

초기 소용돌이 구조, 대칭 및 비대칭 순환, 그리고 순압 태풍 운동

백종수 · 백종진

광주과학기술원 환경공학과
(1999년 2월 12일 접수)

Initial Vortex Structure, Symmetric and Asymmetric Circulations, and 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 12 February 1999)

Abstract

Effects of initial vortex structure on barotropic tropical cyclone motion are numerically investigated in the context of nondivergent barotropic model. Similar to previous studies, it is shown that vortex motion is sensitive to the initial vortex size but is little influenced by the initial vortex intensity. Different motion characteristic of each vortex is directly related to the intensity and pattern of the asymmetric circulation that depends on the initial vortex structure. Asymmetric circulation develops mainly by extracting kinetic energy from the symmetric circulation of the vortex through beta conversion, so the intensity of the asymmetric circulation is proportional to the magnitude of linear term. As the vortex size increases (decreases), the size and intensity of the asymmetric circulation increase (decrease), causing the vortex to move more (less) rapidly. Moreover, the beta gyres near the vortex center rotates more (less) counterclockwise by the stronger (weaker) vortex outflow, causing the vortex to move more toward west (north). However, the intensity and pattern of the asymmetric circulation little vary as the vortex intensity changes. The change rate of the beta conversion term with the intensity change is small and the inner flow cannot make the asymmetric circulation rotate counterclockwise much. Hence, there is little difference in the speed and direction of the vortex motion even if the vortex intensity changes. Analysis of streamfunction tendency equation shows that larger linear term results in larger nonlinear term. That is, as the planetary vorticity advection by the symmetric flow, which induces initial asymmetric circulation, increases, the symmetric vorticity advection by the asymmetric flow and the asymmetric vorticity advection by the symmetric flow increase. However, the increase of the planetary vorticity advection by the asymmetric flow weakens the cyclonic intensity of the symmetric flow and deforms vortex symmetry.

1. 서 론

베타 평면에서 기본류가 없는 경우 저기압성 소용돌이는 자체 소용돌이장과 행성 소용돌이도장과의 상호 작용을 통해 일정 속도로 북서진 한다(베타 표류 현상). 한편 소용돌이는 그 초기 구조에 따라 준 정상 상태에서 진동에 이르기까지 다양한 이동 경로를 나타낸다. 따라서 많은 학자들이 소용돌이의 이동 역학과 더불어 소용돌이의 초기 구조가 소용돌이의 이동에 미치는 영향을 연구해왔다(e.g., Li와 Wang, 1994).

기본류가 존재하는 경우 소용돌이는 기본류 및 행성 소용돌이도장과의 상호작용을 통해 이동한다. Holland(1983)는 발산 순압 소용돌이도 방정식을 이용한 분석적인 연구에서 기본류가 존재하는 경우 소용돌이의 크기가 소용돌이의 이동에 미치는 영향에 대해 조사하였다. 그는 소용돌이와 기본류 간의 상호작용을 최대화시켜 소용돌이의 운동을 지배하는 유효 반경을

정의하고 이 반경은 소용돌이의 바람장 분포에 따라 달라진다고 언급함으로써 소용돌이 운동이 그 구조와 밀접하게 연관되어 있음을 제시하였다. DeMaria (1985)는 비발산 순압 스펙트랄 모형을 이용하여 기본류가 존재하는 경우 소용돌이의 이동에 대해 조사하였다. 그는 소용돌이의 운동은 소용돌이의 크기(size)에 민감하며 기본류의 절대 소용돌이도의 경도가 큰 곳에서 더욱 민감함을 보였다. 한편 Chan과 Williams (1987)는 소용돌이 운동에 대한 베타 효과를 독립적으로 조사하기 위해 기본류가 없는 경우에 비발산 순압 대기에서의 소용돌이의 이동 역학을 조사하였다. 그들은 베타 표류는 선형 항과 비선형 항의 상호작용을 통해 일어남을 보였고 또한 소용돌이의 최대 풍속과 최대 풍속 반경이 증가하면 소용돌이 이동 속도가 증가함을 보였다. Fiorino와 Elsberry(1987, 1989a)는 소용돌이 운동에 대한 비대칭 순환의 중요성을 밝히고 소용돌이의 이동은 소용돌이의 내부 강도의 변화보다

크기 변화에 더욱 민감함을 밝혔다. Fiorino와 Elsberry(1989b)는 푸리에 분해를 통해 소용돌이 접선 속도를 소 규모, 중간 규모, 큰 규모의 세 개의 성분으로 분해하고 각각의 성분들이 소용돌이의 이동에 미치는 영향에 대해 조사하였다. 그들은 소용돌이 구조의 대부분을 차지하는 큰 규모 성분은 큰 에너지를 가지고 소용돌이의 이동 속도를 결정지으며, 중간 규모와 소 규모 성분은 작은 에너지를 가지지만 큰 규모 성분에 의해 형성된 비대칭 순환을 회전시키므로써 소용돌이의 이동 방향에 영향을 준다고 하였다. 이러한 설명은 장파에 더 많이 작용하는 선형 베타 효과와 연관하여 소용돌이의 이동에 대한 외부 바람 구조의 중요성을 강조하고 있다.

위에서 언급된 연구들은 주로 소용돌이의 이동 속도와 경로에만 근거하여 소용돌이의 구조와 이동간의 관계를 설명하였다. 하지만 소용돌이의 초기 구조에 따라 이동 속도와 경로가 달라지는 현상을 초래하는 역학적 과정에 대해 충분히 설명하지는 못하였다. 따라서 본 연구에서는 백종수와 백종진(1999)의 분석 방법을 사용하여 초기 구조에 따른 소용돌이의 이동 특성에 대해 면밀히 조사하고자 한다. 즉, 소용돌이의 초기 구조에 따른 이동 특성을 각 구조에 대한 베타 자이어의 강도와 형태 및 그 시간 변화와 연관시켜 설명할 것이다. 그리고 비대칭 순환에 대한 에너지 방정식을 분석하여 소용돌이의 초기 구조에 따라 베타 자이어의 형태 및 강도와 대칭 및 비대칭 흐름의 시간 변화가 달라지는 원인에 대해 설명할 것이다. 또한 유선 함수 경향 분석을 통해 소용돌이의 초기 구조에 따른 순압 소용돌이도 방정식에 포함된 각 항들에 의한 유선함수 경향장의 특성 및 시간 변화를 조사할 것이다. 이 조사를 통해 소용돌이의 초기 구조에 따라 소용돌이 이동에 미치는 각 항들의 영향이 어떻게 달라지는 가를 밝히고 초기 구조에 따라 변화된 각 항들 간의 상호작용에 의해 소용돌이의 이동 특성이 달라지는 과정을 설명할 것이다.

2. 수치 모형 및 분석 방법

베타 평면에서의 비발산 순압 소용돌이도 방정식을 공간에 대해서는 4차 정확도를 가지는 유한 차분법을, 시간에 대해서는 2차의 정확도를 가지는 Adams-Bashforth 차분법을 사용하여 수치적으로 풀었다.

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

여기서 ζ 는 상대 소용돌이도의 연직 성분이며 u 는 동서 속도 성분, v 는 남북 속도 성분, β 는 코리올리 인자의 남북 경도로서 20°N 에서의 값을 사용하였다. 수치 적분 영역은 동·서, 남·북 방향으로 각각 12000 km로 하였으며 동·서, 남·북 방향으로 주기적 경계 조건을 사용하였다. 상대 소용돌이도에 대한 공간 평활은 실행하지 않았으며 격자 간격을 40 km, 시간 간격을 150초로 하여 모형을 144시간 동안 수치 적분하였다. 초기 소용돌이의 구조는 축 대칭 구조로 설정하였고 소용돌이의 크기와 강도 변화에 따른 이동 특성을 조사하기 위해 아래의 접선 속도 분포식에서 V_m 과 b 값을 변화시켜 구한 세 가지 접선 속도 분포를 이용하였다(Fig. 1).

$$V(r) = V_m \left(\frac{r}{r_m} \right) \exp \left\{ \frac{1}{b} \left[1 - \left(\frac{r}{r_m} \right)^b \right] \right\}. \quad (2)$$

여기서 $V(r)$ 은 소용돌이 중심으로부터 반경 r 떨어진 거리에서의 접선 속도, V_m 은 최대 풍속, r_m 은 최대 풍속이 나타나는 반경이며 b 는 r_m 외부 지역에서의 접선 속도의 형태를 결정하는 인자이다. 모든 경우 최대 풍속 반경 r_m 은 120 km이고 $r = 300$ km에서 V 가 15 ms^{-1} 가 되도록 설정하였다. 접선 속도 분포 I은 V_m 이 40 ms^{-1} ($b = 1.434$)이고 II는 규준 실험에 사용된 접선 속도 분포로서 V_m 이 30 ms^{-1} ($b = 1.132$)이며 III은 V_m 이 20 ms^{-1} ($b = 0.571$)이다. 한편 소용돌

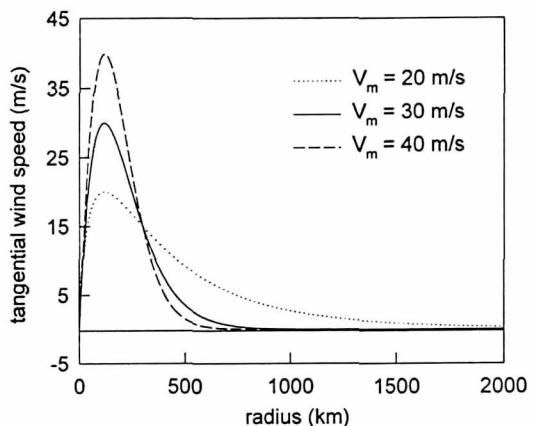


Fig. 1. The tangential wind profiles of three vortices with intensities of 20 ms^{-1} , 30 ms^{-1} , and 40 ms^{-1} and a size radius of 300 km.

