

순압 태풍 운동에서의 대칭 및 비대칭 순환의 역할

백종수·백종진

광주과학기술원 환경공학과
(1998년 9월 11일 접수)

Roles of Symmetric and Asymmetric Circulations in Barotropic Tropical Cyclone Motion

Jong-Su Paek and Jong-Jin Baik

Department of Environmental Science and Engineering, Kwangju Institute of Science and Technology, Kwangju, Korea
(Manuscript received 11 September 1998)

Abstract

The motion of cyclonic vortex on a beta plane in no environmental flow is investigated by performing an extended-range time integration (180 hours) of nondivergent barotropic vorticity equation. Emphasis is put on the roles of symmetric and asymmetric circulations in the beta drift. Similar to previous studies, the dominant part of the asymmetric circulation is a pair of an anticyclonic gyre to the east of the vortex center and a cyclonic gyre to the west, and a nearly uniform ventilation flow exists between the gyres. Analysis of the asymmetric kinetic energy equation reveals that the asymmetric circulation develops by extracting kinetic energy from the symmetric circulation of the vortex and the beta conversion term plays a key role in transferring kinetic energy from symmetric to asymmetric circulation. The anticyclonic gyre to the east of the vortex center appears to split into two at the later period. It is shown that the average velocity of the ventilation flow is almost same as the vortex translation velocity. Analysis of the streamfunction tendency equation shows that the advection of symmetric vorticity by the asymmetric flow plays an important role in moving the entire vortex to the north-northwest. The advection of asymmetric vorticity by the symmetric flow resists asymmetric forcing, thus making inner vortex maintain its symmetry for a long time, and orients the ventilation flow toward more northwest through a counterclockwise rotation of beta gyres. The advection of planetary vorticity by the symmetric flow always increases relative vorticity to the west of the vortex center and forms initial asymmetric circulation. The advection of planetary vorticity by the asymmetric flow weakens the cyclonic symmetric flow and causes a clockwise rotation of the anticyclonic gyre.

1. 서 론

구형의 회전하는 지구 위에서 하나의 저기압성 소용돌이가 존재하는 경우, 기본류가 없더라도 소용돌이는 북서진한다. 이 현상을 베타(beta) 표류라고 하며 이는 저기압성 소용돌이의 이동 역학을 규명하는 데 가장 기본적인 부분으로서 지금까지 비발산 순압 소용돌이도 방정식 또는 천수 방정식을 이용한 많은 이론적, 수치적 연구가 수행되어 왔다(예, Chan and Williams, 1987; Shapiro and Ooyama, 1990; 윤순창·이갑복, 1990; 권혁조, 1993).

소용돌이의 이동에 대한 지구 자전 효과에 관한 연구는 Rossby(1939, 1948)로 부터 시작되었다. Rossby는 소용돌이 북쪽에서의 더 큰 전향력에 의해 소용돌이가 북쪽으로 이동한다고 하였다. Holland(1983)는 초기에는 소용돌이 동쪽과 서쪽의 다른 행성 소용돌이도의 이유에 의해 소용돌이가 서쪽으로 이동하고 절대 소용돌이도를 보존하기 위해 2차적으로 발생한 순환이 소용돌이를 북쪽으로 이동시키므로써 그

결과, 소용돌이가 북서쪽으로 이동한다고 하였다.

Chan and Williams(1987)는 비발산 순압 소용돌이도 방정식에서 비선형 항을 제거한 경우에 선형 베타 효과는 소용돌이를 서쪽으로 확장시킬 뿐 소용돌이를 이동시키는데는 많은 기여를 하지 않음을 밝혔다. 실제 이러한 수치 실험에서 소용돌이의 이동 속도는 $0.2\sim0.3 \text{ ms}^{-1}$ 로써 그들의 설명이 타당함을 입증해준다. 한편 선형 항을 제거한 수치 실험에서는 소용돌이가 이동하지 않고 제자리에서 회전만 한다. 따라서 선형 항과 비선형 항 각각의 효과만으로는 소용돌이가 북서쪽으로 이동할 수 없으며, 이 두 항이 모두 포함된 경우에만 소용돌이가 북서쪽으로 이동한다.

Fiorino and Elsberry(1989)는 비발산 순압 소용돌이도 방정식을 수치 적분하여 구한 유선함수장을 대칭 순환과 비대칭 순환으로 분리하여 베타 표류 현상을 연구하였다. 그들은 비대칭 순환은 주로 파수가 1인 두 개의 맞회전하는 베타 사이어(gyre)이고, 사이어 사이에 소용돌이를 이동시키는 통풍류(ventilation flow)가 존재하며 이 통풍류의 속도가

소용돌이 중심의 이동 속도와 거의 같다고 하였다. 그리고 대칭 순환과 비대칭 순환으로 표현된 유선함수 경향 방정식의 분석을 통해 순압 소용돌이도 방정식의 각 항들이 소용돌이의 이동에 미치는 영향을 밝혔다. Li and Wang(1994)은 천수 방정식을 장시간 수치 적분하여 비대칭 순환의 변화에 따른 소용돌이의 이동 특성을 조사하였다. 그들은 비대칭 운동 에너지 방정식의 분석을 통해 비대칭 순환은 대칭 순환으로부터 에너지를 얻어서 발달함을 보였다. 그 외 Carr and Williams (1989), Smith and Ulrich(1990), Peng and Williams(1990) 등 많은 학자들이 다양한 분석 방법을 통해 비대칭 순환이 소용돌이의 이동에 중요한 역할을 함을 보였다.

이러한 연구들의 궁극적인 목적은 순압 대기에서의 저기압성 소용돌이의 이동 역학을 이해하고 나아가서는 태풍 진로 예보를 향상시키는데 있다. 본 연구에서는 Fiorino and Elsberry(1989)와 Li and Wang (1994)이 사용했던 분석 방법들을 도입하여 비발산 순압 대기에서 배경류가 없고 하나의 소용돌이가 존재하는 경우의 소용돌이 이동 역학에 대해 심도 있게 이해하고자 한다. 이를 위해 아래의 사항들을 조사, 분석 한다. 첫 번째로 소용돌이의 이동 역학을 설명할 수 있는 가장 간단한 방정식인 비발산 순압 소용돌이도 방정식을 장시간 수치 적분하여 유선함수장을 구하고 유선함수장을 대칭 순환과 비대칭 순환으로 분해한다. 두 번째로 대칭 순환과 비대칭 순환의 시간 변화를 조사하고 비대칭 운동 에너지 방정식을 분석하여 비대칭 순환이 발달하는 과정을 조사한다. 세 번째로 비대칭 순환과 소용돌이의 운동을 비교하여 소용돌이 이동에 대한 비대칭 순환의 역할을 조사한다. 마지막으로 유선함수의 경향 방정식을 분석하여 소용돌이 이동에 대한 비발산 순압 소용돌이도 방정식의 각 항들의 역할을 구체적으로 조사한다.

2. 수치 모형 및 분석 방법

베타 평면에서의 비발산 순압 소용돌이도 방정식은 아래와 같다.

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = -u \frac{\partial \zeta}{\partial x} - v \frac{\partial \zeta}{\partial y} - \beta v. \quad (1)$$

여기서 ζ 는 상대 소용돌이도의 연직 성분이며 u 는 동

서 속도 성분, v 는 남북 속도 성분, β 는 코리올리 인자의 남북 경도이다. 식 (1)은 절대 소용돌이도 보존에 근거를 둔 방정식으로서 비선형의 상대 소용돌이도 이류와 선형의 행성 소용돌이도 이류를 포함한다. 흐름이 비발산이므로 ζ , u , v 를 다음과 같이 유선함수로 써 나타낼 수 있다.

$$\zeta = \nabla^2 \psi, \quad (2)$$

$$u = -\frac{\partial \psi}{\partial y}, \quad v = \frac{\partial \psi}{\partial x}. \quad (3)$$

식 (1)을 공간에 대해서는 4차 정확도를 가지는 유한 차분법을, 시간에 대해서는 2차 정확도를 가지는 Adams-Bashforth 차분법을 사용하여 수치적으로 풀었다. 동·서, 남·북 방향으로 주기적 경계 조건을 사용하였으며 수치 적분 영역은 경계 조건 효과를 최소화하기 위해 동·서, 남·북 방향으로 각각 12000 km로 하였다. β 는 20°N에서의 값을 사용하였고 격자 간격을 40 km, 시간 간격을 200초로 하여 모형을 180시간 동안 수치 적분하였다. 초기 소용돌이의 구조는 축 대칭 구조로 설정하였고 초기 접선 속도 분포식은 아래와 같다.

$$V(r) = V_m \left(\frac{r}{r_m} \right) \exp \left\{ \frac{1}{b} \left[1 - \left(\frac{r}{r_m} \right)^b \right] \right\}. \quad (4)$$

여기서 $V(r)$ 은 소용돌이 중심으로부터 반경 r 떨어진 거리에서의 접선 속도, V_m 은 최대 풍속, r_m 은 최대 풍 속이 나타나는 반경이다. b 는 r_m 외부 지역에서의 접선 속도의 형태를 결정하는 인자로서 $V_m = 30 \text{ ms}^{-1}$, $r_m = 120 \text{ km}$ 일 때 $r = 300 \text{ km}$ 에서 V 가 15 ms^{-1} 가 되도록 계산하였다($b = 1.132$).

소용돌이 이동에 대한 대칭 순환과 비대칭 순환의 역할을 조사하기 위해 전체 흐름을 대칭 순환과 비대칭 순환으로 분해하였다. 대칭 순환과 비대칭 순환은 전체 유선함수장을 이용하여 구했으며 계산 과정은 다음과 같다. 먼저 각 좌표계에서 구해진 유선함수장을 원점이 소용돌이의 중심에 위치한 원통 좌표계에서의 값으로 전환하였다. 소용돌이의 중심은 유선함수의 동서·남북 방향의 경도가 영인 점 즉, 남북 속도 성분과 동서 속도 성분이 영인 점으로 하였으며 원통 좌표계에서 반경 격자 간격은 20 km, 방위 격자 간격은 8°로 설정하였다. 각 좌표계에서의 유선함수 값을 원통 좌표계에서의 값으로 전환하는 데에는 bicubic spline 방법을 사용하였다. 다음으로 원통 좌

표계에서의 유선함수 값을 각 반경에서 방위각을 따라 평균한 후 bicubic spline 방법을 사용해 각각 좌표계에서의 값으로 전환하여 대칭 순환을 구했으며 비대칭 순환은 전체 유선함수장에서 대칭 순환을 빼서 구했다.

3. 결과 및 논의

3.1 유선함수장

먼저 개념적으로 축 대칭인 저기압성 소용돌이를 베타 평면에 삽입했을 경우 어떤 현상이 나타나는지 살펴보자. 저기압성 소용돌이의 동쪽에는 북쪽으로의 흐름이, 서쪽에는 남쪽으로의 흐름이 존재한다. 그 결과, 소용돌이 동쪽의 행성 소용돌이도는 증가하고 서쪽의 행성 소용돌이도는 감소하게 된다. 따라서 절대 소용돌이도를 보존하기 위해 소용돌이의 동쪽에서는 증가한 행성 소용돌이도에 상응하여 상대 소용돌이도를 감소시키기 위해 고기압성 자이어가 형성되고 소용돌이 서쪽에서는 감소한 행성 소용돌이도에 상응하여 상대 소용돌이도를 증가시키기 위해 저기압성 자이어가 형성된다. 소용돌이에 의해 발생한 자이어에 대해 같은 이유로 생성된 고기압성 자이어의 동쪽에는 저기압성 자이어가, 생성된 저기압성 자이어의 서쪽에는 저기압성 자이어가 생성된다. 따라서 절대 소용돌이도를 보존하기 위해 Fig. 1에 제시된 바와 같이 소용돌이 동쪽에는 고기압성 자이어, 저기압성 자이어 등이 소용돌이 서쪽에서는 저기압성 자이어, 저기압성 자이어 등이 생성된다.

