

수평조밀격자 GCM을 이용한 적도 태평양상의 SST anomaly에 대한 대기 반응 연구

문승의 · 안중배 · 김유근

부산대학교 대기과학과
(1995년 3월 16일 접수)

A study on the atmospheric response to a SST anomaly over the Equatorial Eastern Pacific Ocean with the horizontally fine resolution AGCM

Sung-Eui Moon, Joong-Bae Ahn and Yoo-Keun Kim

Department of Atmospheric Sciences, Pusan National University, Pusan, Korea
(Manuscript received 16 March 1995)

Abstract

The atmospheric responses to a Sea Surface Temperature Anomaly(SSTA) over the equatorial eastern Pacific Ocean have been investigated using the horizontally fine resolution model based on OSU 2-layer Atmospheric General Circulation Model(AGCM). The SSTAs during the peak phase of 1982-83 El Niño have been applied to the model as the boundary conditions of the experiment.

The model simulates the eastward movement of the rising branch of the Walker circulation. That is, the major features associated with the El Niño such as the increase of the precipitation rate over the center of the Pacific and decrease over the Indonesia, and the 500hPa geopotential height anomaly in the middle latitude are properly described in the fine resolution model experiment.

The model results indicate that this horizontally fine resolution GCM can successfully simulate the ENSO anomalies and be more effectively used for the study of the climate and the climate changes.

Key Words : El Niño, AGCM, atmospheric general circulation, atmospheric model

1. 서론

지금까지의 엘니뇨/남방진동(El Niño/Southern Oscillation, ENSO)에 관한 많은 연구들에 의하면(예, Philander 등., 1984) 이 현상은 해양과 대기 간의 불안정한 물리적, 역학적 상호작용에 의한

것이다. 일반적으로 이러한 해양과 대기간의 불안정성은 역학적인 상호작용과 더불어 수증기 과정(moisture processes) 등과 같은 물리적 상호작용 등이 비선형적이고 양과 음의 되먹임(feedback)으로 연관되는 복잡한 일련의 현상이므로(안, 1994) 대기 대순환 모형과 같은 도구로써만이 종합적인 분석이 가능하다(Shukla, 1990).

대기 대순환 모형을 이용한 ENSO의 연구와 관련하여 해결해야 할 문제점들 중 가장 중요한 것 중의 하나는 지상변수들의 정확한 모사이다. 이는 대기와 지표면간의 경계를 통한 운동량, 열, 수증기 등의 교환이 해양-대기간의 상호작용을 일으키는 가장 핵심적인 물리적 과정임을 의미한다. 이러한 문제를 해결하기 위한 노력으로서 많은 대기 대순환 모형들의 연직 격자를 증가시킴으로써 대기경계층을 포함한 지상에서의 기온, 바람, 습도 등과 같은 변수들을 정확히 모사하려 하였다. 연직 격자를 증가시킴으로써 기상 변수들의 연직 분포와 수송을 보다 현실적으로 모사할 수 있게 되었음은 의심의 여지가 없다. 그러나 ENSO와 관련하여 연직 격자의 증가와 더불어 또 하나 중요한 것은 적도에 한정된(trap) 적도파의 분해가 적절히 이루어져야 한다는 것이다. 적도 대기에서의 로스비 변형 반경(Rossby radius of deformation)이 약 15° 정도인 것을 감안한다면 기존의 많은 모형들이 갖고 있는 위도 4° 정도의 격자 간격은 적도파의 분해에는 부족한 것이라 본다(Matsuno, 1966). 특히 ENSO 현상과 관련한 전지구적인 대기의 반응을 모사하고자 하는 경우에 적도로 부터의 잉여의 모멘텀, 열과 수증기가 극쪽으로 수송되는 과정은 대단히 중요한데(Holton, 1992), 이 경우 수평적으로 조밀한 모형은 이러한 수송에 따른 고위도에서의 반응을 모사하는데 유리하다. 이러한 수평격자의 조밀화가 중요함에도 불구하고 이에 대한 연구는 최근까지 드물었는데 그 주된 이유는 수치계산적인 어려움 때문이다. 즉 수평격자간격을 현재 모형의 반으로 줄이는데는 4배 이상의 계산 능력과 용량 그리고 경제력이 요구되기 때문이다.

본 연구에서는 엘니노등을 포함한 기후 문제를 이해하고 해결하게 할 수 있는 궁극적인 도구인 대기 대순환 모형을 이용하여 겨울철 엘니노와 관련한 해면 온도의 아노말리(anomaly)에 대한 대기의 변동을 모사하였다. 이 현상과 관련하여 순압 모드와 1차 경압모드가 가장 중요한 역할을 담당한다고 가정하여 가장 간단한 형태의 모형인 2층 모형을 이용하였으며 적도에서의 적도파, 그리고 극쪽에서의 열, 운동량, 수증기 등의 수송을 적절히 모사하기 위하여 수평조밀격자 모형을 사용하였

다. 1982-83 엘니노 기간중 겨울동안의 아노말리를 경계조건으로 하여 그 기간동안의 대기모형의 아노말리 반응을 관측치와 비교하여 분석함으로써 모형의 결과를 이해하였다.

