

## 동해 해수순환 모의를 위한 회전반 실험

나정열 · 최진영 · 황병준  
한양대학교 지구해양학과

### Simulation of the East Sea Circulation in a Laboratory Experiment of Rotating Cylindrical Container

JUNGYUL NA, JINYOUNG CHOI AND BYOUNGJUN HWANG  
*Dept. of Earth and Marine Sciences Hanyang University, KOREA*

$\beta$ -효과를 포함한 원통 용기 내의 상하층유체의 하층운동을 하층수와 같은 밀도를 갖는 외부유체를 주입하여 야기시키고 상층수와 같은 유체를 유입 및 유출시켜 지형류 조절에 의한 경계면의 변형 및 이에 따른 상층운동 특성을 실험적으로 관찰하였다. 특히 유입-유출 위치를 변경시키고 동시에 유입과 유출량을 다르게 하여 상층수에 해상풍의 효과를 첨가하였다. 실험의 목적은 극전선 형성과 관련하여 유입-유출 경로(대만난류의 유입-쓰가루, 쓰야 유출)를 결정짓는 외부 인자를 파악하고자 함이다.

유입-유출량이 같은 경우 유입수의 경로는 서안을 따라 북상하다가 이안후 위도에 평행하게 유출된 반면 상층수에 해상풍의 영향을 주었을시 서안 경계류의 분기(negative curl of wind stress 효과시), 남향의 서안 경계류에 의한 유입수의 내부로 침투(positive curl of wind stress 효과시)등의 현상을 보여준다. 한편 유입-유출의 위치를 변경시켜 유입수의 위치를 서안경계에 두었을 시 유입수의 경로가 경계면의 지형류 조절에 의해 서안에 근접하게 북상후 유출(negative curl), 동안에 근접하게 북상후 유출(positive curl)의 특성을 보여준다. 북부의 반시계방향의 흐름이 유입수의 북방 한계를 결정짓는 역할을 하고 있음도 관찰되었다.

Two-layered fluid with sloping bottom and top( $\beta$ -effect) in a rigid cylinder is put on the rotating table. To drive the lower-layer motion in "the Sverdrup type" flow external fluid is pumped into the lower-layer. By introducing inlet-outlet system in the upper-layer, an analogy to the Tsushima-Tsugaru, Soya of the East Sea has been tested. The position of the inlet-outlet system and the difference between the strength of inlet or outlet flow are changed to see the effects of the wind stress on the upper-layer. The northern part of inflow toward the outlet may be interpreted roughly as the position of the polar front in the East Sea. Experimental observations have revealed that the inflow flows along the western boundary before it separates into the interior and flows straight toward the outlet position. However, the wind effect is imposed upon the upper-layer, the western boundary flow branches into two parts of which one flows along the boundary and the other flows into the interior under the influence of negative wind stress curl, while southward western boundary flow seems to block the flow and deflect it to the interior. The changes in the position of inlet-outlet system produce more significant changes in flow pattern in that cyclonic flow in the north controls the northern extent of the polar front by deflecting the northward interior motion toward the west(outlet).

Interface displacement which depends strongly on the velocity difference between two layers seems to play crucial role in terms of the path of upper-layer flow, particularly, the inflow.

\*\*본 연구는 1993년도 교육부 기초과학육성연구비에 의하여 일부지원을 받아 수행된 것임.