이의 크기는 반경 300 km 외부 지역에서의 소용돌이 흐름의 세기를 의미하며 강도는 소용돌이의 최대 풍속을 의미한다.

소용돌이의 초기 구조에 따른 이동 특성과 대칭 및 비대칭 순환과의 관계를 규명하기 위해 소용돌이의 전체 흐름을 대칭 성분과 비대칭 성분으로 분해하였다. 대칭 및 비대칭 순환은 유선함수장을 이용하여 구했으며 그 계산 방법은 백종수와 백종진(1999)의 방법을 이용하였다. 한편 소용돌이 초기 구조에 따른 비대칭 순환의 발달 특성을 이해하기 위해 대칭 및 비대칭 운동 에너지의 시간 변화를 조사하고 비대칭 순환에 대한 운동 에너지 방정식을 분석하였다. 대칭 및 비대칭 운동 에너지와 비대칭 운동 에너지 방정식(Li와 Wang, 1994)은 아래와 같이 정의되며 식에서의 괄호는 원통 좌표계에서의 면적분을 나타낸다.

$$K_s = \left\{ \frac{\nabla \psi_s \cdot \nabla \psi_s}{2} \right\}, \quad K_a = \left\{ \frac{\nabla \psi_a \cdot \nabla \psi_a}{2} \right\}. \quad (3)$$

$$\frac{\partial K_a}{\partial t} = -\{(V \cdot \nabla V_s) \cdot V_a\} + \{\beta r \cos \lambda k \\ \cdot (\nabla \psi_a \times \nabla \psi_s)\} + F_a. \quad (4)$$

위 식에서 ψ_s 와 ψ_a 는 대칭 유선함수와 비대칭 유선함수이고 V , V_s , V_a 는 각각 전체 흐름의 속도 벡터, 대칭 흐름의 속도 벡터, 비대칭 흐름의 속도 벡터이며 k 는 연직 방향의 단위 벡터, λ 는 북에서부터 반시계 방향으로 측정된 방위각이다. 식 (4)의 우변 첫 번째 항(EC_1)은 비선형 항에 의한 대칭 순환에서 비대칭 순환으로의 에너지 전환 항이며 두 번째 항(EC_2)은 베타 효과에 의한 에너지 전환 항이다. 세 번째 항인 F_a 는 면적분 영역 가장 자리에서의 반경 흐름에 의한 에너지 속이다. 초기 구조가 다른 각각의 소용돌이에 대해 식(3)과 (4)에 포함된 각 항들을 소용돌이 중심에서 반경 1200 km 까지 면적분하여 그 결과를 비교·분석하였다.

초기 소용돌이의 크기 및 강도 변화에 따라 순압 소용돌이도 방정식에 포함된 각 항들이 소용돌이의 이동에 미치는 영향이 어떻게 달라지는지를 밝히고 달라진 각 항들의 상호작용이 소용돌이의 이동에 미치는 영향을 조사하기 위해 유선함수 경향 방정식을 분석하였다.

$$\frac{\partial \psi_t}{\partial t} \approx \nabla^{-2} \{-J(\psi_a, \nabla^2 \psi_s)\} + \nabla^{-2} \{-J(\psi_s, \nabla^2 \psi_a)\}$$

TT

SVAF

AVSF

$$+ \nabla^{-2} \{(-\beta v_s)\} + \nabla^{-2} \{(-\beta v_a)\}. \quad (5)$$

여기서 ψ_t 는 총 유선함수, ∇^2 는 역 라플라시안 연산자이고 J 는 자코비안을 나타낸다. 위 식에서 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 나타낸다. 한편 비발산 순압 소용돌이도 방정식[식 (1)]에 포함된 상대 소용돌이도 이류 항을 비선형 항으로 행성 소용돌이도 이류 항을 선형 항으로 부른다.

3. 결과 및 논의

3. 1 소용돌이의 크기를 변화시킨 경우

초기 소용돌이의 크기 변화에 따른 이동 특성을 조사하기 위해 소용돌이의 반경 300 km 내부 지역은 규준 실험에서 사용한 접선 속도 분포(Ⅱ)로 고정시키고 외부 지역은 각각 접선 속도 분포 Ⅰ과 Ⅲ를 사용하여(Fig. 2) 식 (1)을 수치 적분했다. Ⅰ을 사용한 경우(a경우)는 규준 실험 보다 소용돌이의 크기가 감소된 경우이고, Ⅲ을 사용한 경우(b경우)는 증가된 경우이다.

Fig. 3은 초기 소용돌이의 크기를 변화시킨 경우에

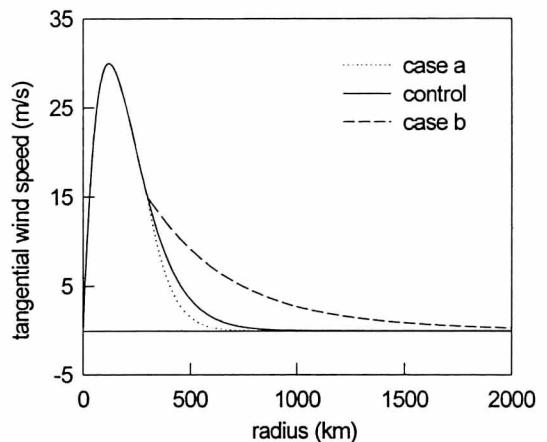


Fig. 2. The tangential wind profiles with an identical inner profile and maximum wind speeds of 40 ms^{-1} (case a), 30 ms^{-1} (control experiment), and 20 ms^{-1} (case b).

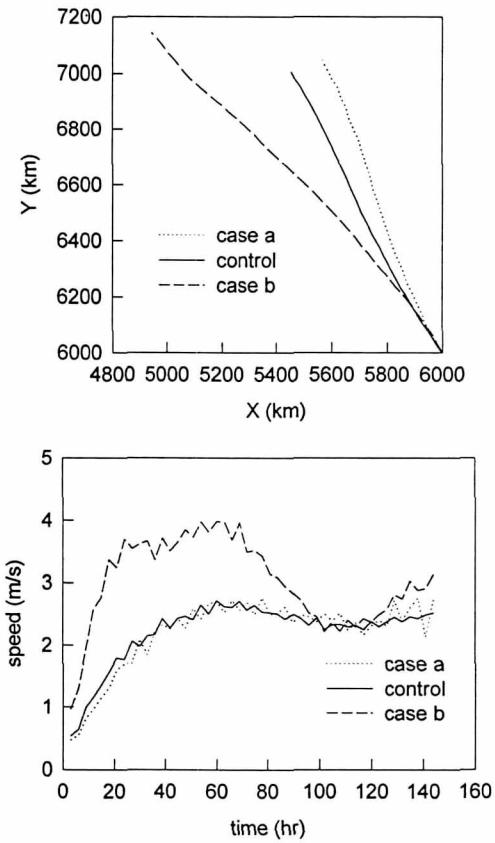


Fig. 3. The tracks (upper panel) and speeds (lower panel) of vortices during 144 hours for cases a, b, and control experiment.

144시간 동안의 소용돌이의 이동 경로와 속도이다. 그림에 나타난 소용돌이 이동 경로를 보면 소용돌이의 크기 변화가 소용돌이의 이동에 미치는 영향이 매우 큼을 알 수 있다. a경우는 소용돌이가 규준 실험 보다 좀 더 북쪽으로 이동했으며 b경우에는 좀 더 서쪽으로 이동했다. 소용돌이의 이동 속도를 살펴보면 a경우는 적분 초기에는 규준 실험보다 약간 느리게 나타났으며 적분 중기에는 규준 실험과 비슷하게 되어 적분 후기에는 시간에 따른 약간의 변동이 있다. b경우 적분 초기부터 72시간까지는 다른 경우보다 속도가 훨씬 빠르다. 하지만 72시간 이후부터 이동 속도가 빠르게 감소하여 96시간에서 120시간까지는 규준 실험과 비슷해지며 120시간 이후부터는 다시 서서히 증가한다.

