

## 1992년 울릉도 북서부해역에서 관측된 난수성 소용돌이의 구조특성\*

신흥렬 · 변상경 · 김철수 · 황상철 · 신창웅  
한국해양연구소 해양물리연구부

### The Characteristics of Structure of Warm Eddy Observed to the Northwest of Ullungdo in 1992

HONG-RYEOL SHIN, SANG-KYUNG BYUN, CHEOLSOO KIM.  
SANGCHUL HWANG AND CHANG-WOONG SHIN  
*Physical oceanography division, Korea Ocean Research &  
Development Institute (KORDI)*

1992년 3월부터 6월까지 속초앞 해역에서 동일한 난수성 소용돌이가 계속 관측되었다. 이 난수성 소용돌이는 1991년에 형성되어 속초앞 해역에서 월동을 한 후 1992년 4~6월에는 약간 북상하였다. 3월에 관측되었을 때 소용돌이의 크기는 직경이 약 160 km, 수심 약 330 m였고, 상층 내부에 약 10°C, 34.2 psu의 균질층(혼합층)이 최대 폭 약 130 km, 수심 약 230 m로 존재하고 있었으나 6월에는 약간 축소되었다. 난수성 소용돌이 표층의 최대유속은 약 65 cm/s였으며, 수심 200 m 에서도 약 20 cm/s 이상의 큰 유속을 갖고 있었다. 이러한 유속구조는 대체로 지형류 평형을 잘 유지하고 있었으나, 6월에는 약간의 차이가 나타났다. 또한 동한난류의 표층유속은 50~70 cm/s로 나타나 소용돌이의 북향류와 비슷했으며, 동한난류수는 주로 수심 200 m 이내의 상층에서만 존재했다.

A warm eddy was continuously observed to the east of Sokcho, Korea from March to June 1992. This warm eddy had been formed in 1991, wintered to the east of Sokcho, and moved northward a little during April-June 1992. The diameter and the depth of the eddy were respectively about 160 km and about 330 m in March. The homogeneous (mixed) layer of 10°C and 34.2 psu water was found at the upper layer with the maximum size of about 130 km and maximum depth of about 230 m in March. The size of the eddy and homogeneous layer decreased in June. Maximum current velocity of the eddy was about 65 cm/s at the surface layer and exceeded 20 cm/s at 200 m depth. It is shown that the flow field was nearly in geostrophic balance, but there was a little difference in the current velocity between ADCP and geostrophic calculation in June. The surface velocity of the East Korean Warm Current(EKWC) was 50~70 cm/s which was very similar to the northward current velocity of the eddy. The EKWC water appeared in the layer upper than 200 m depth.

#### 서 론

東韓暖流와 北韓寒流가 만나는 동해 남서해역 울릉도 부근에서 暖水塊의 존재는 지금까지 단편적으

로 종종 관측되었다. 그러나 울릉도 부근 해역의 난수괴가 소용돌이인가에 대해서 명확히 밝혀 준 관측은 드물었다. 즉 난수괴가 난수성 소용돌이라면 時計 方向으로 回轉하는 流向 및 流速을 가져야

\*본 연구는 해군의 지원 및 과학기술처의 특정연구개발사업(BSPN 00187-611-1) 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

한다. 울릉도 부근 해역에서 난수괴의 회전을 알 수 있는 유속 관측은 1992년 3월 한국해양연구소 해양물리연구부의 연구팀이 초음파식 유속계 (Acoustic Doppler Current Profilers, ADCP)를 사용하여 관측함으로써 최초로 실시되었으며, 또한 CTD (Conductivity, Temperature, Depth)관측도 병행되어 난수성 소용돌이의 구조가 상세히 관측되었다.

An et al.(1994)과 Kang and Kang(1990)은 國立水産振興院 자료를 사용하여 울릉도 부근의 해역에서 난수괴의 존재, 이동 방향 및 대마난류와의 관계에 대해서 서술하였다. 그 결과 동해 남서 해역에는 거의 매년 1~2개씩의 난수성 소용돌이가 존재하고 있으며, 북쪽과 서쪽 또는 남쪽으로 이동한다고 밝혔다. 그러나 난센 관측에 의한 자료를 사용하였기 때문에 상세한 내부 구조를 알 수 없었으며, 또한 유속 관측이 없었던 탓으로 소용돌이의 회전에 관한 내용이 결여되어 있다.