## 서 론

해양의 성층화 된 수직구조를 영구 수온약층을 경계면으로 밀도가 다른 두개의 층으로 가정된 후 외력(바람 마찰력 혹은 밀도차에 의한 부력)을 가했을 시의 이층유체의 적응을 관찰한 회전반 실험(나와 최, 1993, 1994)에서 경계면의 기울기 변화가 상층 및 하층운동에 매우 중요하게 작용함을 제시하였다. 이러한 기울기 변화는 상층(혹은 하층)의 수심 증가로 인한 상대 와도의 증가가 하층(혹은 상층)의 수심 감소 및 상대 와도의 감소를 야기시켜 결국 와도 방정식을 만족시키는 범위 내에서 실험 유체 운동이 관측되고 있음을 보여주고 있다. 예로 internal Froude number가 증가시 Sverdrup type의 하층운동에 따른 상층수의 운동은 몇 개의 폐쇄순환 형태를 보여준바 있다(나와 최, 1993). 따라서 지금까지의 실험에 의한 동해 해수순환 모의는 전층이 거의 균질한 동해 북부해역에 가해지는 해상풍 효과(나 등, 1992)에 의한 하층운동이 동해 남부 해역의 상층에 미치는 영향을 관찰기 위함이었다. 한편 동해 해수순환은 대만난류의 유입 및 유출을 배제하고는 설명할 수가 없으며 대만난류의 유입은 그 범위가 소위 극전선을 경계로 동한 난류의 이안, 대만난류의 분기 극전선의 굴곡된 모양 및 그 주변에 존재하는 "eddies" 등을 포함하는 매우 복잡한 양상을 보여주고 있음은 주지의 사실이다. 특히 전선의 위치는 동안 난류가 이안하는 북위 38도 부근에서 북동쪽으로 연결된 북위 40도까지 걸쳐 있음은 대만난류 유입 및 동해 북부해역의 해수 운동에 의한 영향과 연계성이 존재함을 의미한다고 볼 수 있다. 이층유체 실험에서 하층의 반시계방향 운동에 따른 상층 순환은 북쪽에 반시계방향, 남쪽에 시계방향의 폐쇄순환 형태를 보여 주면서 서안에서의 경계류의 이안 현상을 관측한바 있으며(나와 최, 1993) 이안 되는 위치는 internal Froude number에 매우 민감하게 변함을 보여 주었다. 즉 internal Froude number의 증가는 경압성 운동에 의한 경계면의 변위의 증가를 야기시키며 이에 따른 경계면의 변화(상하층간 유속 차로 인한)는 상층유체의 운동방향에 직접적인 영향을 주게 된다. 따라서 상층유체는 하층유체 운동에 따른 경계면 변화 즉, 지형류 조절(geostrophic adjustment)의 영향을 받게 된다. 상층유체에 유입-유출

및 동해 북부해역에 가해지는 강한 바람 마찰력을 동해 해수순환의 중요한 힘들이라고 가정한다면 회전반 실험으로 상기 두 가지 효과를 재현할 수 있을 것인 바 본 논문의 목적은 원통형 이층유체에 하층운동을 야기시키고 상층은 유입-유출 체계를 포함시켜 상층 순환 특성에 미치는 두 가지 힘의 관계를 규명하고자 함이다. 구체적으로는 상층유체의 유입-유출양을 조절하여 상층에 바람 마찰력 효과도 포함시키고자 한다. 이러한 실험방법은 이미 시도된 바대로(나와 최, 1993, 1994) wind stress curl의 부호를 외부유체를 유입(positive curl) 혹은 유출(negative curl) 시킴으로써 조절 가능하다. 유입과 유출양의 차이는 바로 curl 부호와 직결되기 때문이다. 그러나 대만난류를 염두에 둔 유입 형태는 관성류가 되도록 하여 유입시 지형류 조절에 따른 경계면의 변화를 야기시키도록 해야 하며 유입에 따른 경계면 변화와 하층운동에 의한 경계면 변화 사이에 상호 작용이 어떠한 형태로 나오게에 따라 유입 관성류의 효과를 볼 수 있을 것이다. 외부유체 주입에 의한 하층운동(positive curl 효과)은 남향의 서안경계류를 포함하고 있었으며(나와 최, 1993) 서안경계에서의 상층 순환은 하층운동과는 방향이 다른 북향 흐름도 존재하고 있기 때문에 상층에 관성류를 유입시켰을 시 상층 서안경계류와의 상호 작용에 의한 유입수의 경로는 극전선의 공간적인 분포와 연계시킬 수 있을 것이다.