그러면 초기 구조가 다른 각각의 소용돌이에 의한 베타 자이어의 시간 변화가 소용돌이의 이동과 어떻게 연관되어 있는지를 살펴보자(Fig. 4). 비대칭 순환은 주로 베타 효과에 의한 대칭 순환에서 비대칭 순환으

로의 에너지 전달 과정을 통해 발달한다. 따라서 선형 항의 크기가 증가하면 비대칭 순환의 강도도 증가하며 그 강도와 형태는 소용돌이의 이동과 직접적으로 연관되어 있다. 즉, 비대칭 순환의 강도가 증가할수록 소용돌이의 이동 속도가 증가하며 중심 부근의 비대칭 순환의 형태는 소용돌이의 이동 방향을 결정짓는다(백종수와 백종진, 1999). 초기에 비대칭 순환을 발달시키는 선형 항의 크기는 장파에 더 많이 작용하는 Rossby 파 분산의 강도에 비례하므로 소용돌이 외부 흐름의 세기가 증가하면 선형 항의 크기가 증가한다.

소용돌이의 크기가 규준 실험보다 축소된 a경우 외부 반경 흐름의 약화로 선형 효과가 감소되어 적분 초기에 비대칭 순환(Fig. 4a)은 규준 실험보다 좁은 지역에 약한 강도로 분포하고 있다. 하지만 규준 실험과 그다지 큰 차이를 보이지 않으며 시간이 지나면서 그 강도와 크기가 규준 실험과 비슷해진다. 따라서 a경우에 소용돌이의 이동 속도는 규준 실험과 유사하게 나타난다. 비대칭 흐름을 회전시키는 대칭 소용돌이의 흐름의 세기가 규준 실험보다 감소하였으므로 대칭 순환에 의한 비대칭 순환의 반시계 방향 회전율이 작게 나타났다. 그 결과 중심 부근의 비대칭 자이어가 규준 실험(Fig. 4b)보다 좀 더 북쪽을 향하게 되어 소용돌이를 이동시키는 중심 부근의 비대칭 흐름($u_a = -\partial\psi_a/\partial y$, $v_a = \partial\psi_a/\partial x$)을 평균한 흐름인 통풍류도 규준 실험보다 좀 더 북쪽을 향한다. 비대칭 운동 에너지 방정식의 분석 결과를 보면(Table 1) 외부 흐름의 약화로 K_s (대칭 운동 에너지)는 다른 경우보다 작게 나타난다. EC_2 와 K_d (비대칭 운동 에너지)의 크기 및 시간에 따른 증가율은 규준 실험의 경우와 큰 차이가 나지 않으므로써 이 경우에 비대칭 순환의 크기 및 강도가 규준 실험과 유사하게 나타나는 현상과 일치한다. a경우는 규준 실험보다 소용돌이의 크기가 조금 감소한 경우로서 소용돌이의 이동 속도를 증가시킬 만한 베타 항의 현저한 증가는 나타나지 않았다. 하지만 소용돌이의 이동 방향은 규준 실험과 큰 차이를 보이므로써 비대칭 순환이 회전하는 데 반경 300-800 km에 존재하는 대칭 소용돌이의 흐름이 많은 영향을 줌을 알 수 있다.

b경우는 외부 흐름의 강도가 증가하여 Fiorino와 Elsberry(1989b)가 정의한 소용돌이를 구성하는 성분 중에 큰 규모 성분의 구성비가 증가한 경우이다. 큰 규모 성분의 증가로 소용돌이에 대한 Rossby 파 분산이 증가하고 이 Rossby 파 분산의 강도에 비례하

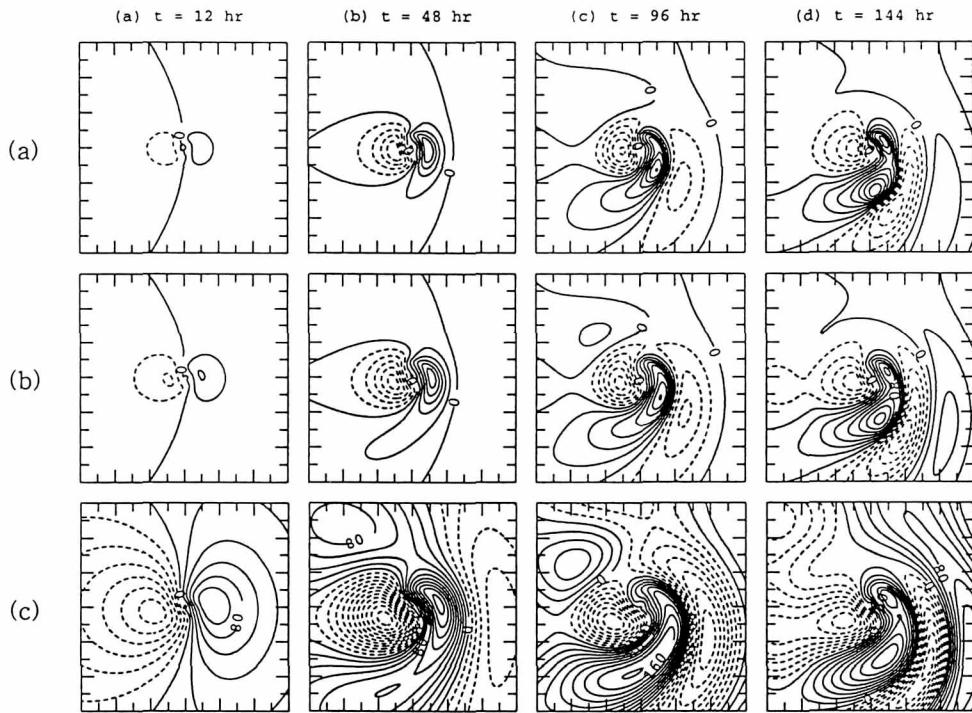


Fig. 4. The evolution of the asymmetric streamfunction for (a) case a, (b) control experiment, and (c) case b. The plotting domain size is $6000 \text{ km} \times 6000 \text{ km}$ centered on the grid point nearest the calculated vortex center at the indicated time. The actual contour interval is $2 \times 10^5 \text{ m}^2 \text{s}^{-1}$.

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 (3) and (4) for case a, control experiment, and case b.

time	case	K_s	K_a	EC_1	EC_2
12 hr	case a	753.87	3.57	2.91	8.83
	control	781.74	3.44	-1.12	13.33
	case b	899.31	15.35	-1.59	66.19
48 hr	case a	775.36	19.78	-2.48	19.57
	control	788.10	20.03	-2.33	26.22
	case b	825.48	41.83	-2.78	66.76
96 hr	case a	698.76	23.15	-3.01	21.30
	control	783.02	24.84	-2.65	21.99
	case b	722.93	26.89	-2.48	26.36

는 선형 효과의 크기가 증가하여 비대칭 순환이 a경우와 규준 실험보다 훨씬 강한 강도로 넓은 지역에 분포하고 있다(Fig. 4c). 또한 다른 두 경우 보다 강한 대칭 소용돌이의 외부 흐름에 의해 중심 부근의 비대칭

자이어는 반시계 방향으로 빠른 속도로 회전하여 다른 경우보다 더 서쪽을 향하고 있다. 따라서 통풍류의 속도는 증가하고 방향은 더 서쪽을 향한다. 한편 소용돌이 중심 동쪽에 발생하는 고기압성 자이어는 다른 경우에 비해 이른 시간에 발생하며 그 크기 및 강도가 훨씬 크다. 소용돌이에 작용하는 선형 효과의 증가로 소용돌이의 변형이 증가하여 고기압성 자이어는 다른 경우보다 시계 방향으로 더 많이 회전한다.

b경우 적분 초기에서 중기까지는 증가한 베타 항에 의해 대칭 순환에서 비대칭 순환의 에너지 전달이 활발히 일어나 EC_2 항이 다른 경우보다 크게 나타난다. 그 결과 시간이 지남에 따라 대칭 운동 에너지는 다른 경우보다 빠른 속도로 감소되며 이와 상응하여 비대칭 운동 에너지가 빠른 속도로 증가한다(Table 1). 하지만 소용돌이의 이동 속도가 다른 경우와 비슷해지는 96시간 이후에는 EC_2 항의 크기도 다른 경우와 비슷해진다. 방위 평균된 접선 속도의 시간 변화(Fig. 5)는 이러한 결과들을 잘 입증해주는 데, 대칭 소용돌이의 저기압성 강도는 빠르게 감소하고 강한 고기압성 베타 자이어의 영향으로 다른 경우 보다 더 큰 반경에

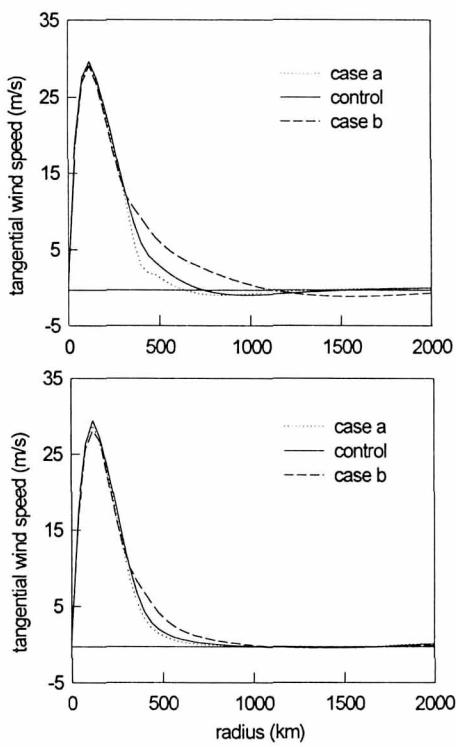


Fig. 5. The azimuthally-averaged tangential wind profiles for cases a, b, and control experiment at 72 hr (upper panel) and 144 hr (lower panel).

