및 하부 대류권 온도와 ECMWF
재분석 결과 사이의 상호 비교; 시·공간 변동
Intercomparison of Middle and Low Tropospheric
Temperature from Satellite with ECMWF Reanalyses;
Temporal and Spatial Variability

이은주, 유정문
이화여자대학교 과학교육과

요 약

중간 및 하부 대류권의 열적 상태에 대한 결과들의 상대적인 정확성을 평가하기 위하여 대기대순환 모델의 재분석(1980-93년) 그리고 세 종류의 위성관측 자료들(1980-97년)을 태평양, 한반도 부근에 대한 시·공간 분석으로 상호 비교하였다. 중간 대류권 온도를 반영하는 위성자료는 본 연구에서 유도된 Microwave Sounding Unit (MSU) 채널2 직하점 밝기온도(MSU2)와 Spencer and Christy(1992a)가 전체 주사자료를 사용하여 유도한 채널2 밝기온도(SC2)이고, 하부 대류권 온도를 반영하는 위성자료는 Spencer and Christy(1992b)가 유도한 것이다(SC2R). 또한, 모델 자료는 ECMWF 재분석 온도이며, 위성관측 자료와의 비교를 위하여 재구성되었다. 한편, 각 위·경도 격자에서 위성관측과 모델 재분석의 월평균 값들의 상관도 전구적으로 조사하였다.

세 종류의 관측 자료들 간의 상관은 중·고위도에서 높았으나($r \geq 0.9$), 저위도 그리고 대류가 활발한 열대 서태평양 및 콩고강 부근에서 낮았다($r \sim 0.65$). 특히 SC2R에 대한 다른 자료의 상관이 상대적으로 낮았다. 이는 하부 대류권의 열적 상태를 반영하는 SC2R이 수적 및 지표방출의 영향으로 잡음을 크게 내포하기 때문인 것으로 추정되었다. 관측들과 모델 온도에 대한 월평균과 아노말리 값의 분석에서 시·공간 변동은 대체로 유사하였다. 관측 및 모델 자료는 열대 태평양 이외의 지역에 대한 월평균 값 모드1에서 연주기를 보였으나, 열대 태평양의 경우 모드2에서 보였다. 열대 태평양의 MSU2 모드1은 Walker 순환에 의한 동·서 대비를 보인 반면, 다른 위성관측과 모델 자료에서는 이러한 형태가 현저하지 않았다. 이 지역의 아노말리 값 모드2에서 위성관측들은 엘니뇨 기간에 적도를 중심으로 열대 동태평양 부근에서 아령모양의 대칭 형태를 보였으나 모델 결과에서는 이러한 특징이 약하였다. 관측과 모델 모두는 열대 태평양에 대한 아노말리 값의 모드1, 2에서 엘니뇨와 라니냐에 의한 경년변동을 뚜렷하게 보였다.

1. 서론

1978년 후반부터 지금까지 약 2년 간격으로 발사되어 지구의 극궤도를 돌고 있는 업무용 NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) 위성에 탑재된 MSU (Microwave Sounding Unit) 채널2 (Ch2) 밝기온도는 중간 대류권인 500 hPa 부근의 열적 상태를 반영한다. 따라서 중간 대류권의 평균온도 및 지구 온난화 경향을 조사하는데 채널2 밝기온도는 상당히 유용하게 이용되어 왔다(Spencer and Christy, 1990; Spencer *et al.*,

