

## 대류권-성층권 평균자오면순환의 장기변동

설 동 일\*

한국해양대학교 운항시스템공학부, 606-791 부산광역시 영도구 동삼동 1번지

### Long-term Variations of Troposphere-Stratosphere Mean Meridional Circulation

Dong-II Seol\*

Department of Ship Operating Systems Engineering, Korea Maritime University,  
Busan 606-791, Korea

**Abstract:** Studies of atmospheric general circulation in the troposphere and stratosphere are very important to understand the influence of human activities on the global climate and its change. Recently, the existence of an annual cycle in the circulation has been reported by a number of studies. In this study, the residual mean meridional circulation is calculated by the TEM momentum and continuity equations for the period from December 1985 to November 1995 (10 years), and the long-term variations of the circulation and mass fluxes across the 100 hPa surface are examined. The multiple regression statistical model is used to obtain quantitatively the long-term variations. This study is focused especially on mean meridional circulation in the troposphere and stratosphere associated with ENSO (El Niño-Southern Oscillation) which is known as a cause of the unusual weather, global climate, and its change. The results show that the global scale troposphere-stratosphere mean meridional circulation is intensified during El Niño event and QBO (quasi-biennial oscillation) easterly phase and weakened during La Niño event and QBO westerly phase. The signal of Mount Pinatubo volcanic eruption in June 1991 is obtained. Due to the volcanic eruption the global scale troposphere-stratosphere mean meridional circulation is abruptly intensified.

**Key words:** troposphere-stratosphere mean meridional circulation, ENSO, QBO, Mount Pinatubo volcanic eruption

**요약:** 대류권과 성층권의 대기대순환에 관한 연구는 전지구 규모의 기후변동에 대한 인간활동의 영향을 이해하는 데 있어서 매우 중요하다. 최근, 상부대류권과 성층권의 대기대순환에 있어서의 일년주기의 존재가 많은 연구에 의하여 보고되어졌다. 이 연구에서는 10년간(1985년 12월 ~ 1995년 11월)의 자료에 대하여, 변형오일러평균방정식계의 운동방정식과 연속방정식을 이용하여 잔차평균자오면순환을 구하고, 그 순환과 100hPa면을 가로지르는 질량 플럭스들의 장기변동을 조사한다. 그 장기변동을 정량적으로 파악하기 위하여 중회귀통계모형을 사용한다. 특히, 이 연구에서는 이상기상과 전지구 규모의 기후변동의 원인으로서 알려진 엘니뇨현상과 관련한 대류권과 성층권의 평균자오면순환에 초점을 맞춘다. 연구의 결과는, 전지구 규모의 대류권-성층권 평균자오면순환은 엘니뇨현상과 준2년주기진동의 동풍 위상 동안에 강화되어지고, 라니냐현상과 준2년주기진동의 서풍 위상 동안에 약화되어진다는 사실을 보인다. 그리고, 1991년 6월에 있었던 피나투보 화산 폭발의 신호가 얻어진다. 그 화산 폭발 때문에 전지구 규모의 대류권-성층권 평균자오면순환은 급격히 강화되어진다.

**주요어:** 대류권-성층권 평균자오면순환, 엘니뇨현상, 준2년주기진동, 피나투보 화산 폭발

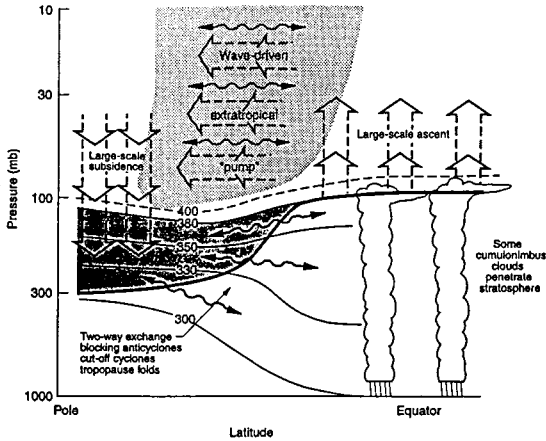
## 서론

대류권과 성층권의 대기대순환에 관한 연구는 인간

활동으로부터 기인하는 각종의 화학성분과 물질이 전지구 규모의 기후변동에 미치는 영향 등을 이해하는 데에 있어서 매우 중요하다.

대류권과 성층권의 대기대순환을 알기 쉽게 나타내어 주는 평균자오면순환(mean meridional circulation)

\*E-mail: seol@hanara.kmaritime.ac.kr



**Fig. 1.** Dynamical aspects of stratosphere-troposphere exchange (from Holton *et al.*, 1995). The tropopause is shown by the thick line. Thin lines are isentropic or constant potential temperature surfaces. The heavily shaded region is the “lowermost stratosphere”, and the region above the 380 K surface is the “overworld”. Light shading in the overworld denotes wave-induced forcing (the extratropical “pump”). The wavy doubled-headed arrows denote meridional transport by eddy motions. The broad arrows show transport by the global-scale circulation, which is driven by the extratropical pump.

은 크게 열대역에서 대류권계면을 가로지르는 상승류, 성층권에서의 극방향으로의 흐름, 그리고 중·고위도 역에서의 대류권으로의 하강류로 구성되어진다(Fig. 1 참조).

