

71.
1-2
6
=2

이학석사 학위논문

대류권과 하부 성층권 평균 온도의 장기 변동

지도교수 정 형 빈

이 논문을 이학석사 학위논문으로 제출함



2003年 2月

부경대학교대학원

환경대기과학과

이 명 주

이명주의 이학석사 학위논문을 인준함

2002년 12월 26일

주 심 이학박사 변 희 룡

위 원 이학박사 정 형 빈

위 원 이학박사 오 재 호



목 차

List of Tables	ii
List of Figures	iv
Abstract	1
1. 서론	3
2. 자료 및 분석방법	5
2.1 자료	5
2.2 분석 방법	6
3. 분석결과	10
3.1 대류권	10
3.2 하부 성층권	19
3.3 대륙 및 해양지역	25
3.4 SOI와 월평균 분석결과와의 지연상관	34
3.5 대류권 상하층간의 상관관계	38
3.6 1980년 전후 trend의 비교분석	44
4. 고찰 및 결론	49
5. 참고문헌	51
감사의 글	54

List of Tables

Table 1. Linear trend of thickness (gpm/40yrs) and mean-temperature (degree/40yrs) of the total troposphere, the upper and the lower troposphere over the whole globe, the northern hemisphere, the southern hemisphere, the northern hemisphere extratropics, the tropics and the southern hemisphere extratropics.	13
Table 2. As in Table 1. bur for the seasonal mean-temperature. Unit is degree/40yrs.	16
Table 3. As in Table 1. but for the lower stratosphere.	21
Table 4. As in Table 3. but for the seasonal mean-temperature. Unit is degree/40yrs.	22
Table 5. As in Table 1. but for the Eurasia continent, the North Pacific and the South Pacific.	26
Table 6. As in Table 5. but for the seasonal mean-temperature. Unit is degree/40yrs.	32
Table 7. Maximum lag-correlation between the monthly-mean temperature and SOL. Temperature anomaly lags the SOL.	37
Table 8. Maximum lag-correlation between the upper level and the lower level. Filtering by from 10-day to 1-year period and from 20-day to 1-year period. Lag is 1/2 day.	42
Table 9. Comparison of RMS in linear trend with mean(Ⓐ,Ⓑ) for the total troposphere, the upper and the lower troposphere over the whole globe, the two hemisphere, the northern hemisphere extratropics,	

the tropics and the southern hemisphere extratropics.	46
--	----

List of Figures

Fig. 1. Axisymmetric (Zonal averaged) analysis domain.	8
Fig. 2. Local analysis domains. Euraisa continent (Ⓐ: 10~140° E, 30~70° N + 10~120° E, 20~30° N), North Pacific (Ⓑ: 140° E~132° W, 30~52° N + 120° E~110° W, 20~30° N), South Pacific (Ⓒ: 160° E~80° W, 20~52° S) and Equator Pacific Ocean (Ⓓ: 160° E~80° W, 20° N~20° S). Vertical layers are the total troposphere (200~1000hPa), the upper (200~500hPa), the lower (500~1000hPa) and the lower stratosphere (20~1000hPa).	9
Fig. 3. The monthly variation of thickness (left) and mean- temperature (right) of the total troposphere (200~1000hPa) over the northern hemisphere, the southern hemisphere and the whole globe during 1960-1999.	12
Fig. 4. Linear trend in the interannual variation of mean-temperature anomalies of the total troposphere, the upper and the lower troposphere over the whole globe, the northern hemisphere, the southern hemisphere, the northern hemisphere extratropics, the tropics and the southern hemisphere extratropics during 1960-1999.	14
Fig. 5. As in Fig. 4 but for temperature anomalies of the seasonal (summer) variation.	17
Fig. 6. As in Fig. 5 but for winter season.	18
Fig. 7. As in Fig. 4. but for temperature anomalies of the lower	

stratosphere.	20
Fig 8. As in Fig 7. but for temperature anomalies of the seasonal variation.	23
Fig 9. Linear trend in the interannual variation of temperature anomalies of the total troposphere (200~1000hPa), the upper- (200~500hPa) and the lower troposphere (500~1000hPa) over the Eurasia continent, the North Pacific and the South Pacific during 1960-1999.	27
Fig. 10. As in Fig. 9 but for temperature anomalies of seasonal (summer) variation.	29
Fig. 11. Same as in Fig. 10 but for winter season.	30
Fig. 12. Linear trend in the seasonal variation of temperature anomalies of the lower stratosphere over the Eurasia continent, the North Pacific and the South Pacific during 1960-1999.	33
Fig. 13. Time variation of Southern Oscillation Index (SOI) since 1960s. Positive and negative anomalies represent El Nino and La Nina, respectively. Data from the internet(http://www.cru.uea.ac.uk/).	34
Fig. 14. Distribution of the maximum and the minimum thickness at the upper troposphere, at the lower troposphere over the northern hemisphere extratropics and at the southern hemisphere extratropics. Unit is gpm[m].	40
Fig. 15. As in fig. 14. but for Distribution of the maximum and the minimum thickness with period from 20-day to 1-year. Unit is gpm[m].	43
Fig. 16. Comparison of trend in 60~70's with 80~90's for the total troposphere, the upper and the lower troposphere over the whole	

globe, the two hemisphere, the northern hemisphere extratropics, the tropics and the southern hemisphere extratropics.	45
Fig. 17. As in Fig. 16. but for the Eurasia continent, the North Pacific and the South Pacific.	47

Long term variation of mean temperature of troposphere and lower stratosphere

Myoung Joo LEE

Department of Environmental Atmospheric Sciences,
Graduate school
Pukyong National University

Abstract

In this study, the global warming was described in terms of the variation of the layer-mean temperature which is calculated by hydrostatic equation. The warming trends of troposphere mean-temperature detected in this study is, in general, in agreement with the previous results for single level or surface.

It is found that the global mean-temperature increased about 0.74K for 40 years in the troposphere. The tendency of increasing mean-temperature was larger in the Southern hemisphere (1.1K/40yrs)

than in the Northern hemisphere (0.4K/40yrs). The warming trend was much greater at the lower troposphere in the Northern hemisphere rather than at the upper troposphere, but at the upper troposphere in the case of Southern hemisphere.

The mean temperatures at the lower stratosphere decreased about 0.6K for the past 40years.

The increase of mean temperature is larger over the Pacific ocean than over the continent. The warming trend over the South Pacific is larger than over the North Pacific Ocean. It is found that temperature anomaly was higher in the winter season than in the summer, which result in the increase of the yearly-average temperature.

The Maximum lag-correlation between the monthly-mean temperature and SOI (Southern Oscillation Index) was 0.67 in the Equator Pacific Ocean. The linear trends of the 60~70's showed different result from the 80's~90's and linear trends in the troposphere during 80~90's are very small in the Southern hemisphere.

1. 서론

지구의 온도 상승과 그에 따른 기후 변화에 대해서 연구하기 위해서, 많은 기후 연구 단체들이 조직되었으며, 많은 연구가 이루어지고 있다.

전구 지표면, 대류권, 성층권의 온도에 관한 많은 분석은 이루어져 왔다 (Fomby et al., 2002; Gordon., 1991; IPCC Report 2001; Jones P. D., 1994; Karl et al., 1994; Lau et al., 1999; Christy et al., 2000; Gaffen et al., 2000; Volodin and Galin 1999). 2001 IPCC 보고서에 따르면, 전구 지표온도는 $0.6 \pm 0.2^{\circ}\text{C}/100\text{년}$ 상승하였으며, 성층권에서 고도에 따라 증가하는 온도의 경향은 15km에서 $-0.5\text{K}/10\text{년}$, 20~35km에서는 $-0.8\text{K}/10\text{년}$, 그리고 50km에서 $-2.5\text{K}/10\text{년}$ 으로 나타났으며(IPCC Report 2001), 지표면 온도의 전구 온난화 정도는 $0.5^{\circ}\text{C}/100\text{yr}$ 정도 상승하였다(Gordon, 1991). Radiosonde 관측에 의한 자료 분석에서 대류권 온도 상승 경향은 $0.10\text{K}/10\text{년}$ 정도인 것으로 보고되었다(Angell, 1999, 2000; Brown et al., 2000). Brown et al.(2000)은 1958~1980년 기간 동안에 하부 대류권 기온 감률과 1980년 이후에 증가하는 하부 대류권 감률에 대해서 연구하였다. 이것은 1946~1975년 기간 동안에 북반구에서 온도 감소 패턴을 보이고, 1976년 이후 전지구적으로 다시 증가하는 추세를 가지는 IPCC 3차 보고서와 같은 연구 결과를 보이고 있다. 그리고 남반구의 온난화가 크게 일어나고 있으며, 남반구 해양 온도가 1950년에서 1980년까지 0.17°C 상승하였으며(Gill, 2002), 남극의 얼음층이 빠르게 용해되고 있다(Rignot & Jacobs, 2002)는 연구결과가 있었다.

지금까지의 지구온난화는 지표면 온도나, 해수면 온도, 단일한 고도면

의 온도, 고도면 사이의 온도를 평균하여 것으로 분석되었다.

본 연구에서는 대류권과 하부 성층권의 층후를 사용하여 지구 온난화를 규명하고자 한다. 분석 방법은 고도와 고도 사이의 온도를 평균하는 방법이 아니라, 고도와 고도 사이의 층후, 즉 유체의 전체 온도를 대표할 수 있는 평균 온도 값을 만들어 현재 진행되고 있는 대류권과 하부 성층권의 온난화 정도를 제시하고자 한다.

2. 자료 및 분석방법

2.1 자료

본 연구의 분석을 위해서 National Centers for Environmental Prediction - National Center for Atmospheric Research (NCEP/NCAR)에서 제공하는 재분석 자료를 사용하였다. 그 자료의 분해능은 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 격자로 되어있으며, 시간 분해능은 12시간 간격 (0000UTC and 1200UTC)으로 구성되어 있다. 분석 기간은 1960년~1999년까지의 40년간이다. 분석 영역은 전지구와 북반구 ($90^{\circ}N \sim EQ$), 남반구 ($EQ \sim 90^{\circ}S$), 그리고, 열대를 제외한 북반구 ($90 \sim 20^{\circ}N$), 열대 ($20^{\circ}N \sim 20^{\circ}S$), 열대를 제외한 남반구 ($20 \sim 90^{\circ}S$)로 3부분으로 나누었으며 (Fig. 1.), 추가적으로 유라시아 대륙 ($10 \sim 140^{\circ}E : 70 \sim 30^{\circ}N + 10 \sim 120^{\circ}E : 30 \sim 20^{\circ}N$)과 북태평양 ($120^{\circ}E \sim 110^{\circ}W : 30 \sim 20^{\circ}N + 140^{\circ}E \sim 132^{\circ}W : 52 \sim 30^{\circ}N$), 남태평양 해양 ($160^{\circ}E \sim 80^{\circ}W : 52 \sim 20^{\circ}S$), 적도 태평양 해양 ($160^{\circ}E \sim 80^{\circ}W, 20^{\circ}N \sim 20^{\circ}S$)에 대하여 분석을 실시하였다(Fig. 2). 그리고 각각의 분석 영역에 대한, 연직 분석 영역은 1000, 500, 200, 20hPa의 고도장으로 구분하여, 1000~200hPa, 500~200hPa, 1000~500hPa, 200~20hPa의 층후를 전체 대류권, 상부 대류권, 하부 대류권, 하부 성층권으로 나누어 대류권과 하부 성층권에 대한 warming trend를 분석하였다. 분석 자료의 시간 평균을 일 평균, 월 평균, 년 평균으로 분석하였다.

2.2 분석 방법

본 연구에서는 층후와 기온의 관계식을 이용하여, 층후로부터 두 고도면 사이의 평균 기온을 계산하는 방법을 사용하였다. 층후로부터의 온도추정은 정역학적 근사에 의해서 그 층후의 평균온도로 환산할 수 있다.

온도의 수평적 평균은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}\overline{T} &= \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \int_{\theta_1}^{\theta_2} T d\lambda \cdot \cos \theta d\theta \\ &= [\sum_i \sum_j T_{ij} w_{ij}] [\sum_i \sum_j w_{ij}]^{-1}\end{aligned}\quad (1)$$

여기서 w_{ij} 는 구면의 격자점 자료를 사용할 때의 weighting function이며, 다음과 같이 주어지고

$$\begin{aligned}w_{ij} &= (\pi/J) \int_{\theta_1}^{\theta_2} \cos \theta d\theta = (\pi/J) \sin \theta \Big|_{\theta_1}^{\theta_2} \\ \theta_1 &= (\pi/J)(j-0.5) \\ \theta_2 &= (\pi/J)(j+0.5),\end{aligned}\quad (2)$$

J 는 남북의 총격자수를 나타내며, $j=1,2,3,\dots,J$ 이다.

그리고 p_1 과 p_2 기압면 사이의 연직 평균은 정역학적 가정에 의해서 이루어지고, 방정식은 다음과 같다.

$$Z_T = H \ln \left(\frac{p_1}{p_2} \right), \quad (3)$$

여기서 $H = \frac{R \langle T \rangle}{g_0}$, R 은 기체상수, $\langle T \rangle$ 는 평균온도이다. p_1 는 하층고도, p_2 는 상층고도를 나타낸다.