1990). MSU는 직하점을 포함한 11개의 주사각에서 밝기온도를 측정한다. Prabhakara *et al.*(1998)은 이들 중에서 직하점 자료만을 사용하여(MSU2), Spencer and Christy(1992a)는 11개의 모든 주사각을 사용하여 중간 대류권 온도(SC2)를 유도하였다. 이러한 MSU 채널2 가중함수들은 성층권 기여 부분을 포함하고 있어서 대류권 온도 경향을 나타내는데 오차로 작용할 수 있다. Spencer and Christy(1992b)는 이와 같은 성층권 영향을 제거하기 위하여 여러 주사각에서의 측정값들을 선형으로 결합하여 SC2R을 고안하였다. 따라서 SC2R은 MSU2나 SC2에 비하여 하부 대류권 열적 상태를 반영한다. 이러한 세 종류의 독립적인 관측은 여러 연구에서 지상온도 관측과 함께 지구 온난화 평가에 유용하게 사용되어 왔으나, 주어진 기간에 대한 온도 증감 경향이 서로 다르게 나타남으로써 많은 논란이 제기되고 있다. 따라서 위성관측들 사이의 객관적인 비교도 필요한 실정이다.

한편, 대기대순환의 결과는 모델 자체의 해상도 및 불완전한 물리 과정의 모수화 등에도 불구하고 기후 변동의 분석에 통찰을 줄 수 있으므로 활용되어 왔다. 기후 변동 분석에서 모델의 자료동화체계와 물리과정의 변화로 인한 불확실성을 줄이기 위하여 ECMWF 재분석 자료를 산출하였다. 이러한 자료는 시간적으로 일관성과 균질성을 가지므로 장기간의 관점에서 재분석 과정을 도입하지 않은 모델 결과보다 더 정확하다. 이러한 모델 재분석과 위성 관측 자료 사이의 객관적인 비교·분석을 통하여 상호 불일치에 대한 원인을 조사함으로써 관측과 모델에 대한 진단 및 가능한 개선을 제시할 수 있다. 본 연구의 목적은 중간 및 하부 대류권의 열적 상태를 반영하는 세 종류의 위성관측 MSU 채널2 밝기온도, 그리고 ECMWF 모델 재분석 자료로부터 재구성된 채널2 온도에 대한 경험직교함수(Empirical Orthogonal Function; EOF) 분석을 통하여 태평양과 한반도 부근 온도의 시·공간 변동과 기후학적인 주요 특성을 밝히고, 자료의 상대적인 정확성을 평가하는데 있다.

2. 자료 및 방법

본 연구에서는 각기 중간 대류권이나 하부 대류권 온도 경향을 제시해주는 세 종류의 위성관측 MSU 채널2(53.74 GHz) 밝기온도와 ECMWF 모델 재분석 자료를 상호 비교를 위하여 사용하였다. MSU는 위성궤도를 가로지르는 주사형 복사계로써 직하점을 중심으로 양쪽에 각각 5개씩 총 11개의 주사각에서 밝기온도를 측정한다. Prabhakara *et al.*(1998) 연구에서 사용된 것과 유사한 직하점 자료(MSU2), Spencer and Christy(1992a)가 전체 주사자료를 사용하여 유도한 밝기온도(SC2), 그리고 각 주사자료의 가중함수가 서로 다른 특성을 이용하여 성층권 효과를 제거한 하부 대류권 밝기온도(SC2R)를 분석에 사용하였다. SC2R 가중함수의 최대값은 700hPa 고도의 상대적으로 얇은 층에서 나타나는 반면에 MSU2와 SC2의 경우는 500hPa 고도의 두꺼운 층에서 나타난다. 따라서 SC2R은 표면 방출과 강수에 보다 민감하다. 이 세 종류의 MSU 채널2 밝기온도 자료는 태평양과 한반도를 포함한 지역들에서 3° 경도×2° 위도 격자값으로 정리되어 분석에 사용되었다.

ECMWF 재분석 자료는 2.5°×2.5° 초기 격자 상태에서 3° 경도×2° 위도로 전환되었으며 17층의 기압면에서의 온도값을 적절하게 가중함으로써 채널2 온도로 재구성되었다. 본 연구에서 사용된 MSU2의 월평균 값들은 1980-98년의 228개월, SC의 경우 1980-97년의 216개월에 대한 것이다. 그리고 ECMWF 재분석의 경우 1980-93년의 168개월의 자료를 이용하였다. 이러한 네 종류 온도 자료의 월평균과 아노말리 값의 시계열에 대하여 각각 경험직교함수 분석을 실시하였다.

