

인도양 해수면 온도와 동아시아 여름 몬순의 관계에 대한 장주기 변동성

김원모^{1,*} · 전종갑¹ · 문병권²

¹서울대학교 지구환경과학부, 151-747 서울시 관악구 관악로 599

²전북대학교 과학교육학부/과학교육연구소, 561-756 전북 전주시 덕진구 덕진동 1가 664-14

The Interdecadal Variation of Relationship between Indian Ocean Sea Surface Temperature and East Asian Summer Monsoon

Won-Mo Kim^{1,*}, Jong-Ghap Jhun¹, and Byung-Kwon Moon²

¹School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, Seoul 151-747, Korea

²Division of Science Education/Institute of Science Education, Chonbuk National University,
Jeonju 561-756, Korea

Abstract: This study aims to analyze the interdecadal variation of relationship between Indian Ocean sea surface temperature (SST) and East Asian summer monsoon (EASM) during the period of 1948-2005. In the pre-period, which is from 1948 to 1975, the relationship between Indian Ocean SST and East Asian summer rainfall anomaly (EASRA) is very weak. However, in the post-period, which is from 1980 to 2005, Indian Ocean SST is significantly positively correlated with EASRA. The equatorial Indian Ocean SST has a significantly positive correlation with EASM in spring, while Indian Ocean SST near the bay of Bengal has a positive relationship in summer for the post-period. Also the interdecadal variation of the correlation between Indian Ocean SST and EASRA is significant, but that between EASRA and the El Niño-Southern Oscillation (ENSO) is not. Atmospheric general circulation model (AGCM) test results show the pattern of increased precipitation in the zonal belt region including South Korea and Japan and the pattern of decreased precipitation in the northeastern part of Asia, which are similar to the real climate. The increase of the precipitation in August from the model run is also similar to the real climate variation. Model results indicate that the Indian Ocean SST warming could intensify the convection over the vicinity of the Philippines and the Bay of Bengal, which forces to move northward the convection center. This warming strengthens the EASM and weakens the WNP. This warming strengthens the EASM and weakens the WNP.

Keywords: East Asian Monsoon, Interdecadal Variation, Indian Ocean Sea Surface Temperature

요약: 본 연구에서는 인도양 해수면 온도의 변동성과 1970년 중·후반 이후 동아시아 여름 몬순의 변화의 상관성을 분석하였다. 전반기의 인도양 해수면 온도는 동아시아 여름강수편차(EASRA), 북서태평양 몬순지수(WNPMI)와 상관관계가 거의 없었지만 후반부에서는 인도양 전 부분에 걸쳐 상관관계가 크게 증가하였다. 인도양 해수면 온도와 동아시아 몬순과의 상관성 관계는 봄철과 여름철 각각 지역적으로 차이를 보였다. 봄철의 경우에는 적도 인도양을 중심으로 높은 상관성을 보인 반면 여름철의 경우에는 벵갈만 근처의 인도양에서 높은 상관성을 보였다. 인도양 해수면 온도의 수십년 주기의 변동성은 ENSO의 변동성보다 동아시아 여름 강수편차에 상관성이 높게 나타나고 있으며 따라서 ENSO보다도 인도양 해수면 온도의 변동성이 동아시아 여름몬순에 더 큰 영향을 줄 수 있다. 이러한 인도양 해수면 온도의 수십년 주기의 변동성 차이(후반기 해수면 온도와 전반기 해수면 온도의 차이)를 모델의 강제력으로 주고 AGCM 실험을 수행하여 그 결과를 비교하였다. 모델 실험 결과 실제 전·후반기 강수량의 차이 패턴인 동아시아 북부의 강수 감소, 한반도와 일본 남부의 강수 증가, 중국 남부의 강수 증가의 패턴이 보였다. 특히 8월의 북서태평양고기압의 확장으로 인한 강수의 증가는 실제 기후변화 차이를 나타낸다. 인도양 해수면 증가로 인한 모델상에서의 대기 순환은 벵갈만-인도양과

*Corresponding author: koom2@snu.ac.kr

Tel: 82-2-880-8125

Fax: 82-2-883-4972

북서태평양의 상승기류 중심을 더욱 강화시키는 역할을 해주며 북서태평양에는 고기압성 기류를 강화시키고 동아시아 지역에서는 저기압성 기류를 강화시키는 역할을 한다. 또한 상승기류 중심을 북쪽으로 이동시킨다. 따라서 인도양 해수면 온도의 증가 효과는 동아시아 지역과 북서태평양 지역의 반대위상의 변화를 강화시키는 역할을 하고 있다. 인도양 지역별 해수면 온도의 민감성 실험에서는 적도인도양의 강제력의 경우에 북서태평양 상승기류를 강화하여 동아시아 여름몬순에 영향을 주었다.

주요어: 동아시아 몬순, 장주기 변동, 인도양 해수면 온도

서론

인도양 해수면 온도의 변화는 여러 가지 기후 특성을 결정짓는데 중요한 요소로 작용하고 있다. 인도양은 인도 몬순뿐만 아니라 아프리카, 호주, 동남아시아까지 영향을 미치고 있음이 여러 연구를 통해 밝혀졌다. 그러나 동아시아 여름 몬순과의 연관성에 대한 연구는 거의 진행되어지지 않고 있으므로 이 연구를 통해 인도양이 동아시아 몬순에 어떠한 영향을 미치는지 알아보려고 한다.

인도양은 100년에 약 1°C 정도 계속 상승하는 추세이다. 이러한 온난화 경향은 다른 지역의 해양에서도 나타나고 있으며 특히 1970년대 중·후반을 기준으로 열대 해수면 온도의 가장 큰 증가가 동태평양과 인도양에서 나타났다(Wang, 1995; Zhang et al., 1997; Nitta and Yamada, 1989). 인도양 해수면 온도 상승은 Hadley 순환을 강화하여 동남아시아 지역에 강한 하강 순환을 야기하고(Wang et al., 2001), 이는 서태평양 고기압 발달을 강화시킨다(Watanabe and Jin, 2002). 또한 1970년대 중·후반 이후로 북서태평

양 아열대 고기압의 중심이 남쪽으로 이동하였음이 알려졌다(Nitta and Hu, 1996). 따라서 지금까지의 연구 결과로부터 1970년대 중·후반 이후의 열대 지역을 중심으로 하는 온난화의 강화가 이 지역의 대기순환장의 변화에 큰 영향을 주었음을 알 수 있다. 인도몬순의 경우에는 인도양 해수면 온도상승이 해들리 세포의 중심을 적도지역에 계속 묶어두는 역할을 하여 인도 여름몬순의 시작을 1주일 정도 지연시키지만 인도 지역에 빠른 여름을 가져오는 것으로 알려졌다며(Annamalai et al., 2005), 또한 강한 인도 몬순은 중국 북동지역에 고기압 편차를 발생시키고 남태평양에 아열대고기압의 발생과도 연관이 있음이 발표되었다(Wang et al., 2001). 또한 최근 십 년 동안에는 여름철 인도 강수와 동태평양과의 음의 상관관계가 약화되고 있음이 관측되었다(Webster et al., 1998; Kumar et al., 1999). 이러한 관계 단절의 원인으로 아노말리 ENSO에 의한 Walker 순환의 인도지역으로의 침강(Kumar et al., 1999), 유라시아 대륙과 해양의 온도경도 증가로 인한 인도 몬순 강화(Kumar et al., 1999), 북대서양 제트류의 북상(Chang et al.,

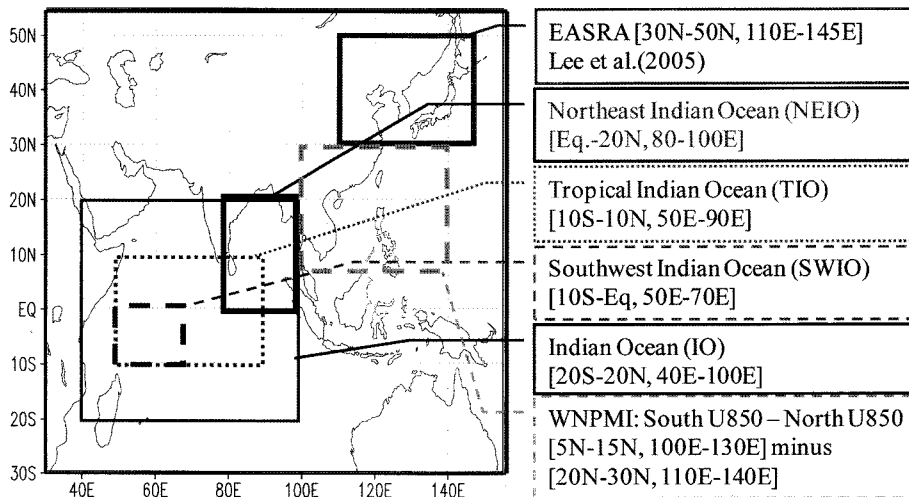


Fig. 1. Areas for defining various indices.

2001) 등 여러 가지 가정이 제안되고 있지만 확실히 밝혀진 것이 없다. 여러 연구에서 인도양이 주변 기후에 미치는 영향력이 1970년 중·후반을 기준으로 뚜렷이 증가하고 있음을 알 수 있다.

