

Circular Annulus 내 회전 이층유체 실험

황병준¹ · 나정열

¹기상연구소 원격탐사연구실, 한양대학교 지구해양과학과

Laboratory Experiments on Rotating Two-layered Fluid in Circular Annulus

BYONGJUN HWANG¹ AND JUNGYUL NA

¹Remote Sensing Research Laboratory, Meteorological Research Institute, Seoul 110-360, Korea
 Department of Earth and Marine Sciences, Hanyang University, Ansan 425-791, Korea

본 이층 유체 실험의 목적은 하층유체가 외부유체의 유입·유출로 움직일 때 그에 따른 상층유체의 경압적인 응답을 연구하는 것이다. 최근에 관측된 동해 심층해류의 순압성 특성(Takematsu *et al.*, 1994; 한국해양연구소, 1997)을 고려할 때 상층은 이러한 동해 심층수의 움직임을 경계면의 변형을 통해 느낄 수 있을 것이다. 본 실험은 이러한 경계면의 변형에 영향을 주는 요인들을 연구함으로써 전체적인 동해의 해수순환 혹은 국지적인 해수순환을 파악하고자 하였다. 정상적(steady)인 축대칭의 유입 혹은 유출실험은 균질 유체의 경우, 축대칭의 지형류를 야기시키며 이층유체의 하층유체 흐름도 유사한 특성을 가졌다. 그러나 로스비 수(ϵ) 혹은 내부 프라우드 수(f_2)가 증가하면서 하층유체의 운동은 경계면 변형에 영향을 받았다. 상층유체의 최대속도는 ϵf_2 에 매우 의존적이며, 그 흐름은 거의 포물선 형태를 보였다. 관찰된 상·하층유체의 속도로부터 계산된 경계면의 기울기는 ϵf_2 에 따라 커졌다. 즉 ϵf_2 의 증가는 이층유체가 순압적인 구조에서 경압적인 구조로 바뀌게 하였다.

The purpose of this study is to investigate the baroclinic response of the upper-layer of two-layered fluid when the lower-layer motion is driven by pumping an external fluid into the lower-layer or by pumping out the lower-layer fluid. Recent observations of the barotropic nature of deep water movements in the East Sea (Takematsu *et al.*, 1994; KORDI, 1997) may suggest a possibility of interaction between the upper and lower layer via interface tilting. For homogeneous fluid, steady and axisymmetric source or sink causes axisymmetric geostrophic flow, and the lower-layer motion in two-layered fluid was similar to homogeneous flow. But as Rossby number (ϵ) or internal Froude number (f_2) increases, the lower-layer motion was affected by the interface tilting. The interface tilting calculated based on the observed azimuthal velocities of upper- and lower-layers becomes greater as ϵf_2 increases. In other words, the increase of the ϵf_2 changes the barotropic system to baroclinic system.

서 론

해수 순환을 회전 유체 실험을 통해서 모델링하려는 시도중 해상풍에 의한 효과는 경계면 마찰(Beardsley, 1969; Hart, 1972; Krishnamurti and Na, 1978)과 외부유체의 유입 혹은 유출(Stommel, *et al.* 1958; Kuo and Veronis, 1971; 나와 최, 1993)에 의해서 주어졌다. 해양의 성층화를 고려한 이층유체의 실험은 Krishnamurti and Na(1978)에 의해 시도되었으며, Hart(1972)는 점성율이 다른 유체를 이용해 이층유체를 만든 후 경압성 불안정에 대한 실험을 수행하였다. 그는 실험을 통해서 로스비 수($\epsilon = \frac{\xi}{2\Omega a E_v^{1/2}}$, a =annulus의 폭)와 내부 프라우드 수($f = \frac{4\Omega^2 a^2}{g'H}$,

$g' = g \times \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2}$)가 충분히 작을 때는 축대칭의 정상류 상태에

있다가 특정한 (ϵ, f)가 되면 비축대칭적인 흐름으로 전이됨을 관찰하였다. 그 후 나와 최(1993)는 sliced-cylinder에서 하층유체에 rim-source 또는 sink를 주었을 때 상층유체의 흐름이 상층의 내부 프라우드 수 f_1 에 의해 민감하게 반응하는 것을 관찰하였다. 즉 f_1 이 6보다 클 때 몇 개의 폐쇄순환이 나타났다. 특히 f_1 이 커질수록 서안에서 관찰되는 폐쇄순환의 수가 많아지며 그 분리점이 북쪽으로 치우쳤다. 나와 최(1994)는 이층유체 실험을 극전선 모의 실험에 적용하여 경압적인 로스비 파를 관찰하기도 하였다. 이러한 이층유체 실험을 살펴본 결과 상·하층유체의 흐름은 내부 프라우드 수 f 에 민감하다는 것을 알 수 있었다. 하지만 sliced-cylinder의 경우 열려진 등심선으로 인해 저 주파수의 비선형항이 존재하므로 이층 유체의 기본적인 역학을 이해하는

* 본 연구는 1997년도 교육부 기초과학육성 연구비의 지원에 의한 것임.

데 어려움이 있었다. 이와는 반대로 닫혀진 계에서의 실험은 훨씬 더 분명하게 기본적인 이중 유체운동의 특성을 파악하게 해주리라 기대된다. 따라서 본 실험에서는 닫혀진 등심선을 가지는 circular annulus 내에서 회전 이중유체 실험을 수행하였다. circular annulus 내에서 실험을 함으로서 얻을 수 있는 장점은 기존의 sliced-cylinder에 비해 닫혀진 등심선으로 인한 정상적(steady)인 지형류를 기대할 수 있다는 것이다. 본 실험은 하층 유체에 외력(외부유체의 유입·유출)을 주었을 때 상·하층 유체의 흐름을 관찰하고 관찰된 흐름을 여러 요인들로 분석하여 특징을 짓고 경계면의 변형과 이중유체 운동과의 상관관계에 대하여 살펴보았다. 먼저 이중유체 실험 전에 균질유체 실험을 선행하여 외력에 의한 균질유체의 영향을 고찰하여 외력에 의한 하층유체의 운동을 파악하는데 도움을 얻고자하였다. 본 실험은 닫혀진 계에서 하층유체의 운동에 의한 상층유체의 적응을 파악하고 그로 인한 경압적인 경계면의 변형정도를 파악하는데 중점을 두었다.