3. 상관 및 EOF 분석

위성에서 관측된 세 종류의 MSU 채널2 자료들과 ECMWF 재분석 결과간의 상관은 중·고위도에서 높았으나($r \geq 0.9$), 저위도 그리고 대류가 활발한 열대 서태평양 및 콩고강 부근에서 낮았다($r \sim 0.65$; Figs. 1a-c). 특히 SC2R에 대한 다른 자료의 상관이 상대적으로 낮았다(Figs. 1c, 1e, and 1f). 이는 하부 대류권의 열적 상태를 반영하는 SC2R이 수적 및 지표 방출의 영향으로 잡음을 크게 내포하기 때문인 것으로 추정되었다. 그러나 대기의 동·서 순환(Walker Circulation) 때문에 강한 역학적인 침강이 생기는 열대 동태평양 부근은 건조하므로(유정문, 1994), 상관이 비교적 높게 나타난다. 또한 모델 결과와의 상관이 있어서 SC2는 MSU2보다 높다. 이는 MSU2 직하점 자료에는 본질적으로 강수 효과가 남아 있으나(Prabhakara *et al.*, 1995, 1996), SC 자료에서는 일부 제거되었기 때문이다(Spencer *et al.*, 1996).

세 종류의 MSU 채널2 밝기온도와 ECMWF 재분석 결과의 월평균(Figs. 2, 3)과 아노말리 값(Figs. 4, 5)에 대한 경험직교함수의 공간분포와 그에 해당하는 시계열은 대체로 일치하는 것으로 나타났다. 태평양에 대한 월평균 채널2 밝기온도의 첫 번째 모드에서 전체의 49.7%를 설명하는 MSU2는 서태평양에서 10N, 그리고 동태평양에서 10S 경계선을 중심으로 온도 변동 경향이 남·북으로 음의 상관을 보인다(Fig. 2). 이러한 대비는 태양 및 열대 수렴대의 계절별 남북 이동과 관련있는 듯 보인다. 북반구 중간 대류권의 밝기온도는 8월에 최대, 2월에 최소의 연주기를 보인다. 다시 말해, MSU2는 열대 서태평양에서 남반구, 그리고 열대 동태평양에서 북반구 변동 형태를 보인다. SC2는 10S, 그리고 SC2R과 ECMWF는 10N을 중심으로 남·북의 온도 변동이 서로 반대 경향임을 보이며, MSU2와 마찬가지로 시계열에서는 연주기를 나타낸다. MSU2는 열대 동·서 태평양에서 Walker 순환에 의한 동·서 대비를 보이는 반면, 다른 세 종류의 자료에서는 이러한 순환이 뚜렷하지 않았다.

태평양에 대한 월평균 값의 두 번째 모드는 남북 순환(Hadley Circulation)의 하강 지역인 남·북 아열대에서 중간 및 하부 대류권의 온도 변동이 큼을 보여준다(Fig. 3). 1982-83년, 1986-87년, 1991-92년, 1997-98년의 엘니뇨 기간에 열대 태평양 중간 및 하부 대류권 온도는 현저하게 상승하였다. 중간 대류권 관측 온도(MSU2, SC2)가 하부 대류권(SC2R)에 비하여 1983년과 1991-92년 엘니뇨 기간에 열대 동태평양에서 더 크게 상승하였다(Figs. 3a-c). 이는 엘니뇨 효과와 더불어 성층권의 열적 상태를 일부 포함하고 있는 채널2 온도(MSU2, SC2)에 엘치촌(1982년 4월)과 피나투보(1991년 6월) 화산 폭발에 의한 승온이 반영되었기 때문으로 추정된다.

