

## 원통형 이층유체의 회전반 실험

나정열 · 최진영

한양대학교 지구해양학과

### Laboratory Experiment of Two-layered Fluid in a Rotating Cylindrical Container

JUNG-YUL NA AND JIN-YOUNG CHOI

Department of Earth & Marine Science, Han Yang University

회전반 위에서 상하경계면이 경사진( $\beta$ -effect) 원통용기에 이층유체를 만들어 하층에 같은 밀도를 갖는 외부유체를 주입하여 경계면 변형에 따른 상층유체의 흐름을 관찰하였다. 상하층유체간의 경계면마찰을 최소화하여 하층유체운동(Sverdrup type)에 따른 경계면의 변화에 적용하기 위한 상층유체 흐름은 internal Froude number ( $F_1$ )에 민감하게 반응함을 보였다. 특히  $F_1$ 값이 6 이상인 경우에는 상층유체운동 특성인 두개의 폐쇄순환의 방향이 반대가 되어 서안경계류의 분리현상을 나타내고 있다. 서안에서의 분리 지점 역시  $F_1$  값에 의존하며, 특히  $F_1 \sim 6$ 인 경우 가장 북쪽에서 분리되는 현상을 보였다.

A right cylindrical tank with sloping bottom and top ( $\beta$ -effect) is filled with two-layered fluid and is put on the rotating table. External fluid of same density as the lower-layer fluid is continuously injected to drive the lower-layer motion which is analogous to "Sverdrup type" circulation with Southward Western boundary layer current. By minimizing the interfacial stress between two layers the motion in the lower-layer deformed the shape of interface such that the upper-layer adjust itself to the variations of the interface in terms of its direction of flow patterns. The most significant parameter is the internal Froude number( $F_1$ ) and when  $F_1$  is greater than 6 two-cellular circulation of the upper-layer changes its direction, thereby creates a separation of Western boundary current. The separation position moves to the most northward when  $F_1$  equals to 6.

## 서론

회전반실험을 이용한 해양의 순환 기작 파악은 주힘(primary force)을 wind stress로 가정한 경우가 대부분이며 특히 단일유체층을 사용한 실험이 그 주를 이루고 있다(Beardsley, 1969; Kuo and Veronis, 1971).

한편 영구수온약층에 의해 이층구조를 보이고 있는 실제 해양을 염두에 둔 회전반실험(Hart, 1975; Krishnamurti and Na, 1978)은 경압불안정에 의한

순환 특성을 고려 하였으며 이때 가장 중요한 요인으로는 이층유체의 경계면조건으로 각층의 유속이 경계면에서 같거나 혹은 유속의 차이가 경계면의 구배와 비례하는 경우를 가정한 것이다. 전자의 경우 경계면마찰이 존재함을 의미하며 따라서 경계면 상하에 Ekman layer가 고려되어야 한다(Hart, 1975). 한편 후자의 경우는 각층의 유속 차이는 경계면의 구배와 비례하게 되며 이는 온도풍을 고려할시 경계면에서의 밀도의 불연속에 의해 야기됨을 알수있다(Pedlosky, 1986).

본 연구는 1990년도 문교부 기초과학육성연구비에 의하여 일부 지원을 받아 수행된 것임.

일반적으로 풍성순환의 모델실험시의 wind stress (혹은 curl of wind stress)의 모의는 주로 유체와 접촉한 upper lid를 회전시킴으로 upper lid와 접한 Ekman layer의 수렴 혹은 발산에 의한 내부유체운동을 야기시킨다 (Beardsley, 1969; Hart, 1975). 한편 이층유체의 풍성순환실험인 경우에는 상층유체와 하층유체사이의 경계면마찰이 거의 없는 상황에서 upper lid의 회전에 따른 내부유체운동이 상층에만 국한됨을 관찰하기도 하였다(Krishnamurti and Na, 1978). 이러한 경우 상층유속에 따라 경계면의 모양이 달라지며 이는 경사를 포함한 upper lid에 의해 발생하는 "지형적 영향에 의한 수직속도"와 upper lid와 접한 Ekman layer의 flux가 균형을 이루기 위해 경계면의 모양이 달라짐을 의미한다. 따라서 경계면마찰을 최소화 할 수 있는 이층유체를 제작 할 수 있다면 경계면의 모양변화를 야기시킬 수 있는 상층 혹은 하층유체의 운동을 이용한 풍성순환 모델을 구성할 수 있게 된다.