김(1991) 및 Kim et al.(1991)은 동해에서 1989년에 관측한 CTD 자료를 사용하여 울릉도 주변 中層均質水의 수직구조 및 시간변화에 대해 비교적 상세하게 언급하였다. 그들은 10°C 중층균질수를 난수괴로 보았으나 유속관측이 없었던 탓으로 소용돌이와의 관계에 대해서는 명확한 언급이 없었다. Isoda and Saitoh(1993)는 인공위성 영상자료와 국

립수산진흥원의 자료를 분석하여 한국東岸부근에서 대마난류(또는 동한난류)로부터 소용돌이로 貫入하는 해수에 대한 假說을 제시하였다. 그는 자신의 가설을 입증하기 위해서는 소용돌이의 유속구조가 자세히 밝혀져야 한다고 보고하였다.

울릉도 부근해역에서의 난수성 소용돌이는 이 해역의 해황변동에도 매우 중요한 역할을 하고 있으므로, 소용돌이의 상세한 구조 및 변화과정을 파악하고 이동경로 등을 연구하는 것은 해양학 연구의 발전뿐만 아니라 기후에의 영향, 수산 및 국가방위에도 필요한 연구이다. 이러한 필요성에 의하여 한국해양연구소의 동해중규모 해황분석 연구팀은 1992년부터 난수성 소용돌이에 대한 既存資料의 조사와 더불어 현장 관측계획을 수립하여, 1992년부터 1993년까지 포항과 속초사이의 해역에서 난수성 소용돌이에 대한 CTD 및 流速觀測을 실시하였다.

본 논문은 1992년에 동해 남서해역에서 관측된 난수성 소용돌이의 수온·염분 밀도 및 유속의 상세한 구조를 밝히고 변화양상을 파악하는 동시에 동한난류와의 관계를 분석하는데 목적을 두고 있다.

## 자료 및 분석방법

1992년에 동해 남서해역의 해황특성을 조사하기

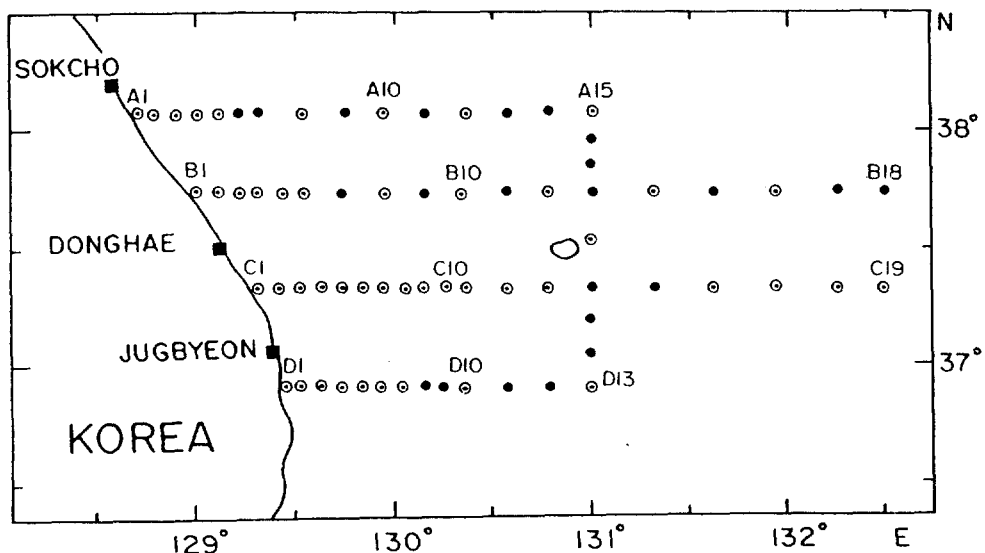


Fig. 1. The locations of CTD, ADCP observation stations in March, May and June 1992. Close circles (●), and open and close circles (○) indicate the location observed to 700 m depth and to the bottom respectively.