이미 동아시아 여름 몬순의 특징 및 수십년 주기 변화에 대한 많은 연구가 진행되었다. 비교 분석을 위해 각 지역별 몬순은 특징을 수치화(index)하여 표현한다. 동아시아 여름 몬순의 경우에는 (110°E-145°E, 30°N-50°N) 영역의 강수량 편차를 공간평균한 동아시아 여름강수편차가 소개되었으며(Lee et al., 2005) 북서태평양 여름 몬순의 경우에는 북쪽 영역(5°N-15°N, 100°E-130°E)과 남쪽 영역(20°N-30°N, 110°E-140°E)의 850 hpa 바람장 차이를 공간평균한 북서태평양 몬순 지수가 소개되었다(Wang et al., 2001). 이

연구에서는 각 몬순과의 비교를 위해 인도양 지역별 SST 편차의 공간평균값을 정의하여 분석을 수행하였다. 또한 동아시아 여름 몬순에 대한 1970년대 후반 이후의 장주기적인 변동에 대한 연구가 많이 진행되어 왔는데 특히 8월 강수량의 증가와 종관적인 특징의 변화가 보고되었다(Yun et al., 2001, Ho et al., 2003, Ha et al., 2005).

기후모델과 관련된 선행연구에서는 인도양 해수면 온도의 아노말리 값을 강제력으로 하여 AGCM에서의 동아시아 겨울 몬순과 인도 여름 몬순에 대한 실험이 있었고 남서인도양과 열대 인도양 해수면 온도의 변동성이 어떠한 영향을 주는지 파악했다(Annamalai et al., 2005). 그러나 이러한 실험에서는 인도양 해수면의 국지적 효과로는 인도 여름 몬순의 시작의 지

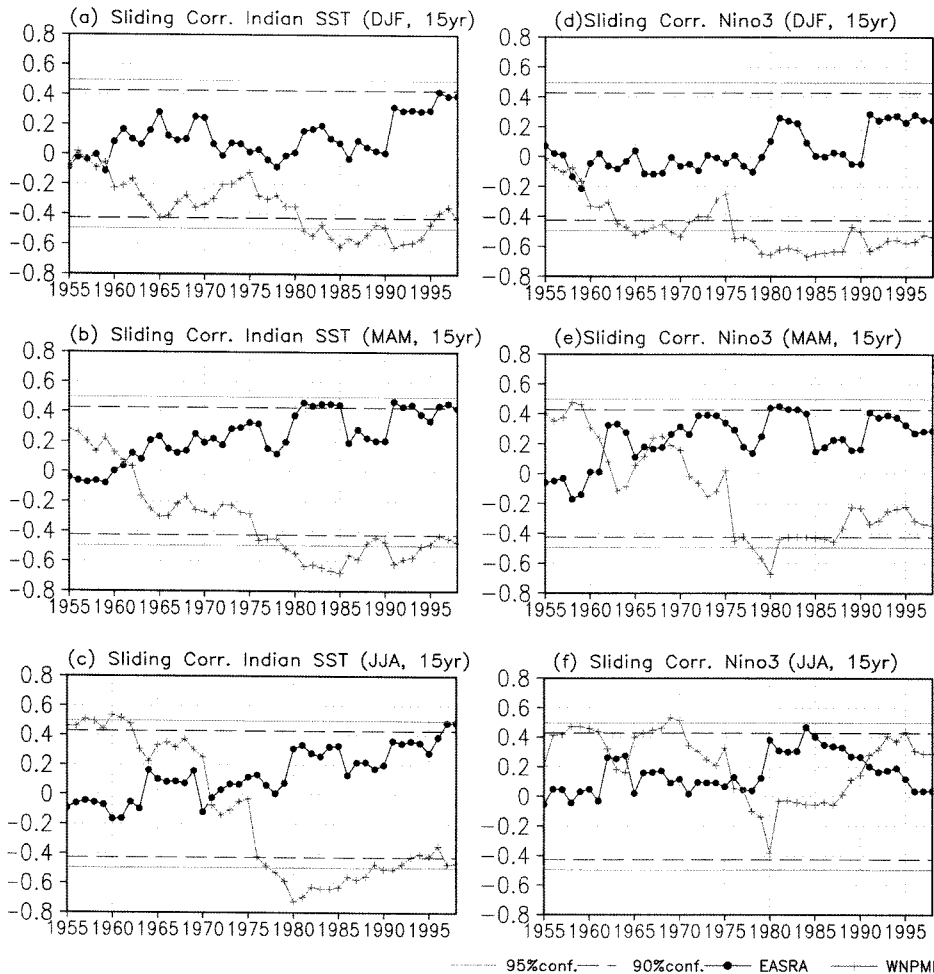


Fig. 2. Sliding correlations with 15-year window between Indian Ocean SST and EASRA (Black curve)/WNPPI (Grey curve) from 1948 to 2005 for (a) DJF, (b) MAM, and (c) JJA. Those between Nino 3 index and EASRA (Black curve)/WNPPI (Grey curve) for (d) DJF, (e) MAM, and (f) JJA.

연과 원거리 효과로서 동아시아 겨울몬순에서의 강우 증가 효과를 설명하였으나 동아시아 여름몬순과의 연관성은 살펴보지 않았다. 본 연구에서는 인도양 해수면 온도의 수십년주기 변동 성분을 강제력으로 하고 동아시아 여름강수편차와 상관성이 높은 지역을 선택하여 인도양 해수면 온도가 얼마나 동아시아 몬순에 영향을 주는지 파악 하고자 한다.

자 료

이 연구에 사용된 해수면 온도자료는 미국 국립 기후데이터센터(NCDC) Extended Reconstructed Sea Surface Temperature(ERSST)이며 위도, 경도 각각 격자 간격이 2.0°인 전구 월별 자료이다(Smith and Reynolds, 2004). 강수 자료는 National Centers for Environmental Prediction(NCEP)의 Precipitation REConstruction(PREC) 자료로 위도, 경도 각각 격자 간격이 2.5°인 전구 월별 아노말리 자료이다(Chen et al., 2002). 그 외의 기상요소(지상온도, 바람장, 500 hPa 고도 등)로는 유럽중기예보센터(ECMWF)의 40년 재분석자료(ERA-40)로 위도, 경도 각각 격자 간격이 2.5°인 전구 월별 자료가 사용되었다(Uppala et

Table 1. Correlation coefficient between EASRA and SST for specifically defined area in MAM. ** means that 95% confidence level is satisfied, while * means 90% satisfied.

	1948~1975	1980~2005	1948~2005
IO	0.080	0.391**	0.271**
TIO	0.092	0.426**	0.293**
SWIO	0.066	0.395**	0.248*
NEIO	-0.092	0.361*	0.168
Nino3 (MAM)	0.154	0.296	0.258*

al., 2005). WNPMI의 정의에 사용된 바람자료(850 hPa 동서성분)는 NCEP 재분석자료와 ECMWF자료를 모두 사용하여 해수면 온도와 비교하였다(Kalnay et al., 1996).

본 연구에서 동아시아 영역은 한반도를 중심으로 하는 (110°E-145°E, 30°N-50°N)이며 인도양 영역은 (20°S-20°N, 30°E-100°E)이다. 인도양의 지역적인 특징을 살펴보기 위해 벵갈만 영역(NEIO), 적도 영역(TIO), 남서 열대인도양 영역(SWIO)을 따로 정의하여 비교하였다. TIO와 SWIO는 봄철의 인도양 해수면 온도와 EASRA의 상관계수 값이 신뢰수준 90% 이상인 영역으로 정의하였고 NEIO는 여름철 인도양 해수면 온도와 EASRA의 상관계수 값이 신뢰수준

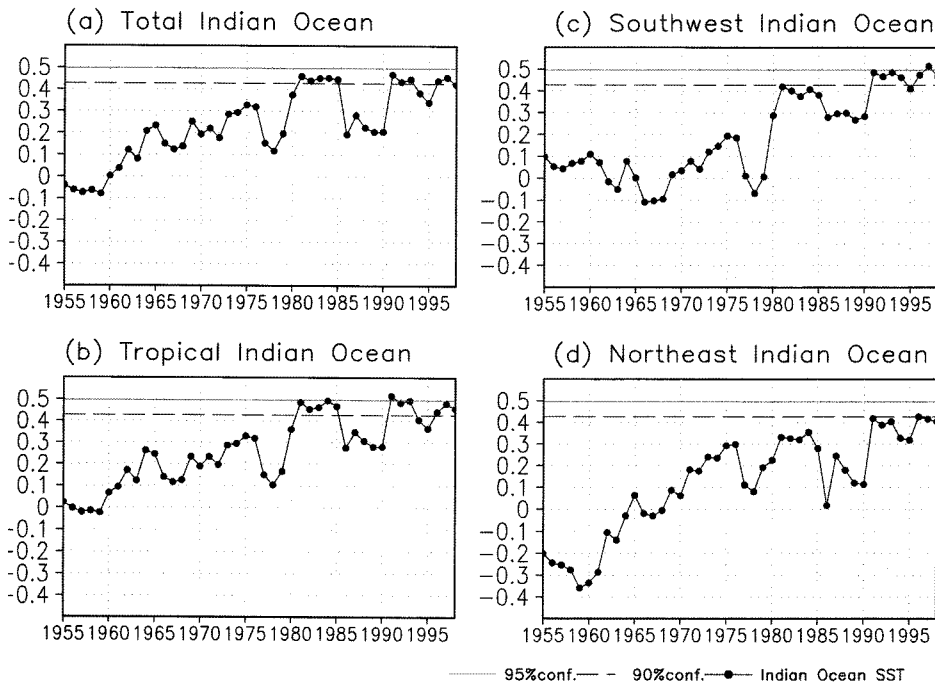


Fig. 3. Same as Fig. 2 except for Indian Ocean SST of areas (a) IO (20°S-20°N, 40°E-100°E), (b) TIO (10°S-10°N, 50°E-90°E), (c) SWIO (15°S-Eq, 50°E-70°E), and (d) NEIO (Eq-20°N, 80°E-100°E) in MAM.

