

## 원통형 이층유체의 회전반실험\* (극전선 모의)

나정열 · 최진영

한양대학교 지구해양학과

### Laboratory Experiment of Two-Layered Fluid in a Rotating Cylindrical Container (Simulation of Polar Front)

JUNGYUL NA AND JINYOUNG CHOI

*Dept. of Earth & Marine Sciences, Hanyang University*

회전하는 원통형 이층 유체에 하층 유체와 동일한 밀도의 유체를 경사진 하층 바닥의 둘레를 통하여 주입시 하층 내부는 일정한 수직 운동을 하게 되며 이러한 수직운동은 결국 하층 유체에 Sverdrup type의 운동인 남향의 서안 경계류와 북향의 내부 운동을 발생시킨다. 이때  $\beta$ -효과와 동시에 하층 유체가 상층 경계면과 만나게 하므로써 소위 극전선 효과를 갖고 있는 상층 유체의 운동 특성을 관찰하였다. 서안에서의 순압성, 동안에서의 경압성 운동이 뚜렷하게 나타나고 특히 동안 경계류의 남향과 서안 경계류의 남향은 서안에서의 이안 현상을 야기시킨다. 상층에  $\beta$ -효과를 증가시 서안 경계류의 폭이 감소하고 이안 현상후 내부에 "eddy" 모양의 흐름이 존재한다.

한편 경압성 Rossby wave는 동안 부근에서 뚜렷하게 관측되나 서쪽으로 진행하면서 소멸되는 현상이 관측 되었다.

하층 유체에 국지적 지형 효과를 준 경우 상층수의 서안 경계류 및 동안 경계류가 민감하게 반응하여 동안에서는 정상과 형태의 운동이 나타나고 서안에서는 이안 현상 없이 경계류의 폭이 증가함을 보인다. 이는 하층의 순압성 운동이 지형 효과를 느끼는 반면 그 영향은 상층에 직접 전달되지 못하고 있음을 보여주고 있는 것이라 사료된다. 상층의  $\beta$ -효과 증가시 internal radius보다 훨씬 큰 규모의 파형이 내부에 존재하는 특성을 보여 주고 있다.

Rotating right cylinder of rigid sloping boundaries(top-bottom) is filled with two-layered fluid. External fluid which has the same density as the lower-layer is pumped through the rim boundary at the bottom, and this induces uniform vertical velocity in the interior that produces the Sverdrup type motion such as southward flowing western boundary current with northward interior horizontal motion. The rigid sloping upper boundary meets with lower layer to simulate so called "polar front", and the upper-layer motion influenced by the lower-layer flow has been observed.

Barotropic motion in the western part of the basin while baroclinic motion in the eastern half is always present. In particular, both southward flowing eastern boundary flow and western boundary flow meets near the western wall and it induces northward western boundary flow to separate from the boundary. With increased  $\beta$ -effect on the upper-layer the width of western boundary decreases and the separated western boundary flow moves into the interior to form an eddy-like motion. Baroclinic Rossby wave clearly observed in the eastern boundary slowly propagates to the west but it seems to be decayed before travelling to the western boundary.

A local topographic effect imposed on the lower-layer causes very sensitive response of upper layer boundary flows. In the east standing-wave-like features are observed in the west whereas the width

\*본 연구는 1991년도 교육부 기초과학육성연구비에 의하여 일부지원을 받아 수행된 것임.

of the boundary increases without any evidence of the separation of the western boundary flow. This may be due to the fact that, even the lower-layer barotropic motion feels the topography it's influence does not propagate into the upper-layer. With large  $\beta$ -effect on the upper-layer, relatively large scale waves whose wavelengths are greater than the internal radius deformation exist in the interior.

## 서 론

이층유체를 이용한 회전반 실험시 밀도가 다른 유체경계면의 마찰력 혹은 표면장력이 거의 무시된 상태하에서의 각층에서의 geostrophic motion은 경계면의 경사에 의한 vorticity 적응이 주요한 요인으로 작용한다(Pedlosky, 1979; 나와 최, 1993). 즉 하층의 cyclonic motion에 의한 경계면의 국지적 상승은 상층운동을 anticyclonic하도록 유도함으로써 하층에서의 vortex tube stretching이 상층에는 compression으로 작용하여 경압성 운동을 야기시키게 된다. 이러한 밀도차에 의한 각층의 수평속도의 불연속성은 결국 경계면의 경사를 적절히 변화시킴으로써 각층내의 vorticity를 보존하게 된다. 그 예로 원통형 이층 유체의 회전반 실험(나와 최, 1993)에서 각층 흐름의 방향이 서로 상반되고 특히 상층 흐름은 소위 internal Froude number ( $F$ )에 민감하게 반응하여  $F > 6$ 인 경우 몇 개의 폐쇄순환(Closed Cell Circulation)이 나타남을 보여 주기도 했다. 이러한 실험결과는 하층수가 어떤 외적인 힘에 의해 운동을 하게 될 때 운동의 결과가 상층에 미치는 영향을 파악하는데 매우 편리한 방법임을 제시하였다. 특히 하층의 운동이 서안 경계류 및 Sverdrup type의 내부 흐름을 포함하고 있을시 이에 따른 상층수의 적응은 매우 흥미로운 관찰이 될 수 있을 것이다. 동해 북부 해역에서 거의 수직적으로 균질한 해수에 가해지는 해상풍에 의한 풍성순환이 남부 해역의 상층수에 미치는 영향을 고려한 이층 유체 실험은 상층 서안 경계류의 연안에서의 분리현상과 동한난류의 이안과도 상관성이 있음을 암시하고 있어 동해 해수 순환의 기작 파악에 실험의 응용성을 제시하기도 하였다.