본 실험연구의 목적은 앞서 언급한 경계면 변화를 염두에 두고 하층유체의 운동을 야기시켜 이에 따른 상층유체 운동을 관찰하기 위한 것이다.

근래에 계산된 한국근해의 해상풍의 분포(Na, et al., 1992)에서 특히 동해 북부해역의 wind stress의 평균값이 남부해역에 비해 두배 이상의 크기를 그리고 curl값은 10배 이상인 경우도 나타나고 있음을 보이고 있다. 한편 동해 북부해역은 전층이 거의 균질한 층으로 되어 있어 해수면에 가해지는 해상풍에 의한 풍성순환이 전층에 영향을 미칠것이란 가정은 매우 가능성이 있다고 고려된다. 특히 겨울철 curl값의 부호는 양의 값을 갖고 있어 이에 따른 한반도 북부해역을 따라 남하하는 서안류의 존재 가능성이 있을 뿐 아니라 이러한 남하류에 의한 동해 남부해역에서의 하층운동이 야기 된다고 가정하였을 때 이에 따른 상층수의 운동은 경계면의 구배변화에 따른 적응의 결과가 될 것이다. 따라서 본 실험은 경계면마찰이 거의 없는 이층유체를 이용하여 하층운동을 양의 부호를 갖는 curl에 의한 운동 (외부 유체 유입)으로 모의한후 이에 따른 상층의 운동을 관찰하여 경계면의 변화를 유추할 뿐 아니라 상층순환의 특성을 밝힘이 주요 내용이 된다.

### 실험 파라메타 선정을 위한 와도방정식

반경이 L, 높이가 H<sub>0</sub>인 원통형 용기의 상하면이 각각 같은 경사도(tan $\alpha=0.1$ )를 갖는 평면으로 구성되고 용기안에 평균두께가 각각 H<sub>1</sub>, H<sub>2</sub>되는 이층유체 (밀도는  $\rho_1, \rho_2$ )를 채워 각속도  $\Omega$ 로 회전시키는 경우를 고려하자. 한편 이층유체가 강제 회전을 할 시에 하층유체와 같은 밀도를 갖는 유체를 원통밖에서 하층에 주입할 경우, 이로 인해서 경계면 뿐만 아니라 상층과 접한 경사면 자체도 일정한 수직속도를 갖게 된다. 즉 상층의 평균 수심은 변화가 없으나 경계면의 모양에는 변화가 있을 수 있다. 따라서 상기와 같은 용기내에서의 와도방정식은 Hart(1976)와 Pedlosky(1986)에 의해 다음과 같이 표시된다.

$$\begin{aligned} R_0 \frac{d}{dt_1} \left[ \nabla^2 P_1 + F_1(P_2 - P_1) \right] \\ = \frac{\partial \zeta}{\partial t} \cos \alpha + \tan \alpha \left[ -\frac{1}{r} \frac{\partial P_1}{\partial \theta} \sin \theta \right. \\ \left. + \frac{\partial P_1}{\partial r} \cos \theta \right] + f_1 \frac{\partial P_1}{\partial \theta} - \frac{\partial \zeta}{\partial t} \\ - \frac{(E_1)^{1/2}}{2} \nabla^2 P_1 \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} R_0 \frac{d}{dt_1} \left[ \nabla^2 P_1 + F_2(P_2 - P_1) \right] \\ = \frac{\partial \zeta_1}{\partial t} - f_2 \frac{\partial P_1}{\partial \theta} - \tan \alpha \left[ -\frac{1}{r} \frac{\partial P_2}{\partial \theta} \sin \theta \right. \\ \left. + \frac{\partial P_2}{\partial r} \cos \theta \right] - \frac{(E_1)^{1/2}}{2} \nabla^2 P_1 \end{aligned} \quad (2)$$

즉 식 (1)과 (2)에서 비차원 파라메타들은 다음과 같이 정의된다.

$$R_0 = \frac{\zeta}{\Omega L E_1^{1/2}} : \text{Rossby number}$$

$$\zeta = \frac{\partial \zeta}{\partial t} : \text{외부 유입수에 의한 경계면의 상승속도.}$$

$\Omega$  = 회전 각속도.