90% 이상인 영역으로 정의하였다. 각 영역은 Fig. 1의 NEIO(적도-20°N, 80°E-100°E), TIO(10°S-10°N, 50°E-90°E), SWIO(10°S-적도, 50°E-70°E)이다.

인도양 해수면 온도의 장주기 변동성

이동 평균 상관

Fig. 2는 인도양 해수면 온도와 동아시아 여름강수 편차(검정색 실선)/북서태평양 몬순지수(회색 실선)에 대해 이동 평균(Sliding) 상관계수를 구한 것이다. 인도양 해수면 온도는 동아시아 몬순에 대해서 양의 상관을 보이고 Tao and Chen, 1987; Zhang and Sumi, 1999 북서태평양 몬순에 대해서는 음의 상관을 보여주고 있다(Wu and Wang, 2002). 각각의 경우에서 1970년대 중·후반을 기준으로 EASRA와 양의 상관성이 급격히 증가하고 WNPMI와 음의 상관

성은 급격히 감소하는 것을 볼 수 있다. 즉 1970년대 후반을 기점으로 기후 변화가 있었음을 알 수 있다. 이미 이러한 기후 변화관계는 ENSO와 각 지역 몬순 지수와의 이동평균 상관관계에서도 나타나고 있다(Wu and Wang, 2002; Nitta and Hu, 1996). 인도양의 경우 겨울철부터 여름철까지 모든 경우에서 기후 급변(Jumping)을 잘 보여 주고 있지만 Nino3 지수의 경우 EASRA와의 상관성이 Fig. 2e에서처럼 1970년 이전에 기후변이가 나타나거나 Fig. 2f에서처럼 동시 상관이 유의수준 95% 이하로 떨어져 나타나기도 한다. 이는 1970년 중·후반 이후에는 Nino3와 연관된 동태평양 영역보다 인도양과 서태평양이 동아시아 몬순과 더 큰 상관관계가 있음을 암시하고 있다. 한편 후반기의 봄철 인도양 해수면 온도와 봄철 Nino3 지수는 각각 EASRA에 큰 상관성을 보이고 있지만 1985~1990년 사이의 기간에는 이동평균 상관계수가

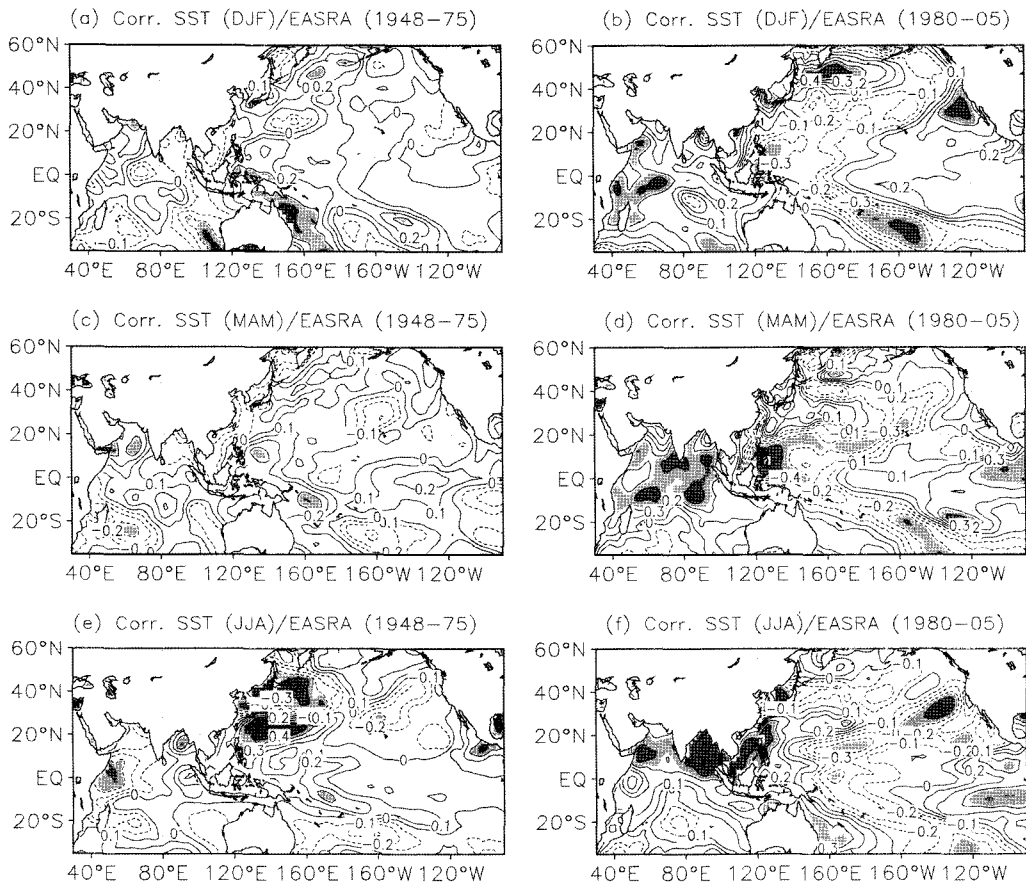


Fig. 4. Correlation maps between SST of DJF (a, b) and East Asia summer rainfall anomaly (EASRA/JJA), SST of MAM (c, d) and EASRA/JJA, and SST of JJA (e, f) and EASRA/JJA. Dark shading areas represent 95% confidence level and light shading area 90% confidence level.

90% 신뢰수준에 못 미치고 있다. 그러나 수십년주기 (interdecadal) 변화의 기준점을 1970년대 중·후반이라고 하면 Table 1의 결과로부터 1980년에서 2005년까지의 기간에 동아시아 몬순과 인도양 해수면 온도의 장주기 변동성이 95% 이상의 신뢰수준으로 변동하고 있음을 알 수 있다. 전반기 28년, 후반기 26년, 전체기간 58년에서의 통계적 유의수준 검사를 위한 자유도(N-1)는 각각 27, 25, 57이다. 이에 해당하는 90% 신뢰수준의 상관계수는 0.313, 0.331, 0.217이며 95% 신뢰수준의 상관계수는 0.373, 0.388, 0.259이다. Table 1에서 **는 95% 신뢰수준 이상을 *는 90% 신뢰수준 이상을 나타낸다. 또한 여름철 인도양 해수면 온도를 사용하여 동시 상관성을 분석한 결과, 인도양 해수면 온도가 후반기에 EASRA와 높은 양의 상관성을, 그리고 WNPMI와는 음의 상관성을 뚜렷하게 보여주고 있다(Table 미제시). 이것은 EASRA와

WNPMI이 서로 음의 상관관계를 보이는 것과 일치한다(Lee et al., 2005).

Fig. 3은 인도양을 특정 지역별로 나누어 볼 때 동아시아 몬순과 인도양 해수면 온도 변동이 어떻게 지역별로 다르게 나타나는지 보여준다. 영역 TIO와 SWIO는 봄철의 해수면 온도가 EASRA와 상관성이 높은 영역이며 영역 NEIO는 여름철의 동시 상관성이 높은 영역이다. Fig. 3a에서 보이는 1970년대 중·후반의 수십년주기의 기준점이 Fig. 3b와 Fig. 3c에서 더욱 뚜렷하게 나타난다. 특히 인도양 해수면 온도 변동성을 국지적으로 가장 잘 대변하는 남서인도양 영역에서(Klein et al., 1999) 이러한 수십년주기의 변동성이 가장 잘 나타나고 있다. 동아시아 몬순과 전·후반기의 상관성을 조사한 결과가 Table 1에 요약되어 있다. 1948년부터 2005년까지의 전체 기간과 1948년부터 1975년까지의 전반기에서는 EASRA와