Rosenlof and Holton(1993), Rosenlof(1995), Eluszkiewicz *et al.*(1996) 그리고 Yang and Tung(1996)은 대류권과 성층권의 대기대순환에 관한 연구에서, 열대역의 하부 성층권에서 상향하는 질량 플럭스는 북반구의 겨울(12~2월)에 최대이고, 북반구의 여름(6~8월)에 최소인 일년주기의 변동을 보인다는 것을 밝혀냈다. 그에 더하여, Seol and Yamazaki(1999)는 변형 오일러평균방정식계(transformed Eulerian-mean(TEM) formalism)의 잔차평균자오면순환(residual mean meridional circulation)을 이용하여 구한 대류권계면 부근의 질량 플럭스로부터 대류권과 성층권 순환에 있어서의 계절변화를 명확히 밝혀냈다. 그러나, 대류권과 성층권 순환의 장기변동에 대하여는 아직 충분히 규명되어져 있지 않은 것이 현실이다(이 연구에서는 일년주기의 변동보다 긴 경우를 장기변동이라 한다).

대류권과 성층권 순환에 있어서의 장기변동에 대하여는 Eluszkiewicz *et al.*(1996, 1997), Yang and Tung

(1996), Mote *et al.*(1996) 및 Seol and Yamazaki (1998) 등의 연구가 있다. Eluszkiewicz *et al.*(1996, 1997)과 Yang and Tung(1996) 그리고 Seol and Yamazaki(1998)는 적도역의 준2년주기진동(quasi-biennial oscillation: QBO)이 서풍위상일 때보다 동풍위상일 때에 전지구 규모의 대기대순환이 보다 강하다는 것을 보였고, Mote *et al.*(1996)도 열대역의 수증기 자료를 이용하여 같은 결과를 보였다. 그러나, 준2년 주기진동보다 긴 대류권-성층권 순환의 장기변동에 대하여는 아직까지도 뚜렷한 연구 결과가 없는 것이 현실이다.

특히, 약 4~5년의 주기를 보이며, 전지구 규모의 이상기상과 기후시스템에 크나 큰 영향을 미치는 것으로 알려진 엘니뇨(El Niño-Southern Oscillation)와 관련한 대기대순환의 변동에 대하여는 밝혀진 것이 거의 없다. 엘니뇨와 관련한 대기대순환에 대한 연구로는 Shiotani(1992), Hasebe(1993), Shiotani and Hasebe(1994), Zou and Gao(1997) 등이 있다. ENSO 현상은 적도 동부 태평양의 해수면 온도가 수년에 1 번, 반년 이상에 걸쳐 광범위하게 상승하는 현상을 말한다. 엘니뇨현상은 1950년대까지는 남미 연안의 국지적인 현상이라고 생각하였으나, 그 이후 지구 규모의 대기·해양 관측망이 정비되기 시작하면서 태평양 적도지역 중앙 부근에까지 영향을 미치는 대규모 현상이라는 것이 밝혀졌다. 더욱이 이 현상은 태평양 열대지역의 기압장 변동과 밀접한 관련이 있고, 전지구적인 규모의 대기대순환에도 크나 큰 영향을 주어 중·고위도역까지 포함하는 세계 각지의 기상에 중대한 영향을 미치고 있음이 밝혀졌다.

이에, 이 연구에서는 보다 장기간의 전지구 객관해석자료를 이용하여 TEM 방정식계로부터 잔차평균자오면순환과 그것의 유선함수 그리고 질량 플럭스를 구하여, 준2년주기진동 보다 긴 엘니뇨 스케일의 장기변동에 초점을 맞추어 대류권과 성층권의 평균자오면순환을 보다 상세히 규명하고자 한다.

## 자 료

이 연구에서 사용되어진 자료는 10년간(1985년 12월 1일 ~ 1995년 11월 30일)의 NMC(U.S. National Meteorological Center) 자료로, 1일 1회(GMT 1200)의 값을 갖는다. 50hPa 보다 높은 곳에 대하여는 NMC/CAC(Climat Analysis Center)에서 만든 지오

포텐셜 고도(geopotential height) 자료와 온도 자료를 사용하였다.

자료의 수평분해능은  $5.0^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ (위도 $\times$ 경도)이고, 18개 기압면(1000, 850, 700, 500, 400, 300, 250, 200, 150, 100, 70, 50, 30, 10, 5, 2, 1, 0.4hPa)의 수직분해능을 갖는다.

동서와 남북방향의 바람은 1000hPa에서 50hPa까지의 높이에서 이용할 수 있다. 50hPa 보다 높은 곳에서는 위도  $20^{\circ}$ 와  $90^{\circ}$  사이의 지오폠펌셜 고도 자료를 사용하여 비선형 균형풍(nonlinear balance wind)을 구하여 이용하였다(Randel, 1987). 위도  $10^{\circ}$ 와  $20^{\circ}$  사이에서는 지균풍(geostrophic wind)과 비선형 균형풍의 선형 복합(linear combination)이 사용되어졌고, 적도역인 남위  $10^{\circ}$ 와 북위  $10^{\circ}$  사이의 바람은 cubic-spline 보간법을 이용하여 구하였다. 수직방향의 바람은 동서와 남북방향의 바람을 이용하여 연속방정식으로 구하였고, 결손 자료는 선형적으로 보간하여 처리하였다(Seol and Yamazaki, 1999).

중회귀분석(multiple regression analysis)을 위하여, 싱가포르( $1^{\circ}\text{N}$ ,  $104^{\circ}\text{E}$ ) 상공에 있어서의 월평균 동서풍과 SOI(Southern Oscillation Index)가 사용되어졌다. 싱가포르 상공에 있어서의 월평균 동서풍은 70, 50, 40, 30, 20, 15, 10hPa에서의 자료이다. SOI는 남태평양의 Tahiti( $17.5^{\circ}\text{S}$ ,  $149.6^{\circ}\text{W}$ )와 북부 오스트레일리아의 Darwin( $12.4^{\circ}\text{N}$ ,  $130.9^{\circ}\text{E}$ )과의 기압 차이를 나타내는 지수이며, 엘니뇨의 척도이다. 즉, SOI가 큰 부(負)의 값일 때는 엘니뇨현상이, 큰 정(正)의 값일 때는 라니냐현상이 발생했다는 것을 의미한다.