L = 원통 용기의 반경.

H<sub>i</sub> = 각층의 평균수심

$$E_i = \frac{\nu}{2\Omega H_i^2} : \text{Ekman number}$$

$$F_i = \frac{4\Omega^2 L^2}{g \frac{\Delta\rho}{\rho} H_i} : \text{Internal Froude number}$$

$$f_i = \frac{\Omega^2 L^2}{g H_i} : \text{External Froude number.}$$

$\tan \alpha$  : 상, 하 경계면의 경사( $\beta$ -effect).

$i=1$ 은 상층,  $i=2$ 는 하층.

한편, 내부유체 운동이 hydrostatic, geostrophic인 경우 이때의 이중경계면의 높이( $h$ )는

$$h = R_0 F_i H_i (P_2 - P_1) + f_i H_i \frac{r^2}{2} \quad (3)$$

으로 주어지며, 식 (1)과 (2)를 연결하게 되는데, 식 (3)의 첫 항은 밀도차에 의한 경계면의 변화를 그리고 둘째항은 원심력에 의한 변화를 의미한다. 따라서 경계면의 변화, 즉 한층에서의 vortex-tube compression은 다른 층의 stretching을 야기시킴으로써 각 층에서의 와도 방정식을 만족시키게 된다. 식 (1)과 (2)의 유도과정에서 상하층의 점성이 같다는 조건 하에서 경계면 마찰로 인한 경계면 Ekman layer 를 무시했으며, 따라서 각 층은  $z$ -independent 한 운동을 가정하여 원통의 상하면에서 경계면까지의, 소위 Ekman-layer compatibility 조건을 적용한 것이다. 또한 측면에 존재하는 Ekman-layer 역시 무시하여 내부 운동만을 고려 하였다. 따라서 식 (1)-(2)에서  $R_0$ ,  $f_i$ ,  $R_0 F_i$ ,  $\tan \alpha$  및  $\frac{\partial \zeta}{\partial t}$ 의 크기를 같게 함으로써 와도방정식을 실험용기 내에서 재현할 수 있게 된다.

이때 식 (1)의 우변 첫항과 끝항은  $\cos \alpha \sim 1$ 임으로 서로 상쇄되어 상층유체의 상승속도에 따른 와도 변화는 무시 될 수 있음을 의미한다. 특히 하층 유체운동을 야기시키는 외적인 힘은 외부 유입수에 의한 경계면의 상승인 바 식 (2)  $\frac{\partial \zeta}{\partial t}$  항의 크기를

고려해야 하며 동시에  $\beta$ -effect를 나타내기 위한  $\tan \alpha$  항의 크기와 같게 고려 되어야 한다. 더구나 상층 운동은 경계면의 변화에 의한 경압성 적용이 주요인 임으로  $f_i$  값에 따른 운동 특성도 관심의 대상이 된다.

## 이중유체 실험장치

반경 20 cm, 높이 20 cm인 플라스틱 원통의 바닥과 뚜껑을 같은 경사를 갖는 평면으로 만들어 상하층 유체운동시 소위  $\beta$ -effect를 모의 한다. 이때 상층유체는 thymol blue 용액(Baker, 1967)으로 하고 하층유체는 경계면마찰을 최소화 하기 위한 전분회석유체(Krishnamurti and Na, 1978)로 만들어 두층사이의 밀도차 ( $\Delta\rho$ )를  $\Delta\rho/\rho_2 \approx O(10^{-3})$  되게 유지한다. 이에 따른  $F_1 \sim O(1)$ 을 유지할 수 있게 된다. 특히 상하층 유체간의 경계면 마찰 효과 여부를 판단키 위해  $f$ -plane에서의 이중유체실험을 수행하여 외부유체 주입시 하층유체의 circular 운동이 상층 thymol blue 용액에서 관측되는가를 판단한 결과 경계면 마찰을 무시할 수 있을 정도로 상층운동이 거의 없었음을 예비실험에서 확인하였다.

