

## 여름철 계절내 진동에 의한 대기 와도의 연직 구조: 순압성 또는 경압성?

송은지 · 서경환\*

부산대학교 지구환경시스템학부 대기환경과학과

(접수: 2012년 5월 31일, 수정: 2012년 6월 24일, 게재확정일: 2012년 6월 28일)

### Vertical Vorticity Structure Associated with the Boreal Summer Intraseasonal Oscillation: Barotropic or Baroclinic?

Eun-Ji Song and Kyong-Hwan Seo\*

Division of Earth Environmental System, Department of Atmospheric Sciences, Pusan National University,  
Busan 609-735, Korea

(Received: 31 May 2012, Revised: 24 June 2012, Accepted: 28 June 2012)

**Abstract** This study investigates the reason why the barotropic vorticity structure prevails vertically in response to the enhanced convection associated with the boreal summer intraseasonal oscillation over the central Indian Ocean. The relative vorticity tendency analysis for a 2.5-layer simplified model demonstrates that the barotropic vorticity structure is predominant due to the following two factors: 1) vertical easterly shear on the meridional gradient of barotropic divergence (which induces generation of barotropic vorticity twice larger than that of baroclinic vorticity); and 2) vertical easterly shear on the meridional gradient of baroclinic divergence (which appears only in relation to the generation of barotropic vorticity). The percentage of contribution by each term to barotropic and baroclinic vorticity tendency equations is presented.

**Keywords:** BSISO (boreal summer intraseasonal oscillation), barotropic vorticity, baroclinic vorticity, barotropic divergence, baroclinic divergence

## 1. 서 론

매든-줄리안 진동 (Madden-Julian Oscillation, MJO), 혹은 계절내 진동 (Intraseasonal Oscillation, ISO)은 적도에서 발생하는 가장 지배적인 변동 모드 중 하나로 알려져 있다 (Madden and Julian, 1994; Zhang, 2005). 겨울철 동안, 열대 지역에서 25~80일 주기로 발생하는 강한 심층 대류는 인도양에서 처음 발생 하여 점진적으로 동진하는 패턴을 보이며 발달하며, 날짜 변경선 근처에 도달하면 강도가 약해지면서 점점 소멸하는 과정을 보인다. 반면에 여름철 심층 대류는 서

인도양에서 처음 발달하기 시작하여 인도양, 서태평양 지역에서는 북진을, 동아시아 몬순이 발생하는 지역에서는 북서진을 하는 등 상대적으로 복잡한 패턴을 보인다 (Sikka and Gadgil, 1980; Lau and Chan, 1986; Wang and Rui, 1990; Annamalai and Sperber, 2005; Seo *et al.*, 2007; and others). 이러한 심층 대류는 적도에서 발생하지만, 파열 (wave train)을 통해 중위도 일기와 기후에도 영향을 준다 (Lau and Lau, 1986; Vecchi and Bond, 2003, 2004; Jeong *et al.*, 2005; Donald *et al.*, 2006). 또한, MJO 혹은 ISO는 인도, 아시아, 미국 등과 같은 지역에서 발생하는 몬순계의 시작 시기를 결정하고, 몬순계 자체의 계절내 변동성을 조절함으로써 (Goswami, 2005; Hsu, 2005; Wheeler and McBride, 2005; Mo and Paegle, 2005; Matthews, 2004), 해당 지역에서 농업과 인류 생활에 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 그렇기 때문

\*Corresponding Author: Kyong-Hwan Seo, Department of Atmospheric Sciences, Pusan National University, Busandaehak-ro 63 beon-gil, Geumjeong-gu, Busan 609-735, Korea.

Phone : +82-51-510-2181, Fax : +82-51-515-1689

E-mail : khseo@pusan.ac.kr

에 지금까지 MJO 혹은 ISO와 관련된 연구는 활발하게 진행되었다.

MJO와 관련되어 가장 잘 알려진 순환은 심층 대류의 발생과 더불어 발생하는 로스비 반응 (Rossby response)이다. 로스비 반응은 심층 대류가 있을 경우 대기 중층에 발생하는 단열 가열로 인해, 심층 대류의 북쪽 혹은 남쪽 지역에 하층 저기압성 흐름과 상층 고기압성 흐름이 발생하는 것을 이른다. 이 때 순환장의 연직 구조는 상하층이 서로 반대 위상인 경압성을 보인다고 알려져 있다 (Kiladis and Weickmann, 1992; Matthews *et al.*, 2004).