### 잔차평균자오면순환의 계산과 질량 플럭스의 산출

잔차평균자오면순환( $\bar{v}^*$ ,  $\bar{w}^*$ )은 구형 로그 기압좌표계(spherical log pressure coordinate)에 있어서의 TEM 동서운동방정식과 연속방정식의 복합시스템을 풀어 계산한다.

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{v}^* \left[ \frac{1}{\text{acos}\phi} \frac{\partial}{\partial \phi} (\bar{u} \text{cos}\phi) - f \right] + \bar{w}^* \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} = \frac{1}{\rho_0 \text{acos}\phi} \nabla \cdot \mathbf{F} + \bar{X} \quad (1)$$

$$\frac{1}{\text{acos}\phi} \frac{\partial}{\partial \phi} (\bar{v}^* \text{cos}\phi) + \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial z} (\rho_0 \bar{w}^*) = 0 \quad (2)$$

여기서,  $\nabla \cdot \mathbf{F}$ 는 Eliassen-Palm(E-P) flux divergence 이고,  $\bar{X}$ 는 미분해 스케일의 에디(eddy)에 의한 힘(force)이며,  $\text{bar}(-)$ 는 동서 평균(zonal mean)을 의미한다. 그 외의 다른 기호들은 Andrew *et al.*(1987)에 정의되어 있다. TEM 방정식계에 있어서의 E-P flux divergence는 다음과 같이 표현되어진다.

$$\nabla \cdot \mathbf{F} = \frac{1}{\text{acos}\phi} \frac{\partial}{\partial \phi} \left( F^{(\phi)} \text{cos}\phi + \frac{\partial F^{(z)}}{\partial z} \right) \quad (3)$$

단,

$$F^{(\phi)} = \rho_0 \text{acos}\phi (\bar{u}_z \bar{v}'\theta' / \theta_z - \bar{v}'u') \quad (4)$$

$$F^{(z)} = \rho_0 \text{acos}\phi$$

$$\times \left\{ \left[ f - \frac{1}{\text{acos}\phi} \frac{\partial}{\partial \phi} (\bar{u} \text{cos}\phi) \right] (\bar{v}'\theta' / \theta_z - \bar{w}'u') \right\} \quad (5)$$

E-P flux 벡터  $\mathbf{F}=(F^{(\phi)}, F^{(z)})$ 는 식(4)와 (5)의 우변의 모든 항으로부터 계산되어진다. 이 연구에서,  $\bar{X}$ 는 Shibata and Chiba(1990)에서 사용되어진 고도 의존의 Rayleigh 마찰계수( $\kappa$ )로 간단히 파라메터화( $\bar{X} = -\kappa \bar{u}$ ) 하였다. 0.05hPa과 3hPa에서의 마찰계수는 각각  $5 \times 10^{-6} \text{s}^{-1}$ ,  $2 \times 10^{-7} \text{s}^{-1}$ 이고, 다른 높이에서의 마찰계수들은 로그 기압좌표계에서 선형적으로 보간되어진다. 20hPa 이하에서의 마찰계수는 동일하게  $4.5 \times 10^{-8} \text{s}^{-1}$ 이 이용되어진다. 이 연구에 이용되어진 E-P flux divergence와  $\bar{X}$ 는 일일(1日)의 자료에 근거하여 얻어지므로, 잔차평균자오면순환도 10년간에 대하여 일일의 자료로 얻어진다.

$\nabla \cdot \mathbf{F}$ 와  $\bar{X}$ 를 계산한 후,  $\bar{v}^*$ 와  $\bar{w}^*$ 를 구하기 위하여 반복법(iterative method)을 사용한다. 식(1)로부터  $\bar{v}^*$ 는 다음과 같이 쓰여진다.

$$\bar{v}^* = \frac{(\rho_0 \text{acos}\phi)^{-1} \nabla \cdot \mathbf{F} + \bar{X} - \partial \bar{u} / \partial t - \bar{w}^* (\partial \bar{u} / \partial z)}{(\text{acos}\phi)^{-1} \partial (\bar{u} \text{cos}\phi) / \partial \phi - f} \quad (6)$$

식(6)에서  $\partial \bar{u} / \partial t$ 와  $(\text{acos}\phi)^{-1} \partial (\bar{u} \text{cos}\phi) / \partial \phi$ 는 NMC 자료로부터 직접 계산되어진다. 따라서, 처음의  $\bar{v}^*$ 는  $\bar{w}^* (\partial \bar{u} / \partial z)$ 를 무시함으로써 얻어진다. 그리고,  $\bar{w}^*$ 는 0.25hPa에서  $\bar{w}^* = 0$ 라는 경계조건을 가지고 연속방정식(식(2))을 적분하여 얻어진다. 0.4hPa 위로는 자료가 없으므로, 최상층은 자의적으로 선택되어진다. 0.4hPa 위의 질량은 100hPa 위 질량의 0.4%에 불과하므로, 100hPa에 있어서의 질량 플럭스에 대한 0.4hPa 위에 있는 층의 기여는 작다고 말할 수

있다.

$\bar{w}^*$  를 알면, 새로운  $\bar{v}^*$  는  $\bar{w}^*(\partial\bar{u}/\partial z)$ 를 포함하는 식(1)로부터 구할 수 있다. 식(1)과 (2)의 모든 항을 포함하는, 이와 같은 과정을 3회 반복한다.  $\bar{v}^*$  와  $\bar{w}^*$  는 2회 재부터 거의 변화하지 않는다.