동해는 북위 약 40°에 나타나는 극전선을 중심으로 북쪽의 냉수역과 남쪽의 난수역으로 나누어지며 냉수역은 여름철에 계절적으로 형성되는 표층수를 제외하면 전층이 상대적으로 균질한 냉수로 이루어져 있는 반면 난수역은 고온의 대마난류수가 냉수와의 사이에 영구 수온약층을 형성하고 있는 이중 구조를 이루고 있다. 실제 동해의 경우 이중유체의 특성을 살펴봄으로써 북부 냉수역의 겨울철 강한 바람의 효과(나 등, 1992)가 남부 난수역의 상층에 미치는 영향을 파악하는데 도움을 줄 수 있다. 동해의 심층수는 수온구조가 거의 균질하므로 북부해역 심층수 상층에서의 해상풍 효과가 냉수역은 물론 난수역의 심층수 전체에 나타나리라 생각된다. 실제로 최근의 해류관측치(Takematsu *et al.*, 1994)를 보면 북부해역의 심층에서 강한 순압적인 해류가 존재한다. 그리고 남북 분지를 연결하는 울릉도와 독도 사이의 심층에서도 강한 해류가 존재함(한국해양연구소, 1997)이 관측되었다. 이러한 동해 심층수의 운동에 의한 동해 남부 상층의 운동은 수온약층을 경계로 하는 경계면의 변형에 의해 크게 좌우된다. 이때 경계면의 변형이 어떠한 요인에 큰 영향을 받는지를 파악하는 것은 이중 구조를 이루고 있는 동해 남부 해수순환의 기본적인 역학을 파악하는데 도움이 되리라 생각된다. 물론 실제 해양순환은 순압적인 흐름과 경압적인 흐름이 혼합되어있다고 할 수 있다. 그리고 경압적인 경계면 변형에 따른 지형류 조절은 대기의 운동과는 달리 해수의 움직임에 의해서 생긴 속도장을 압력장이 따라 가는 형태를 가진다. 즉 동해 심층수에 의한 흐름이 속도장을 변화시켜 이에 따른 압력장 또는 경계면의 변화를 야기시킨다. 동해 남부해역의 상층은 그러한 경계면의 변형에 영향을 받는 경압적인 요소가 크다. 본 실험에서는 동해 해수순환에 영향을 미치는 다른 외적인 힘들, 즉 동해 북부해역에서의 냉수 침강, 대한해협으로의 난류 유입과 쓰야, 쓰가루 해협을 통한 유출은 고려되지 않았다. 이러한 외적인 힘들들 주 힘으로 한 실험은 과거 실험들(나와 최, 1993; 나와 황, 1995)을 통해서 이루어졌다.

실험장치 및 방법

본 실험에서 사용된 용기는 아크릴 재질로 만들어 졌으며 높

이는 30 cm, 내부 실린더의 외경은 10 cm, 외부 실린더의 내경은 19 cm이며 circular annulus의 폭은 9 cm이다(Fig. 1). Annulus 내 유체의 온도를 일정하게 유지하기 위해서 Annulus 안과 바깥으로 실험유체와 같은 온도를 가지는 유체를 넣어서 온도차로 인한 온도풍 효과를 제거하였다. 특히 회전반 실험시 실험유체의 온도변화는 잘못된 실험결과와 직결되므로 보온재를 이용하여 만든 작은 방 내에 회전반을 위치함으로써 온도차를 최대한 적게 유지하였다. Annulus 용기 내 유체의 유입, 유출은 바닥에서 부터 외측벽면의 약 0.5 mm 내외의 틈을 통해서 측대칭으로 고르게 이루어지도록 하였다(Fig. 1). 본 실험에서 에크만 층 두께($\delta_E = aE^{1/2}$)는 약 0.2~0.3 cm로 유체의 유출입 틈이 작기 때문에 외부유체가 에크만 층 내에서 내부유체로 퍼짐으로 내부유체에 교란을 주지 않고 고른 상승효과를 줄 수 있다(Kuo and Veronis, 1971). 유체의 운동을 관찰하기 위해 약 1 m 높이에 VCR과 카메라를 설치하여 유체의 연속적인 흐름과 순간적인 전체 유체의 운동을 관찰하였다. 유체의 속도는 VCR을 통해서 녹화된 화면을 분석함으로써 이루어졌다. 본 실험의 경우 아주 느린 속도의 유체의 흐름을 관찰하기 위해서 pH 지시약법을 사용하였다. 이 방법은 작업유체의 pH를 변화시킴으로써 가시화 하기 때문에 착색된 유체가 중성 부력(neutral buoyancy)을 유지할 수 있고 그 확산정도가 적기 때문에 느린 유체의 흐름의 정량적인 관찰이 가능하다(Baker, 1966). 작업 유체는 수산화나트륨 용액에 티몰 블루 용액을 섞어서 시각적으로 관찰이 용이하도록 하였다. 이때

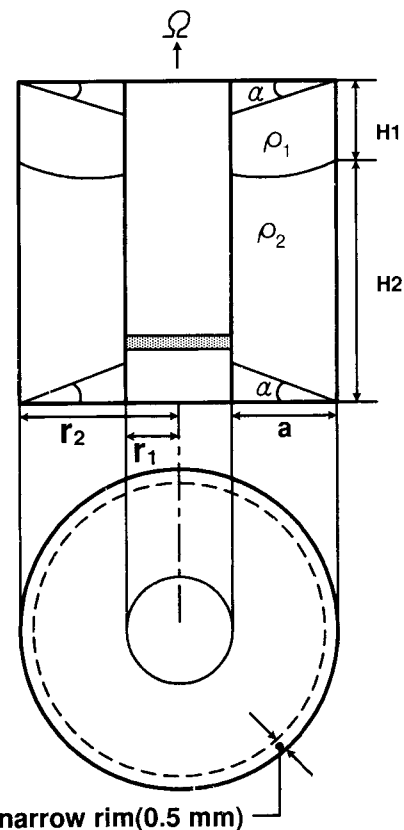


Fig. 1. Geometry of Rotating, Circular Annulus: $\rho' (= \rho_2 - \rho_1) = 0.007$, $H_1 = 4$ cm, $H_2 = 8$ cm, $a = 9$ cm, $\tan \alpha = 0.1$, inner radius (r_1) = 10 cm, outer radius (r_2) = 19 cm. The fluid is injected through "narrow rim" into interior of the annulus.

전극선의 전압은 2~3 Volt 정도로 낮은 전압을 사용하여 생성된 수소이온들이 기포화되는 것을 막았다. 또한 용액속에 설치된 전극선은 기존의 유체 운동에 영향을 주지 않도록 두께가 약 0.01 mm인 전극선을 사용하였으며, 이 경우 레이놀드 수 ($Re = |\epsilon|/E_0$)가 약 1.7~4 이므로 전극선으로 인한 흐름의 영향을 무시할 수 있다.

