

회전하는 수조에서 나타나는 순압성 소용돌이의 패턴과 트라이폴라 소용돌이의 구조적 회전

권혁민 · 오영록* · 김태연

경기과학고등학교, 440-800, 경기도 수원시 장안구 수일로 135

Patterns of Barotropic Vortex in a Rotating Fluid and the Structural Rotation of Tripolar Vortex

Hyeok Min Kwon, Young Lok Oh*, and Tae Yeon Kim

Gyeonggi Science High School for the Gifted, Gyeonggi 440-800, Korea

Abstract: In this study, the patterns of barotropic vortices and their structural rotation were investigated through laboratory experiments. Both stable and unstable barotropic vortices were formed in a rotating water tank with a rotating circular plate depending on the diameter, direction, and speed of rotating circular plate. The patterns of stable vortices turned out to be tripolar, triangular, rectangular, and monopolar vortex. These vortex patterns were affected by the gap between the circular plate and the wall of the water tank. Many unstable vortices were formed by anticyclonically and highly rotating circular plate. These results were caused by the centrifugal instability. The structural angular velocity of the tripolar vortex increased with the tangential velocity of the circular plate. The anticyclonic tripolar vortex had higher structural angular velocity than the cyclonic vortex. The tripolar vortex in the water tank was very similar with the real oceanic tripolar vortex from the view point of the Rossby number and the structural rotation.

Keywords: barotropic vortex, tripolar vortex, centrifugal instability, structural rotation, rotating fluid

요약: 회전하는 수조에서 나타나는 순압성 소용돌이의 패턴과 구조 회전에 대한 연구를 수행하였다. 소용돌이는 수면 위에 접촉된 원판을 수조에 대해 상대적으로 회전시키는 방법을 통해 만들어졌다. 회전원판의 크기, 회전방향, 회전속력에 따라 트라이폴라 소용돌이, 삼각형 소용돌이, 사각형 소용돌이, 커다란 원형 소용돌이가 안정하게 나타났고, 모양이 계속 변하는 불안정한 소용돌이도 나타났다. 회전원판과 수조 벽 사이의 간격이 안정한 소용돌이의 패턴에 큰 영향을 주었고 불안정한 소용돌이는 원판이 시계방향으로 빠르게 회전할 때 주로 나타났는데, 그 원인은 원심력적 불안정성이었다. 한편, 트라이폴라 소용돌이에서 나타난 전체 패턴의 구조적 회전 각속도는 원판 가장자리의 선속도에 비례하였고, 고기압성 트라이폴라 소용돌이가 저기압성 보다 더 큰 구조 회전 각속도를 가졌다. 로스비 수와 구조회전의 관점에서 볼 때, 해양에서 발견된 트라이폴라 소용돌이와 본 실험에서 나타난 트라이폴라 소용돌이는 유사하였다.

주요어: 순압성 소용돌이, 트라이폴라 소용돌이, 원심력적 불안정성, 구조 회전, 회전 유체

서론

회전하는 수조에서 나타나는 순압성 소용돌이의 패턴, 안정성과 변화과정, 구조적 회전(structural rotation)에 대한 연구는 실험적으로 또는 컴퓨터 시뮬레이션을 사용한 방법으로 대단히 많이 진행되었다(e.g., Niino and Misawa, 1984; Heijst and Kloosterziel, 1989; Carnevale and Kloosterziel, 1994; Flór and

*Corresponding author: lorasias72@gmail.com

Tel: +82-31-8014-1532

Fax: +82-31-253-2812

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Heijst, 1996; Beckers and Heijst, 1998). 이들은 주로 고립된 원형 소용돌이가 dipolar, tripolar, triangular, rectangular vortex 등으로 다양하게 변하는 기작과 불안정성에 대해 연구하였다.

고립된 원형의 소용돌이가 가지는 속도분포는 중심에서 멀어지면서 증가하다가 최고인 지점(v_{max})을 지난 후 다시 감소하여 0으로 수렴한다. 이러한 속도분포에서 v_{max} 인 지점과 속도가 0으로 수렴하는 외각 사이의 폭이 원형 소용돌이의 패턴에 영향을 주는데, 이 폭이 좁아질수록 최종적으로 만들어지는 소용돌이는 tripolar, triangular, rectangular vortex의 순으로 변한다(e.g., Flierl, 1988; Heijst et al., 1991).

