

## 서안경계류 역학을 이해하기 위한 실험 장치 및 방법 개발

장승환<sup>1</sup> · 신정선<sup>1</sup> · 문병권<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup>전북대학교 과학교육학부, 융합과학연구소, 561-756, 전북 전주시 덕진구 덕진동 1가 664-14

<sup>2</sup>전북대학교 과학교육학부, 첨단과학고사연수센터, 561-756, 전북 전주시 덕진구 덕진동 1가 664-14

### Development of Apparatus and Methods for Understanding the Dynamics of the Western Boundary Current

Swung-Hwan Jang<sup>1</sup>, Jung Sun Shin<sup>1</sup>, and Byung-Kwon Moon<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup>Division of Science Education, Institute of Fusion Science, Chonbuk National University, Jeonbuk 561-756, Korea

<sup>2</sup>Division of Science Education, Center for Bridging Advanced Science and Education, Chonbuk National University, Jeonbuk 561-756, Korea

**Abstract:** A simple laboratory device and methodology are developed for deep understanding of the western boundary current (WBC). The apparatus consists of a rotating (count-clockwise) rectangular tank with a sloping bottom in order to simulate the beta effect, the variation of the Coriolis parameter with latitude. We also used a clockwise rotating disk at the surface water to mimic the wind stress forcing in mid-latitude oceans. Four experiments were carried out using some combination of a bottom type and a rotation of the tank. Experiment with the beta effect clearly demonstrated the WBC-like flow as well as the Sverdrup interior. However, the water in a tank gave rise to an inertial motion under the influence of a constant Coriolis force alone. We also discussed a stiffening of the rotating fluid on the basis of the Taylor-Proudman effect. We believe that the apparatus and methods developed in this study help to understand the WBC due to the beta effect.

**Keywords:** western boundary current, rotating tank, Coriolis force, beta effect, Taylor-Proudman effect

**요약:** 서안경계류의 발생 역학을 이해하기 위하여 간단한 실험 장치와 방법을 개발하였다. 위도에 따른 코리올리 파라미터의 변화(즉 베타효과)를 구현하기 위하여 바닥이 경사진 반 시계 방향으로 회전하는 수조를 이용하였다. 중위도 해양에 작용하는 바람 응력은 수조 상부에서 시계 방향으로 회전하는 원판으로 대신하였다. 수조 바닥의 형태와 수조의 회전 유무의 조합으로 구성된 4가지 실험을 수행하였다. 그 결과, 베타효과가 포함된 실험에서 서안경계류와 유사한 흐름과 스베드руп 영역을 볼 수 있었다. 반면에, 베타효과 없이 일정한 코리올리 힘만 있을 때는 수조 속의 물은 관성류의 특징을 나타냈다. 우리는 또한 회전 유체가 굳어진 것처럼 변한다는 테일러-프라우드만 효과를 확인 하였다. 이 연구에서 개발된 장치와 방법은 베타효과에 의한 서안경계류를 이해하는 데 도움을 줄 것으로 기대한다.

**주요어:** 서안경계류, 회전수조, 코리올리 힘, 베타효과, 테일러-프라우드만 효과

## 서론

해수의 순환은 크게 바람응력에 의한 풍성 순환과 바다물 밀도 차이에 의한 열염분 순환으로 구분된다. 이들 중 중위도(15°-45°)의 풍성순환은 대체로 그 중

심이 서쪽으로 치우쳐 나타난다. 이와 함께 대양의 서쪽 경계에서 좁고 빠른 해류가 극 방향으로 흐른다. 반면에 동쪽 경계의 해류는 그에 비해 너비가 넓은 지역에서 천천히 적도 방향으로 흐른다(Mellor, 1996). 대양의 서쪽 경계에서 흐르는 강하고 좁은 해류를 서안경계류(Western Boundary Current)라 부른다. 북태평양의 쿠로시오 해류, 북대서양의 멕시코 만류, 남태평양의 동오스트레일리아 해류, 남대서양의

\*Corresponding author: moonbk@jbnu.ac.kr

Tel: 82-63-270-2824

Fax: 82-63-270-2802

브라질 해류 등이 이에 해당한다(한국지구과학회, 2002).

Stommel(1948)은 최초로 서안경계류의 주요 원인이 흔히 베타효과( $\beta$ -effect, Holton, 2004)라 일컫는 코리올리 파라미터( $f$ )의 위도 변화 때문인 것을 밝혔다. 이후 여러 연구들이 수조 실험을 통하여 서안경계류를 재현하는 노력을 하였다(Pedlosky and Greenspan, 1967; Beardsley, 1969; Griffiths and Veronis, 1997). 이들은 지표면의 곡률에 의해 나타나는 베타효과를 회전 테이블과 경사진 바닥을 갖는 수조를 이용하여 실험실에서 구현하였다.