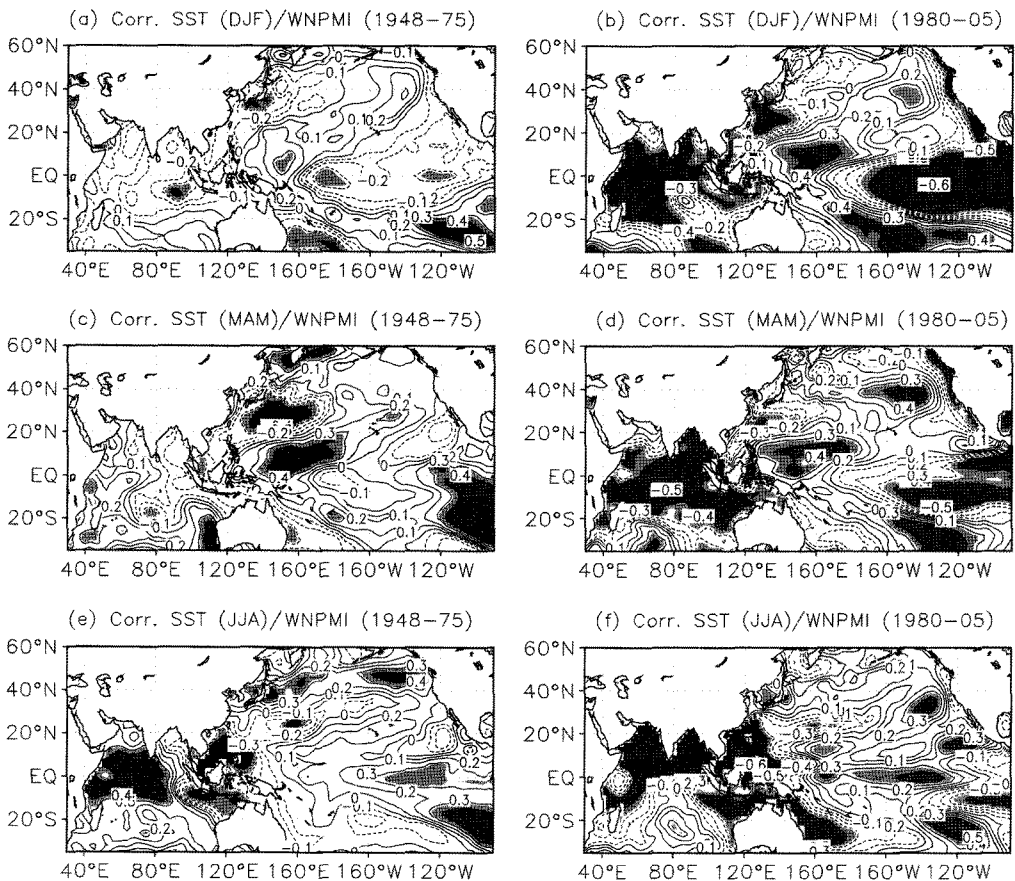


Fig. 5. Correlation maps between SST of DJF (a, b) and western North Pacific monsoon index (WNPMI/JJA), SST of MAM (c, d) and WNPMI/JJA, and SST of JJA (e, f) and WNPMI/JJA. Dark shading areas represent 95% confidence level and light shading areas 90% confidence level.

인도양 해수면 온도의 동시 상관성이 각각 0.27과 0.08로 신뢰수준 90%에 못 미치는 값을 갖지만 1980년부터 2005년의 후반기 기간에서는 신뢰수준 95% 이상의 값을 유지하고 있다. 또한 Nino3와 비교해 보면 Nino3는 신뢰수준 90%에 못 미치는 반면 인도양의 경우 모든 영역에 걸쳐서 해수면 온도와 동아시아 몬순의 상관성이 높다. 따라서 기후 변이에 대한 확실한 비교를 위해 전반기와 후반기의 중간점이 되는 1976년~1979년의 자료는 제외하고 1948년부터 1975년까지를 전반기, 1980년부터 2005년까지를 후반기로 하여 비교 모델 실험을 하였다.

공간 상관 관계

Fig. 4는 겨울철(DJF)와 봄철(MAM)의 해수면 온도 아노말리와 EASRA의 상관계수에 대한 공간적인 분포를 보여준다. 겨울철의 경우에 전반기에는 인도양 해수면 온도와 EASRA 사이의 상관성이 거의 없지만 후반기에는 서부 인도양에서 상관성이 크게 증가하였다. 이러한 전·후반기의 상관 관계의 변화는 봄철과 여름철(JJA)에도 유사한 공간적인 패턴을 보여주고 있다. Figs. 4c와 4d를 보면 봄철의 경우 적도 영역을 중심으로 하여 인도양 전체 영역에서 해수면 온도와 EASRA이 큰 양의 상관성을 보여주고

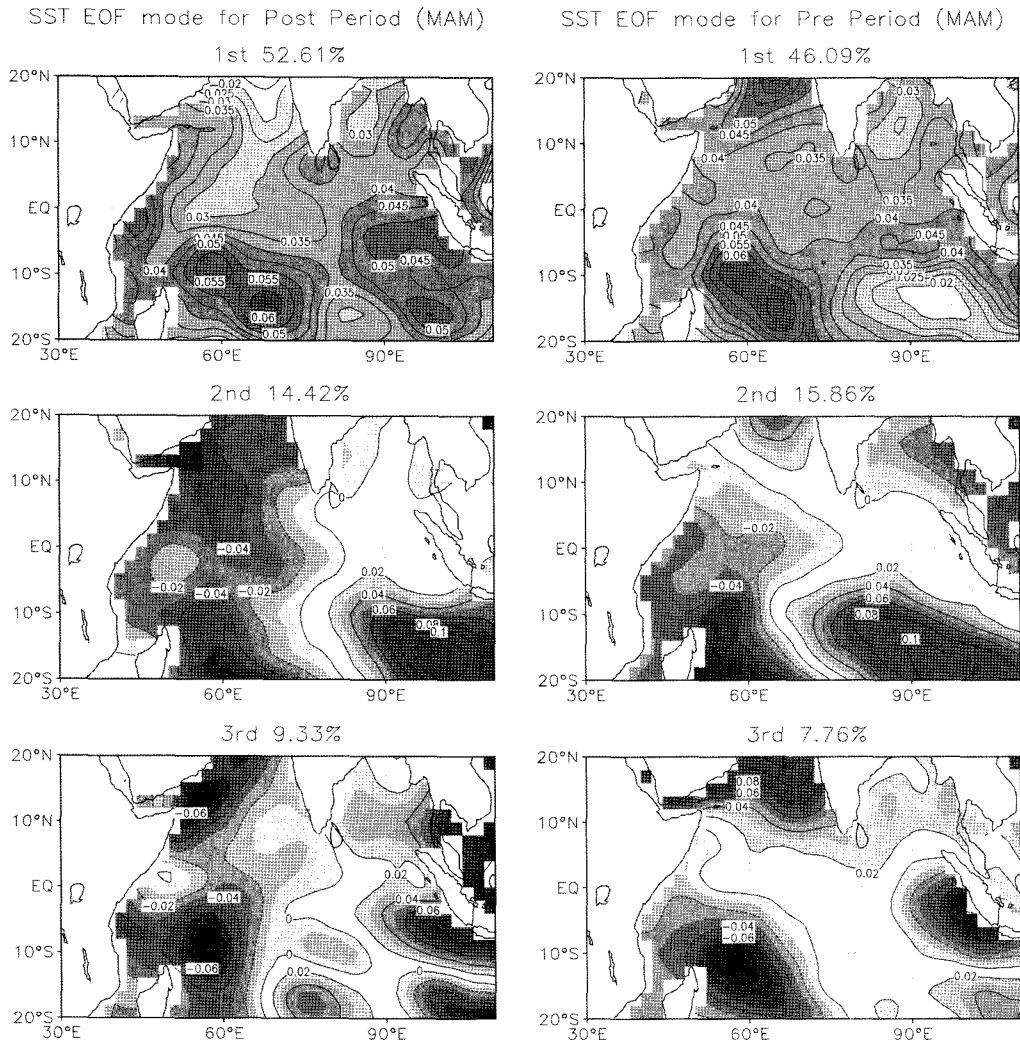


Fig. 6. The first three EOF modes in MAM for 1948-1975 (left panels) and for 1980-2005 (right panels). Units are nondimensional and the contour intervals is 0.02.

있으며 EASRA는 북서태평양 영역의 해수면 온도와 강한 음의 상관 관계로 바뀌었음을 알 수 있다. Figs. 4e와 4f는 여름철의 공간패턴을 보여주고 있다. 후반기에는 특히 벵갈만 지역을 중심으로 한 북부 인도양 해수면 온도와 상관성이 크게 나타나고 있다. 이 지역은 북서태평양의 필리핀 열도 지역과 함께 대류 중심이 위치하는 곳이다(Wang and Fan, 1999). 따라서 전반부보다 후반부 여름철 인도양 대류활동이 활발해졌고 이로 인해 북서태평양 몬순과 동아시아 여름철 몬순에 큰 영향을 주었다고 판단된다. 인도양 해수면 온도의 상승 효과가 벵갈만 지역의 대류에 어떠한 영향을 주는지는 본 연구의 5절에서 수치실험을 통하여 분석하였다. 한편 우리나라 근처의 해수

면 온도와 상관성은 후반기에 많이 약해졌음을 볼 수 있다. 한편 기후 변동의 특징은 EASRA와 해수면 온도의 상관관계뿐만 아니라 북서태평양 몬순 지수와 해수면 온도의 공간 상관 관계에서도 뚜렷이 나타남을 알 수 있다(Fig. 5). 특히 후반기에 WNPMI가 인도양 해수면 온도와 음의 상관관계가 크게 높아졌다. 결과적으로 동아시아 여름몬순과 북서태평양 여름몬순은 ENSO에 의한 장주기 변동보다는 인도양에 의한 장주기 변동에 의해 더 큰 영향을 받아 왔다고 할 수 있다.