2장에서는 본 연구에서 사용된 대기 대순환 모형의 구조와 경계조건, 그리고 수치 실험 방법에 대해 기술하였고, 3장에서는 평균상태에 대한 모형의 결과와 해수온 아노말리에 대한 대기 반응의 수치실험 결과를 관측치와 비교, 분석하였다. 4장에서는 수치실험의 결과에 대한 이해를 종합하였다.

2. 대기모형의 구조 및 실험방법

본 연구에서 사용한 모형은 Oregon State University(OSU) 2층 대기 대순환 모형(Ghan *et al.*, 1982)을 골격으로 하고 동서방향과 남북방향의 격자 간격을 기존의 $5^\circ \times 4^\circ$ 에서 $2.5^\circ \times 2^\circ$ 로 줄였다(류와 안, 1995). 모형의 구조는 연직적으로는 2개의 층을 갖고 모델의 꼭대기는 200hPa에 위치하며, $\sigma = \frac{1}{4}$ 과 $\sigma = \frac{3}{4}$ 에서 u, v, T, ϕ, q 가 구해지며 $\sigma = \frac{1}{2}$ 에서 σ 의 상승속도, $\dot{\sigma}$ 가 계산되어진다. u, v 는 각각 경도, 위도 방향의 풍속을, T 는 기온, ϕ 는 지위, q 는 수증기 혼합비를 나타내며, $\dot{\sigma}$ 는 σ 의 연직 속도를 나타낸다. 수평조밀화에 따라 이들 경계조건중에서 특히 지형, 지표 형태, 해면 온도와 같은 경계자료를 더 정확히 모형에 입력될수 있다. 본 연구에서는 $1^\circ \times 1^\circ$ 격자 간격을 갖고, 32가지의 형태로 분류된 전지구적 식생분포(Matthews, 1983)로부터 9가지의 지표 형태로 분류하였다. 해면온도는 $2^\circ \times 2^\circ$ 의 격자간격을 갖는 CAC SSTs(The Climate Analysis Center's Sea Surface Temperature data set)로서 1982년부터 1991년까지의 월평균 자료를 이용하였다(Fig. 1).

평균 해면온도와 그것에 해면온도 아노말리가 더해진 El Niño 형태의 해면온도 분포에 대한 대기 반응 실험을 수평조밀격자모형과 비조밀격자모형에 대해 각각 실행하였다. 수치 적분은 11월의

평균상태를 초기조건으로하여 12월 1일 00시부터 시작하여 60일간 적분하였으며, 마지막 30일간의 평균값(즉 1월 평균)을 구하여 관측치와 비교, 분석하였다. 이때 사용된 관측치는 $5^{\circ} \times 4^{\circ}$ 의 격자간격을 갖는 Rand Global Climatology data set이다.

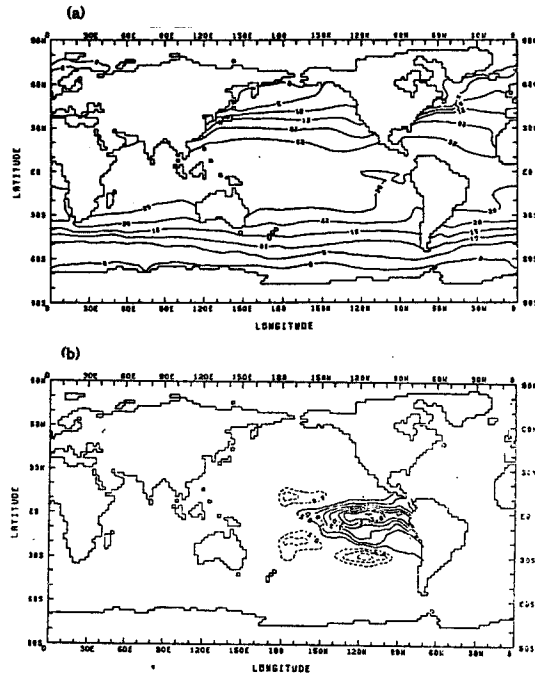


Fig. 1. Distributions of (a) the mean sea-surface temperature(SST, $^{\circ}\text{C}$) and (b) SST anomaly in 1983 for January(from CAC SSTs).