위 방정식에서 평균온도는

$$\langle T \rangle = \frac{g_0}{R} \cdot \frac{Z_T}{\ln(p_1/p_2)} \quad (4)$$

위 방정식에서 구하여진 각각의 층후에서 1gpm당 온도는

20 - 200 hPa	: 0.0148K
200 - 1000 hPa	: 0.0212K
200 - 500 hPa	: 0.0373K
500 - 1000 hPa	: 0.0493K

로 주어진다.

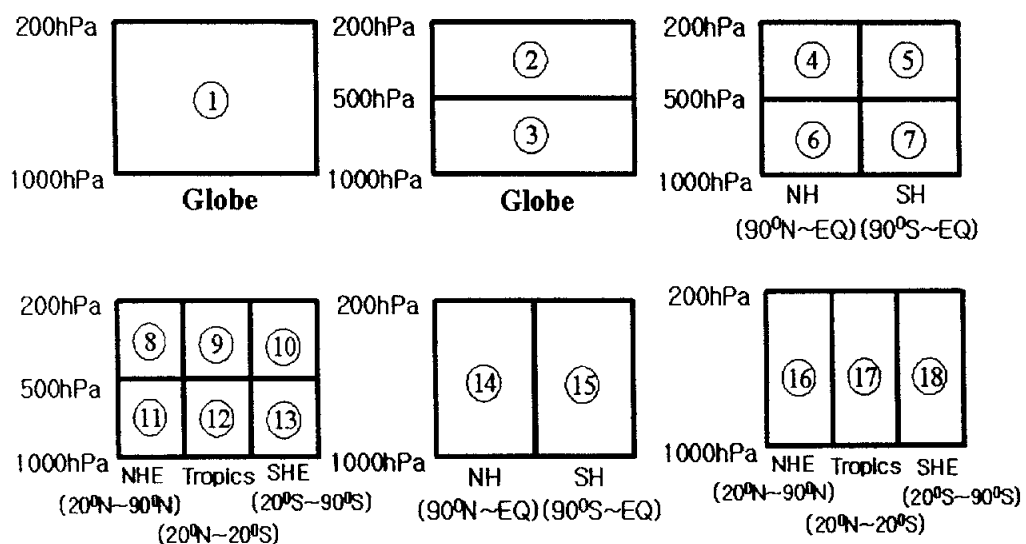


Fig. 1. Axisymmetric (Zonal averaged) analysis domain.

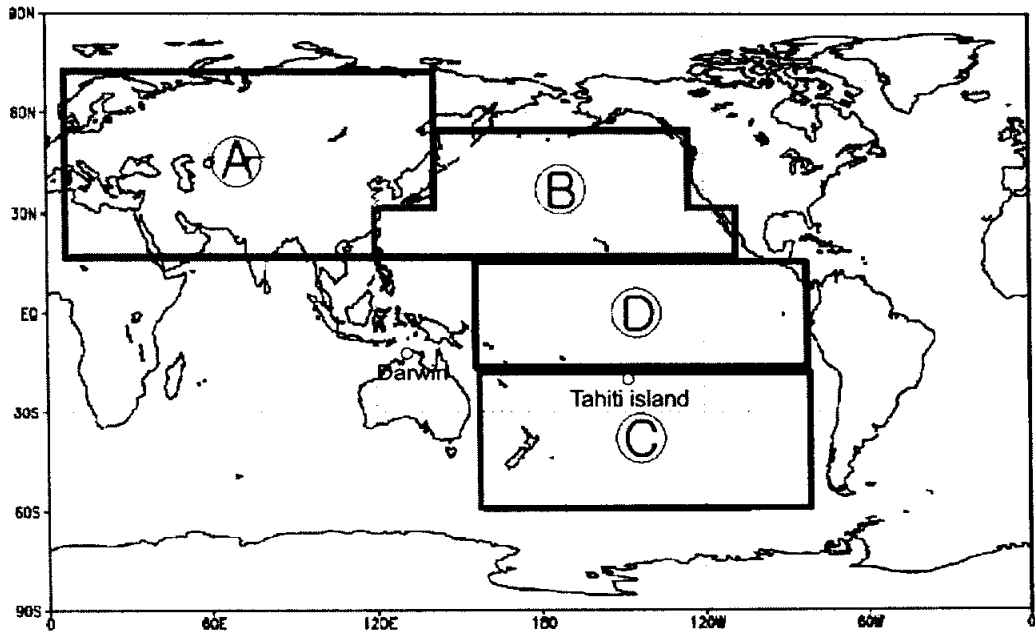


Fig. 2. Local analysis domains. Euraisa continent (A: 10~140° E, 30~70° N + 10~120° E, 20~30° N), North Pacific (B: 140° E~132° W, 30~52° N + 120° E~110° W, 20~30° N), South Pacific (C: 160° E~80° W, 20~52° S) and Equator Pacific Ocean (D: 160° E~80° W, 20° N~20° S). Vertical layers are the total troposphere (200~1000hPa), the upper (200~500hPa), the lower (500~1000hPa) and the lower stratosphere (20~1000hPa).

3. 분석결과

3.1 대류권

대류권의 층후에서 구한 평균 온도에서의 온난화 경향은 시간 평균에 따라 약간의 차이는 있으나, 모든 분석영역에서 지난 40년 동안에 온난화가 일어나는 것을 확인 할 수 있었다.

Fig. 3은 40년 동안의 대류권 전체의 층후와 평균 온도를 일 변동으로 나타낸 것이며, 분석 영역은 전지구 영역, 북반구와 남반구로 구성되어 있다. 연 변동은 북반구가 남반구보다 많은 것으로 나타났고, 여름철에 나타나는 각각의 반구에서의 층후는 북반구가 남반구보다 더 높은 것으로 나타났으나, 겨울철에는 남반구와 북반구의 층후의 높이가 비슷한 것으로 나타났다. 결과적으로 계절적 변동은 육지가 상대적으로 많은 북반구에서 높은 것으로 나타났다.

대류권의 평균 온도에서 분석한 온난화 경향은 회귀직선으로 구하였다. 대류권의 평균 온도 증가치는 일 평균 (12시간 간격)에서 40년 동안에 0.33K에서 1.64K정도 증가한 것으로 나타났으며, 이 온도의 증가치는 층후의 8.9gpm과 43.9gpm에 해당한다. 년 평균의 분석 결과는 0.34K에서 1.75K로 나타났다. 그리고 40년 동안에 1.0K이상 증가한 곳은 대부분 남반구이며, 상당한 온난화가 진행되는 것을 알 수 있다. 특히 열대를 제외한 남반구의 상층에서 1.75K/40yr 증가한 것을 확인 할 수 있었다.

대류권 전체에서 전지구적으로 약 0.74K/40yr 정도 증가하였으며, 대류권 하층보다는 대류권 상층에서 약 0.11K/40yr 정도 온도가 더 상승한 것으로 나타났다. 대류권에서 가장 많은 온도 증가가 일어나는 곳은 Table 1에 나타난 것처럼 열대를 제외한 남반구의 대류권 상층이고, 가장 적게 온도 증가가 보이

는 곳은 40년 동안에 0.3K 정도 증가한 북반구의 대류권 상층으로 나타났다. 열대를 제외한 북반구와 열대에서 대류권 하층이 상층보다 40년 동안에 온도 증가치가 약 1.8배정도 많은 것으로 나타났고, 남반구에서는 대류권 상층이 하층보다 약 1.8배정도 많은 것으로 나타났다.

Fig. 4.에서 나타나는 것처럼 북반구보다는 남반구에서 온도가 현저하게 증가하였다. 1950년 이후 남반구에서 온난화가 진행된 것을 확인할 수 있었다 (Gille, 2000; Rignot & Jacobs, 2002). 열대지역도 북반구보다 온도증가가 많은 것으로 나타났으며, 북반구와 마찬가지로 대류권 하층보다는 대류권 상층에서 온도증가경향이 크게 나타났다. 연변동은 열대지역의 대류권 상층에서 다른 지역보다 크게 나타났다. 전지구적으로는 대류권 상층에서 연변동 (yearly oscillation)이 큰 것으로 나타났다. 북반구에서 대류권 하층이 대류권 상층보다 온도 증가가 많은 것은 대륙의 영향으로 보인다.

Fig. 4.에서의 linear trend를 잘 살펴보면, 1980년을 기준으로 약간 다르게 나타나는 것을 볼 수 있는 데, 이것은 나중에 다시 언급하도록 하겠다.

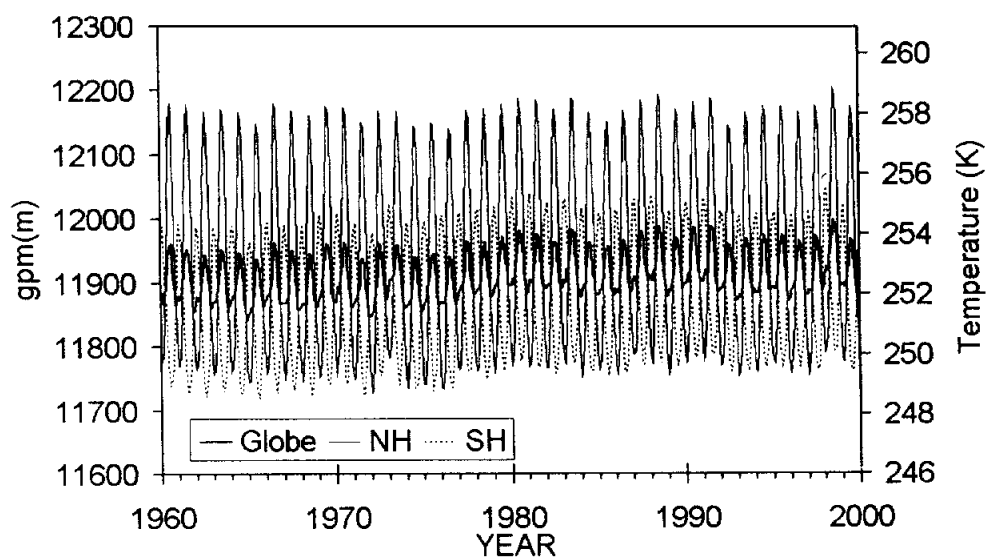


Fig. 3. The monthly variation of thickness (left) and mean-temperature (right) of the total troposphere (200~1000hPa) over the northern hemisphere, the southern hemisphere and the whole globe during 1960-1999.

Table 1. Linear trend of thickness (gpm/40yrs) and mean-temperature (degree/40yrs) of the total troposphere, the upper and the lower troposphere over the whole globe, the northern hemisphere, the southern hemisphere, the northern hemisphere extratropics, the tropics and the southern hemisphere extratropics.

	thickness [gpm/40yrs]	mean-temperature [K/40yrs]
Globe_Total	35.27	0.7488
Globe_Upper	21.34	0.7958
Globe_Lower	13.93	0.6865
NH_Upper	7.975	0.2974
SH_Upper	34.71	1.294
NH_Lower	10.48	0.5167
SH_Lower	17.37	0.8563
NHE_Upper	7.336	0.2735
Tropics_Upper	9.166	0.3418
SHE_Upper	46.89	1.748
NHE_Lower	9.915	0.4887
Tropics_Lower	12.66	0.6243
SHE_Lower	19.14	0.9433
NH_Total	18.46	0.3918
SH_Total	52.08	1.106
NHE_Total	17.25	0.3662
Tropics_Total	21.83	0.4635
SHE_Total	66.02	1.402

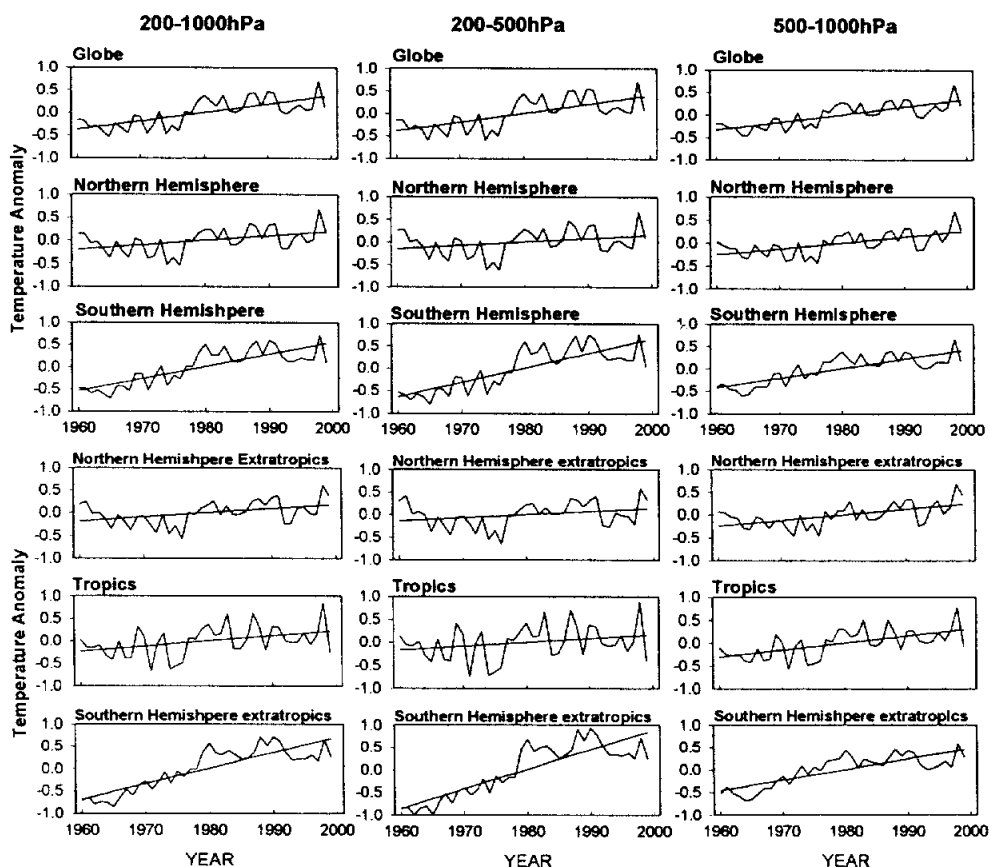


Fig. 4. Linear trend in the interannual variation of mean-temperature anomalies of the total troposphere, the upper and the lower troposphere over the whole globe, the northern hemisphere, the southern hemisphere, the northern hemisphere extratropics, the tropics and the southern hemisphere extratropics during 1960-1999.