그러나 기존의 이층 유체 실험은 상하층이 각각 경사면( $\beta$ -effect)을 포함하고 있으나 실제 관측 결과에서 보여주는 소위 극전선을 모의하지는 못하였다. 그 이유는 실험실에서의 극전선 모의는 이층유

체의 제작과 관련이 있고 특히 상하층 경계면에서 마찰효과를 극소화 할 수 있는 유체의 선택에 제한점이 있기 때문이다. 즉 기존의 이층유체 실험은 경계면에서의 마찰을 포함시켜 상하층의 수평속도에 따른 경압 불안정에 초점을 맞추었다(Hart, 1975). 더구나 실제 해양을 염두에 둔 얇은 상층과 두꺼운 하층 그리고 상층 수심의 변화를 실험적으로 모의할 경우 상층 운동의 수평범위 제한(극전선 이북으로의 침투 불가)에 의한 운동특성을 파악할 수 있는 기회가 되기도 한다. 이러한 실험은 기존의 서안 경계류의 분리(Parson, 1969; Veronis, 1981) 및 하층 서안 경계류(Stommel, 1958)에 의한 상층수의 적응을 관찰할 수 있게 한다. 한편 동해를 이층구조의 해양이라 가정할 시 동한 난류가 이안하여 동쪽으로 흐르는 경로를 따라 소위 극전선이 형성됨은 이미 널리 알려진 사실이며 전선을 따라 등온선의 굴곡 혹은 meandering의 존재는 동해 해수순환을 모의하고자 하는 노력 중에서도 가장 중요한 부분이기도 하다.

따라서 본 실험 연구의 목적은 이층유체중 상층에 극전선 효과 및  $\beta$ -효과를 포함시킨 상태에서 하층 운동(Sverdrup type)에 따른 상층수 운동을 관찰하는 것이다. 특히 하층에 지형적인 효과를 가했을 때와 비교하여 이층 유체의 상하층간의 적응과정을 파악하는 데도 목적을 두고 있다.

한편 하층운동은 동해 북부 해역의 positive wind stress curl 특성(나 등, 1992)에 근거한 외부유체 주입(positive vorticity)으로 남향의 서안경계류와 폭넓은 내부순환 특성을 갖는 전형적인 Sverdrup type을 갖는다.

이층유체가 quasi-geostrophic한 운동을 할 경우 하층의 지형적인 효과가  $\beta$ -effect를 능가할 시에는 하층 운동과 상층 운동이 decouple되는 효과가 있으며(Rhines, 1970) 이러한 운동은 결국 상층에만 국한됨을 의미하는 바 internal deformation radius보다 큰 scale의 지형 효과를 준 경우 순환전

체에 미치는 영향을 관찰하기 위한 것도 본 실험의 목적이다.

**실험방법**

본 실험을 위한 장치는 나와 최(1993)에서 사용한 이층유체 실험장치와 동일하다. 즉 반경 20 cm, 높이 20 cm인 플라스틱 원통의 바닥과 뚜껑을 같은 경사를 갖는 평면으로 만들어 상하층 유체에 소위  $\beta$ -effect를 갖게 한다. 특히 상층유체의 경우 “floating lid”을 사용하므로써 외부 유체의 주입시 상층 유체의 체적을 일정하게 유지할 수 있다. 바닥면의 경사도는  $\tan\alpha=0.1$  ( $\alpha$ 는 수평에서의 경사각)로 유지하되 상층 floating lid의 경사도는  $\tan\alpha=0.1$ ,  $\tan\alpha=0.2$ 로 변화시켜 상층의  $\beta$ -효과 및 지형 효과를 관찰할 수 있으며 “극전선”의 위치는 정북에서 (가장 낮은 수심) 남쪽으로 1/4 반경에 고정시켜 주로 극전선 보다 훨씬 남쪽에서 상층수의 내부운동을 관찰하였다.