그리면 구체적으로 소용돌이 삽입 후에 이러한 절대 소용돌이도를 보존하는 과정에 의해 유선함수가 시간에 따라 어떻게 변하는지 살펴보자. Fig. 2는 유선함수의 시간에 따른 변화를 나타낸다. 소용돌이를 베타 평면에 삽입하면 소용돌이에 작용하는 베타 효과에 의해 소용돌이가 변형되기 시작한다. 파장이 클수록 더 빨리 이동하는 Rossby파 분산에 의해 소용돌이 바깥 쪽이 안쪽 보다 더 빨리 이동하여 서쪽의 유선함수의 경도는 감소하고 동쪽의 유선함수의 경도는 증가한다. 그 결과, 소용돌이 동쪽에서 흐름의 속도가 증가하는 남북 방향 속도 성분의 비대칭이 나타나기 시작한다. 시간이 흐름에 따라 저기압성 소용돌이의 강도가 감소하면서 소용돌이 동쪽에 고기압성 자이어가 형성된다 (24시간). 소용돌이의 저기압성 강도는 적분 초기부터

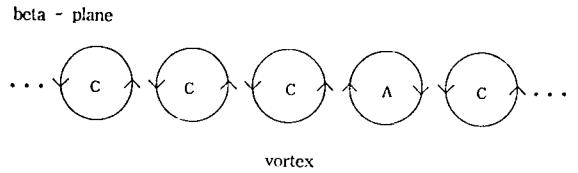


Fig. 1. The idealized schematic diagram of induced gyres on a β -plane. The C and A indicate cyclonic and anticyclonic, respectively [from Baik (1992)].

시간에 따라 감소하는 반면에 소용돌이 동쪽에 위치한 고기압성 자이어의 강도는 점점 증가한다. 고기압성 자이어의 강도가 점점 증가함에 따라 고기압성 자이어의 동쪽에 저기압성 자이어가 발달하기 시작한다(96시간). 96시간 이후 고기압성 자이어의 동쪽에 위치한 저기압성 자이어의 강도가 증가함에 따라 고기압성 자이어의 강도는 감소한다. 120시간 후부터 소용돌이 남동쪽에 위치한 저기압성 자이어의 강도가 계속해서 증가함에 따라 고기압성 자이어가 이분되며 시작하여 168시간에는 완전히 이분된 모습을 보인다. 이 때 이분된 고기압성 자이어 중에서 소용돌이 남동쪽에 위치한 고기압성 자이어는 그 동쪽의 저기압성 자이어와 준 평형을 이루고 있다. 이는 소용돌이의 에너지가 고기압성 자이어로 전달되어 고기압성 자이어가 발달하며 이 고기압성 자이어가 가지는 에너지가 저기압성 자이어로 전달됨으로써 저기압성 자이어가 발달함을 나타낸다. 즉, 자이어들은 에너지 전달 과정을 통해 발달함을 알 수 있으며 이러한 에너지 전달의 구체적 양상은 3.2절에서 보일 것이다. 이렇게 초기에 축 대칭인 소용돌이가 베타 효과에 의해 변형되면 상대 소용돌이도의 수평 이류가 발생하게 되고 이 비선형 항과 행성 소용돌이도의 수평 이류 항인 선형 항이 상호 작용을 하여 소용돌이가 북서진하게 된다.

3.2 대칭 및 비대칭 순환과 통풍류

다음으로 소용돌이로 대표되는 대칭 순환과 소용돌이 흐름과 행성 소용돌이도장과의 상호 작용으로 발생한 비대칭 순환의 시간 변화를 살펴보자.

Fig. 3은 대칭 순환으로 표현되는 방위각을 따라 평균한 접선 속도의 시간에 따른 변화이다. 대칭 소용돌이의 저기압성 강도는 시간이 지남에 따라 점점 약해지며 소용돌이 내부 지역보다는 Rossby파 분산의 영향을 많이 받는 외부 지역에서 더 빨리 약해진다. 132시간과 180시간에서는 각각 반경 720 km와 800

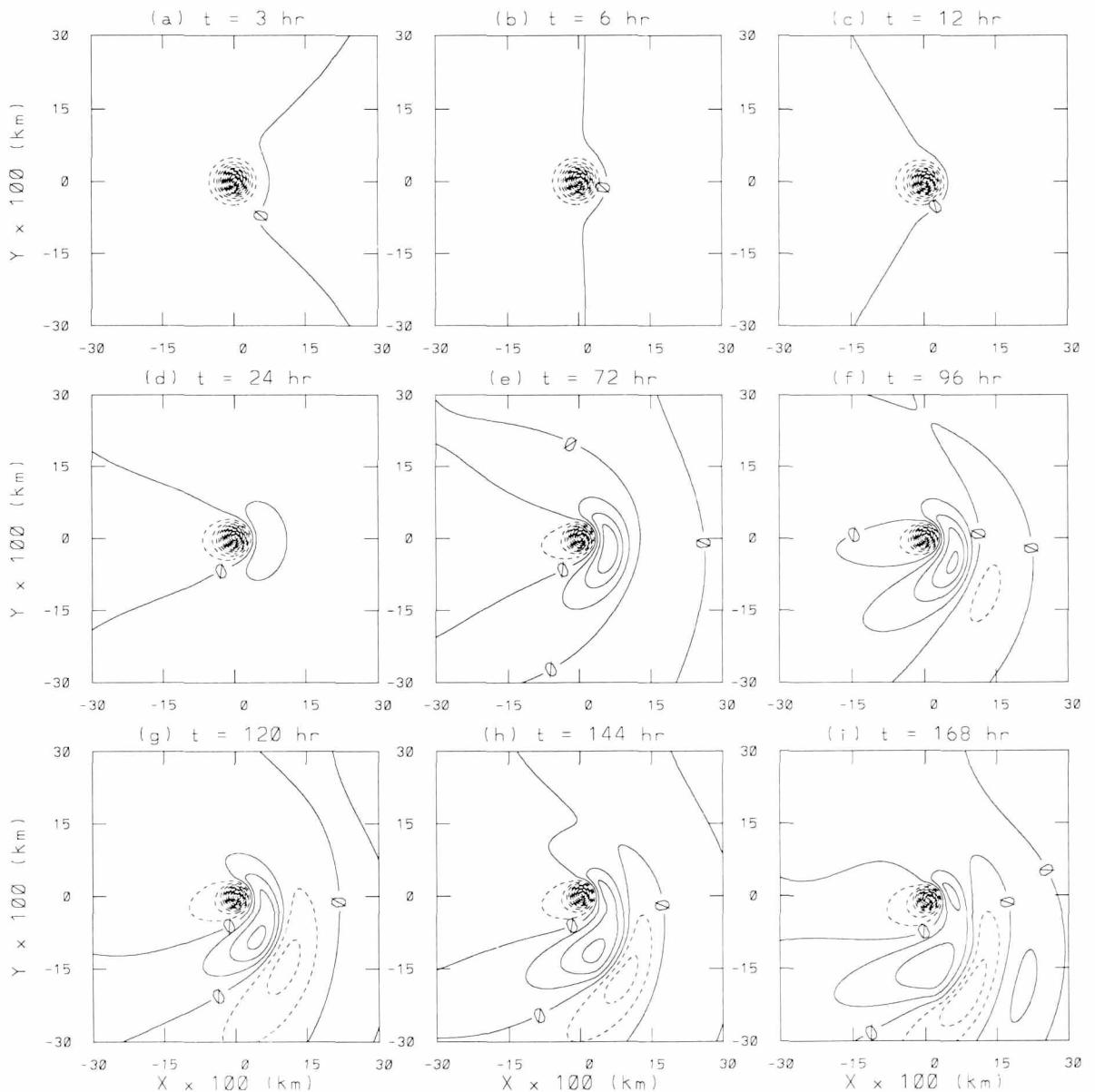


Fig. 2. The evolution of the total streamfunction. The plotting domain size is 6000 km × 6000 km centered on the grid point nearest the calculated vortex center at the indicated time. The contour interval is $5 \times 10^5 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$.

km 외부에 고기압성 흐름이 존재한다. 180시간에서 는 1800 km 이상 반경에서 저기압성 순환이 나타나지만 그 강도는 매우 약하다. 이렇게 외부 반경에 고기압성 흐름이 나타나는 것은 절대 소용돌이도를 보존하기 위한 역학 과정의 결과이다.

비대칭 순환의 시간에 따른 변화를 Fig. 4에 나타내었다. 비대칭 순환의 가장 큰 특징은 파수가 1인 고기압성 자이어가 소용돌이 중심의 오른쪽에, 저기압성

자이어가 왼쪽에 존재하며 이 자이어들 사이에 준 균일 흐름인 통풍류가 존재하는 것이다. 소용돌이 삽입 후 12시간까지 소용돌이가 베타 효과에 의해 변형됨에 따라 초기에 좁은 지역에 걸쳐 약한 강도로 존재하던 비대칭 순환은 강도가 커지면서 바깥 지역으로 확장한다. 이 과정에서 소용돌이에 작용하는 Rossby과 분산의 영향으로 저기압성 자이어가 서쪽 방향으로 더 많이 확장된다. 또한 소용돌이 중심 근처의 내부 자이어

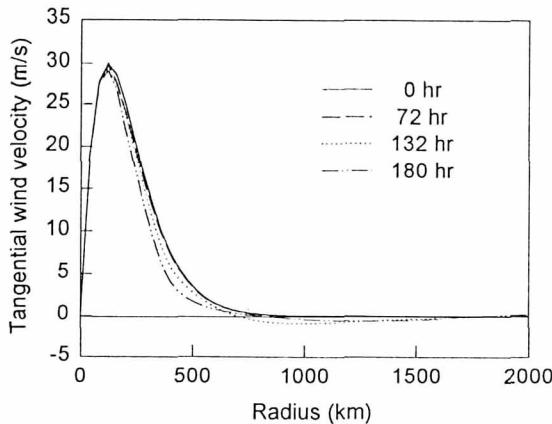


Fig. 3. The evolution of the azimuthally-averaged tangential wind profile.

부터 반시계 방향으로 회전하여 시간이 지남에 따라 외부 자이어까지 반시계 방향으로 회전한다. 그 결과 초기에 북쪽을 향하는 통풍류가 북북서쪽으로 향하게 된다. 24시간 이후부터 72시간까지 비대칭 순환은 더 이상 외부 지역으로 확장하지 않지만 시간이 지남에 따라 자이어의 강도는 선형적으로 증가한다.

한편 소용돌이 중심 부근에 위치한 저기압성 자이어와 고기압성 자이어는 48시간까지 계속해서 반시계 방향으로 회전한다. 하지만 중심에서 멀리 떨어진 고기압성 자이어의 남쪽 외부 지역은 36시간부터 시계 방향으로 회전하면서 남서쪽으로 확장되어 중심에서 먼 곳에 위치한 비대칭 순환이 동서 방향으로 변형되기 시작한다. 이후 고기압성 자이어에 의한 저기압성 자이어가 성장함에 따라 시계 방향의 회전 지역은 점점 증가하여 고기압성 자이어의 내부 지역도 시계 방향으로 회전하게되고 그 결과 비대칭 순환은 계속해서 변형되어 60시간부터는 파수가 2인 형태를 보인다. 이와 더불어 소용돌이 서쪽에 위치한 저기압성 자이어의 크기도 조금씩 줄어들지만 소용돌이 내부 지역의 자이어의 강도는 계속 증가하여 통풍류의 속도는 그대로 유지된다. 72시간까지 증가한 소용돌이 서쪽의 저기압성 자이어의 진폭은 이후 서서히 감소하여 120시간 이후에 성장이 정상 상태에 도달한다. 72시간 이후 고기압성 자이어 동쪽에 위치한 저기압성 자이어의 강도는 계속해서 증가하고 고기압성 자이어도 계속해서 시계 방향으로 회전한다. 132시간까지 소용돌이 중심 부근에서 고기압성 자이어의 강도는 조금씩 감소하지만 남동쪽에서는 강도가 증가한다. 120시간 이후부터 소용

돌이 동쪽의 고기압성 자이어는 이분되기 시작하여 132시간에 중심에서 약 500 km 떨어진 곳에서 처음으로 이분된다. 이 때부터 소용돌이 중심 부근의 고기압성 자이어의 강도는 다시 서서히 증가하고 남동쪽의 고기압성 자이어의 강도는 점점 감소한다. 고기압성 자이어가 이분된 후에 북동쪽의 고기압성 자이어는 소용돌이와 관련된 비대칭 저기압성 자이어와 준 평형을 이루고 남동쪽의 고기압성 자이어는 고기압성 자이어에 의해 다시 발생한 저기압성 자이어와 준 평형을 이룬다.