만일, 식(1)에서  $\partial\bar{u}/\partial t$ ,  $(\text{acos}\phi)^{-1}\partial(\bar{u}\text{cos}\phi)/\partial\phi$ ,  $\bar{w}^*(\partial\bar{u}/\partial z)$  그리고  $\bar{X}$ 가 무시되어진다면, 잔차평균자오면순환은 Rosenlof and Holton(1993)과 같이 downward control method로부터 구한 잔차평균자오면순환과 본질적으로 동등하다.

$\bar{v}^*$  와  $\bar{w}^*$  를 계산한 후, 잔차평균자오면순환의 유선함수와 어느 한 기압면을 가로지르는 질량 플럭스를 구하기 위하여 Rosenlof and Holton(1993)과 Rosenlof(1995)에서의 방법을 사용한다. 잔차평균자오면순환에 대한 유선함수는 다음과 같이 정의되어진다.

$$\bar{v}^* = -\frac{1}{\rho_0 \text{cos}\phi} \frac{\partial\Psi}{\partial z}, \bar{w}^* = \frac{1}{\rho_0 \text{acos}\phi} \frac{\partial\Psi}{\partial z} \quad (7)$$

주어진 위도( $\phi$ )에서 극 쪽으로, 어느 한 기압면을 가로지르는 순(純)하향 질량 플럭스는 극에서  $\Psi=0$ 이라는 경계조건을 사용하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$2\pi \int_{\phi}^{\text{pole}} \rho_0 a^2 \text{cos}\phi \bar{w}^* d\phi = 2\pi a \Psi(\phi) \quad (8)$$

여기서,  $\phi$ 는  $|\Psi|$ 가 최대인 위도를 말하며,  $\bar{w}^*$  가 상향에서 하향으로 방향을 바꾸는 위도와 일치한다. 이 연구에서 중·고위도역이라 함은 위도  $\phi$ 의 극 쪽 영역을 말하고, 열대역이라 함은 남반구와 북반구의 중·고위도역 사이에 존재하는 영역을 말한다. 이 연구에서 남반구와 북반구의 중·고위도역에 있어서의 하향 질량 플럭스는 식(8)을 이용하여 월평균 유선함수로부터 구하고, 열대역의 상향 질량 플럭스는 남반구와 북반구의 하향 질량 플럭스의 합으로 구한다.

### 해석 결과

대류권-성층권 평균자오면순환의 지표라고 할 수 있는 100hPa면을 가로지르는 열대역의 상향 질량 플럭스, 남반구의 하향 질량 플럭스 그리고 북반구의 하향 질량 플럭스에서의 장기변동(준2년주기진동 관련 변동, 엘니뇨 관련 변동 등) 유무와 그 장기변동

을 정량적으로 조사하기 위하여 중회귀통계모델(multiple regression statistical model)을 도입하여 사용한다. 그 모델은 다음과 같다.

$$Y(t) = \beta_0 + \beta_1 X_1(t) + \beta_2 X_2(t) + \beta_3 X_3(t) + \beta_4 t + \beta_5 X_5(t) + \beta_6 X_6(t) + \beta_7 X_7(t) + \beta_8 X_8(t) + \epsilon(t) \quad (9)$$

여기서, 각각의 기호는 다음과 같다.

t : 월(月),

Y(t) : 월별의 열대역 상향 질량 플럭스, 남반구 하향 질량 플럭스 또는 북반구 하향 질량 플럭스,

$\beta_0$  : 회귀상수,

$\beta_i(i=1, 2, \dots, 8)$  : 회귀계수,

$X_1(t)$ 와  $X_2(t)$  : 각각 싱가포르 상공 50hPa, 20hPa에 있어서의 동서풍(적도역의 준2년주기진동을 나타냄),

$X_3(t)$  : SOI(엘니뇨현상을 나타냄),

$X_5(t)$ 와  $X_6(t)$  : 일년주기의 sine 성분과 cosine 성분(계절변화를 나타냄),

$X_7(t)$ 와  $X_8(t)$  : 반년주기의 sine 성분과 cosine 성분(계절변화를 나타냄),

$\epsilon(t)$  : 잔차.

잔차평균자오면순환을 계산하여 구한 100hPa면을 가로지르는 열대역의 상향 질량 플럭스에 대하여 중회귀통계모델을 이용하여 얻어진 결과가 Fig. 2에 나타나 있다. 그리고, Table 1은 100hPa면을 가로지르는 열대역의 상향 질량 플럭스에 대한 회귀계수를 정리한 것이다.

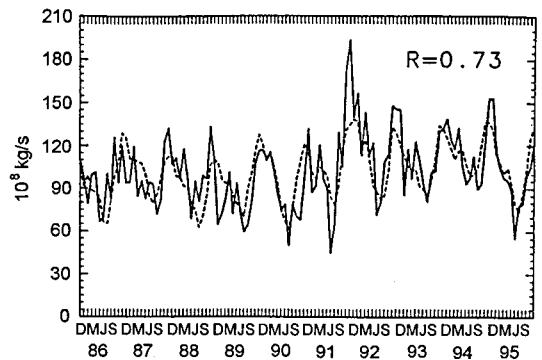


Fig. 2. Time series of the tropical upward mass flux across the 100 hPa surface (solid line) and that calculated from the multiple regression model (dotted line).