한편 하층수의 유입을 위한 장치는 50 ml 주사기 새개를 연결한 주사기펌프를 DC-Motor와 축을 연계시킴으로써 직류전압 변화에 의한 motor의 회전 속도로 유입량을 조절할 수 있도록 하였다. 특히 유입시 일정한 양이 Ekman layer를 통하여 내부로 유입되도록 용기바닥을 이중으로 만들어 원통의 내벽면을 따라 흐르도록 만들었으며 이때 내벽과의 간격은 1 mm 정도로 Ekman layer thickness 보다 작게 하였다. 상층유체운동의 관측은 thymol blue 용액을 사용하였기 때문에 직경 0.009 cm의 stainless steel wire를 격자로 만들어 직류 1.5 volt에 의해 전기분해된 wire 주위의 염색된 유체를 회전 반축 일정한 높이에 장치한 카메라를 이용 촬영과 동시에 관찰할 수 있다. Fig. 1은 실험장치를 보여 주고있다.

특히 이러한 이중유체 실험에서 가장 많은 시간이 소요되는 것은 비회전시 이중유체의 제작인 바 상층유체를 하층유체위에 경계면의 흐트림이 없이 만들기 위해서는 가는 구멍을 통하여 모세관현상을 이용한 장시간의 작업을 요하며, 이때 유체와 주위의 온도차를 없애야함에 주의를 요한다.

## 실험결과 및 토론

우선 하층유체의 운동에 의한 상층유체의 운동은

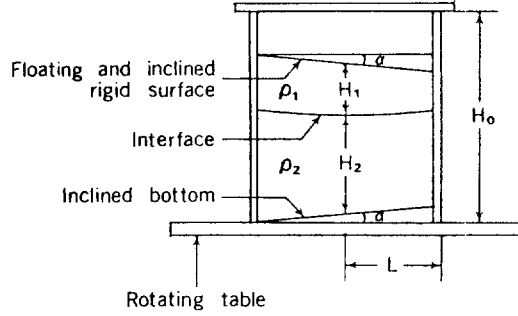
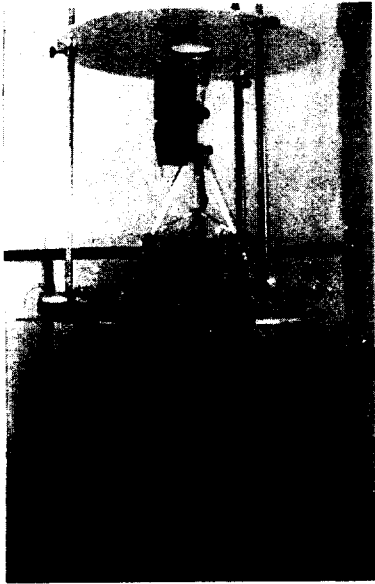


Fig. 1. Experiment apparatus and geometry for the cylindrical tank with inclined bottom and inclined rigid surface.

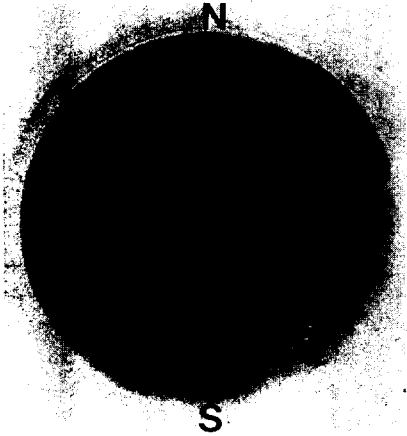


Fig. 2. Flow pattern of uniform source. Rossby number  $R_o = 3.79 < 10^{-3}$

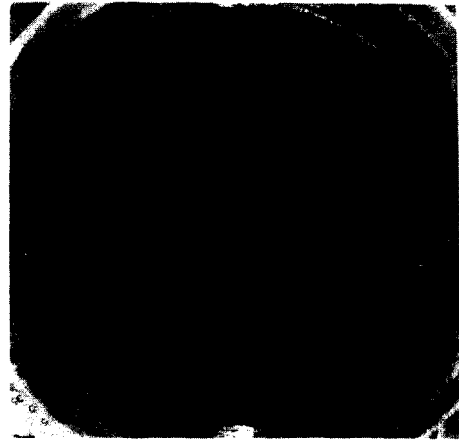


Fig. 3. Flow pattern of the upper-layer fluid with free surface driven by source flow showing almost axis-symmetric, but very weak flow.