경험적 직교 함수 분석을 통한 수십년주기 변동
일반적으로 인도양 해수면 온도를 경험적 직교 함

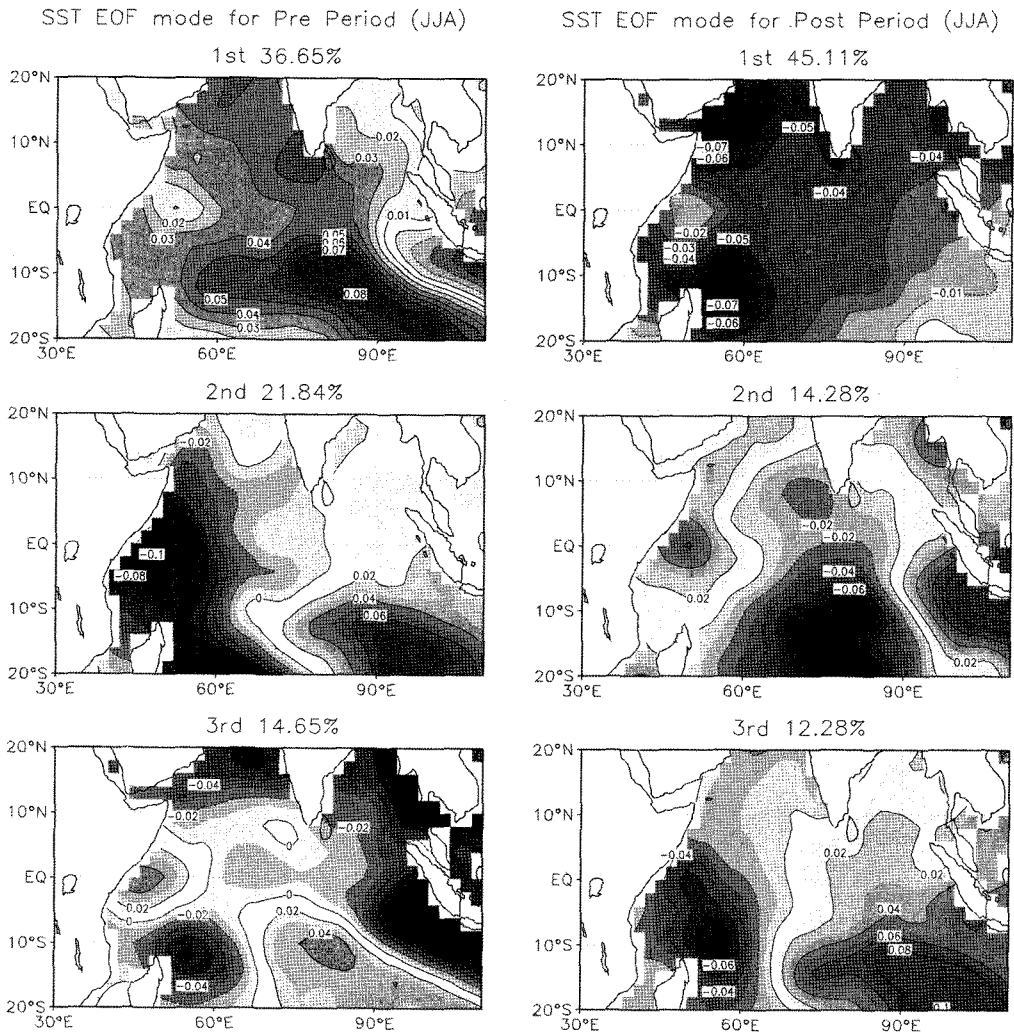


Fig. 7. Same as Fig. 6 except for JJA.

수(EOF)로 분석하면 첫 번째는 총체(basin) 모드, 두 번째는 동서방향의 양극 모드, 세 번째는 남북방향의 양극 모드가 얻어진다. Fig. 6에서 보듯이 봄철 인도양 해수면 온도의 첫 번째 모드는 전·후반기에 유사한 패턴을 보여주고 있으나 두 번째와 세 번째 모드는 바뀌어 나타난다. 따라서 봄철의 인도양 해수면 온도가 후반기에 동아시아 몬순에 영향을 많이 준 것은 EOF 첫 번째 모드의 변화보다도 두 번째 모드의 특성 변화에 의해 발생되었을 것으로 생각된다. 즉 후반기에는 동서방향 양극 모드의 영향이 더 강해진 것으로 보인다. 여름철의 경우에는 전·후반기 EOF 패턴에 큰 변화가 있음을 알 수 있다(Fig. 7). 전반기에는 첫 번째 모드의 중심핵이 남동인도양에 치우쳐 있지만 후반기에는 그 중심핵이 남서인도양과 북서인도양에 나타나고 있다. 또한 봄철과는 반대로 전반기에는 동서방향의 양극 모드가 두 번째 모드였지만 후반기에는 세 번째 모드로 나타난다.

1970년대 중·후반 이후 평균장의 변화

Fig. 8은 500 hPa 지오폠펀셜고도 등고선 중 5850

gpm~5880 gpm 사이의 등고선만을 나타낸 것이다. 5880 gpm의 등고선이 둘러싸고 있는 부분을 북태평양 양고기압의 중심 영역으로 보면 전반기에 비해 후반기에 6, 8월의 북태평양고기압 확장이 뚜렷하게 나타나고 있으며, 5850 gpm 등고선과 연관된 북태평양고기압의 영향권이 6, 7, 8월 모두 대륙쪽으로 확장해 있다. 따라서 전반기보다 후반기에 동아시아 지역에 북태평양고기압의 영향이 크게 작용했음을 알 수 있다. 이와 같이 북태평양고기압 확장은 동아시아 강수 패턴과 중국북부, 양쯔강-일본 동서편, 중국 남부에 각각 양, 음, 양의 상관성을 갖는다(Wu and Wang, 2002).

이러한 북태평양고기압의 확장으로 전반기에 비해 후반기에 동아시아 영역에서의 강수 밴드 패턴이 더 강하게 나타난다. Fig. 9를 보면 남중국으로부터 한 반도를 거쳐 일본에 이르는 지역에 강수밴드의 활성화가 뚜렷이 보이며, 중국 북동부 지역은 더욱 건조해졌음을 볼 수 있다. Table 2에서 동아시아 몬순 지역(30°N-50°N, 110°E-145°E)에서의 실제 강수량을 전·후반기 나누어 살펴보면 전체 강수량의 차이가 크지 않다. 따라서 강수량 변화의 큰 특징은 동아시아 몬순지역내에서 강수가 증가한 지역과 감소한 지

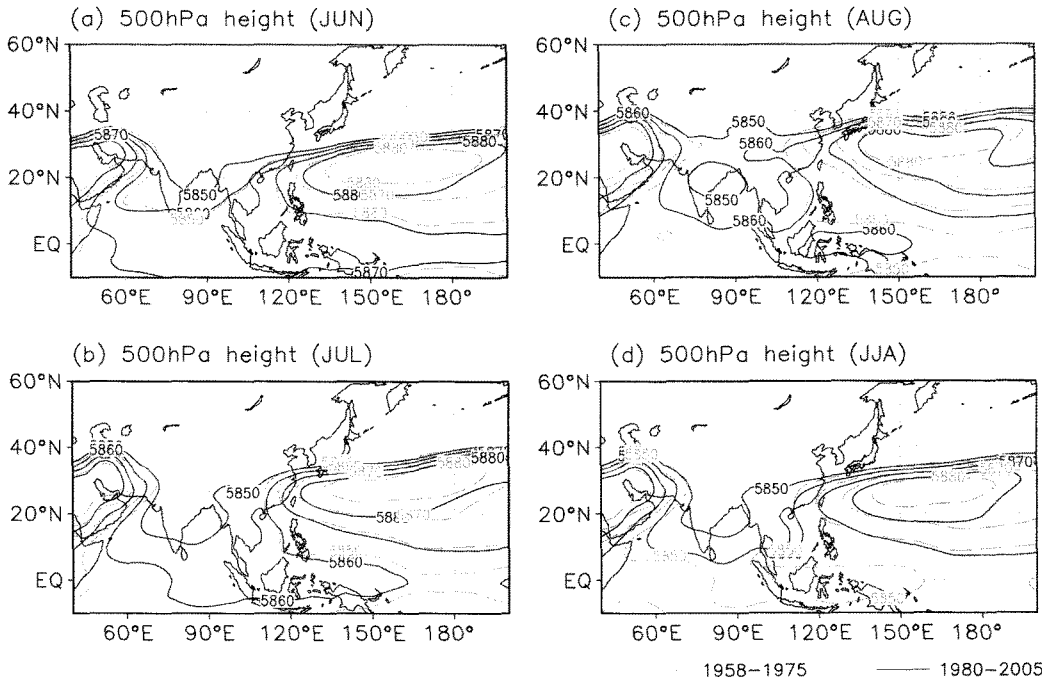


Fig. 8. 500hPa geopotential height fields for (a) June, (b) July, (c) August, and (d) JJA from observations. Solid black contours are for the post-period and dashed grey contours for the pre-period.