본 실험에서 모의한 극전선은 상층과 하층의 경계면이 floating lid의 밑면과 접하도록 상층수의 양을 조절함으로써 가능하며 비회전시의 경계면은 lid의 밑면과 직선으로 만나기 때문에 이를 근거로 관측을 위한 wire의 위치를 결정하였다(Fig. 1). 특히 상층 내부 운동을 관측키 위해서는 모든 wire의 위치가 Ekman layer depth 외측(즉 내부유체)에 정해지도록 고려하였다. 상층 유체는 thymol blue 용액(Barker, 1967), 하층용액은 전분회석 유체(나와 최, 1993)를 사용하여 경계면 마찰을 최소화 하였다. 회전시 상하층의 평균두께는 각각 1~1.5 cm( $\tan\alpha=0.1 \rightarrow 1$  cm,  $\tan\alpha=0.2 \rightarrow 1.5$  cm), 7 cm로 유지하였으며 두 유체의 밀도차이는  $\Delta\rho/\rho \sim O(10^{-3})$ 이다. 상층 유체운동의 관측은 외부유체 주입전 2~3시간을 요하는 spin-up 과정을 거친후 외부 유체 주입후 2~3분후 부터 시작하였다. 실험은 하층 바닥에 지형 효과를 장치한 경우와 없는 경우 외부 유체를 주입(positive vorticity 유도)하는 실험을 수행하였고 각각의 경우 회전속도를 변화시켜 유체의 적응을 관찰하였다. 회전반위에 고정 설치된 녹화기(VCR)에 의해 각각의 경우가 연속 관측되었으며 화면(monitor)을 촬영하여 같은 시간에서의 유체운동을 비교하였다.

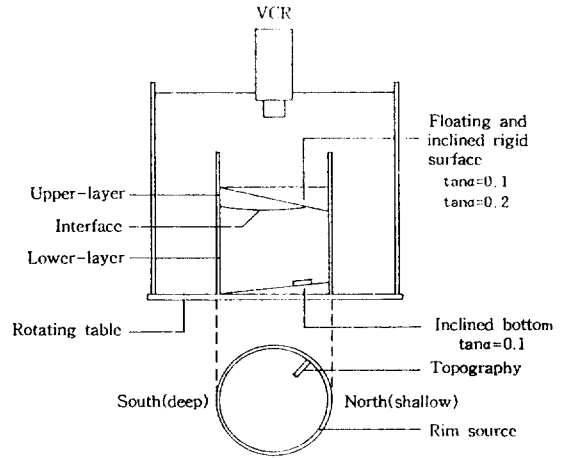


Fig. 1. Geometry for the cylindrical tank with floating and inclined rigid surface and inclined bottom with a topography.

각 실험에 사용된 파라메타의 선정은 이층 유체의 quasi-geostrophic 선형화도 방정식을 비차원화 시킨 식 (1)과 (2)에서 다음과 같이 정의 하였다 (나와 최, 1993).

$$R_{01} \frac{\partial}{\partial t} [\nabla^2 P_1 + F_1(P_2 - P_1)] = a_1 E^{1/2} \nabla^2 P_1 + \beta_1 v - \frac{1}{2} E_1^{1/2} \nabla^2 P_1 \quad (1)$$

$$R_{02} \frac{\partial}{\partial t} [\nabla^2 P_2 + F_2(P_2 - P_1)] = a_2 E^{1/2} \nabla^2 P_2 + \beta_2 v - \frac{1}{2} E_2^{1/2} \nabla^2 P_2 \quad (2)$$

여기서

$$R_{0i} = \frac{\xi}{\Omega L E_i^{1/2}} : \text{Rossby number} \quad (i=1: \text{상층}, i=2: \text{하층})$$

$\xi$  = 외부유체 주입에 의한 경계면 상승속도

$\Omega$  = 회전 각속도

$L$  = 용기의 반경

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

$H_1$  = 각층의 평균깊이

$\nu$  = kinematic viscosity(상, 하층 유체)

$$F_1 = \frac{4\Omega^2 L^2}{g\rho' H_1} : \text{internal Froude number}$$

$$\rho' = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2}$$

$$\beta_1 = \tan\alpha_1, \beta_2 = \tan\alpha_2, \alpha_1, \alpha_2 \text{는 상수 } \sim O(1)$$

상기 파라메타중 경계면 상승에 의한 내부 유체의 와도 변화를  $a_1 E^{1/2} \Delta^2 P_1$ 로 한것은 와도 생성에 직접적인 영향을 주는 외부 유체에 의한 내부 유체의 소위 vortex-tube stretching이 rigid-boundary에 의한 영향인  $O(E^{1/2} \Delta^2 P_1)$ 의 와도 생성과 연계되기 때문이다. 동시에 바닥과 뚜껑의 경사 역시 일정한 값을(x-y 좌표계인 경우 경사도는 y-방향에만 존재) 주었기 때문에 y-방향 운동에 의한 지형적인 수직 운동 효과만을 고려하였으므로 일반적인  $\beta$ -효과를 나타내고 있다.