그러나, 최근 Seo and Song (2012)는 잠재 와도를 통해 여름철 계절내 진동 (Boreal Summer Intraseasonal Oscillation, BSISO)와 관련된 심층 대류의 생성 메커니즘을 밝히는 과정에서 심층 대류의 발생이 최대로 이루어졌을 때, 연직적으로 순압적인 잠재 와도가 지배적으로 나타남을 보였다. 이는 Jiang *et al.* (2004)이 보인 관측 자료와 모형 실험을 통해 얻은 결과와도 상당 부분이 일치한다. 그러나, Jiang *et al.* (2004)은 초기에 발산의 연직적 경압 구조만 존재한다고 가정했을 때, 순압 와도는 경압 발산의 남북경도에 작용하는 평균류의 연직 시어가 생성시킨다고 밝혔으나, 실제로는 경압 구조와 순압 구조가 공존한다는 점과, 기여하는 정도를 객관적으로 보이지는 못했다는 점에서 한계를 가지고 있다. 따라서 본 연구에서는 재분석 자료를 이용하여, BSISO와 관련된 심층 대류로 인해 발생하는 흐름에서 연직적으로 순압적인 와도가 경압적인 와도보다 더욱 지배적으로 발달함을 보일 것이다. 또한, 와도 방정식에 대한 규모 분석을 통하여 가장 큰 영향을 주는 요소, 그리고 그들의 기여도를 정량적으로 나타내고자 한다.

2장에서는 본 연구에서 사용된 자료와, MJO의 시그널을 탐지하기 위해 사용된 방법을 제시하고, 3장에서는 여름철 계절내 진동에 따라 발생하는 순압 와도가 경압 와도보다 더욱 지배적으로 발달함을 보일 것이다. 또한, 와도 방정식에 대한 규모 분석을 통하여 순압 와도와 경압 와도의 발달에 기여하는 지배적인 요인을 살펴보고 그의 기여를 정량적으로 나타냈다. 마지막으로 4장에서 본 연구에서 밝히고자 하는 바를 요약하고, 연구의 추후 방향을 제시하였다.

## 2. 자료와 분석방법

본 연구에서는 심층 대류를 나타내기 위해 NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration)에서 제공하는 OLR (Outgoing Longwave Radiation)의 일 평균 자료를 사용하였다. 또한, BSISO와 관련된 순환장을 나타내기 위해 유럽 중기 예보 센터 (European

Centre for Medium-Range Weather Forecasts: ECMWF)에서 제공하는 40년 재분석 자료 (ECMWF 40 years Reanalysis Data: ERA-40)를 사용하였다. 5월에서 9월 까지를 북반구 여름철로 정의하고, 1979년부터 2001년까지 총 23년간 자료에 대한 분석을 수행하였다. 25일에서 80일 주기의 시그널만 추출하기 위해 모든 변수에 기후 값을 제거한 후, 란코즈 필터링 (Lanczos filtering)을 적용시켰다 (Duchon 1979).

BSISO의 발달에 따른 대류, 순환 등을 살펴보기 위해 지연 회귀법 (Lag regression)을 사용했다(e.g., Seo and Kumar 2008). 이 때, 사용된 기준 지수는 OLR의 변동성이 큰 인도양 지역 (75°-95°E, 5°S-5°N)에 대해 평균된 시계열로 만들어졌다. 지연 회귀법에서 나타난 Day 0는 인도양에서 강한 대류가 최대로 일어난 시간을 의미하고, Day 0 이전에는 강한 대류가 점진적으로 발달하는 과정을, Day 0 이후에는 강한 대류가 점차 약화되는 과정을 나타낸다.

## 3. 결과

### 3.1. BSISO의 발달에 따른 흐름: 상대 와도

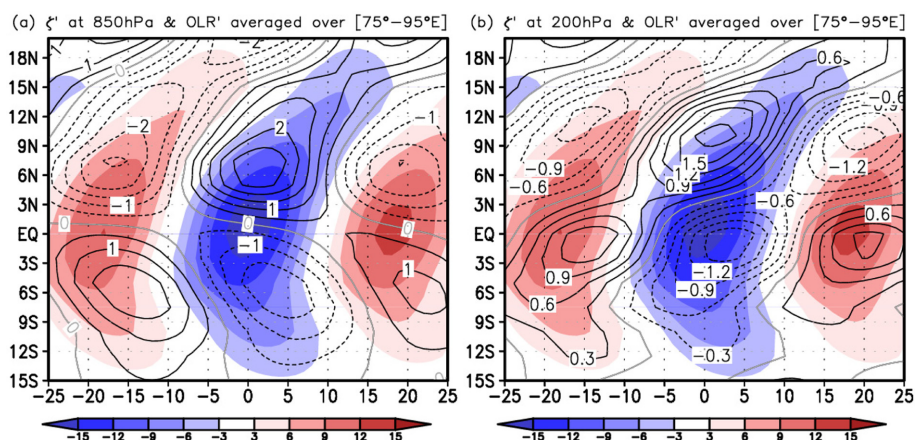
BSISO와 관련된 심층대류의 발달함에 따라 나타나는 상대 와도를 살펴보기 위해, Fig. 1에 OLR과 200-hPa 및 850-hPa에서 상대 와도의 시간-위도 그래프를 나타냈다. 앞서 언급한 바와 같이 Day 0일 때 심층대류 (Fig. 1, 음영)는 적도에서 최대 강도를 보이고, 850-hPa 와도 (Fig. 1(a), 선)는 심층 대류를 중심으로 북 (남)쪽에는 양 (음)의 와도를 보이는 전형적인 로스비 반응을 보이며 발달한다. 반면에 200-hPa 와도 (Fig. 1(b), 선)는 심층 대류가 최대(소)값을 나타냈을 때 (Day -18, Day 0, Day 18), 적도를 중심으로 로스비 반응을 보이지만, Day 0 일 때 북쪽에 존재하는 양의 와도를 중심으로 살펴보면 앞서 발생한 반대 위상의 대류에 따른 로스비 반응과 결합되어 남반구에서 생성되어 북진하는 것처럼 보이는 등 다소 복잡한 구조가 나타남을 알 수 있다. 또한, 와도의 세기도 하층 와도와 비교했을 때, 상대적으로 강한 것을 볼 수 있다.