회전수조는 Siemens(1866)이 사용한 이후 대기와 해양의 움직임을 실험실에서 모사하기 위해 자주 사용되었다(Mallock, 1896; Hide, 1953; Hide, 1958; Cenedese and Whitehead, 2000). 최근에는 직경 5 m의 거대한 회전수조를 이용하여 서안경계류의 구조를 연구하고 있다(Pierini et al., 2008). 또한 학생 교육을 위한 작고 단순한 실험장치가 사용되고 있다(MIT, 2010). 국내에서는 소선섭 외(1995, 1997)가 회전수조를 이용하여 중위도 대기 파동을 연구하였다. 그리고 그들이 다룬 것과 비슷한 회전수조는 남북의 온도 차에 의해 발생하는 대기파동을 재현하는 실험장치로 우리나라 고등학교 과정에 흔히 소개된다. 실험은 학생들의 흥미를 유발시키는 데 도움이 될 뿐만 아니라 이론으로 배운 지식에 대한 이해를 넓힐 수 있다(조희형과 최경희, 2008). 그러나 고등학교나 대학 교양에서 중요하게 다루는 서안경계류를 이해하기 위한 실험과 방법은 국내에서 아직 개발되지 않았다. 학생들이 이론 수업만으로 코리올리 힘, 베타효과 그리고 서안경계류의 관계를 무리 없이 이해하기는 힘들 것이다. 따라서 이들 관련성을 파악할 수 있는 실험 장치와 방법이 필요하다. 그리고 이 연구에서 검토한 국내 6종의 지구과학 2 교과서에서 서안경계류를 본문과 더불어 삽화로 설명하고 있었다. 그런데 그 중 3종의 교과서는 서안경계류의 발생 원인으로 코리올리 힘만을 지적하고 있다. 그러므로 일부 학생은 서안경계류의 발생 원인을 베타효과 즉, 코리올리 힘의 위도변화가 아닌 단순히 코리올리 힘이라 오해할 가능성이 높다. 이들에게 위도에 따라 변하지 않고 일정한 코리올리 힘이 존재할 경우에서 서안경계류가 발생하지 않는 것을 명확히 볼 수 있는 실험이 필요하다.

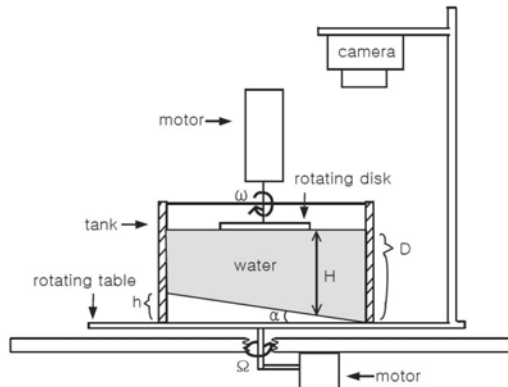
그래서 이 연구에서 서안경계류의 발생이 단순히

코리올리 힘의 작용이 아니라 베타효과에 의해 나타나는 것을 쉽게 확인 할 수 있는 실험 장치와 다양한 실험 방법을 개발하였다. 개발된 실험 장치는 기존 연구(Beardsley, 1969; MIT, 2010)와 비슷한 원리로 작동된다. 덧붙여 이 연구는 학교 현장에서 쉽게 수행할 수 있는 몇 가지 실험 방법과 그 결과를 분석하였다. 제시된 회전 수조 실험을 통해 학생들이 서안경계류의 발생 역학을 좀 더 명확하고 쉽게 이해할 수 있을 것으로 기대한다.

## 서안경계류 모의를 위한 실험 장치

Fig. 1은 이 연구에서 개발한 실험 장치를 나타낸다. 물을 채운 직육면체 수조(40 cm×40 cm×24 cm)가 회전 속도를 조절할 수 있는 테이블(지름 66 cm) 위에 놓여있다. 수조는 바닥이 편평한 것과 경사진 것 등 두 형태를 사용하였다. 수조 바닥 형태에 대한 자세한 설명은 뒤에 추가하였다. 여기서 회전하는 테이블은 중위도 어떤 위도에 접하는 가상의 평면이 지구 자전에 의해 회전하는 것을 나타낸다. 이 회전 각속도는 실제 북반구 중위도에서 근사적으로  $f \approx 10^{-4} \text{ s}^{-1}$  크기를 갖는다(Holton, 2004). 그리고 수조 상부에 있는 회전 원판(지름 30 cm, 두께 0.5 cm)은 물에 접하면서 시계방향으로 회전하고 있다. 이는 북반구 중위도 해양에 작용하는 바람 응력을 나타내기 위해서이다. 북반구 중위도 해양의 북쪽과 남쪽은 각각 편서풍과 편동풍이 불기 때문에(Hartmann, 1994), 이곳에서는 바람 응력이 시계방향의 소용돌이도(vorticity)를 해양에 전달한다(Pedlosky, 1996). 그리고 디지털 카메라를 회전 테이블에서 높이 90 cm에 두어 수조에서 나타나는 물의 흐름을 관찰하였다.