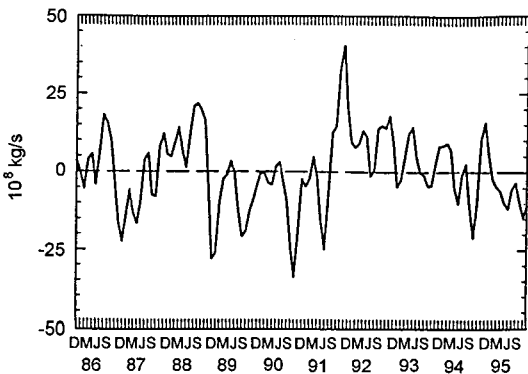
**Table 1.** Values ( $\times 10^8$ ) of the regression coefficients for the tropical upward mass flux at 100 hPa (Values in parentheses represent 95% confidence interval).

Coefficient	Value
$\beta_1$	-0.24( $\pm 0.31$ ) kg/m
$\beta_2$	-0.20( $\pm 0.18$ ) kg/m
$\beta_3$	-3.88( $\pm 2.24$ ) kg/s
$\beta_4$	0.15( $\pm 0.10$ ) kg/s/month
$\beta_5$	-5.49( $\pm 4.87$ ) kg/s
$\beta_6$	20.34( $\pm 4.87$ ) kg/s
$\beta_7$	-7.02( $\pm 4.73$ ) kg/s
$\beta_8$	-5.26( $\pm 4.73$ ) kg/s

Fig. 2에서 계산으로부터 얻어진 열대역의 상향 질량 플럭스(실선)와 회귀 질량 플럭스(점선) 사이의 중상관계수가 0.73임을 알 수 있다. 남반구의 하향 질량 플럭스와 북반구의 하향 질량 플럭스에 대한 중상관계수는 각각 0.83과 0.93이다(그림 생략). 이들 중상관계수들은 유의수준 1%(F 분포)로 유의하므로, 잔차평균자오면순환을 이용하여 계산으로부터 얻어진 100hPa면을 가로지르는 열대역과 중·고위도역의 질량 플럭스들이 중회귀분석의 설명변수들에 의하여 잘 설명되고 있음을 보여준다.

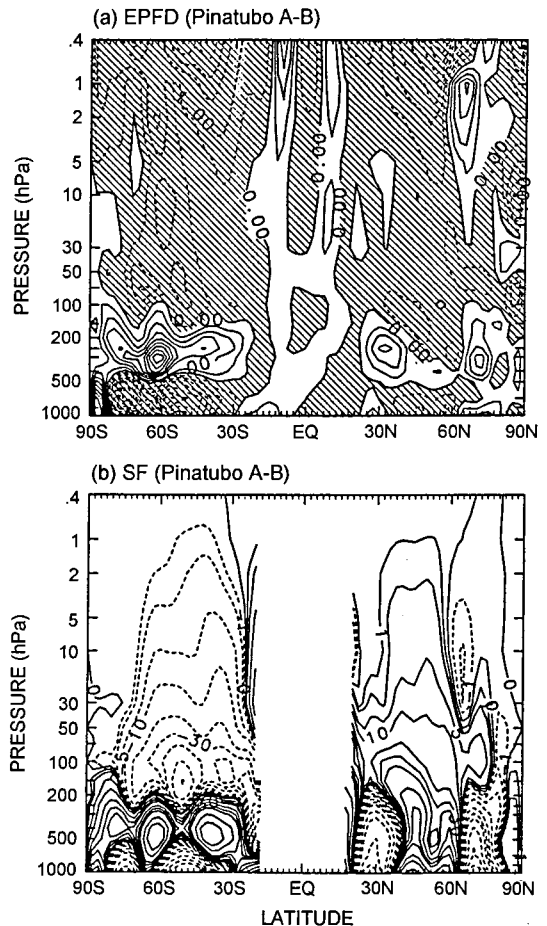
열대역의 상향 질량 플럭스에 대한 중상관계수가 남반구와 북반구의 하향 질량 플럭스에 대한 중상관계수보다 작은 이유는, 남반구의 하향 질량 플럭스와 북반구의 하향 질량 플럭스의 일년 주기가 서로 다른 위상을 가지고 있고, 잔차들이 일치하기 때문이다.

실제로 남반구와 북반구에 있어서의 잔차는 1991년 6월 15일, 필리핀 피나투보(15.1°N, 120.3°E) 화산 폭발 후 급격히 증가한다. Fig. 3은 100hPa면을 가로지



**Fig. 3.** Time series of residual for the tropical upward mass flux across the 100 hPa surface. The value was smoothed.

르는 열대역의 상향 질량 플럭스에 대한 잔차를 보인다. 이 그림에서 피나투보 화산 폭발과 관련한 질량 플럭스의 증가는 1991년 6~11월의 두 계절(여름과 가을) 동안에 가장 크다는 것을 알 수 있다. 그 증가는 화산 폭발 약 2.5년 후인 1993년 말 경에 멈춘다. 화산 폭발과 관련한 잔차의 최대값은 1991년 11월에 있어서의  $40 \times 10^8$  kg/s이다. 1991년 12월 ~ 1992년 2월의 열대역의 상향 질량 플럭스는 10년간(1985 ~ 1995년)의 북반구 겨울(12~2월)의 평균값(열대역의 상향 질량 플럭스) 보다 약 25% 크다. 이것



**Fig. 4.** Latitude-height sections of the differences of (a) E-P flux divergence anomalies and (b) residual circulation function anomalies between August 1991-July 1993 (A) and June 1989-May 1991 (B). The values were smoothed. Contour interval in (a) is 0.5 m/s/day, and contour levels in (b) are  $\pm 1000, \pm 500, \pm 400, \pm 300, \pm 200, \pm 150, \pm 100, \pm 80, \pm 60, \pm 40, \pm 30, \pm 20, \pm 10, \pm 5, \pm 2, \pm 1$  and 0 kg/m/s. In (a), negative values are hatched.

