

초기 소용돌이의 전체 상대 각 운동량이 순압 태풍 운동에 미치는 영향

백종진 · 백종수

광주과학기술원 환경공학과
(1999년 3월 18일 접수)

Effects of the Total Relative Angular Momentum of Initial Vortex on Barotropic Tropical Cyclone Motion

Jong-Jin Baik and Jong-Su Paek

Department of Environmental Science and Engineering, Kwangju Institute of Science and Technology, Kwangju, Korea

(Manuscript received 18 March 1999)

Abstract

Effects of the total relative angular momentum (RAM) of initial vortex on barotropic tropical cyclone motion are examined using a nondivergent barotropic model. Despite different initial RAMs, the vortex motion is directly related to the asymmetric circulation and the vortex motion vector is almost equal to the ventilation flow vector. It is shown that when the area-integrated tangential wind is positive (negative, but relatively not close to zero) at any time, the vortex moves northwest (southwest). As the initial RAM becomes larger, more intense asymmetric circulation develops over broader region. When the initial RAM is positive (negative), RAM decreases (increases) with time because of the weakening of outflow strength by the Rossby wave dispersion. This eventually results in weak anticyclonic flow at large radii in all the vortices at later stage. When the initial vortex has strong anticyclonic flow, the vortex moves southwest due to the asymmetric circulation formed by the anticyclonic flow. However, as time passes, the asymmetric circulation near the vortex center rotates clockwise by the anticyclonic flow and the vortex moves northwest. Analysis of the streamfunction tendency equation shows similar roles of each term in the vortex motion regardless of different initial RAMs.

1. 서 론

저기압성 소용돌이는 그 초기 구조에 따라 다양한 이동 경로를 나타낸다. 태풍 부근에서의 관측 자료의 부족으로 거의 모든 현업 태풍 모형이 가상 소용돌이 삽입법을 이용하는 것을 고려해 볼 때 소용돌이의 초기 구조에 따른 이동 특성을 밝히는 것은 보다 정확한 태풍 진로 예보를 위해 매우 중요한 일이다. 지금까지 많은 학자들이 비발산 순압 소용돌이도 방정식 혹은 천수 방정식을 이용하여 소용돌이의 구조에 따른 이동 특성을 연구해왔다(e.g., DeMaria, 1985; Chan과 Williams, 1987; Fiorino와 Elsberry, 1989; 백종수와 백종진, 1999b). 그들은 저기압성 소용돌이의 이동은 초기 소용돌이의 내부 강도의 변화보다 외부 반경에서의 크기 변화에 더욱 민감함을 보였다.

한편 연직적으로 평균된 태풍의 접선 속도는 외부 반경에서 고기압성 흐름을 포함할 수 있다. 이 고기압성 흐름의 강도에 따라 소용돌이의 전체 상대 각 운동량은 변화될 수 있다. 순압 소용돌이의 전체 상대 각 운동량의 크기는 소용돌이의 구조에 따라 달라지므로 소용돌이의 이동은 전체 상대 각 운동량의 변화에 따

라 다양하게 변화될 수 있다.

순압 소용돌이의 이동에 대한 전체 상대 각 운동량의 중요성은 Rossby(1948)로부터 인식되어 왔다. 그는 저기압성 소용돌이의 북향 속도는 소용돌이의 전체 상대 각 운동량에 비례하는 순 북향 코리올리 강제력 때문이라고 하였다. DeMaria와 Baik(1987)은 소용돌이의 이동 방향은 초기 소용돌이의 면적분된 접선 속도에 의해 결정된다고 하였다. 그들은 초기 소용돌이의 면적분된 접선 속도가 0보다 큰 경우에는 소용돌이가 북서쪽으로 이동하며 0보다 작은 경우에는 남서쪽으로 이동한다고 하였다. DeMaria(1987)는 소용돌이의 전체 상대 각 운동량이 0에 가까울 때 비발산 순압 모형에서 평균 진로 예보 오차가 최소가 됨을 지적하였다. Willoughby(1988)는 순압 소용돌이의 선형 운동을 조사한 연구에서 베타 평면에서 소용돌이의 극향 속도는 소용돌이의 전체 상대 각 운동량에 비례한다고 하였다. 그는 전체 상대 각 운동량이 0보다 작은 소용돌이는 적도쪽으로, 0보다 큰 소용돌이는 극쪽으로 이동하고 전체 상대 각 운동량이 커질수록 서향 이동 성분이 증가한다고 하였다. 또한 그는 각기 다른 구조를 갖는 소용돌이의 전체 상대 각 운동량은 시간

이 지남에 따라 0부근에 가까워지려는 경향이 있음을 지적하였다. Fiorino와 Elsberry(1989)는 초기에 저기압성 흐름만을 포함하는 소용돌이의 경우 시간이 지남에 따라 소용돌이 외부 반경에 고기압성 흐름이 형성되어 반경 2000 km 이내의 소용돌이의 전체 상대 각 운동량이 초기보다 감소된다고 하였다. Shapiro와 Ooyama(1990)는 시간에 따른 소용돌이의 변형을 전체 상대 각 운동량의 시간 변화와 연관시켜 설명하였다. 그들은 소용돌이의 전체 상대 각 운동량은 시간이 지남에 따라 감소하고 소용돌이의 중심부터 외부 반경(3000 km)까지의 전체 상대 각 운동량은 적분 후기에 0부근에서 진동한다고 하였다. 또한 그들은 베타 평면에서 전체 상대 각 운동량이 0이 아닌 소용돌이는 고립되어 존재할 수 없으며 Rossby(로스비) 북향 강제력에 의해 소용돌이의 전체 상대 각 운동량이 변한다고 하였다.

본 연구에서는 비발산 순압 모형을 이용하여 초기 소용돌이의 전체 상대 각 운동량의 변화에 따른 소용돌이의 이동 특성을 체계적으로 조사하고자 한다. 특히 외부 반경에 강한 고기압성 흐름을 포함하여 전체 상대 각 운동량이 0보다 작은 소용돌이의 이동 역학을 중점적으로 조사한다. 이를 위해 초기 소용돌이의 전체 상대 각 운동량의 변화에 따른 대칭 및 비대칭 순환과 유선함수 경향 방정식을 분석한다.

2. 수치 모형 및 분석 방법

본 연구에서 사용한 수치 모형은 백종수와 백종진(1999a)에 기술되어 있는 모형과 동일하다. 베타 평면에서의 비발산 순압 소용돌이도 방정식은 다음과 같이 표현된다.

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

여기서 ζ 는 상대 소용돌이도의 연직 성분, u 는 동서 속도 성분, v 는 남북 속도 성분, β 는 코리올리 인자의 남북 경도이다. 비발산 흐름이므로 ζ , u , v 를 다음과 같이 유선함수(ψ)로써 나타낼 수 있다.

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

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

소용돌이의 이동에 미치는 전체 상대 각 운동량의 영향을 조사하기 위해 아래와 같이 소용돌이의 초기 구조를 설정하였다(DeMaria와 Baik, 1987; DeMaria, 1987).

$$V(r) = V_c \left(\frac{r}{r_c} \right) \exp \left\{ \frac{1}{b} \left[1 - \left(\frac{r}{r_c} \right)^b \right] \right\} + V_a \left(\frac{r}{r_a} \right) \exp \left\{ \frac{1}{2} \left[1 - \left(\frac{r}{r_a} \right)^2 \right] \right\}. \quad (4)$$

여기서 $V(r)$ 은 소용돌이 중심으로부터 반경 r 떨어진 곳에서의 접선 속도이며 $V_c = 30 \text{ ms}^{-1}$, $r_c = 120 \text{ km}$, $r_a = 600 \text{ km}$ 로 설정하였다. V_a 가 0일 때 반경 120 km에서 소용돌이의 최대 풍속이 30 ms^{-1} 가 되며 이 때 $r = 300 \text{ km}$ 에서 $V = 15 \text{ ms}^{-1}$ 가 되도록 b 를 계산하였다($b = 1.132$). V_a 가 0보다 작은 경우 소용돌이는 외부 반경에서 고기압성 흐름을 포함하며 이 때 $|V_a|$ 가 클수록 더 강한 고기압성 흐름을 포함한다.