앞서 수조 바닥의 형태가 두 종류인 것에 대해 잠시 말하였다. 회전 테이블에 놓인 경사진 바닥의 수조는 편평한 것과 비교하여 다른 역학적 환경을 갖는다. 편평한 바닥의 수조와 달리 경사진 수조에서 물의 두께는 위치에 따라 변하게 된다. 이런 환경에서는 물의 두께가 얇아지는 쪽이 바로 코리올리 파라미터(혹은 코리올리 힘)가 증가하는 방향이 된다(Greenspan, 1965; Beardsley, 1969; Holton, 2004). 즉 회전 테이블에 놓인 경사진 바닥을 갖는 수조 속의 물은 코리올리 힘의 위도 변화로 나타나는 해양과 대기의 운동과 비슷한 특징을 갖는다. 이 연구는 중위도 북반구 해양을 대상으로 삼고 있으므로 물의



**Fig. 1.** Diagram of the experimental apparatus illustrating the section of a rectangular tank with a sloping bottom. Note that some experiments were also carried out with a flat-bottomed tank. The maximum depth of water, maximum height of bottom, and angle of slope are  $D=17$  cm,  $h=11.5$  cm, and  $\alpha=15^\circ$ , respectively. The depth of water ( $H$ ) varies as seen. For  $\Omega$  and  $\omega$ , see Table 1.

두께가 얇아지는 방향(혹은 바닥 높이가 증가하는 방향)이 북쪽을 가리킨다. 지형 변화에 의한 베타효과를 Pedlosky(1987)에 자세히 설명돼 있다.

여기서 Fig. 1과 비슷한 장치는 지구물리유체역학(Geophysical Fluid Dynamics) 실험 분야에서 널리 이용되고 있다는 것을 말하고자 한다. 특히 MIT 대학 홈페이지에서 우리와 비슷한 실험을 통해 해양 순환을 모의한 사진과 동영상을 볼 수 있다(MIT, 2010). 여기서 강조하고 싶은 것은 우리는 몇 가지 실험 환경의 변화에 따른 실험 결과를 비교하여 서안경계류의 발생 원인을 쉽게 이해할 수 있는 실험 방법을 함께 제시하고 있는 점이다. 다음 절에서 실험 방법을 소개하고 있다.

## 수조 바닥 형태와 테이블 회전 영향을 이해하기 위한 실험 방법

앞에서 우리나라 고등학교 교과서 중 일부가 서안 경계류의 발생 원인으로 베타효과가 아닌 코리올리 힘을 제시하고 있다고 말했다. 따라서 이들 교과서를 사용하는 학생은 서안경계류의 발생원인을 제대로 이해하기 힘든 환경에 놓여있다. 이 연구에서 제시된 일련의 실험 과정을 수행하고 그 결과를 토의하면서 교과서의 오류를 보완할 수 있을 것이다. 뿐만 아니라, 베타효과가 포함될 때와 그렇지 않을 때의 해양 순환의 여러 특징을 비교하는 실험은 서안경계류를 더 깊이 이해하는데 큰 도움이 될 것이다.

이 연구에서 우리는 실험을 수행할 때 두 요인의 변화를 고려하였다. 먼저 베타효과가 있고 없음을 따라 중위도 해수 순환의 특징 변화를 살펴보기 위하여 바닥이 경사진 것과 편평한 두 개의 수조를 사용하였다. 다시 한번, 회전테이블에 놓인 경사진 바닥의 수조는 지구 곡률에 의해 나타나는 베타효과가 작용할 경우와 같은 역학적 환경을 갖는다는 점을 강조하고자 한다(Pedlosky, 1987; Holton, 2004). 다른 요인은 수조가 놓인 회전테이블이 회전할 때와 그렇지 않는 경우이다. 이들은 각각 자전에 의한 코리올리 힘이 작용할 때와 작용하지 않는 경우를 고려한 것이다. 이때 코리올리 힘은 위도에 따른 변화가 없다고 가정한 것이다.