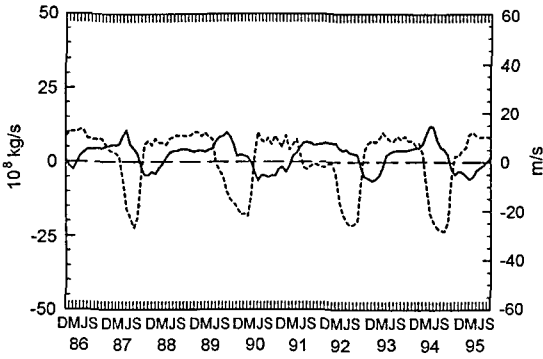


Fig. 5. Variation of the tropical upward mass flux at 100 hPa associated with the QBO (solid line). The dotted line shows the monthly mean 50 hPa zonal wind at Singapore.

은 Eluszkiewicz *et al.*(1997)에 의하여 보고되어진 결과와 거의 같은 것이다. 100hPa면에 있어서의 중·고위도역의 하향 질량 플럭스에 대한 피나투보 화산 폭발의 기여는 북반구보다 남반구에서 보다 크다. 그러나, 잔차의 최대값은 양반구에서 거의 같다(그림 생략).

Fig. 4(a)와 4(b)는 각각 피나투보 화산 폭발 후 2년 평균과 폭발 전 2년 평균 사이의 E-P flux divergence 아노말리(anomaly) 차와 잔차평균자오면순환 유선함수의 아노말리 차를 보인다. 화산 폭발 후, 전 지구 규모의 순환은 크게 강화되어지고[Fig 4(b) 참조], 부의 wave forcing은 중·고위도역의 성층권에서 강화되어진다[Fig. 4(a) 참조]. McCormick *et al.* (1995)은 피나투보 화산 폭발로 인하여 하부 성층권에 축적되어진 다량의 에어로졸로 인하여 생기는 방사 가열의 차는 전지구 규모의 대기대순환을 강화시킨다는 것을 보였다.

100hPa면을 가로지르는 열대역의 상향 질량 플럭스에 대한 준2년주기진동 신호가 싱가포르 상공에 있어서의 동서풍과 함께 Fig. 5에 나타나 있다. Fig. 5에서 100hPa면을 가로지르는 열대역의 상향 질량 플럭스는 50hPa를 기준으로 하여 동풍위상일 때 증가되어지고, 서풍위상일 때 감소되어진다는 것을 확인할 수 있다. 이 결과는 Eluszkiewicz *et al.*(1996, 1997), Yang and Tung(1996), Mote *et al.*(1996) 및 Seol and Yamazaki(1998)의 연구 결과와 같다.

Fig. 6(a)와 6(b)는 각각 준2년주기진동과 관련한 E-P flux divergence 아노말리의 차(동풍 위상-서풍 위상)와 잔차평균자오면순환 유선함수의 아노말리의

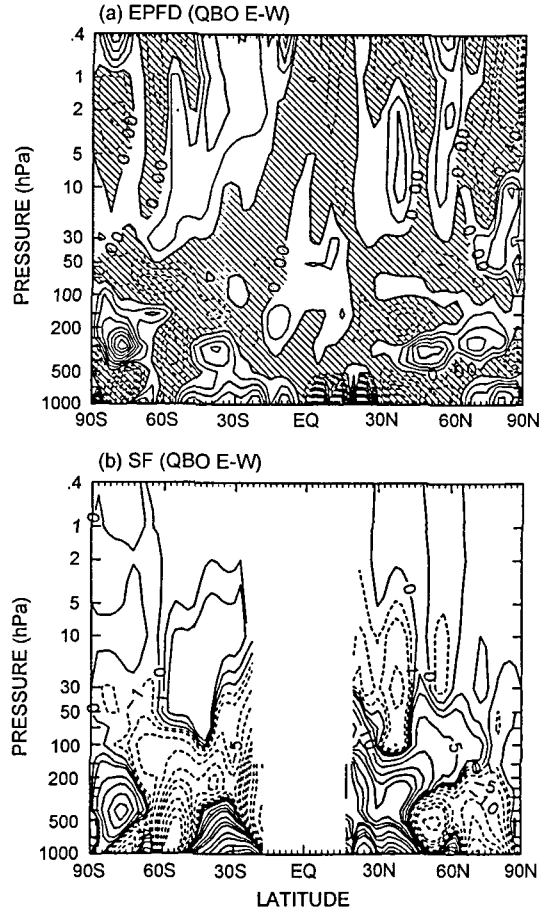


Fig. 6. As in Fig. 4, except for the differences between the easterly phase of QBO (E) and the westerly phase (W). Contour interval in (a) is 0.2 m/s/day.

차(동풍 위상-서풍 위상)를 보인다. Fig. 6(b)에서, 상당한 하강류의 아노말리가 하부 성층권 15°~30°N/S 부근의 아열대역에서 발견되어진다. 이들 순환의 아노말리는, 적도역의 동풍역에서 상향운동이 야기되어지고, 그것을 보충하는 하강운동이 아열대역에서 야기되어지는 준2년주기진동 자체의 자오면순환과 일치한다[Plumb and Bell(1982) 참조]. Fig. 6(b)에서, 아열대역의 하강류가 중부 대류권까지 침입하는 것은 주목할 만하다. 양반구 중·고위도역의 하향 질량 플럭스는 준2년주기진동의 동풍 위상시에 크고, 그것은 또한 열대역 상향 질량 플럭스의 증가에 기여한다. 동풍 위상시에 강화되어지는 이들 순환의 아노말리는 중·고위도역 하부와 중부 성층권에 있어서의 부의 wave forcing과 밀접히 관련되어 있다[Fig. 6(a) 참조].