ENSO와 관련한 해면온도 아노말리는 해양과 대기간의 상호작용에 의해 결과적으로 나타난 해양요소중의 하나로서 대기의 변동에 핵심적 영향을 미친다. 따라서 주어진 SST 아노말리를 이용한 ENSO와 관련된 대기 대순환의 변동에 관한 연구들이 많이 있어 왔다.(예, Shukla and Wallace, 1983 ; Lau, 1985). 본 연구에서는 수평조밀격자모형을 이용하여 1982-83년 El Niño의 성숙기간의 해면온도의 아노말리를 사용하여 겨울철 순환을 살펴보았으며 SSTA의 분포를 적도 동태평양에 한정하였다. Fig. 1.(b)는 1983년 1월의 해면온도

아노말리 분포를 나타낸 것이다. 분석에 사용된 관측치로는 $5^{\circ} \times 4^{\circ}$ 수평격자간격을 갖는 ECMWF (European Centre for Medium-range Weather Forecasts) 자료로 1980-89년 까지 10년간의 1월 평균치와 83년의 1월 평균치를 사용하였고, OLR (out going long wave radiation)은 미국 NMC (US National Meteorological Centre)의 자료를 사용하였다.

3. 결과 및 분석

해면온도의 아노말리에 대한 대기의 반응을 보기 위하여 해면온도 아노말리를 주었을때의 모형결과에서 평년의 해면온도에 대한 모형 결과를 뺀것을 각 변수의 아노말리로 하여 비교하였다. 분석 자료로는 해면기압, 강수량의 아노말리를 사용하였고, 북태평양에서 북대서양에 걸쳐 나타나는 PNA(Pacific Northern American)반응을 보기 위해 500hPa 지위고도 아노말리를 사용하였다. 그리고 바람장의 연직평균장과 연직위어장을 통해 대기의 경압성분과 순압성분의 반응을 살펴보았다.

3.1 해면기압

Fig. 2은 해면기압의 아노말리 분포로 각각 (a)는 관측치를, (b)는 조밀격자 모형결과를 나타낸다. ENSO현상의 중요한 지수 중의 하나인 남방지수는 적도 동태평양과 적도 서태평양에서의 기압의 차이로 표현되는데, 엘니뇨 기간동안 음의 값을 갖는 것으로 알려져 있다. 즉 적도 동태평양위에서는 해면기압이 감소하고 적도 서태평양위에서는 해면기압이 증가하는데, 이러한 적도태평양에서의 동서간의 비대칭적 기압분포를 관측과 모형결과는 보여주고 있다. 적도에서와는 달리 중·고위도에서는 뒤에 설명될 500hPa 지위고도(Fig. 4.(b))의 아노말리 분포와 유사하게 나타나고 있는데, 북미 서안에서의 음의 아노말리는 알루산 저기압의 약화를 북대서양에 위치한 저기압 아노말리는 아이슬랜드 저기압의 강화를 의미한다. 북반

구 중위도, 가령 북미 서안과 동안, 북대서양 같은 곳에서의 아노말리 분포도 관측과 비교적 잘 일치함을 볼수 있다. 그러나 상대적인 크기와 우랄산맥 동부에서의 아노말리는 관측과 차이를 보이고 있다. 이는 2층 모형의 한계를 나타내는 결과로서 해면 기압과 같은 지표변수들의 정확한 모사를 위해서는 더 많은 연직모드가 필요하며, 따라서 2층 이상의 다층모형을 사용해야 함을 의미한다.

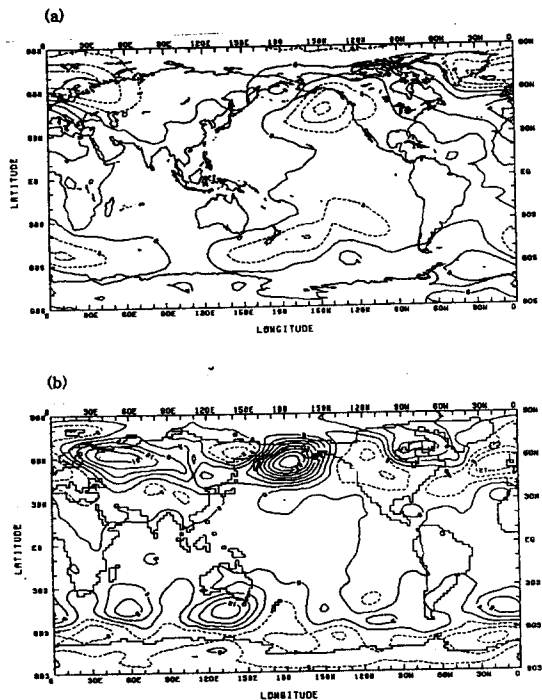


Fig. 2. Sea-level pressure anomalies for (a) observation and (b) simulation.