열대 태평양에 대한 채널2 온도 아노말리 값의 분석에서 두 번째 모드는 네 종류 자료 모두는 주성분의 시계열에 엘니뇨 기간동안 온도가 크게 상승하는 경년변동을 보여준다(Fig. 4). 이들 자료의 공간 분포는 열대 중앙 태평양에서 적도를 중심으로 남북 대칭인 아령모양의 엘니뇨 형태를 나타낸다(see also Yulaeva and Wallace, 1994). 그러나 위성 관측들과 모델 사이의 주목할만한 불일치는 160E-160W의 적도 용승지역에서 나타난다. MSU 결과들은 160-170E 적도에서 큰 온도 변동을 보이는데 반하여 ECMWF에서는 뚜렷하지 않다. 따라서 관측을 보다 적절하게 시뮬레이션하기 위하여 ECMWF 모델은 적도 서태평양 용승 지역에서 대기-해양 상호작용을 보완해야 할 것으로 추정된다.

한반도를 포함하는 서태평양 및 인도양 지역에 대한 두 번째 모드는 열대 중앙 태평양 지역에서 적도를 중심으로 남·북 대칭인 엘니뇨 모드의 공간 형태를 보인다(Fig. 5). 열대 태평양의 대칭 지역에서 시계열은 엘니뇨 시기에 뚜렷한 상승을 반영한다. 엘니뇨의 원격 효과를 고려할 때 열대 중앙 태평양과 한반도를 포함한 중위도 북태평양 사이의 대류권 온도는 대체로 음의 상관을 보인다.