에너지 관점에서 이러한 비대칭 순환의 발달과 약화는 비대칭 순환의 운동 에너지 생성율에 의해 결정된다. 따라서 비대칭 순환에 대한 운동 에너지 방정식을 분석하여 베타 자이어가 어떤 과정을 통해 발달하는지를 조사하였다. 대칭 순환과 비대칭 순환에 대한 운동 에너지는 각각 아래와 같이 정의된다.

$$K_s = \left\{ \frac{\nabla \psi_s \cdot \nabla \psi_s}{2} \right\}, \quad K_a = \left\{ \frac{\nabla \psi_a \cdot \nabla \psi_a}{2} \right\}. \quad (5)$$

여기서 ψ_s 는 대칭 유선함수, ψ_a 는 비대칭 유선함수를 나타낸다. 위의 괄호는 원통 좌표계에서의 면적분을 나타내며 모든 면적분은 반경 1200 km까지 수행되었다. 식 (1)의 양변에 ψ_a 를 곱한 다음 면적분을 하여 비대칭 순환에 대한 운동 에너지 방정식을 구했으며 그 식은 아래와 같다(Li and Wang, 1994).

$$\begin{aligned} \frac{\partial K_a}{\partial t} = & -\{(\mathbf{V} \cdot \nabla V_s) \cdot V_a\} \\ & + \{\beta r \cos \lambda \mathbf{k} \cdot (\nabla \psi_a \times \nabla \psi_s)\} + F_a. \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 \mathbf{V} , V_s , V_a 는 각각 전체 흐름의 속도 벡터, 대칭 흐름의 속도 벡터, 비대칭 흐름의 속도 벡터이며 \mathbf{k} 는 연직 방향의 단위 벡터, λ 는 북에서부터 반시계 방향으로 측정된 방위각이다. 위 식의 우변 첫 번째 항(EC_1)과 두 번째 항(EC_2)은 대칭 순환에서 비대칭 순환으로의 에너지 전환을 나타낸다. EC_1 은 비선형 항에 의한 에너지 전환 항이고, EC_2 는 베타 효과에 의한 에너지 전환 항이다. 위 식의 세 번째 항인 F_a 는 면적분 영역 가장 자리에서의 반경 흐름에 의한 에너지 속이다.

Table 1은 시간에 따른 K_s , K_a , EC_1 , EC_2 값을 보여준다. F_a 항은 다른 항들에 비해 크기가 매우 작으므로 표에 포함시키지 않았다. 모든 시간에서 대칭 순환의 운동 에너지가 비대칭 순환의 운동 에너지 보

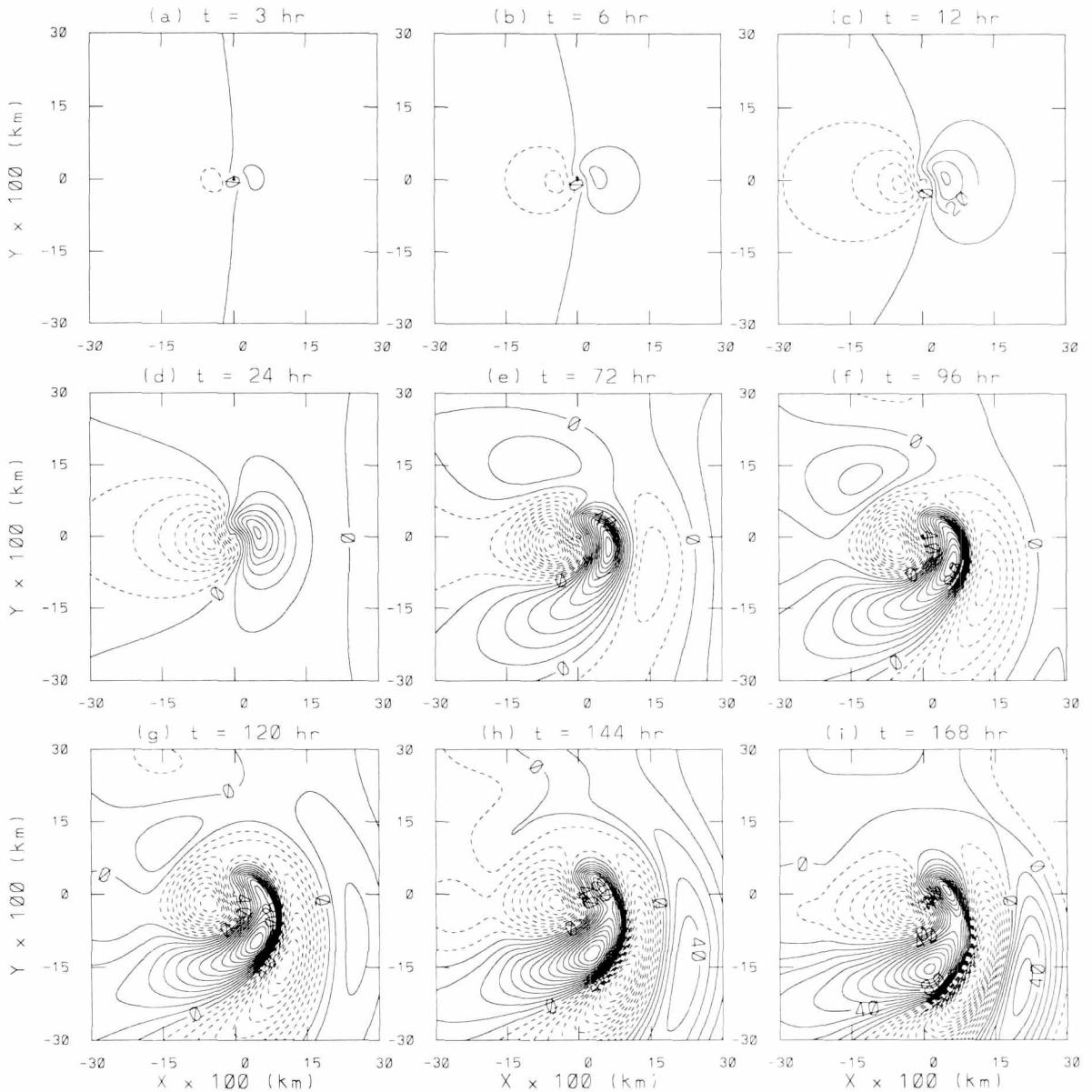


Fig. 4. The evolution of the asymmetric streamfunction. The plotting domain size is the same as in Fig. 2. The actual contour interval is $10^5 \text{ m}^2 \text{s}^{-1}$.

다 훨씬 크다. 시간이 흐르면서 비대칭 순환이 발달함에 따라 비대칭 순환의 운동 에너지는 증가하는 경향을 보이고 이와 상응하여 대칭 순환의 운동 에너지는 감소하는 경향을 보인다. 이는 전체 유선향수장의 시간 변화(Fig. 2)에서 살펴본 바와 같이 대칭 순환에서 비대칭 순환으로의 에너지 전달 과정이 존재함을 나타낸다. EC_1 과 EC_2 의 경우, EC_2 가 EC_1 보다 항상 크게 나타나므로써 주로 베타 효과에 의해 대칭 순환의 운

동 에너지가 비대칭 순환의 운동 에너지로 전환되는 것을 알 수 있다. 한편, 초기에 양의 값을 가지던 EC_1 은 12시간 이후부터는 음의 값을 가지는데 이는 비대칭 순환에서 대칭 순환으로의 에너지 전달 과정이 존재하는 것을 의미한다. 즉, 대칭 각 바람(angular wind)의 수평 시어에 의해 비대칭 순환으로부터 비대칭 섭동 에너지가 대칭 순환으로 전달되므로써 소용돌이의 비대칭성이 감소됨을 알 수 있다. 이러한 비선형

Table 1. The time variations of the kinetic energy components K_s , K_a (unit: $10^{12} \text{ m}^4 \text{s}^{-2}$) and the asymmetric kinetic energy conversion terms EC_1 , EC_2 (unit: $10^7 \text{ m}^4 \text{s}^{-3}$) computed using (5) and (6).

Time	K_s	K_a	EC_1	EC_2
3 hr	831.83	5.08	0.62	5.41
6 hr	827.84	6.97	1.83	9.15
12 hr	781.62	3.45	-1.10	13.33
24 hr	775.97	7.90	-2.14	20.18
72 hr	736.48	22.73	-2.64	25.28
96 hr	737.95	26.66	-2.65	22.04
120 hr	692.46	21.33	-3.45	20.96
144 hr	667.37	22.81	-2.89	22.49
168 hr	686.68	39.74	-2.34	19.80

에너지 전환 과정은 각 바람의 수평 시어가 큰 최대 풍 속 반경 부근에서 활발하게 일어나므로 중심 부근의 대칭 소용돌이는 오랫동안 축 대칭성을 유지한다(Carr and Williams, 1989; Li and Wang, 1994).

베타 효과에 의한 에너지 전환 과정을 통해 발달한 비대칭 순환은 소용돌이의 이동에 중요한 역할을 한다. Fig. 5는 소용돌이 중심 서쪽에 위치한 저기압성 사이어의 최대 진폭의 시간에 따른 변화와 소용돌이의 이동 속도의 시간 변화를 비교한 그림이다. 소용돌이는 전체 적분 시간 동안 평균 2.3 ms^{-1} 의 속도로 북과 북서 사이의 방향으로 이동(Fig. 6)하는데 소용돌이의 이동 속도는 60시간까지 빠르게 증가하며 그 이후부터 117시간까지는 서서히 감소하고 다시 180시간까지 서서히 증가한다. 소용돌이 이동 속도가 시간에 따라 변하는 형태는 소용돌이 중심 서쪽에 위치한 저기압성 사이어의 최대 진폭이 시간에 따라 변하는 형태와 거의 일치한다.

Fig. 7은 비대칭 흐름 벡터장의 시간 변화를 나타낸다. 이 그림에서도 소용돌이 중심 부근에 존재하는 비대칭 흐름의 속도가 소용돌이의 이동 속도와 거의 일치하므로써 소용돌이 중심 부근에 존재하는 베타 자이어 사이의 통풍류가 소용돌이의 이동과 직접적으로 연관되어 있음을 보여준다.

위에서 보여진 소용돌이 이동에 대한 비대칭 흐름의 중요성을 입증하기 위해 매 12시간 간격으로 계산된 통풍류와 소용돌이의 운동을 비교하였다(Fig. 8). 여기서 통풍류를 소용돌이 중심 부근의 일정 지역(여기서는 중심에서 반경 300-400 km까지의 지역으로 정의)에서 균일한 비대칭 흐름($u_a = -\partial \psi_a / \partial y$, $v_a = \partial \psi_a / \partial x$)을 평균한 흐름으로 정의하였다. 전체 적분 시

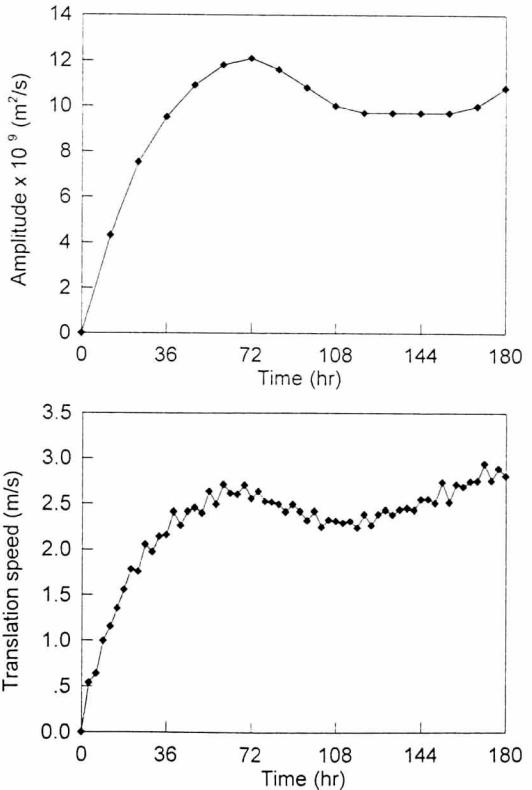


Fig. 5. The time variations of the maximum amplitude of the cyclonic beta gyre to the west of the vortex center (upper panel) and the vortex translation speed (lower panel).

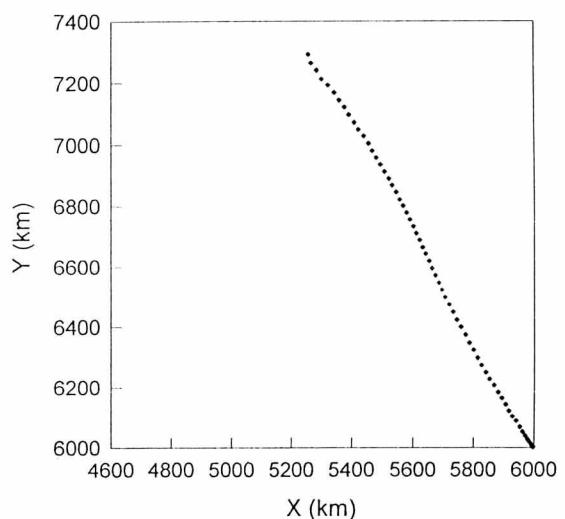


Fig. 6. The position of the vortex center in a 3-hour interval.