상대 와도의 연직 구조를 좀 더 명확하게 알아보기 위해, 상·하층 와도를 이용해서 순압 와도 (barotropic vorticity)와 경압 와도 (baroclinic vorticity)를 정의했다:

$$\text{barotropic vorticity} = \frac{\zeta_{200} + \zeta_{850}}{2} \quad (1)$$

$$\text{baroclinic vorticity} = \frac{\zeta_{200} - \zeta_{850}}{2} \quad (2)$$

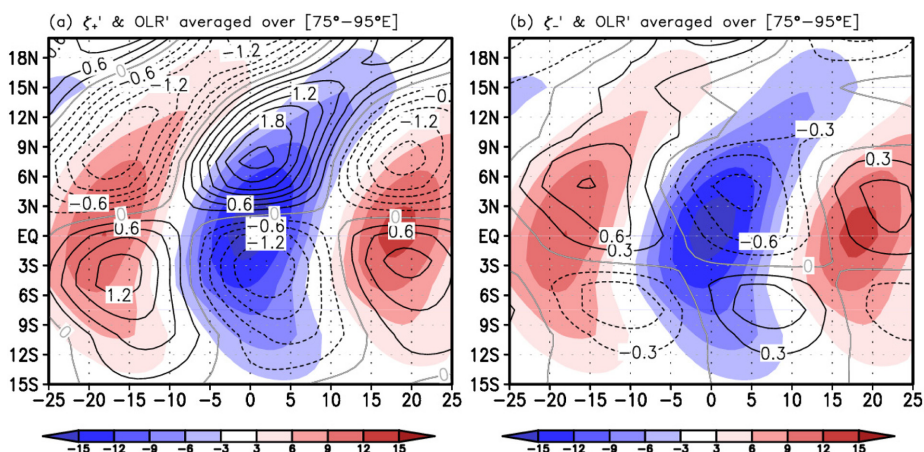
Fig. 2는 심층 대류의 발달에 따른 순압 와도와 경압 와도를 시간-위도 그래프로 나타낸 것이다. 순압



**Fig. 1.** Time - Latitude cross section of OLR (Colors, Units:  $W m^{-2}$ ), (a) the relative vorticity at 850 hPa (Contours, intervals:  $0.5 \times 10^{-8} s^{-1}$ ), and (b) relative vorticity at 200 hPa (Contours, intervals:  $0.3 \times 10^{-6} s^{-1}$ ) regressed onto time-series averaged over Indian Ocean ( $75^{\circ}-95^{\circ}E$ ). Note that the blue (red) indicates the enhanced (suppressed) convection. Solid line means cyclonic (anti-cyclonic) vorticity in Northern (Southern) Hemisphere, and the gray line means zero.

와도 (Fig. 2(a), 선)는 심층 대류를 따라 발생하는 전형적인 로스비 반응의 형태로 발달하며 특히,  $6^{\circ}-9^{\circ}N$  와  $3^{\circ}-6^{\circ}S$  지역에서 크게 나타난다. 반면에 경압 와도 (Fig. 2(b), 선)는 다소 복잡하게 발달한다. 심층 대류의 발생 시작과 함께 북진이 진행된 Day 5일 때, 심층 대류의 북쪽 지역 ( $3^{\circ}-6^{\circ}N$ ) 에서 음의 경압 와도가 발생한다. 시간에 따라 발달하여 Day 3일 때 최소로 발달한다. 그리고 Day 0일 때  $4^{\circ}-6^{\circ}S$ 에서 양의 경압 와도가 처음 발생하고, 시간의 흐름에 따라, Day 8이 되면  $4^{\circ}-10^{\circ}S$ 에서 최대 강도를 보이며 발달한다.