따라서 상기 비차원 파라메타의 크기를 거의 같게 유지하여 실험을 수행할시는 각층에서 quasi-geostrophic vorticity의 변화는 경계면에 의한 수직운동 그리고 경사면 자체에 의한 Ekman layer내의 수렴과 발산에 따른 수직운동에 기인하게 된다. 한편 경계면이 회전에 의해 굴곡되어짐으로 해서 발생하는 효과는 경계면 효과와 비교 무시하였다. 실제 external Froude number는 internal Froude number와 비교할 때 매우 작다.

### 실험 결과

#### 1. 평탄한 경사면 바닥

하층 유체의 밀도와 동일한 유체를 외부에서 하층 바닥 둘레를 통하여 주입시 하층 유체 내부는 일정한 수직운동을 하게 되며 이때 vortex-tube stretching의 효과를 야기시킨다(positive vorticity). 이로 인한 하층 유체 운동의 특성은 전형적인 Sverdrup type의 내부운동인 북향류 및 서안에서는 남향 경계류를 존재하는 것이다(나와 최, 1993). 이러한 하층 운동이 상층에 전달되는 과정은 적어도 경계면 마찰 효과가 없는 경우 경계면의 변형에 의한 상층와도의 변화이다. 따라서 하층 운동이 반 시계 방향의 특성을

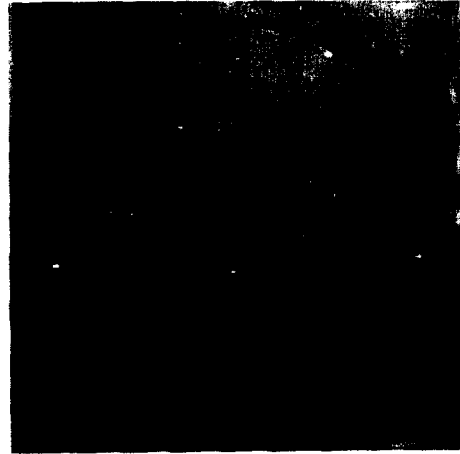


Fig. 2. Flow pattern of the upper-layer fluid with  $\tan\alpha=0.1$  driven by lower layer flow showing barotropic tendency near the Western boundary and baroclinic tendency near the eastern wall. Solid line presents position of polar front. ( $R_0=7.73 \times 10^{-4}$ ).

갖는 경우 상층 운동 방향이 하층과 일치(순압성 운동) 혹은 반대(경압성 운동)의 형태를 나타내게 된다.

Fig. 2는 floating lid의 경사가  $\tan\alpha=0.1$ 인 경우 남북을 중심으로 서쪽은 순압성, 동쪽은 경압성 운동 특성을 보이고 있다. 즉 서쪽은 하층 운동과 거의 일치한 반 시계 방향의 흐름과 남향의 서안 경계류를 보이고 동쪽은 시계 방향으로 남향의 동안 경계류를 포함하고 있다. 특히 동안 경계류의 서안으로의 침투에 의한 북향의 서안 경계류가 남향의 서안 경계류와 만나 이안 현상을 보여 주는 것이 특이하다.

상층에  $\beta$ -효과를 두배로 증가시( $\tan\alpha=0.2$ )에는 서안의 남향 경계류의 폭이 좁아지고(shear가 증가했기 때문에 dye가 확산되어 사진에서는 잘 보이지 않음) 동시에 동안 남향 경계류는 남쪽으로 갈수록 약해지나 서안에서 북향 경계류는 그 폭이 역시 좁아지면서 이안 현상을 보이고 있다(Fig. 3). 특히 이안 후 시계방향의 "Eddy" 모양의 흐름이 보이고 있는 바 그 위치가 극 전선보다 훨씬 남쪽에 있으며  $\beta$ -효과가 증가시에만 존재하고 있다.

Fig. 2와 Fig. 3에서 최북단 wire에서의 dye line의 북쪽으로의 흐름이  $\tan\alpha=0.2$ 인 경우(Fig. 3)에 더욱 뚜렷하며 급격한 반시계 반향으로의 전환 구조에서 그 크기가 internal radius of deformation인 2 mm

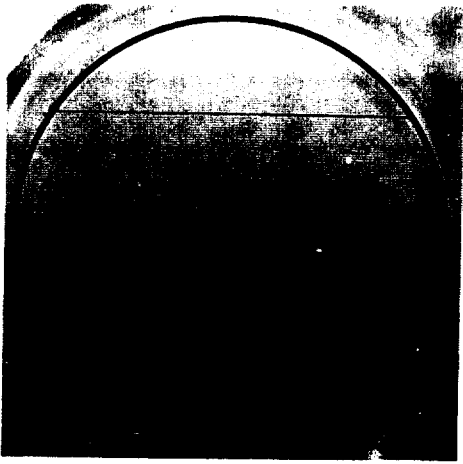


Fig. 3. Flow pattern of the upper-layer fluid with  $\tan\alpha=0.2$ . Narrower western boundary and broader eastern boundary are clearly seen compared with Fig. 2. Solid line presents position of polar front. ( $R_0=7.73\times 10^{-4}$ ).