파악하기 전에 하층유체의 운동을 알기 위하여 유출입실험을 하였다 (Fig. 2). 이때 전분회석유체 대신 thymol blue 용액을 사용하고 free surface 조건하에서 운동을 관측한 결과 소위 Sverdrup balance를 나타내는 내부운동은 유입시에는 북향류를 유출시에는 남향류를 나타내며 이에 따른 서안강화류의 남, 북방향이 뚜렷이 나타나고 있다. 따라서 이러한 비대칭형의 하층유체 운동에 의한 상층운동은 경계마

찰 효과가 클 경우 같은 모양을 할 가능성이 있을 것이다. 그러나 경계마찰 효과를 최소화 할 수 있는 전분회석 유체의 사용시 마찰 효과보다는 경계면 변형에 의한 효과를 보기 위하여 이층유체의 상층이 free surface를 갖게 하여 경계면의 모양과 free surface의 모양이 같은 조건하에서 실험을 행하였다 (Fig. 3). 이때 하층유체는 서안강화현상과 Sverdrup type의 내부운동을 하고 있으나 상층운동은 거의

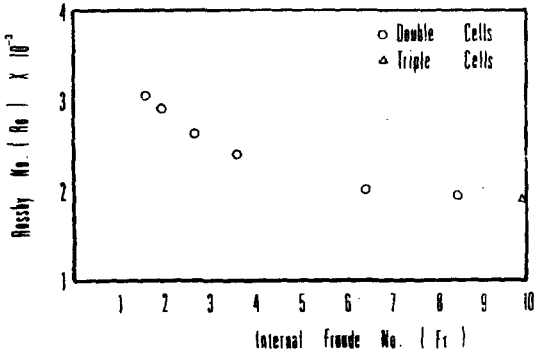


Fig. 4. Observed number of cells for different Rossby and internal Froude number.

축에 대칭이며 하층운동에 비해 매우 약한 형태를 갖고 있다. 이는 경계면의 모양이 free surface와 같이 축에 대칭인 곡면을 갖고 있음을 의미하기 때문에 이에 따른 축에 대칭인 지형류가 존재함을 보여주고 있다. 특히 그 크기는 약하나 반시계방향의 운동은 하층수의 유입에 따른 양의 부호의 와도가 하층에 존재함(반시계방향의 순환)에 따른 것으로 상하층유체의 운동방향이 서로 같음을 의미한다. 따라서 경계면마찰을 무시 할 수 있는 이중유체의 상층에 경계면을 갖는 뚜껑을 없어 (상층수에 자유롭게 떠있는 상태임) 소위  $\beta$ -effect를 갖게 한후 회전속도를 변화하면서 상층유체의 운동을 관찰하였다. 특히 경계면 변화에 민감한 변수는 식 (1)과 (2)의 왼쪽항의 두번째 식으로  $F_1$ 값에 따라 상하층 압력차에 따른 속도차를 야기시키기 때문에 운동특성을 구분짓는 중요한 변수가 된다. 상층유체운동관측 시 특이한 점은 외부변수에 따라 원통내 순환 형태가 둘 혹은 세개의 폐쇄순환(closed circulation)을 이루고 있는 것이다. 이미 언급한 대로 하층운동은 일종의 single cell 순환인 바 상층운동형태는 곧 경계면의 구배가 이미 변해 있다는 증거임으로 만일 상층에 두개의 cell이 존재할 때는 각각의 cell부근의 경계면의 경사가 서로 반대됨을 의미하고있다(Pedlosky,1986). Fig. 4는 외부유체 유입시에 internal Froude number와 Rossby number에 따른 상층유체의 특성을 double cells 혹은 triple cells형태로 표시한 것이다. 여기서 double cells이라 함은 시계방향과 반시계방향의 폐쇄순환(closed circulation)이 각각 북서방향의 경계 및 그 외의 지역에 존재할때를 의미하며 (Fig. 5) triple cells은 double cells과 같은