대류권의 계절적 패턴을 위해서 계절별로 구분하여 분석하였다. 계절 구분은 북반구를 기준으로 봄은 3, 4, 5월을, 여름은 6, 7, 8월을, 가을을 9, 10, 11월을, 겨울은 12월과 이듬해 1월, 2월로 구분하여 분석하였다. warm season과 cold season의 대비에서 warm season보다 cold season동안에 북반구에서 온도가 더 상승한 것으로 나타났다(Wallace et al. 1996). 그리고 남반구도 마찬가지로 cold season동안인 6, 7, 8월에 온도 증가가 높은 것으로 나타났다.

Table 2는 대류권의 계절별 평균온도 증가치를 나타낸 것이다. 전지구적으로 대류권 전체에서는 전 계절적으로 약 0.7K/40yrs 정도 증가한 것으로 나타났고, 가장 크게 증가한 곳은 1.868K/40yrs로 여름철에 열대를 제외한 남반구의 대류권 상층에서 나타났으며, 가장 작게 증가한 곳은 0.1351K/40yrs로 열대를 제외한 북반구의 대류권 상층에서 봄철로 나타났다. 전지구적으로 대류권 상층은 가을과 겨울철에 온도 증가가 봄과 여름철보다 크고, 대류권 하층은 봄과 여름철보다 가을과 겨울철에 온도 증가가 크게 나타났다. 북반구와 열대는 대류권 상층에서는 가을과 겨울철에 온도 증가 경향이 크게 나타났고, 대류권 하층에서는 봄과 겨울철에, 남반구는 대류권 상층에선 여름과 가을철에, 대류권 하층에서는 봄과 여름철에 온도 증가가 다른 계절보다 크게 나타났다.

그리고 여름과 겨울철의 비교에서는 북반구의 모든 영역에서 여름철보다 겨울철에 온도 증가가 더 크게 나타났다. 여름철보다 겨울철에 약 1.5배정도 온도 증가가 많은 것을 볼 수 있는데, 이것은 최고점의 온도가 계속 높아지는 것보다 최저점의 온도가 높아지고 있다는 것을 가리키는 것으로, 추운 날들의 평균 온도가 상승하므로써 전체적인 평균 온도 상승을 초래하는 결과라고 할 수 있다. 즉 이것은 북반구 대류권의 평균온도를 높이는 결과를 초래한다(Wallace et al. 1996).

Table 2. As in Table 1. bur for the seasonal mean-temperature.
Unit is degree/40yrs.

	spring	summer	autumn	winter
Globe_Total	0.7024	0.789	0.7699	0.7610
Globe_Upper	0.7012	0.7908	0.8644	0.8606
Globe_Lower	0.7040	0.7865	0.6449	0.6293
NH_Upper	0.1691	0.234	0.3579	0.4791
SH_Upper	1.233	1.348	1.371	1.242
NH_Lower	0.5163	0.5109	0.4974	0.5642
SH_Lower	0.8918	1.062	0.7925	0.6944
NHE_Upper	0.1351	0.2438	0.3456	0.4203
Tropics_Upper	0.2536	0.2314	0.3710	0.5581
SHE_Upper	1.691	1.868	1.851	1.587
NHE_Lower	0.4917	0.4743	0.4600	0.5488
Tropics_Lower	0.6323	0.6329	0.5955	0.6590
SHE_Lower	0.9844	1.244	0.8767	0.6818
NH_Total	0.3186	0.3532	0.4180	0.5157
SH_Total	1.086	1.225	1.122	1.006
NHE_Total	0.2887	0.3431	0.3949	0.4756
Tropics_Total	0.4167	0.4043	0.4677	0.6016
SHE_Total	1.387	1.599	1.431	1.197

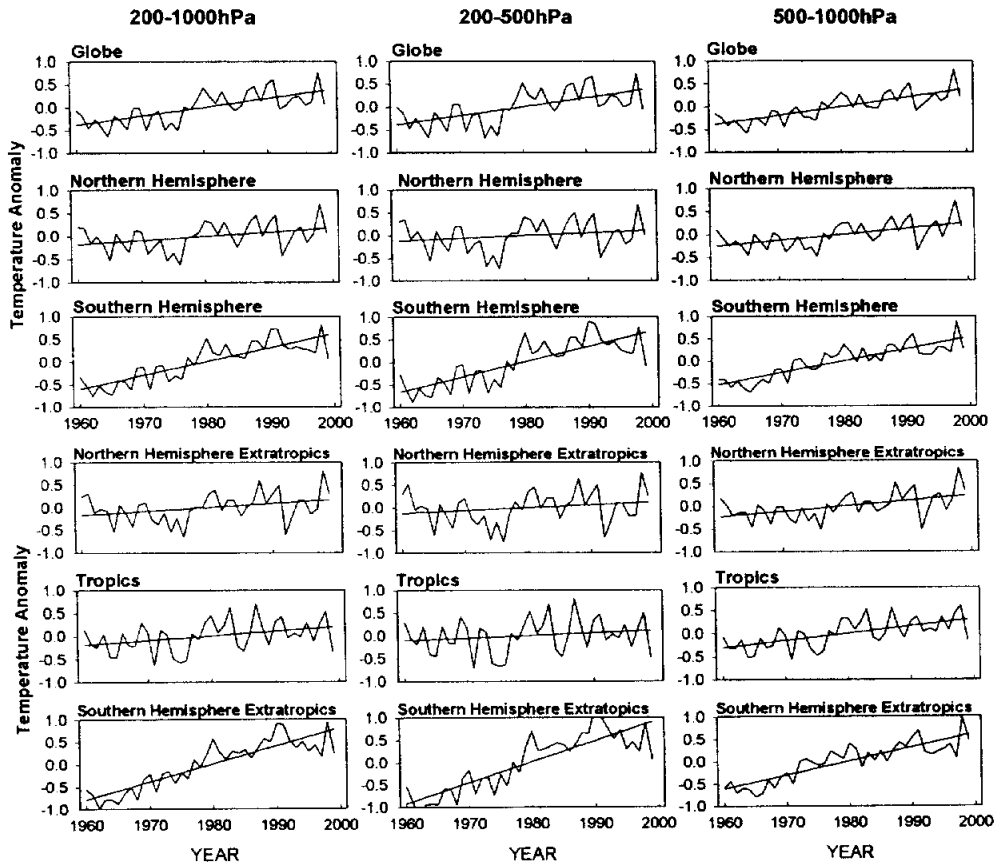


Fig. 5. As in Fig. 4 but for temperature anomalies of the seasonal (summer) variation.

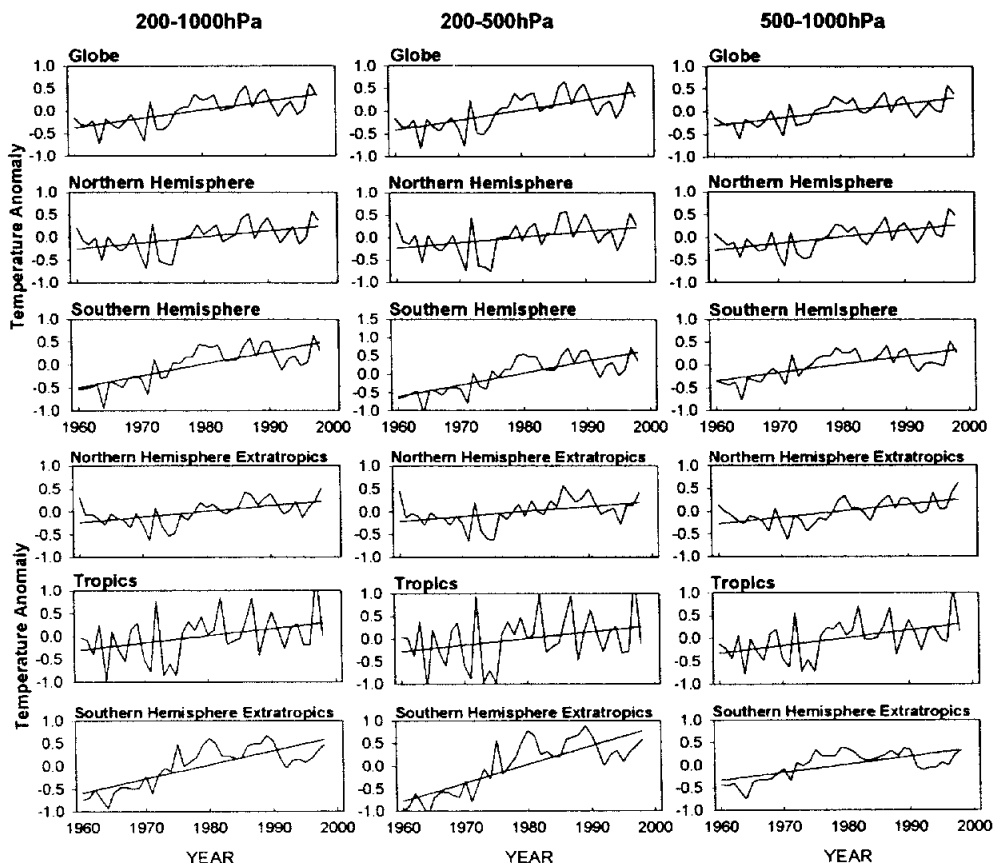


Fig. 6. As in Fig. 5 but for winter season.

남반구의 대류권 상층은 40년간의 온도 상승 정도가 계절 변동에 의해 그다지 영향을 받지 않지만, 대류권 하층의 경우에는 다른 계절보다도 남반구가 겨울일 때, 즉 6, 7, 8월에 온도 증가가 크게 나타났다. Fig. 5는 여름철 (6, 7, 8월) 온난화 경향을 나타낸 것이다. 여름철에는 북반구에서 대류권 상층보다는 대류권 하층에서 온도 증가 경향이 큰 것으로 나타났고, 남반구에서는 대류권 하층보다 대류권 상층에서 온도 증가 경향이 큰 것으로 나타났다. 그리고 열대 지역에서는 대류권 하층에서 온도 상승폭이 큰 것으로 나타났다.

Fig. 6.은 겨울철의 온난화 경향을 나타낸 것으로 열대를 제외한 분석영역에서 연변동이 여름철보다 작은 것으로 나타났다. 겨울철에 전지구적으로 대류권 상층이 하층보다 온도 증가 경향이 큰 것으로 나타났고, 북반구에서는 대류권 하층이 상층보다 조금 크게 상승하였다. 그러나 연변동은 대류권 상층에서 큰 것으로 나타났다. 남반구 역시 마찬가지다. 열대 지방에서는 겨울철에 연변동이 매우 큰 것으로 나타났고, 온도상승도 여름철에 비해 활발하게 나타났으며, 대류권 상층보다 대류권 하층에서 연변동이 작으나, 온난화 경향은 크게 나타났다.

3.2 하부 성층권

하부 성층권 (20~200hPa)의 분석에서는 온도 편차가 감소하는 패턴을 보였다(Lawrimore et al. 2001). 40년 동안 전지구적으로 성층권의 온도는 약 0.6K 정도 감소하였다. 온도 감소는 남반부 ($-0.21\text{K}/40\text{yrs}$)보다는 북반구 ($-0.9\text{K}/40\text{yrs}$)에서의 감소가 크게 나타나고 있다. 그리고 북반구 ($90\sim 20^{\circ}\text{N}$)는 남반구 ($90\sim 20^{\circ}\text{S}$)보다 약 10배나 많은 감소량을 보이고 있다. Table 3에서 나타나는 것처럼 가장 크게 하강한 곳은 열대를 제외한 북반구에서 $-1.11\text{K}/40\text{yrs}$ 로 나타났고, 가장 적게 한 것은 열대를 제외한 남반구에서 $-0.13\text{K}/40\text{yrs}$ 로 나타났다. 1980년 부근과 1990년 부근에서 성층권 온도 편차가 갑자기 상승한 것을 볼 수 있는데, 분석 영역 전체에서 상승한 시기가 같은 것으로 나타났다.