이렇게 만들어진 소용돌이 중 tripolar vortex는 비교적 안정하지만 초기 원형 소용돌이의 회전방향에 따라 안정과 불안정이 결정된다. Kloosterziel and Heijst(1991)는 고기압성 회전의 tripolar vortex가 저기압성 회전의 tripolar vortex보다 더 불안정하다는 것을 원심력적 불안정성(centrifugal instability)으로 설명하였다. 이들은 저기압성 tripolar vortex의 경우 로스비 수가 약 4.5 이상이어야 불안정하지만 고기압성인 경우 약 0.6 이상만 되어도 불안정하다는 것을 밝혔다. 한편, triangular vortex와 rectangular vortex는 일반적으로 매우 불안정하여 잠시 만들어지기는 하지만, 그 형태를 유지하지 못하고 다른 형태로 쉽게 변하는 것으로 알려져 있다(Orlandi and Heijst, 1992; Carnevale and Kloosterziel, 1994).

Tripolar, triangular, rectangular vortex는 모두 중앙의 큰 소용돌이와 외각의 작은 소용돌이로 구성되어 있다. 중앙의 소용돌이와 외각의 소용돌이는 회전방향이 반대이며 이들은 모두 전체적으로 각 소용돌이의 회전속도보다는 느리게 구조적 회전을 하며 그 방향은 중앙의 소용돌이 회전방향과 같다(Heijst and Kloosterziel, 1989; Heijst et al., 1991; Beckers and Heijst, 1998). 이 때, 이 구조적 회전의 각속도는 중앙 소용돌이와 외각 소용돌이 사이의 거리와 각 소용돌이의 순환(circulation)과 관련되는 것으로 알려져 있다. 한편, 해양에서도 고기압성 tripolar vortex가 발견되었는데(Pingree and Cann, 1992) 그 크기가 약 100 km 정도로 수 일간 지속되다가 사라졌으며, 이것 또한 구조적 회전을 하고 있었다.

본 논문에서는 수면과 접촉시킨 원판이 회전할 때 나타나는 다양한 순압성 소용돌이의 패턴에 영향을 주는 요인, tripolar vortex의 구조회전과 원판 회전

사이의 관계, 해양에서 발견된 tripolar vortex와 실험에서 만들어진 소용돌이의 유사성을 알아보고자 한다.

실험방법

회전하는 수조에서 순압성 소용돌이를 만드는 데에는 여러 방법이 있다. 예를 들어, Heijst and Clercx (2009)의 논문에는 다공성 튜브로 수조 중심부의 물을 빨아들이는 방법, 밀이 뚫린 실린더를 수조에 집어넣고 실린더 속의 물을 휘저은 다음 이를 들어 올리는 방법, 밀이 뚫린 실린더를 이용해 내부와 외부의 물의 높이차를 만들고 실린더를 들어 올리는 방법, 긴 직사각형 모양의 판을 수조 중심에 집어넣어 회전시키는 방법 등이 언급되어 있다. 본 연구에서는 이와 달리 수면에 접촉시킨 다양한 크기의 원판을 회전시키는 방법이 사용되었다. Niino and Misawa (1984)가 소용돌이를 만들었던 방법과 본 연구의 방법이 유사하나 이들은 수조 바닥에서 원판을 회전시켰고, 그 회전속도가 매우 느리며 원판의 크기가 일정했다는 것이 다르다.

Fig. 1은 실험기구의 모식도이다. 수조는 반시계 방향으로 회전($\Omega = +10$ rpm)하는 테이블 위에 있다. 수

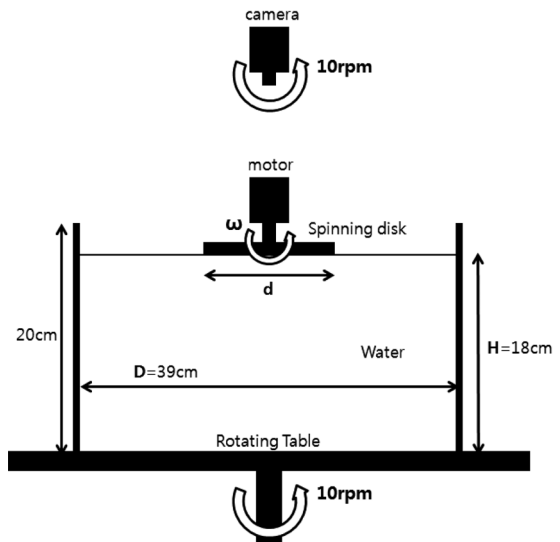


Fig. 1. A schematic drawing of the laboratory experiment. The water tank on the turntable always rotates counter-clockwise at 10 rpm. A spinning circular disk is used to form barotropic vortices, it rotates clockwise or counter-clockwise at 2-15 rpm relative to the water tank. The camera corotate with the water tank.