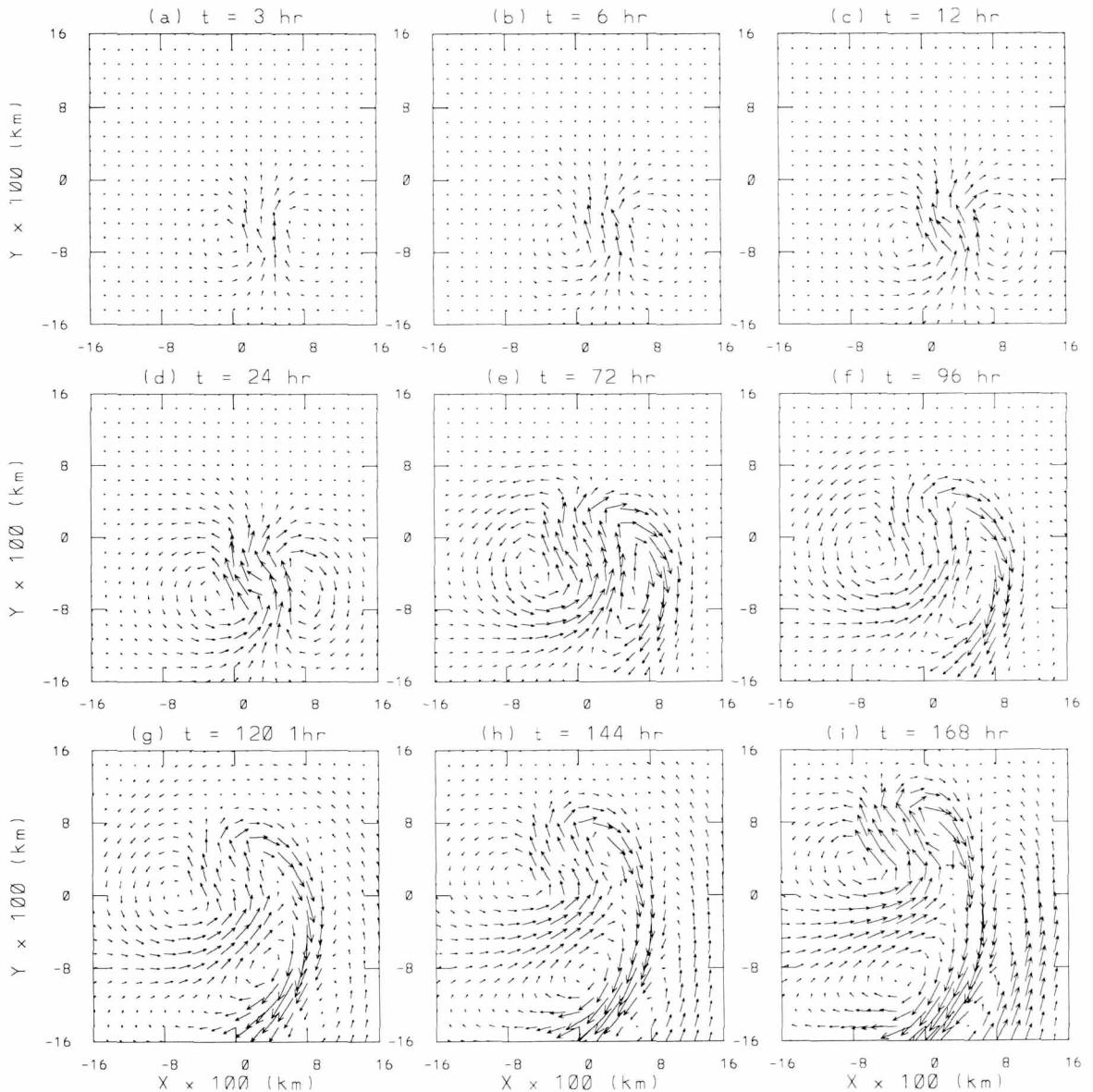


Fig. 7. The evolution of the asymmetric flow vector. The domain size is $3200 \text{ km} \times 3200 \text{ km}$ centered on the grid point nearest the calculated vortex center at 96 h. The magnitude of maximum vector (ms^{-1}) is (a) 0.57, (b) 0.94, (c) 1.14, (d) 2.30, (e) 3.84, (f) 5.58, (g) 6.85, (h) 7.24, and (i) 6.47.

간 동안 통풍류와 소용돌이의 이동 속도는 거의 일치 한다. 소용돌이 이동 속도에 대한 통풍류 속도의 평균 편차는 2.4%이고 최소 편차는 24시간에 0.05%, 최대 편차는 60시간에 10%이다(Fig. 8). 통풍류의 방향은 비대칭 순환이 빠른 속도로 발달하는 초기에 소용돌이 이동 방향과 가장 큰 차이가 나고 132시간까지는 소용돌이 이동 방향보다 좀 더 북쪽을 향하고 있으

며 그 이후에는 좀 더 북서쪽을 향한다. 소용돌이 이동 방향에 대한 통풍류 이동 방향의 평균 편차는 1.8%이다. 이와 같이 통풍류의 속도와 방향은 소용돌이의 이동 속도와 방향과 잘 일치하므로 통풍류가 소용돌이의 이동에 중요한 역할을 할 수 있다.

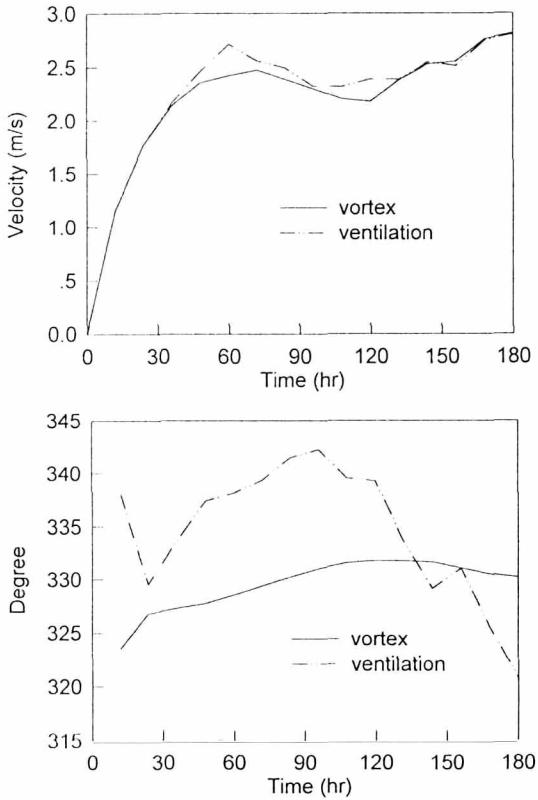


Fig. 8. The time variations of magnitudes (upper panel) and directions (lower panel) of the vortex motion vector and the ventilation flow vector.

3.3 유선함수 경향 분석

비발산 순압 소용돌이도 방정식에 포함된 각 항들이 소용돌이의 이동에 어떠한 역할을 하는지를 조사하기 위해 전체 유선함수장에 대한 경향 방정식을 분석하였다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \psi_t}{\partial t} &\approx \nabla^{-2} \{-J(\psi_a, \nabla^2 \psi_s)\} + \nabla^{-2} \{-J(\psi_s, \nabla^2 \psi_a)\} \\ TT & \quad SVAF \quad \quad AVSF \\ + \nabla^{-2} \{(-\beta v_s)\} & + \nabla^{-2} \{(-\beta v_a)\}. \\ PVSF & \quad \quad PVAF \end{aligned} \quad (7)$$

여기서 TT는 전체 유선함수 경향, SVAF는 비대칭 흐름에 의한 대칭 상대 소용돌이도의 이류, AVSF는 대칭 흐름에 의한 비대칭 상대 소용돌이도의 이류, PVSF는 대칭 흐름에 의한 행성 소용돌이도의 이류,

PVAF는 비대칭 흐름에 의한 행성 소용돌이도의 이류를 나타내며 ∇^{-2} 는 역 라플라시안 연산자이다. 한편식 (1)에 포함된 상대 소용돌이도 이류 항을 비선형 항으로, 행성 소용돌이도 이류 항을 선형 항으로 정의하였다. 비선형 항중 하나인 비대칭 흐름에 의한 비대칭 상대 소용돌이도의 이류 항은 SVAF항과 AVSF항에 의해 그 크기가 매우 작아 여기에서는 제시하지 않았다. Fiorino and Elsberry(1989)는 유선함수 경향 방정식을 분석함에 있어서 선형 항 자체를 대칭 성분과 비대칭 성분으로 나누어 분석하였으나 본 연구에서는 소용돌이의 이동에 대한 대칭 흐름과 비대칭 흐름의 역할을 좀 더 명확하게 조사하기 위해 선형 항을 대칭 흐름에 의한 행성 소용돌이도의 이류 항과 비대칭 흐름에 의한 행성 소용돌이도의 이류 항으로 나누어 분석하였다.

식 (7)에 포함된 각 항들이 소용돌이의 이동에 미치는 영향을 조사하기 위해 각 항들에 의한 유선함수 경향장의 시간과 공간에 따른 변화를 조사하였으며 전체 유선함수 경향장과 비선형 항에 의한 유선함수 경향장, 그리고 선형 항에 의한 유선함수 경향장을 조사하여 소용돌이가 이동하는데 있어 비선형 항과 선형 항이 어떻게 작용하는지를 조사하였다.

SVAF항에 의한 유선함수 경향장을 Fig. 9에 나타내었다. 전체 적분 시간 동안 북서쪽에 음의 유선함수 경향이 남동쪽에 양의 유선함수 경향이 나타난다. 저기압성 소용돌이는 상대 소용돌이도가 증가하는 방향으로 이동하므로 이러한 유선함수 경향장의 형태는 이항이 소용돌이가 북서쪽으로 이동하는 데 영향을 주는 것을 나타낸다. 비대칭 순환에 의한 대칭 소용돌이의 이류를 나타내는 항이므로 이 항에 의한 유선함수 경향장의 시간에 따른 변화는 비대칭 순환의 시간 변화와 직접적인 연관이 있다. 즉, 비대칭 순환이 발달하기 시작하는 초기에는 좁은 지역에 걸쳐 약한 강도를 가지지만 비대칭 순환의 발달함에 따라 그 강도가 계속 증가하여 비대칭 순환의 발달이 준 정상 상태에 이르는 72시간 이후부터는 쌍극자 모양의 유선함수 경향장은 거의 같은 강도로 일정 넓이의 지역(중심에서 반경 300-400 km)에 분포한다. 이는 통풍류가 고기압성 차이의 지속적인 변형에도 불구하고 계속해서 일정한 영역에서 비슷한 크기를 유지하는 것과 같은 현상이다. 즉, 이 항에 의한 유선함수 경향장은 소용돌이가 비대칭 순환에 의해 북북서쪽으로 이동됨을 보여준다.