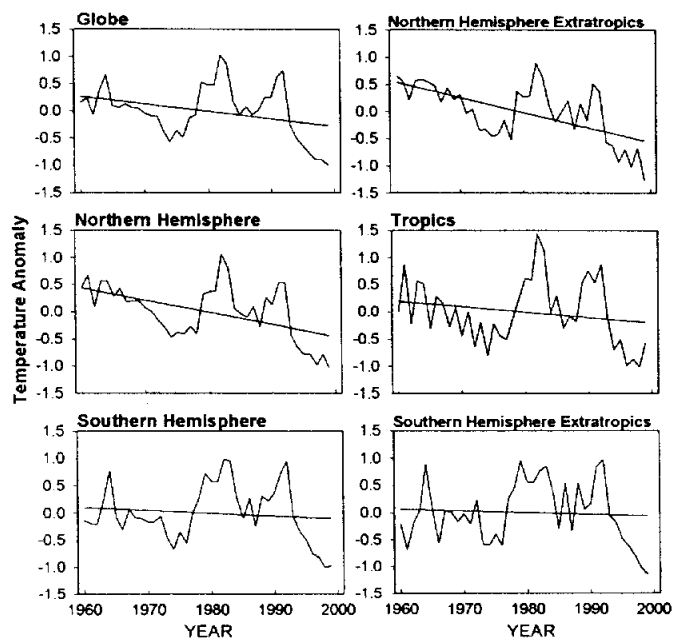


Fig. 7. As in Fig. 4. but for temperature anomalies of the lower stratosphere.

Table 3. As in Table 1. but for the lower stratosphere.

	thickness [gpm/40yrs]	mean-temperature [K/40yrs]
Globe stratosphere	-37.2019	-0.5520
NH stratosphere	-60.4220	-0.8966
SH stratosphere	-13.9824	-0.2075
NHE stratosphere	-74.7692	-1.1095
Tropics stratosphere	-27.7013	-0.4110
SHE stratosphere	-8.6365	-0.1282

Table 4. As in Table 3. but for the seasonal mean-temperature. Unit is degree/40yrs.

	spring	summer	autumn	winter
Globe Stratosphere	-0.6774	-0.7749	-0.4694	-0.2382
NH Stratosphere	-0.7980	-1.1114	-0.9361	-0.6721
SH Stratosphere	-0.5567	-0.4385	-0.0028	0.1957
NHE Stratosphere	-0.9814	-1.1952	-1.1620	-1.0026
Tropics Stratosphere	-0.3824	-0.8830	-0.4152	0.05
SHE Stratosphere	-0.6529	-0.2523	0.1718	0.2532

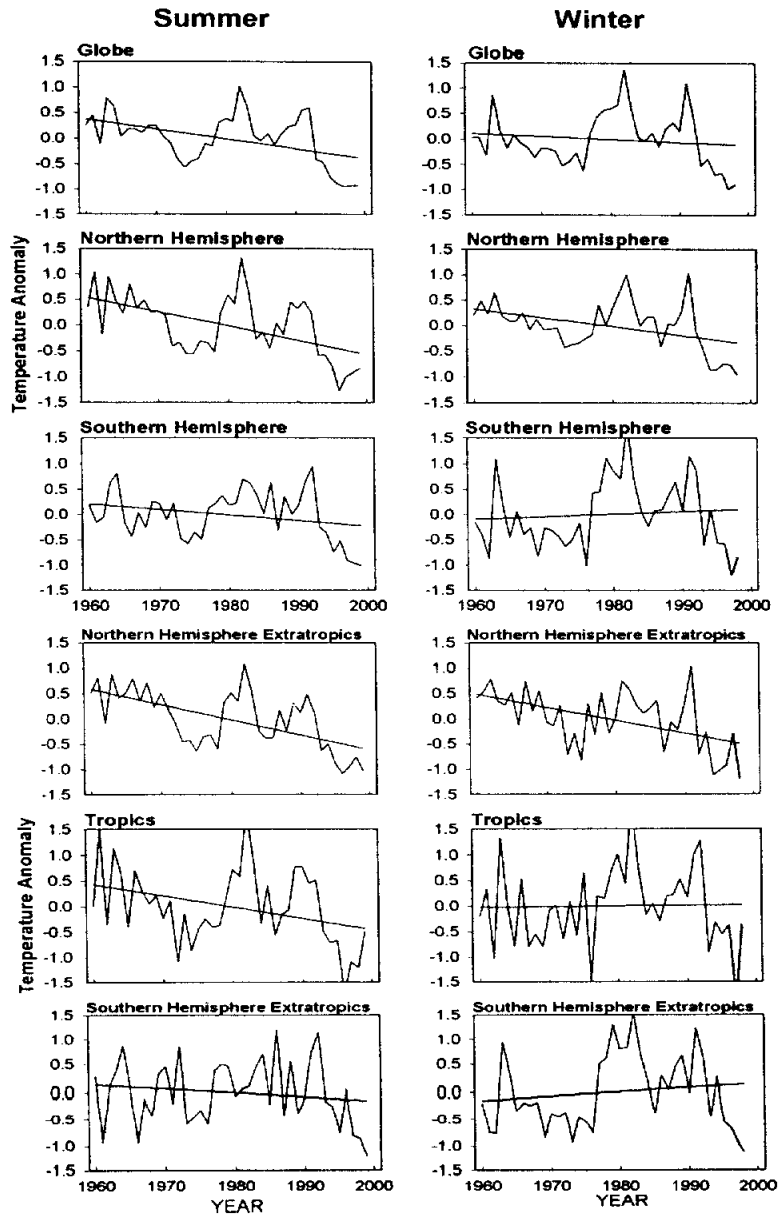


Fig 8. As in Fig 7. but for temperature anomalies of the seasonal variation.

하부 성층권도 마찬가지로 4계절로 구분하여 분석한 결과에서 전반적으로 성층권 온도는 하강하는 것으로 나타났다. Fig. 8.에서는 40년 동안의 하부 성층권의 계절변동에 대한 그림으로 전지구적으로 겨울철이 여름철보다 적게 하강하는 것으로 나타났다. 북반구도 전지구 패턴과 마찬가지로 여름철에 온도 하강이 크게 나타났다. 그러나 남반구의 경우에는 여름철에는 하강하나, 겨울철에는 다시 온도가 상승한 것을 알 수 있다. 겨울철에 남반구 ($90\sim 20^{\circ}\text{S}$)의 성층권 온도는 미약하게나마 증가하였는데, 특히 남반구 ($90\sim 20^{\circ}\text{S}$)에서 $0.1\text{K}/40\text{yrs}$ 이상 증가하였다. 그리고 열대 지역에서는 대류권의 연진동과 마찬가지로 겨울철에 여름철보다 연진동이 큰 것으로 나타났으며, 겨울철에는 약간 온도 증가 패턴을 보이나 여름철에는 하강하는 패턴이 뚜렷하게 나타나는 것을 알 수 있다.

Table 4.에서는 하부 성층권의 계절별 온도 증가치를 나타낸 것인데, 봄과 여름철에 모든 분석영역에서 하강하는 패턴을 보였으며, 여름철에 남반구의 하부 성층권에서 가장 큰 하강 패턴을 보이고 있으며, 겨울철에 전지구 하부 성층권에서 가장 작은 감소 패턴을 보이고 있다. 그리고 가을과 겨울에 남반구에서 작은 온난화 패턴을 볼 수 있는데, 가장 크게 증가한 곳은 겨울철에 열대를 제외한 남반구로 $0.25\text{K}/40\text{yrs}$ 였으며, 가장 적게 증가한 곳은 열대 지역으로 40년 동안에 0.05K 정도 증가한 것으로 나타났다.

3.3 대륙 및 해양지역

유라시아 대륙과 북태평양 해양, 남태평양 해양의 지역적인 영역 분석에서도 온난화 경향이 발견되었다. Fig. 9.에서 나타나는 것처럼 대륙권 전체에서는 유라시아대륙보다 해양에서 온도 증가가 많은 것으로 나타났고, 해양에서는 북태평양 해양보다는 남태평양 해양에서 온도 증가가 큰 것을 알 수 있었다. 유라시아 대륙은 대륙권 전체에서 작은 온난화 경향이 나타나지만, 대륙권 상층에서는 약간 냉각되는 현상을 볼 수 있었다. 그러나 대륙권 하층에서는 0.58K/40yrs 정도 상승한 것으로 나타났고, 대륙권 상층보다는 대륙권 하층에서 온도 상승이 큰 것을 알 수 있었다.

해양의 경우, 북태평양과 남태평양 해양에서는 전반적으로 온난화 경향을 보여주었다. 북태평양 해양은 대륙권 하층보다 대륙권 상층이 더 큰 온도상승을 보여주었고, 북태평양 해양과 남태평양 해양에서는 대륙권 하층보다는 대륙권 상층에서 온도 증가 경향이 큰 것으로 확인되었다.

Table 5.에서는 대륙과 해양의 온도 증가치를 나타내고 있는데, 유라시아 대륙의 대륙권 상층을 제외한 나머지 영역에서 온난화 정도를 나타내고 있다. 유라시아 대륙의 대륙 상층은 40년 동안에 7.5gpm 정도 감소한 것으로 나타났다. 가장 크게 증가한 곳은 남태평양의 대륙권 상층으로 2.1K/40yrs 정도 증가한 것으로 나타났다. 그러나 대륙권의 전체 평균 온도는 북태평양 해양에서 가장 높은 것으로 나타났다. 대륙권 상층과 하층도 마찬가지로 나타났으며, 층후의 평균 온도는 북태평양, 남태평양, 유라시아 대륙순으로 나타났다.

Table 5. As in Table 1. but for the Eurasia continent, the North Pacific and the South Pacific.

	thickness [gpm/40yrs]	mean-temperature [K/40yrs]
Eurasia continent 200~1000hPa	1.511	0.03208
Eurasia continent 200~500hPa	-7.471	-0.2786
Eurasia continent 500~1000hPa	8.982	0.4428
North Pacific 200~1000hPa	27.62	0.5863
North Pacific 200~500hPa	19.21	0.7162
North Pacific 500~1000hPa	8.409	0.4145
South Pacific 200~1000hPa	72.45	1.538
South Pacific 200~500hPa	56.89	2.121
South Pacific 500~1000hPa	15.56	0.7668

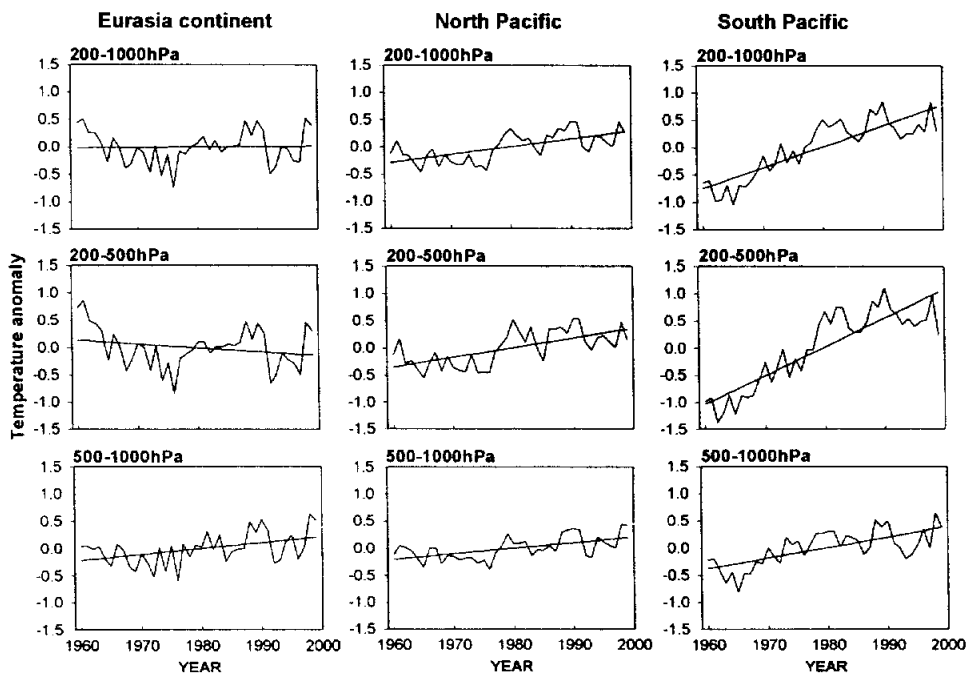


Fig. 9. Linear trend in the interannual variation of temperature anomalies of the total troposphere (200~1000hPa), the upper (200~500hPa) and the lower troposphere (500~1000hPa) over the Eurasia continent, the North Pacific and the South Pacific during 1960-1999.

계절별 분석의 그림인 Fig. 10., Fig. 11.에서는 유라시아 대륙과 북태평양의 경우에는 다른 계절보다 겨울철에 크게 온난화 패턴이 나타난다. 여름철인 6, 7, 8월에는 유라시아 대륙의 대류권 전체와 대류권 상층에서 여름철에 온도 패턴이 감소하는 것을 볼 수 있다. 그러나 대류권 하층에서는 온도 상승 경향을 확인하였다. Fig. 10.에서의 여름철 북태평양 지역에서는 대류권 전반적으로 온도 상승 경향이 비슷한 것으로 나타났지만, 연 진동은 대류권 하층보다 대류권 상층에서 많은 것을 확인 할 수 있었다. 남태평양 해양에서는 대류권 상층에서 다른 지역보다 큰 온도 상승을 볼 수 있다. 남태평양 해양의 대류권 상층이 대류권 하층보다 3배정도 높은 온도 증가를 보여주고 있는 것을 확인하였다. 그리고 Fig. 7.과 Fig. 8.에서 볼 수 있었던 1980년 전후의 크게 상승한 온도 상승 폭과 1990년 전후의 상승한 온도 상승폭을 남태평양 해양에서도 확인할 수 있었다.