균질유체 실험

해상도 효과를 대체할 수 있는 유입 혹은 유출로 인한 균질 유체 운동의 특성을 파악하고자 annulus 내에서 실험을 수행하였다. 이때 외부유체는 바깥쪽 경계면을 따라 일정량의 유체가 정상적(steady)으로 유입 또는 유출되게 하였다. 바깥쪽 면을 따라 들어간 외부유체는 실험용기의 바닥과 벽면의 $O(E_v^{1/2})$ 의 얇은 에크만 층을 통해 내부로 스며든다. 스며든 외부 유체로 인해 수심중가가 야기되며 이에 대해 균질유체는 양의 와도를 가지게 된다. 먼저 β -표면(Na and Hwang, 1996)을 씌우지 않고 자유표면에서 균질유체 실험을 하였다. 이때 균질유체를 외부로 유출시키면서 비디오를 통해서 한 지점에서 연속적인 염료선(dye-line)을 관찰했으며 카메라를 이용해서 전체적인 흐름의 형태를 관찰하였다. 이러한 관찰은 균질유체가 완전히 강제회전인 것을 확인한 후 행해졌다. 그 후 β -표면을 씌운 후 동일한 실험을 반복하였다. 이어 β -표면을 약간 기울인 후 실험을 하였다.

이층유체 실험

하층유체의 운동에 따른 상층유체의 적응을 관찰하기 위해 이층유체 실험을 수행하였다. 이를 위해서 이층유체의 제작이 관건이다. 상·하층유체의 경계면 마찰을 최소화하기 위해서 하층유체로는 전분회석유체를 사용하였으며 상층유체는 티몰 블루 용액을 사용하였다. 상·하층유체를 동시에 관찰하기 위해서는 상·하층유체 모두 동일하게 티몰 블루 용액을 사용하였으나 하층유체의 경우 전분회석유체를 섞어서 밀도차가 나도록 하였다. 이때 상·하층유체의 밀도차는 $O(10^{-3})$ 이 되게 하였다. 상층유체의 경계면 조건은 두가지 경우로 주었다. 첫 번째 경우는 상층 유체가 자유표면을 가지고 하층유체는 경사면($\tan\alpha=0.1$)을 가지는 경우로 강제회전 확인 후 하층유체에 외부유체를 유입 혹은 유출시킴으로써 이루어졌다. 두 번째 경우는 상층유체에 하층유체의 경사진 면과 같은 기울기를 가지는 β -표면을 씌운 후 동일한 실험을 수행하였다.

실험결과 및 토론

균질유체 실험

Fig. 2는 자유 표면인 경우 균질유체의 운동을 관찰한 것이다. Fig. 2a는 전체적인 흐름의 형태를 카메라를 이용해 관찰한 것이고 Fig. 2b는 한 지점을 VCR을 이용해 관찰한 것이다. 전체적인 흐름의 모양을 관찰하기 위해서 한 전극선에 전류를 20 초마다 통하게 하여 연속적인 흐름의 형태를 관찰하였고 나머지 전극선은 계속해서 전류를 통하게 해서 전체적인 흐름의 형태를 관찰하였다. 한 지점에서 계속 관찰된 염료선을 보면 축류

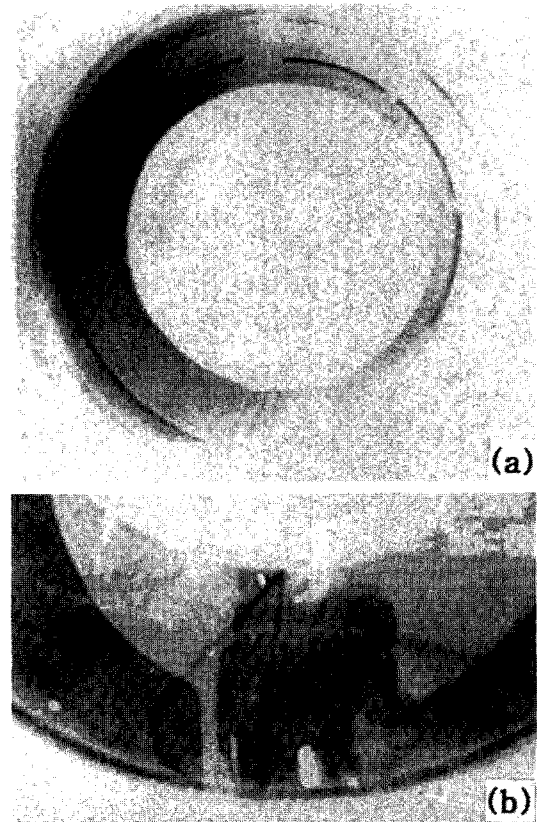


Fig. 2. Flow patterns of homogeneous fluid with free surface showing an axisymmetric (a) and parabolic (b) motion of fluid.

(azimuthal velocity)가 바깥으로 가면서 커지다가 급격히 감소하는데 이는 측면의 마찰 경계면에 의한 것으로 사료된다. 그리고 전극선 두 지점에서 연속적으로 나오는 염료선이 축을 따라서 흐르는 것이 특징이다. 유체 흐름의 최대속도는 ϵ 의 값이 증가함에 따라 함께 증가하였다.

ELCC(Ekman Layer Compatibility Condition)을 이용해 (Pedlosky, 1986) 실험용기 내의 균질유체에 대한 선형 와도 방정식을 유도하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\nabla^2 P) = \xi - \beta_0 \frac{\partial P}{\partial \theta} - E_v^{1/2}(\nabla^2 P) \quad (1)$$

위의 식에서 유체가 정상류인 경우 좌변항이 영이 됨으로

$$\nabla^2 P + \frac{2\beta_0}{E_v^{1/2}} \frac{\partial P}{\partial \theta} = \frac{\xi}{E_v^{1/2}} \quad (2)$$

이 되며 여기서 ξ 는 자유표면의 상승(하강)속도이고 $E_v^{1/2} (= \frac{v}{2\Omega H^2})$ 는 수직 에크만 수, $\beta_0 (= \frac{a \tan \alpha}{H})$ 는 지형효과, Ω 는 회전반의 회전속도, a 는 circular annulus의 폭, H 는 최고수심, $\tan \alpha$ 는 바닥의 기울기이다. 이 식의 내부압력(P)는 $P_r(r) + E^{1/2} P_\theta(r, \theta)$ 의 해를 가지는데 자유표면인 경우 P_r 는 $\frac{\xi}{2E_v^{1/2}} r^2$ 로 주어지며 $P_\theta(r, \theta)$ 는 θ 방향의 비축대칭적인 유입 혹은 유출에 의한 $O(E_v^{1/2})$ 의 교정 항이다. 본 실험의 경우 측면 경계면이 없다면 축대칭적인 유입 혹은 유출이 이루어짐에 따라 $E^{1/2} P_\theta(r, \theta) = 0$ 인

축대칭류를 기대할 수 있다. 따라서 실제로 관찰된 축류의 최대 속도를 그 유체의 특징적인 속도로 할 때, 최대속도와 $\xi/E_v^{1/2}$ 는 선형적인 관계를 가진다. 내부 유체가 축대칭류인 경우 흐름은 식 3과 같이 된다.