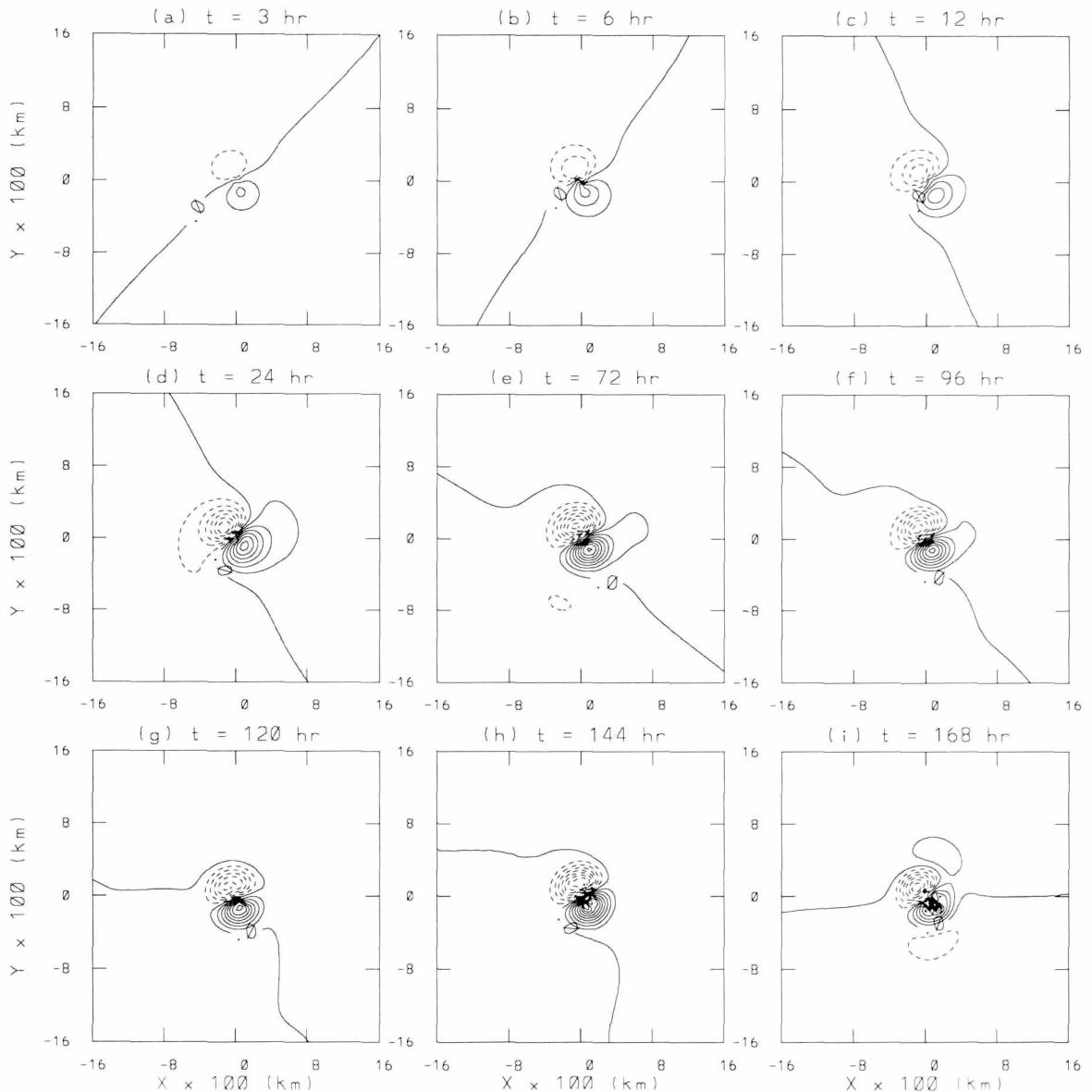


Fig. 9. Contribution to the total streamfunction tendency due to SVAF (symmetric vorticity advection by the asymmetric flow). The plotting domain size is 3200 km × 3200 km centered on the grid point nearest the calculated vortex center at the indicated time. The same plotting domain size is used in Figs. 10–15. The contour interval is $5 \text{ m}^2 \text{s}^{-2}$.

AVSF항은 대칭 순환에 의한 비대칭 상대 소용돌이도의 이류 항으로서 이 항에 의한 유선함수 경향장을 Fig. 10에 나타내었다. 초기에는 북서쪽에 양의 유선함수 경향이, 남동쪽에는 음의 유선함수 경향이 나타난다. 이러한 형태의 유선함수 경향장은 시간이 지남에 따라 반시계 방향으로 회전하여 24시간에 소용돌이 남서쪽에 양의 유선함수 경향이 북동쪽에 음의 유선함

수 경향이 나타난다. 그 결과 이 항에 의한 강제력이 북동쪽을 향하게 되어 서쪽으로 작용하는 베타 강제력을 약화시키므로써 선형 항에 의한 소용돌이의 변형을 억제한다. 또한 이러한 회전에 의해 내부 베타 자이어가 반시계 방향으로 회전하여 초기에 북을 향하던 통풍류가 북북서로 향하게 된다. 유선함수 경향장은 24시간 이후 계속해서 반시계 방향으로 회전하여 72시간

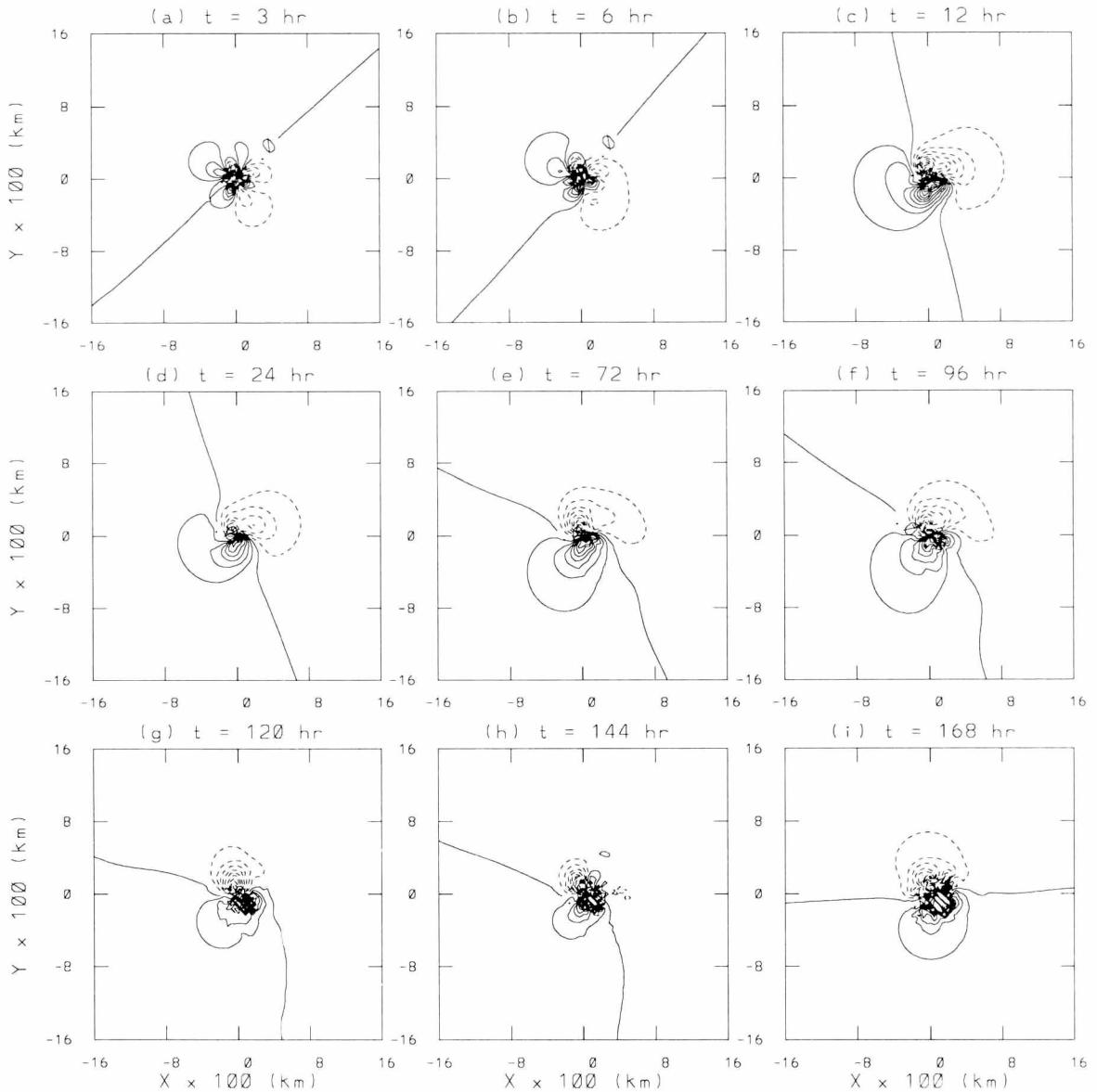


Fig. 10. Contribution to the total streamfunction tendency due to AVSF (asymmetric vorticity advection by the symmetric flow). The contour interval in (a)-(c) is $2 \text{ m}^2 \text{s}^{-2}$ and the contour interval in (d)-(i) is $5 \text{ m}^2 \text{s}^{-2}$. In the figures (h) and (i) (also, in Figs. 13 and 15), the high-valued contours for the oval blank regions near the vortex center are not plotted for clarity of figures.

후부터는 소용돌이 북쪽 지역의 음의 유선함수가 증가하는데 영향을 주며 고기압성 사이어가 변형될수록 소용돌이 중심 부근에서 강한 비선형성을 나타낸다. 즉, 이 항은 회전을 통해 베타 효과에 의한 소용돌이의 변형을 억제하고, 통풍류가 북북서로 향하는데 영향을 준다.

PVFS 항 (Fig. 11)은 대칭 순환에 의한 행성 소용돌

이도의 이류를 나타낸다. 이 항에 의한 유선함수 경향장은 소용돌이 서쪽에 음의 유선함수 경향, 동쪽에 양의 유선함수 경향이 나타나며 이는 이 항이 초기에 비대칭 순환이 발달하는 데 주 역할을 함을 나타낸다. 이 양·음의 유선함수 경향장은 서로 동서 대칭을 이루며 시간이 지나면서 소용돌이의 저기압성 강도가 약해짐에 따라 이 항의 크기도 감소하고 유선함수 경향

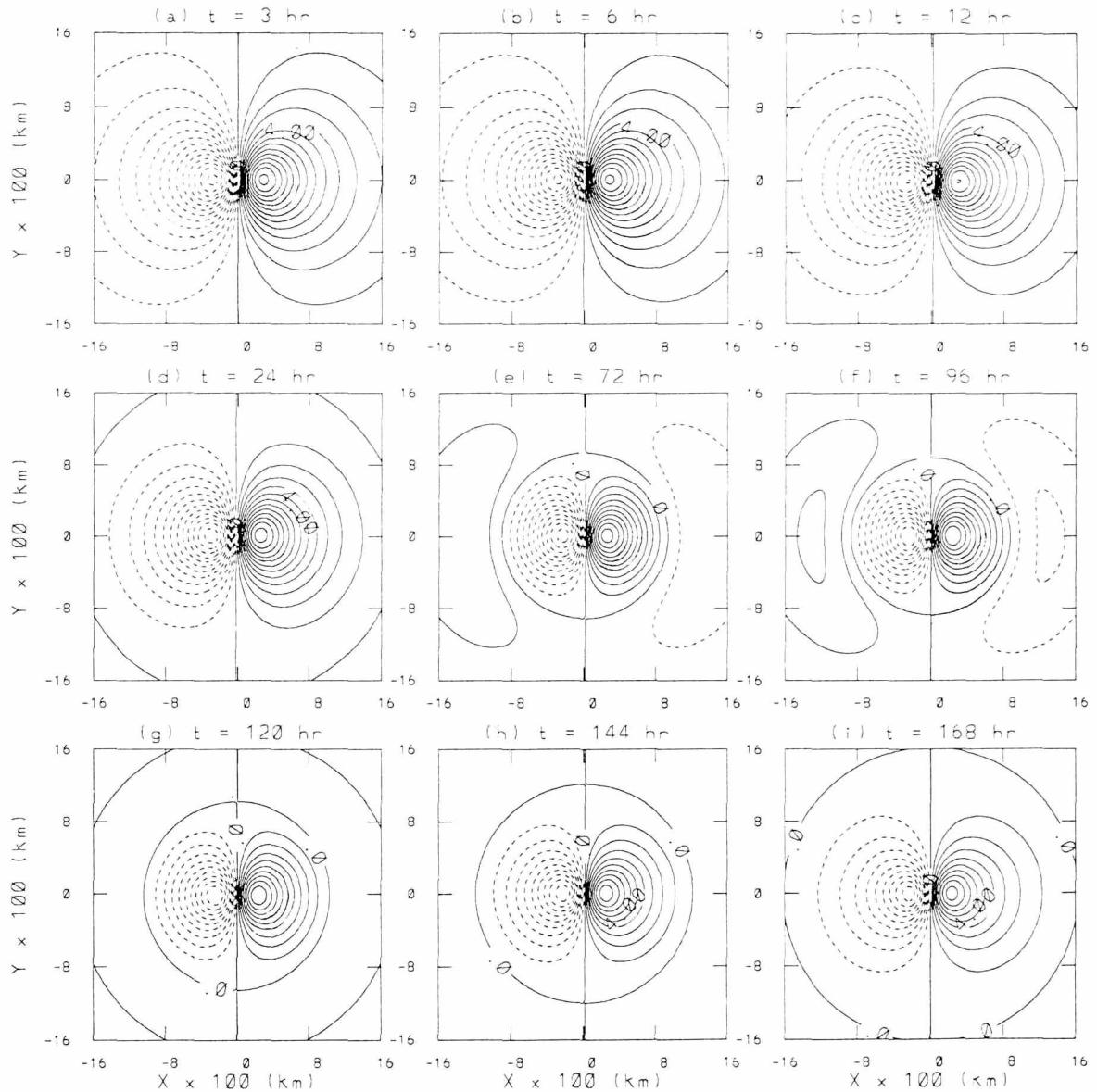


Fig. 11. Contribution to the total streamfunction tendency due to PVSF (planetary vorticity advection by the symmetric flow). The contour interval is $1 \text{ m}^2 \text{s}^{-2}$.