Day 0를 중심으로 순압 와도와 경압 와도를 비교했을 때 적도에서  $10^{\circ}N$  지역까지 순압 와도는 양의 값을 보이지만 경압 와도는 음의 값을 보인다. 또한, 순압 와도가 최대(소)로 발달하는 지역의 중심이 경압 와도가 최소(대)로 발달하는 지역보다 약  $3^{\circ}$ 가량 북쪽에 위치한다. 이 결과는 200-hPa 상대 와도의 발달이 로스비 반응과 어떻게 다른지도 설명 가능케 한다. 수치를 고려하면, 상대 와도의 순압 모드는 최대  $2 \times 10^{-6} s^{-1}$ 를 보이며 경압 모드 ( $1 \times 10^{-6} s^{-1}$ )보다 약 두 배 가량 큰 값을 보인다. 이는 순압 와도가 경



**Fig. 2.** Time-Latitude cross section of OLR (Colors, Units:  $W m^{-2}$ ), (a) the barotropic mode of the relative vorticity (Contours, Units:  $s^{-1}$ ), and (b) the baroclinic mode of the relative vorticity (Contours, Units:  $s^{-1}$ ) regressed onto time-series averaged over Indian Ocean ( $75^{\circ}-95^{\circ}E$ ). Note that the blue (red) indicates the enhanced (suppressed) convection. Contour's interval is  $0.3 \times 10^{-6}$ , solid line means cyclonic (anti-cyclonic) vorticity in Northern (Southern) Hemisphere, the grey line means zero.

압 와도보다 두드러지게 발생하는 것을 의미 한다. 이러한 순압 구조는 Jiang *et al.* (2004)이 관측 자료와 ECHAM 모형의 결과로 나타낸 바 있다. 또한, Seo and Song (2012)에서 나타내는 잠재 와도의 순압 구조와도 일치한다.

그렇다면, 심층 대류가 발생함에 따라 순압 와도가 왜 지배적으로 발생하는지, 발생에 중요한 역할을 하는 요소가 무엇인지, 그리고 이들이 얼마나 기인하는지 알아보기 위해 Jiang *et al.* (2004)에서 제안한 와도의 지배 방정식을 도입했다.

### 3.2. 와도에 영향을 주는 요소

순압 와도의 발달에 기여하는 경·순압 발산을 정량적으로 나타내기 위해 Jiang *et al.* (2004)에서 제시하는 2.5층 모형에서 사용되는 와도 방정식을 도입했다. 이 모형은 2층의 자유대기와 잘 혼합된 대기 경계층을 고려하고, 간단한 이해를 위해서 사용되는 모든 변수를 동서방향의 경도가 없는 2차원 변수로 가정한다. 또한, 코리올리 파라미터가 일정한 에프-평면 근사 (f-plane approximation)를 사용한다. 그러나 본 연구에서는 열대의 변화를 고려하므로 근사하지 않은 원래의 코리올리 파라미터 ( $f = 2\Omega \sin\phi$ )를 사용했다. 또한, Jiang *et al.* (2004)에서 초기에 순압 발산이 없는 대기를 가정하였기 때문에 오직 경압 구조의 역할만 강조되었다. 그러나 실제 BSISO와 관련되어 발생하는 대류는 순압과 경압 흐름이 공존하기 때문에, 본 연구에서는 순압 발산의 영향 또한 고려하고자 한다. 특히 본 연구를 통해서 BSISO와 관련된 와도는 경압적인 구조보다 순압적인 구조로 발달된다는 것을 보이고 또한 이러한 순압 와도의 발달에 순압 발산이 경압 발산보다 더 큰 영향을 준다는 것을 보이도록 하겠다. 평균 동서류의 연직 시어가 일정한 선형 운동에 대한 와도의 지배 방정식은 아래와 같다 (e.g. Jiang *et al.*, 2004):

$$\frac{\partial \zeta_+}{\partial t} = \underbrace{\bar{u}_T \frac{\partial 2D_+}{\partial y}}_{(I)} + \underbrace{\bar{u}_T \frac{\partial D_-}{\partial y}}_{(II)} + \underbrace{-fD_+}_{(III)} + KV^2 \zeta_+ \quad (3)$$

$$\frac{\partial \zeta_-}{\partial t} = \underbrace{-\bar{u}_T \frac{\partial D_+}{\partial y}}_{(IV)} + \underbrace{-fD_-}_{(V)} + KV^2 \zeta_- \quad (4)$$

여기에서  $f$ 는 코리올리 파라미터,  $D$ 는 발산을 의미한다.  $\bar{u}_T = (\bar{u}_{200} - \bar{u}_{850})/2$ 는 동서 평균류의 일정한 (constant) 연직 시어를 의미하고, 아래 첨자 +(-)는 순압 (경압) 모드를 나타낸다. 이 식에 대한 자세한 정보는 Jiang *et al.* (2004)의 Appendix에서 제공된다.