3.2 지표기온

Fig. 3. (a)는 1982-84년 동안 계절 또는 그 이상의 기간에 걸쳐 기온변동이 심했던 지역을 나타낸 것인데, 빗금친 부분은 82-83년 엘니뇨 기간중 겨울철에 평년보다 온난했던 지역을, 점으로 나타낸 것은 추웠던 지역을 나타낸 것이다. Fig. 3. (b)는 지표기온의 아노말리 분포에 대한 모형결과이다. 전형적인 El Niño기간에 북미의 겨울철에 발생하는 한파와는 달리 1982-83년 El Niño기간에는

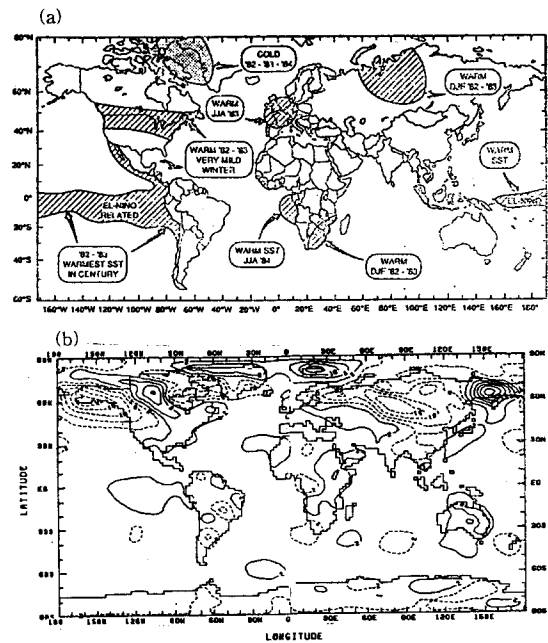


Fig. 3 (a) Selected extreme temperature events that persisted for a season or longer in the 1982-84 period and (after Glantz *et al.*, 1991) and (b) simulated surface air temperature.

북미(35-60° N)의 중부와 유라시아(45-75° N)에서의 예외적인 양의 지표기온 아노말리가 나타났다(Quiroz, 1983). 이러한 관측된 지표기온분포는 모형결과에서도 보여준다. 이는 미국 동부에서의 해면기압상승으로 인한 남서풍 아노말리와 동태평양의 해면기압감소에 의한 대류권 하층에서의 따뜻한 공기의 유입이 북미 중부지역의 지표기온을 상승시킨 것으로 해석된다. 북태평양에서 북대서양에 걸쳐 나타나는 지표기온의 분포는 해면기압의 분포와 유사하게 나타나는 반면, 남반구에서는 해면기압 또는 지위고도의 아노말리에 비해 지표기온의 아노말리는 아주 작게 나타나고 있다. 이는 북반구에서는 해면기압의 아노말리들이 남북방향으로도 큰 진폭을 갖고 있으며 이에따라 고기압 아노말리의 동쪽과 서쪽, 그리고 저기압 아노말리의 서쪽과 동쪽에 각각 한랭기류와 온난기류와 관련된 냉각과 가열 아노말리가 있기 때문이다. 반면, 남반구에서는 해면기압의 아노말리가 비교적 동서방향으로 넓게 퍼져 남북방향의 진폭이 적어 지표온도의 아노말리가 적다.

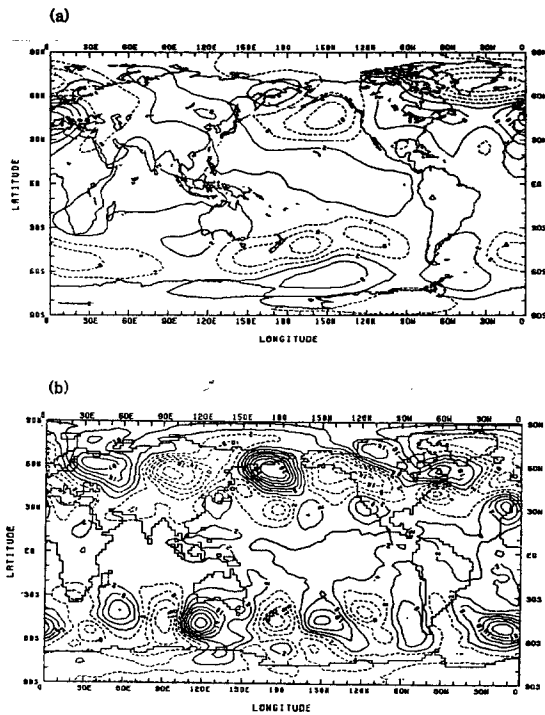


Fig. 4. 500hPa geopotential height anomalies for (a) observation and (b) simulation (Contour interval : 10m).