$$\nabla^2 P = \frac{\xi}{E_v^{1/2}} \quad (3)$$

이러한 축류의 속도는 식(4) 이고 no-slip 경계 조건을 고려하면

$$v = \frac{\partial P}{\partial r} = \frac{\xi}{E_v^{1/2}} r \quad (4)$$

$$v = \frac{\xi}{E_v^{1/2}} r (1 - \exp(-\frac{r-1}{l})) \quad \text{where, } l = \frac{E_h^{1/2}}{E_v^{1/4}} \quad (5)$$

식 5와 같이 쓸 수 있다(Pedlosky, 1979). 여기서 $E_h^{1/2} (= \frac{v}{2\Omega a^2})$ 는 수평 에크만 수이다. 이때 이론적인 축류의 최대속도는 $\xi/E_v^{1/2}$ 이나 Fig. 3에서 보는 것과 같이 자유 표면을 갖는 균질유체 실험의 경우에는 $0.78 \xi/E_v^{1/2}$ 의 결과를 얻었다. 실제로 관찰된 최대속도가 약 30% 정도 감소된 것은 측면 마찰 경계면에 의해서이다. 이 때 측면 마찰경계층의 두께($l = E_h^{1/2}/E_v^{1/4}$)는 약 1 cm 정도이다. 측면 경계층(l) 내에서는 유체의 침강이나 상승이 없고 단지 no-slip 조건만이 성립한다. 외부유체의 유입시 측면경계층 내에서의 유체의 상승은 $O(E^{1/2})$ 의 얇은 층 내에서 이루어진다.

식 5에서와 같이 no-slip 조건을 만족하는 이론적인 축류의 속도와 실제 관찰된 축류의 속도를 비교한 결과, 내부 유체의 흐름은 물론 측면 경계층 내에서도 일치하였다(Fig. 4). 상층 표면에 β -표면을 가지는 경우 흐름의 형태는 자유표면을 가지는 경우와 같지만 ε 가 같은 값을 가질 때 자유표면에서 최대속도보다 β -표면일 때의 최대속도가 약 2 배 감소한다. 이는 회전유체의 윗뚜껑이나 밑판이 $O(\varepsilon)$ 로 spin-down 혹은 spin-up 시에 경계면 마찰로 인해 내부 지형류 속도가 약 50% 감소하는 일반적인 회전유체의 성격을 반영하는 것이다(Friedlander, 1980).

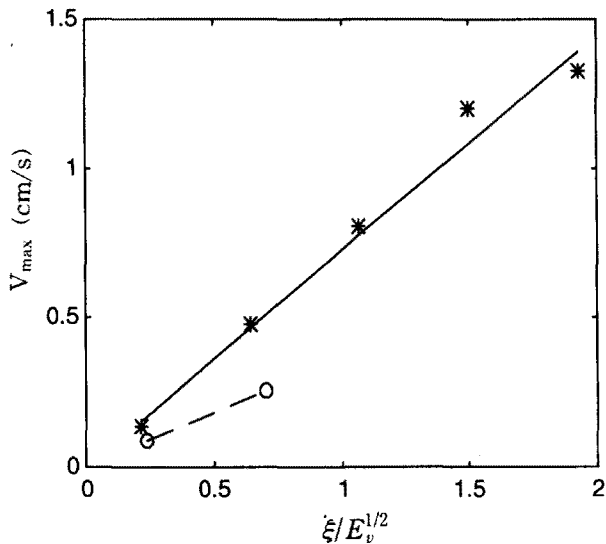


Fig. 3. Maximum velocities (V_{max}) versus $\xi/E_v^{1/2}$ with free surface (star) and β -surface(open circle). Slopes of the solid line (free surface) and dashed line (β -surface) are 0.78 and 0.32, respectively.

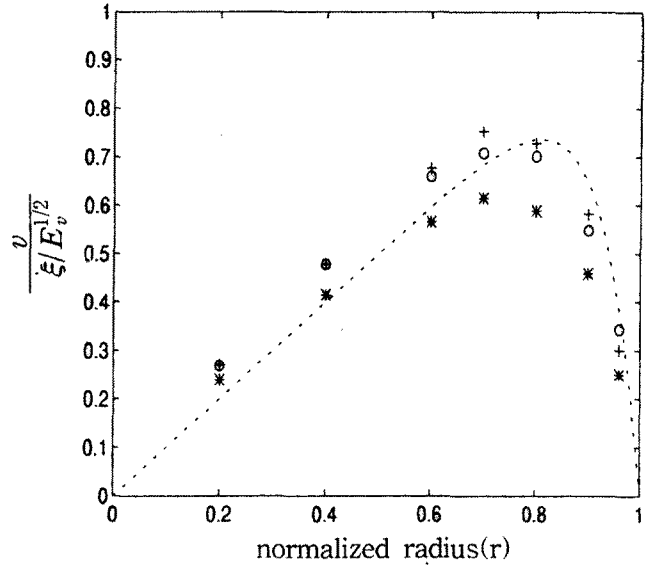


Fig. 4. Normalized azimuthal velocity ($v/(\xi/E_v^{1/2})$) in homogeneous fluid with free surface. '*', 'o', '+' indicate observed velocities at different $\xi/E_v^{1/2}$ and dotted line calculated velocity. (* $\xi/E_v^{1/2}=0.21$, 'o' $\xi/E_v^{1/2}=0.62$, '+' $\xi/E_v^{1/2}=1$).

이층유체 실험

Figures 5a와 5b는 하층유체에 외부유체 유입과 유출시 상·하층유체를 관찰한 것이다. 하층유체의 흐름은 유입과 유출시 모두 동일한 형태를 가지나 상층유체의 흐름은 그 형태가 다를 수 있다. 또한 상층과 하층유체의 형태가 다르며 상층유체의 경우 최대속도가 외측벽쪽으로 치우쳐있다.

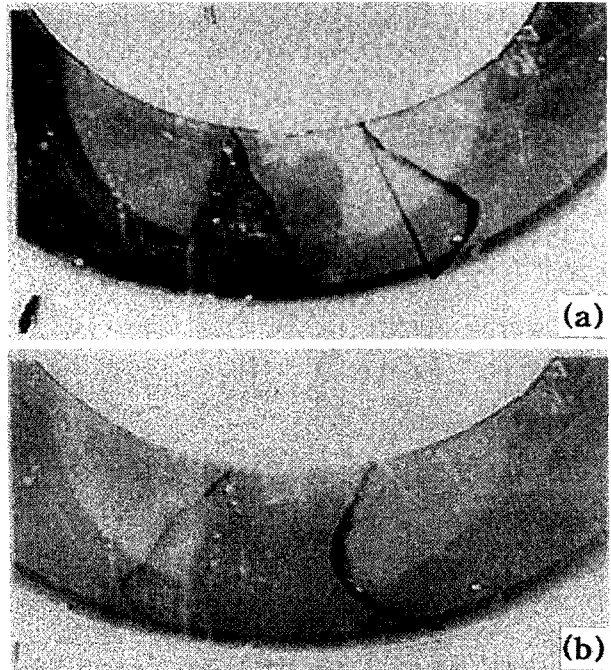


Fig. 5. Flow patterns of upper(right) and lower(left) layers fluid for source (a) and sink (b). The upper- and lower-layers flow patterns are different. For lower-layer flow, the maximum velocity is tilted to the outer wall.