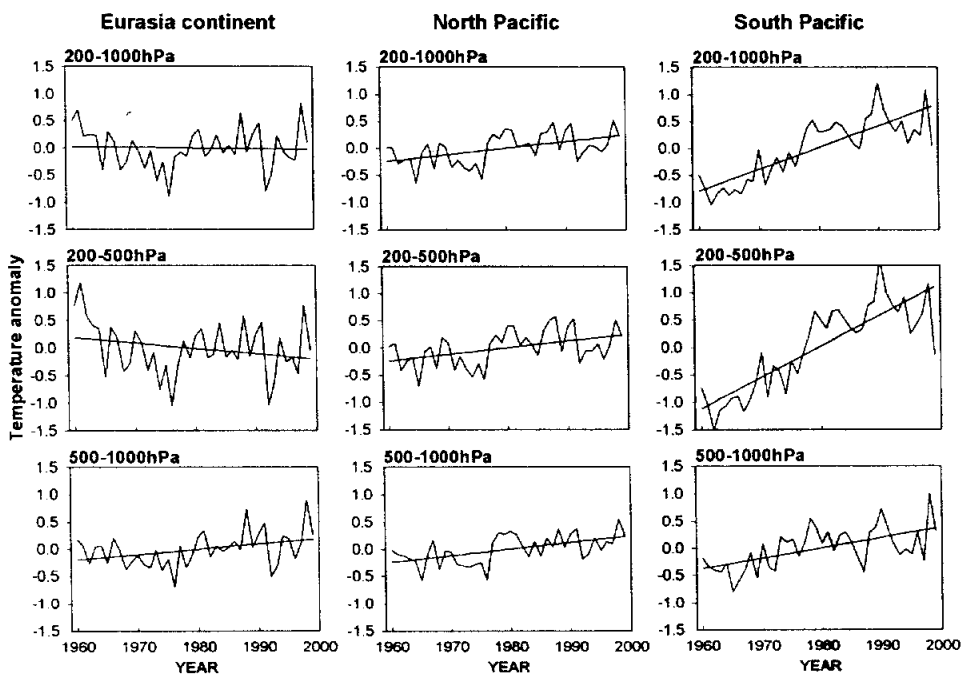


Fig. 10. As in Fig. 9 but for temperature anomalies of seasonal (summer) variation.

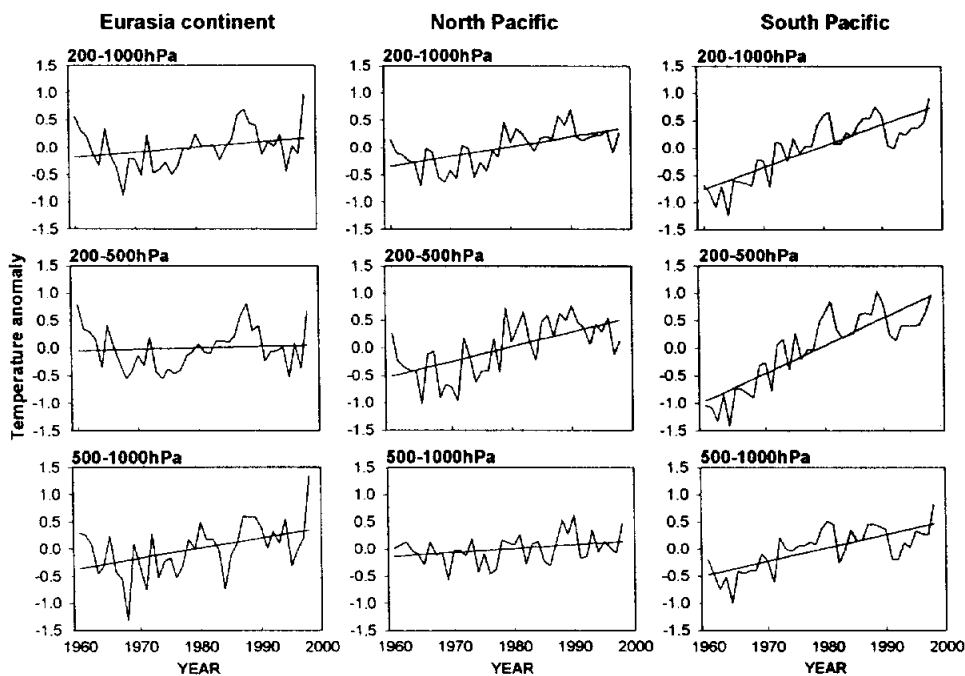


Fig. 11. Same as in Fig. 10 but for winter season.

유라시아 대륙은 겨울철에 대류권 전체적으로 증가하는 것을 확인 할 수 있었는데, 대류권 하층의 경우 1.8배정도 되는 온도 증가율을 보였고, 유라시아 대륙의 대류권에서 99년에 겨울철에는 온도 편차가 상승하는 것으로 나타났으나, 여름철에는 하강하는 것으로 나타났다. 이러한 현상은 Fig. 10.와 Fig. 11.을 비교해 보면 지역적 분석 영역의 모든 영역에서 여름철에는 99년에 온도 편차가 하강하는 것을 볼 수 있으나, 겨울철에는 반대되는 현상을 볼 수 있었다. 북태평양 해양의 경우에는 대류권 하층에서는 여름철보다 온도 편차의 증가 패턴이 작은 것으로 나타났지만, 대류권 상층의 경우는 여름철보다 겨울철에서 온도 편차가 증가하는 패턴이 두 배정도 높은 것으로 나타났다. 남태평양의 경우에는 여름철보다 온도 편차 증가 패턴이 약간 작아지는 것을 알 수 있었고, 대

류권 상층에서 여름철보다는 온도 증가율이 낮아지지만, 여전히 높은 온도 증가 패턴을 보여주고 있다. 즉 남반구에서도 남반구의 여름철보다 겨울철에 온도 증가가 많은 것으로 나타났다. 대류권 상층에서는 남반구가 겨울철인 6, 7, 8월에, 대류권 하층에서는 여름철인 12, 1, 2월에 더 높은 온도 증가치를 나타내었다.

Table 6.은 지역적 분석 영역에서의 대류권의 계절적 온도 증가치를 나타낸 것이다. 유라시아 대륙은 전반적으로 겨울철과 대류권 하층을 제외하면, 온도 패턴이 감소하는 것을 알 수 있다. 특히 대류권 상층에서 봄철에는 40년 동안에 0.6K정도 감소한 것을 볼 수 있다. 북태평양 해양의 경우는 대류권 전체에서 가을과 겨울철에 온도 상승이 많은 것으로 나타났다. 특히 겨울철에 대류권 상층에서는 약 1.0K 정도 증가한 것을 볼 수 있다. 남태평양 해양의 경우는 대류권 상층에서 40년 동안에 약 2.0K 정도 상승한 것을 볼 수 있는데, 가장 많은 상승한 곳은 대류권 상층에서 남반구가 겨울철인 6, 7, 8월에 온도 상승이 큰 것으로 나타났다.

지역적 분석영역의 하부 성층권 패턴은 앞의 결과와 마찬가지로 하강하는 패턴을 보여주었다(그림 없음). 온도 편차가 감소하는 패턴은 유라시아 대륙이 가장 크고, 북태평양 해양은 남태평양 해양보다 크고, 유라시아 대륙보다는 작은 것으로 나타났다. 그리고 지역적 분석영역의 계절적 분석은 Fig. 12.에서 보여지는 것으로 전반적으로 유라시아 대륙에서는 전 계절동안에 온도 편차가 감소하는 것으로 나타났다. 북태평양 해양의 경우는 겨울철을 제외한 나머지 계절 동안에는 감소하는 패턴을 보이지만, 겨울철에는 하부 성층권이 조금 증가하는 패턴을 보여주고 있다. 남태평양 해양의 경우도 마찬가지로의 결과로 나타났다. 그러나 남태평양의 경우는 가을과 겨울철에 하부 성층권의 평균 온도가 증가한 것을 알 수 있다. 그리고 80년 근처부근과 90년 부근의 큰 폭으로 상승하는 온도를 지역적 분석영역에서 잘 나타내고 있다.

Table 6. As in Table 5. but for the seasonal mean-temperature. Unit is degree/40yrs.

	spring	summer	autumn	winter
Eurasia continent 200 ~ 1000hPa	-0.2128	-0.05207	0.06627	0.3748
Eurasia continent 200 ~ 500hPa	-0.5958	-0.3859	-0.1744	0.1027
Eurasia continent 500 ~ 1000hPa	0.2935	0.3892	0.3845	0.7345
North Pacific 200 ~ 1000hPa	0.4360	0.4900	0.6958	0.7192
North Pacific 200 ~ 500hPa	0.6319	0.4937	0.7062	1.047
North Pacific 500 ~ 1000hPa	0.1771	0.4851	0.6820	0.2857
South Pacific 200 ~ 1000hPa	1.507	1.622	1.517	1.537
South Pacific 200 ~ 500hPa	2.003	2.278	2.259	1.969
South Pacific 500 ~ 1000hPa	0.85	0.7551	0.5360	0.9673

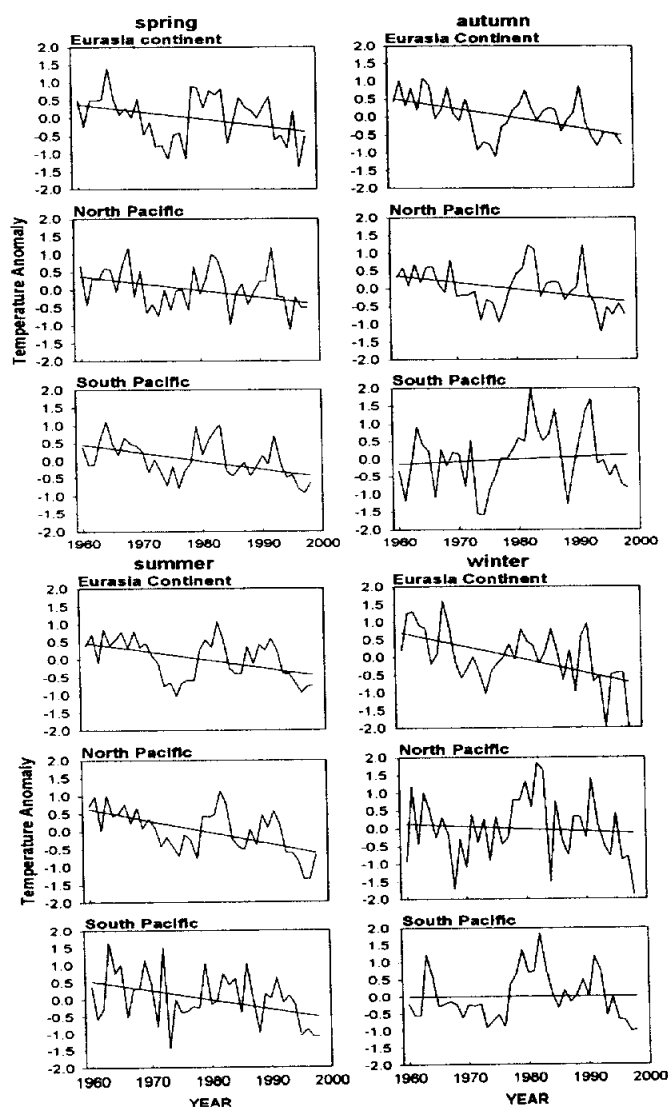


Fig. 12. Linear trend in the seasonal variation of temperature anomalies of the lower stratosphere over the Eurasia continent, the North Pacific and the South Pacific during 1960-1999.

3.4 SOI와 월평균 분석결과와의 지연상관

지구온난화와 관련하여 엘리뇨나 라니냐를 연관시켜서 설명을 하고자 하는 경우가 많다. SOI (Southern Oscillation Index)는 Tahiti와 Darwin 사이의 표준화된 기압 차이로 표현된다. Fig. 13처럼 SOI에서 양은 엘리뇨에 해당하면, 음의 값은 라니냐에 해당한다. 그리고 SOI를 구하는 방법은 Ropelewski and Jones(1987)에 의한 방법에 의한 것이다. Fig. 13.은 SOI를 년 평균으로 나타낸 것이지만, 실제 계산에서는 월 평균으로 계산되었다.