장이 분포하는 영역도 줄어들지만 양·음의 유선함수 경향의 최대·최소 점은 전체 적분 시간 동안 모두 같은 곳에 위치한다. 즉, 이 항은 절대 소용돌이도 보존 법칙에 근거하여 적분 초기에 비대칭 순환이 발달하는데 영향을 주며 초기에 소용돌이가 서쪽으로 이동하는데 영향을 준다.

PVAF항(Fig. 12)은 비대칭 순환에 의한 행성 소용돌이도의 이류 항이다. 소용돌이 중심에 존재하는 양

의 유선함수 경향은 이 항이 대칭 소용돌이의 저기압 성 흐름이 약화되는 데 영향을 주는 것을 나타낸다. 초기에 비대칭 순환의 강도가 약할 때는 중심 지역의 양의 유선함수 경향장의 강도도 약하다. 시간이 지나면서 비대칭 순환이 발달함에 따라 양의 유선함수 경향의 강도가 증가하므로 비대칭 순환이 발달함에 따라 대칭 소용돌이의 흐름이 약해짐을 알 수 있다. 소용돌이가 약화되고 고기압성 자이어가 발달함에 따라 중심

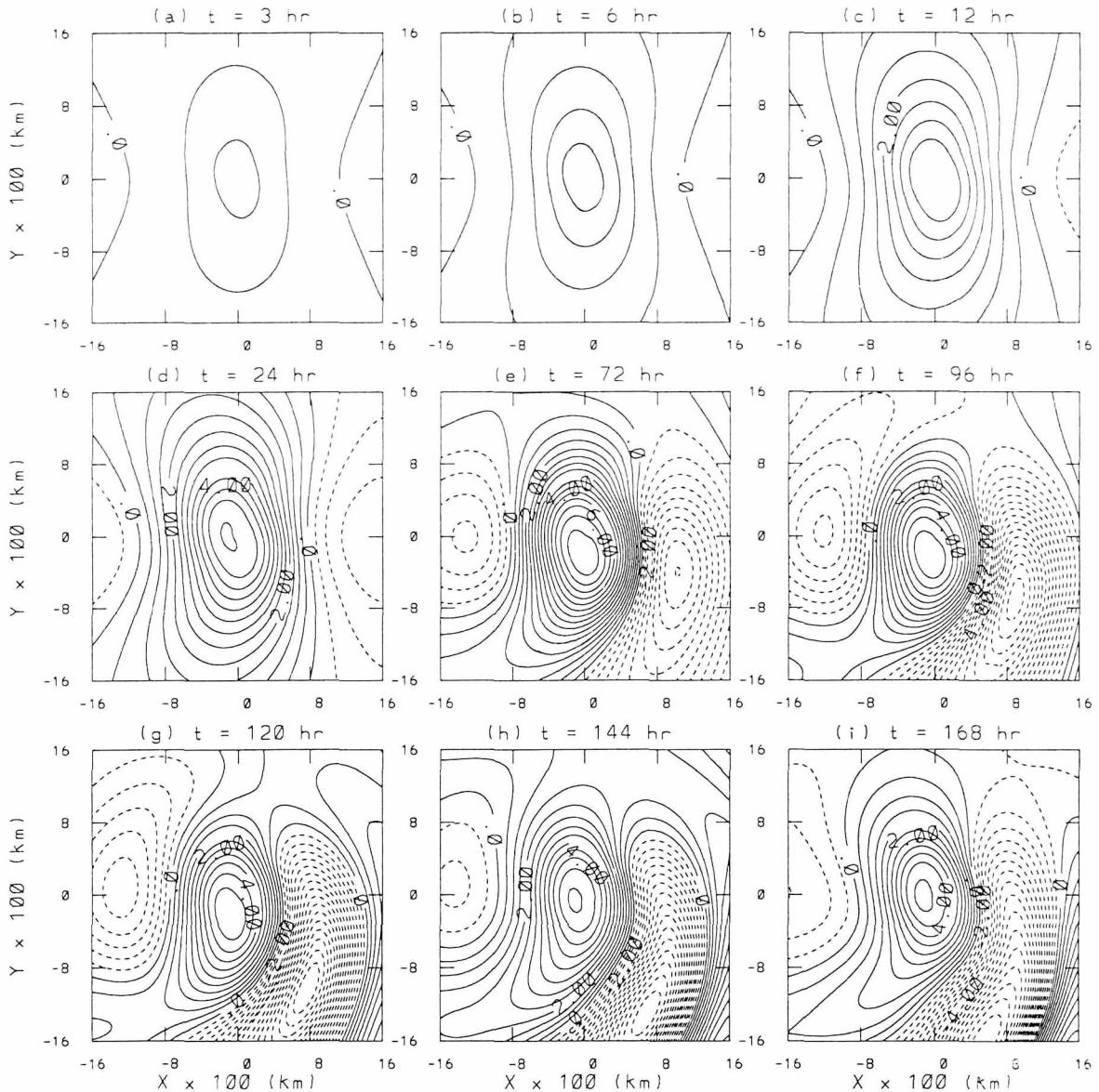


Fig. 12. Contribution to the total streamfunction tendency due to PVAF (planetary vorticity advection by the asymmetric flow). The contour intervals is $0.5 \text{ m}^2 \text{s}^{-2}$.

의 양의 유선함수 경향 지역은 수축하고 소용돌이 동 쪽의 음의 유선함수 경향은 증가한다. 96시간 이후 고 기압성 자이어에 의해 발생한 저기압성 비대칭 자이어의 강도가 커지기 시작함에 따라 소용돌이 중심에서 동쪽으로 약 1600 km 떨어진 곳에서 양의 유선함수 경향 지역과 음의 유선함수 경향 지역은 시계 방향으로 회전하여 고기압성 자이어가 시계 방향으로 회전하는

데 영향을 준다. 즉, 이 항은 대칭 소용돌이의 저기압성 강도가 약화되고 변형되는 데 영향을 준다.

비선형 항에 의한 유선함수 경향장을 Fig. 13에 나타내었다. 초기에는 거의 북쪽에 음의 유선함수 경향, 남쪽에 양의 유선함수 경향이 나타난다. 시간이 지나면서 선형 항에 의해 소용돌이가 변형됨에 따라 AVSF 항에 의해 유선함수 경향장이 반시계 방향으로 회전하게 되어 그 결과, 음의 유선함수 경향장이 북북서쪽을

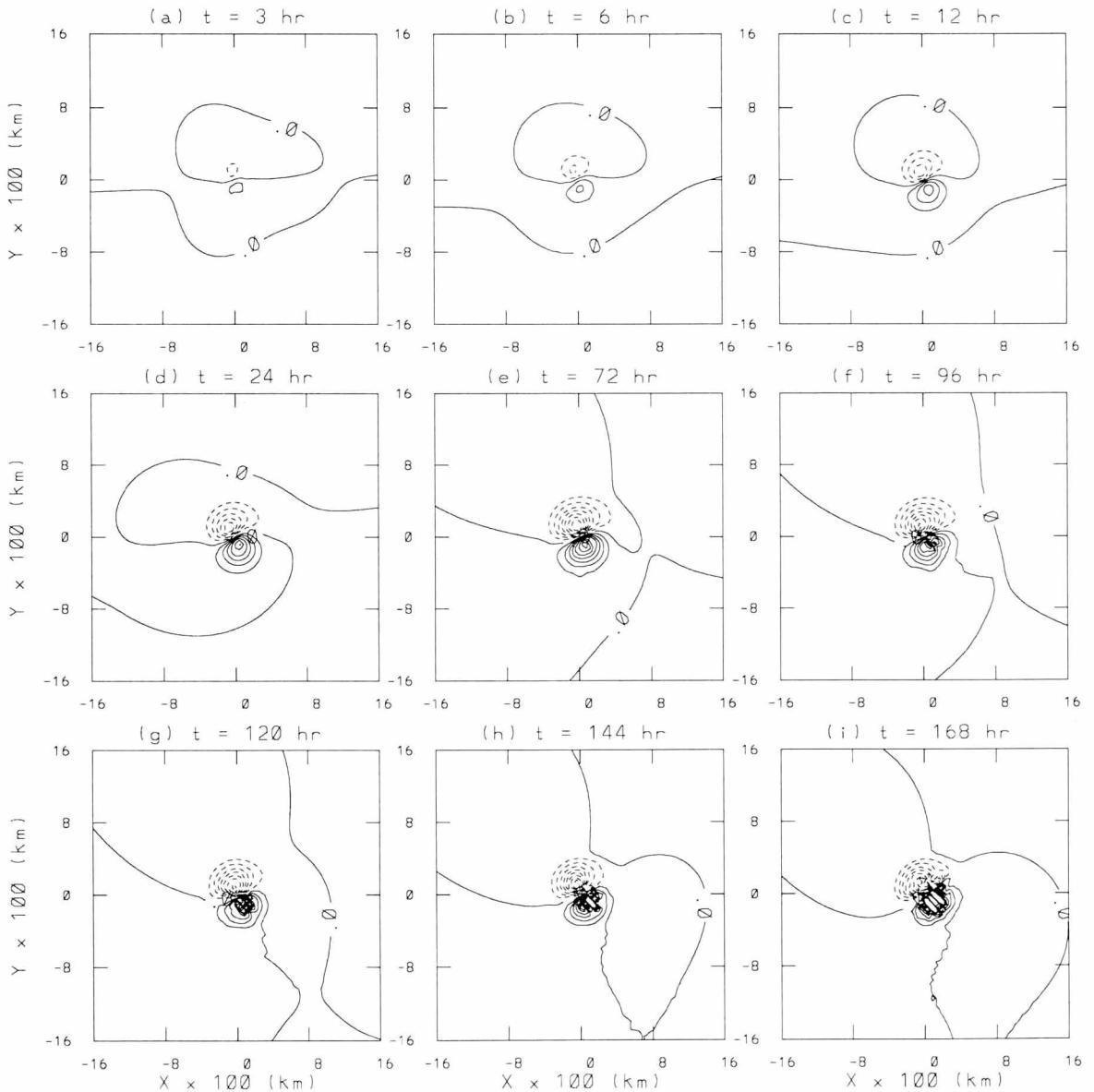


Fig. 13. Contribution to the total streamfunction tendency due to the nonlinear term. The contour interval is $10 \text{ m}^2 \text{s}^{-2}$.

향하게 된다. 전체 유선함수 경향장(Fig. 15)과 비교했을 때 음의 유선함수 경향장이 좀 더 북쪽을 향하며 전체 경향장 크기의 대부분을 차지한다. 비선형 항은 선형 항에 의해 소용돌이가 변형된 이후에 값을 가지며 비대칭 순환의 강도가 증가하면 그 크기가 증가한다. 즉, 비선형 항은 선형 항이 존재 할 때에만 소용돌이를 북북서쪽으로 이동시키는 데 주된 역할을 한다.