먼저 하층유체의 흐름의 특성을 파악하기 위해서 하층유체의 최대 속도와 $\xi/E_v^{1/2}$ 는 0.7의 기울기 값을 가지는데(Fig. 6) 이는 균질유체인 경우의 0.78과 큰 차이가 없다. 또한 실제로 관찰한 하층유체의 속도를 축대칭류로 가정한 Kuo and Veronis(1971)의 이론적인 속도와 비교해 본 결과(Fig. 7) 내부 지형류의 흐름이 매우 잘 일치하는 것을 볼 수 있는데 이는 하층유체가 균질유체의 경우와 같은 축대칭류에 가까움을 보여주고 있다. 따라서 상층유체의 운동만을 자기 다른 실험 조건에서 관찰해 보았다. 관찰은 실험 절차에서 말한 바와 같이 전체적인 흐름과 국지적인 흐름을 동시에 관찰하였다.

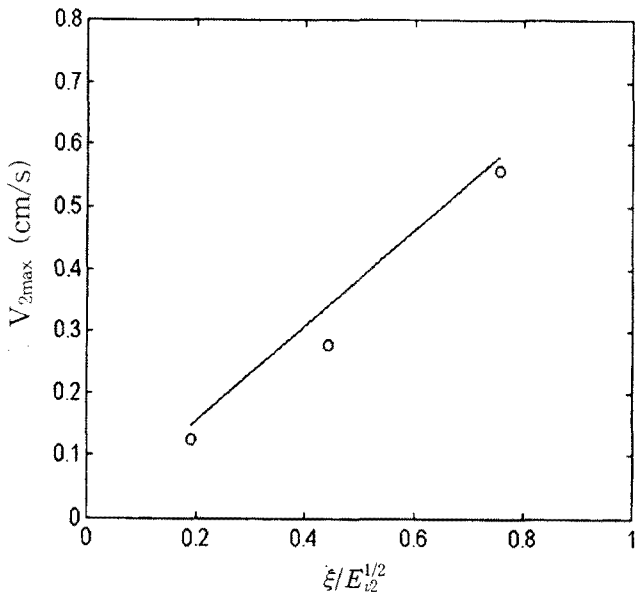


Fig. 6. Maximum velocities (V_{2max}) of lower layer versus $\xi/E_v^{1/2}$. Slope of the solid line is 0.7. E_{v2} indicates Ekman number for lower-layer.

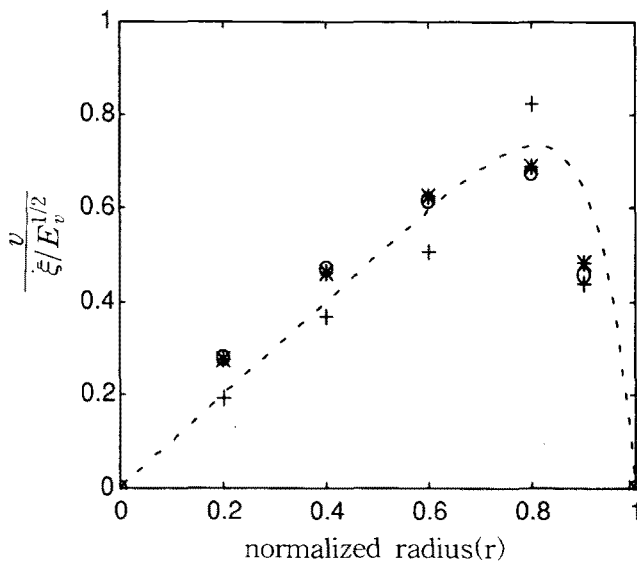


Fig. 7. Normalized azimuthal velocity ($v/(\xi/E_v^{1/2})$) in lower-layer fluid. '*', 'o', '+' indicate observed velocities at different $\xi/E_v^{1/2}$ and dotted line calculated velocity. (* $\xi/E_v^{1/2}=0.16$, 'o' $\xi/E_v^{1/2}=0.36$, '+' $\xi/E_v^{1/2}=0.61$).

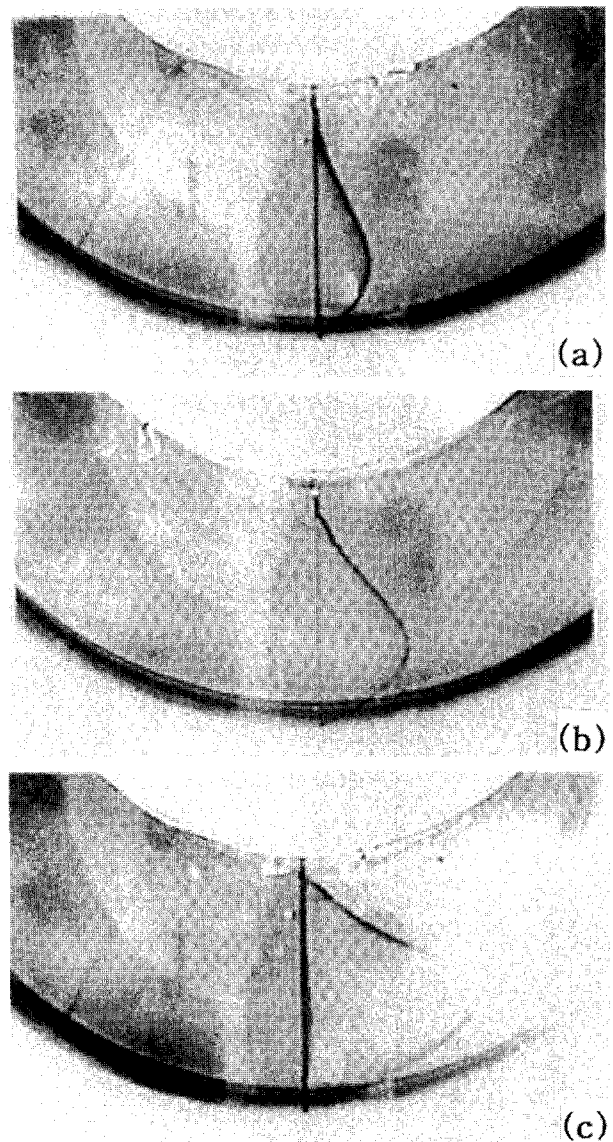


Fig. 8. Flow patterns of upper-layer fluid at (a) $\epsilon=6.9 \times 10^{-3}$, (b) $\epsilon=1.6 \times 10^{-2}$, (c) $\epsilon=2.9 \times 10^{-2}$. The magnitude of azimuthal velocities are clearly dependent on ϵ .