Table 1은 여러 실험 환경의 특징을 나타내고 있다. 기준실험(control experiment)이라 할 수 있는 SB\_fl 경우에 경사진 바닥의 수조가 반시계 방향으로 회전하는 테이블( $\Omega=5$  rpm) 위에 놓인다. 그리고 시계방향(북반구 고기압성 방향)으로 회전하는( $\omega=4$

**Table 1.** Experiment summary

Name	Bottom type of tank	Turn table rotation ( $\Omega=5$ rpm, count-clockwise)	Notes
SB_fl	sloping	Yes	$\beta$ -effect (also Coriolis force) works
SB_f0	sloping	No	-
FB_fl	Flat	Yes	constant Coriolis force only works
FB_f0	Flat	No	-

For all experiments, the water in tanks is forced by the anti-cyclonic (clockwise) rotating disk with the same angular velocity of  $\omega=4$  rpm.

<sup>†</sup>이와 관련하여 Pedlosky(1987, 107 page)는 “there is an exact dynamical equivalence between the variance of the Coriolis parameter with latitude, the  $\beta$ -effect, and variations of topography in the presence of constant  $f$ ”라 말하고 있다.

rpm) 원판을 이용하여 수조의 물에 응력을 주었다. 실험에서 원판은 북반구 중위도 해양에 작용하는 바람 역할을 하고 있다. 나머지 실험에도 이 원판은 SB\_f1와 같은 각속도와 회전 방향을 갖는다. 즉 네 실험 모두 바람 응력의 조건은 동일하다.

실험 SB\_f0는 경사진 바닥을 갖는 수조를 사용하지만 테이블이 회전하지 않는 환경에 있다. 이 경우 물의 운동은 회전 원판이 전달하는 응력과 경사 바닥의 영향에 의해 나타날 것이다. 편평한 바닥의 수조를 사용한 두 실험 FB\_f1과 FB\_f0는 각각 테이블에 회전을 준 경우와 주지 않는 경우를 나타낸다. 여기서 FB\_f1는 ‘서안경계류는 코리올리 힘에 의해 발생한다’는 명제를 판단하기 위한 실험이다. 특히 이 실험 결과를 기준실험(SB\_f1)의 결과와 비교함으로써 서안경계류 발생에 베타효과가 반드시 필요하다는 것을 이해하는 것이 목적이다.

덧붙여, 코리올리 힘을 고려한 실험(SB\_f1, FB\_f1)과 고려하지 않는 실험(SB\_f0, FB\_f0) 결과를 비교하여 회전하는 유체의 역학적 특징을 살펴볼 수 있을 것이다. 회전하는 계(system)에 놓인 유체는 테일러-프라우드만 효과(Taylor, 1921; Proudman, 1916)의 영향으로 주로 2차원 운동을 하는 것으로 알려졌다. 다시 말하면 회전하는 유체는 연직 방향(즉, 회전축에 나란한 방향)으로 속도 변화가 없게 된다. 이때 유체는 마치 연직 방향으로 딱딱하게 굳는 것처럼 변한다(Vallis, 2006).

회전 원판을 작동시키고 실험에 따라 회전 테이블을 작동 시킨 후 20분 동안 그대로 두었다. 이는 수조 안의 물의 흐름이 안정화 되기를 기다린 것이다. 이후 수조의 남쪽 경계의 양 구석에 파란색 잉크를 떨어뜨려 시간에 따른 흐름 변화를 관찰하였다. 이때 남쪽은 SB\_f1과 SB\_f0는 물 깊이가 깊어지는 방향이며 FB\_f1과 FB\_f0는 실험 결과 비교를 위하여 임의로 정했다.

## 실험 결과

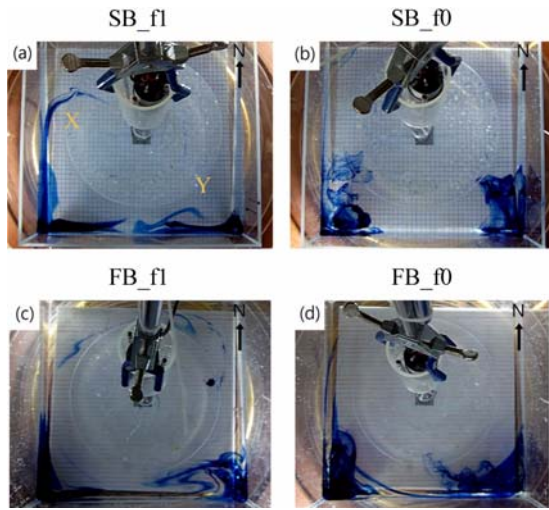
회전 원판을 작동시키고, 두 실험(SB\_f1, FB\_f1)의 경우 회전 테이블을 작동 시킨 후 20분 동안 그대로 두었다. 이는 정지한 상태에서 실험 장치를 작동시킬 때 발생한 수조 안의 미세규모 운동의 영향을 최소화하기 위해서이다. 우리는 여러 번 실험을 통해 약 20분이 지나면, 수조 속의 흐름이 관찰하고자 하는 순환