선형 효과의 주 강제력은 소용돌이 흐름의 남북 방향 속도 성분에 의해 발생한다. 선형 항에 의한 유선

함수 경향장(Fig. 14)의 경우 큰 규모의 쌍극자 형태의 경향장을 생성하며 비대칭 순환(Fig. 4)과의 비교를 통해 볼 때 선형 항은 적분 초기에 비대칭 순환이 발달하는 데 영향을 주는 것을 알 수 있다. 하지만 이 항에 의한 유선함수 경향장의 형태는 적분 후기의 비대칭 유선함수장의 형태와 많은 차이를 나타내므로 비대칭 순환의 발달과 시간 변화에 비선형 항도 중요한 역할을 할 수 있다. 선형 항에 의한 유선함수 경향장은 대칭 흐름이 강한 소용돌이 중심 근처에서는

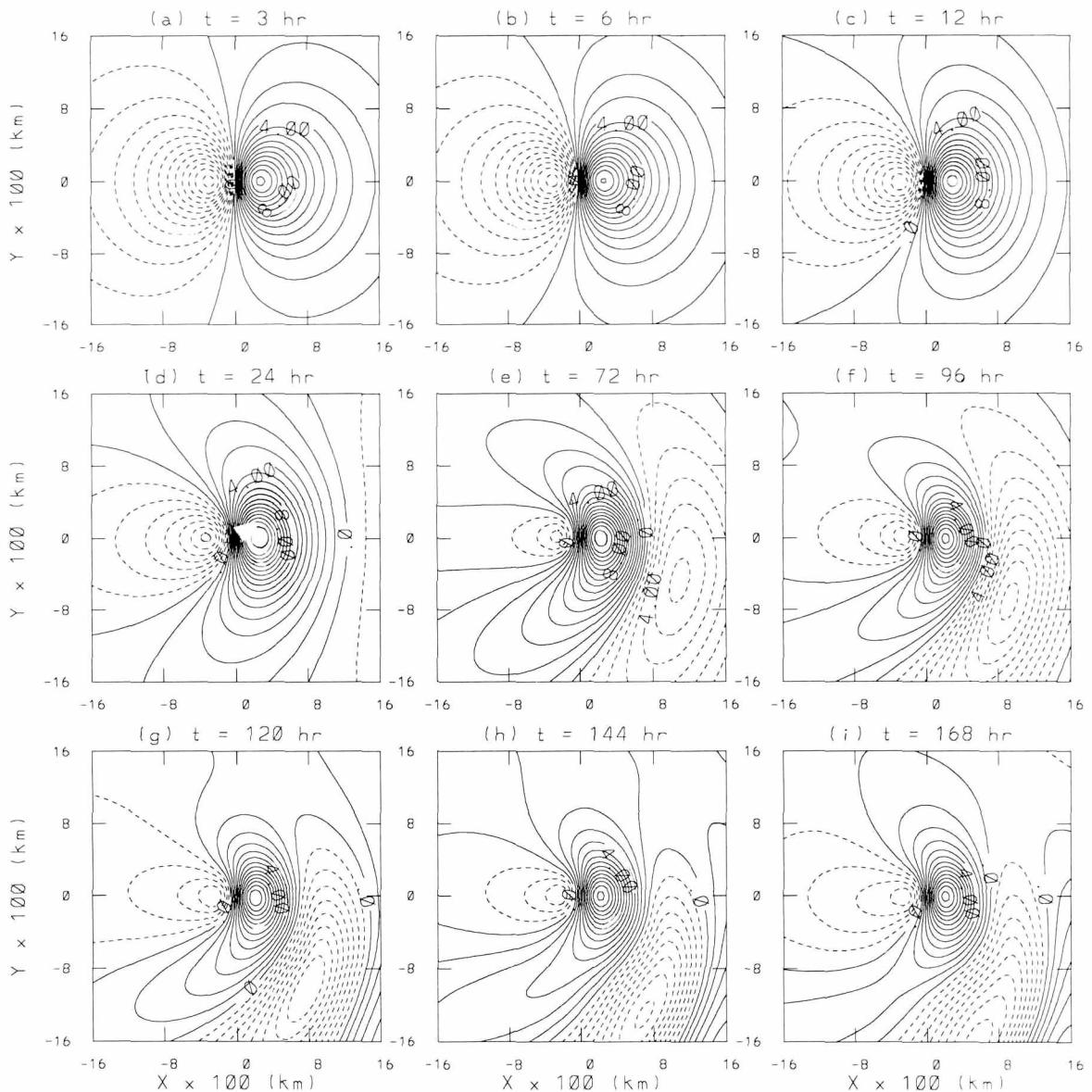


Fig. 14. Contribution to the total streamfunction tendency due to the linear term. The contour interval is $1 \text{ m}^2 \text{s}^{-2}$.

주로 PVSF항에 의해 결정되므로 소용돌이 중심 근처에서는 선형 강제력이 항상 서쪽으로 향한다. 중심에서 면 지역일수록 PVAF의 영향을 많이 받으므로 소용돌이 중심에서 면 지역에서는 유선함수 경향장이 시계 방향으로 회전하여 소용돌이 동쪽에 위치한 고기압성 자이어가 시계 방향으로 회전하는 데 영향을 준다. 선형 항은 적분 초기에는 소용돌이의 이동에 직접적인 영향을 주어 소용돌이가 서쪽으로 이동하는 데 기여하며 시간이 지나면서 대칭 순환에 영향을 주어 소용돌

이 동쪽의 남풍이 증가하고 소용돌이 중심에서 멀리 떨어진 동쪽에서 저기압성 자이어가 형성되는 데 영향을 준다. 선형 항은 전체 유선함수 경향장의 형태와 강도에 큰 영향을 주지는 않지만 비선형 항의 생성과 발달에 영향을 주고 다시 비선형 항에 의해 강하게 영향을 받는다. 결론적으로 비선형 항과 선형 항은 각각의 항들의 발달과 시간 변화에 서로 영향을 주며 이 항들의 상호 작용을 통해 소용돌이가 북북서쪽으로 이동함을 알 수 있다.

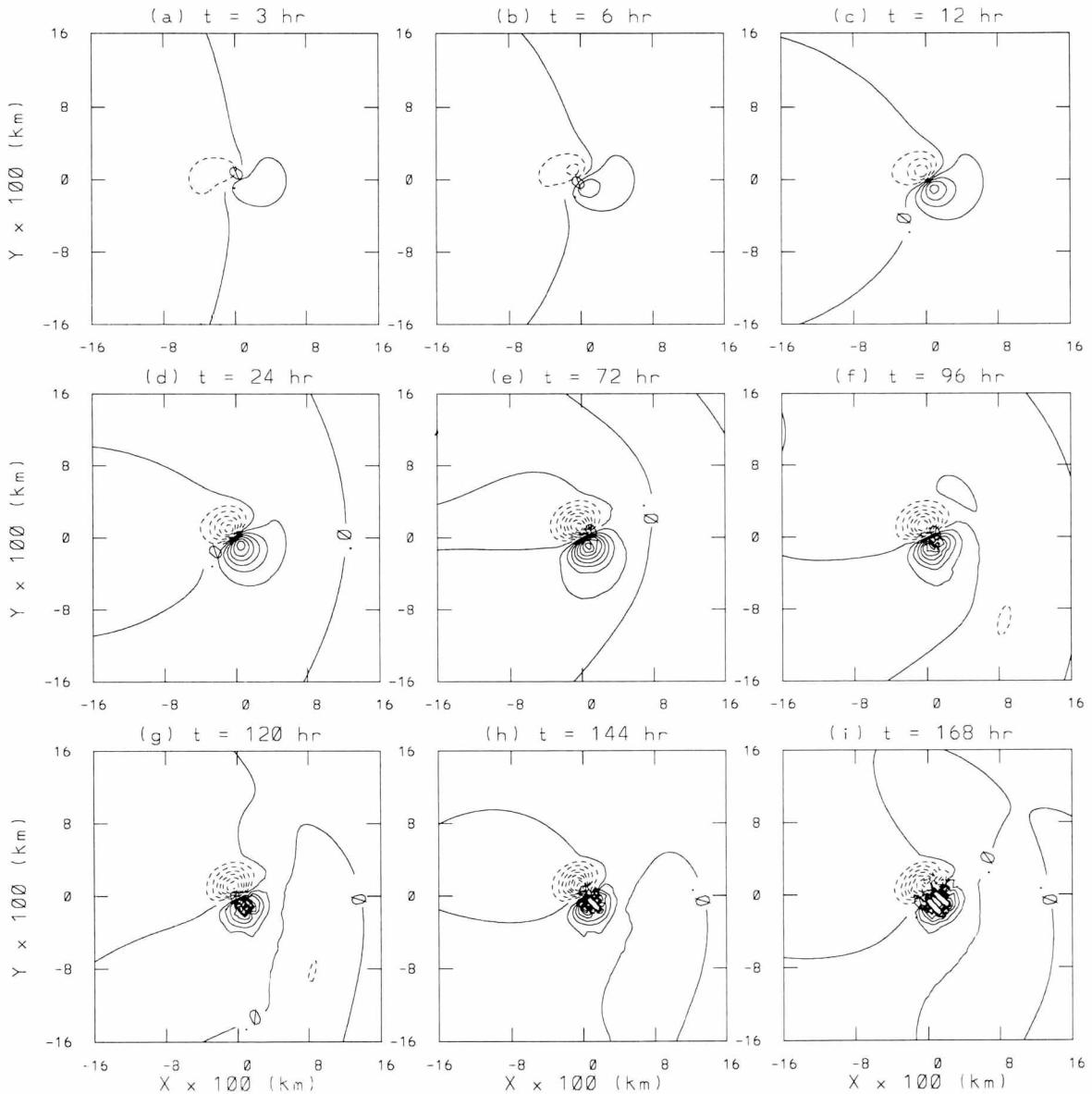


Fig. 15. Total streamfunction tendency (TT term) fields. The contour interval is $10 \text{ m}^2 \text{s}^{-2}$.

전체 유선함수 경향장의 시간에 따른 변화를 Fig. 15에 나타내었다. 이 그림은 음의 유선함수 경향이나 타나는 방향으로 소용돌이가 이동됨을 나타낸다. 비대칭 순환의 강도가 약한 초기에는 대칭 순환에 의한 행성 소용돌이도의 이류가 전체 유선함수 경향장의 대부분을 차지하므로 소용돌이가 서쪽으로 이동한다. 시간이 지나면서 비선형 항의 영향을 많이 받지만 선형 항도 지속적으로 작용하므로 음의 유선함수 경향장이 비선형 항에 의한 유선함수 경향의 경우 보다 좀 더 북

서쪽을 향한다. 72시간 이후 전체 유선함수의 경향장은 거의 일정한 형태를 나타냄으로써 소용돌이가 72시간 이후 거의 일정한 속도로 북과 북서 사이를 이동함을 보여준다.

Fig. 16은 소용돌이 중심에서 서쪽으로 150 km 떨어진 곳에서의 SVAF항, AVSF항, PVAF항, PVAF항에 의한 유선함수 경향과 비선형 항 및 선형 항에 의한 유선함수 경향, 전체 유선함수 경향의 시간 변화를 나타낸다. 이 지역은 대칭 순환의 흐름이 강한 지역으

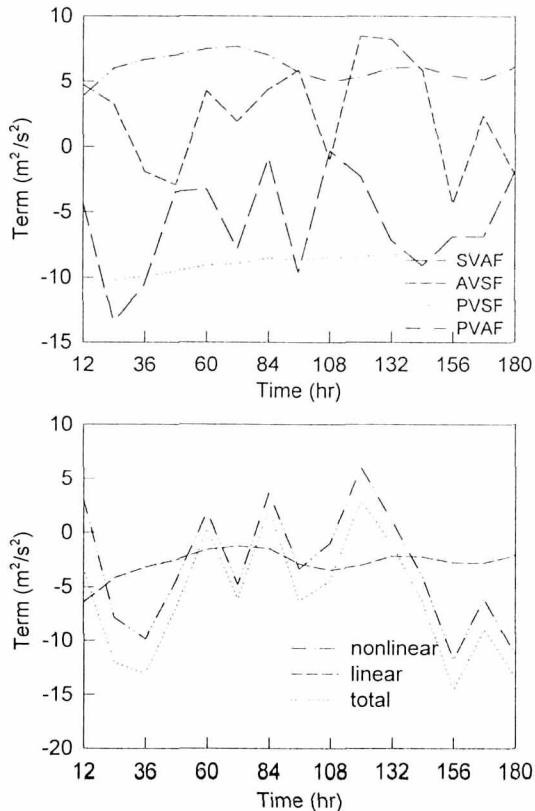


Fig. 16. The time variations of the streamfunction tendency values due to SVAF, AVSF, PVSF, and PVAF terms (upper panel) and nonlinear term, linear term, and total streamfunction tendency term (lower panel) at a location of 150 km to the west of the vortex center.