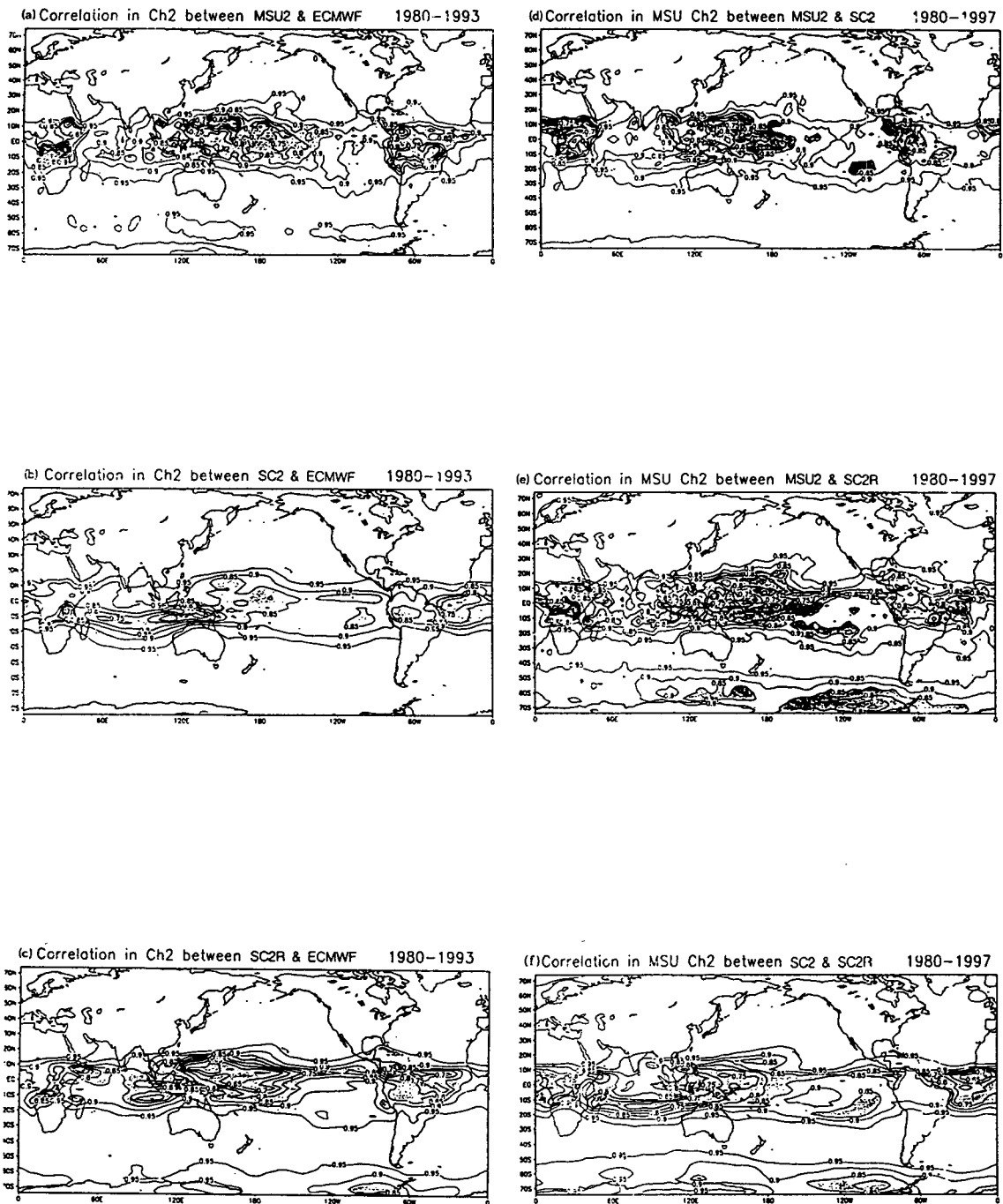


Fig. 1. Temporal correlation between monthly MSU Ch2 and ECMWF reanalyses temperature over 168 months from 1980 to 1993 for (a) MSU2 vs ECMWF, (b) SC2 vs ECMWF, (c) SC2R vs ECMWF, and over 216 months from 1980 to 1997 for (d) MSU2 vs SC2, (e) MSU2 vs SC2R, and (f) SC2 vs SC2R.

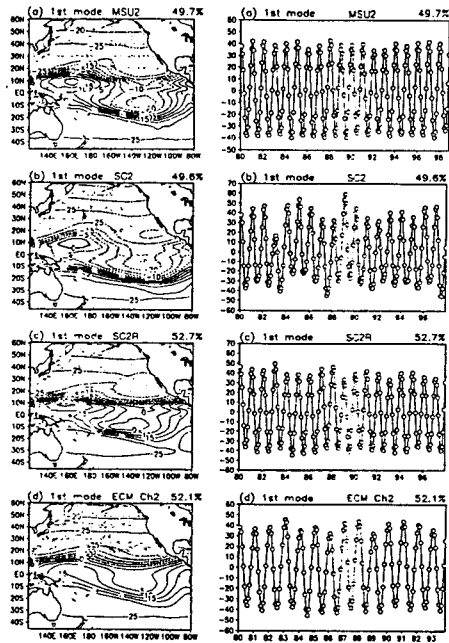


Fig. 2. The first mode of EOFs of the covariance matrix in left panel and corresponding principal component time series in right panel of monthly mean Ch2 temperature in the Pacific Ocean of (121.5E-79.5W, 45.5S-60.5N) of (a) MSU2, (b) SC2, (c) SC2R, and (d) ECMWF. The time series in the right side represent the projections of the temperature patterns at each time on the EOF patterns shown in the left side.

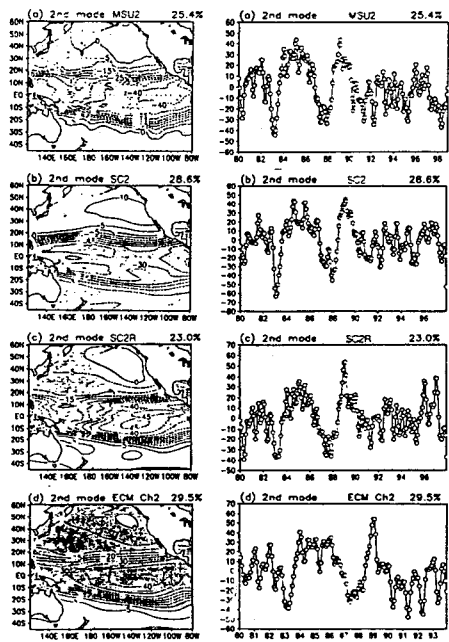


Fig. 3. Same as in Fig. 2. except for the second mode.