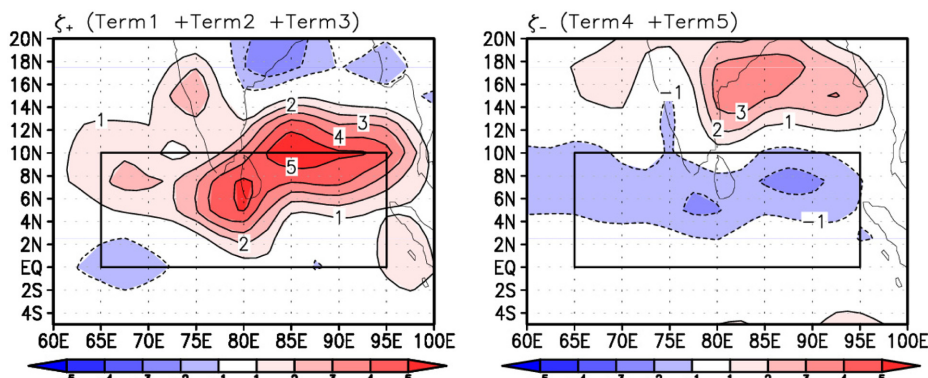
위에서 나타낸 와도 방정식을 따르면, 순압 와도와 경압 와도의 발달은 순압 발산과 경압 발산의 분포에 의해 결정 된다; 순압 와도의 변화 ( $\partial \zeta_+ / \partial t$ )는 순압 발산의 남북 경도에 작용하는 연직 시어 (I:  $\bar{u}_T(\partial 2D_+ / \partial y)$ ), 경압 발산의 남북 경도에 작용하는 연직 시어 (II:  $\bar{u}_T(\partial D_- / \partial y)$ ), 순압 발산에 의한 연직 신장 (III:  $-fD_+$ ), 그리고 경압 와도로 인한 확산 ( $KV^2 \zeta_+$ )의 영향을 받는다. 반면, 경압 와도의 변화 ( $\partial \zeta_- / \partial t$ )는 순압 발산의 남북 경도에 작용하는 연직 시어 (IV:  $-\bar{u}_T(\partial D_+ / \partial y)$ ), 경압 발산에 의한 연직 신장 (V:  $-fD_-$ ), 그리고 경압 와도로 인한 마찰력 ( $KV^2 \zeta_-$ )의 영향을 받는다.

적도 지역은 준 정상상태 (quasi steady state)이므로 와도는 거의 변하지 않는다 (실제로 재분석 자료를 이용했을 때 다른 항의 약 20%정도의 크기를 나타낼 만큼 작게 나타남). 또한, 뉴턴 유체 (Newtonian fluid)를 가정하여 확산 항을 Rayleigh friction으로 근사했다. 즉,  $\partial \zeta_+ / \partial t \approx 0$ ,  $\partial \zeta_- / \partial t \approx 0$ ,  $KV^2 \zeta_+ \propto -K \zeta_+$ ,  $KV^2 \zeta_- \propto -K \zeta_-$ 을 적용시키면 식 (3)과 (4)는 아래와 같이 된다:

$$\zeta_+ \approx \frac{1}{K} \left[ \bar{u}_T \frac{\partial 2D_+}{\partial y} + \bar{u}_T \frac{\partial D_-}{\partial y} - fD_+ \right] \quad (5)$$

$$\zeta_- \approx \frac{1}{K} \left[ -\bar{u}_T \frac{\partial D_+}{\partial y} - fD_- \right] \quad (6)$$

이 식은 순압 와도와 경압 와도를 방정식에서 나타낸 관련 항의 합으로 구할 수 있음을 의미한다. 또한, 재분석 자료를 통해 직접 구한 관련 항들의 합과 경압 와도와 순압 와도를 이용해서 확산 계수  $K$  (diffusion coefficient,  $K$ )를 구할 수 있게 한다 (확산계수의 역은 시간 규모를 나타낸다). 이에 따라, 재분석 자료를 이용해서 구한 인도양 지역에서  $K$  값을 구한 결과 약  $2 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 로 Jiang *et al.* (2004) 및 Stevens and White (1979) 등에서 사용한 4일에서 8일 정도의 시간 규모 값과 비슷하게 나타났다. 여기서 우측 첫 번째 항에서  $D_+$ 의 계수에 곱해진 숫자 2는 같은 순압 발산량과 경압 발산량이 존재할 때 순압 와도의 변화는 순압 발산량에 대해 더욱 더 민감하게 나타난다는 것을 의미하고, 유체의 연속성에 의해 발생하는 대기경계층 (Planetary Boundary Layer, PBL)의 상층경계면에서 연직운동을 고려해서 결정된 가중치이다 (보이지 않음). Fig. 3은 Day 0일 때 방정식을 통해 구한 순압 와도와 경압 와도의 수평 분포를 나타낸 것이다. 앞서 나타낸 순압 와도와 경압 와도 (Fig. 2)와 같이 적도에서 10°N까지 지역에서 순압 와도는 양의 값을, 경압 와도는 음의 값을 보이며 발달한다. 또한, 순압 와도가 경압 와도보다 약 2배 가량 크게 나타나는 것



**Fig. 3.** The generation of (a) barotropic vorticity, and (b) baroclinic vorticity obtained from the equation of barotropic and baroclinic vorticity at Day 0. The interval of the tendency of vorticity is  $1 \times 10^{-11} \text{ s}^{-2}$ . Box indicates a region where the relative vorticity by BSISO mainly occurs.