순압 소용돌이의 전체 상대 각 운동량(RAM)은 다음과 같이 표시될 수 있다.

$$RAM = C \int_0^{2\pi} \int_0^\infty V r^2 dr d\theta. \quad (5)$$

여기서 C 는 상수이고 θ 는 방위각을 나타낸다. 식 (4)의 구조를 갖는 소용돌이에 대한 RAM은 아래와 같다.

$$RAM = 2\pi C [V_c r_c^3 \exp \left(\frac{1}{b} \right) b^{4/b-1} \Gamma \left(\frac{4}{b} \right) + 2V_a r_a^3 \exp \left(\frac{1}{2} \right) \Gamma(2)]. \quad (6)$$

여기서 Γ 는 감마 함수를 나타낸다. 식 (6)에서 소용돌이의 RAM은 V_a 의 선형 함수이며 V_a 가 -0.83 ms^{-1} 일 때 소용돌이의 RAM이 0이 된다. 따라서 V_a 가 -0.83 ms^{-1} 보다 큰 경우에는 초기 소용돌이의 RAM이 0보다 크고 -0.83 ms^{-1} 보다 작은 경우에는 0보다 작다. 본 연구에서는 초기 소용돌이의 RAM이 0보다 큰 경우($V_a = 1.17 \text{ ms}^{-1}$), 0인 경우($V_a = -0.83 \text{ ms}^{-1}$), 0보다 작은 경우($V_a = -2.83, -4.83, -6.83 \text{ ms}^{-1}$)에 대해 조사하였다. 이 다섯 가지 경우의 초기 소용돌이의 구조는 Fig. 1과 같다.

비발산 순압 소용돌이도 방정식 (1)을 공간에 대해서는 4차 정확도를 가지는 차분법을 시간에 대해서는 2차 정확도를 가지는 Adams-Bashforth 차분법을

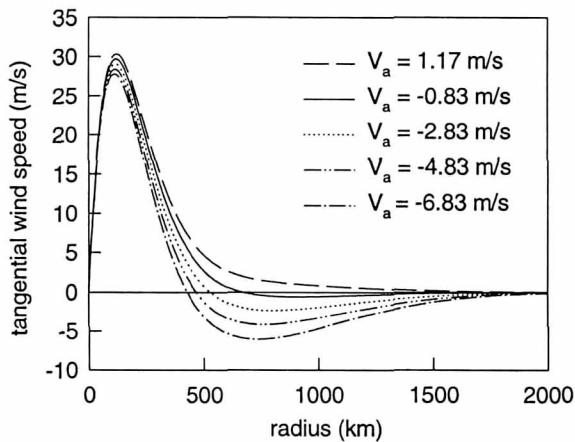


Fig. 1. The initial tangential wind profile given by (4) with $V_a = 1.17, -0.83, -2.83, -4.83$, and -6.83 ms^{-1} .

이용하여 수치적으로 풀었다. 수치 적분 영역은 동·서·남·북 방향으로 모두 12000 km이고 β 는 20°N 에서의 값으로 하였다. 격자 간격을 40 km, 시간 간격을 200초로 하여 수치 모형을 144시간 동안 적분하였다.

베타 평면에서 소용돌이의 이동은 비대칭 순환의 강도 및 형태와 직접적으로 연관된다. 따라서 소용돌이의 RAM에 따른 이동 특성을 이해하기 위해 대칭 순환과 비대칭 순환의 특성 및 시간 변화를 조사하였다. 대칭 순환과 비대칭 순환은 전체 유선함수장과 백종수와 백종진(1999a)에 기술되어 있는 계산 방법을 이용하여 구하였다. 유선함수 경향 방정식을 분석하여 초기 소용돌이의 RAM에 따른 각 항들이 소용돌이의 이동에 미치는 역할을 조사하였다.

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

여기서 ψ_t 는 전체 유선함수, ∇^{-2} 는 역 라플라시안 연산자, J 는 야코비안을 나타낸다. 그리고 첨자 s 는 대칭 성분, a 는 비대칭 성분을 나타낸다. 식 (7)의 각 항을 왼쪽부터 시작하여 TT, SVAF, AVSF, PVSF, 그리고 PVAF로 각각 표기한다.

3. 결과 및 논의

Fig. 2는 Fig. 1에 제시된 소용돌이의 144시간 동

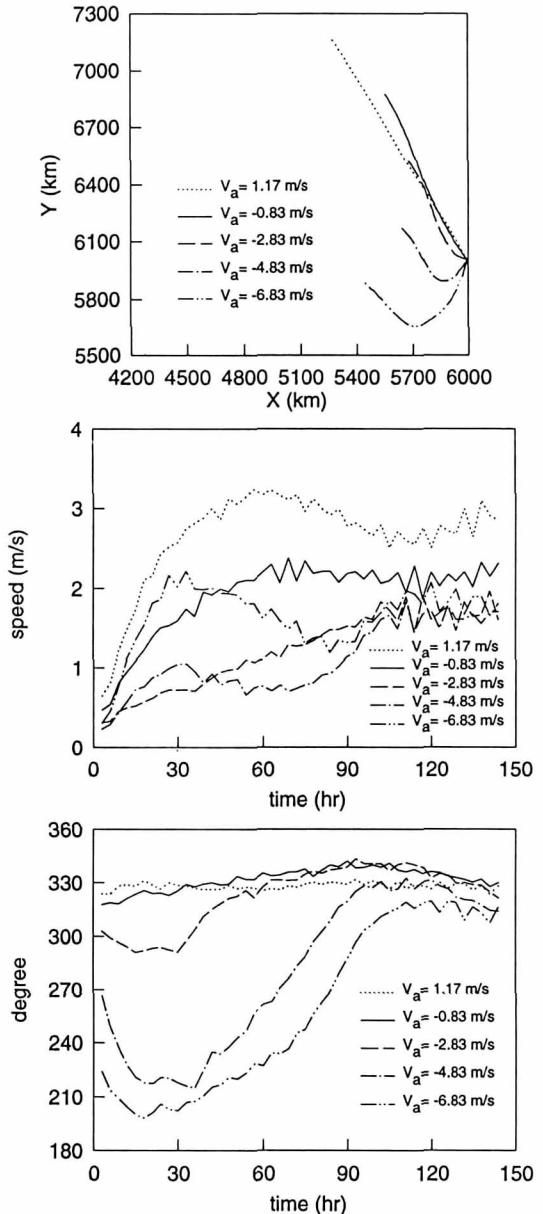


Fig. 2. The track (upper panel), and the vortex motion speed (middle panel) and motion direction (lower panel) as a function of time for the five initial vortices during 144 hours.

안의 진로, 이동 속도 및 이동 방향을 보여준다. 소용돌이의 이동 경로는 초기 소용돌이의 RAM에 따라 다르게 나타났다. DeMaria와 Baik(1987)은 이러한 이동 경로의 차이는 초기 소용돌이의 면적분한 접선 속도와 연관되어 있다고 하였다. 순압 소용돌이에 대한 면적분한 접선 속도(T)는 다음과 같이 표시될 수

있다.

$$T = D \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} V r dr d\theta. \quad (8)$$

여기서 D 는 상수이다. 식 (4)의 구조를 갖는 소용돌이에 대한 T 는 다음과 같다.

$$T = 2\pi D [V_c r_c^2 \exp\left(\frac{1}{b}\right) b^{3/b-1} \Gamma\left(\frac{3}{b}\right) + \sqrt{2} V_a r_a^2 \exp\left(\frac{1}{2}\right) \Gamma\left(\frac{3}{2}\right)]. \quad (9)$$