조의 수면에 접촉시킨 원판은 소형 모터에 연결되어 있어 반시계방향($\omega > 0$) 또는 시계방향($\omega < 0$)으로 최대 15 rpm의 속도로 회전할 수 있다. 소용돌이를 만들기 위해 우선 안쪽지름(D)이 39 cm인 수조 안에 물을 $H=18$ cm 가량의 높이로 채운 후 원판을 물에 겨우 잠기도록 설치했다. 원판은 지름(d)이 10, 15, 20, 25, 30, 35 cm인 것을 사용하였고 시계방향 또는 반시계방향으로 2에서 15 rpm의 속도로 회전시켰다. 수조와 원판을 약 20분간 회전시켜 물의 흐름을 안정화시킨 후, 색소를 골고루 넣어 소용돌이 모양을 가시화하여 수조 위에서 같이 회전하는 비디오카메라로 소용돌이를 촬영했다.

결과 및 해석

소용돌이를 관찰하기 위해 넣은 색소는 커튼 모양으로 퍼지며 이러한 2차원적 흐름은 테일러-프라우드만 효과로 알려져 있다(Marshall and Plumb, 2008; Jang et al., 2010). 색소를 넣은 후 1-2분 정도가 지나면 뚜렷한 소용돌이의 모양을 관찰할 수 있고, 약 10분 정도의 시간이 흐른 후 수조를 옆면에서 관찰하면 수조 바닥면에서 나타나는 마찰의 영향으로 예크만 펌핑현상도 관찰할 수 있다.

Fig. 2는 이 실험에서 관찰된 소용돌이들의 사진이다. Fig. 2a는 tripolar, Fig. 2b는 triangular, Fig. 2c는 rectangular, Fig. 2d는 monopolar vortex이다. 이들은 공통적으로 매우 안정한 소용돌이로, 중심에 큰 소용돌이와 주변의 작은 타원형 소용돌이들로 이루어져 있다. 중심의 소용돌이는 원판의 회전방향과 같은 방향으로, 주변의 타원형 소용돌이는 그와 반대 방향으로 회전을 한다. 전체 소용돌이의 개수를 세어 보면 tripolar는 3개, triangular는 4개, rectangular는 5개이다. monopolar는 하나의 소용돌이로 보이지만 색소를 넣은 직후에 관찰하면 Fig. 2f와 같이 매우 작은 소용돌이가 주변에 있는 것을 확인할 수 있다. Fig. 2e는 모양과 움직임이 규칙적이지 않은 불안정한 소용돌이로 시간에 따라 모양이 변한다.

Fig. 2a부터 Fig. 2e까지의 소용돌이의 패턴을 d/D 와 ω/Ω 의 관계로 나타낸 것이 Fig. 3이다. d/D 는 수조의 안쪽지름에 대한 원판의 상대적인 지름을, ω/Ω 는 수조의 배경회전속도에 대한 원판의 상대적인 회전속도를 뜻한다. Fig. 3에서 tripolar가 가장 많은 영역을 차지하고 있지만 d/D 가 0.8을 넘어가게