으로 적응된다는 것을 알았다. 만약 수조의 크기, 테이블과 원판의 회전 속도 등을 다르게 구성하면 초기 안정화 시간을 적절히 조절해야 할 것이다.

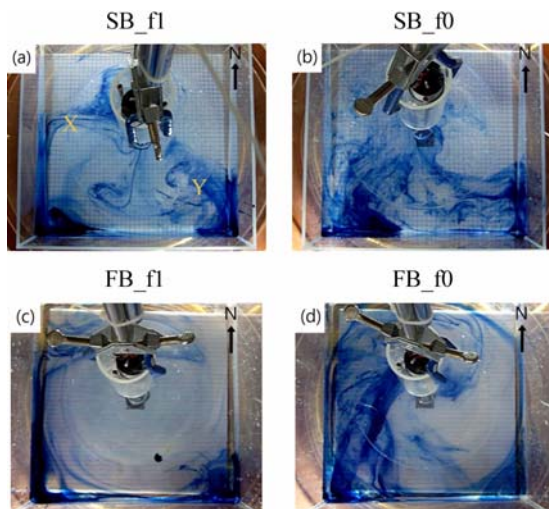
Fig. 2는 잉크를 떨어뜨리고 15초 후의 모습이다. 테이블이 회전할 때(Fig. 2a, 2c)와 그렇지 않는 경우(Fig. 2b, 2d)를 비교하면 서로 다른 점을 찾을 수 있다. 테이블이 회전한 경우, 즉 코리올리 힘이 있을 때는 잉크가 이루 되는 형태가 큰 순환으로 나타나고 있다(Fig. 2a, 2c). 반면 코리올리 힘이 없는 경우 잉크는 떨어뜨린 곳에 아직 머물러 있는 듯이 보인다(Fig. 2b, 2d). 코리올리 힘의 유무에 따른 이 차이가 내포하는 의미는 아주 크다. 모든 실험에서 물에 작용하는 바람 응력의 크기와 방향이 같은 것을 고려하면, 큰 규모의 순환이 발생하기 위해선 코리올리 힘이 필요함을 알 수 있다. 만약 코리올리 힘이 없을 때 초기 외부 강제력에 의한 대기와 해양의 위치에너지는 곧바로 운동에너지로 전환되면서 중력파에 의해 사라질 것이다(Gill, 1982).

베타효과와 서안경계류의 관련성은 Fig. 2a와 Fig. 2c를 통해 짐작할 수 있다. 바닥경계와 테이블 회전에 의해 발생하는 베타효과는 수조의 서쪽 경계에 좁고 빠른 흐름을 만들고 있다(Fig. 2a). 특히 이 흐름은 X 부근에서 경계를 벗어나 동쪽으로 향하고 있다. 이 모습은 실제 해양의 서안경계류 분리(Adamec, 1997)와 비슷하다. 몇몇 연구들은 이 서안경계류의 분리에 영향을 주는 요인을 다루고 있다(Haidvogel et al., 1992). 동쪽 경계부근(Y)에는 잉크를 떨어뜨린 지 얼마 되지 않기에 아직 뚜렷한 특징이 나타나지 않는다. 베타효과가 포함된 경우와 달리 테이블 회전에 의해서 생성된 일정한 코리올리 힘만 존재하는 경우(Fig. 2c)는 서쪽 경계에서 빠른 순환과 경계를 벗어나 동쪽으로 분리되는 흐름이 뚜렷이 나타나지 않는다. 그리고 이 경우는 오른쪽 위 구석에 까지 잉크가 순환되고 있다.