서 더 강한 고기압성 흐름이 형성된다.

다음으로 유선함수 경향 방정식의 분석 결과를 살펴보겠다. 설명에 앞서서 위에서 정의한 각 항들이 소용돌이의 이동에 미치는 영향에 대해 알아보자. SVAF항은 비대칭 흐름에 의해 대칭 소용돌이가 이류되는 과정을 나타내는 항으로서 소용돌이의 이동 속도와 직접적으로 관련되어 있으며 베타 평면에서 소용돌이가 북서쪽으로 이동하는 데 영향을 준다. AVSF항은 대칭 흐름에 의해 비대칭 순환이 반시계 방향으로 회전하는 과정을 포함하며 이러한 회전은 서쪽으로 향하는 베타 강제력을 약화시키므로써 소용돌이의 변형을 억제하는 역할을 한다. PVSF항은 초기에 베타 자이어가 형성되는 데 기여하고 소용돌이의 서진에 영향을 주며 PVAF항은 소용돌이의 저기압성 강도가 약화되고 형태가 변형되는 데 영향을 준다. PVSF항과 PVAF항의 합인 선형 항은 초기에 비선형 항을 형성시키고 다시 비선형 항의 영향을 받는다. 즉, 초기에 선형 항의 크기가 클수록 더 큰 비선형 항이 형성되며 소용돌이는 비선형 항과 선형 항의 상호작용을 통해

이동한다. 비선형 항은 비대칭 자이어의 빌달 및 유지에 영향을 주고 소용돌이 이동 속도와 방향에 많은 영향을 준다(백종수와 백종진, 1999).

a경우 각 항들에 의한 유선함수 경향장의 형태와 강도는 규준 실험과 큰 차이는 나지 않는다. SVAF항에 의한 유선함수 경향장(Fig. 6a)은 규준 실험의 경우(Fig. 6b) 보다 그 강도가 조금 더 약하며 쌍극자 형태의 경향장이 좀 더 북쪽을 향하므로써 이 항이 이 경우에 소용돌이가 규준 실험의 소용돌이보다 조금 더 느린 속도로 좀 더 북쪽으로 이동하는 데 영향을 주는 것을 알 수 있다. 일반적으로 AVSF항에 의한 유선함수 경향장은 적분 후기 보다 초기에 빠른 속도로 반시계 방향으로 회전하여 통풍류를 북서쪽으로 향하게 하는 역할을 한다. 이는 비대칭 순환이 초기에는 반시계 방향으로 계속해서 회전하지만 소용돌이의 이동이 준정상 상태에 도달하는 약 72시간부터는 더 이상 회전하지 않는 현상과 연관이 있다. a경우 이 항에 의한 유선함수 경향장(Fig. 7a)은 다른 경우보다 회전율이 작으며 그 결과 소용돌이의 이동 방향은 좀 더 북쪽을 향하게 된다. PVSF항에 의한 유선함수 경향장(Fig. 8a)은 적분 초기에 규준 실험의 경우(Fig. 8b)보다 좀 더 약한 강도로 좁은 지역에 분포하고 있으므로써 비대칭 순환은 규준 실험보다 좀 더 약한 강도로 분포하게 된다. PVAF항에 의한 유선함수 경향장(Fig. 9a)에서 양의 유선함수 경향장은 적분 초기에는 규준 실험의 경우(Fig. 9b)보다 조금 더 약한 강도로 분포하고 있지만 이동 속도가 규준 실험과 비슷해지는 적분 중기 이후에는 규준 실험의 경우와 비슷한 형태와 강도를 갖는다.

b경우 각 항들에 의한 유선함수 경향장은 a경우 및 규준 실험과 많은 차이를 보인다. SVAF항에 의한 유선함수 경향장(Fig. 6c)은 규준 실험 보다 훨씬 넓은 지역에 강한 강도로 분포하고 있으며 더 서쪽을 향한다. 한편 이 유선함수 경향장은 적분 초기에 반시계 방향으로 회전하여 소용돌이의 서향 성분을 증가시킨다. 하지만 96시간 이후에는 그 크기 및 강도가 규준 실험과 비슷해지며 이는 96시간 이후의 소용돌이의 이동 속도가 규준 실험과 비슷해지는 현상과 일치한다. AVSF항에 의한 유선함수 경향장(Fig. 7c)을 살펴보면 중심 부근에서 많은 비선형성이 나타난다. 초기에는 빠르게 반시계 방향으로 회전하여 소용돌이가 좀 더 서쪽으로 이동하는 데 영향을 주며 48시간 이후부터는 음의 유선함수 경향의 경도가 북서쪽으로 향하므

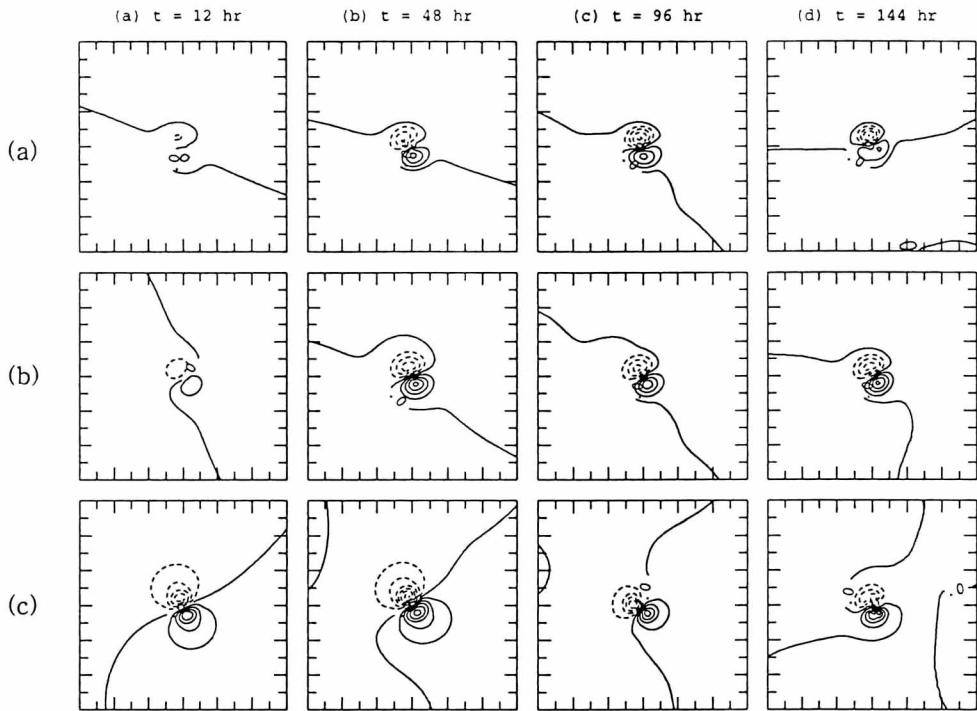


Fig. 6. Contribution to the total streamfunction tendency due to SVAF (symmetric vorticity advection by the asymmetric flow) for (a) case a, (b) control experiment, and (c) case b. The plotting domain size is $3200 \text{ km} \times 3200 \text{ km}$ centered on the grid point nearest the calculated vortex center at the indicated time. The contour interval is $10 \text{ m}^2 \text{s}^{-2}$. The same plotting domain size is used in Figs. 7-9 and Figs. 14-17.

로써 소용돌이가 좀 더 빨리 북서쪽으로 이동하는 데 영향을 준다. PVSF항에 의한 유선함수 경향장(Fig. 8c)은 적분 초기에(0-36시간) 그 강도가 a경우보다 약 2-3배 크며 다른 경우보다 더 넓은 지역에 분포하고 있다. 즉, 증가한 PVSF항은 소용돌이가 좀 더 서쪽으로 이동하는 데 영향을 주고 초기에 더 큰 비선형 항이 형성되는 데 영향을 주어 소용돌이가 더 빨리 북서쪽으로 이동하는 데 많은 영향을 준다. 시간이 지나면서 Rossby 과 분산에 의해 소용돌이의 저기압성 강도가 감소함에 따라 유선함수 경향장의 강도와 크기가 빠른 속도로 감소한다. PVAF항에 의한 유선함수 경향장(Fig. 9c)의 강도는 적분 초기(0-36시간)에 a경우 보다 약 4배 크게 나타나므로써 이 항에 의한 소용돌이의 변형이 크게 증가한 것을 보여준다. 특히 중심의 양의 유선함수 경향장은 넓은 지역에 강한 강도로 존재하므로 이 항이 소용돌이의 저기압성 강도가 빠른 속도로 감소되는 데 영향을 주는 것을 알 수 있다.