위 식은 T 가 V_a 의 선형 함수이며 소용돌이가 외부 반경에 강한 고기압성 흐름을 포함할 때 T 가 0보다 작아짐을 나타낸다. 식 (9)에서 T 가 0인 V_a 는 -2.56 ms^{-1} 이다. V_a 가 $1.17, -0.83 \text{ ms}^{-1}$ 인 경우에 초기 소용돌이의 T 는 0보다 크다. 이 경우 소용돌이는 전체 적분 시간 동안 계속 북서진하며 T 는 시간이 지남에 따라 감소하지만 항상 양의 값을 갖는다. V_a 가 -2.83 ms^{-1} 인 경우에 초기 T 는 0보다 작지만 적분 후 곧 0보다 커지며 이후 적분 시간 동안 항상 0보다 크다. 이 경우 소용돌이는 적분 직후에는 서진하다가 곧 북서 방향으로 이동한다. V_a 가 $-4.83, -6.83 \text{ ms}^{-1}$ 인 경우 초기 T 는 0보다 작다. 수치 적분 초기에 소용돌이는 남서진하고 이 동안 T 는 0보다 작다. 시간이 지나면서 소용돌이 외부 반경의 고기압성 흐름이 약화됨에 따라 T 는 계속 증가하여 적분 중·후기에는 0보다 커진다. 소용돌이의 이동 방향은 서서히 바뀌어 적분 중·후기에는 소용돌이가 북서진한다. 이때 소용돌이가 남서에서 북서로 전향하는 시간은 외부의 고기압성 흐름의 강도가 클수록 늦다. 결론적으로 어느 시각에서의 소용돌이의 이동 방향은 초기 T 의 부호에 의해 결정되는 것이 아니라 그 시각에서의 T 의 부호에 의해 결정된다. 즉 T 가 0보다 클 때 소용돌이는 북서진하고 T 가 0보다 작지만 상대적으로 0에 가까울 때는 서진후 북서진하며 T 가 0보다 작을 때는 남서진한다.

소용돌이의 이동 속도는 초기 RAM이 0보다 클 때 가장 크다. 초기 RAM이 0일 때는 72시간 이후 평균 속도 2.2 ms^{-1} 로 준 정상 상태의 이동을 나타낸다. 한편 초기 RAM이 0보다 작은 소용돌이는 36시간까지 외부 반경의 고기압성 흐름이 클수록 더 빨리 이동한다. 이 중에서 $V_a = -4.83, -6.83 \text{ ms}^{-1}$ 인 두 경우 ($T < 0$)는 36시간 이후부터 이동 속도가 감소하며 이동 방향이 북서로 바뀌기 시작하는 시간부터 이동 속

도가 다시 서서히 증가하여 108시간 이후에는 초기 RAM이 0보다 작은 모든 소용돌이의 이동 속도가 서로 비슷해진다.

다음으로 전체 상대 각 운동량의 변화에 따른 대칭 및 비대칭 순환의 시간 변화를 살펴보자. Fig. 3은 $V_a = 1.17 \text{ ms}^{-1}$ 와 $V_a = -4.83 \text{ ms}^{-1}$ 인 경우에 대칭 순환으로 표현되는 방위각을 따라 평균한 접선 속도의 시간 변화이다. 초기 소용돌이의 RAM이 0보다 큰 경우($V_a = 1.17 \text{ ms}^{-1}$)와 작은 경우($V_a = -4.83 \text{ ms}^{-1}$) 모두 적분 후기(144시간)에는 평균 접선 속도의 차이가 크게 나지 않는다. 좀 더 자세히 말하면 초기 RAM이 0보다 큰 경우는 시간이 지나면서 외부 흐름의 크기가 감소되고 절대 소용돌이도를 보존하기 위해 발생한 고기압성 차이의 영향으로 외부 반경에서 약한 고기압성 흐름이 나타난다. 따라서 소용돌이의 RAM은 시간이 지남에 따라 감소한다. 초기 RAM이 0보다 작은 경우는 시간이 흐름에 따라 로스비 파 분산에 의해 외부 반경의 고기압성 흐름이 약화

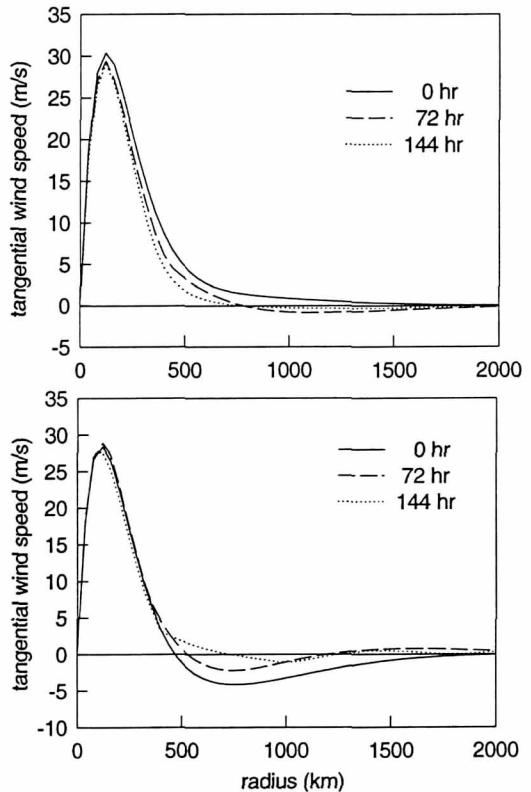


Fig. 3. The azimuthally-averaged tangential wind profile at 0, 72, and 144 hr in the cases of $V_a = 1.17 \text{ ms}^{-1}$ (upper panel) and $V_a = -4.83 \text{ ms}^{-1}$ (lower panel).

되고 고기압성 흐름에 의해 발생한 저기압성 자이어의 영향으로 고기압성 흐름이 존재하는 반경 외부에 약한 저기압성 흐름이 나타난다. 그 결과 소용돌이의 RAM은 시간이 지남에 따라 증가한다. 이때 반경 500 km 이내의 저기압성 흐름의 강도는 거의 변하지 않고 72시간에는 오히려 초기보다 약간 더 크게 나타난다. 이는 초기 소용돌이의 내부에 저기압성 흐름이, 외부에 고기압성 흐름이 존재하는 경우 외부의 고기압성 흐름이 우선적으로 로스비 파 분산에 의해 소멸됨을 나타내며 고기압성 흐름의 소멸 과정에서 고기압성 흐름에서 저기압성 흐름으로의 운동 에너지 전달 과정이 존

재함을 암시한다. 이러한 과정을 통해 적분 후기에 수치 실험에 사용된 모든 소용돌이의 T 는 0보다 커진다. 결론적으로 초기에 양에서 음에 이르기까지 각각 다른 초기 RAM을 갖는 소용돌이의 대칭 흐름은 적분 후기에 RAM이 0인 소용돌이의 구조와 비슷해진다. 이는 소용돌이 중심에서 외부 반경까지의 RAM이 적분 후기에 0부근에서 진동한다는 Shapiro와 Ooyama (1990)의 결과와 일치한다.

Fig. 4는 초기 소용돌이의 V_a 가 1.17 ms^{-1} 인 경우에 대한 비대칭 순환의 시간 변화를 보여준다. 이 경우 비대칭 순환의 시간 변화는 베타 평면에서 저기압