시간이 흐르면서 앞에서 다룬 여러 특징이 좀 더 자세히 나타난다(Fig. 3). 특히 이 연구의 주된 목적인 베타효과가 있을 때와 단순히 코리올리 힘만 있을 경우의 차이가 명확히 드러난다. 먼저 실험 SB\_f1의 경우, 서쪽 경계의 좁은 흐름과 X의 동쪽으로 향하는 흐름이 뚜렷하다. 그리고 Y를 포함한 수조 안의 대부분 영역에서 남쪽으로 향하는 흐름이 나타난다. 이는 Sverdrup 평형으로 설명할 수 있는데, 이것은 북반구 고기압성 바람응력이 해양에 작용할

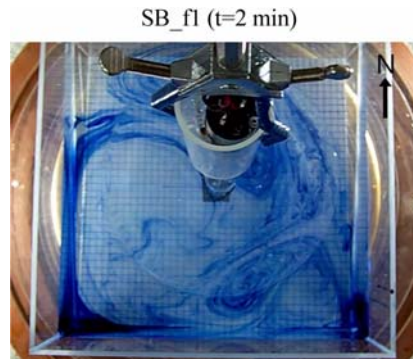


**Fig. 2.** Photographs of the circulations revealed by advection of dye at 15 sec after dye injection in the (a) SB\_fl, (b) SB\_f0, (c) FB\_fl and (d) FB\_f0 experiments. Note that the arrows in the upper-right corner indicate the northward direction in the SB\_fl and SB\_f0, which is also consistent with the direction of the decreasing depth in water. In FB\_fl and FB\_f0, however, arrows are used for only comparison and point out the arbitrary direction. X and Y indicate the WBC separation and eastern boundary regions, respectively.

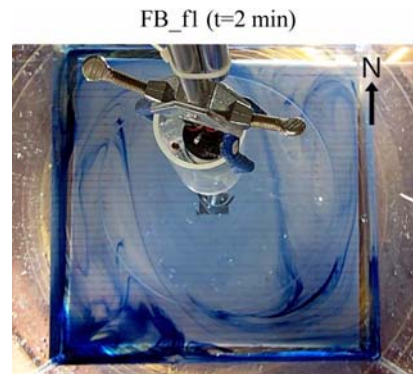


**Fig. 3.** Same as Fig. 2 except for photographs at 1 min later.

때 베타효과로 인하여 해류는 남쪽으로 흐르게 됨을 말한다(Sverdrup, 1947). 따라서 서안경계류가 나타나는 서쪽 경계 부근은 수조 내부의 다른 영역과(특히 Y주위의 남쪽으로 향하는 흐름이 나타나는 영역) 달리 스베드럽 평형이 깨지는 곳이라 할 수 있다



**Fig. 4.** Photographs of the circulations of the SB\_fl experiment at 2 min later.



**Fig. 5.** Same as Fig. 4 but for the experiment of FB\_fl.

(Pedlosky, 1987). 왜냐하면, 이곳에서는 스베드럽 평형이 적용되는 곳과는 달리 북쪽으로 해류가 흐르기 때문이다.

반면 실험 FB\_fl는 코리올리 힘의 영향은 받지만 그 힘의 크기가 일정할 때를 나타내고 있다. 베타효과가 있을 때와는 달리 남쪽으로 흐르는 영역, 즉 스베드럽 영역이 뚜렷하지 않는다. 그리고 서쪽경계의 흐름이 중간에서 분리되지 않고 북쪽 경계에 이르고 있다. 이후 북쪽 경계를 따라 동쪽으로 향하는 흐름이 나타난다. 그러나, 이 흐름은 Fig. 3a에서 나타나는 것과 역학적으로 다른 과정을 통해 발생한 것으로 추측할 수 있다.

코리올리 힘의 위도변화 효과, 즉 베타효과의 영향은 잉크를 넣고 2분이 지나면서 더 두드러진다(Fig. 4와 Fig. 5). SB\_fl의 순환은 실제 해양의 순환처럼 그 중심이 서쪽으로 치우쳐 나타난다. 수조 안에서 물은 서쪽 경계의 좁은 흐름, 분리돼 동쪽으로 향하는 흐름과 대부분 영역에서 나타나는 남쪽 방향의

흐름을 통해 순환하고 있다. 따라서, Fig. 4는 실제 북태평양이나 북대서양에서 나타나는 주된 특징을 잘 보여주고 있다고 말할 수 있다. 그러나 일정한 코리올리 힘만 있을 경우(FB\_fl)는 서쪽으로 중심이 치우치거나, Sverdrup 영역 등을 찾을 수 없다. 오히려 전체 흐름이 회전대칭(약  $180^\circ$ ) 특징을 보인다. 이는 일정한 코리올리 힘이 존재하고 기압경도력과 같은 다른 힘이 없을 때, 바람 강제력에 의해 발생하는 관성류(inertial flow)로 설명할 수 있다(Gill, 1982; Holton, 2004). 이때 바람 강제력에 의해 북반구 해양의 물은 시계방향으로 회전하게 된다.