정도임을 보여준다. 이러한 현상은 북향류나 남향류에 관계없이  $\tan\alpha=0.2$ 인 경우에 나타나고 있다. wire에서 발생된 dye의 흐름은 wire 위치에서 흐름의 방향에 의해서만 결정되므로 같은 위치에 발생된 dye line의 변형은 원 위치에서의 흐름의 변화를 의미하고 있다. 따라서 “급격한 방향전환”이란 원 위치에서의 흐름의 방향 변화가 있었음을 나타내므로 전체적인 dye 모양에서 wave의 존재를 파악할 수 있게 된다. 즉 Fig. 3에서 서안에서의 dye 모양은 처음에는 서쪽으로의 흐름이 존재하다가 후에 북향으로 바뀌 모습을 보이며 북쪽의 두 wire에서는 동쪽으로의 흐름(시계방향)이 북향류로 변하고 있음을 보여주는 것이다. 이러한 관찰로부터 상층 운동은 경압 혹은 순압 Rossby wave의 존재를 파악할 수 있고 특히 경계면의 변화에 매우 민감하게 반응하는 운동규모는 적어도 internal Rossby radius보다 큰 파장의 wave이므로 본 실험에서 경압성 wave의 경우는 위상 속도가 매우 느린  $10^{-2}$ cm/sec의 크기를 갖고 순압성 wave는 10 cm/sec의 크기를 갖게되어 관측된 dye의 시간 변화로부터 경압성 wave의 존재를 확인할 수 있다.

특히 네개의 wire 중 남쪽에 해당하는 북쪽에서 세번째 wire의 dye 움직임으로부터 국지적으로 상층 유체 운동의 경압구조가 매우 복잡함을 암시해 주고

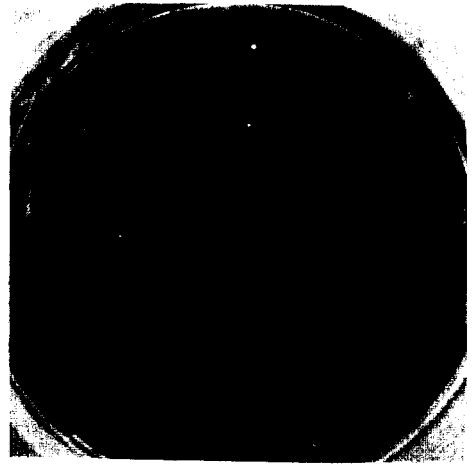


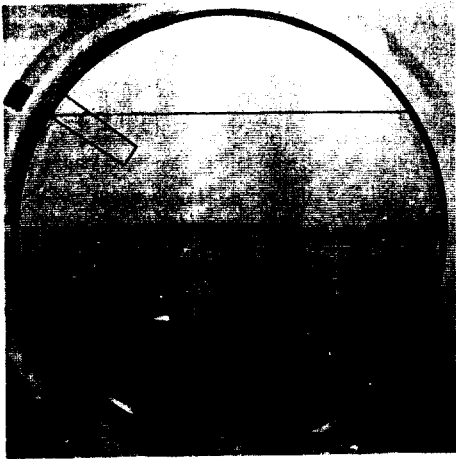
Fig. 4. Source driven homogeneous flow with topography at the bottom. ( $\tan\alpha=0.2$ ,  $R_0=7.73\times 10^{-4}$ ).

있다. 우선 시계 방향의 흐름은 흐름방향의 오른쪽 경계면의 수심이 주위보다 낮음(상층수의 두께가 깊음)을 의미하므로 이곳에선 동-서 방향의 경계면 기울기의 부호가 짧은 거리에서 바뀌고 있음을 의미하고 있다. 특히 북향과 남향의 서안 경계류가 서로 부딪힌 후 이안되어 나타나는 현상이 주로 이 wire 부근에 존재하는 것도 흥미 있는 현상이다.