위하여 3, 5, 6, 8, 10월 및 12월에 CTD 시스템(Mark IIIB, EG & G)을 사용하여 약 9~28 km 간격으로 수온 및 염분 관측을 수심 700 m 또는 해저까지 실시하였다(Fig. 1). 또한 수온·염분의 관측정점과 동일한 위치에서 超音波式 流速計(ADCP, RD-SC 0150)를 이용하여 해류를 관측하였다.

ADCP 유속관측에서 조사 정점의 수심이 150 kHz

음원이 도달할 수 있는 350 m 보다 얇은 경우에는 Bottom tracking 방법으로 측정하였다. 그 이상의 깊은 곳에서는 수심 290 m를 무류면으로 가정하여 환산한 상대유속을 사용하였다.

1992년의 관측자료 중에서 본 논문에서는 동일한 난수성 소용돌이의 남쪽 절반이 계속 관측된 3월(11~19일), 5월(11~18일) 및 6월(12~17일)의 자

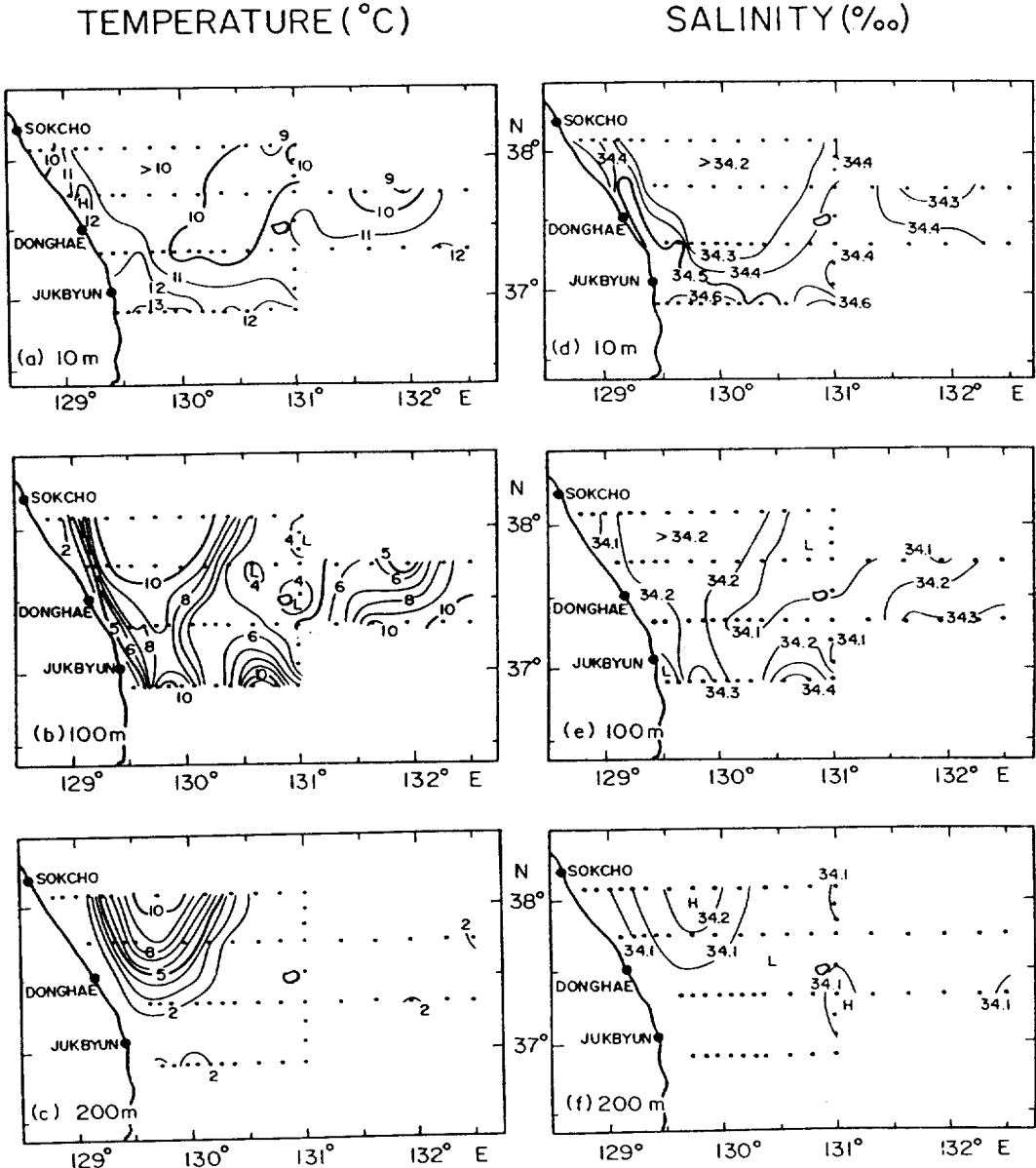


Fig. 2. Horizontal distributions of temperature and salinity at (a) and (d) 10 m, (b) and (e) 100 m, and (c) and (f) 200 m depth in March 1992.

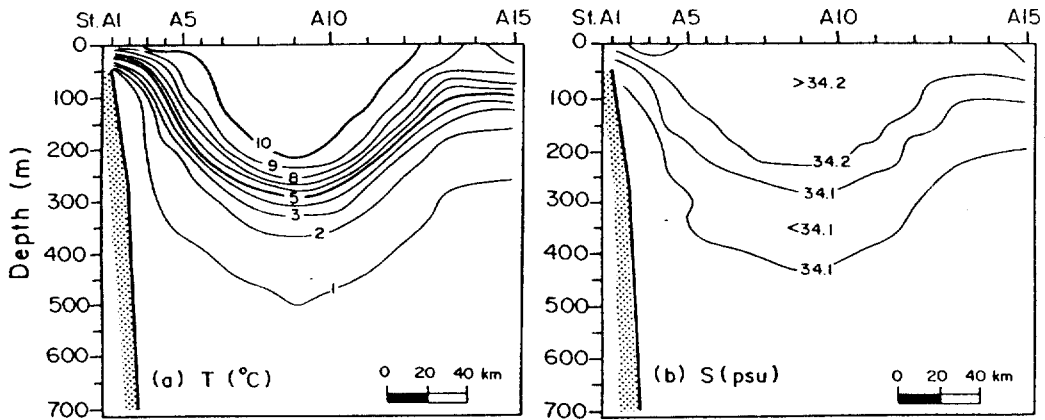


Fig. 3. Vertical distributions of (a) temperature and (b) salinity on section A in March 1992.

료를 사용하여 난수성 소용돌이의 내부구조 특성 및 변화과정을 분석하였다. 또한 1991년과 1992년의 인공위성 영상자료(서울대학교 해양연구소 제공)를 사용하여 소용돌이의 위치를 파악하였으며, 1991년 국립수산진흥원의 해양정선(102~107정선) 관측자료를 소용돌이의 형성시기 및 변화과정 분석에 사용하였다.