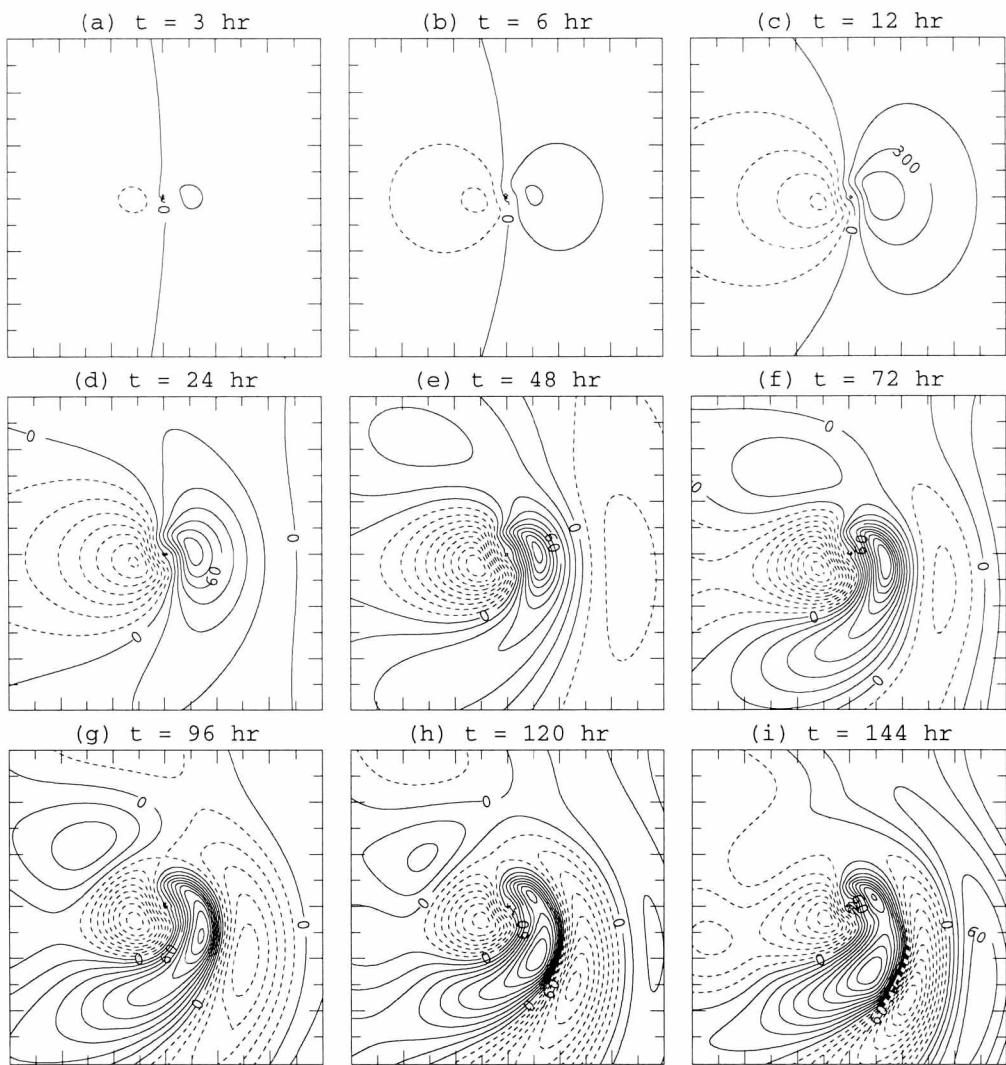


Fig. 4. The evolution of the asymmetric streamfunction field in the case of $V_a = 1.17 \text{ ms}^{-1}$. The plotting domain size is $6000 \text{ km} \times 6000 \text{ km}$ centered on the grid point nearest the calculated vortex center at the indicated time. The actual contour interval is $1.5 \times 10^5 \text{ m}^2 \text{s}^{-1}$.

성 소용돌이에 의한 비대칭 순환의 시간 변화의 전형적인 특성을 나타낸다. 베타 평면에서 저기압성 소용돌이에 의한 비대칭 순환의 시간 변화는 백종수와 백종진(1999a)에 자세히 기술되어 있으므로 참고하기 바란다. Shapiro와 Ooyama(1990)는 순압 모형에서 RAM이 0이 아닌 소용돌이는 로스비 파 분산에 의해 계속해서 변형되며 로스비 파 분산의 강도와 이에 의해 발생하는 비대칭 순환의 강도 및 크기는 초기 RAM의 크기에 비례한다고 하였다. 즉, 초기 소용돌이의 RAM이 클수록 비대칭 순환이 넓은 지역에 강한 강도로 분포한다. 따라서 초기 RAM이 가장 큰 이 경우에 비대칭 순환은 소용돌이 중심에서 멀리 떨어진 남동쪽까지 넓은 지역에 강한 강도로 형성되며 그 결과 이동 속도가 다른 경우 보다 크게 나타난다. 중심 부근 반경 300 km 이내의 비대칭 흐름($u_a = -\partial\psi_a/\partial y$, $v_a = \partial\psi_a/\partial x$)을 평균한 흐름(통풍류)은 소용돌이의 운동과 잘 일치하므로 중심 부근의 비대칭 순환의 강도와 형태가 소용돌이의 이동 속도와 방향을 결정 짓음을 알 수 있다(Fig. 5).

Fig. 6은 V_a 가 1.17 ms^{-1} 인 소용돌이의 이동이 준

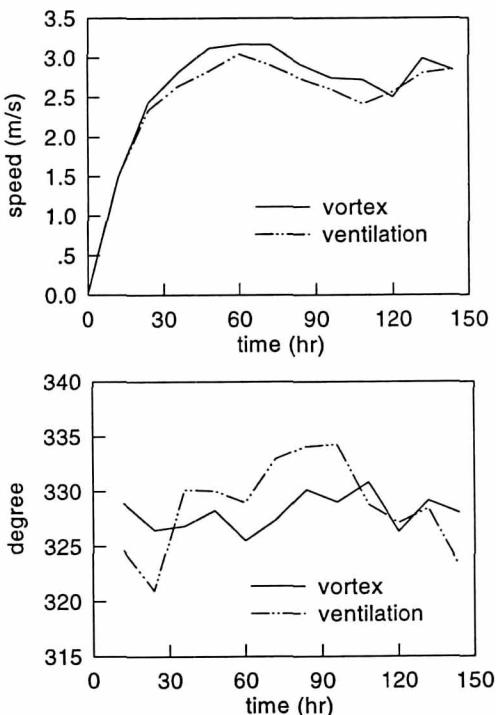


Fig. 5. The magnitude (upper panel) and direction (lower panel) of the vortex motion vector and ventilation flow vector as a function of time in the case of $V_a = 1.17 \text{ ms}^{-1}$.

정상 상태에 이르는 72시간에서의 유선함수 경향 방정식에 포함된 각 항의 기여에 의한 유선함수 경향장이다. SVAF항은 비대칭 흐름에 의한 대칭 상대 소용돌이도의 이류와 연관되는 항으로서 북서쪽의 음의 유선함수 경향장 및 남서쪽의 양의 유선함수 경향장은 이 항이 소용돌이가 북서쪽으로 이동하는 데 기여함을 나타낸다. 대칭 흐름에 의한 비대칭 상대 소용돌이도의 이류와 연관되는 AVSF항은 적분 초기에는 소용돌이 내부의 비대칭 자이어를 회전시켜 소용돌이의 이동 방향에 영향을 준다. 소용돌이의 이동이 준 정상 상태에 도달하는 72시간 이후에는 소용돌이의 북서진에 영향을 주며 소용돌이 중심 부근에서 큰 값을 나타낸다. PVSF항은 대칭 흐름에 의한 행성 소용돌이도의 이류와 관련되며 이 항은 초기에 베타 자이어가 형성되는 데 기여하고 소용돌이의 서진에 영향을 준다. PVAF항은 비대칭 흐름에 의한 행성 소용돌이도의 이류와 관련되는 항으로서 중심의 양의 유선함수 경향장은 이 항이 소용돌이의 저기압성 강도를 약화시키는 데 기여

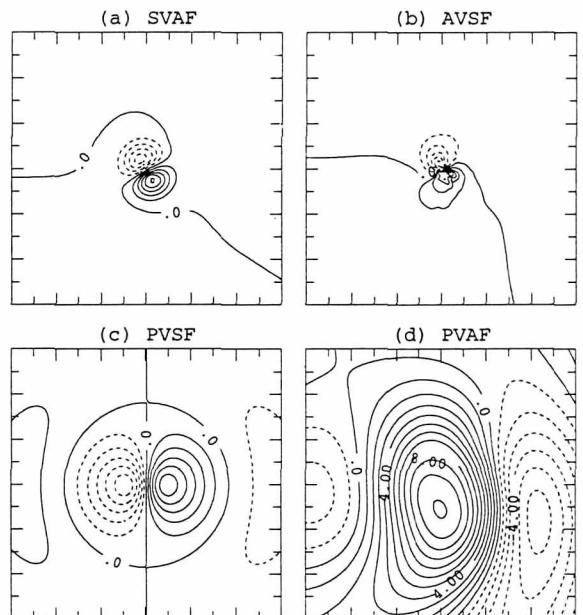


Fig. 6. Contribution to the total streamfunction tendency field due to (a) SVAF (symmetric vorticity advection by the asymmetric flow), (b) AVSF (asymmetric vorticity advection by the symmetric flow), (c) PVSF (planetary vorticity advection by the symmetric flow), and (d) PVAF (planetary vorticity advection by the asymmetric flow) at 72 hr in the case of $V_a = 1.17 \text{ ms}^{-1}$. The plotting domain size is $3200 \text{ km} \times 3200 \text{ km}$ centered on the grid point nearest the calculated vortex center. The contour intervals in (a), (b), (c), and (d) are 10, 10, 2, and $1 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$, respectively. The same plotting domain size is used in Figs. 9-12.