로서 AVSF항에 의한 유선함수 경향이 소용돌이 외부 지역에서 보다 훨씬 크게 나타나며 시간에 따른 크기의 변동 폭이 크다. SVAF항에 의한 유선함수 경향은 전체 적분 시간동안 음의 값을 나타내고 시간에 따른 크기 변화의 기복이 심하다. 이렇게 비선형 항의 크기 변화가 심한 것은 소용돌이 중심 부근에서는 흐름이 강한 비선형성을 띠기 때문이다. 반면에 PVSF항에 의한 유선함수 경향은 시간에 따른 크기의 변화가 적은데 시간이 흐르면서 대칭 소용돌이의 흐름이 약해짐에 따라 크기가 감소한다. 또 전체 적분 시간 동안 음의 값을 나타내어 소용돌이 중심 부근에서는 선형 항에 의한 강제력이 항상 서쪽을 향함을 보여준다. PVAF항에 의한 유선함수 경향은 전체 적분 시간 동안 양의 값을 나타내는데 이는 Fig. 12에 나타난 바와 같이 소용돌이 중심 부근에 나타나는 양의 유선함수 경향에

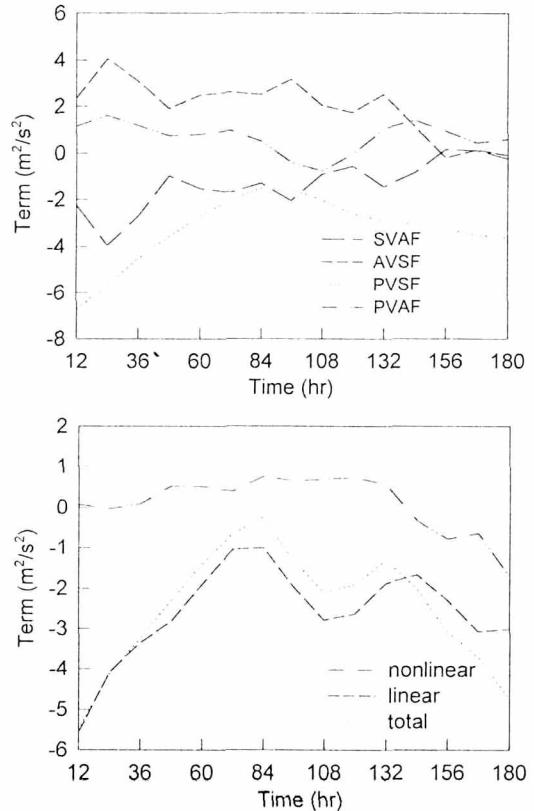


Fig. 17. The same as in Fig. 16 except for 750 km.

의해 소용돌이의 흐름이 약화되는 것을 나타낸다. 시간이 지남에 따라 선형 항에 의한 유선함수 경향이 계속 일정한 크기를 유지하는 것은 소용돌이 중심 부근에서 강한 대칭 소용돌이 흐름에 의해 소용돌이가 초기의 축 대칭성과 강도를 유지하고 있기 때문이다. 이 지역에서 전체 유선함수 경향은 주로 비선형 항, 특히 AVSF항에 의해 결정된다.

소용돌이 중심에서 서쪽으로 750 km 떨어진 곳 (Fig. 17)은 소용돌이 흐름이 약한 지역으로서 그림에 나타난 모든 값들의 크기가 150 km 지역에서 보다 작게 나타난다. 이 지역에서 SVAF항에 의한 유선함수 경향과 AVSF항에 의한 유선함수 경향은 132시간 까지 서로 비슷한 크기에 다른 부호를 가지므로 비선형 항에 의한 유선함수 경향의 크기는 매우 작다. 소용돌이 외부 지역에서 강하게 작용하는 베타 효과 때문에 대칭 소용돌이의 흐름은 빠르게 약화되어 PVSF항에 의한 유선함수 경향의 크기가 시간이 지남에 따라 빠르게 감소한다. Fig. 12에서 보여진 바와 같이

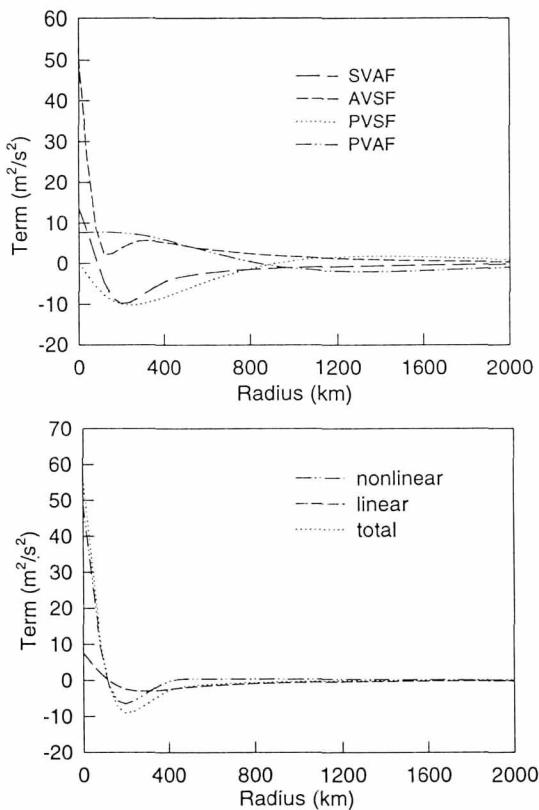


Fig. 18. The spacial distributions of SVAF, AVSF, PVSF, and PVAF terms (upper panel) and nonlinear term, linear term, and total streamfunction tendency term (lower panel) at 72 h to the west of the vortex center.

이 지역은 PVAF항에 의한 양의 유선함수 경향의 가장 자리가 위치하는 지역이므로 PVAF항에 의한 유선함수 경향이 작은 크기의 양의 값을 가진다. 이 지역에서 전체 유선함수 경향은 주로 선형 항에 의해 결정된다.

Fig. 18은 소용돌이의 이동이 준 정상 상태에 도달하기 시작하는 72시간에서 소용돌이 중심에서 서쪽으로 반경을 증가시키면서 조사한 각 항들에 의한 유선함수 경향의 공간 분포를 나타낸다. 150 km 내부 지역에서는 AVSF항이, 150-400 km 지역에서는 SVAF 항과 PVSF항이, 400 km 이상 지역에서는 PVSF와 PVAF를 더한 선형 항이 전체 유선함수 경향을 결정짓는다. 반경 400 km 이내에서 유선함수 값의 변화가 심하며 이 지역에서의 대칭 순환과 비대칭 순환의 상호 작용이 소용돌이를 이동시키는데 주 역할을 함을 알 수 있다.

4. 요약 및 결론

비발산 순압 모형을 이용하여 베타 표류 현상에 대해 조사하였다. 유선함수장을 대칭 순환과 비대칭 순환으로 분리하여 각 순환들의 시간 변화를 살펴보았다. 초기에 저기압성 흐름만을 나타내는 대칭 순환은 시간이 흐르면서 절대 소용돌이도를 보존하기 위한 비대칭 자이어의 발달로 인해 흐름이 외부 반경에서 고기압성으로 바뀌었다. 비대칭 흐름은 주로 파수가 1인 두 개의 맞회전하는 자이어로서 소용돌이 서쪽에는 저기압성 자이어가 동쪽에는 고기압성 자이어가 위치하였다. 동쪽의 고기압성 자이어는 시간이 지남에 따라 시계 방향으로 회전하고 적분 후기에는 2개로 나누어졌다. 비대칭 운동 에너지 방정식의 분석을 통해 비대칭 순환은 대칭 순환에서 비대칭 순환으로의 에너지 전달 과정을 통해 발달하며 이러한 에너지 전달 과정은 주로 베타 효과에 의해 이루어짐을 알 수 있었다. 소용돌이의 운동과 비대칭 순환의 비교·분석을 통해 소용돌이 중심 부근에 존재하는 비대칭 흐름을 평균한 흐름인 통풍류에 의해 소용돌이가 이동됨을 알 수 있었다.

유선함수 경향 방정식을 분석하여 순압 소용돌이도 방정식의 각 항들이 소용돌이의 이동에 미치는 영향을 조사하였다. 베타 효과에 의한 선형 항은 초기에 비대칭 순환이 형성되는데 영향을 주며 소용돌이가 변형되어 대칭 순환의 저기압성 강도가 약화되는 데 영향을 준다. 선형 항은 초기 12시간까지 소용돌이의 이동에 영향을 주며 이 항에 의한 유선함수 경향은 소용돌이 외부 지역에서 전체 유선함수 경향의 대부분을 차지한다. 또한 실질적인 소용돌이의 이동을 일으키는 전체 유선함수 경향의 변화에는 큰 영향을 주지 않지만 초기에 비선형 항이 발달하는데 중요한 역할을 한다. 비선형 항은 비대칭 순환에 의한 대칭 상대 소용돌이도의 이류 과정을 통해 소용돌이가 북북서로 이동하는데 영향을 주며 이 항에 의한 유선함수 경향은 전체 유선함수 경향의 대부분을 차지한다. 대칭 순환에 의한 비대칭 상대 소용돌이도의 이류 과정은 대칭 소용돌이 흐름에 의한 비대칭 순환의 회전을 통해 통풍류가 좀 더 북서쪽으로 향하는 데 영향을 주고 선형 항에 의한 지속적인 소용돌이의 변형을 억제하여 적분 후기에도 통풍류의 이동 속도가 거의 일정하게 유지되는 데 영향을 준다. 결론적으로 초기에 선형 항에 의해 발달한 비대칭 순환은 비선형 항에 의해 발달·유

지될 수 있으며 베타 표류는 대칭 순환과 비대칭 순환 간의 상호 작용을 통해서 일어난다.

한편 소용돌이는 그 구조에 따라 다양한 이동 경로를 겪을 수 있다(DeMaria and Baik, 1987; Fiorino and Elsberry, 1987; Li and Wang, 1994). 그러므로 정확한 태풍 진로 예측을 위해 소용돌이의 초기 구조에 따른 이동 역학을 연구하는 것이 매우 중요하다. 소용돌이의 초기 구조에 따른 다양한 이동 경로는 비대칭 순환의 시간 변화와 밀접한 연관이 있다. 즉, 소용돌이의 구조에 따라 비대칭 순환의 형태도 달라지고 순압 소용돌이도 방정식에 포함된 각 항들의 크기와 각 항들에 의한 유선함수 경향장의 형태도 달라질 것이다. 따라서 본 연구에서 사용한 방법론을 가지고 소용돌이의 초기 구조가 소용돌이의 이동에 미치는 영향에 대한 심도있는 연구가 요구되며 이러한 연구는 태풍 진로 예측을 향상시키는데 기여할 것이다.

감사의 글

이 연구는 과학기술처 특정 연구 과제 (NDII-01-01-04)의 지원으로 수행되었다.

참고문헌

- 권혁조, 1993: 비발산 모형에서의 열대성 저기압의 이동과 국부적 에너지에 관한 수치연구, 한국기상학회지, 29권 3호, 181-194.
윤순창, 이갑복, 1990: 순압 대기에서의 태풍의 이동 성향에 관

한 연구, 한국기상학회지, 26권 1호, 25-37.

- Baik, J.-J., 1992: Conceptualizations and high school earth science educational guides of tropical cyclone motion and development. *J. Korean Earth Sci. Soc.*, **13**, 419-433.
- Carr, L.E., III, and R.T. Williams, 1989: Barotropic vortex stability to perturbations from axisymmetry. *J. Atmos. Sci.*, **46**, 3177-3196.
- Chan, J.C.L., and R.T. Williams, 1987: Analytical and numerical studies of the beta-effect in tropical cyclone motion. Part I: Zero mean flow. *J. Atmos. Sci.*, **44**, 1257-1264.
- DeMaria, M., and J.-J. Baik, 1987: The effect of the vortex structure on barotropic hurricane track forecasts. *17th Conf. on Hurricanes and Tropical Meteorology*, FL, Miami, Amer. Meteor. Soc., 52-54.
- Fiorino, M., and R.L. Elsberry, 1987: The role of vortex structure in barotropic tropical cyclone motion. *17th Conf. on Hurricanes and Tropical Meteorology*, Miami, FL, Amer. Meteor. Soc., 55-59.
- _____, and _____, 1989: Some aspects of vortex structure related to tropical cyclone motion. *J. Atmos. Sci.*, **46**, 975-990.
- Holland, G.J., 1983: Tropical cyclone motion: Environmental interaction plus a beta effect. *J. Atmos. Sci.*, **40**, 328-342.
- Li, X.F., and B. Wang, 1994: Barotropic dynamics of the beta gyres and beta drift. *J. Atmos. Sci.*, **51**, 746-756.
- Peng, M.S., and R.T. Williams, 1990: Dynamics of vortex asymmetries and their influence on vortex motion on a β -plane. *J. Atmos. Sci.*, **47**, 1987-2003.
- Rossby, C.G., 1939: Relation between variations in the intensity of the zonal circulation of the atmosphere and the displacements of the semi-permanent centers of action. *J. Mar. Res.*, **2**, 38-55.
- _____, 1948: On displacements and intensity changes of atmospheric vortices. *J. Mar. Res.*, **7**, 157-187.
- Shapiro, L.J., and K.V. Ooyama, 1990: Barotropic vortex evolution on a beta plane. *J. Atmos. Sci.*, **47**, 170-187.
- Smith, R.K., and W. Ulrich, 1990: An analytical theory of tropical cyclone motion using a barotropic model. *J. Atmos. Sci.*, **47**, 1973-1986.