### 1992년 3월에 관측된 난수성 소용돌이의 구조

#### 1. 수온·염분분포

난수성 소용돌이의 모양이 표층의 수온분포(Fig. 2a)에서는 명확하지 않았지만, 수심 100 m와 200 m에서는 정선 A와 B에 걸쳐 2~10°C의 등온선이 반원의 모양으로 나타나 소용돌이의 남쪽 절반의 모양을 나타내고 있다(Fig. 2b와 2c). 소용돌이의 중심위치에는 약 10°C, 34.2 psu의 균질층을 갖는 해수가 넓게 분포하고 있었으며, 그폭은 속초 부근 정선 A의 표층에서 약 125 km, 수심 200 m에서는 약 35 km였다.

수심 100 m에서는 6~8°C의 등온선이 미약하지만 소용돌이의 남쪽과 연결되어 있었으며, 수심 10 m의 경우 34.5 psu 이상의 고염수가 해안을 따라 북상하고 있어서 상층에서는 동한난류수의 일부가 속초 부근해역까지 진출하고 있었음을 알 수 있다.

염분의 분포(Fig. 2d~f)에서는 수온분포와는 달리 표층부터 소용돌이의 구조가 나타난다. 표층에서 34.3

과 34.4 psu, 수심 200 m에서는 34.1과 34.2 psu의 등염분선이 정선 A, B, C에 걸쳐 분포하고 있는 소용돌이의 위치 및 염분의 수평분포를 보여주고 있었다. 표층 10 m의 경우 소용돌이의 중심보다 좁은 폭의 주변에서 염분치가 높게 나타나고 있으나, 보다 깊은 100 m와 200 m에서는 소용돌이 중심에 고염수가 나타나고 있다. 이는 표층 소용돌이의 주변에서는 동한난류수의 새로운 공급이 계속되고 있음을 의미하고 있다.