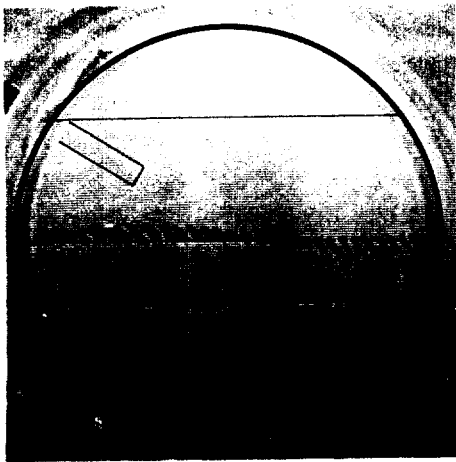
## 2. 지형 효과를 갖는 경사면 바닥

지형효과(Fig. 1)를 준 경우 전과 같이 실험을 반복하였다. 우선 지형에 의한 하층수의 운동은 지형 주위로 시계 방향의 흐름이 존재하며 이는 지형류의 특성상 지형 위로의 흐름이 억제되기 때문이다(Fig. 4).  $\tan\alpha=0.2$ 의 floating lid를 사용하였으므로 서안 경계류는 매우 폭이 좁으며 내부 유체는 북향의 Sverdrup type의 flow를 보여주고 있다.

한편 floating lid의 경사, 즉  $\tan\alpha=0.1$ 인 경우 지형 효과가 없던 경우와 비교하면 상층수의 반응이 매우 민감함을 알 수 있다. 우선 서안 경계류의 폭이 증가하고 서안에서 북향 경계류가 전혀 나타나지 않으며(Fig. 3과 비교) 동안에서의 경계류는 폭은 좁으나 주기적인 방향 전환이 있음을 보여주고 있다. Fig. 5인 경우 동안 경계에서 발생한 Rossby wave가 약  $3\times 10^{-2}$ cm/sec의 속도로 서향하고 있으며 이것은 앞서 언급한 경압성 모드에 해당함을 알 수 있다. 특히 국지적인 지형에 의한 vortex-tube 확장 및



(a)



(b)

Fig. 5. Flow pattern of the upper-layer fluid with  $\tan\alpha=0.1$ (a),  $\tan\alpha=0.2$ (b) with local bottom topography. Solid line presents position of polar front. ( $R_0=7.73 \times 10^{-4}$ ).

수축이 거의 없는 하층의 지형류를 감안 할때 지형의 위치보다 훨씬 남쪽에 위치한 곳에서 짧은 파장 wave의 존재는 이들이 낮은 주파수를 갖는 비수렴 경압 Rossby wave로 상층에만 국한되어 나타나고 하층에 존재하는 순압성 wave는 지형효과를 느끼나 그 영향은 상층에 미치지질 못하고 있음을 나타낸다고 하겠다(Veronis, 1981).

특히 이러한 high wave number 흐름은  $\tan\alpha=0.2$ 인 경우에 뚜렷하며 Rossby number에도 매우 민감하게 반응함을 알 수 있다(Fig. 6). 즉 거의 같은

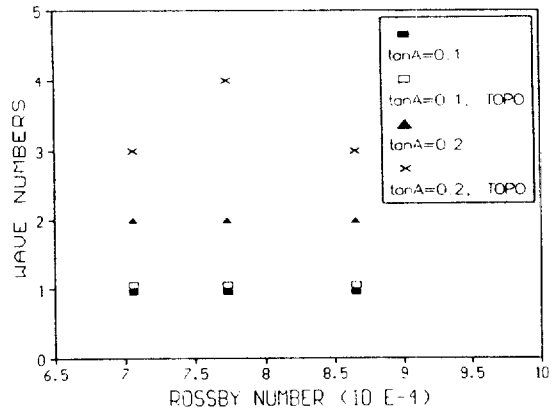


Fig. 6. Observed numbers of waves in east-west direction at a preselected wire for different Rossby number.

크기를 갖는 세 가지 Rossby number는 회전반 속도를 각각 20, 25 그리고 30 rpm으로 변화시켰을 때의 값들이며 속도가 25 rpm에 해당하는 경우 가장 많은 수의 wave 형태가 관측되고 있으며 상층 경사도가 증가시 뚜렷하게 알 수 있다. 따라서  $\tan$  값의 증가는 서안 경계폭의 감소로 인한 내부 운동의 순압구조를 확장시킴과 동시에 짧은 파장(internal radius 보다 큼)의 경압성 Rossby wave의 발달에 영향을 미침으로써 수온 전선 이남에서의 소위 meandering 현상을 야기시킬 수 있음이 관측 되었다.