함을 나타낸다. 또한 소용돌이 동쪽의 고기압성 사이어의 시계 방향 회전에 영향을 주어 소용돌이의 형태가 변형되는 데 기여한다.

초기 소용돌이의 RAM이 0인 경우의 분석 결과는 다른 경우보다 Rossby 과 분산의 강도가 약하며 이에 의한 소용돌이의 변형도 적음을 보여준다. 따라서 소용돌이는 서쪽으로 덜 확장되고 비대칭 사이어는 다른 경우보다 좁은 지역에 분포한다. 비선형 항과 선형 항 사이의 평형 상태가 빠르게 성립되어 소용돌이의 이동은 다른 경우보다 이를 시간(약 60시간)에 준 정상 상태에 도달한다(Fig. 2).

Fig. 7은 초기 소용돌이의 V_a 가 -4.83 ms^{-1} 인 경

우에 대한 비대칭 순환의 시간 변화를 보여준다. 이 경우에 소용돌이 외부 반경의 고기압성 흐름은 행성 소용돌이도의 수평 이류를 일으키고 이 이류의 정도는 소용돌이 내부의 저기압성 흐름에 의한 행성 소용돌이도의 수평 이류보다 훨씬 크다. 따라서 적분 초기에 비대칭 순환은 소용돌이 외부 반경의 고기압성 흐름에 의해 발생한 베타 사이어가 주를 이룬다. 적분 초기에 소용돌이 중심 부근의 비대칭 흐름은 서쪽을 향하고 있으며 속도가 매우 작다. 시간이 지나면서 고기압성 흐름에 의해 발생한 비대칭 순환이 발달함에 따라 소용돌이의 남향 속도가 증가한다. 시간이 더 지나면서 고기압성 흐름이 약화됨에 따라 소용돌이 중심 부근의

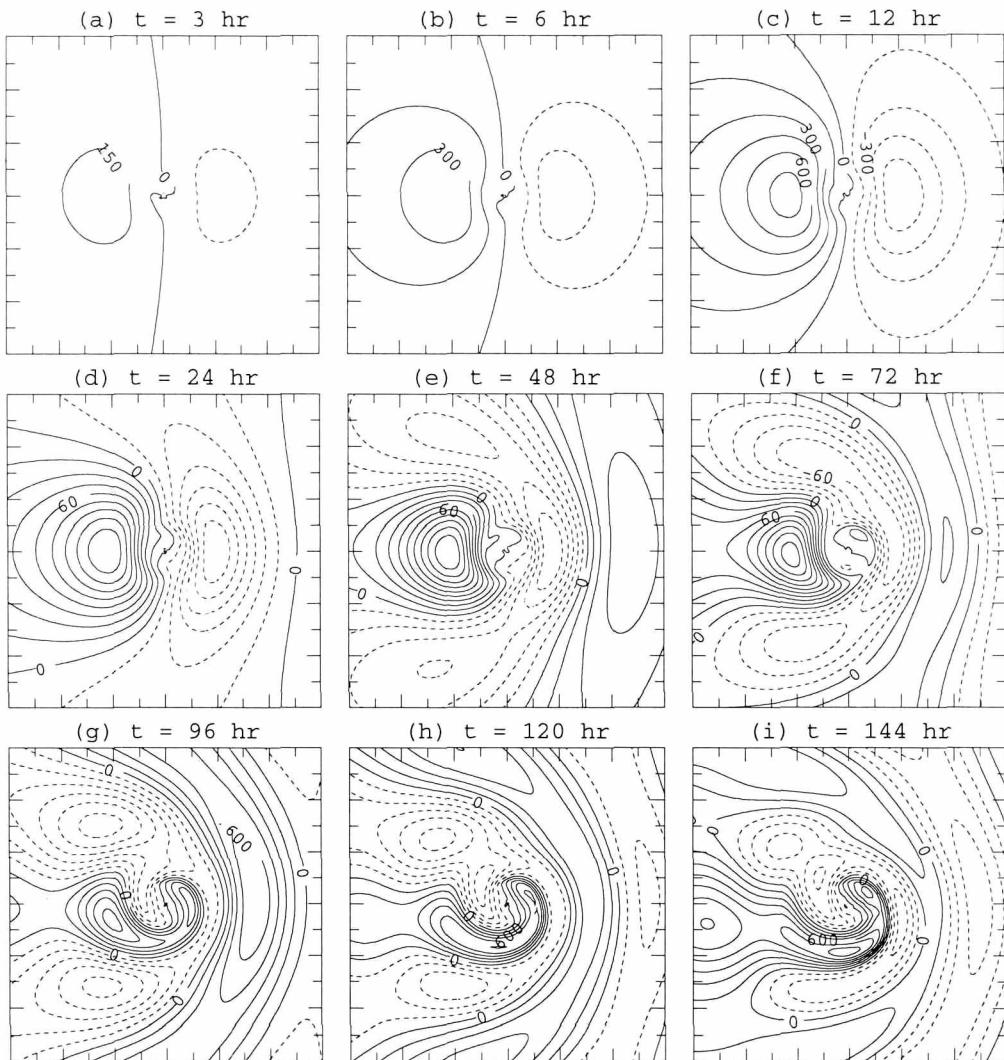


Fig. 7. The same as in Fig. 4 except for $V_a = -4.83 \text{ ms}^{-1}$.

저기압성 흐름에 의한 베타 사이어가 발달하기 시작한다. 소용돌이 외부에 존재하는 고기압성 흐름에 의한 베타 사이어는 72시간 이후 계속 약화되고 96시간 이후부터는 소용돌이 내부의 저기압성 흐름에 의한 비대칭 순환에 합병된다. 한편 12시간 이후부터 중심 부근의 비대칭 순환은 외부의 고기압성 흐름에 의해 서서히 시계 방향으로 회전한다. 그 결과 소용돌이의 이동 방향이 84시간 이후부터는 북서를 향하게 된다. 고기압성 흐름이 상당히 약화된 120시간 이후에는 중심 부근의 사이어가 저기압성 흐름에 의해 반시계 방향으로 회전하여 중심 부근의 비대칭 흐름은 좀 더 서쪽을 향한다. 이 경우에도 통풍류는 전체 적분 시간 동안 소용돌이의 운동과 잘 일치한다(Fig. 8).