3.3 500hPa 지위고도

지구대기와 같은 회전하는 유체의 와도 생성원은 로스비파를 생성시킨다. Horel과 Wallace(1981)는 적도의 가열이 있는 곳에서부터 큰 원을 이루며 중위도까지 나타나는 아노말리 분포는 강수량이 증가한 지역의 상층대류권에서의 와도 생성원으로부터 진행되는 준정상(quasi-stationary) 로스비파에 의한 것이라고 결론지었고, Wallace와 Gutzler(1981)는 적도 서태평양에서의 대기 가열에 의해 북태평양, 캐나다 그리고 미국 동부와 서대서양에서 발생하는 아노말리순환을 PNA분포라 하였다. Fig. 4.(a)와 (b)는 500hPa 지위고도의 아노말리로 각각 관측치와 모형결과를 나타낸다. 북미의 서안에서는 음의 아노말리가 존재하고, 중부에서는 양의 아노말리가 대서양까지 뻗어져 있고,

알래스카에서 음의 아노말리가 존재하는 것이 북태평양에서 북대서양에 걸쳐 나타나는 PNA분포와 상당히 유사한 분포를 보이고 있다.

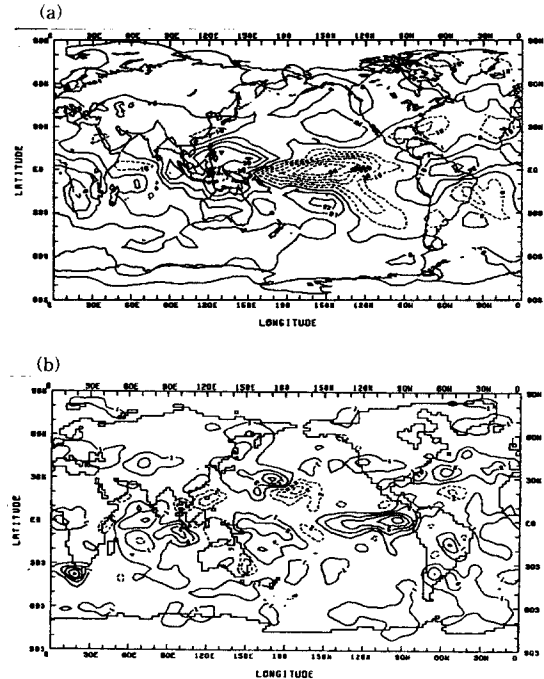


Fig. 5 (a) Observed outgoing longwave radiation anomaly for January in 1983 (Unit : W/m^2) and (b) simulated precipitation rate anomaly in $2.5^\circ \times 2^\circ$ (Unit : mm/day).

3.4 강수량

Fig. 5(a)는 1983년 1월의 관측된 OLR의 아노말리 분포를, Fig. 5(b)는 강수량 아노말리에 대한 모형 결과를 나타낸다. 중위도에서의 강수량의 아노말리는 대규모 응결에 기인한 것인 반면, 적도에서의 강수량의 아노말리는 수증기속(moisture flux) 아노말리의 수렴과 일치하여 나타나는 대류성 강수이다(Mechoso *et al.*, 1987). 따라서 적도에서의 강수량의 분포는 보통 OLR의 분포와 큰 상관 관계를 갖게 되는데, OLR의 음의 아노말리값은 심층대류에 의한 강수량의 증가지역과 거의 일치한다(Fennessy 등, 1985). Fig. 5(a)에 의하면, 적도태평양 전 구역에 심층대류활동이 증가하였으며, 인도네시아와 파푸아뉴기니가 있는 서태평양

지역에서는 대류활동이 감소하였음을 볼 수 있다. Fig. 5(b)에서 나타난 동·중앙 태평양에서의 OLR의 강한 음의 아노말리는 중앙태평양에서 동쪽으로 나타난 강수량의 증가와 일치하며, 인도네시아를 비롯한 서태평양에서의 강수량의 감소도 관측된 OLR의 증가와 잘 일치하고 있다. 이는 ENSO와 관련돼 Walker순환의 상승역이 약화되며, 동쪽으로 이동하였음을 의미한다. 특히 인도네시아를 비롯한 적도 서태평양에서의 강수량의 감소는 해양-대기간의 불안정한 모드에 의해 발생하는 적도 요란은 위도 10° 이내의 수평조밀화에 따라 더 뚜렷해 졌음을 알 수 있었다(그림 생략).

3.5 바람장

3.5.1 발산장

적도 동태평양상의 해면온도가 상승함에 따라 적도태평양상의 동서방향의 온도구배가 감소하게 되고 따라서 Walker순환이 약화될 뿐아니라, 그 상승역이 동쪽으로 이동하게 된다. 이러한 Walker순환은 적도저층에서의 수렴, 발산장과 관계가 있다. Fig. 6은 800hPa에서의 발산장으로, 각각 (a)는 관측치를, (b)는 조밀격자 모형결과를, 그리고 (c)는 비조밀격자모형결과를 나타낸다. 등치선은 velocity potential로 단위는 $1.0 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{sec}$ 이며, 음의 값은 발산역을 양의 값은 수렴역에 해당한다. 관측치의 경우 동태평양에서의 발산장과 서태평양에서의 수렴장으로 크게 두 영역으로 나누어진 분포를 보인 반면, 모형결과들은 특히 중·고위도에서 비교적 작은 규모의 순환들이 나타나고 있다. 그러나 조밀격자의 경우(Fig. 6(b)) 적도 동태평양에서의 수렴아노말리와 오스트레일리아와 인도네시아를 비롯한 서태평양에서의 발산아노말리는 관측과 유사한 분포를 보이는 것으로, Walker순환의 상승역이 동쪽으로 이동하는 것과 관련된 적도 저층에서의 순환 또한 잘 묘사함을 알 수 있다. 비조밀격자의 경우(Fig. 6(c)) 동태평양에서의 수렴장은 나타나지만, 서태평양에서의 발산장이 잘 묘사되지 못하고 있다.