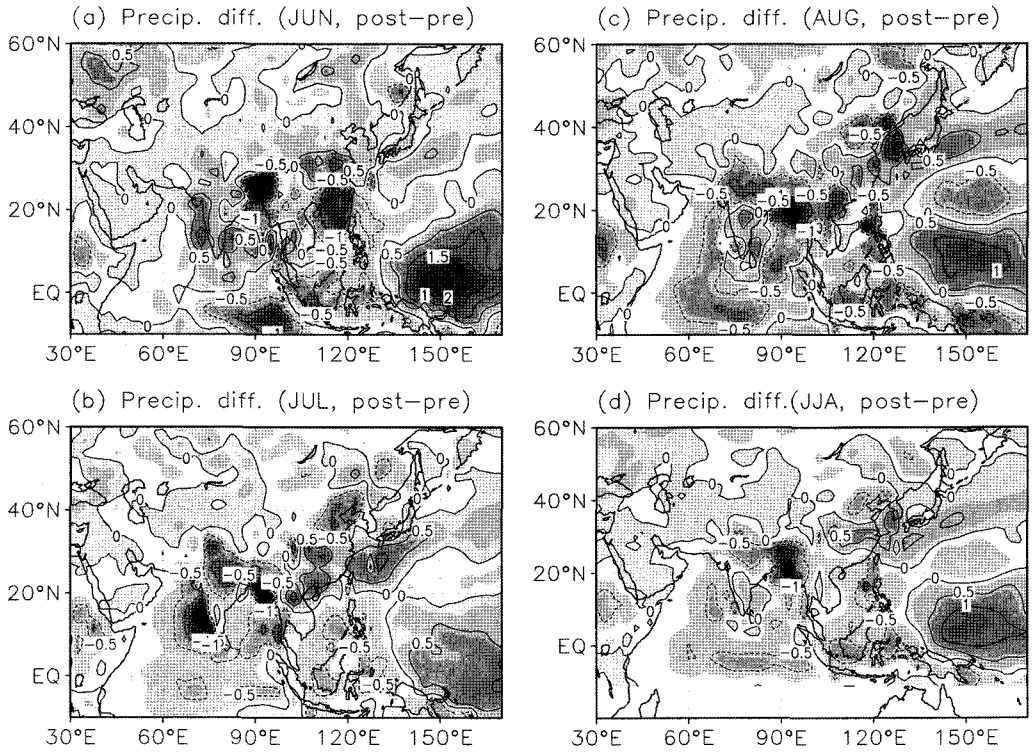


Fig. 9. Differences of precipitation between the post-period and the pre-period for (a) June, (b) July, (c) August, and (d) JJA.

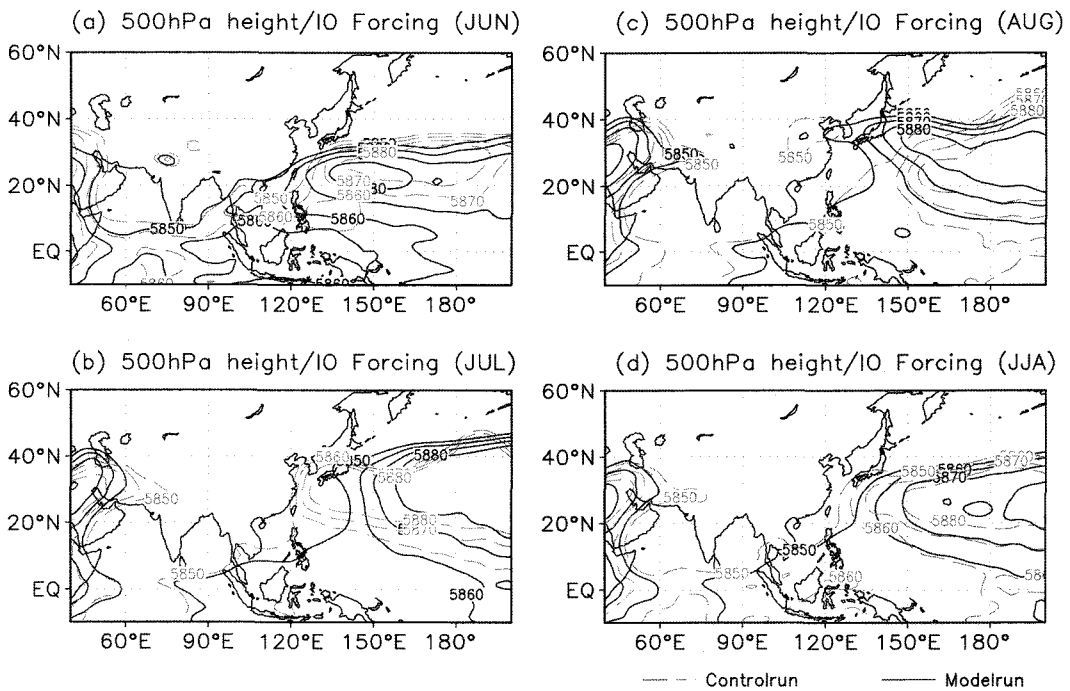


Fig. 10. Same as Fig. 8 except from IO forcing experiments.

Table 2. Precipitation averaged for EASRA region of (30°N-50°N, 110°E-145°E). Unit is mm/day.

	June	July	August	JJA
1948~1975	4.25	5.00	4.40	4.55
1980~2005	4.31	4.90	4.50	4.57

역으로 나뉘어진다는 것이다. 또한 대륙과 해양의 온도차가 후반기 들어 크게 증가하였고 이에 따라 아시아 대륙 동안의 상층 동서방향 풍속이 후반기에 크게 증가하였다(그림 미제시). 이러한 바람장의 강화는 인도 몬순의 강화로 이어지며(Kumar et al., 1999) 또한 동아시아 몬순 지역의 강수량 증가와 밀접하게 관련되어 있다(Lee et al., 2005). 특히 상층 풍속은 중국남부 및 한반도와 일본남부를 걸치는 강수 밴드 지역에서 크게 증가하였다.

수치 실험

서울대학교 대기대순환 모형

서울대학교 대기대순환 모형(SNUAGCM)은 Kim (1999)에 의해서 개발되었다. 이 모형은 T42의 수평

해상도(~2.8×2.8)를 가지는 전구 스펙트럴 모델이다. 연직으로는 20개의 시그마(σ)층으로 이루어져 있으며 일본 도쿄 대학의 CCSR/NIES AGCM을 기반으로 하고 미국 국립대기연구소(NCAR)의 지표면 모델과 non-local PBL/vertical diffusion scheme 등이 추가되었다. 대기 모델의 자세한 물리 과정들은 Kim(1999)에 나타나있다. 물리과정의 모수화에는 두 흐름(two-stream) k 분포 함수를 갖는 복잡한 복사과정 체계, 간단화한 Arakawa-Shubert 체계, 예단 구름 체계, 구름효과를 갖는 난류종결체계, 지형 중력과 저항, 간단한 지표면 과정 등이 포함되어 있다.

실험 방법

본 실험에서는 Fig. 1에서 이미 정의된 영역을 해수면 온도 강제력(forcing) 영역으로 하였다. 강제력 값은 임의의 값을 주지 않고 수십년주기변화에 해당하는 후반기 해수면 온도에서 전반기 해수면 온도의 차이를 모델 강제력으로 주었다. 실제 인도양 해수면 온도는 계속 증가하는 추세였지만 실제 공간별로 수십년주기의 변화에 해당하는 해수면 온도를 주었으므로 해수면 온도 변동에 의한 AGCM의 실험 결과를 얻

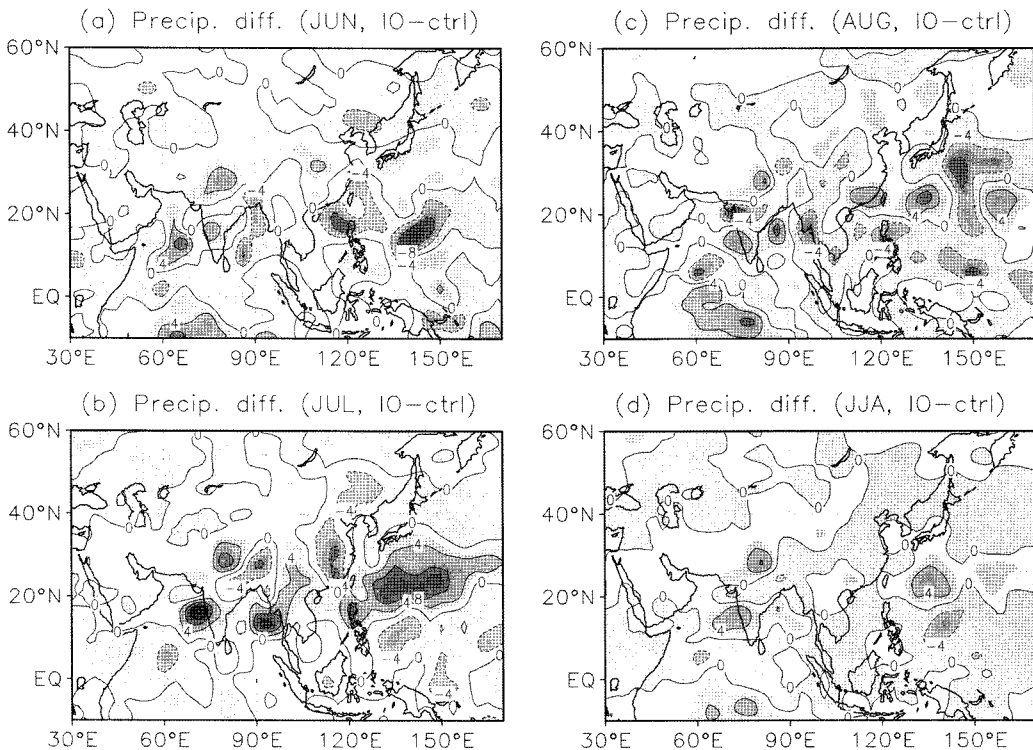


Fig. 11. Precipitation differences (model run minus control run) for (a) June, (b) July, (c) August, and (d) JJA. Unit is mm/day.