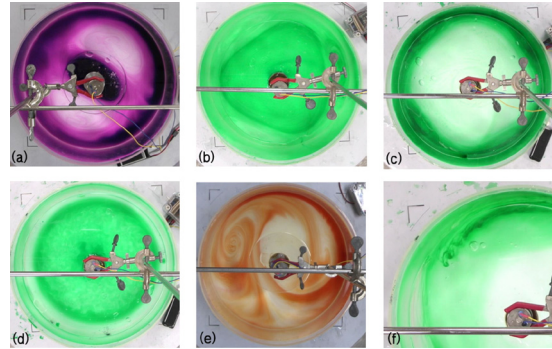


Fig. 2. Typical barotropic vortices formed for various values of d/D and ω/Ω . The inner diameter (D) of the water tank is 39 cm and the background rotating angular velocity (Ω) of the water tank is 10rpm counterclockwise. (a) tripolar vortex, $d/D=0.38$, $\omega/\Omega=1.0$. (b) triangular vortex, $d/D=0.77$, $\omega/\Omega=1.0$. (c) rectangular vortex, $d/D=0.90$, $\omega/\Omega=-0.3$. (d) monopolar vortex, $d/D=0.90$, $\omega/\Omega=0.3$. (e) unstable vortex, $d/D=0.38$, $\omega/\Omega=-1.4$. (f) very small vortices of the outside of monopolar vortex (d).

되면 더 이상 나타나지 않는다. d/D 가 0.75를 넘어서면 tripolar, triangular, monopolar vortex가 나타나다가 d/D 가 0.85보다 커지면 monopolar와 rectangular vortex가 나타난다. 이를 통해 d/D 가 커질수록 전체 소용돌이의 개수가 증가하는 경향이 있다는 것을 알 수 있다.

불안정한 소용돌이는 주로 원판이 고기압성 방향으로 빠르게 회전할 때 즉, ω/Ω 이 -1 이하일 때 나타났다. 한편, 원판이 저기압성 방향으로 빠르게 회전할 때는 안정적인 소용돌이가 나타났다. 이는 원판의 회전방향에 따라 소용돌이의 불안정성이 다르게 나타난다는 것을 의미한다. Table 1에 제시된 바와 같이 저기압성 및 고기압성 소용돌이들 모두 0.5 이하의 로스비 수를 갖는다. 원판의 회전이 빠를수록 로스비 수가 커지므로, 원판이 고기압성으로 빠르게 회전하면서 나타나는 불안정성은 Kloosterziel and Heijst(1991)가 제시한 원심력적 불안정성이 그 원인임을 알 수 있다. 한편, Fig. 3에서 $d/D=0.77$ 일 때 나타나는, 저기압성 불안정한 소용돌이는 원심력적 불안정성으로 설명할 수 없었다.

수조에서 나타난 소용돌이들은 Fig. 4에서처럼 원판의 회전방향과 같은 방향으로 구조적 회전을 한다. 본 연구에서 가장 많이 관측된 tripolar vortex의 구조적 회전은 Heijst et al.(1991)에 의해 point-vortex

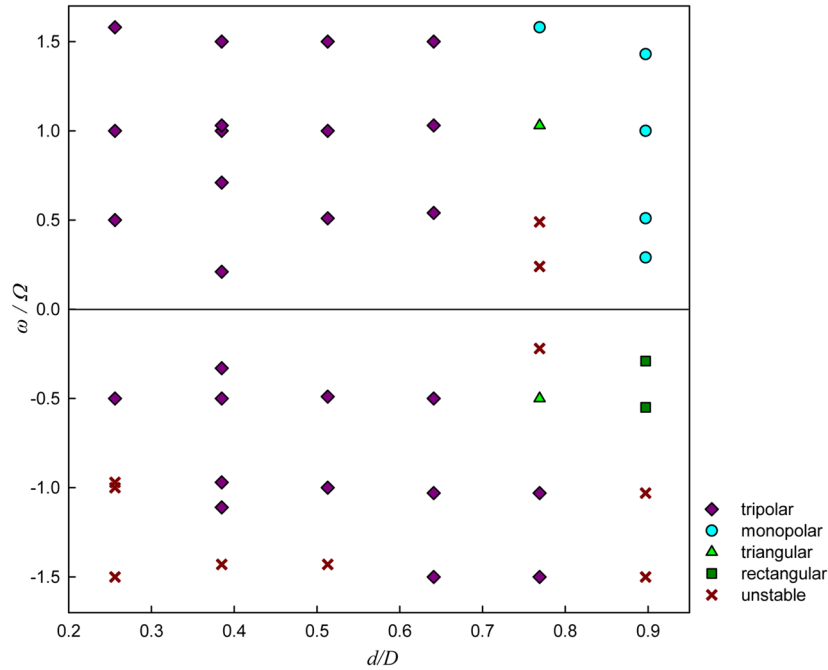


Fig. 3. The observed various barotropic vortex structures, as a function of d/D and ω/Ω . d, D, ω, Ω are the diameter of rotating disk and water tank and the angular velocity of rotating disk and water tank, respectively.