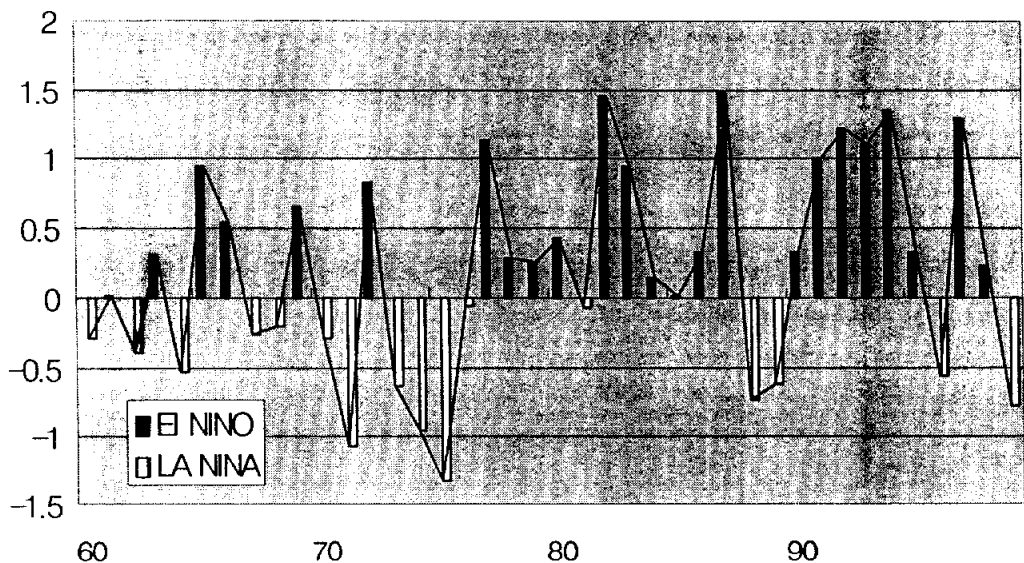


Fig. 13. Time variation of Southern Oscillation Index (SOI) since 1960s. Positive and negative anomalies represent El Nino and La Nina, respectively. Data from the internet(<http://www.cru.uea.ac.uk/>).

SOI와 월 평균 자료와의 지연상관을 구하는 식은 다음과 같다.

$$r_{xy|lag} = \frac{\frac{1}{n-2|lag|} \sum_{i=|lag|+1}^{n-|lag|} (x_i - \overline{x_{|lag|}})(y_{i\pm|lag|} - \overline{y_{|lag|}})}{\sigma_{x_{|lag|}} \sigma_{y_{|lag|}}} \quad (5)$$

만약에 $lag > 0 \Rightarrow +|lag|$, $lag < 0 \Rightarrow -|lag|$. 그리고 lag는 -6개월에서 +6개월까지이다. 그리고

$$\sigma_{x_{|lag|}} = \frac{\sqrt{\sum_{i=|lag|+1}^{n-|lag|} (x_i - \overline{x_{|lag|}})^2}}{n-2|lag|},$$

$$\sigma_{y_{|lag|}} = \frac{\sqrt{\sum_{i=|lag|+1}^{n-|lag|} (y_{i\pm|lag|} - \overline{y_{|lag|}})^2}}{n-2|lag|}$$

$$\overline{x_{|lag|}} = \frac{\sum_{i=|lag|+1}^{n-|lag|} x_i}{n-2|lag|}, \quad \overline{y_{|lag|}} = \frac{\sum_{i=|lag|+1}^{n-|lag|} y_{i\pm|lag|}}{n-2|lag|}.$$

그리고 x_i 는 SOI를 나타내고, y_i 는 분석 결과인 월평균 자료를 나타낸다.

여기서 월평균 자료는 일평균 자료에서 0일, 5일, 10일, 15일, 20일, 25일로 딜레이시켜서 월평균 자료를 구하였다. 그리고 딜레이된 월평균 자료에서 일년 주기 성분을 뺀 월평균 자료를 만들어서 SOI와 최대지연상관을 구하였다. SOI와 월평균 자료사이의 최대지연상관은 Table 7.에서 나타내었다. 그리고 엘리뇨와 라니냐 현상이 발생하는 지역과 근접한 적도 태평양 지역을 추가하여 지연

상관을 구하였다. 전지구 영역의 대류권 전체에서 최대 상관이 0.36으로 4개월 10일 지연되는 것으로 나타났다. 그리고 북반구에서는 전체적으로 최대 지연상관은 4개월에서 0.3으로 나타났고, 남반구는 북반구보다 비교적 높은 5개월 5일이 지연되는 0.34정도로 나타났다. 열대 지역에서는 비교적 높게 최대 지연상관이 2개월 25일로 약 3개월 정도 지연되는 0.55로 나타났다. 전반적으로 대류권 하층보다는 대류권 상층에서 높은 상관을 보여주고 있다. 그리고 적도 태평양에서는 대류권 전체에서 열대 지역보다 높은 상관인 0.67로 나타났다. SOI의 변화가 대류권에서 미치는 영향은 지역별로 차이는 있으나, 약 3개월에서 5개월 후에 나타나는 것으로 분석 결과에서 알 수 있었다. 그리고 남반구보다는 북반구에 미치는 기간이 더 짧으나, 상관은 남반구가 더 많은 것으로 나타났다.

Table 7. Maximum lag-correlation between the monthly-mean temperature and SOL. Temperature anomaly lags the SOL.

region		lag	correlation
Globe	200 ~ 1000hPa	4M 10D	0.35598
	200 ~ 500hPa	4M 10D	0.35952
	500 ~ 1000hPa	4M 00D	0.32803
NH	200 ~ 1000hPa	4M 00D	0.30272
	200 ~ 500hPa	4M 00D	0.29724
	500 ~ 1000hPa	4M 00D	0.29266
SH	200 ~ 1000hPa	5M 05D	0.34498
	200 ~ 500hPa	5M 05D	0.34338
	500 ~ 1000hPa	5M 05D	0.30808
NHE	200 ~ 1000hPa	4M 00D	0.13294
	200 ~ 500hPa	4M 00D	0.13006
	500 ~ 1000hPa	4M 05D	0.13091
Tropics	200 ~ 1000hPa	2M 25D	0.55449
	200 ~ 500hPa	2M 25D	0.55468
	500 ~ 1000hPa	2M 25D	0.52350
SHE	200 ~ 1000hPa	5M 05D	0.19863
	200 ~ 500hPa	5M 05D	0.20325
	500 ~ 1000hPa	5M 05D	0.15681
Equator Pacific	200 ~ 1000hPa	2M 25D	0.67008
	200 ~ 500hPa	2M 25D	0.65963
	500 ~ 1000hPa	2M 25D	0.66129

3.5 대류권 상하층간의 상관관계

지금까지는 대류권과 하부 성층권의 평균 온도의 장기 변동성에 관하여 연구하였다. 대류권 상하층간의 온도변동성은 하층과 상층 사이에 어떤 상관성이 있는지를 분석할 것이다. 먼저 각각의 분석영역에서 대류권 상층과 하층의 층후가 가장 크게 나타난 날과 가장 작게 나타난 날을 분석 자료에서 추출하였다. 이 추출한 자료는 Fig. 14.에서 나타난 것과 같다. Fig. 14.는 열대를 제외한 북반구와 남반구에서 매년 최대 층후와 최소 층후를 나타낸 것이다. 북반구의 경우, 매년 층후가 최대로 나타나는 시기가 일정한 시기에 밀집한 것을 볼 수 있다. 열대를 제외한 북반구의 하층에서 나타나는 최대 층후는 평균적으로 415.75 [1/2day]이고, 대류권 상층은 417.25[1/2day]로, 상층의 최대 층후는 하층보다 약 1.5[1/2day]일 정도 늦게 나타나는 것으로 확인되었고, 여름철 7월 말경에 집중적으로 나타나는 것을 알 수 있었다. 그러나 최소 층후는 최대 층후보다 나타나는 날짜가 넓게 퍼져 있는 것을 확인할 수 있었다. 그리고 대류권 하층에서 최소 층후가 나타나는 시기는 54.85[1/2day]이고, 상층에서는 61.4[1/2day]에 나타나는 것을 확인하였다. 열대를 제외한 남반구의 경우도 북반구와 비슷한 결과를 볼 수 있었다. 그러나 남반구는 북반구에 비해 최대 층후가 나타나는 시기가 넓게 퍼져 있는 것을 볼 수 있었다. 이것은 남반구가 북반구에 비해 육지 부분이 작기 때문에 나타난 것으로 볼 수 있다. 그리고 남반구의 하층에서의 최대 층후는 평균적으로 51.12[1/2day]에 나타나는 반면에 상층에서는 81.08[1/2day]로 나타났으며, 최소 층후는 하층에서는 441.18[1/2day]이고, 상층은 437.9[1/2day]로 나타났다. 남반구는 북반구에 비해 대류권 하층이 상층에 미치는 영향이 늦게 나타나는 것을 알 수 있었고, 대류권 하층이 상층보다 온도 상승이 빠르고, 온도 하강이 늦은 것을 알 수 있었다. 그리고 대류

권 하층과 상층의 최대 지연 상관을 Table 8.에서 볼 수 있다. Table 8.은 매년 대류권 상하층간의 최대 상관을 나타낼 때, 지연된 일수의 40년 평균을 나타낸 것이다. 위의 결과처럼 북반구가 남반구보다 약 2배정도 빠르게 하층이 상층에 영향을 주는 것으로 나타났다.

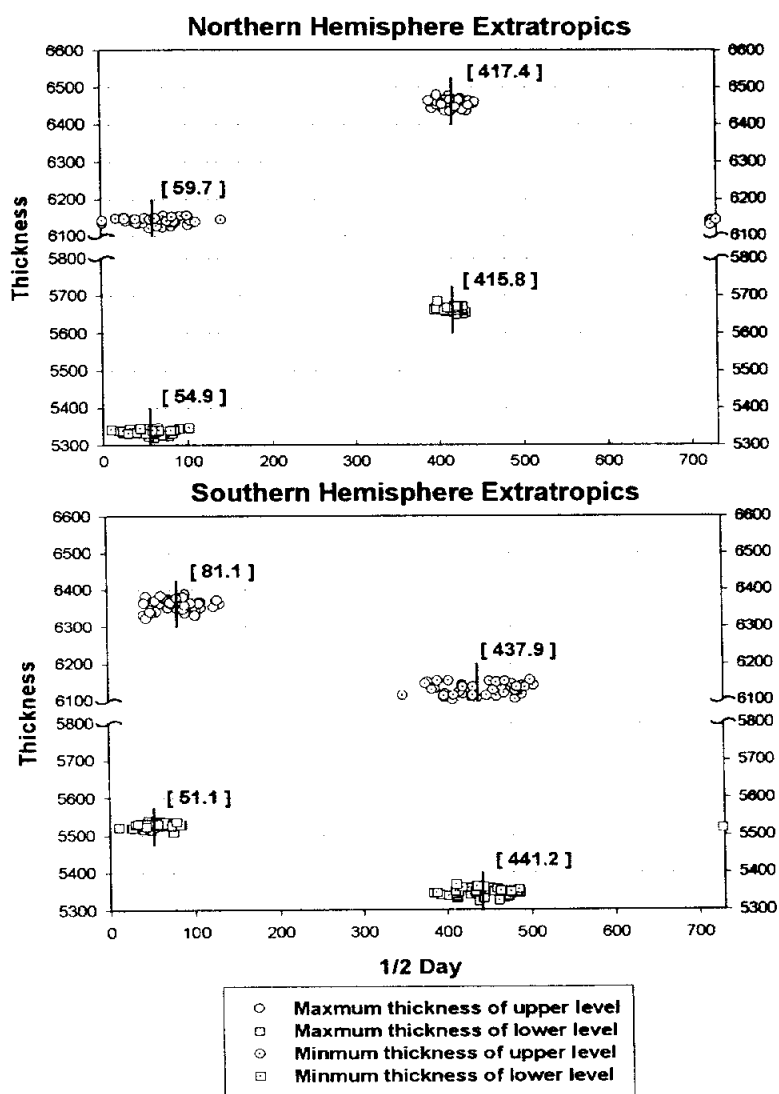


Fig. 14. Distribution of the maximum and the minimum thickness at the upper troposphere, at the lower troposphere over the northern hemisphere extratropics and at the southern hemisphere extratropics. Unit is gpm[m].

Fourier transform을 사용하여 10일 주기 성분과 20일 주기 성분보다 낮은 주기를 제거하여 분석하였다. 여기서 사용한 Fourier transform은 다음과 같은 식에 의해서 구할 수 있다.

$$F_i = a_0 + \sum_{n=1}^{\frac{N}{2}} \left(a_n \cos \frac{2\pi \cdot i \cdot n}{N} + b_n \sin \frac{2\pi \cdot i \cdot n}{N} \right) . \quad (6)$$

$$\begin{aligned} a_0 &= \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} F_i \\ a_n &= \frac{2}{N} \sum_{i=0}^{N-1} F_i \cos \frac{2\pi \cdot i \cdot n}{N} \\ b_n &= \frac{2}{N} \sum_{i=0}^{N-1} F_i \sin \frac{2\pi \cdot i \cdot n}{N} \end{aligned}$$

여기서 20-day에서 1-year까지는 20-day로, 10-day에서 1-year까지는 10-day로 두었다. 10-day와 20-day를 분석한 자료에서도 마찬가지로 비슷한 결과를 나타내었다. 북반구가 남반구보다 빠른 시간에 하층이 상층에 영향을 주는 것으로 나타났다. Fig. 15.는 20일주기 성분보다 작은 주기를 제외한 자료를 Fig. 14.와 같은 방법은 표현한 것이다. Fig. 14.와 비슷한 형태의 향상을 보이는 것을 알 수 있다.

Table 8. Maximum lag-correlation between the upper level and the lower level. Filtering by from 10-day to 1-year period and from 20-day to 1-year period. Lag is 1/2 day.