## 실험장치 및 방법

본 실험에서 사용된 장치(Fig. 1)는 이미 사용했던 것으로(나와 최, 1993, 1994) 직경 20 cm, 높이 20 cm인 플라스틱 원통의 바닥과 뚜껑을 같은 경사도를 갖는 평면으로 만들어 상하층 운동이  $\beta$ -효과를 느끼게 하였다. 이때 상층의 뚜껑은 부유 상태를 유지시킴으로써 상층유체의 체적 변화에 순응하게 하였다. 한편 유체를 유입 혹은 유출시키기 위한 펌프는 튜브를 회전 압축시키는 연동(peristaltic)펌프를 사용하였으며 유량은 10~1000  $\mu$ /hr의 범위를 갖고 있기 때문에 Rossby number( $Ro$ )를 작게 하기 위해서 ( $Ro \sim O(10^{-3})$ ,  $Ro$ 는 유입 혹은 유출양에 비례함) 유입 혹은 유출양은 약 0.3  $\mu$ /sec로 유지하였다. 하층수의 유입 및 유출은 원통 바닥의 내

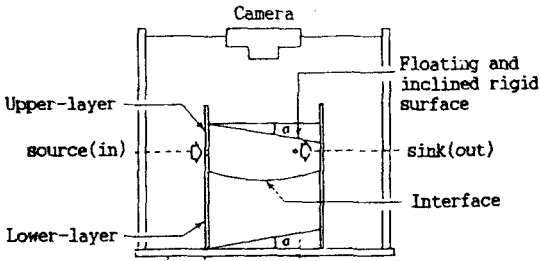


Fig. 1. Geometry of the source-sink flow in a rotating container with a inclined bottom and inclined rigid floating surface.

벽면을 따라 흐르도록 하였으나 상층수(평균두께 약 2cm)의 유입은 그 위치를 동해를 염두에 두고 원통의 정남 혹은 남서 방향으로 택하였으며 유출 위치 역시 쓰가루 및 소야 해협을 한 점으로 가정하여 정동 혹은 북동 방향을 택하였다(Fig. 2). 유입 및 유출 위치를 변화시킨 이유는 유입류와 서안 경계류와의 상호작용 및  $\beta$ -효과에 의한 유입류의 경로를 파악하기 위함이며 두 경우 모두 유입 유출 사이의 각은  $135^\circ$ 가 되도록 하였다. 유입 및 유출은 내경이 2mm인 튜브 끝에 관성을 억제하기 위한 확산체(diffuser)를 접착하여 관성류가 급하고 강하게 내부로 유입되는 것을 방지하였으며 이때 유입량은  $0.3 \mu\text{l}/\text{sec}$ 이내에서 조절하였다.

특히 유체흐름 관찰을 위한 직경 0.009 cm의 스테인리스 선이 thymol blue용액인 상층수 내에 고정되어 있기 때문에 상층수의 유량 및 체적에 주의를 하여 경계면의 상승시 그 최대 높이가 와이어에 접촉하지 않도록 고려하였다. 한편 상층수에 바람마찰력 효과를 주기 위하여 유입양과 유출양을 조절하였는데 만일 positive curl의 효과를 주기 위해서는 유입양이 유출양보다 크게 함으로써 상층수 내부에 수직운동 즉 vortex-tube stretching 효과를 주게 되며 유입양이 유출양보다 작을 경우는 negative curl의 효과를 주게 된다. 실험 내용은 하층수에 외부유체의 유입(반시계방향의 비대칭 운동) 혹은 유출(시계방향의 비대칭 운동)에 따라 상층수에 유입-유출을 가미한 경우 상층운동을 관찰하여 기록한 것이다.

실험 결과

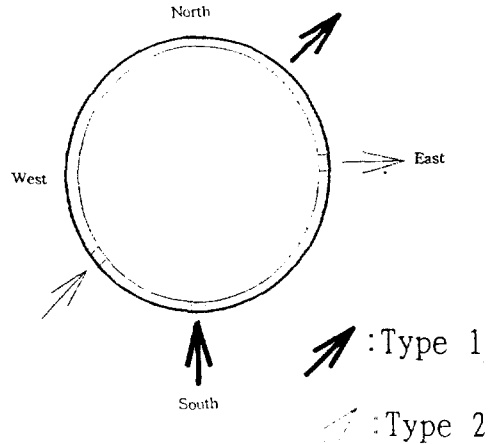


Fig. 2. Positions of inlet-outlet system in the upper-layer. (Type 1: south to northeast. Type 2: southwest to east).