먼저 Fig. 8은 외부유체 유입시 ϵ 를 증가시켰을 때 상층유체의 흐름을 관찰한 것으로 ϵ 가 커지면서 상층유체의 속도가 커짐을 보여준다. Fig. 9는 ϵ 는 같으나 f_2 가 다를 때 상층유체의 흐름을 관찰한 것으로 f_2 가 증가함에 따라 상층유체의 속도가 증가하였다. 여기서 ϵ 는 로스비 수($\epsilon = \frac{\xi}{2\Omega a^2 E^{1/2}}$)이고 f_2 는 하층유체의 내부 프라우드 수($f_2 = \frac{2\Omega^2 a^2}{g(\nabla\rho/\rho)H_2}$)이다. ϵ 혹은 f_2 와 상층유체의 운동과의 관계를 알기 위해서 상층유체의 최대 속도와 ϵ 와 f_2 와의 관계를 살펴보았다. Fig. 10을 살펴보면 f_2 가 2.3일 때 기울기 값이 1.6인데 f_2 가 39.9일 때는 기울기가 25.9로 커지는 것을 알 수 있다. 이를 통해서 f_2 의 값이 클수록 상층유체의 운동은 ϵ 의 변화에 민감하게 반응한다는 것을 알 수 있다. 따라서 상층유체의 운동은 ϵf_2 로 특징지어 보았다. Fig. 11은 상층유체의

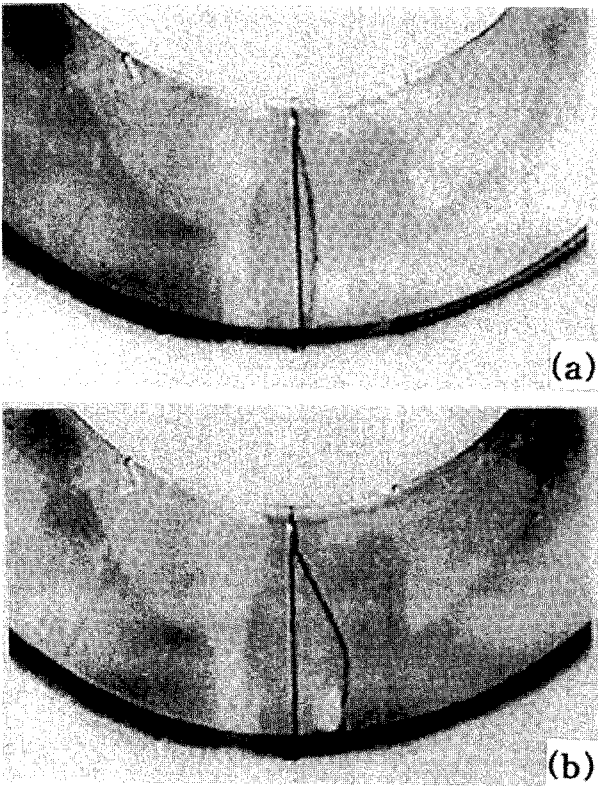


Fig. 9. Flow patterns of upper-layer fluid at (a) $f_2=1.6$ and (b) $f_2=6.4$. The magnitude of azimuthal velocities is dependent on f_2 .

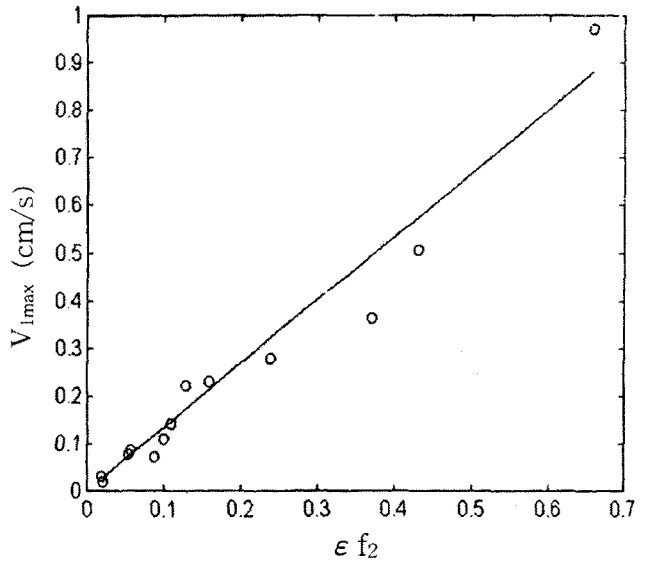


Fig. 11. Observed maximum velocities (V_{lmax}) of upper-layer fluid versus ϵf_2 . The slope of the solid line is 1.3.

로 주어진다(Pedlosky, 1979). 여기서 h 는 경계면의 높이이고 $\frac{\partial h}{\partial r}$ 는 경계면의 기울기이다. 실제로 관찰한 상·하층유체의 속도(V_1, V_2)를 이용해 경계면의 기울기를 구하여 보았다. 유입시 경계면의 기울기의 모양은 ϵ 가 작을 때는 변형이 없다가 ϵ 이 증가할수록 경계면의 기울기는 'U'자 형태로 변형되었다(Fig. 12). 이와 반대로 유출시에는 경계면의 기울기는 ϵ 이 커질수록 '∩'자 형태로 변형되었다(Fig. 13). ϵ 이 작을 때는 하층유체의 속도 분포와 같은 경향을 가지나 ϵ 이 증가하면서 축대칭적인 하층유체 속도 분포와 다른 경향을 보여주고 있다. f_2 의 변화에 따른 경계면의 변형을 알기 위해서 하층유체의 흐름을 축대칭류라

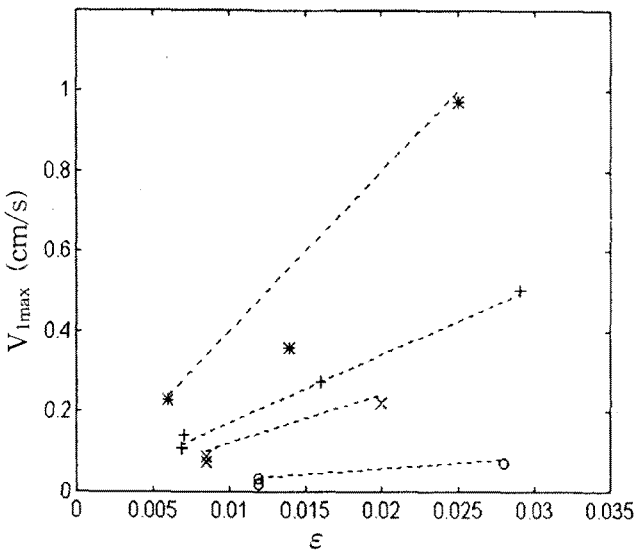


Fig. 10. Maximum velocities (V_{lmax}) of upper-layer versus ϵ at different f_2 . f_2 is 2.8 (o), 12.1 (x), 17.1 (+) and 39.9 (*), and corresponding slopes are 1.6, 6.4, 14.5 and 25.9.