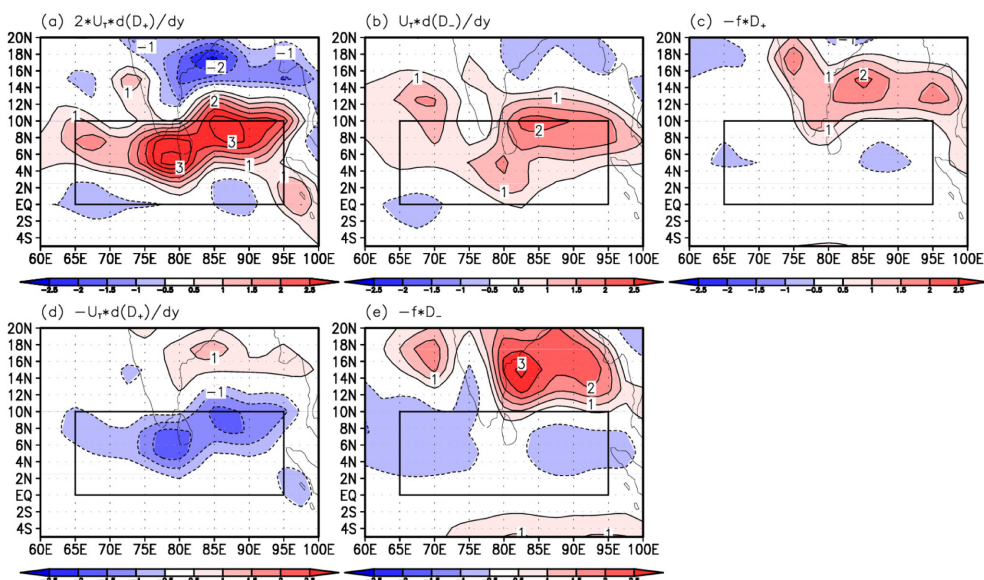
도 Fig. 2와 유사하다. 이 결과로 인해 와도 방정식으로 경압 와도와 순압 와도의 발달을 잘 표현할 수 있다는 점과 와도 방정식에 대한 규모 분석으로 와도의 발달에 영향을 주는 각 항의 기여를 나타낼 수 있다는 점을 알 수 있다.

### 3.3. 와도 발달에 대한 각 요소들의 기여도

심층 대류가 최대 발생할 때 나타나는 순압 와도

와 경압 와도의 발달에 가장 큰 영향을 주는 요소를 알아보기 위해, Fig. 4에 지연 회귀를 수행한 결과 중 Day 0일 때 와도 방정식에 대한 규모 분석 수행 결과를 나타냈다.

각 요소의 입장에서 살펴보면, 순압 와도와 경압 와도의 발달에 가장 큰 기여를 하는 것은 순압 발산의 남북 경도에 작용하는 연직 시어 (Fig. 4(a)와 4(d))이다. 이 항은 경압 와도 보다 순압 와도의 발달에 2



**Fig. 4.** The quantity of (a) vertical shear on the meridional gradient of barotropic divergence, (b) vertical shear on the meridional gradient of baroclinic divergence, (c) vortex stretching by barotropic divergence, (d) vertical shear on the meridional gradient of barotropic divergence, and (e) vortex stretching by barotropic divergence. Note that upper (lower) panels indicate the generation of barotropic (baroclinic) vorticity, so summation of upper (lower) panels is equal to Fig. 3(a) (Fig. 3(b)). All intervals are  $0.5 \times 10^{-11} \text{ s}^{-2}$ . Box indicates a region where relative vorticity by the BSISO mainly develops.

배 더 큰 영향을 준다. 또한, 경압 발산의 남북 경도에 작용하는 연직 시어 (Fig. 4(b))는 순압 와도의 발달에만 영향을 준다. 마지막으로, 열대 지역에서 전향력은 작기 때문에 순압 발산과 경압 발산에 의한 연직 신장 (Fig. 4(c)와 4(e))은 수치적으로 작은 값을 갖는다. 그 결과, 순압 와도는 경압 와도보다 2배 가량 잘 발달한다.

와도의 발달에서 각 요소의 중요도를 알아보기 위해, 와도의 발달에 영향을 주는 요소에 대해서 살펴보았다. 순압 와도의 발달에서 순압 발산 (Fig. 4(a), Term I)과 경압 발산 (Fig. 4(b), Term II)의 남북 경도에 작용하는 연직 시어는 순압 와도의 발달과 비슷한 패턴을 보인다. 이는 발산의 남북 경도에 작용하는 연직 시어가 순압 와도의 생성에 주요한 역할을 하는 것을 의미한다. 특히, 순압 발산의 남북 경도에 작용하는 연직 시어 항이 상대적으로 큰 값을 보이며 가장 큰 기여를 하는 것으로 나타났다.

일반적으로 대류가 발생했을 때 경압 발산량이 순압 발산량보다 크다고 알려져 있으나 실제 경압 발산의 남북방향 경도를 계산하면 순압 발산의 남북방향 경도와 비슷한 크기를 가진다. 앞서 언급한 바와 같이 본 연구에서 이용하는 2.5층 모델에서는 경압 발산의 남북 경도에 비교 순압 발산의 남북 경도값에 대해 2배의 가중치가 발생한다. 따라서 순압 와도의 발달에는 순압 발산에 대한 남북 방향 경도에 작용하는 연직 시어가 더 큰 영향을 미치는 것으로 밝혀졌다.