하층유체에 외부유체를 주입시 internal Froude number( $F$ )가 6 이하인 경우 상층 흐름은 북부에서 시계방향, 그리고 남부에는 반시계방향의 흐름이 존재하나  $F$ 값이 6이상이면 북부에는 반시계방향, 남부에는 시계방향의 흐름이 존재함을 보였다(나와 최, 1993, Fig. 7 참조). 이러한 현상은 경계면의 기울기 변화에 의한 상층유체의 지형류 조절이 그 원인임을 알 수 있다(Pedlosky, 1986, p86~93). 우선 상층유체의 정남 방향의 유입과 북동 방향으로의 유출인 경우(Fig. 3) 유입으로 인한 북향의 서안경계류는 서안 북부에서 이안 하여 위도에 평행하게 유출되는 모양을 보여주고 있다. 유입-유출이 없는 경우 상층운동은 남부에 시계방향, 북부에는 반시계방향의 흐름이 존재했음을 상기할 때 남부에서 유입된 유체는 시계방향 흐름을 더욱 강화시켰으며 이로 인해 북부의 반시계방향의 흐름을 능가하여 서안 북부로부터의 이안 현상을 뚜렷하게 보여주고 있다. 이러한 현상은 유입-유출 작용이 하층운동에 의해 변형된 경계면을 따르기보다는 유입-유출에 경계면이 적응한 결과 때문이라 사료되며 유입수가 유출되기까지의 경로는  $\beta$ -효과에 의한 서안에서의 이안 현상이 뚜렷함을 보여주고 있다.

이층유체에서 경계면의 변형이야말로 최소한의 에너지를 요하는 과정이고 특히 상층이 뚜껑에 의해 rigid-lid 표면을 갖고 있기 때문에 가장 민감하게

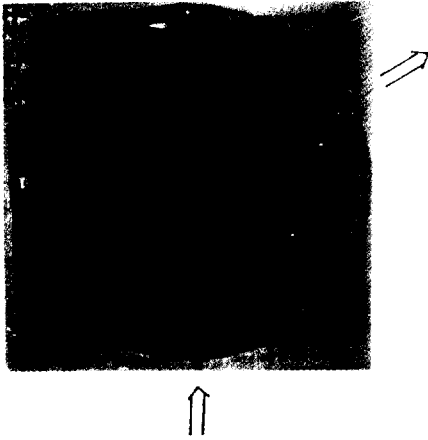


Fig. 3. Flow pattern of the equal strength of inlet-outlet in the upper-layer with source-driven lower-layer motion. The  $\beta$ -effect drives the inlet flow separated from the western boundary and toward the outlet. (Arrows indicate the position of inlet and outlet)( $F=6.394$ ).

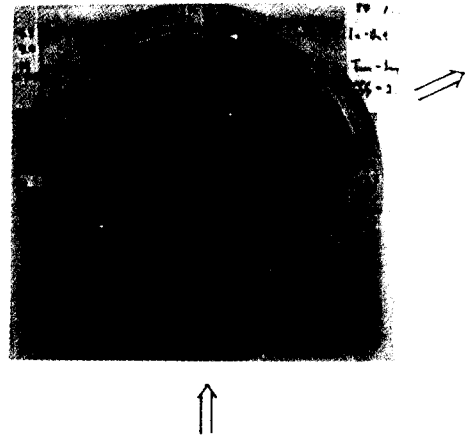


Fig. 5. When the strength of outlet is greater, northward western boundary current splits into two branches. Overall clockwise circulation is dominant even the upper-layer is experiencing the negative curl effect( $F=6.394$ ,  $Ro=1.726 \times 10^{-3}$ ).