최대 속도와 ϵf_2 와의 관계를 나타낸 것으로 1.3의 선형 기울기 값을 가진다. 여기서 상층유체의 흐름이 ϵf_2 의 값과 연관되어 있다는 것은 흥미롭다. 왜냐하면 ϵf_2 는 경압적인 경계면 변형과 연관되어있기 때문이다. 이층유체의 와도 방정식으로부터 경압적인 경계면의 변형은

$$\frac{\partial h}{\partial r} = \epsilon f_2 (V_2 - V_1) \quad (6)$$

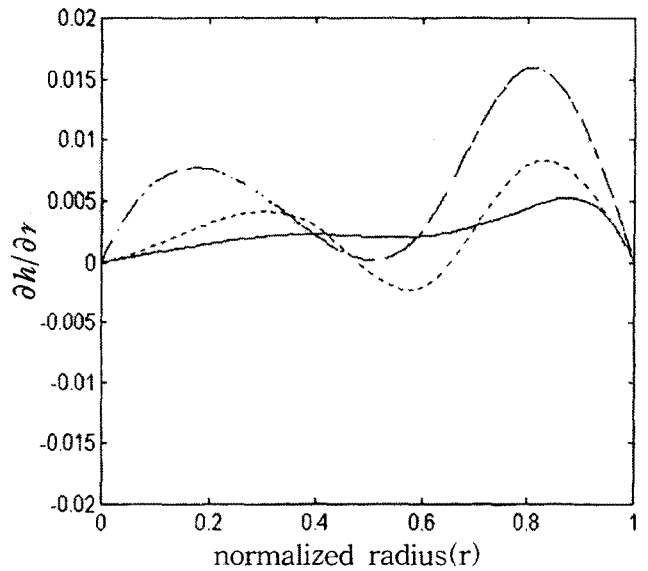


Fig. 12. Estimated gradient of the baroclinic interface for source at $\epsilon=6.9 \times 10^{-3}$ (solid), $\epsilon=1.6 \times 10^{-2}$ (dotted), $\epsilon=2.9 \times 10^{-2}$ (dashed). The gradient becomes a shape of "U" as ϵ increases.

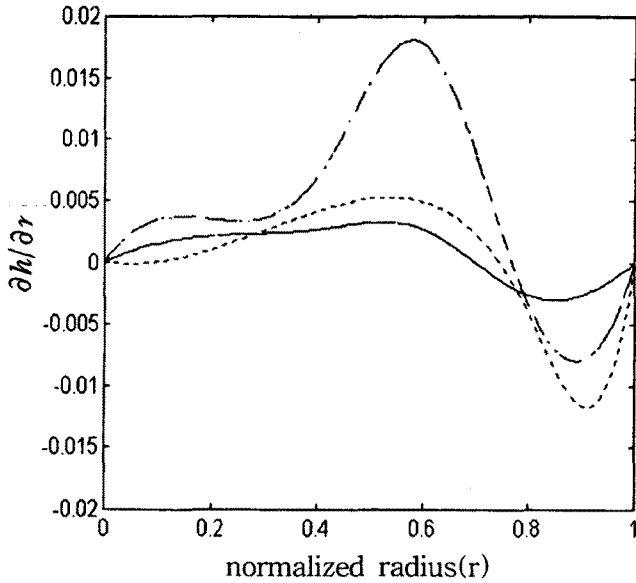


Fig. 13. Estimated gradient of the baroclinic interface for sink at $\epsilon = 6.9 \times 10^{-3}$ (solid), $\epsilon = 1.6 \times 10^{-2}$ (dotted), $\epsilon = 2.9 \times 10^{-2}$ (dashed). The gradient becomes a shape of "∩" as ϵ increases.

가정한 후 경계면의 기울기를 구하여 보았다(Fig. 14). f_2 가 작을 때 경계면의 기울기는 거의 하층유체의 압력 분포와 같은 양상을 보여주다가 f_2 의 값이 커지면서 위로 볼록한 형태가 된다. 이러한 결과들을 토대로 다음과 같이 생각할 수 있다. 즉 ϵ , f_2 값이 작을 때는 경계면이 하층유체의 압력 분포와 평행하다가 이 두 변수의 값이 증가하면 경계면이 불안정해져 유입시는 위로 오목한 형태로, 유출시는 위로 볼록한 형태의 경계면 형태를 가지게 된다. 이로 인한 상층유체의 적응은 경계면 변형으로 인한 상층유체의 국지적인 수심 변화에 따라 상대와도가 변화한다. 따라서 ϵ , f_2 는 경계면의 변형에 중요한 변수라 할 수 있다. 상층

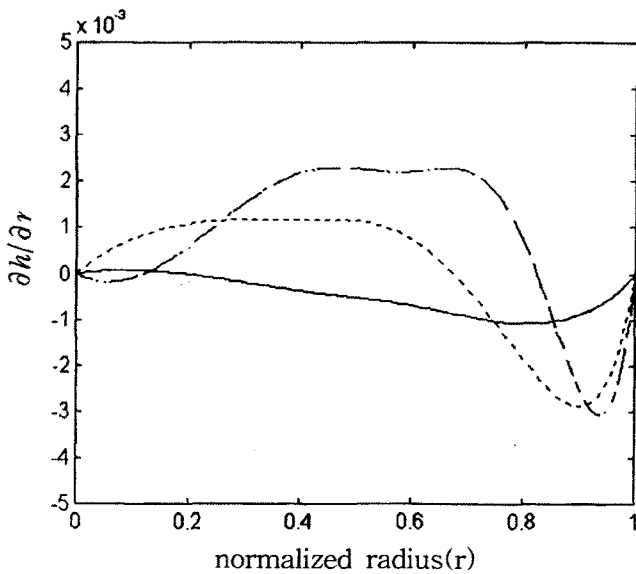


Fig. 14. Estimated gradient of the baroclinic interface for sink at $f_2 = 1.6$ (solid), $f_2 = 6.4$ (dotted), $f_2 = 14.5$ (dashed). The gradient become a shape of "∩" as f_2 increase.