Table 1. The ranges of Rossby number in the various stable vortex patterns

The vortex pattern	Cyclonic	Anticyclonic
Tripolar	0.06-0.30	0.07-0.50
Triangular	0.46	0.22
Rectangular	-	0.13-0.29
Monopolar	0.14-0.50	-

model로 해석되었고, 그 구조 회전의 각속도($d\theta/dt$)는 다음과 같다.

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{3\gamma}{4\pi a^2}$$

여기서 γ 는 tripolar vortex를 구성하고 있는 외각 소용돌이의 순환(circulation)을 의미하고 a 는 가운데 소용돌이의 중심에서 외각 소용돌이의 중심까지의 거리를 의미한다. 외각 소용돌이의 순환은 평균 소용돌이도(vorticity) $\langle \zeta \rangle$ 와 소용돌이의 면적 A 의 곱으로 표현할 수 있다. $\langle \zeta \rangle$ 는 원판의 회전에 의해 생기므로 회전원판 가장자리 부분의 선속도의 두 배인 ωd 에 비례한다고 가정하면 위의 식은

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{3\gamma}{4\pi a^2} \approx \frac{3\langle \zeta \rangle A}{4\pi a^2} \propto \left(\frac{A}{a^2}\right) \omega d$$

으로 표현할 수 있다. Fig. 5는 tripolar vortex에서 계산된 ωd 와 $d\theta/dt$ 의 관계를 나타낸 것이다. 저기압성과 고기압성 tripolar vortex 모두 ωd 에 거의 선형적으로 비례함을 확인할 수 있다. 또한 고기압성에서 나타나는 기울기가 저기압성의 그것보다 약간 큰데, 이것은 고기압성 회전과 저기압성 회전에 의해 생기는 tripolar vortex의 성질이 서로 다름을 암시한다.

마지막으로 Pingree and Cann(1992)가 해양에서 발견한 고기압성 tripolar vortex와 수조에서 만들어진 소용돌이를 비교해보고자 한다. 이들의 자료에 의하면 이 소용돌이의 로스비수는 0.2, 구조회전주기는 18일, 위도효과를 고려한 지구자전주기는 1.4일이다. 본 연구에서 고기압성 tripolar vortex 중 이 소용돌이와 로스비 수가 가장 비슷한 것은 Fig. 4에 제시된 소용돌이로 이것의 로스비 수는 0.18, 구조회전주기는 71초, 배경회전주기는 6초이다. 본 실험의 tripolar vortex와 Pingree and Cann(1992)이 발견한 tripolar vortex의 구조회전주기와 배경회전주기의 비는 11.8과

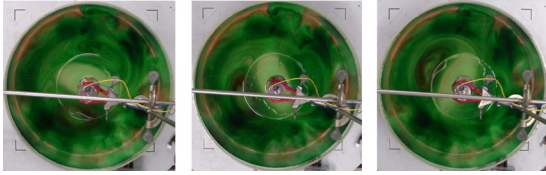


Fig. 4. The structural rotation of anticyclonic tripolar vortex. The ω/Ω and d/D of the vortex is -0.97 and 0.38 respectively. The time interval of photographs is 10 seconds and the period of structural rotation is 71 seconds.

12.7로 유사하여 두 소용돌이가 역학적으로 매우 유사하다는 것을 알 수 있다.

결론 및 토의

본 연구에서 나타난 안정한 소용돌이에서 d/D 가 커질수록 즉, 원판과 수조 벽 사이의 공간이 좁아질수록 전체 소용돌이의 개수가 증가하는 경향이 있다. 이것은 서론에서 언급했듯이 초기 원형의 소용돌이의 거리에 따른 속도분포에서 v_{max} 인 지점과 속도가 0으로 수렴하는 곳 사이의 간격이 좁을수록 전체 소용돌이의 개수가 증가한다는 Flierl(1988)의 결과와 잘 일치한다.