	Lag	Lag_10day	Lag_20day
NH	3.8 (0.99)	3.7 (0.99)	3.7 (0.99)
SH	7.6 (0.99)	7.5 (0.99)	7.5 (0.99)
NHE	3.8 (0.99)	3.8 (0.99)	3.8 (0.99)
Tropics	0.78 (0.85)	0.95 (0.85)	1.3 (0.86)
SHE	6.8 (0.97)	6.7 (0.99)	6.8 (0.99)

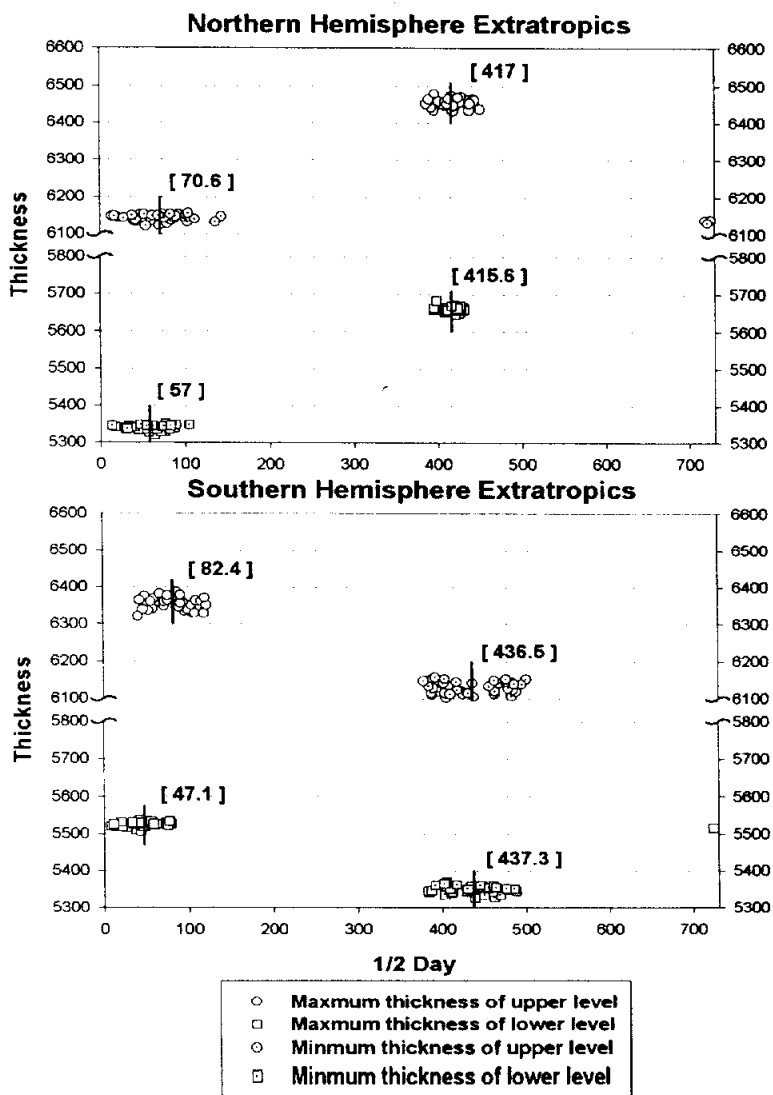


Fig. 15. As in fig. 14. but for Distribution of the maximum and the minimum thickness with period from 20-day to 1-year. Unit is gpm[m].

3.6 1980년 전후 trend의 비교분석

지금까지의 분석결과에서는 linear trend를 가지고 온도 경향을 분석하였다. 그러나 실제로 80년을 기준으로 경향 패턴이 잘 맞지 않는 것을 알 수 있다. 이것은 양쯔강의 여름 강수에서 1970년 후반 이후 Shift가 나타나는 현상과 비슷하다(Gong, D. Y., Ho, C. H., 2002). Fig. 16.에서 보게 되면, 실제로 80년 부근 시점을 기준으로 다른 것을 확연하게 볼 수 있다. 전지구적으로 볼 때 대륙권에서 80년 이전에는 온도 편차가 상승하는 것을 볼 수 있으나, 80년 이후에는 온도 편차 기울기가 매우 작은 것을 알 수 있다. 그러나 80년 이전에 비해 평균 온도는 높은 것을 알 수 있다. 북반구 지역에서는 대체적으로 대륙권에서는 80년 이전까지는 감소하는 패턴을 보여주고 있으나, 80년 이후로는 온도 기울기가 작은 것을 확인 할 수 있다. 이것도 전지구적인 영역과 마찬가지로 80년 이전보다 이후에 전체적으로 높은 평균온도를 가지고 있는 것을 알 수 있다. 남반구에서 80년 이전까지는 높은 기울기로 증가하다가 80년 이후부터는 온도 기울기가 작아진 것을 볼 수 있고, 대륙권 하층보다는 대륙권 상층에서 차이가 많이 나는 것을 확인할 수 있다. 이 결과는 Rignot & Jacobs(2002)의 연구에서 남반구 해양이 1950년에서 1980년까지 온도증가가 많은 것으로 나타난 결과와 비슷하다. 그리고 열대 지역에서는 온도 증가 기울기가 80년 이전과 이후를 비교했을 때 그다지 차이가 나지 않으나, 서로 다른 평균 온도를 보여주고 있는 것을 알 수 있다. 성층권에서는 80년 이전과 이후를 비교하였을 때, 서로 비슷한 기울기를 가지는 것을 알 수 있었다(그림 없음). 이것은 80년 시점에서 갑작스런 온도 상승이 있었고, 시간이 지나면서 다시 온도가 하강하였다는 것을 말해주는 결과이다. 그리고 각각의 분석 영역의 RMS(Root-Mean-Square) 는 Table 9.에서 볼 수 있다. Table 9.에서 나타난

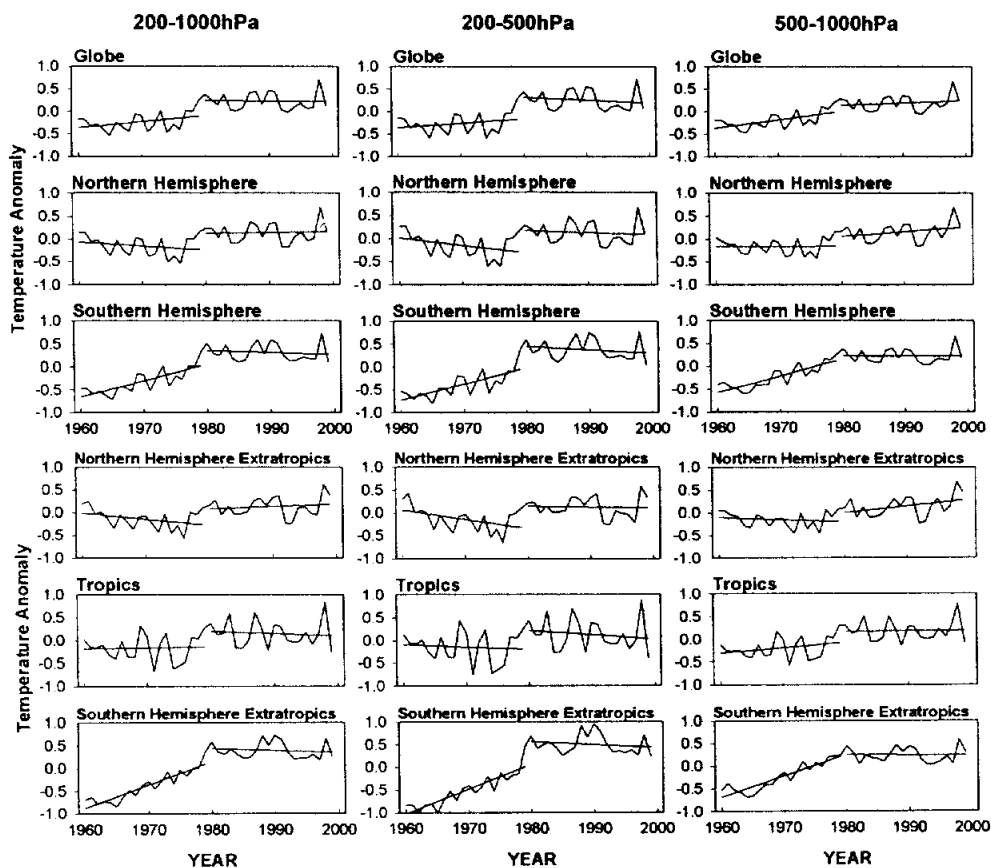


Fig. 16. Comparison of trend in 60~70's with 80~90's for the total troposphere, the upper and the lower troposphere over the whole globe, the two hemisphere, the northern hemisphere extratropics, the tropics and the southern hemisphere extratropics.

Table 9. Comparison of RMS in linear trend with mean(Ⓐ,Ⓑ) for the total troposphere, the upper and the lower troposphere over the whole globe, the two hemisphere, the northern hemisphere extratropics, the tropics and the southern hemisphere extratropics.

	Linear trend	60~70's (Ⓐ)	80~90's (Ⓑ)	mean (Ⓐ,Ⓑ)
Globe_Total	0.211012244	0.184985489	0.192814603	0.188900054
Globe_Upper	0.251469284	0.216046751	0.216848865	0.216447800
Globe_Lower	0.167969927	0.149043471	0.169095784	0.159069628
NH_Upper	0.271251321	0.252822489	0.233345270	0.243083879
SH_Upper	0.271017641	0.191873208	0.220008969	0.205941081
NH_Lower	0.191607609	0.172767177	0.191492841	0.182130009
SH_Lower	0.183981046	0.137299865	0.158567980	0.147933930
NHE_Upper	0.264352679	0.240633056	0.222077549	0.231355309
Tropics_Upper	0.356938869	0.339513481	0.341367364	0.340440422
SHE_Upper	0.289691985	0.160934046	0.209381178	0.185157612
NHE_Lower	0.202576280	0.166236252	0.209654823	0.187945545
Tropics_Lower	0.235701755	0.227116734	0.224340305	0.225728512
SHE_Lower	0.197907954	0.120594643	0.159250259	0.139922455
NH_Total	0.232457235	0.215129182	0.210886121	0.213007659
SH_Total	0.225492477	0.162204295	0.187942564	0.175073430
NHE_Total	0.229690671	0.201982304	0.210043982	0.206013143
Tropics_Total	0.302766919	0.290369898	0.288569689	0.289469779
SHE_Total	0.235755295	0.126961857	0.177779198	0.152370527

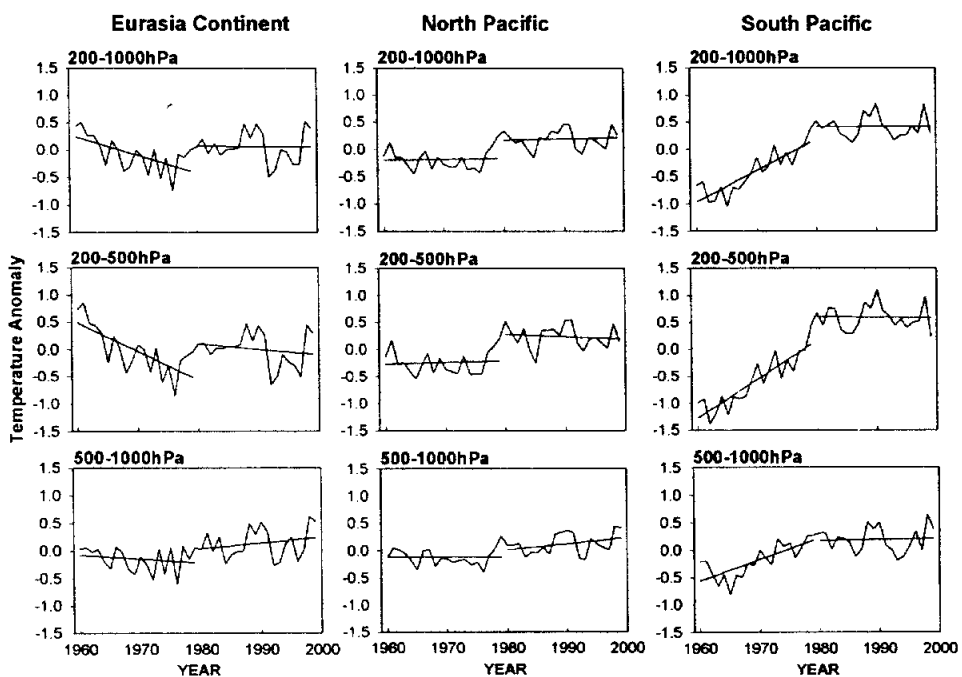


Fig. 17. As in Fig. 16. but for the Eurasia continent, the North Pacific and the South Pacific.