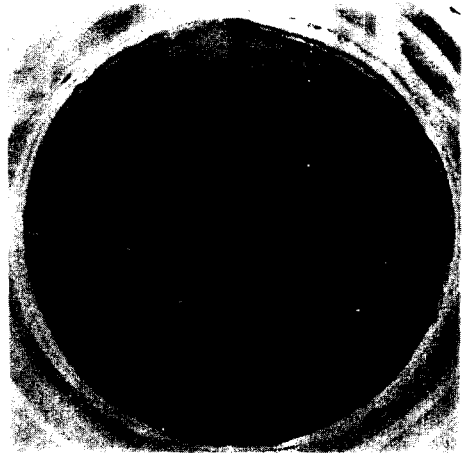


Fig. 5. Flow pattern of the upper-layer fluid with  $\beta$ -surface showing two closed circulation(double cells).

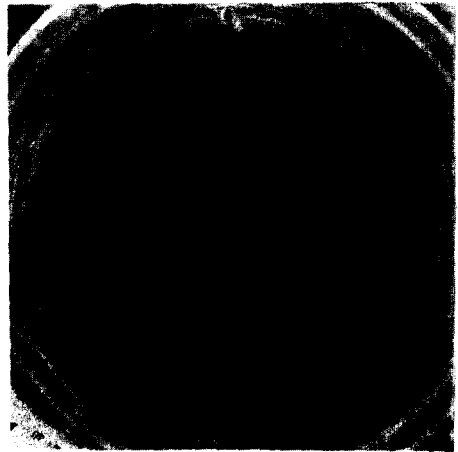


Fig. 6. Flow pattern showing the triple cells, one in NW-corner with counter-clockwise, the other in the interior with clockwise, the third one at the Southern with counter-clockwise.

모양을 하고 아주 작은 또 하나의 폐쇄순환이 남쪽경계에 존재함을 의미한다 (Fig. 6). 본 실험 파라메타내의 거의 전 구간에 걸쳐 double cells이 관측되었고 triple cells은  $F_1$ 이 10인 경우에만 나타나고 있다. 즉 와도 방정식에서  $F_1$ 의 증가는  $R_1 F_1$ 의 값의 증가로 인한 밀도차에 의한 경압성효과를 증대시키고 이에 따라 경계면모양의 변화 역시 회전에 따른 위심력효과를 증가하기 때문에 상층유체의 vorticity balance를 위한 반시계 혹은 시계방향의 순환부분이 경계면의 꺾기 혹은凸과 상응한 곳이 될

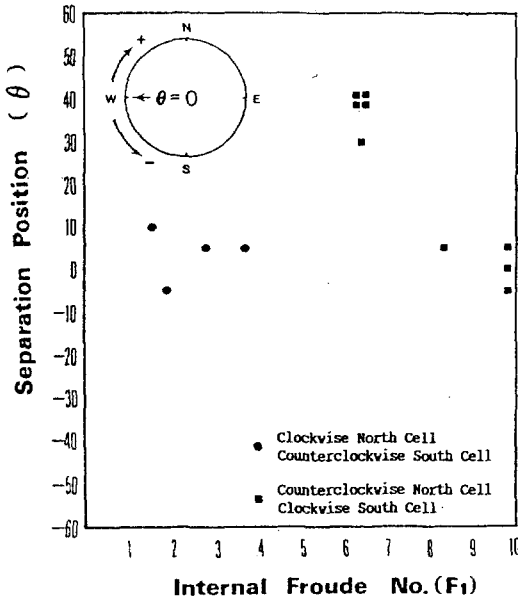


Fig. 7. Separation position vs. internal Froude number of the Western boundary flow for double-cell circulation.

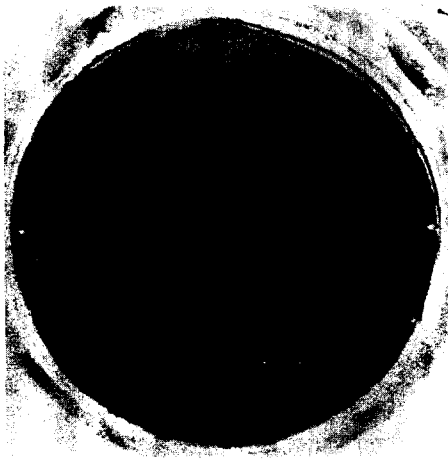


Fig. 8. Flow pattern showing the separation of the Western boundary flow at the Western wall ( $F_1=4$ ).