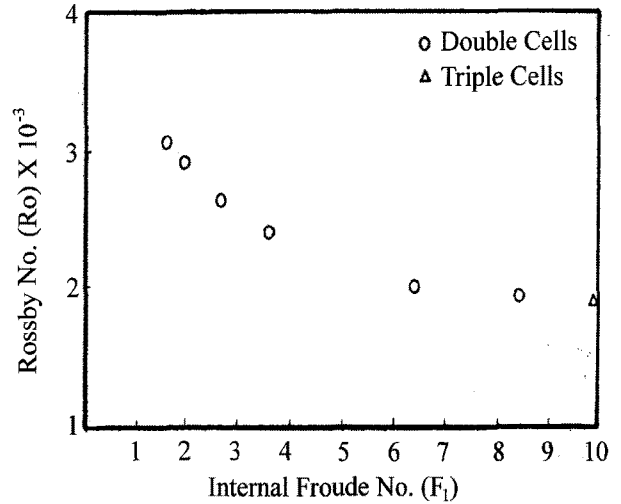


Fig. 15. Observed number of closed cells for different Rossby and internal Froude numbers (나와 최, 1993).

유체에 β -표면을 씌운 후 상층유체의 흐름을 관찰한 결과 자유 표면일 때와 같은 경향을 가진다. 단지 β -표면으로 인한 spin-down으로 기존의 자유 표면에서의 상층유체 속도보다 2 배 감소된 속도를 보였다. 본 연구의 실험 결과를 보충 설명하기 위해서 과거에 최(1994)가 행했던 실험 결과를 살펴보면 서안에서 관찰된 폐쇄순환의 수가 f_1 값이 커지면서 ϵ 이 작은 값일 때도 나타나는 것을 볼 수 있다. 이러한 결과와 본 실험의 결과를 관련시켜 볼 때 ϵ 또는 f_2 의 증가가 서안에서의 경압적인 경계면의 변형을 야기시켜 그로 인한 폐쇄 순환형태가 나타나는 것으로 보인다. 또한 국지적인 수심변화가 상층유체의 와도 변화에 미

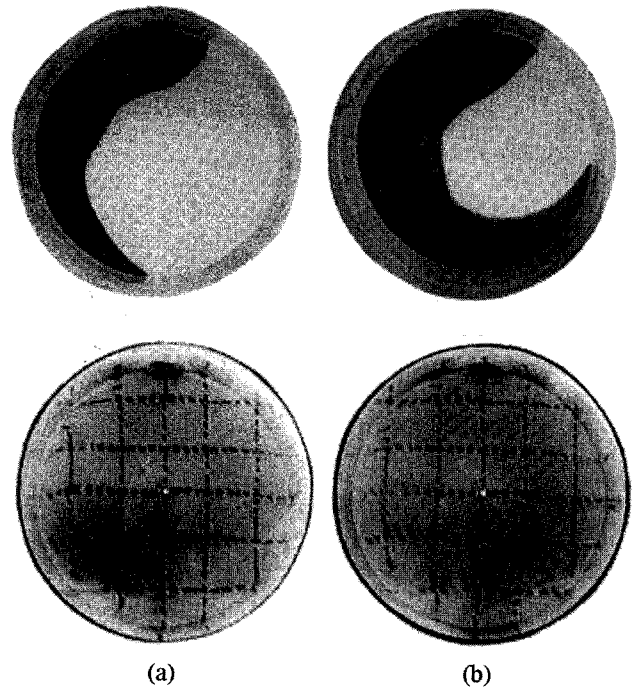


Fig. 16. Homogeneous flow induced by a heavy source fluid in the β -surface. (a) 3 min, (b) 7 min after the injection of the heavy fluid (나와 황, 1995).

치는 영향을 보다 분명히 보기 위해서 예전에 행했던 원통형 회전유체 실험을 살펴보았다(나와 황, 1995). Fig. 16을 보면 고밀도류가 확장하면서 균질유체에 상대적인 수심감소를 유도해 음의 와도를 형성함으로써 경압성을 증대시켜 이에 대한 반류를 야기시킨다. 이러한 반류 현상은 실제 해양의 경우 전체 동해 해역중 한반도 동해안 연안을 따라 내려오는 북한 한류가 경계면의 변형을 통해 상층수에 경압성 반류를 형성하는 것과 유사하다(Cho, 1995). 그러므로 극전선 남쪽의 이층구조 해수순환 특성을 이해하기 위해서는 이러한 경압성 요인을 반드시 고려해야 할 필요가 있다.

참고문헌

- 나정열, 서장원, 한상규, 1992. 한국 근해의 월평균 해상풍. 한국해양학회지, **27**: 1-10.
- 나정열, 최진영, 1993. 원통형 이층유체의 회전반 실험. 한국해양학회지, **28**: 17-23.
- 나정열, 최진영, 1994. 원통형 이층유체의 회전반 실험(극전선 모의). 한국해양학회지, **29**: 296-303.
- 나정열, 황병준, 1995. 균질의 회전 유체에 고밀도유체 주입 실험. 한국해양학회지, **30**: 355-364.
- 최진영, 1994. 회전반 실험을 통한 동해 해수 순환의 모의. 이학 석사학위논문, 한양대학교. 135 pp.
- 한국해양연구소(KORDI), 1997. 동해분지의 해양환경변화와 지구조진화연구 (1차년도). 한국해양연구소보고서, BSPE-79605-00-1037-5, 657 pp.
- Baker, D.J., 1966. A technique for the precise measurements of small fluid velocities. *J. Fluid Mech.*, **26**: 573-575.
- Beardsley, R.C., 1969. A laboratory model of the wind-driven ocean circulation. *J. Fluid Mech.*, **38**: 255-271.
- Cho, Y.K., 1995. Hydrography and a Hydraulic Model of Currents in the Korea Strait. Ph. D. Thesis, Seoul National University, 142 pp.
- Friedlander, S., 1980. An Introduction to the Mathematical Theory of Geophysical Fluid Dynamics. North-Holland, Amsterdam, 272 pp.
- Na, J.Y. and B.J. Hwang, 1996. Injection of an intermediate fluid into a rotating cylindrical container filled with two-layered fluid. *J. Korean. Soc. Oceanol.* **31**: 173-182.
- Hart, J.E., 1972. A laboratory study of baroclinic instability. *Geophys. Fluid Dyn.* **3**: 181-209.
- Krishnamurti, R. and J.Y. Na, 1978. Experiments in ocean circulation modelling. *Geophys. Astrophys. Fluid Dyn.*, **11**: 13-22.
- Kuo, H.H., and G. Veronis, 1971. The source-sink flow in a rotating system and its oceanic analogy. *J. Fluid Mech.*, **45**: 441-464.
- Pedlosky, J., 1979. Geophysical Fluid Dynamics. Springer-Verlag, New York, 710 pp.
- Stommel, H., A.B. Arons and A.J. Faller, 1958. Some example of stationary flow patterns in bounded basins. *Tellus*, **10**: 179-187.
- Takematsu, M., A.G. Ostrovskii and T. Kitamura, 1994. Current features in the Japan Sea Proper Water. In: Proceedings of the CREAMS '94, Seoul National University, Seoul, pp. 1-4.

1998년 8월 5일 원고 접수

1998년 12월 10일 수정본 채택