Fig. 7은 100hPa면을 가로지르는 열대역의 상향 질

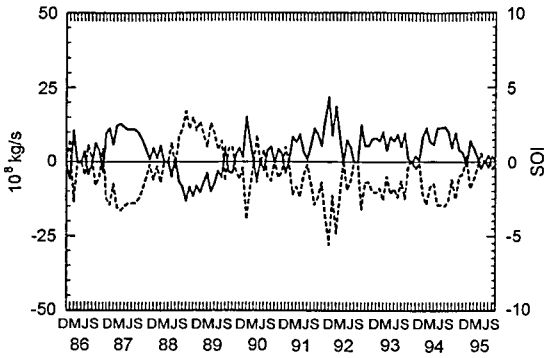


Fig. 7. Variation of the tropical upward mass flux at 100 hPa associated with the ENSO event (solid line). The dotted line shows the SOI.

량 플럭스에 대한 엘니뇨 신호를 보인다. 100hPa면에 있어서의 열대역의 상향 질량 플럭스는 SOI가 큰 부의 값을 가질 때 즉, 엘니뇨현상 동안(1986~1987년, 1991~1992년, 1993년)에 증가하고, 라니냐현상 동안(1988~1989년)에 감소한다는 것을 알 수 있다. 그 열대역 상향 질량 플럭스의 최대 진폭은 약  $33 \times 10^8 \text{ kg/s}$ 이다.

Fig. 8(a)와 8(b)는 각각 SOI가 -1 이하인 경우와 정인 경우에 있어서의 E-P flux divergence 아노말리와 잔차평균자오면순환 유선함수의 아노말리의 차를 보인다. Fig. 8(b)에서 알 수 있는 것처럼, 엘니뇨현상이 발생하면 전지구 규모의 대류권-성층권 평균자오면순환은 강화되어 진다. 즉, 열대역에서는 상승류가, 남반구와 북반구의 중·고위도역에서는 하강류가 강해진다. 이와 같은 전지구 규모의 대기대순환은 중·상부 성층권에까지 도달한다.

엘니뇨와 관련한 대기대순환의 이러한 변화는 해수면 온도(sea surface temperature: SST)의 변화와 wave forcing과 깊은 관계가 있을 것이라고 생각되어 진다. 즉, wave forcing은 SOI가 정인 때보다 부인 때에 보다 크다[Fig. 8(a) 참조]. 그리고, 라니냐현상 때보다 엘니뇨현상 때에 동부 태평양의 해수면 온도가 높아지기 때문에 활발한 적운대류와 함께 강화되어진 대기의 상향운동은 하부성층권에 도달하고, Brewer-Dobson 순환을 강화시킨다고 볼 수 있다. Hasebe(1993)와 Shiotani and Hasebe(1994)는 열대역의 총오존량을 이용하여 강화되어진 상향운동에 동반되어지는 이류효과는 총오존량을 감소시키는 경향을 보인다고 보고하여 이를 뒷받침하고 있다.

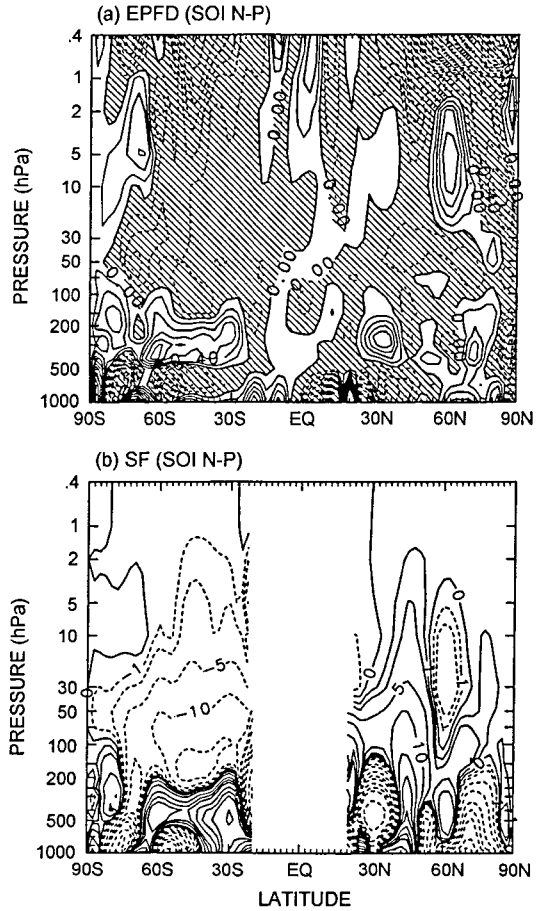


Fig. 8. As in Fig. 4, except for the differences between the negative 1 or less SOI (N) and the positive SOI (P). Contour interval in (a) is 0.2 m/s/day.

## 결론

10년간(1985년 12월 ~ 1995년 11월)의 TEM 잔차 평균자오면순환을 이용하여 주로 100hPa면을 가로지르는 열대역의 상향 질량 플럭스와 대류권-성층권 대기대순환의 장기변동에 대하여 알아보았다. 대류권-성층권 대기대순환에 관한 연구는 전지구 규모의 기후변동에 대한 인간활동의 영향을 이해하는 데에 있어서 매우 중요하다. 특히, 엘니뇨와 관련한 대류권과 성층권의 평균자오면순환에 주목하여 행한 이 연구에서 얻어진 결과를 정리하면 다음과 같다.