초기 소용돌이의 V_a 가 -4.83 ms^{-1} 인 경우 유선함수 경향 방정식에 포함된 각 항의 기여에 의한 유선함수 경향장의 시간 변화를 Figs. 9-12에 나타내었다. SVAF항에 의한 유선함수 경향장(Fig. 9)을 살펴보면 소용돌이 중심 부근의 음과 양의 유선함수 경향장의 위치는 항상 소용돌이의 이동 방향과 일치하며 그 강도의 시간 변화 양상은 소용돌이의 이동 속도의 시간 변화 양상과 유사하다. 즉, 이 항에 의한 강제력은

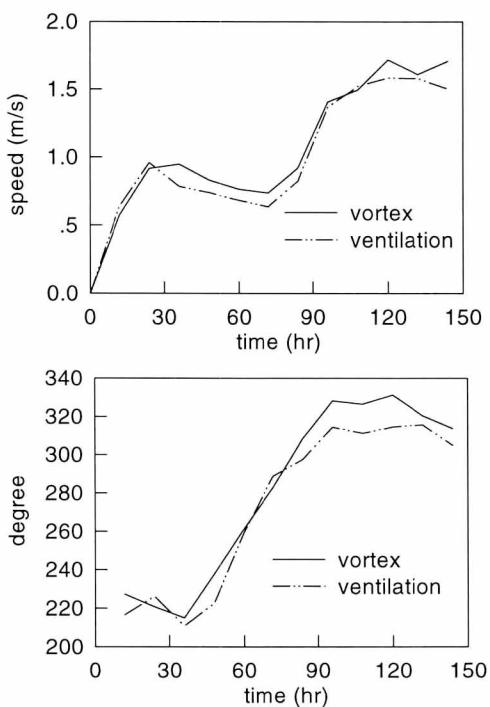


Fig. 8. The same as in Fig. 5 except for $V_a = -4.83 \text{ ms}^{-1}$.

항상 소용돌이가 이동하는 방향으로 작용하여 소용돌이의 이동에 직접적인 영향을 준다. AVSF항에 의한 유선함수 경향장(Fig. 10)을 살펴보면 내부 지역의 유선함수 경향장은 12시간 이후부터 96시간까지 계속 시계 방향으로 회전하고 96시간 이후에는 반시계 방향으로 회전한다. 이 회전 지역의 공간 규모는 크지 않지만 회전 지역에서의 유선함수 경향장의 강도가 크게 나타난다. 즉, AVSF항은 중심 부근의 비대칭 사이어가 시계 또는 반시계 방향으로 회전하는 데 영향을 주어 이 경우에 소용돌이의 이동 방향이 남서에서 북서로 변하는 데 기여함을 알 수 있다.

PVSF항의 기여에 의한 유선함수 경향장(Fig. 11)을 살펴보면 소용돌이 중심 서쪽의 고기압성 베타 사이어와 동쪽의 저기압성 베타 사이어가 외부의 고기압성 흐름에 의해 발생한 것임을 알 수 있다. 하지만 적분 초기에 중심부근의 저기압성 흐름에 의한 유선함수 경향장의 축(0 선)은 남북 방향을 향하고 있는 반면 중심 부근의 저기압성 흐름에 의한 비대칭 사이어의 0 선은 동서 방향을 향하고 있다(Fig. 7). 이는 저기압성 흐름만을 포함하는 소용돌이의 경우 초기 비대칭 사이어의 형태가 PVSF항에 의한 유선함수 경향장의 형태와 매우 유사한 것과 다른 현상이다. 이와 같이 적분 초기에 저기압성 흐름에 의한 사이어의 형태가 PVSF항에 의한 유선함수 경향장의 형태와 다르게 나타나는 것은 소용돌이의 흐름이 저기압성에서 고기압성 흐름으로 바뀌는 경계면에서 각 흐름간에 어떠한 상호작용이 존재함을 시사한다. 한편 고기압성 흐름은 상대 소용돌이도가 감소하는 방향으로, 저기압성 흐름은 상대 소용돌이도가 증가하는 방향으로 이동하므로 외부에 고기압성 흐름을 포함한 경우에도 PVSF항은 소용돌이가 서쪽으로 이동하는 데 기여함을 알 수 있다. 외부의 고기압성 흐름에 의한 유선함수 경향장은 시간이 지나면서 소멸하고 적분 중기 이후에는 저기압성 소용돌이에 의한 유선함수 경향장만 남는다. PVAF항에 의한 유선함수 경향장(Fig. 12)은 비대칭 순환이 복잡하게 진화함에 따라 적분 후기에 그 형태가 복잡하게 나타난다. 초기 RAM이 0보다 큰 경우와 달리 적분 초기에 음의 유선함수 경향이 넓은 지역에 분포한다. 96시간 이후에는 소용돌이 중심 부근에 양의 유선함수 경향장이 나타난다. 이는 이 항이 적분 초기에는 외부의 고기압성 흐름의 강도가 약화되는 데 영향을 주고 고기압성 흐름이 약화된 이후에는 저기압성 흐름의 강도가 약화되는 데 영향을 줌을 나타낸다.

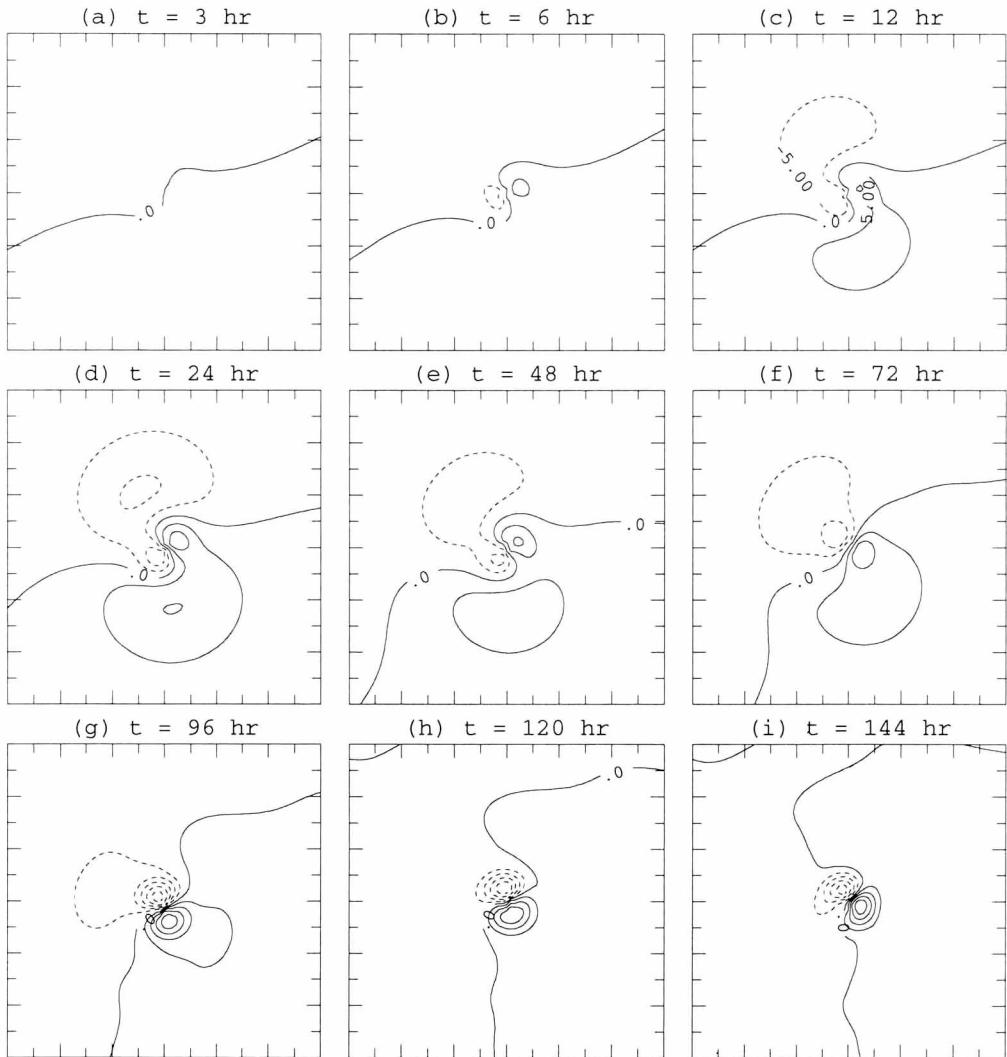


Fig. 9. Contribution to the total streamfunction tendency field due to SVAF at indicated times in the case of $V_a = -4.83 \text{ ms}^{-1}$. The contour interval is $5 \text{ m}^2 \text{s}^{-2}$.