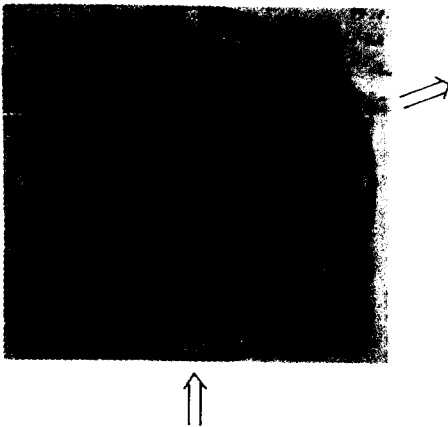


Fig. 4. The strength of inlet is greater than that of outlet. Sverdrup-type flow is dominant, but most of the inlet flows northwest then into the interior with weaker northeast flow.( $F=6.394$ ,  $Ro=1.996 \times 10^{-3}$ ).

반응하는 경계면에 의해 상층 순환의 특성이 나타나고 있음은 주지의 사실이다.

따라서 유입-유출량의 차이를 갖게 함으로써 상층에 가해지는 새로운 외력을 모의할 수 있는바 우선 유입량이 유출량보다 크게 하여 소위 상층유체가 양의 와도(positive vorticity=positive curl의 효과)

를 느끼게 하였다(Fig. 4). 하층은 이미 언급한대로 반시계방향의 single-cell type의 순환을 하고 있고 상층은 유입량이 유출량보다 크므로 해서 하층과 같은 효과를 느끼게 됨에 따라 상층 순환 역시 하층과 거의 같은 형태의 Sverdrup-type 순환을 보이고 있다(Fig. 4). 정남에서 유입된 유체의 일부는 서안을 따라 북상하다가 곧 이안 하여 내부로 흘러들어 가며 동쪽으로 편향된 흐름은 곧 북향으로 변하여 내부로 흐르고 전반적으로 반시계방향의 순환이 우세하다. 특히 서안에서 북향의 유입수가 강한 남향의 서안경계류에 의해 내부로 유입되는 것은 유입수에 의한 영향이 상층수 전반에 반시계방향의 positive curl의 영향을 미침으로써 북향의 서안 유입류의 세력이 남향의 서안경계류보다 매우 약함을 보여주고 있다. 즉 유입-유출과 같은 지역적인 영향보다는 전층에 가해지는 힘에 의한 유입-유출수의 적용이 나타나고 있음을 보여주고 있다. 이러한 원인은 이중유체의 경우 상하층 사이의 속도 차에 의해 그 경계면의 기울기가 비례한다는 사실로부터 상층은  $\beta$ -효과 및 positive curl의 효과를 그대로 받고 있으며 따라서 그 경계면 기울기의 효과가 크지 않음을 의미한다.

그렇다면 상층에 가해지는 힘이 하층에 가해지는 힘과 반대가 될 때 이로 인한 경압성의 극대화를

예측할 수 있으므로(경계면 기울기의 극심한 변화) 유입양보다 유출양을 크게 하여 내부운동과 외적인 영향을 비교하였다(Fig. 5). 하층과 정반대의 negative curl의 효과를 받는 상층은 앞서의 예와는 반대로 내부순환이 시계방향의 모양을 나타내고 있으며 특히 북향의 서안경계류는 일종의 분기(branching) 현상도 보이고 있음은 주목할 만하다. 유입수는 대부분 북향의 서안경계류와 합세하며 일부가 유출점을 향하여 내부로 흐르고 있는 반면 동안에서는 미약하나마 남향의 반류가 존재하고 있다. 특이한 것은 서안경계류와 합세하였던 유입수가 북향 중 그 주축이 분리되어 내부운동보다 약한 서안경계류와 폭 넓은 내부 북향류로 분리되는 것이다. 또한 내부운동은 그 크기에 있어 하층의 영향을 받아 매우 감소된 특성을 갖고 있으나 방향은 전반적으로 북향을 보이고 있음은 경계면 변화가 가장 심한 곳이 서안경계와 가까운 곳임을 시사하고 있다. 이러한 추측은 상층수가 약하나마 negative-curl의 영향을 받고 있으며 따라서  $\beta$ -효과에 의해 남향의 내부운동과 북향의 서안경계류를 나타내어야 하나 하층수의 반시계방향의 흐름과 상호 작용시 그 결과는 경계면의 기울기가 증가하여 내부유체의 경우는  $\beta$ -효과를 능가하고 있다고 볼 수 있다. 즉 유입-유출 위치에 의한 시계방향(negative vorticity)의 흐름과 이와는 반대 경향의 상층수에 가해지는 negative-curl의 효과가  $\beta$ -효과를 능가하여 서안경계를 제외한 내부운동은 positive-curl의 영향을 받는 경우와 동일하게 되었다고 본다.