엘니뇨현상 동안에 100hPa면을 가로지르는 열대역의 상향 질량 플럭스는 증가하고, 라니냐현상 동안에 그 열대역 상향 질량 플럭스는 감소한다. 100hPa면

을 가로지르는 열대역의 상향 질량 플럭스에 대한 엘니뇨·라니냐 현상의 기여는 약  $33 \times 10^8 \text{ kg/s}$ 이다.

결과적으로, 엘니뇨현상 동안에 전지구 규모의 대류권-성층권 순환은 강화되어진다. 즉, 열대역에서는 상승류가, 남반구와 북반구의 중·고위도역에서는 하강류가 강해진다. 이와 같은 전지구 규모의 대기대순환은 중·상부 성층권에까지 도달한다.

또한, 전지구 규모의 대류권-성층권 순환은 준2년 주기진동의 동풍 위상 동안에 강화되어지고, 준2년주기진동의 서풍 위상 동안에 약화되어진다. 그리고, 1991년 6월에 있었던 피나투보 화산 폭발로 전지구 규모의 대류권-성층권 순환은 급격히 강화되어지고, 그 순환의 강화는 화산 폭발 약 2.5년 후인 1993년 말 경에 멈춘다. 화산 폭발과 관련한 잔차의 최대값은 1991년 11월에 있어서의  $40 \times 10^8 \text{ kg/s}$ 이다.

## 사 사

이 논문의 질적인 향상을 위하여 세심한 심사를 하여 주신 두 분의 심사위원께 깊은 감사를 드립니다. 또한, SOI 자료를 제공하여 준 M. Shiotani 박사와 싱기플 상공의 바람 자료를 제공하여 준 B. Naujokat 박사에게도 깊은 감사를 드립니다. 이 논문은 1999년도 한국학술진흥재단의 연구비에 의하여 지원되었음(KRF-99-003-D00193).

## 참고문헌

- Andrews, D.G., Holton, J.R., and Leovy, C.B., 1987, Middle Atmosphere Dynamics. Academic Press, 498 p.
- Eluszkiewicz, J., Crisp, D., Zurek, R., Elson, L., Fishbein, E., Froidevaux, L., Waters, J., Grainger, R.G., Lambert, A., Harwood, R., and Peckham, G., 1996, Residual circulation in the stratosphere and lower mesosphere as diagnosed from Microwave Limb Sounder data. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 53, 217-240.
- Eluszkiewicz, J., Crisp, D., Grainger, R.G., Lambert, A., Roche, A.E., Kumer, J.B., and Mergenthaler, J.L., 1997, Sensitivity of the residual circulation diagnosed from the UARS data to the uncertainties in the input fields and to the inclusion of aerosols. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 54, 1739-1757.
- Hasebe, F., 1993, Dynamical response of the tropical total ozone to sea surface temperature changes. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 50, 345-356.
- Holton, J.R., Haynes, P.H., McIntyre, M.E., Douglass, A.R., Rood, R.B., and Pfister, L., 1995, Stratosphere-troposphere exchange. *Reviews of Geophysics*, 33, 403-439.
- McCormick, M.P., Thomason, L.W., and Trepte, C.R., 1995, Atmospheric effects of the Mt Pinatubo eruption. *Nature*, 373, 399-404.
- Mote, P.W., Rosenlof, K.H., McIntyre, M.E., Carr, E.S., Gille, J.C., Holton, J.R., Kinnarsley, J.S., Pumphrey, H.C., Russell III, J.M., and Waters, J.W., 1996, An atmospheric tape recorder: The imprint of tropical tropopause temperatures on stratospheric water vapor. *Journal of Geophysical Research*, 101, 3989-4006.
- Plumb, R.A. and Bell, R.C., 1982, A model of the quasi-biennial oscillation on an equatorial beta-plane. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 108, 335-352.
- Randel, W.J., 1987, The evaluation of winds from geopotential height data in the stratosphere. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 44, 3097-3120.
- Rosenlof, K.H., 1995, Seasonal cycle of the residual mean meridional circulation in the stratosphere. *Journal of Geophysical Research*, 100, 5173-5191.
- Rosenlof, K.H. and Holton, J.R., 1993, Estimates of the stratospheric residual circulation using the downward control principle. *Journal of Geophysical Research*, 98, 10,465-10,479.
- Seol, D.-I. and Yamazaki, K., 1998, QBO and Pinatubo signals in the mass flux at 100 hPa and stratospheric circulation. *Geophysical Research Letters*, 25, 1641-1644.
- Seol, D.-I. and Yamazaki, K., 1999, Residual Mean Meridional Circulation in the Stratosphere and Upper Troposphere: Climatological Aspects. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 77, 985-996.
- Shibata, K. and Chiba, M., 1990, A simulation of seasonal variation of the stratospheric circulation with a general circulation model. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 68, 687-703.
- Shiotani, M., 1992, Annual, Quasi-Biennial, and El Niño-Southern Oscillation (ENSO) Time-Scale Variations in Equatorial Total Ozone. *Journal of Geophysical Research*, 97, 7625-7633.
- Shiotani, M. and Hasebe, F., 1994, Stratospheric ozone variations in the equatorial region as seen in Stratospheric Aerosol and Gas Experiment data. *Journal of Geophysical Research*, 99, 14,575-14,584.
- Yang, H. and Tung, K.K., 1996, Cross-isentropic stratosphere-troposphere exchange of mass and water vapor. *Journal of Geophysical Research*, 101, 9413-9423.
- Zou, H. and Gao, Y., 1997, Long-term variation in TOMS ozone over 60~70°S. *Geophysical Research Letters*, 24, 2295-2298.