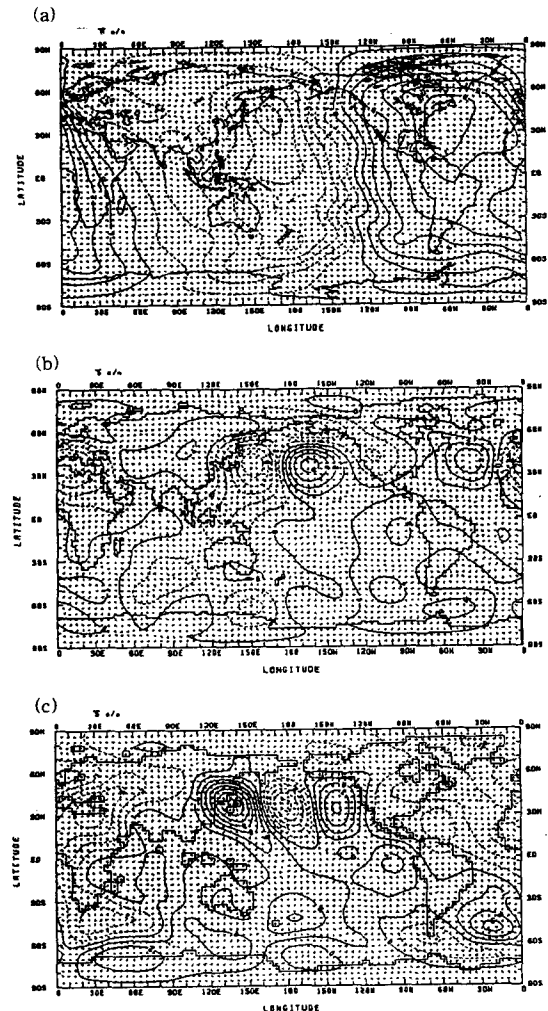


Fig. 6. Anomalies of the velocity potential and the divergent wind at 800hPa for January, (a) observation, (b) simulation n $2.5^\circ \times 2^\circ$ and (c) in $5^\circ \times 4^\circ$.

3.5.2 연직평균장과 연직쉬어장

Fig. 7은 바람의 연직평균장으로 대기의 순압적인 특징을 나타낸다. 이 경우 관측과 모형결과의 공통적인 특징은 중위도에서의 아노말리가 강한 반면, 적도에서의 아노말리들은 약하게 나타난다는 것이다. 또한 북태평양에서 북미대륙과 북대서양에 걸쳐 나타나는 바람장의 아노말리는 PNA분포와 일치하여 나타나고 있다. 즉 PNA 분포에

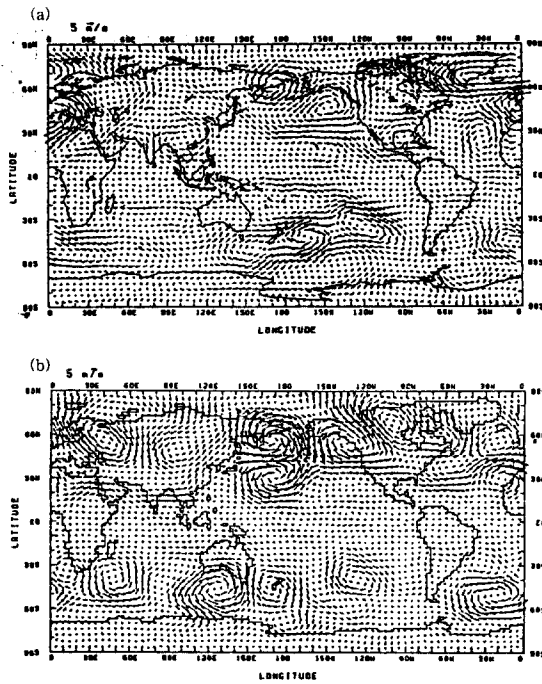


Fig. 7. Vertical means of the wind anomaly($0.5(V_{400}^2 + V_{800}^2)$) for January, (a) observation and (b) simulation.