3.2 소용돌이의 강도를 변화시킨 경우

초기 소용돌이의 강도 변화에 따른 이동 특성을 조사하기 위해 300 km 외부 지역은 규준 실험에서 사용한 접선 속도 분포로 고정시키고 소용돌이의 내부 지역은 각각 접선 속도 분포 I과 III을 사용하여(Fig. 10) 식 (1)을 수치 적분했다. I을 사용한 경우(d경우)는 규준 실험 보다 소용돌이의 강도가 증가된 경우이고, III을 사용한 경우(c경우)는 감소된 경우이다.

Fig. 11은 내부 강도를 변화시킨 경우의 소용돌이의 이동 경로와 속도이다. 최대 풍속이 20 ms^{-1} 인 경우(c경우) 소용돌이의 이동 경로는 전체 적분 시간 동안 고리 모양 및 진동 형태를 나타낸다. Fiorino와 Elsberry(1987)는 진동 형태의 이동 경로는 비선형 이류 항의 수치 전단 오차의 영향으로 나타나며 내부 흐름이 강한 경우에는 큰 관성 안정도의 영향으로 비선형 경향이 전단 오차보다 커지므로써 이러한 현상이 나타나지 않는다고 하였다. 소용돌이 이동 속도의 경우 c경우는 이동 경로와 마찬가지로 이동 속도의 시간에 따른 변동이 심했다. 최대 풍속이 40 ms^{-1} 인 경우

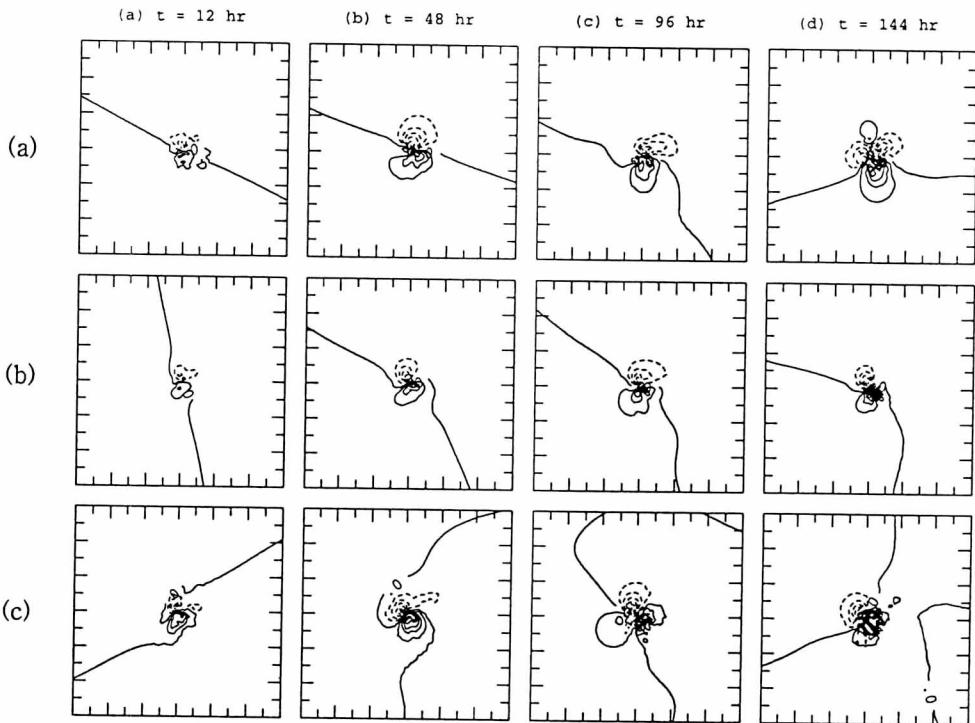


Fig. 7. The same as in Fig. 6 except for AVSF (asymmetric vorticity advection by the symmetric flow). The contour interval is $10 \text{ m}^2 \text{s}^{-2}$.

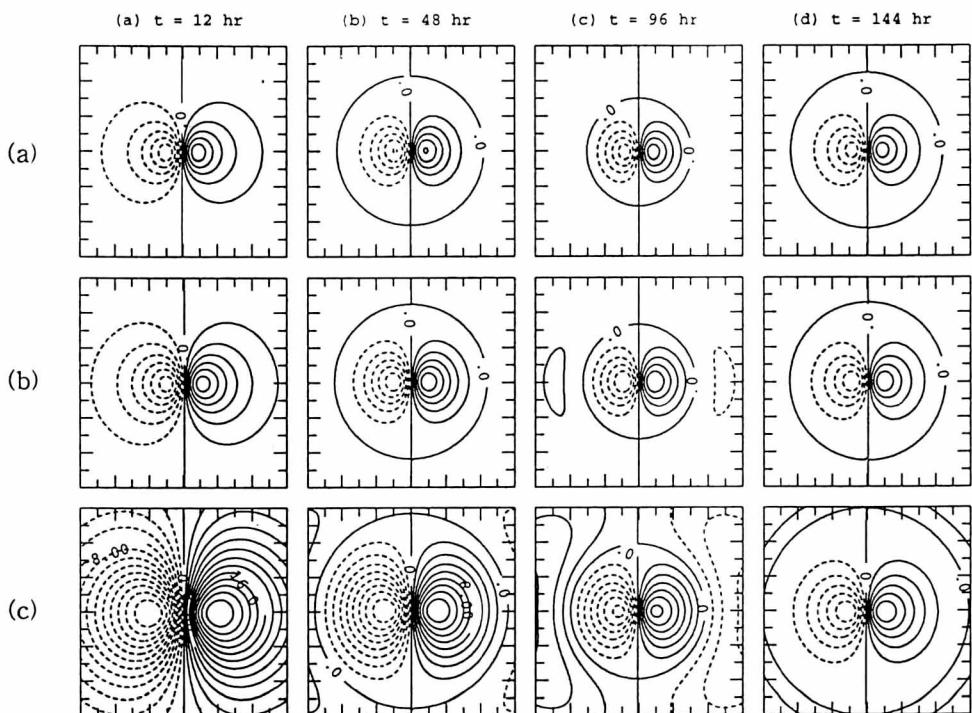


Fig. 8. The same as in Fig. 6 except for PVSF (planetary vorticity advection by the symmetric flow). The contour interval is $2 \text{ m}^2 \text{s}^{-2}$.

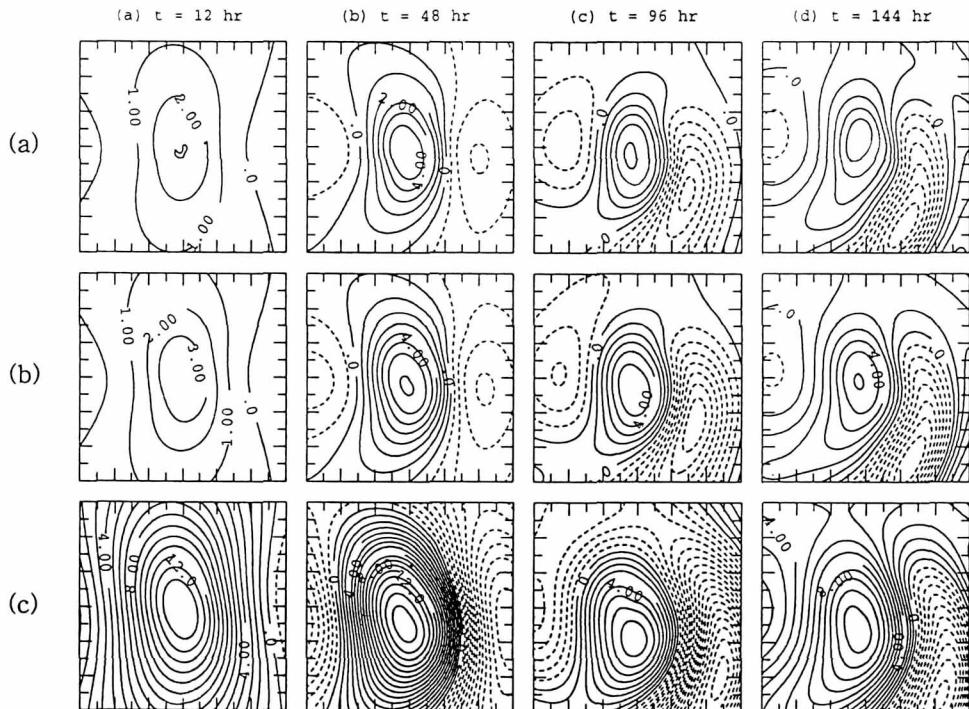


Fig. 9. The same as in Fig. 6 except for PVAF (planetary vorticity advection by the asymmetric flow). The contour interval is $1 \text{ m}^2 \text{s}^{-2}$.

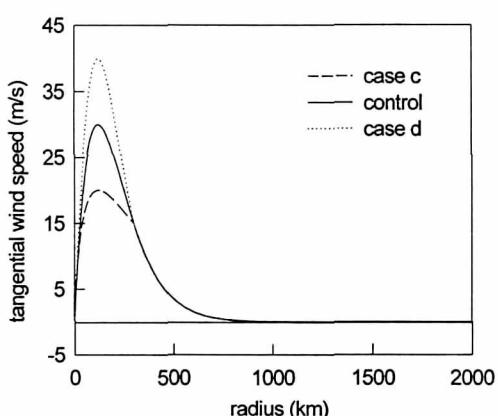


Fig. 10. The tangential wind profiles with an identical outer profile and maximum wind speeds of 20 ms^{-1} (case c), 30 ms^{-1} (control experiment), and 40 ms^{-1} (case d).