Carnevale and Kloosterziel(1994), Flór and Heijst (1996), Beckers and Heijst(1998)의 연구에서 triangular

와 rectangular vortex는 매우 불안정하여 초기에 잠깐 모습을 보이다가 다른 소용돌이로 변하였지만 본 연구에서는 안정적으로 관찰되었다. 이러한 이유는 실험방법의 차이에 의한 것으로 추정된다. 이들은 앞에서 언급한 다양한 방식으로 거리에 따른 특정 속도분포를 만들고 여기서 만들어진 소용돌이를 그대로 놓아두면서 소용돌이를 관찰했다. 이러한 방식으로 만들어진 소용돌이는 거리에 따른 속도의 분포가 그대로 유지되지 못하고 빠르게 회전력이 감소한다. 하지만 본 연구에서는 계속적으로 원판을 회전시키기 때문에 triangular와 rectangular vortex가 계속 유지될 수 있는 회전력이 제공된다고 판단할 수 있다.

원판이 고기압성으로 빠르게 회전할 때 나타나는 불안정한 소용돌이는 원심력적 불안정성이 그 원인이다. 이것은 해양에서 관측된 중규모 소용돌이 중 저기압성 회전을 가진 것이 고기압성 회전을 가진 것보다 더 큰 로스비 수를 가질 수 있다는 것(Olson, 1991)과 같은 의미를 갖는다. 한편, Fig. 3에서 $d/D=0.77$ 일 때 나타나는 불안정한 소용돌이는 Table 1을 참고할 때 저기압성은 로스비 수가 0.46 이하, 고기압성은 0.22 이하이어야 하므로 원심력적 불안정성으로 설명할 수 없다. 이들 소용돌이들은 tripolar vortex와 비슷한 형태를 보이지만 비대칭적이면서 외각 소용돌이의 크기가 변한다. 따라서 이들의 불안정성에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

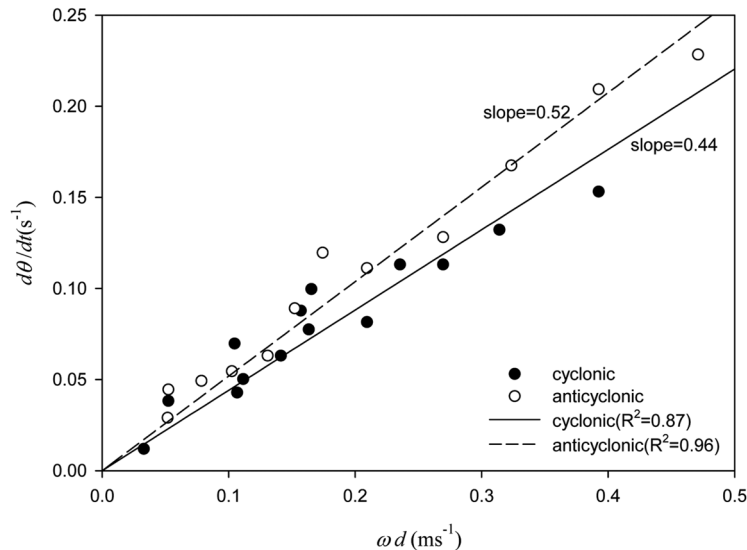


Fig. 5. The angular velocity ($d\theta/dt$) of structural rotation of the tripolar vortex, as a function of ωd . The angular velocity of cyclonic and anticyclonic tripolar vortex increases almost linearly as ωd increases. Note that the slope of anticyclonic tripolar vortex is greater than the cyclonic vortex.

본 연구에서 가장 많이 관찰된 tripolar vortex의 구조회전 주기는 원판 가장자리의 선속도에 비례하고 같은 선속도에서 고기압성 tripolar vortex가 저기압성보다 더 빠르게 회전한다. 만일 tripolar vortex의 형태와 관계된 A/a^2 의 값이 저기압성과 고기압성에서 차이가 없다고 가정하면, 같은 원동력을 주었을 때 고기압성 구조적 회전이 저기압성 구조적 회전보다 그 속도가 빠르다는 것을 의미한다. 이것은 마치 동일한 기압경도력이 주어질 때 고기압성 경도풍의 속력이 저기압성 경도풍의 그것보다 더 빠르다는 것(Holton, 2004)과 같은 맥락이라고 판단된다.