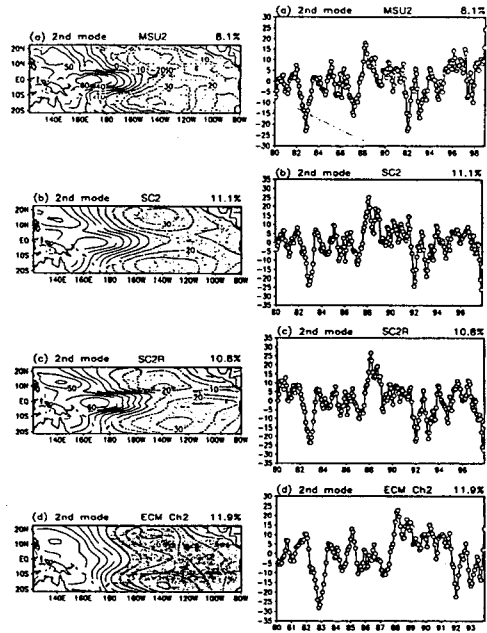


Fig. 4. Same as in Fig. 3. except for the monthly anomaly Ch2 temperature in the Pacific Ocean of (121.5E-79.5W, 21.5S-22.5N).

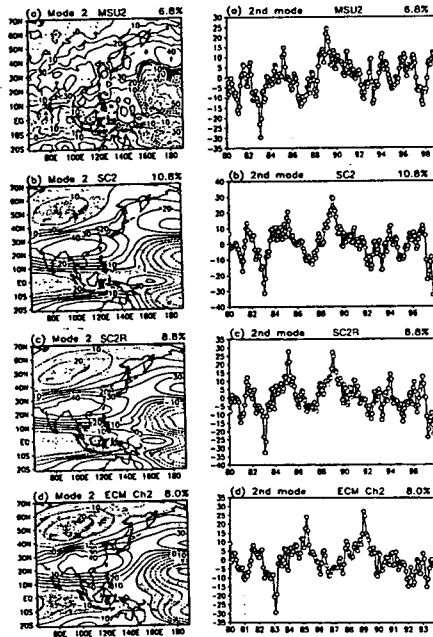


Fig. 5. Same as in Fig. 4. except for in the tropical western Pacific Ocean and the Indian Ocean of (61.5E-169.5W, 21.5S-70.5N).

4. 참고문헌

- 유정문, 1994, 적외선 위성자료에서 유도된 층운분포, 한국 기상학회지, 30(3), 444-455.
- Prabhakara, C., J. J. Nucciarone, and J.-M. Yoo, 1995, Examination of 'Global atmospheric temperature monitoring with satellite microwave measurements.' Part 1: Theoretical considerations, *Climate Change*, 30, 349-366.
- Prabhakara, C., J.-M. Yoo, S. P. Maloney, J. J. Nucciarone, A. Arking, M. Cadetdu, and G. Dalu, 1996, Examination of 'Global atmospheric temperature monitoring with satellite microwave measurements.' Part 2: Analysis of satellite data, *Climate Change*, 33, 459-476.
- Prabhakara, C., R. Iacovazzi, J.-M. Yoo, and G. Dalu, 1998, Global warming deduced from MSU, *Geophys. Res. Lett.*, 25, 1927-1930.
- 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, 1992a, 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, 1992b, Precision and radiosonde validation of satellite gridpoint temperature anomalies, Part II: A tropospheric retrieval and trends during 1979-1990, *J. Climate*, 5, 858-866.
- Spencer, R. W., J. R. Christy, and N. C. Grody, 1996, Analysis of 'Examination of "Global atmospheric temperature monitoring with satellite microwave measurements"', *Climate Change*, 33, 477-489.