(d경우)는 규준 실험의 이동 경로와 큰 차이가 나지 않는다. 36시간까지는 규준 소용돌이의 이동 속도와 거의 비슷했으며 시간이 지나면서 규준 소용돌이 보다 빠르게 이동했다.

c경우 비대칭 순환(Fig. 12)은 적분 초기에 규준

실험과 d경우 보다 좁은 영역에 분포하고 있다. d경우는 이동 경로와 마찬가지로 비대칭 순환 형태 및 시간 변화(Fig. 12b)가 규준 실험과 유사하다. 대칭 흐름의 시간 변화(Fig. 13)도 규준 실험과 비슷하며 소용돌이 외부 반경의 고기압성 흐름의 강도도 규준 실험과 비슷하다. 단, 증가한 최대 풍속의 영향으로 선형 항의 크기가 증가하여 베타 자이어의 강도가 조금 더 증가했다. 그 결과 중심 부근의 통풍류의 속도가 증가하여 소용돌이의 이동 속도가 규준 실험보다 조금 더 빠르게 나타났다. EC_2 의 크기도 규준 실험보다 크게 나타나므로써 이러한 현상과 잘 일치한다(Table 2). 한편 증가한 내부 풍속의 영향으로 소용돌이 내부 지역의 각 바람의 수평 시어가 증가하여 EC_1 에 의한 비대칭 섭동 에너지의 약화 과정이 활발하게 일어나므로써 소용돌이의 대칭 운동 에너지 감소율이 다른 경우 보다 작게 나타났다(Table 2).

유선함수 경향 분석 결과 c경우는 SVAF항과 AVSF항에 의한 유선함수 경향장(Figs. 14a, 15a)의 형태가 다른 경우와 다르게 나타났다. 하지만 SVAF항에 의한 유선함수 경향장(Fig. 14a)중 음의 유선함수 경향장이 위치하는 곳은 항상 소용돌이의 이

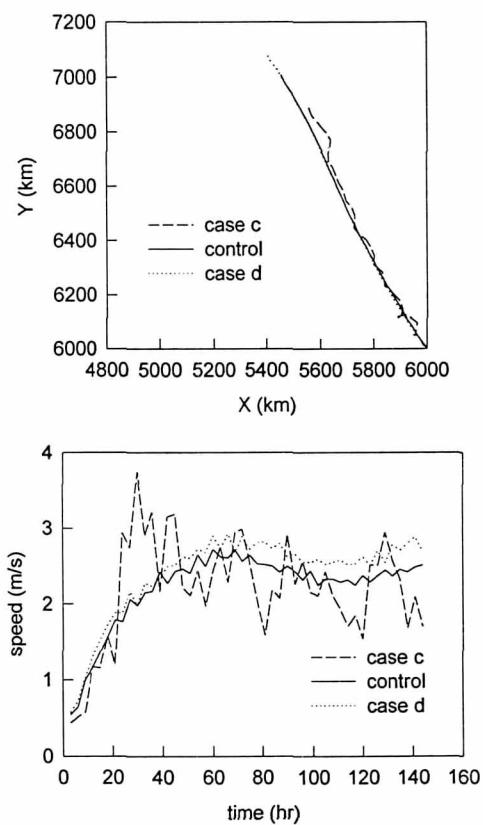


Fig. 11. The tracks (upper panel) and speeds (lower panel) of vortices during 144 hours for cases c, d, and control experiment.

동 방향과 잘 일치하여 이 경우에도 이 항은 소용돌이의 이동에 직접적으로 영향을 주는 것을 알 수 있었다. AVSF항에 의한 유선함수 경향장(Fig. 15a)은 중심 부근에 다른 경우보다 더 많은 복잡성이 나타났으며 다른 경우에서와 같이 유선함수 경향장이 회전하는 경향은 나타나지 않는다. 한편 PVSF항에 의한 유선함수 경향장(Fig. 16a)은 다른 경우와 비슷한 형태로 규준 실험 보다 약한 강도로 분포하고 있다. 이는 소용돌이 이동이 진동 현상을 나타내는 이 경우에도 이 항에 의한 베타 강제력은 항상 서쪽을 향하고 있음을 보여준다. PVAF항에 의한 유선함수 경향장도 다른 경우와 유사한 형태를 보이므로써 소용돌이가 진동하며 이동하는 현상은 비선형 항과 밀접하게 연관되어 있음을 알 수 있다. d경우 순압 소용돌이도 방정식에 포함된 각 항들에 의한 유선함수 경향장은 그 강도가 조금씩 증가하였을 뿐 규준 실험과 비슷한 형태를 나타낸다(Figs. 14b, 15b, 16b, 17b). 이 경우에 Fiorino와 Elsberry(1987)는 외부 반경의 풍속 분포에 의한 선형 효과는 고정되었으므로 더 빠른 소용돌이의 이동 속도는 비선형 효과 때문이라고 했다. 그러나 이 경우 선형 효과는 고정된 것이 아니며 적분 초기에 PVSF항과 PVAF항의 크기가 규준 실험 보다 크게 나타난다. 그 결과 초기에 선형 항에 의해 발생하는 비선형 항의 크기가 증가하므로써 소용돌이의 이동 속도가 규준 실험 보다 조금 더 빠르게 나타난다.

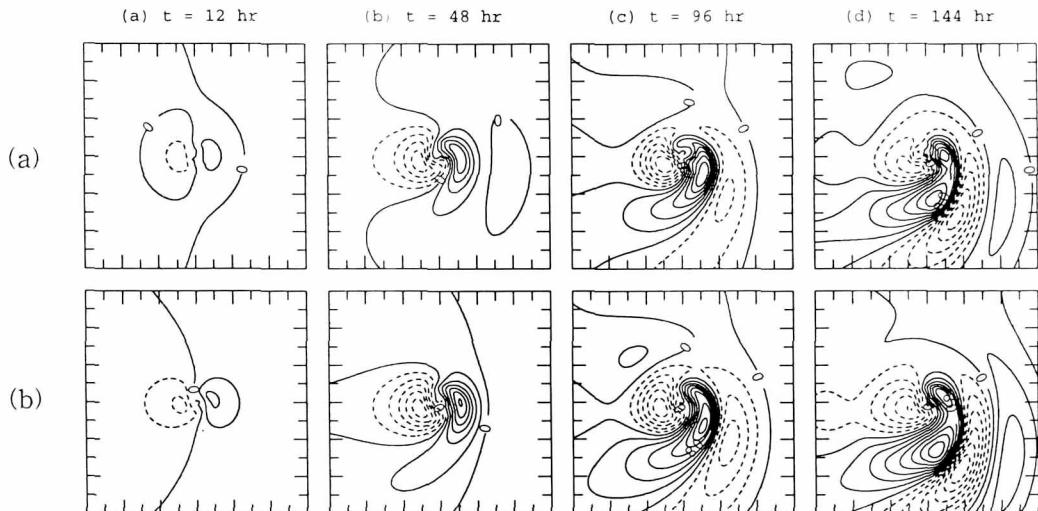


Fig. 12. The evolution of the asymmetric streamfunction for (a) case c and (b) case d. The plotting domain size and the contour interval are the same as in Fig. 4.

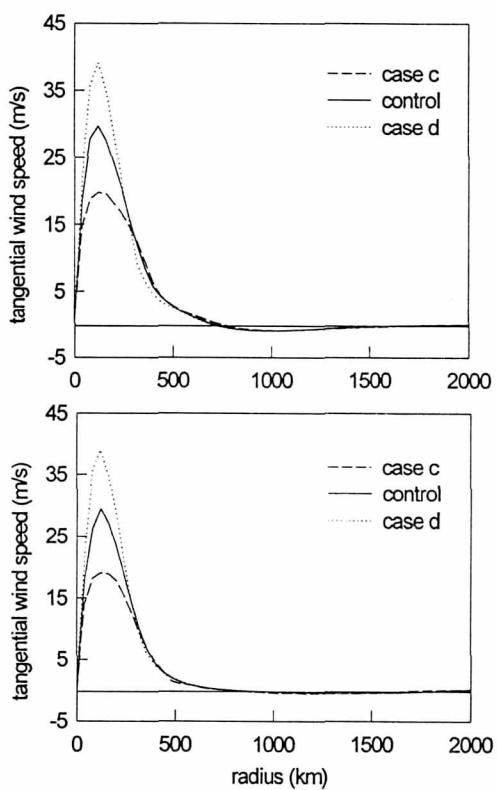


Fig. 13. The azimuthally-averaged tangential wind profiles for cases c, d, and control experiment at 72 hr (upper panel) and 144 hr (lower panel).