따라서 유입-유출의 효과는 결국 서안경계를 따라 그대로 유지되고 유입수는 내부를 거쳐 북동 부에서 강한 흐름을 보여주고 있는 것은 결국 유입-유출수가 변형된 경계면에 적응하여 나타난 결과라고 사료된다. 이러한 경향을 시험하기 위해 유입-유출 위치를 변경시켜 경계면과의 조절 여부를 관찰하였다.

### 남서-정동의 유입-유출 실험

유입 위치를 남서 방향, 유출 위치를 정동에 두어 두 위치가 이루는 각은  $135^\circ$ 로 전과 같게 하였으나 유입 위치는 서안경계류의 영향을 받는 위치에 있게 하여 경계류와 유입수가 직접 접촉하도록 하였다. 상층수에 positive-curl의 효과를 주었을 시 유입수는

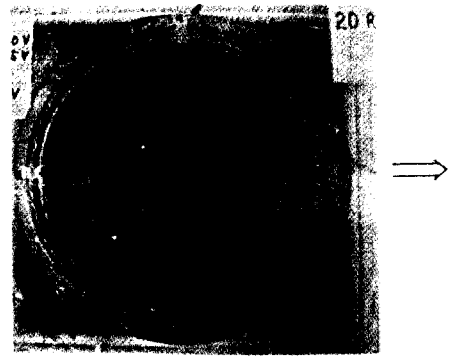


Fig. 6. Comparing with Fig. 4, new position of inlet and outlet with a greater inlet, disturbs the boundary flow and creates small scale eddies of the internal radius. ( $F=6.394$ ,  $Ro=2.158 \times 10^{-3}$ ).

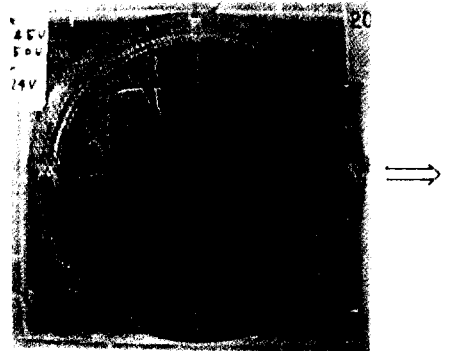


Fig. 7. Abrupt change in flow direction along the western boundary and the northern part, compared to the Fig. 5, are seen clearly. The inlet flow forms an anti-cyclonic eddy and part of it flows southward and then into the interior. Cyclonic flow in the north seems to control the part of inlet-outlet flow. ( $F=6.394$ ,  $Ro=1.888 \times 10^{-3}$ ).

남향의 강한 서안경계류로 인해 남쪽으로 치우치면서 그 일부는 내부로 그리고 나머지는 남쪽경계를 따라 흐르는 모양을 나타내고 있으나 북부에서의 반시계방향의 강한 흐름은 정남 위치의 유입수 영향과 비슷하다(Fig. 6). 단 유입수가 내부로 흐르면서 Rossby 내부 반경과 거의 같은 크기의 불안정한 흐름이 존재하고 있음이 특이하다.