것이다. 이러한 상층유체 흐름의 방향변화는 경계면의 마찰효과를 무시했던 가정을 증명하는 것이기도 하다. 특히 double cells 형태의 순환인 경우는  $F_1$  값이 증가할때 흐름의 방향이 전격적으로 바뀌는 현상을 보이고 있다 (Fig. 7). 즉  $F_1$  값이 6이하인 경우는 서안경계를 중심으로 북쪽에 시계방향의 흐름이 존재하고 전체 구역을 포함하는 반시계방향의

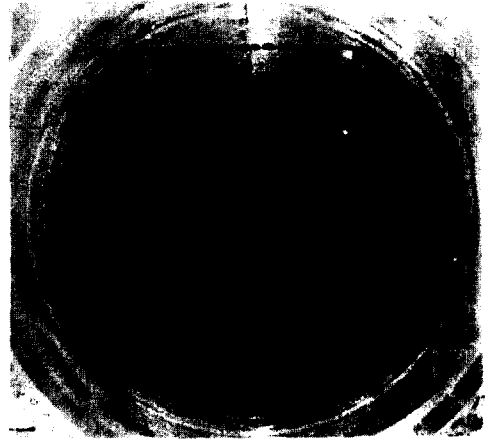


Fig. 9. Flow pattern showing the separation of the Western boundary flow ( $F_1=10$ ).

흐름이 나타나다가 (Fig. 7)  $F_1$  값이 6 이상이 되면 북쪽 및 내부순환의 방향이 반대가 되는 동시에 북쪽의 반시계방향 흐름이 조금 더 확장된 형태를 보이게 된다. 이때 서안경계에서의 매우 흥미있는 현상은 북향의 서안경계류가 남향의 경계류와 만난 후 내부로 흘러들어가는 일종의 서안경계류의 분리 현상을 나타내고 있다(Fig. 8). 특히  $F_1$ 이 6인 곳에서의 분리위치는 다른 경우보다 훨씬 북쪽에 위치하고 있으며 그 외는 거의  $\theta = \pm 10^\circ$  이내의 범위에 존재한다. 분리위치가 북쪽에 치우쳐 나타날때의 흐름은 시계방향의 순환이 남쪽에 존재할 때 즉 비교적 강한 북향의 서안경계류와 북쪽의 반시계방향의 순환에 의한 비교적 약한 남향의 서안경계류가 존재 할 때이다.

한편 하층유체는 외부유체의 주입에 따라 내부는 북향, 서안경계류는 남향의 반시계방향의 흐름을 갖고 있음을 고려할때 상층유체의 서안분리 현상은 매우 흥미있는 현상으로 이미 언급한 북한한류에 의한 동해난류의 분리와 그 기작의 유사성을 의미 할 수도 있을 것이다.

REFERENCE

Baker, D.J., 1967. Shear layers in a rotating fluid. *J. Fluid Mech.*, 2: 165-175.  
 Beardsley, R.C., 1969. A Laboratory model of wind-driven ocean circulation. *J. Fluid Mech.*, 38: 255-272.  
 Hart, J.E., 1975. The flow of a two-layer fluid over topog-

- raphy in a polar ocean. *J. Phys. Oceanogr.* 5: 615-624.
- Krishnamurti, R. and J.Y. Na, 1978. Experiments in ocean circulation modelling. *Geophysical and Astrophysical fluid dynamics*. 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: part 3. 441-464.
- Na, J.Y., et al. 1992. Monthly-mean sea surface winds over the adjacent seas of the Korea Peninsular. *J. Oceanol. soc. Korea*. 27: 1-10.
- Na, J.Y. and B.H. Kim, 1991. Laboratory experiment of periodically forced homogeneous flow in a rotating cylindrical container. Published in a Proceedings of the 5th JECSS Workshop.
- Pedlosky, J., 1986. *Geophysical fluid dynamics*. Springer Verlag, NY., 86-93.
- 
- Accepted January 15, 1993