Table 2. 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 (3) and (4) for case c and case d.

time	case	K_s	K_a	EC_1	EC_2
12 hr	case c	528.78	4.34	-2.52	11.77
	case d	1218.20	9.38	-1.30	16.22
48 hr	case c	486.09	17.83	-2.88	13.31
	case d	1173.78	18.51	-2.71	27.06
96 hr	case c	461.19	29.47	3.22	19.90
	case d	1114.51	26.60	-4.39	25.46

SVAF항에 의한 유선함수 경향장(Fig. 14b)과 AVSF항에 의한 유선함수 경향장(Fig. 15b)을 살펴보면 그 강도가 규준 실험보다 조금 더 크게 나타나므로써 위의 설명을 잘 입증해 준다. 적분 후기(144시간)에 이 항들에 의한 유선함수 경향장은 중심 부근에

서 매우 큰 값을 나타낸다. 또한 PVFSF항에 의한 유선함수 경향장은 적분 후기에도 규준 실험보다 더 크게 나타나므로써 이 경우에 대칭 흐름 강도의 감소율이 규준 실험보다 작은 것을 알 수 있다. 이는 이 경우에 소용돌이의 대칭 운동 에너지의 감소율이 다른 경우보다 작게 나타나는 것과 같은 현상이다.

위에서 살펴본 바와 같이 소용돌이의 이동은 소용돌이 내부 강도의 변화에는 둔감하다. 소용돌이의 이동에 대한 비선형 항과 선형 항의 역할을 살펴보면 적분 초기에는 주로 선형 효과가 소용돌이의 이동에 영향을 주지만 시간이 지나면서 비대칭 순환이 발달함에 따라 선형 효과에 의해 발생한 비선형 항이 소용돌이의 이동에 영향을 준다. 선형 항의 크기가 증가하면 이와 상응하여 비선형 항의 크기도 증가하므로 소용돌이가 더 빨리 이동한다. 하지만 내부 강도가 증가된 경우는 선형 항의 크기가 소용돌이의 이동 속도가 많이 변할 수 있을 만큼 증가할 수 없으므로 소용돌이의 이동 속도가 규준 실험과 비슷하게 나타난다. 한편 소용돌이의 비대칭 순환의 수평 크기는 소용돌이의 수평 크기보다 훨씬 크므로 내부 흐름(최대 풍속 반경 부근의 흐름)은 큰 규모의 비대칭 순환을 반시계 방향으로 회전시키는 데는 큰 역할을 하지 못한다. 즉, 소용돌이의 이동과 관련된 비대칭 순환의 반시계 방향 회전율은 내부 강도의 변화에 따라 크게 변하지 않으므로 강도가 다른 각 소용돌이의 이동 방향은 서로 비슷하게 나타난다.

지금까지 소용돌이의 초기 흐름이 순수하게 저기압성인 경우에 소용돌이의 구조(크기 및 강도 변화)에 따른 이동 특성을 살펴보았다. 그 결과 소용돌이 중심 부근의 통풍류의 크기와 방향은 모든 경우에 소용돌이 운동과 잘 일치했다. 한편 소용돌이의 운동은 비대칭 자이어의 시간 변화와 직접적인 관련이 있다. 비대칭 자이어의 시간 변화는 구조에 따라 약간씩 차이가 나지만 대략 공통적으로 다음과 같다. 적분 초기(0-12시간)는 베타 자이어가 빠른 속도로 발달하고 자이어의 수평 크기가 외부로 확장되는 시기이다. 이때 중심 부근의 자이어부터 반시계 방향으로 회전하며 시간이 지남에 따라 이 회전 지역이 증가하여 통풍류가 좀 더 북서쪽을 향하게 된다. 24-72시간은 자이어의 강도가 선형적으로 증가하는 시기이다. 이 시기(24시간)부터 고기압성 자이어는 외부 자이어부터 시계 방향으로 회전하고 적분 후기까지 계속 회전한다. 한편 중심 부근의 비대칭 순환의 강도는 소용돌이의 이동이 준 정상

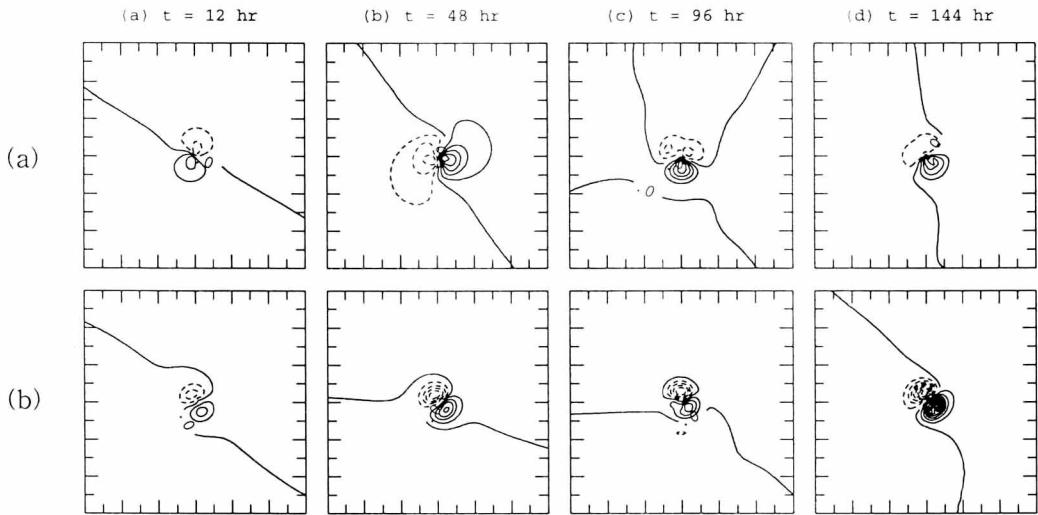


Fig. 14. Contribution to the total streamfunction tendency due to SVAF for (a) case c and (b) case d. The contour interval is $10 \text{ m}^2 \text{s}^{-2}$.

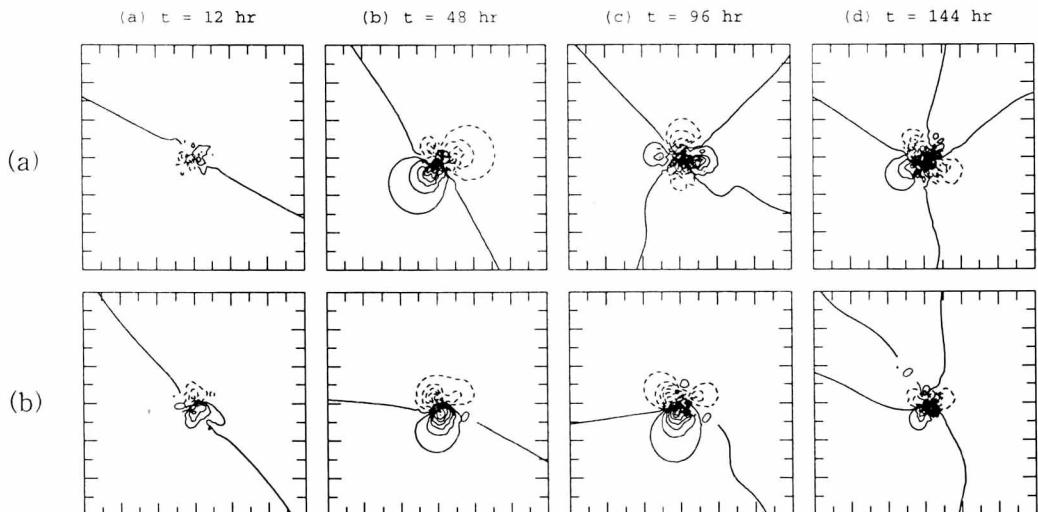


Fig. 15. The same as in Fig. 14 except for AVSF. The contour interval is $10 \text{ m}^2 \text{s}^{-2}$ except for case d at 144 hr ($20 \text{ m}^2 \text{s}^{-2}$).

상태에 도달하는 72시간 이후부터 거의 같은 크기를 유지한다. 좀 더 자세히 살펴보면 전체 적분 영역을 북에서부터 시계 방향으로 4분면으로 나누었을 때, 고기압성 사이어의 중심이 1사분면을 벗어나 2사분면에 존재하는 시기(84-120시간)에는 고기압성 사이어에서 그 동쪽에 위치한 저기압성 사이어로의 에너지 전달이 증가하여 중심 부근에 위치한 고기압성 사이어의 강도가 약간 감소되며 소용돌이의 이동 속도도 약간 감소된다. 이후(132시간 이후) 소용돌이 중심 부근에서 저

기압성 소용돌이에서 고기압성 사이어로의 에너지 전달 과정이 서서히 증가하면서 사이어가 이분되기 시작하고 이분된 후 소용돌이의 이동 속도가 다시 서서히 증가한다.