한편 상층수에 negative-curl 효과를 주었을 시는 유입-유출 위치에 따른 영향이 매우 크게 나타남을 보이고 있다(Fig. 5와 Fig. 7 비교). 우선 유입수는

유입 직후 반시계방향의 흐름을 야기시키면서 거의 내부로 흐르고 남향의 서안경계류가 존재하며 북부에서의 흐름도 반시계방향으로 바뀌었으며 남부에서의 경계를 따른 북향류 역시 존재하지 않고 있다. 이러한 변화는 북부에서 동서로 엇갈리는 흐름으로부터 경계면의 기울기가 정반대의 부호를 갖는 형태로 변형되어졌음을 나타내며 특히 유입수 부근 및 서안 경계 내에서의 경계면 역시 기울기의 부호가 바뀔 정도의 조절이 일어나고 있음을 보여주고 있다. 지금까지의 관찰 결과는 유입-유출 경로를 판단할 수 있는 몇 가지 요인을 제시하고 있다. 첫째 유입-유출만이 존재시 유입수의 경로는  $\beta$ -효과에 의한 서안 분리 후 위도에 거의 평행하게 유출되나 해상풍에 의한 마찰력이 존재시 내부에서의 분리 후 유출(positive curl 효과) 혹은 서안에서의 분리 후 유출(negative curl 효과)의 경로를 나타낸다. 한편 유입수와 경계류의 작용시 유입수에 의한 지형류 조절은 경계면을 변화시킴으로써 서안경계류의 내부 진입 경로를 변경시키며 북부에서의 반시계방향 흐름을 야기시켜 남향의 서안경계류를 형성시킨다.

**토론 및 결론**

상하층이  $\beta$ -효과를 포함하고 하층운동이 positive wind stress-curl에 의해 내부는 남향류 서안경계류

는 북향을 갖는 Sverdrup type의 운동을 하고 있을 시 상층에 유입-유출 및 wind stress의 영향을 주어 이에 따른 순환 특성을 실험적으로 관찰하였다. 특히 동해 해수순환의 중요한 외적 요인을 대마난류의 유입 그리고 동해북부에 가해지는 해상풍에 의한 positive wind stress curl(나 등, 1992) 등으로 고려하여 이러한 외적인 힘을 하층수에 외부유체 주입(해상풍 효과) 상층수는 외부유체의 유입 및 유출(대마난류 및 동해 남부에 가해지는 해상풍 효과)로 모의 할 수 있었다. 실험의 주된 관측 항목은 하층수 운동에 의한 경계면의 적응 및 지형류 조절에 의한 상층 순환 특성을 유입-유출의 위치 변화와 관련하여 유입-유출 경로 변화 양상 즉 극전선의 공간적인 특성을 파악코자 함이었다.

따라서 본 실험 중 상층 흐름을 조정하는 가장 중요한 요인은 경계면 기울기의 변화, 유입 위치 및 유입수에 의한 경계면의 조절이었다. 본 실험에서 사용한 이층유체는 경계면마찰을 극소화 할 수 있는 것으로 상하층이 준 지형류 조건을 만족하고 있기 때문에 각층의 운동은 경계면의 기울기 변화에 의해 상호 보완하는 경우가 된다. 따라서 이러한 조건하에서 상층유체의 흐름을 관측하여 하층유체 흐름을 근거로 기울기의 변화를 예측할 수 있게 된다. 즉 상하층의 azimuthal velocity를 각각  $V_1, V_2$ 라 할 때 경계면(h)과의 관계는