끝으로 3절에서 언급한 테일러-프라우드만 효과(Taylor, 1921; Proudman, 1916)를 Fig. 3을 통해 이해하려 한다. 다시 말하면, 이 효과는 회전하는 유체 내부의 운동은 연직방향으로 일정하게 나타나는 것을 의미한다. 따라서 외부 강제력을 고려하지 않는다면 회전하는 유체는 주로 2차원 운동을 할 것이다. 회전하는 테이블에 놓은 수조(Fig. 3a, Fig. 3c)에 비해 정지한 채 있는 수조(Fig. 3b, Fig. 3d)의 잉크가 더 넓게 확산돼 있는 것을 알 수 있다. 3분 후쯤에는 정지한 채 있는 수조는 물의 흐름을 더 이상 파악할 수 없을 정도로 잉크가 확산되는 것을 확인할 수 있었다. 반면에 실험 SB\_fl와 FB\_fl 수조는 그때에도 순환의 모습을 알아볼 수 있다.

이 차이점에 대하여 테일러-프라우드만 효과를 고려하여 다음과 같은 설명이 가능하다. 잉크 분자운동에 의한 확산을 고려하지 않는다면, 유일한 강제력인 회전 원판에 의해 생성된 순환이 잉크를 주로 확산시킬 것이다. 물이 2차원 순환을 할 때보다는 3차원 순환을 할 때 이 확산은 더 두드러질 것이다. 회전 테이블에 놓은 SB\_fl과 FB\_fl의 수조는 주로 2차원 순환(테일러-프라우드만 효과)을 하므로 3차원 순환이 가능한 SB\_f0와 FB\_f0의 수조보다는 잉크의 확산이 더디게 나타난다.

## 요약 및 토의

우리는 서안경계류의 발생 과정을 이해하기 위한 실험 장치와 방법을 개발하였다. 실험장치는 지구물리유체역학 연구에 흔히 사용되는 회전테이블과 수조 등으로 구성된다. 서안경계류 발생의 주요 원인인 베타효과를 구현하기 위해 기존 연구(Pedlosky and

Greenspan, 1967; Beardsley, 1969)와 비슷하게 수조의 바닥에 경사를 두었다. 바닥 경사로 수조 속의 물의 깊이가 변하게 되면서 코리올리 힘의 위도에 따른 변화 효과(즉, 베타효과)와 비슷한 효과가 나타난다. 북반구 중위도 해양에서 나타나는 바람 응력은 시계방향으로 회전하는 원판을 물 상부에 대어 구현하였다.

베타효과와 코리올리 힘 등이 해수의 순환에 미치는 영향을 파악하기 위하여 4개의 실험을 실시하였다. 수조의 바닥 경사가 있고 테이블이 회전할 때, 즉 베타효과가 존재하는 경우 물의 흐름은 실제 북반구 중위도 해양의 순환과 매우 유사한 모습을 보였다. 여기서 우리는 서안경계류의 특징인 서쪽 경계에서 나타나는 좁고 강한 흐름, 경계에서 분리되어 동쪽으로 향하는 모습 등을 볼 수 있었다. 반면에 바닥 경사가 없는 수조를 사용하여 코리올리 힘만 있는 경우는 시계방향으로 회전하는 대칭적 흐름을 보였다. 이 경우는 갑작스런 바람에 의해 해양 표면에서 나타날 수 있는 관성류와 비슷한 역학적 특징을 나타냈다. 우리는 또한 회전계에 놓인 유체의 특징인 테일러-프라우드만 효과를 볼 수 있었다. 즉, 회전하는 테이블에 놓인 수조는 베타효과와 유무에 상관없이 2차원에 가까운 물의 흐름을 나타냈다.

서안경계류는 북반구 중위도 해양 순환의 중요한 특징이며 고등학교 과정과 대학 교양과정에서 중요하게 다루고 있다. 우리가 개발한 실험 장치와 방법은 학교 현장에서 중위도 해양 순환을 이해시키는데 큰 도움을 줄 것으로 판단된다. 뿐만 아니라, 간단한 실험 장치와 방법이지만, 지구물리유체역학에서 중요하게 다루는 회전 유체의 특징을 살펴보는 데도 무리 없이 사용될 수 있을 것이다. 현재 우리가 개발한 실험 장치와 방법을 교육 현장에 적용하고, 그 교육적 활용 가치를 평가하는 연구를 진행하고 있다.

## 사 사

이 연구는 기상청 기상지진기술개발사업(CATER 2008-4408)의 지원으로 수행되었습니다. 세심한 심사와 조언을 주신 소선섭 교수님, 이은정 박사님과 중요한 오류를 수정해주신 윤일희 교수님께 감사 드립니다. 그리고 그래픽 작업에 도움을 준 강솔잎 학생께 감사 드립니다.