### 결론 및 토의

밀도가 다르고 경계면에서의 마찰력이 거의 없는 이층 유체의 상층에 소위 극전선 효과를 주어 하층 유체가 상층의 경사면과 접하도록 한후 하층에 외부 유체를 주입시킴으로써 positive vorticity를 발생시켜 이로 인한 상층 유체의 운동을 관찰하였다. 상층과 하층 유체가 상층 경사면과 만나는 곳이 해양에서 관측된 극전선과 유사한 역학 구조를 갖는 점에 착안하여 상층 유체의 내부 운동 즉 극전선 이남의 유체 흐름 특성을 파악하였다. 특히 본 실험의 배경은 동해에서 관측된 극전선 및 극전선 이북 해역에 가해지는 바람 마찰력(wind stress curl)의 positive한 경향을 감안한 수온전선 이남 해수 운동을 염두에 둔 것이나 다만 난류의 영향은 고려치

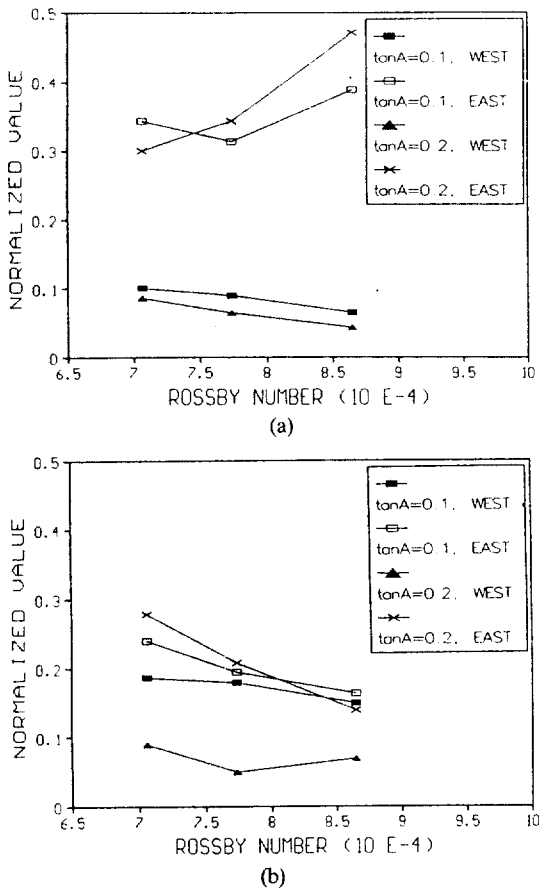


Fig. 7. Width of Western and Eastern boundary current. Without topography(a), with topography(b).

않았다.

인공위성 적외선 영상에 의한 해수면 온도의 분포로부터 여러가지 크기의 소용돌이가 극전선 훨씬 이남에서 관측된 바 있다(Isoda, 1994). 한편 본 실험에서 첨가한 국지적인 지형효과는 원산만 부근에 존재하는 평균수심 천미터 정도의 돌출부(Korea plateau)를 모의하여 순압성인 하층수에 지형효과를 주기 위함이었다.

따라서 극전선 이남 해역에 미치는 하층 운동의 영향을 알아보기 위해 하층에 국지적인 해저 지형 효과를 첨가했으며 주로 관측의 초점은 서안 및 동안 경계류의 변화, 경압 및 순압 구조의 특성, 서안 경계류의 이안 그리고 경압성 Rossby wave의 존재 여부였다. 우선 지형 효과가 없는 경우 상층 유체에 가해지는 소위  $\beta$ -효과를 변화시켜( $\tan\alpha=0.1$ 과  $0.2$ )

이에 따른 운동 특성을 관찰 하였다.

$\tan\alpha$  값의 증가는 서안 경계류의 폭을 감소시키는 효과가 있음은 분명하게 나타나고 있으나 동안에서 남하하는 경계류의 폭은 일반적으로 증가하는 경향을 보이고 있다(Fig. 7). Sverdrup type의 하층 운동(반시계 방향의 운동)을 근거로 할 때 서안 쪽은 순압성 동안 쪽은 경압성 구조를 보이며 서안 경계에서 남향의 경계류와 남쪽에 위치한 북향의 경계류가 서로 만난후 이안 현상을 보이며 부근에 anti-cyclonic한 eddy형태가 존재함이 관측되었다. 특히 남쪽에 있는 dye 모양이 여러 파수를 갖는 파형을 보임으로써 소위 수운전선 이남에 경계면의 모양이 매우 심하게 변화하고 있음을 암시하고 있다. 이러한 파형이 존재시 그 크기는 internal radius보다 큰 규모를 갖고 있으며 동시에 internal radius와 거의 같은 0.2 cm 정도의 규모를 갖는 흐름도 존재하고 있다. 동안 경계류의 폭이 시간에 따라 변화됨도 관측된 바 파형은 서쪽으로 전파되며 그 속도는 경압 Rossby wave의 위상속도에 해당하는  $2 \times 10^{-2}$  cm/sec( $\tan\alpha=0.2$ 인 경우)을 갖고 있고  $\tan\alpha=0.1$ 일 때  $10^{-2}$  cm/sec의 속도로 서쪽으로 움직임을 보이고 있으나 이러한 파동의 진행에 따른 영향이 내부에서 거의 소멸되는 경향을 보이고 있음이 특히하다.