것처럼 모든 분석영역에서 linear trend 보다 80년 이전과 이후로 나누어 구한 RMS가 더 작은 것을 알 수 있다. Fig. 17.에서 보는 것처럼 지역적인 분석영역에서도 마찬가지로 80년 이전과 이후에 차이가 나타나는 것을 알 수 있다. 유라시아 대륙은 전반적으로 온도 증가 기울기의 차이는 있지만, 80년 이전에는 감소하는 패턴을 보여주다가, 80년 이후에는 온도 기울기가 감소하는 패턴 대신에 기울기가 작아지는 것을 볼 수 있다. 그리고 대륙권 하층에서는 80년 이후에 온도 증가가 나타나는 것을 알 수 있었다. 그리고 북태평양 해양의 경우는 80년 이후와 80년 이전의 온도 기울기가 거의 비슷하게 나타났다. 그러나 서로 다른 평균 온도를 가지고 있는 것을 보았다. 그리고 남태평양 해양의 경우는 대륙권 상층에서는 80년 이전에 큰 온도 증가가 있었고, 80년 이후에는 그 온도 증가 기울기가 작아진 것을 볼 수 있었다. 그리고 대륙권 상층이 대륙권 하층보다 80년 이전에 온도 증가가 더 많은 것을 확인 할 수 있었다.

4. 고찰 및 결론

대류권 평균 온도의 온난화 경향은 이전의 연구들과 대략적으로 일치하는 것으로 나타났다. 시간 평균에서 조금씩의 차이를 나타냈지만, 분석결과에서 온난화 현상을 확인할 수 있었다. 전지구적으로 40년 동안에 대류권에서 0.7K/40yrs 정도 상승한 것으로 나타났다. 온난화 경향은 남반구 (1.1K/40yrs)가 북반구 (0.4K/40yrs)보다 크게 나타났다. 북반구에서는 대류권 하층이 대류권 상층보다 온도 증가가 많았으며, 남반구에서는 대류권 하층보다 대류권 상층에서 온도 증가가 많은 것으로 나타났다. 계절별 분석에서 대류권 상층은 가을과 겨울에, 대류권 하층은 봄과 여름에 온도 상승이 다른 계절보다 많은 것으로 분석되었다. 그리고 추운 계절과 따뜻한 계절 비교에서 여름철보다는 겨울철에 온도 증가가 많은 것으로 나타났으며(Wallace et al.1996), 이것은 추운 계절의 온도가 상승하는 것이 결국 전체 온도 상승을 초래할 수 있는 말할 수 있다. 그리고 하부 성층권 평균 온도는 과거 40년 동안에 0.6K정도 하강한 것으로 나타났고, 특히 북반구의 하부 성층권의 온도 하강 현상은 다른 지역들보다 큰 것으로 분석되었다. 그리고 80년 부근과 90년 부근에서 성층권 모든 영역에서 큰 폭의 온도 상승을 보았다. SOI와 월평균 온도의 상관에서 전지구적으로 미치는 영향은 4개월 후에 나타났으며(0.35), 북반구에 미치는 영향은 남반구보다 한달 정도 빨리 나타났다. 그리고 적도 태평양의 경우는 전체적으로 약 3개월 후에 0.66으로 높은 상관을 나타내었다. 그리고 전반적으로 대류권 하층보다는 대류권 상층에서 높은 상관을 나타내었다.

유라시아 대륙과 태평양 해양의 비교에서 평균 온도 증가치가 대륙보다 태평양 해양에서 더 크게 나타났고, 북태평양보다는 남태평양의 온도 증가가 많은 것으로 분석되었다. 그리고 유라시아 대륙은 대류권 하층에서, 북태평양 해양과

남태평양 해양에서는 대류권 상층에서 온도 증가가 많은 것으로 나타났다. 계절적 분석은 추운 계절에 온난화 현상이 크게 일어나는 것으로 분석되었다.

분석결과에서 80년 전후를 비교분석에서, 북반구에서는 80년 이전에는 온도 편차 패턴이 하강하고, 80년 이후에 다시 온도 편차가 상승하는 것을 볼 수 있었다. 그리고 남반구에서는 80년 이전까지 큰 폭의 온도 상승을 하다가 80년 이후 온도 상승 기울기가 작아지는 것을 확인할 수 있었다. 유라시아 대륙은 북반구 패턴과 비슷하게 나타났으나, 북태평양 해양의 경우는 80년 이전과 이후에 온도 상승 기울기가 서로 비슷한 것으로 분석되었지만, 서로 다른 평균 온도를 가지고 있는 것을 확인하였다. 남태평양 해양의 경우는 남반구의 패턴과 비슷하게 나타나는 것으로 분석되었다. IPCC 보고서에 따르면, 1946~1975년까지는 북반구 지역이 온도가 하강하고, 1976~2000년까지는 다시 온도가 상승하는 것으로 나타났으며, 남반구에서는 계속적인 온도 상승을 유지하고 있다고 보고되었다. 남반구보다 북반구가 대류권 하층이 대류권 상층에 미치는 시간은 약 2배정도 빠른 것으로 나타났으며, 최대 층후는 일정한 시기에 밀집되어 있는 것을 볼 수 있었고, 최소 층후는 최대 층후보다 더 넓게 퍼져있는 것을 확인할 수 있었다. 그리고 RMS 분석결과에서도 linear trend보다, 20년씩 나누어서 RMS 분석결과 값이 작은 것으로 나타났다.

5. 참고문헌

- Angell, J. K., 1999: Comparison of surface and tropospheric temperature trends estimated from a 63-station radiosonde network, 1958-1998. *Geophys. Res. Lett.*, **26**, 2761-2764.
- Brown, S. J., D. E. Parker, C. K. Folland, and I. Macadam, 2000: Decadal variability in the lower-tropospheric lapse rate. *Geophys. Res. Lett.*, **27**, 997-1000.
- Christy, R. J., R. W. Spencer, and W. D. Braswell, 2000: MSU Tropospheric temperatures: Dataset construction and radiosonde comparisons. *J. Atmos. Oce. Tech.*, **17**, 1153-1170.
- Fomby, T. B. 2002: The application of size-robust trend statistics to global-warming temperature series. *J. Climate*, **15**, 117-123.
- Gaffen, D. J. M. A. Sargent, R. E. Habermann, and J. R. Lanzante, 2000: Sensitivity of tropospheric and stratospheric temperature trends to radiosonde data quality. *J. Climate*, **13**, 1776-1796.
- Gille, S. T. 2002: Warming of the southern ocean since the 1950s. *science*, **295**, 1275-1277.
- Gong, D. Y., Ho, C. H. 2002: Shift in the summer rainfall over the Yangtze River valley in the late 1970s. *Geophys. Res. Lett.*, **29**, 78_1-78_4.
- Gordon, A. H. 1991: Global warming as a manifestation of a random walk. *J. Climate*, **4**, 589-597.
- Huang, B., and Z. Liu, 2001: Temperature trend of the last 40 Yr in the upper Pacific Ocean. *J. Climate*, **14**, 3738-3750.

- Hurrell, J. W., and K. E. Trenberth, 1992: An evaluation of monthly mean MSU and ECMWF global atmospheric temperatures for monitoring Climate. *J. Climate*, **5**, 1424-1440.
- , —, 1998: Difficulties in obtaining reliable temperature trends: Reconciling the surface and satellite microwave sounding unit records. *J. Climate*, **11**, 945-967.
- Hurrell, J. W., S. J. Brown, K. E. Trenberth, and J. R. Christy, 2000: Comparison of tropospheric temperatures from radiosondes and satellites: 1979-98. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **81**, 2165-2177.
- Jones, P. D. 1994: Hemispheric surface air temperature variations: A reanalysis and an update to 1993. *J. Climate*, **7**, 1794-1802.
- Karl, T.R., and R. W. Knight., J. R. Christy., 1994: Global and hemispheric temperature trends: Uncertainties related to inadequate spatial sampling. *J. Climate*, **7**, 1144-1163.
- Kushner, J. P., I. M. Held, and T. L. Delworth, 2001: Southern hemisphere atmospheric circulation response to global warming. *J. Climate*, **14**, 2238-2249.
- Lau, K.-M., and H. Weng, 1999: Internnual, decadal-interdecadal, and global warming signals in sea surface temperature during 1955-97. *J. Climate*, **12**, 1257-1267.
- Lawrimore, J. H., M. S. Halpert., G. D. Bell, et al., 2001: Climate assessment for 2000: *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **82**, S1-S55.
- Rignot, E. and Jacobs, S. S. 2002: Rapid bottom melting widespread near antarctic ice sheet grounding lines. *science*, **296**. 2020-2023.
- Schneider, T., I. M. Held, 2001: Discriminants of twentieth-century changes

- in earth surface temperatures. *J. Climate*, **14**, 249-254.
- Singh, N. and S. K. Patwardhan, 2002: Effect of global atmospheric thermal conditions on the MonSoons of the Indian Region. *Korean Journal of Atmospheric Sciences*, **5**, 39-54.
- Trenberth, K. E., 1990: Recent Observed Interdecadal climate changes in the northern hemisphere. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **71**, 988-993.
- Volodin, E. M. and V. Y. Galin, 1999: Interpretation of winter warming on northern hemisphere continents in 1977-94. *J. Climate*, **12**, 2947-2955.
- Wallace, J. M., Y. Zhang, and L. Bajuk, 1996: Interpretation of interdecadal trends in northern hemisphere surface air temperature. *J. Climate*, **9**, 249-259.
- Watterson, I. G. 2000: Interpretation of simulated global warming using a simple model. *J. Climate*, **13**, 202-215.
- Woodward, W. A., and H. L. Gray, 1993: Global warming and the problem of testing for trend in time series data. *J. Climate*, **6**, 953-962.

감사의 글

배움의 장이라는 대학이라는 곳에서 인연을 맺은 지도 벌써 9년이라는 시간이 흘렀습니다. 타지에서 배움의 시간을 갖는다는 것은 무척이나 어려운 일이었지만, 그 시간들이 저의 인생에서 무엇보다도 값지고 소중한 시간이었습니다. 가정형편상 학교를 제대로 다닐 수 없는 저에게 배움의 기회를 주신 정형빈 교수님과의 만남은 제 인생에서 가장 큰 행운이었습니다. 교수님의 학문에 대해 순수하고, 열정적인 모습은 항상 저에게 큰 모범이 되었습니다. 교수님의 자상하고, 관심 깊은 지도가 있었기에 지금의 제가 있을 수 있었습니다. 이 지면을 빌려 다시 깊은 감사의 말씀을 올립니다. 배움의 끝이 아닌 시작되는 시점에서 교수님의 가르치심 그리고 학문에 대한 마음가짐을 잊지 않고 생활하겠습니다. 그리고 제가 한사람으로의 기상학도로써 부끄럼이 없도록 학문적으로 저를 이끌어 주신 한영호 교수님, 한 마디 한 마디 말씀에도 따뜻한 온정이 느끼게 해주셨던 김영섭 교수님, 미처 생각지 못했던 사실들을 일깨워주시고, 칭찬과 질책으로 저를 성장할 수 있게 해주셨던 변희룡 교수님. 새로운 분야의 개척으로 인생의 의미를 알게 해주신 이동인 교수님, 젊음의 패기와 끈기를 주시고 한 마디의 말씀 속에서도 자상한 배려를 해주셨던 옥곤 교수님, 새로운 시도로 할 수 있다는 자신감을 심어주신 오재호 교수님, 아직 배움의 기호를 갖지는 못했지만, 연구자의 모습을 보여주신 권병혁 교수님. 다시 한 번 이 모든 분들에게 진심으로 감사드립니다.

군 체대 후, 대기수치모델링실험실(4308B)이란 작은 공간에서 시작된 인연으로 늘 좋은 일, 좋은 일을 함께 나누었던 실험실 동료들. 함께 한 시간은 얼마 되지 않았지만 자상했던 동기형, 처음으로 실험실에서의 일을 가르쳐주시고, 항상 충고와 격려를 해주신 영철이형, 저의 고민 상담

을 해주던 민규형, 가장 오래도록 함께 생활하고 도움을 준 태영이형, 그리고 선배들을 잘 따라주고 열심히 생활하는 인혁이, 찬웅이, 지금은 같은 실험실에 없지만, 한 때 같이 생활했던 연주와 정임에게도 이 지면을 빌려 고마움을 전합니다. 그리고 항상 부족한 후배인 저를 아껴주신 병환이형, 철환이형, 장호형, 부경이형, 성희형, 태국이형, 기만이형, 효경이누나, 봉근이형, 민이형, 영교형, 성용이형에게도 정말 감사의 마음을 전합니다. 그리고 같이 공부하며, 경쟁을 했던 기선, 동일이와 기훈, 늦게 공부를 다시 시작하는 길종이에게도 고마움을 전하고, 저를 도와주신 모든 대기과학과 선·후배님들에게 감사를 전합니다.

마지막으로, 항상 저를 걱정해주시면 걱려를 아끼지 않으셨던 할아버지와 주위 친지 분들과 형을 믿고 따라준 동생들에게 진심으로 감사드립니다.

“감사드립니다”, “고맙습니다” 라는 말씀을 드리기엔 너무나 부족한 답례라고 느껴질 정도로 저를 세상에 나게 해주시고 자신의 몸보다도 저를 보살펴주셨던 부모님. 지금까지도 부모님께 의지하고 있는 아들에게 더 잘해주지 못해서 미안해하시는 분들. 만약 아버지, 어머니가 없었다면 본 논문은 물론, 앞에서 열거했던 제가 사랑하고 사랑하는 모든 사람들과의 인연도 없었을 것입니다. 항상 당신들의 아들이 곁에 있다는 사실을 잊지 마시고, 아프지 않고 건강하게 오래오래 사십시오. 사랑합니다. “아버지”, “어머니”.

그리고 저와 인연을 나누었던 모든 분들에게도 진심으로 감사드립니다.