서 음의 아노말리가 존재했던 북미 대륙의 서안에서는 저기압성 흐름이 양의 아노말리가 있었던 북미 대륙위에서는 고기압성 흐름이 나타나고 있다. 이것은 PNA 분포가 적도대기의 가열에 의해 북동진해 온 순압 로스비파로 나타나는 것이라는 것을 설명해 준다. Fig. 8은 바람의 연직취어장으로 경압적인 특징을 나타낸다. 연직취어장은 400hPa에서의 바람에서 800hPa에서의 바람을 뺀 것이다. 바람장의 경우 모형결과가 관측보다 아노말리의 크기가 좀더 크게 나타나는 경향이 있으나 그 분포의 특징은 관측과 상당히 유사하게 나타났다. 연직취어장의 경우 연직평균장과는 달리 중위도에서의 아노말리들은 상당히 약화된 반면, 적도에서의 아노말리가 비교적 강화되었다. 특히 동, 중앙태평양에서는 두 경우 모두 편동풍 아노말리가 나타나고 있는데, 이것은 강수량의 증가역과 일치하고 있다. 즉, 바람의 수렴아노말리가 나타났던 적도 동태평양에서의 편동풍은 켈빈파의 존재를 의미하며, 이 지역에서의 강수량의 증가는 주로 잠

열방출에 의한 편동풍 지역에서의 켈빈파의 강화와 관련된 것으로 보인다.

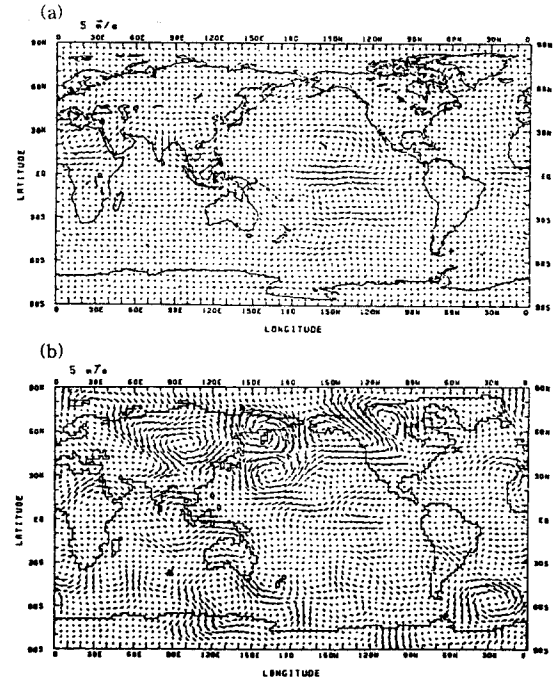


Fig. 8. Vertical shears of the wind anomaly($V_{400}^2 - V_{800}^2$) for January, (a) observation and (b) simulation.

4. 결론

본 연구에서는 엘니뇨/남방진동과 관련한 적도 동태평양에서의 해면온도 아노말리에 대한 대기반응을 수치실험하였고, 그 결과를 관측치와 비교, 분석하였다. 이 현상과 같이 적도의 좁은 영역에서 일어나서 전 지구적인 영역에 영향을 미치는 기후의 아노말리를 분해하기 위해서 $2.5^\circ \times 2^\circ$ 의 수평조밀격자 대기 대순환모형을 이용하였다. 또한 이 현상과 관련하여 순압모드와 1차 경압모드가 중요한 연직모드임을 가정하여 2층 모형을 사용하였다. 비교적 강한 엘니뇨 현상이 있었던 1982-83 겨울철 동안의 해면온도 아노말리에 대한 대기 반응에 관한 실험에서 나타난 특징들은 다음과 같다.

1) 해면온도의 상승과 같은 해양에서의 변동은 대기에서의 기압변동을 야기시키는데, 모형결과 적도 동태평양에서는 기압의 감소와 적도 서태평양에서는 기압의 증가가 나타났다. 또한 82-83년 겨울동안 특히 온난했던 북미대륙에서의 기온상승이 모형결과에서도 나타났다.

2) Walker순환의 상승역의 이동에 따라 중양태평양에서 동쪽으로 띠를 이루며 강수량의 증가가 나타났으며 오스트레일리아의 북동쪽에서도 강수량이 증가하였다. 하지만 오스트레일리아를 비롯한 인도네시아, 필리핀 등의 서태평양 지역에서는 강수량이 감소하였다.

3) 적도에서의 해면온도의 아노말리는 teleconnection에 의해 중위도에서의 순환에도 영향을 미치는데, 500hPa 지위고도 아노말리 분포에서는 전체적으로 약간 동쪽으로 치우치긴 했지만 PNA 분포와 유사한 분포를 보였다.

4) 조밀격자 모형결과 800hPa 발산장의 분포에서는 적도 동태평양에서의 수렴과 서태평양에서의 발산이 관측치와 유사한 분포를 보였는데, 이것은 평년에 적도 서태평양에 존재하던 Walker순환의 상승부가 동쪽으로 이동한 것과 관련된 것이다. 비조밀격자의 경우 적도 동태평양의 수렴은 나타났지만, 서태평양에서의 발산이 잘 모사되지 못했다.