한편 하층 유체 운동이 지형 효과를 포함하고 있을시 그 효과는 매우 국지적으로 서안 경계류 부근에 국한 되고 있음을 하층 운동에서 볼 수 있다(Fig. 4). 이때 상층 운동의 특성은 지형효과가 없는 경우와 비교할 때 매우 다른 양상을 보인다. 서안 경계류의 폭은  $\tan\alpha$  증가시 감소하고 동안 경계류의 폭은 거의 변화가 없으나 Rossby number가 증가시 전체적으로 감소하는 경향을 보인다. 더구나  $\tan\alpha=0.2$ 일때는 내부 운동의 파형의 파수가 증가하여 소위 meandering 양상을 보이고 있다. 짧은 파장의 흐름 형태는 매우 느린 서향의 경압성 Rossby wave임을 보여주고 있으나 그 현상이 남쪽에 치우쳐 나타나고 있음은 지형효과가 없는 경우와 동일하다. 서안 경계류의 이안 현상도 뚜렷하지 않거나 거의 없음은 지형 효과가 없는 경우에 비해 서안 경계류의 폭이 훨씬 넓어지면서(동시에 동안 경계류의 폭은 감소됨) 남향의 동안 경계류보다 우세한 때문으로 보인다. 극전선 부근에 위치한 하층의 해저 지형은 하층 서안

경계류가 시계 방향의 흐름을 갖도록 유도하므로 이에 따른 상층수의 순압성 흐름은 급격한 남향으로의 방향 전환이 요구되며 결과는 폭넓은 상층수의 서안 경계류의 폭이 증가하는 것으로 판단된다.  $\tan\alpha=0.1$ 인 경우 모든 Rossby number에서 동안 경계류의 시간적인 변화가 발생하고 있고 그 형태는 일종의 standing wave와 같다(Fig. 5.a). 즉 주기가 회전수의 약 100배에 해당하는 파형이 나타나고 있으나 이로 인한 서안 경계류의 변화는 보이지 않는다. 단 내부에서는 internal radius와 거의 같은 크기의 파형이 dye-line에서 관측됨은 그 방향의 급격한 변화가 내부에 파급되고 있음을 알 수 있다.  $\tan\alpha=0.2$ 일때 나타나는 짧은 파장 및 이에 따른 남쪽에서의 meandering은 단파의 경압성 Rossby mode가 우세하게 존재함을 의미하며 이때 동안에서의 경압성 구조가 지형 효과가 없는 경우에 비하여 축소된 형태를 보이고 있음은 하층수 운동이 상층에 미치는 영향이 매우 크다는 것을 말해 주고 있다. 따라서 상층 경계면에 하층수와 상층수가 접하게 되는 극전선이 존재함은 상층수의 북향 운동이 더 이상 진행하지 못하는 물리적인 경계를 만들게 되며 이로 인해 상층수의 재순환과 하층수에 의한 두층간의 경계면 변화가 서로 상호작용을 하면서 발생하는 상층 순환의 특성을 실험적으로 관찰하였다. 본 실험에서 관측된 상층수의 운동은 그 에너지원이 하층수의 운동이며 따라서 상층수의 경압 불안정과

같은 현상 관측은 별도의 실험대상이 될 수 있을 것이다. 이러한 실험을 위해서는 상층에 유입(대만 난류에 해당) 및 유출(소야 및 쓰가루 해협을 통한 유출)에 의한 정상류를 첨가시킴으로써 가능하며 이러한 실험 결과는 추후 발표 예정이다.

## 참고문헌

- 나정열, 최진영, 1993. 원통형 이층유체의 회전반 실험. 한국해양학회지, 28: 17-23.
- Baker, D. J., 1967. Shear layers in a rotating fluid. *Journal of the Fluid Mechanics*, 2: 165-175.
- Hart, J. E., 1975. The flow of a two-layer fluid over topography in a polar ocean. *Journal of Physical Oceanography*, 5: 615-624.
- Isoda, Y., 1994. Warm eddy movements in the eastern Japan sea. *Journal of oceanography*, 50: 1-15.
- Na, J. Y., et al. 1992. Monthly-mean sea surface winds over the adjacent seas of the Korea Peninsular. *Journal of Oceanological Society of Korea*, 27: 1-10.
- Parson, A. T., 1969. A two-layer model of Gulf Stream separation. *Journal of the Fluid Mechanics*, 39: 511-528.
- Pedlosky, J., 1979. *Geophysical fluid dynamics*. Springer Verlag, NY., 86-93.
- Rhines, P., 1970. Edge-, bottom-, and Rossby waves in a rotating stratified fluid. *Geophysical fluid dynamics*, 1: 273-302.
- Stommel, H., 1958. The abyssal circulation. *Deep-Sea Research*, 5: 80-82.
- Veronis, G., 1981. Dynamics of large-scale ocean circulation. *Evolution of Physical Oceanography*, 140-183.

Accepted August 31, 1994