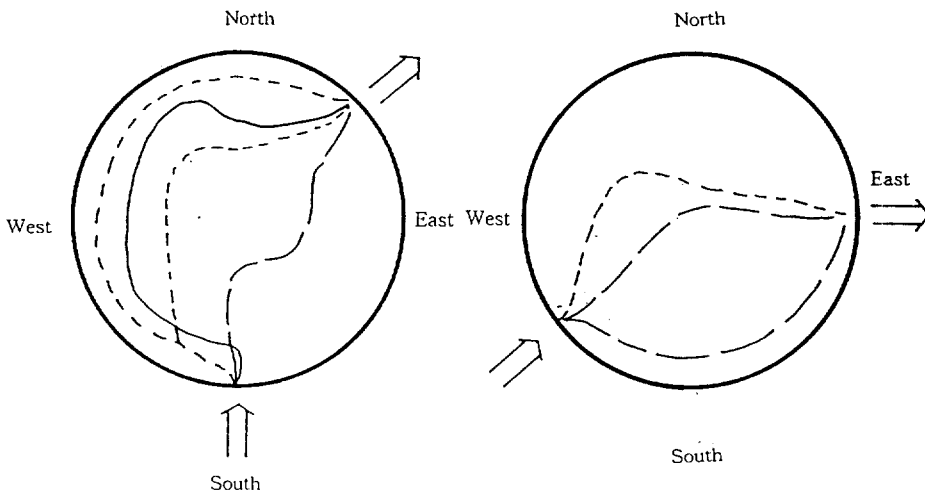


Fig. 8. Summary of the observed paths of the inflow for two different inlet-outlet system with and without the wind effects. — (1) indicates the case of no wind effects, ---- (2) for the negative curl effect. - · - (3) for the positive curl effect

$$V_2 - V_1 = \frac{\partial h}{\partial r}$$

로 주어지며(Pedlosky, 1986), 따라서 하층의 내부 운동 즉  $V_2 > 0$ 인 경우 상층운동으로부터  $V_2 - V_1$ 의 부호에 의해 경계면의 radial 방향 기울기를 예측할 수 있다. 즉 서안에서  $V_1 < 0$  (북향)이면  $V_2 - V_1$ 의 부호는 양이 되며 경계면은 서안을 향하여 상승하는 경우가 될 것이다( $\frac{\partial h}{\partial r} > 0$ ). 내부운동이 남향인 경우(동안 부근) 역시  $V_2 - V_1 > 0$ 으로 인해 동안을 향하여 경계면이 상승하는 경우가 될 것인바 상층유체 순환형태를 근거로 radial 및 azimuthal 방향으로의 기울기 변화를 예측할 수 있게 된다.

따라서 유입-유출에 의해 상층 순환의 급격한 방향 변화 내지는 서안경계류의 남향 혹은 북향은 경계면이 적응된 상태, 즉 지형류 조절에 의한 결과라고 보아야 할 것이다.

결론적으로 하층운동에 의해 변형된 이층유체의 경계면은 상층유체에 유입-유출 효과만을 주었을 시 유입수의 경로가  $\beta$ -효과에 의해 서안에서 분리되어 위도에 평행한 축을 따라 유출되도록 지형류 조절에 의해 재 변형됨을 알 수 있다. 상층에 해상풍의 효과를 첨가 시는 이에 따른 경계면의 변형이 유입-유출 경로를 변경시켜 유입수가 내부에서 분리 후

유출(positive curl) 혹은 서안에서 분기 후 유출(negative curl)되는 경로는 보여준다. 유입 및 유출의 위치 변화는 서안경계류와의 작용이 극대화되어 경계류의 내부로의 진입을 변경시켜서 북부에서의 반시계방향의 흐름이 남향의 서안경계류를 형성케 한다(Fig. 8). 이러한 실험 결과는 동해의 수온약층의 시공간적인 변화와 관련지어 대마난류의 분기, 동한난류의 이안 그리고 북한한류의 남하 과정과 연계성을 부여 할 수 있을 것이다. 그러나 실제로 대마난류의 유입은 극전선 이남에 국한됨으로 극전선과 이층유체의 상층의 유입-유출 효과를 첨가한 실험의 필요성이 대두되나 실험장치의 제작이 매우 난해하여 용이한 실험이 아님도 지적해야 할 것이다.

### 참고문헌

- 나정열, 최진영, 1994. 원통형 이층유체의 회전반 실험(극전선 모의). 한국해양학회지, 29: 296-303.  
 나정열, 최진영, 1993. 원통형 이층유체의 회전반 실험. 한국해양학회지, 28: 17-23.  
 나정열, 서장원, 한상규, 1992. 한국근해의 월평균 해상풍. 한국해양학회지, 27: 1-10.  
 Pedlosky, J., 1986. Geophysical fluid dynamics. Springer Verlag, N.Y.