## 참고문헌

- 소선섭, 이규현, 윤성석, 김명환, 손정호, 전창근, 진수광, 1995, 회전 원통수조 실험의 파동유형 분석. 한국기상학회지, 31, 159-168.
- 소선섭, 신흥렬, 김명환, 윤성석, 손정호, 윤진석, 진수광, 전창근, 1997, 회전수조에서 나타나는 경압불안정파의 내부구조. 한국기상학회지, 33, 753-764.
- 조희형, 최경희, 2008, 과학교육의 이론과 실제. 교육과학사, 서울, 734 p.
- 한국지구과학회, 2002, 지구과학개론. 교학연구사, 서울, 818 p.
- Adamec, D., 1997, Western boundary current separation sensitivity studies using a quasigeostrophic ocean model. *Journal of Physical Oceanography*, 27, 798-809.
- Beardsley, R.C., 1969, A laboratory model of the wind-driven ocean circulation. *Journal of Fluid Mechanics*, 38, 255-271.
- Cenedese, C. and Whitehead, J.A., 2000, Eddy shedding from a boundary current around a cape over a sloping bottom. *Journal of Physical Oceanography*, 30, 1514-1531.
- Gill, A.E., 1982, *Atmosphere-ocean dynamics*. Academic press, San Diego, USA, 662 p.
- Greenspan, H.P., 1965, On the general theory of contained rotating fluid motions. *Journal of Fluid Mechanics*, 22, 449-462.
- Griffiths, R.W. and Veronis, G., 1997, A laboratory study of the effects of a sloping side boundary on wind-driven circulation in a homogeneous ocean model. *Journal of Marine Research*, 55, 1103-1126.
- Haidvogel, D.B., McWilliams, J.C., and Gent, P.R., 1992, Boundary current separation in a quasigeostrophic eddy-resolving ocean circulation model. *Journal of Physical Oceanography*, 22, 882-902.
- Hartmann, D.L., 1994, *Global Physical Climatology*. Academic Press, San Diego, USA, 411 p.
- Hide, R., 1953, Some experiments on thermal convection in a rotating liquid. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 79, 161, doi:10.1002/qj.49707933916.
- Hide, R., 1958, An experimental study of thermal convection in a rotating liquid, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 250, 441-478.
- Holton, J.R., 2004, *An introduction to dynamic meteorology*. Academic press, San Diego, USA, 535 p.
- Mallock, A., 1896, Experiments on fluid viscosity, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character*, 187, 41-56.
- MIT, 2010, <http://ocw.mit.edu/OcwWeb/Earth--Atmospheric-and-Planetary-Sciences/12-003Fall-2008/Labs/detail/lab13.htm> (검색일: 2010. 1. 5.)
- Mellor, G.L., 1996, *Introduction to physical oceanography*. Springer-Verlag, New York, USA, 453 p.
- Pedlosky, J., 1987, *Geophysical fluid dynamics*. Springer-Verlag, New York, USA, 710 p.
- Pedlosky, J., 1996, *Ocean circulation theory*. Springer-Verlag, Berlin, Germany, 453 p.
- Pedlosky, J. and Greenspan, H.P., 1967, A simple laboratory model for the oceanic circulation. *Journal of Fluid Mechanics*, 27, 291-304.
- Pierini, S., Malvestuto, V., Siena, G., McClimans, T.A., and Løvås, S.M., 2008, A Laboratory Study of the Zonal Structure of Western Boundary Currents. *Journal of Physical Oceanography*, 38, 1073-1090.
- Proudman, J., 1916, On the motion of solids in a liquid possessing vorticity. *Proceedings of the Royal Society of London, Series A*, 92, 408-424.
- Siemens, C.W., 1866, On uniform rotation. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 156, 657-670.
- Stommel, H., 1948, The westward intensification of wind-driven ocean currents. *Transactions American Geophysical Union*, 29, 202-206.
- Sverdrup, H.U., 1947, Wind-driven currents in a baroclinic ocean; with application to the equatorial currents of the eastern Pacific, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 33, 318-326.
- Taylor, G.I., 1921, Experiments with rotating fluids. *Proceedings of the Royal Society of London, Series A*, 100, 114-121.
- Vallis, G.K., 2006, *Atmospheric and oceanic fluid dynamics: Fundamentals and large-scale circulation*. Cambridge University Press, Cambridge, USA, 745 p.

---

2010년 2월 8일 접수  
 2010년 2월 12일 수정원고 접수  
 2010년 2월 17일 채택