4. 요약 및 결론

비발산 순압 모형을 이용하여 베타 평면에서 초기 소용돌이의 전체 상대 각 운동량에 따른 소용돌이의 이동 특성을 조사하였다. 소용돌이는 각 시각에서 면적분된 접선 속도가 0보다 클 때 북서진하고 0보다 작지만 상대적으로 0에 가까울 때는 서진후 북서진하며 0보다 작을 때는 남서진한다. 소용돌이에 작용하는 로스비 파 분산에 의한 외부 흐름의 약화로 초기 소용돌이의 RAM이 0보다 큰 경우는 시간이 지남에 따라 RAM이 감소하고 반면에 초기 소용돌이의 RAM이 0

보다 작은 경우는 시간이 지남에 따라 RAM이 증가한다. 비대칭 순환의 강도와 형태는 초기 소용돌이의 외부 흐름의 구조 및 크기에 따라 달라지며 중심 부근의 비대칭 순환의 강도와 형태는 소용돌이의 이동 속도와 방향을 결정짓는다. 초기 소용돌이의 RAM이 0보다 큰 경우 RAM이 클수록 로스비 파 분산의 강도가 크고 로스비 파 분산에 대한 소용돌이의 적응 과정이 활발하게 일어나므로써 비대칭 순환이 넓은 지역에 걸쳐 강하게 발달한다. 초기 소용돌이의 RAM이 0보다 작은 경우 초기에는 외부의 고기압성 흐름에 의해 발달한 비대칭 순환의 영향으로 소용돌이가 남서진한다.

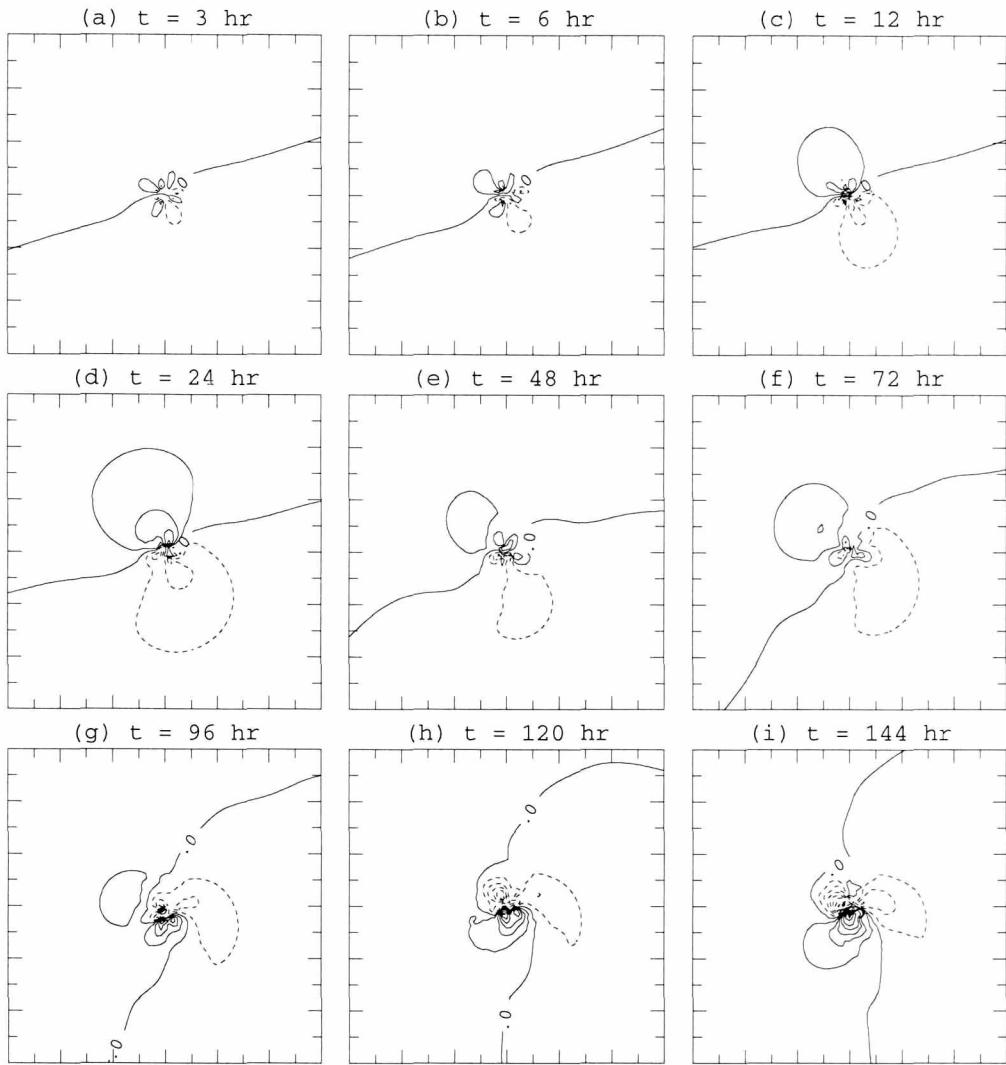


Fig. 10. The same as in Fig. 9 except for AVSF. The contour interval is $5 \text{ m}^2 \text{s}^{-2}$.

하지만 적분 중·후기에 소용돌이는 북서진하고 소용돌이의 비대칭 순환의 시간 변화 양상이 초기 RAM이 0보다 큰 저기압성 소용돌이의 경우와 비슷해진다. 이 때 외부의 강한 고기압성 흐름은 내부 사이어를 시계 방향으로 회전시켜 소용돌이가 북서로 전향하는 데 기여한다. 또한 고기압성 흐름이 소멸되면서 고기압성 흐름에서 저기압성 흐름으로 에너지가 전달되어 소용돌이 중심 부근에서 소용돌이의 저기압성 강도가 증가 한다. 소용돌이의 이동에 대한 유선함수 경향 방정식에 포함된 각 항들의 역할은 초기 소용돌이의 RAM의 부호에 관계 없이 동일하다.

본 연구에서 살펴본 바와 같이 소용돌이의 이동은

소용돌이의 초기 RAM에 따라 다르게 나타난다. 하지만 주어진 초기 RAM에 상응하는 초기 소용돌이의 구조는 무한히 존재하고 소용돌이의 이동은 소용돌이의 구조에 민감할 수 있으므로 초기 소용돌이의 RAM값으로만 소용돌이의 이동 특성을 미리 예측할 수 없다. 예로서 Li와 Wang(1994)의 수치 실험에서 초기 RAM이 0인 소용돌이의 이동 경로는 고리 모양을 나타내지만 본 실험에서는 준 정상 상태의 이동을 나타낸다. 결국 초기 소용돌이의 RAM을 변화시킨 수치 실험에서 초기 RAM에 따른 다양한 이동 특성은 소용돌이의 외부 구조의 변화에 따른 각각 다른 비대칭 순환의 시간 변화로부터 기인된 것이다. 즉, 초기 RAM