5) 대기의 순압적인 특징을 보여주는 바람의 연직평균장의 경우, 중위도에서 아노말리가 강하게 나타났으며, 그 분포는 PNA분포와 일치하는 흐름을 보였다. 또한 대기의 경압적인 특징을 보여주는 바람의 연직쉬어장의 경우에는 중위도에서의 아노말리는 약화된 반면, 적도에서의 아노말리가 비교적 강하게 나타났는데, 특히 적도 동태평양에서 나타난 편동풍 아노말리는 강수량의 증가역과 일치하였다.

수치 실험시 해면온도를 제외한 나머지 변수들은 아노말리 적분초기에 기후값을 이용했음에도 불구하고, 대기반응에 관한 모형결과는 관측된 특징적인 분포와 유사한 분포를 보였다. 이는 대기는 주어진 조건에 따라 비교적 빨리 조정(adjust)됨을 의미하며 동시에 다른 작은 변화보다도 였니

노/남방진동 현상이 해면온도의 아노말리에 의해 결정적인 영향을 받음을 의미한다.

본 연구에서는 수평조밀격자 대기 대순환 모형을 이용한 결과, 적도에서의 요란과 관련한 강수 분포와 바람장의 분포가 적절히 모사되었음을 알 수 있었다. 앞으로 연직 격자의 증가등을 통해 더 많은 연직모드를 증가시킴으로써 보다 나은 결과를 얻을 수 있으리라 기대된다

감사의 글

이 연구는 한국과학재단의 목적기초연구사업(핵심전문연구, 과제번호 KOSEF 921-0500-007-2)의 지원에 의해 이루어졌다. 논문의 시종을 도와준 부산대학교 대기과학과 류정희양의 수고에 감사한다.

참고문헌

- 류정희, 안중배, 1995, AGCM의 수평조밀격자화에 따른 반응 연구, 한국기상학회지, 발간중.
- 안중배, 1994, 해양-대기 결합수치모형을 이용한 ENSO 연구, 한국 환경과학회지, 53 : 64.
- Fennessy, M. J., L. Marx and J. Shukla, 1985 : General Circulation Model Sensitivity to 1982-83 Equatorial Pacific Sea Surface Temperature Anomalies, Mon., Wea., Rev., Vol. 113, 858-864.
- Ghan, S. J., W. L. LINGAAS, M. E. Schlessinger, R. L. Mobley and W. L. Gates, 1982 : A documentation of the OSU two-level atmosphere general circulation model. Climatic research institute, Report No. 35.
- Glantz, M. H., Katz, R. W., Nicholls, N., 1991 : Teleconnections linking worldwide climate anomalies. Cambridge University Press. pp.4.

- Horel, D. J. and Wallace J. M., 1981 : lanetary-Scale Atmospheric Phenomena Associated with the Southern Oscillation, *Mon. Wea. rev.*, Vol. 109, 813-829.
- Holton, J. R., 1992 : An Introduction to Dynamic Meteorology 3rd ed. Academic Press, INC., pp.369-402.
- Lau, N. -C., 1985 : Modeling the Seasonal Dependence of the Atmospheric Response to Observed El Niño in 1962-76. *Mon. Wea. Rev.*, 113, 1970-1996.
- Matsuno, T., 1966 : Quasi - Geostrophic Motions in the Equatorial Area. *J. Meteorol. Soc. Japan*, 44, 25-42.
- Matthews, F., 1983, Global vegetations and land use : New high-resolution data bases for climate students, *J. Clim. Appl. Meteor.*, 22, 474-487.
- Mechoso, R., A. Kitoh, S. Moorthi and A. Arakawa, 1987 : Numerical Simulation of the Atmospheric Response to a Sea Surface Temperature Anomaly over the Equatorial Eastern Pacific Ocean *Mon. Wea. Rev.*, Vol. 115, 2936-2955.
- Philander, S. G. H., P. Yamagata and R. C. Dacanowski, 1984 : Unstable air-sea interaction in the tropics. *Atmos. Sci.*, 41, 604-13.
- Quiroz, R. S., 1983 : The Climate of the "El Niño" Winter of 1982-83 - A Season of Extraordinary Climatic anomalies, *Mon. Wea. Rev.*, Vol. 111, 1685-1706.
- Shukla, J., 1990 : TOGA : A Review of Progress and Future Opportunities. Academic Press, National Research Council, 66pp.
- Shukla, J. and J. M. Wallace, 1983 : Numerical Simulation of the Atmospheric Response to Equatorial Pacific Sea Surface Temperature Anomalies. *J. Atmos. Sci.*, Vol. 40, 1613-1630.
- Wallace, J. M. and D. S. Gutzler, 1981 : Teleconnections in the Geopotential Height Field during the Northern Hemisphere Winter, *Mon. Wea. Rev.*, Vol. 109, 784-812.