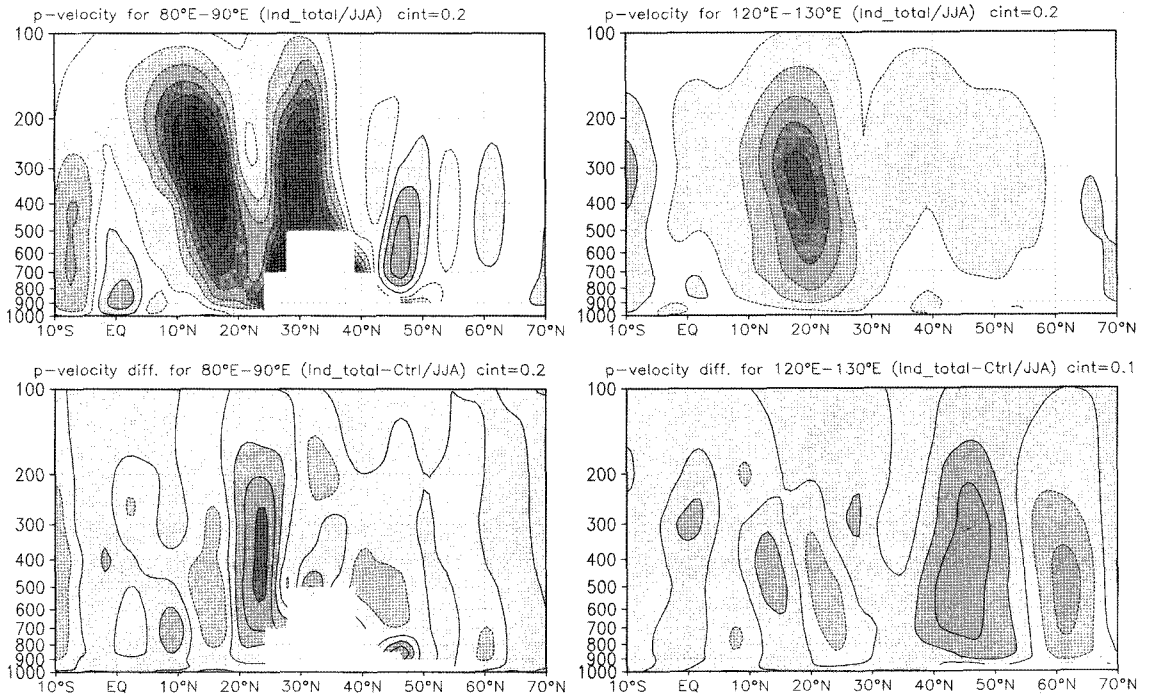


Fig. 12. P-velocity (upper panels) and differences of p-velocity (lower panels) for two convection centers (80°E-90°E, 20°N-30°N) and (120°E-130°E, 10°N-20°N) for IO forcing from the model run.

을 수 있다. AMP(Atmospheric Model Intercomparison Project)을 기준으로 3월 1일부터 8월 31일까지 수십 년주기 차이 값에 해당되는 해수면 온도 강제력을 주어 6개의 앙상블 결과값을 얻었다.

실험 결과

Fig. 10에서 500 hPa 지오폠펜셜 고도의 모델 결과 값을 보면 5880 gpm에 해당하는 북 태평양고기압이 8월에 확장하는 모습이 실제 기후 변화 패턴과 유사함을 알 수 있다. 따라서 인도양 해수면 온도 변화는 동아시아 여름 몬순의 변동에 대한 주요한 원인 중의 하나라고 생각된다. 특히 8월 5880 gpm 등고선의 형태가 북쪽으로 올라와 있고 5850 gpm 등고선이 대륙쪽으로 올라와 있는 것은 실제 관측값과 매우 유사함을 알 수 있다. 그러므로 인도양 해수면 온도 변화는 특히 8월의 동아시아 기후 변동에 큰 영향을 줄 수 있을 것으로 생각된다.

Fig. 11에서 보면 전체 인도양의 전·후반기 해수면 온도 차이에 해당하는 강제력의 효과는 특히 6월과 8월에 우리나라 강수를 증가시키는데 기여한 것으로 보인다. 앞 4절의 전·후반기의 강수 패턴 효과(Fig.

9)와 비교해 보면 우리나라 북쪽의 중국지방에 건조 효과를 더욱 강화시키고 남중국과 한반도, 일본을 잇는 강수 밴드 연결 그리고 8월 강수의 증가 등의 패턴이 실제 1970년대 중·후반기 기후변화 패턴과 유사함을 알 수 있다. 8월 강수의 증가는 북서태평양 쪽의 태풍의 발생과도 연관지어 볼 수 있는데 강수량 증가 지역이 태풍발생의 영향지역일 가능성도 있다. 따라서 인도양 해수면 온도 증가가 태풍발생 증가의 원인이 될 수 있는가에 대한 연구가 필요할 것 같다.

Fig. 12에서 붉칠 p-속도 연직 구조를 보면 인도양 해수면 온도 상승으로 인해 벵갈만 지역의 대류 중심이 강화되고 이에 반대 현상으로 북서 태평양 필리핀 부근의 대류 중심도 강화됨을 알 수 있다(Wang and Fan, 1999). 따라서 인도양 해수면 온도 강제력으로 인도양-북서태평양으로 잇는 위키 순환이 강화되고 북서태평양-동아시아 지역을 잇는 해들리 순환이 강화되는 효과를 확인할 수 있다(Kawamura et al., 2001; Wang et al., 2001; Lee et al., 2005). 이러한 두 개의 대류 중심의 강화 효과는 해면기압 변화에서도 확인할 수 있는데 특히 한반도 남부와 일본

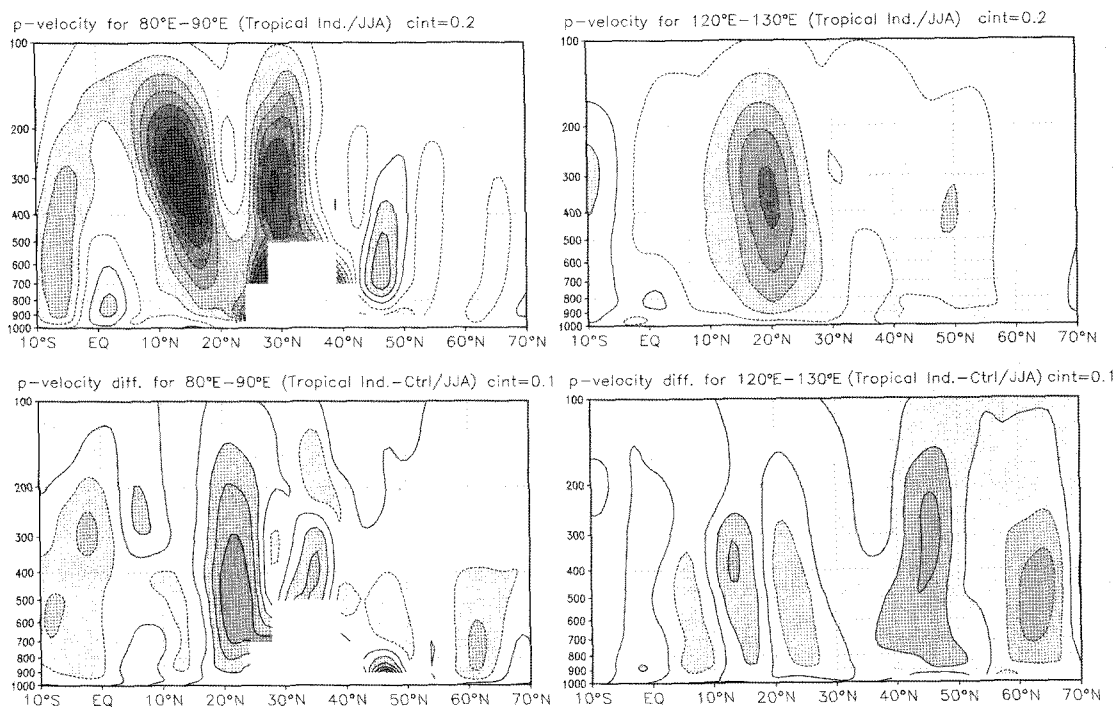


Fig. 13. Same as fig. 12 except for TIO forcing.

남부를 잇는 해양 지역에서의 변동폭이 가장 크게 나타났고 이로 인한 해면기압의 하강효과가 일본 남부 지역에 있음을 확인할 수 있다(그림 미제시). 여름철의 경우에도 Fig. 13에서처럼 인도 지역의 대류 축인 (80°E-90°E, 10°N-25°N)에서의 강한 상승효과를 확인할 수 있고 이로 인한 북서태평양의 (120°E-130°E, 10°N-20°N)에서의 대류도 강화되는 것을 볼 수 있다. 또한 전반적으로 중위도 지역에서는 강한 침강의 효과가 발생하는 것으로 나타났다. 그러나 동아시아여름 몬순의 경우 북서태평양 몬순의 순환에 의해 큰 영향을 받으므로 북서태평양 비정상 대류는 동아시아 여름 몬순에 비정상적인 형태를 가져온다고 생각된다(Wang et al., 2001).