4. 요약

소용돌이의 초기 구조에 따른 이동 특성을 구조가

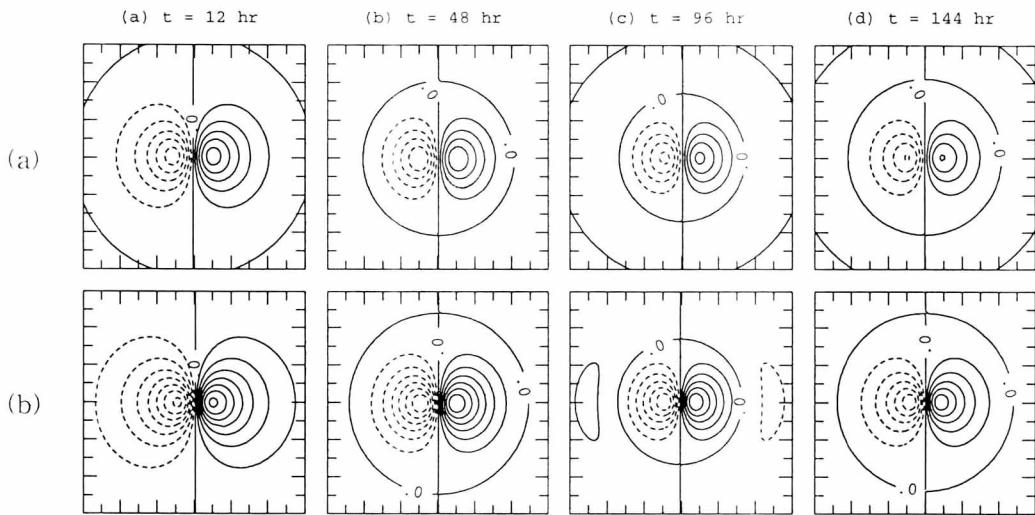


Fig. 16. The same as in Fig. 14 except for PVSF. The contour interval is $2 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$.

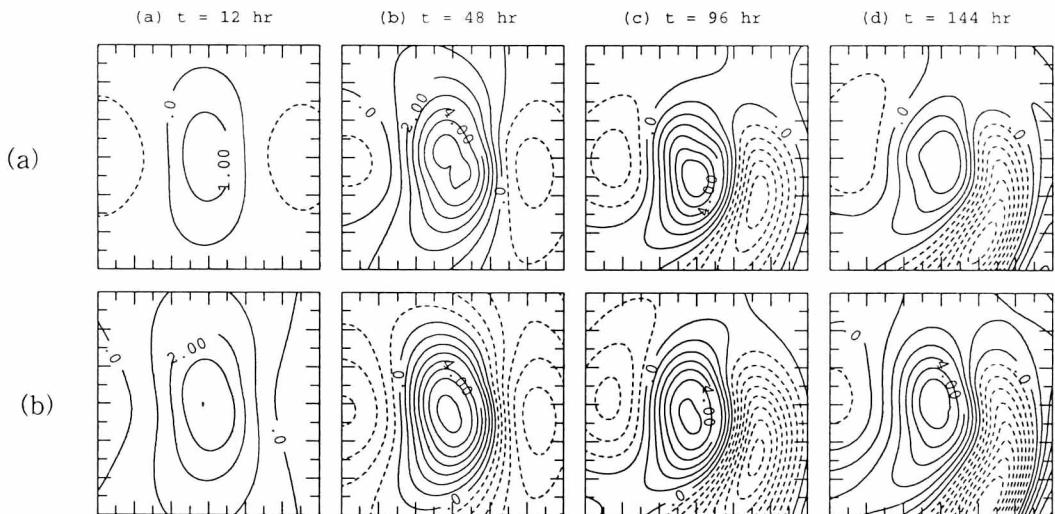


Fig. 17. The same as in Fig. 14 except for PVAF. The contour interval is $1 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$.

다른 여러 소용돌이와 베타 평면에서의 비발산 순압 모형을 이용하여 조사하였다. 외부 바람의 구조 즉, 크기가 다른 소용돌이의 이동 양상은 서로 큰 차이를 보이지만 강도가 다른 소용돌이 경우에는 많은 차이를 보이지 않았다.

각 소용돌이별 이동 특성은 베타 자이어의 형태와 강도에 의해 결정된다. 베타 자이어의 시간 변화는 소용돌이의 초기 구조에 따라 달라지며 그 강도는 Rossby 과 분산의 강도에 비례하는 선형 항의 크기에

의존된다. 즉, 규준 실험보다 소용돌이의 크기가 증가된 경우는 선형 항의 크기가 증가하므로 베타 효과에 의한 대칭 순환에서 비대칭 순환으로의 에너지 전환 과정(EC_2)이 활발하게 일어난다. 그 결과 더 강한 비대칭 순환이 형성되어 통풍류의 속도가 증가하므로써 소용돌이의 이동 속도가 증가한다. 또한 소용돌이의 강한 외부 흐름은 소용돌이 보다 큰 규모의 비대칭 순환을 반시계 방향으로 더 많이 회전시켜 통풍류의 서향 성분을 증가시키므로써 소용돌이가 좀 더 서쪽을

향하여 이동하는 데 기여한다. 하지만 소용돌이의 크기가 감소된 경우는 외부 흐름의 약화로 더 약한 비대칭 순환이 형성되고 비대칭 순환의 반시계 방향의 회전율도 감소되어 소용돌이는 좀 더 느린 속도로 더 북쪽을 향하여 이동한다. 한편 소용돌이의 강도 변화에 따른 선형 항의 변화율은 크기 변화에 따른 변화율보다 훨씬 작다. 따라서 소용돌이의 강도가 증가한 경우 강도 증가에 따른 EC_2 및 이에 의해 형성되는 비대칭 순환의 강도 변화도 작으므로 이동 속도는 규준 실험과 큰 차이를 보이지 않는다. 또한 내부 흐름은 외부 흐름 보다 비대칭 순환을 반시계 방향으로 회전시키는데는 많은 기여를 하지 않으므로 소용돌이의 이동 방향도 규준 실험과 큰 차이가 나지 않는다. 하지만 소용돌이 중심 부근의 강한 흐름은 비대칭 운동 에너지를 대칭 순환으로 전달시키는데는 효과적이므로 내부 강도가 증가된 경우 시간에 따른 대칭 에너지의 감소율이 작게 나타난다. 소용돌이의 강도가 감소된 경우는 소용돌이의 이동 경로가 진동 형태를 나타내며 이는 비선형 항과 밀접하게 연관되어 있다.

각 소용돌이의 대칭 흐름의 저기압성 강도는 시간이 지남에 따라 감소하는데 소용돌이의 크기가 클수록 더 빨리 감소하며 강도가 클수록 비선형 에너지 전환 항에 의한 비대칭 순환에서 대칭 순환으로의 에너지 전달 과정이 증가하여 덜 감소한다. 한편 실험에 사용된 모든 소용돌이는 소용돌이 동쪽의 고기압성 자이어의 강도가 증가함에 따라 외부 반경에 약한 고기압성 흐름을 포함하며 소용돌이의 크기가 클수록 그 강도가 크다.

유선함수 경향 방정식의 분석을 통해 초기에 선형 항이 증가한 경우는 비선형 항도 증가하는 것을 알 수 있었다. 즉, 소용돌이의 크기가 증가한 경우에 비대칭 초기에 비대칭 자이어를 형성시키는 PVSF항이 다른 경우보다 훨씬 크게 소용돌이의 이동에 가장 많은 영향을 주는 SVAF항도 크게 나타나는데 이 항의 영향으로 소용돌이의 이동 속도가 다른 경우 보다 크게 나타난다. 또한 AVSF항에 의한 유선함수 경향장은 반시계 방향으로 더 많이 회전하여 비대칭 순환을 반시계 방향으로 빠르게 회전시키므로써 소용돌이가 좀 더 서쪽으로 향하는 데 기여한다. 하지만 이 경우 더 큰

PVAF항은 소용돌이의 저기압성 강도를 빠르게 감소시키고 고기압성 자이어를 시계 방향으로 더 많이 회전시켜 소용돌이의 변형을 증가시킨다. 소용돌이의 크기가 감소된 경우는 AVSF항에 의한 유선함수 경향장의 반시계 방향 회전율이 감소하고 PVSF항과 SVAF항의 크기는 더 작게 나타나므로 이 경우에 소용돌이의 크기가 증가한 경우보다 더 느린 속도로 더 북쪽으로 이동한다. 소용돌이의 강도가 증가한 경우는 각 항들에 의한 유선함수 경향장의 강도가 약간씩 더 증가하였을 뿐 규준 실험과 많은 차이를 보이지 않으므로 소용돌이의 이동도 규준 실험과 큰 차이가 나지 않았다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부에서 시행하는 중점국가연구개발사업의 하나인 자연재해방재기술개발사업으로 수행된 것입니다.

참고문헌

- 백종수, 백종진, 1999: 순압 태풍 운동에서의 대칭 및 비대칭 순환의 역할, *한국기상학회지*, **35**(1), 1-19.
- 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.
- 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 _____, 1989a: Some aspects of vortex structure related to tropical cyclone motion. *J. Atmos. Sci.*, **46**, 975-990.
- _____, and _____, 1989b: Contributions to tropical cyclone motion by small, medium, and large scales in the initial vortex. *Mon. Wea. Rev.*, **117**, 721-727.
- Holland, G. J., 1983: Tropical cyclone motion: Environmental interaction plus a beta effect. *J. Atmos. Sci.*, **40**, 328-342.
- Li, X., and B. Wang, 1994: Barotropic dynamics of the beta gyres and beta drift. *J. Atmos. Sci.*, **51**, 746-756.