반면 순압 발산에 의한 연직 신장항 (Fig. 4(a), Term III)은 순압 와도의 발달 (Fig. 3(a))와 다른 분포를 보인다. 심층 대류와 관련된 와도가 발생하는 지역 [65° - 95°E, EQ - 10°N]을 중심으로 보면, 약 6°N 이하 지역에서는 작은 값이지만 음의 값이 나타나고, 6°N부터 14°N로 갈수록 큰 값을 보인다. 위도가 높아질수록 값이 커지는 것은 열대 지역에서는 작고 고위도로 갈수록 크게 작용하는 전향력 때문인 것으로 사료된다. 따라서, 순압 발산에 의한 연직 신장은 전향력 때문에 열대 지역에서 발생하는 순압 와도의 발달에 큰 영향을 주지 않는 것을 알 수 있다.

Fig. 4(d)와 4(e)는 경압 와도의 발달에 영향을 주는 요소를 나타낸 것이다. 순압 발산의 남북 경압에 작용하는 연직 시어 (Fig. 4(d), Term IV)는 경압 와도의 발달 (Fig. 3(b))과 비슷한 분포를 보이고 경압 발산에 대한 연직 신장 (Fig. 4(e), Term V)보다 상대적으로 큰 값을 갖는다. 이와 달리 경압 발산에 의한 연직 신장 (Fig. 4(d), Term IV)은 Fig. 4(c)와 비슷하지만 수치는 상대적으로 큰 분포를 보인다. 특히, 본 연구에서 중점적으로 살펴보는 지역 [65° - 95°E, EQ - 10°N]에서는  $0.5 \times 10^{-11} \text{ s}^{-2}$ 로 작지만 뚜렷한 음의 값을 나타낸다.

**Table 1.** Fractional percentage (%) of each term contributing to the generation of barotropic and baroclinic vorticity.

Term	Generation of barotropic vorticity	Generation of baroclinic vorticity
$-\frac{\partial D_+}{u_T \partial y}$	60	59
$-\frac{\partial D_-}{u_T \partial y}$	45	-
$-f_0 D_+$	-5	-
$-f_0 D_-$	-	41

Table 1은 와도의 발달에 대한 각 항들의 기여를 정량적으로 나타내기 위해, BSISO에 의한 와도가 발생하는 지역 [65° - 95°E, EQ - 10°N]에서 순압 와도 및 경압 와도의 발달에 대한 각 항의 기여도를 나타낸 것이다. 앞서 언급한 결과에서 가장 큰 기여를 한다고 밝힌 순압 발산의 남북 경도에 작용하는 연직 시어는 순압 와도의 발달에는 약 60%, 경압 와도의 발달에는 약 59%의 기여를 하는 것으로 나타났고, 경압 발산의 남북 경도에 대한 연직 시어는 순압 와도의 생성에만 약 45%의 기여를 하는 것으로 나타났다. 또한, 순압 발산에 대한 연직 신장은 순압 와도의 생성에 있어서 5%로 가장 작은 양이지만 순압 와도 발달의 저지에 기여 하는 것으로 밝혀졌다. 반면, 경압 발산에 의한 연직 신장은 수치적으로 작은 양이지만 상대적으로 큰 기여 (약 41%)를 하는 것처럼 보인다. 이는 경압 와도의 생성 또한 작게 나타나기 때문이다.

따라서, 순압 와도의 발달이 경압 와도 보다 지배적으로 일어나는 이유는 1) 순압 발산의 남북 경도에 작용하는 연직 시어가 경압 와도보다 순압 와도의 생성에 2배 가량 크게 기여하고, 2) 경압 발산의 남북 경도에 작용하는 연직 시어는 순압 와도의 생성에만 기여를 하고, 마지막으로 3) 발산에 의한 연직 신장은 전향력으로 인해 열대 지역에서 큰 기여를 하지 않기 때문으로 밝혀졌다.

#### 4. 요약 및 제언

본 연구에서는 여름철 계절내 진동에 따른 심층대류가 최대 발달했을 때, 왜 연직적으로 순압적인 와도가 경압적인 와도보다 더 지배적으로 발생하는지를 밝혔다.

와도 방정식에 따르면 순압 와도 및 경압 와도의 발달은 순압 발산의 남북 경도에 작용하는 연직 시어, 경압 발산에 대한 연직 시어, 순압 발산에 의한 연직 신장, 그리고 경압 발산에 의한 연직 신장의 영향을 받는다.