해양에서 관측된 고기압성 tripolar vortex와 본 연구에서 나타난 고기압성 tripolar vortex는 로스비 수와 구조회전의 관점에서 유사하여 두 소용돌이가 역학적으로 매우 유사하다. 따라서 작은 회전수조에서 만들어진 소용돌이가 비교적 자연의 소용돌이를 충실히 재현하고 있다고 판단된다.

고등학교 교육과정에도 회전수조를 이용한 편서풍 파동 실험이 다루어지고 있고(Lee et al., 2006), 최근에는 우리나라에서도 서안경계류를 재현하거나 태풍의 발생 및 이동에 대한 실험에 회전수조를 이용하는 방법 등이 제시되었다(Jang et al., 2010; Wie et al., 2012). 본 연구가 회전원판에 의해 생기는 소용돌이에 중점을 두고 진행되었으나, 수조의 바닥이나 원판 접촉면에 의한 마찰력으로 인해 생기는 2차 순환도 관찰할 수 있는 것을 생각할 때, 예크만 펌핑을 재현하는 실험으로도 충분히 사용될 수 있을 것으로 생각된다.

감사의 글

본 연구를 진행하는 동안 많은 조언을 해 주신 서울대학교 장경일, 전북대학교 문병권 교수님께 감사드리며, 꼼꼼하게 심사해주신 심사위원님들께도 감사드립니다.

References

Beckers, M. and Heijst, G.J.F. van, 1998, The observation of a triangular vortex in a rotating fluid, *Fluid dynamics research*, 22, 265-279.
Carnevale, G.F. and Kloosterziel, R.C., 1994, Emergence and evolution of triangular vortices, *Journal of fluid*

mechanics, 259, 305-331.
Flierl, G.R., 1988, On the instability of geostrophic vortices, *Journal of fluid mechanics*, 197, 349-388.
Flór, J.B. and Heijst, G.J.F. van, 1996, Stable and unstable monopolar vortices in a stratified fluid, *Journal of fluid mechanics*, 311, 257-287.
Heijst, G.J.F. van and Clercx, H.J.H., 2009, Laboratory modeling of geophysical vortices, *Annual reviews of fluid mechanics*, 41, 143-164.
Heijst, G.J.F. van and Kloosterziel, R.C., 1989, Tripolar vortices in a rotating fluid, *Nature*, 338, 569-571.
Heijst, G.J.F. van, Kloosterziel, R.C., and Williams, C.W.M., 1991, Laboratory experiments on the tripolar vortex in a rotating fluid, *Journal of fluid mechanics*, 225, 302-331.
Holton, J.R., 2004, *An introduction to dynamic meteorology*, Academic Press, USA, 535 p.
Jang, S.H., Shin, J.S., and Moon, B.K., 2010, Development of apparatus and methods for understanding the dynamics of the western boundary current, *Journal of Korean earth science society*, 31, 88-94. (in Korean)
Kloosterziel, R.C. and Heijst, G.J.F. van, 1991, An experimental study of unstable barotropic vortices in a rotating fluid, *Journal of fluid mechanics*, 223, 1-24.
Lee, S.H., Park, G.S., and Kim, H.S., 2006, Development of a set of an experimental equipment of westerly wave for high school, *Journal of Korean earth science society*, 27, 177-187. (in Korean)
Marshall, J. and Plumb, R.A., 2008, *Atmosphere, ocean, and climate dynamics: An introductory text*, Academic Press, China, 319 p.
Niino, H. and Misawa, N., 1984, An experimental and theoretical study of barotropic instability, *Journal of the atmospheric sciences*, 41, 1992-2011.
Olson, D.B., 1991, Rings in the ocean, *Annual reviews of earth and planetary sciences*, 19, 283-311.
Orlandi, P. and Heijst, G.J.F. van, 1992, Numerical simulation of tripolar vortices in 2D flow, *Fluid dynamics research*, 9, 179-206.
Pingree, R.D. and Cann, B. le, 1992, Three anticyclonic slope water oceanic eDDIES (SWODDIES) in the southern bay of Biscay in 1990, *Deep-sea research*, 39, 1147-1175.
Wie, J.E., Jang, S.H., and Moon, B.K., 2012, Development of an experimental method for understanding the effect of the Coriolis force on the typhoon genesis and its movement, *Journal of Korean earth science society*, 33, 544-553. (in Korean)

2013년 3월 21일 접수
2013년 4월 8일 수정원고 접수
2013년 5월 3일 채택