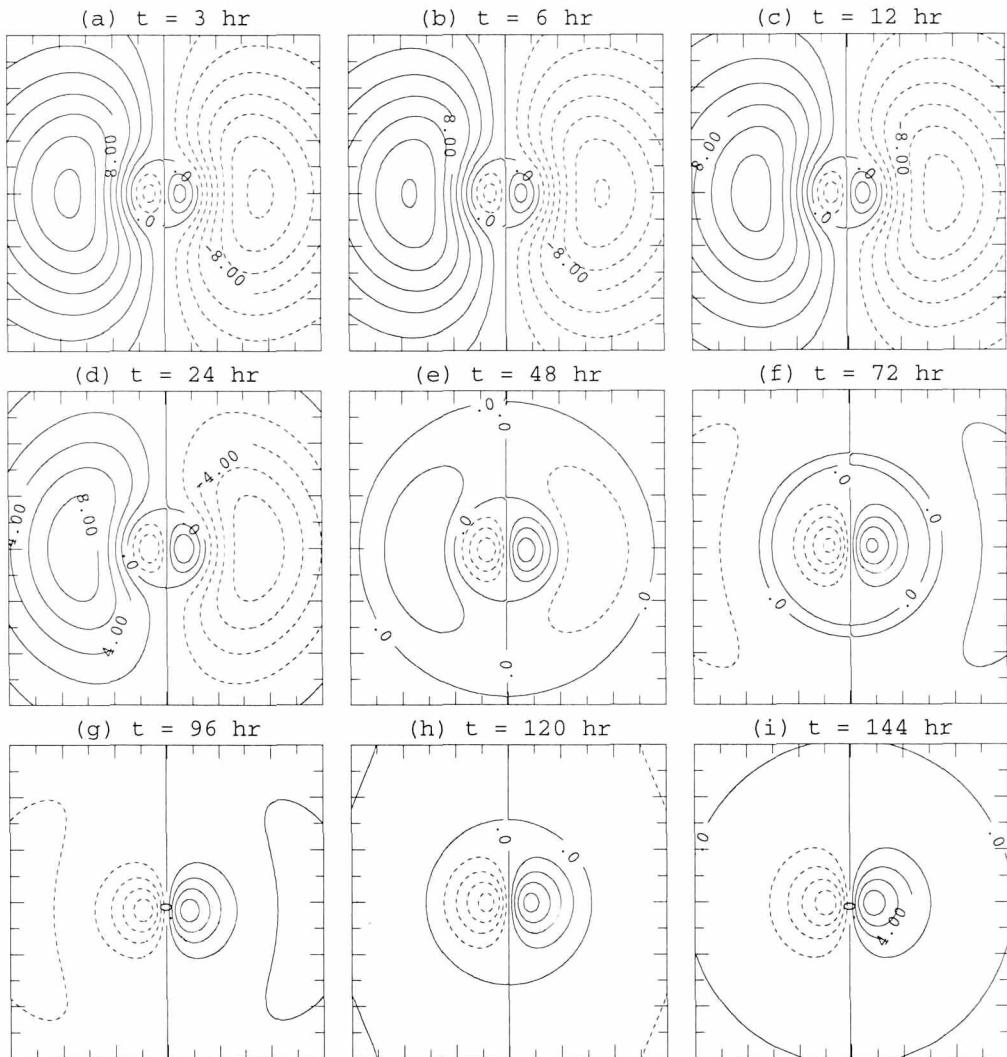


Fig. 11. The same as in Fig. 9 except for PVSF. The contour interval is $2 \text{ m}^2 \text{s}^{-2}$.

의 변화에 따라 초기에 선형 효과에 의해 발생하는 비대칭 순환의 강도와 형태가 달라지고 선형 항의 크기에 따라 각기 다르게 생성된 비선형 항에 의해 비대칭 순환이 다른 시간 변화를 겪으므로써 소용돌이가 다양한 이동 특성을 갖게 된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부에서 시행하는 중점국가연구개발사업의 하나인 자연재해방재기술개발사업으로 수행된 것입니다.

참고문헌

- 백종수, 백종진, 1999a: 순압 태풍 운동에서의 대칭 및 비대칭 순환의 역할, *한국기상학회지*, **35**(1), 1-19.
 백종수, 백종진, 1999b: 초기 소용돌이 구조, 대칭 및 비대칭 순환, 그리고 순압 태풍 운동, *한국기상학회지*, **35**(2), 201-214.
 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**, 1257-1265.
 DeMaria, M., 1985: Tropical cyclone motion in a nondivergent barotropic model. *Mon. Wea. Rev.*, **113**, 1199-1210.
 ———, 1987: Tropical cyclone track prediction with a barotropic spectral model. *Mon. Wea. Rev.*, **115**, 2346-2357.

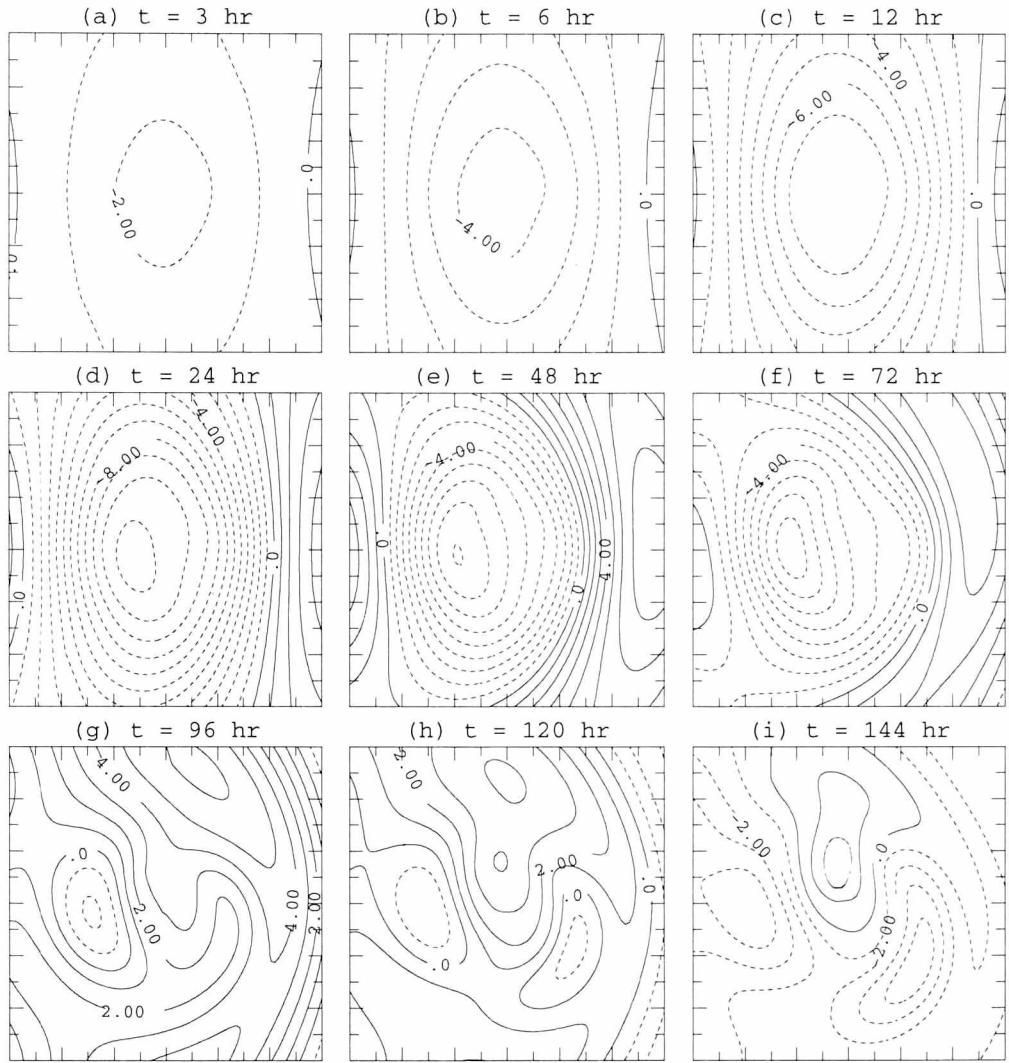


Fig. 12. The same as in Fig. 9 except for PVAF. The contour interval is $1 \text{ m}^2 \text{s}^{-2}$.

- _____, and J.-J. Baik, 1987: The effect of the vortex structure on barotropic hurricane track forecasts. *17th Conf. on Hurricanes and Tropical Meteorology*, Miami, FL, Amer. Meteor. Soc., 52-54.
- Fiorino, M., and R. L. Elsberry, 1989: Some aspects of vortex structure related to tropical cyclone motion. *J. Atmos. Sci.*, **46**, 975-990.
- Li, X., and B. Wang, 1994: Barotropic dynamics of the beta gyres and beta drift. *J. Atmos. Sci.*, **51**, 746-756.
- Rossby, C. G., 1948: On displacements and intensity changes of atmospheric vortices. *J. Mar. Res.*, **7**, 175-187.
- Shapiro, L. J., and K. V. Ooyama, 1990: Barotropic vortex evolution on a beta plane. *J. Atmos. Sci.*, **47**, 170-187.
- Willoughby, H. E., 1988: Linear motion of a shallow-water, barotropic vortex. *J. Atmos. Sci.*, **45**, 1906-1928.