선행 연구에서는  $f$ 가 일정한 평면에서 경압 흐름만이 존재하는 대류를 고려했을 때, 순압 와도의 발달에는 경압 발산의 남북 경도에 작용하는 연직시어가, 경압 와도의 발달에는 경압 발산에 의한 연직신장향이 중요하다는 결과를 보였다 (Jiang *et al.*, 2004). 그러나, 본 연구에서 고려하는 전향력의 영향이 작은 적도에서 순압 흐름과 경압 흐름이 공존하는 BSISO과 관련된 대류가 발생할 경우, 순압 발산의 남북 경도에 작용하는 연직 시어는 경압 와도 보다 2배 더 많은 순압 와도를 발생시키고, 경압 발산의 남북 경도에 작용하는 연직 시어는 오직 순압 와도만 생성하기 때문에 순압 와도의 발달이 두드러지게 발생하는 것을 밝혀져, 순압 와도의 남북 경도에 작용하는 연직시어가 중요한 역할을 하는 것으로 나타났다.

Seo and Song (2012)에 따르면, 잠재 와도의 연직적 순압 구조는 BSISO의 시작을 알려주는 좋은 척도로 사용될 수 있다. 여기에서 잠재 와도의 순압성은 상대 와도의 순압성에 기인한다. 따라서, 본 연구에서 밝힌 순압 와도의 발생 요인은 이에 대한 좋은 역학적 근거가 될 것으로 사료된다. 또한, 현실과 좀더 비슷한 상황을 연출하기 위해, 3차원 방정식에서 각 항의 기여를 알아보는 연구가 계속되어야 할 것이다.

## 감사의 글

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비 (2년)에 의하여 수행되었습니다. 더 좋은 논문이 될 수 있도록 세심한 조언을 해주신 두 심사위원님께 감사의 말씀을 드립니다.

## 참고문헌

- Annamalai, H., and K. R. Sperber, 2005: Regional heat sources and the active and break phases of boreal summer intraseasonal (30-50 day) variability. *J. Atmos. Sci.*, **62**, 2726-2748.
- Madden, R. A., and P. R. Julian, 1994: Observations of the 40-50 day tropical oscillation : A Review. *Mon. Weather Rev.*, **122**, 814-837.
- Duchon, C. E., 1979: Lanczos filtering in one and two dimensions. *J. Appl. Meteor.*, **18**, 1016-1022.
- Goswami, B. N., 2005: South Asian monsoon. W. K. M. Lau, D. E. Waliser, Ed, Springer-Praxis, 19-62.
- Hsu, H. H., 2005: South Asian monsoon. W. K. M. Lau, D. E. Waliser, Ed, Springer-Praxis, 63-94.
- Jiang, X. A., T. Li, and B. Wang, 2004: Structures and mechanisms of the northward propagating boreal summer intraseasonal oscillation. *J. Climate*, **17**, 1022-1039.
- Kiladis, G. N., and K. M. Weickmann, 1992: Circulation Anomalies Associated with Tropical Convection during Northern Winter. *Mon. Wea. Rev.*, **120**, 1900-1923.
- Lau, K. M., and P. H. Chan, 1986: Aspects of the 40-50 day oscillation during the northern summer as inferred from the outgoing longwave radiation. *Mon. Wea. Rev.*, **114**, 1354-1367.
- Matthews, A. J., 2004: Intraseasonal variability over the tropical Africa during northern summer. *J. Climate*, **17**, 2427-2440.
- Mathers, A. J., B. J. Hoskins, and M. Masutani, 2004: The global response to tropical heating in the Madden-Julian oscillation during the northern winter. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **130**, 1991-2011.
- Mo, K. C., and J. N. Paegle, 2005: South Asian monsoon. W. K. M. Lau, D. E. Waliser, Ed, Springer-Praxis, 95-124.
- Seo, K.-H., and A. Kumar, 2008: The onset and life span of the Madden-Julian Oscillation. *Theoretical and Applied Climatology*, **94**, 13-24, doi 10.1007/s00704-007-0340-2.
- Seo, K.-H., and E.-J. Song, 2012: Initiation of Boreal Summer Intraseasonal Oscillation: Dynamic Contribution by Potential Vorticity. *Mon. Wea. Rev.*, **140**, 1748-1760.
- Seo, K.-H., J.-K. E. Schemm, W. Wang, and A. Kumar, 2007: The boreal summer intraseasonal oscillation simulated in the NCEP Climate Forecast System (CFS): The effect of sea surface temperature. *Mon. Wea. Rev.*, **135**, 1807-1827.
- Sikka, D. R., and S. Gadgil, 1980: On the maximum cloud zone and the ITCZ over Indian longitudes during the Southwest monsoon. *Mon. Wea. Rev.*, **108**, 1840-1853.
- Stevens, D. E., and G. H. White, 1979: Comments on "Viscous Internal Gravity Waves and Low-Frequency Oscillations in the Tropics". *J. Atmos. Sci.*, **36**, 545-546.
- Wang, B., and H. Rui, 1990: Synoptic climatology of transient tropical intraseasonal convection anomalies. *Meteor. Atmos. Phys.*, **44**, 43-61.
- Wheeler, M., and J. L. McBride, 2005: South Asian monsoon. W. K. M. Lau, D. E. Waliser, Ed, Springer-Praxis, 125-174.
- Zhang, C., 2005: Madden-Julian Oscillation. *Rev. Geophys.*, **43**, RG2003, doi:10.1029/2004RG000158.