요약 및 결론

인도양 해수면 온도는 1970년 중·후반이후 동아시아 여름 몬순 및 북서태평양 몬순과 큰 상관성을 보여 주었다. 전반기의 인도양 해수면 온도는 동아시아 여름 강수량 편차, 북서태평양 몬순지수와 상관관계가 거의 없었지만 후반부에서는 인도양 전부분에 걸쳐 상관관계가 크게 증가하였다. 인도양 해수면 온도

와 동아시아 몬순과의 상관관계는 봄철과 여름철 각각 지역적으로 차이를 보였다. 봄철의 경우에는 적도 인도양을 중심으로 높은 상관성을 보인 반면 여름철의 경우에는 벵갈만 근처의 인도양에서 높은 상관성을 보였다. 인도양 해수면 온도의 수십년주기의 변동성은 ENSO의 변동성보다 동아시아 여름 강수편차에 상관성이 더 높게 나타나고 있다. 따라서 ENSO보다는 인도양 해수면 온도의 변동성이 동아시아 여름몬순에 더 큰 영향을 줄 수 있을 것으로 생각된다.

실제 관측값의 전·후반기 차이를 보면 여름철의 북서태평양 고기압의 확장과 동아시아 강수 지역의 집중화를 볼 수 있다. 즉 북서태평양의 확장으로 인해 동아시아 강수의 가능성은 높아졌지만 실제 동아시아 여름철 강수는 중국 남부·한반도·일본 남부의 강수 띠를 중심으로 강수량이 증가하였고 산동반도와 북부 중국의 경우에는 강수량이 감소하였다.

인도양 해수면 온도의 수십년주기의 변동성 차이(후반기 해수면 온도 minus 전반기 해수면 온도)를 모델의 강제력으로 주고 AGCM 실험을 수행하여 그 결과를 비교하였다. 모델 실험 결과 실제 전·후반기 강수량의 차이 패턴인 동아시아 북부의 강수 감소, 한반도와 일본 남부의 강수 증가, 중국남부의 강수

증가의 패턴이 보였다. 특히 8월의 북서태평양 고기압의 확장으로 인한 강수의 증가는 실제 기후변화 차이를 나타내었다. 인도양 해수면온도 증가는 중국 북부의 상층 바람을 증가시키는 역할을 하며 이로 인한 강수 증가의 효과가 여름 동아시아에 나타날 수 있다고 판단된다. 또한 인도양 해수면 온도 증가가 벵갈만-인도양과 북서태평양의 대류 중심을 더욱 강화시키는 역할을 하여 북서태평양에는 고기압성 기류를 강화시키고 동아시아 지역에서는 저기압성 기류를 강화시키는 역할을 하였다.

인도양 해수면 온도의 경우 봄철의 해수면온도와 동아시아 여름몬순의 관계가 큰 상관성을 갖는다. 그러나 실험에 사용한 AGCM을 사용하여 봄철의 인도양 해수면온도가 한 계절 후의 동아시아 여름몬순에 미치는 영향을 완벽하게 설명하기는 어렵다. 따라서 CGCM 등 다른 모델을 사용하여 어떻게 봄철 인도양 해수면온도가 동아시아여름몬순에 영향을 주는지에 대한 세부적인 메커니즘을 파악하기 위해 더 깊은 연구가 필요하다.

사 사

이 연구는 기상청 기상지진기술개발사업(CATER 2006-4205)과 두뇌한국21사업의 지원으로 수행되었습니다. 논문을 면밀히 검토해주신 부산대 하경자 교수님과 익명의 심사자분께 감사드립니다.

참고문헌

- Annamalai, H., Liu, P., and Xie, S., 2005, Southwest Indian Ocean SST variability: Its local effect and remote influence on Asian monsoons. *Journal of Climate*, 18, 4150-4167.
- Chang, C., Harr, P., and Ju, J., 2001, Possible roles of Atlantic circulations on the weakening Indian monsoon rainfall-ENSO relationship. *Journal of Climate*, 14, 2376-2380.
- Chen, M., Xie, P., Janowiak, J.E., and Arkin, P.A., 2002, Global land precipitation: A 50-yr monthly analysis based on gauge observations. *Journal of Hydrology*, 3, 249-266.
- Ha, K.J., Park, S.K., and Kim, K.Y., 2005, On interannual characteristics of climate prediction center merged analysis precipitation over the Korean peninsula during the summer monsoon season. *International Journal of Climatology*, 25, 99-116.
- Ho, C.H., Lee, J.Y., Ahn, M.H., and Lee, H.S., 2003, A sudden change in summer rainfall characteristics in Korea during the late 1970s. *International Journal of Climatology*, 23, 117-128.
- Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., Deaven, D., Gandin, L., Iredell, M., Saha, S., White, G., Woollen, J., Zhu, Y., Leetmaa, A., Reynolds, B., Chelliah, M., Ebisuzaki, W., Higgins, W., Janowiak, J., Mo, K.C., Ropelewski, C., Wang, J., Jenne, R., Joseph, D., 1996, The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bulletin of American Meteorological Society*, 77, 437-470.
- Kawamura, R., Matsuura, T.I., and Iizuka, S., 2001, Role of equatorially asymmetric sea surface temperature anomalies in the Indian Ocean in the Asian summer monsoon and El Nino Southern Oscillation coupling. *Journal of Geophysical Research*, 106, 4681-4693.
- Kim, J.K., 1999, Parameterization of land surface processes in an atmospheric general circulation model. Ph. D. thesis, Seoul National University, Seoul, Korea, 178 p.
- Klein, S.A., Soden, B.J., and Lau, N.C., 1999, Remote sea surface temperature variations during ENSO: Evidence for a tropical atmospheric bridge. *Journal of Climate*, 12, 917-932.
- Kumar, K.K., Rajagopalan, B., and Cane, M.A., 1999, On the weakening relationship between the Indian monsoon and ENSO. *Science*, 284, 2156-2159.
- Lee, E.J., Jhun, J.G., and Park, C.K., 2005, Remote connection of the northeast Asian summer rainfall variation revealed by a newly defined monsoon index. *Journal of Climate*, 18, 4381-4393.
- Nitta, T. and Yamada, S., 1989, Recent warming of tropical sea surface temperature and its relationship to the Northern Hemisphere circulation. *Journal of Meteorological Society of Japan*, 67, 375-382.
- Nitta, T. and Hu, Z.Z., 1996, Summer climate variability in China and its association with 500 hPa height and tropical convection. *Journal of Meteorological Society of Japan*, 74, 425-445.
- Smith, T.M. and Reynolds, R.W., 2004, Improved Extended Reconstruction of SST (1854-1997). *Journal of Climate*, 17, 2466-2477.
- Tao, S.Y. and Chen, L.X., 1987, A review of recent research on the East Asian summer monsoon in China. In Chang, C.P. and Krishnamurti, T.N. (eds.), *Monsoon Meteorology*. Oxford University Press, UK, 60-92.
- Uppala, S.M., Källberg, P.W., Simmons, A.J., Andrae, U., da Costa Bechtold, V., Fiorino, M., Gibson, J.K., Haseler, J., Hernandez, A., Kelly, G.A., Li, X., Onogi, K., Saarinen, S., Sokka, N., Allan, R.P., Andersson, E., Arpe, K., Balmaseda, M.A., Beljaars, A.C.M., van de Berg, L., Bidlot, J., Bormann, N., Caires, S., Cheval-

- lier, F., Dethof, A., Dragosavac, M., Fisher, M., Fuentes, M., Hagemann, S., Hlm, E., Hoskins, B.J., Isaksen, L., Janssen, P.A.E.M., Jenne, R., McNally, A.P., Mahfouf, J.-F., Morcrette, J.-J., Rayner, N.A., Saunders, R.W., Simon, P., Sterl, A., Trenberth, K.E., Untch, A., Vasiljevic, D., Viterbo, P., and Woollen, J., 2005, The ERA-40 re-analysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 131, 2961-3012.
- Wang, B., 1995, Interdecadal changes in El Niño onset in the last four decades. *Journal of Climate*, 8, 267-285.
- Wang, B. and Fan, Z., 1999, Choice of South Asian summer monsoon indices. *Bulletin of American Meteorological Society*, 80, 629-638.
- Wang, B., Wu, R., and Lau, K.M., 2001, Interannual variability of the Asian summer monsoon: Contrasts between the Indian and the western north Pacific-east Asian monsoons. *Journal of Climate*, 14, 4073-4090.
- Watanabe, M. and Jin, F.F., 2002, Role of Indian Ocean warming in the development of Philippine Sea anticyclone during ENSO. *Geophysical Research Letters*, 29, 116/1-116/4.
- Webster, P.J., Magana, V.O., Palmer, T.N., Tomas, R.A., Yanai, M., and Yasunari, T., 1998, Monsoons: Processes, predictability, and the prospects for prediction. *Journal of Geophysical Research*, 103, 14451-14510.
- Wu, R. and Wang, B., 2002, A contrast of the East Asian summer monsoon-ENSO relationship between 1962-77 and 1978-93. *Journal of Climate*, 8, 3266-3279.
- Yun, W.T., Park, C.K., Lee, J.W., Lee, H.S., and Min, S.K., 2001, Analysis of the Korean heavy rainfall in summer 1998. *Journal of the Korean Meteorological Society*, 37, 181-194.
- Zhang, R.H. and Sumi, A., 1999, A diagnostic study of the impact of El Niño on the precipitation in China. *Advances in Atmospheric Sciences*, 16, 229-241.
- Zhang, Y., Wallace, J.M., and Battisti, D.S., 1997, ENSO-like interdecadal variability; 1900-93. *Journal of Climate*, 10, 1004-1020.

2007년 11월 22일 접수
 2008년 1월 4일 수정원고 접수
 2008년 1월 22일 채택