Fig. 3은 정선 A에서의 수온과 염분의 수직단면도를 나타낸 것이다. 반타원형의 볼록한 1~10°C 등온선의 구조가 정선 A에서 약 160 km 폭의 난수성 소용돌이의 존재를 나타내고 있다. 이 소용돌이의 수직구조 특징은 상층에 약 10°C, 34.2 psu의 均質層(混合層)이 A9 정점을 중심으로 두텁게 분포하고 있었으며 최대수심은 약 230 m였다.

이와 같이 상층의 두터운 10°C, 34.2 psu의 균질층은 Tomosada(1978)와 Shin et al.(1992)이 언급한 바와 같이 겨울철에 표층에서 혼합되어 형성된 수괴이므로 越冬을 한 난수성 소용돌이에서 나타나는 특징으로 생각된다. 따라서 이 소용돌이는 1991년에 대마난류로부터 형성된 것으로 사료된다. 이것은 1991년 10~12월에 38°N, 130°E 부근을 중심으로 원형의 난수괴가 인공위성 사진에 나타난 사실로 확인할 수 있었다.

10°C 균질층의 아래에는 2~10°C의 수온약층이 정선 A에서 최대수심 약 360 m까지 나타나고 있었다(Fig. 3a). 소용돌이가 없는 주변해역에서 수온약

DENSITY ( $\sigma_t$ )

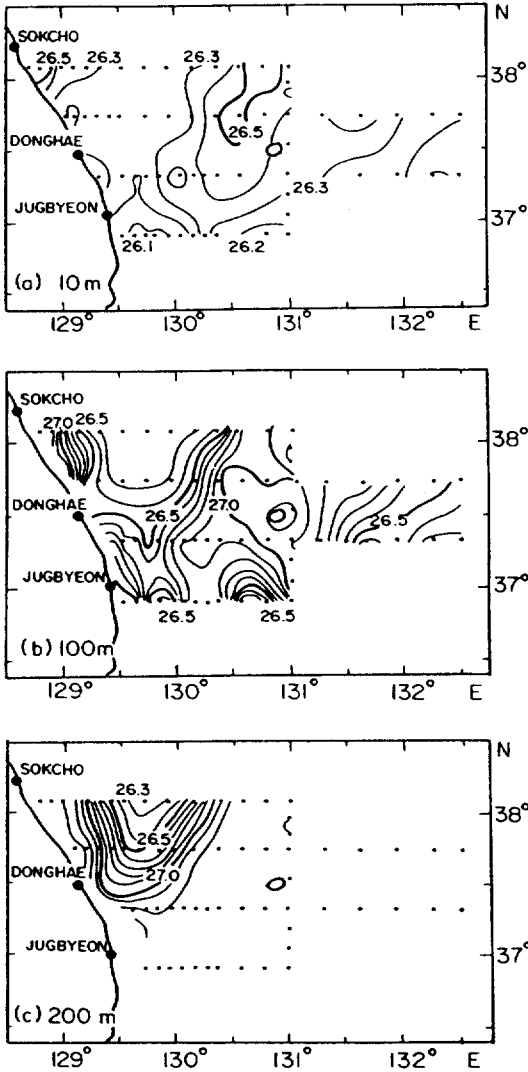


Fig. 4. Horizontal distributions of density( $\sigma_t$ ) at (a) 10 m, (b) 100 m, and (c) 200 m depth in March 1992.

층의 수심은 약 150 m를 보였으며, 수온약층의 아래에는 1°C 이하의 東海固有水가 해저까지 분포하고 있다.

소용돌이의 중심에서 수심 약 250~450 m 사이에 34.1 psu 이하의 염분최소층이 존재하고 있다(Fig. 3 b). 난수성 소용돌이가 없는 해역에서는 수심 100~300 m 사이에 염분최소층이 존재하고 있다. 이 염분최소층은 상층에 존재하는 34.2 psu 이상의 고염

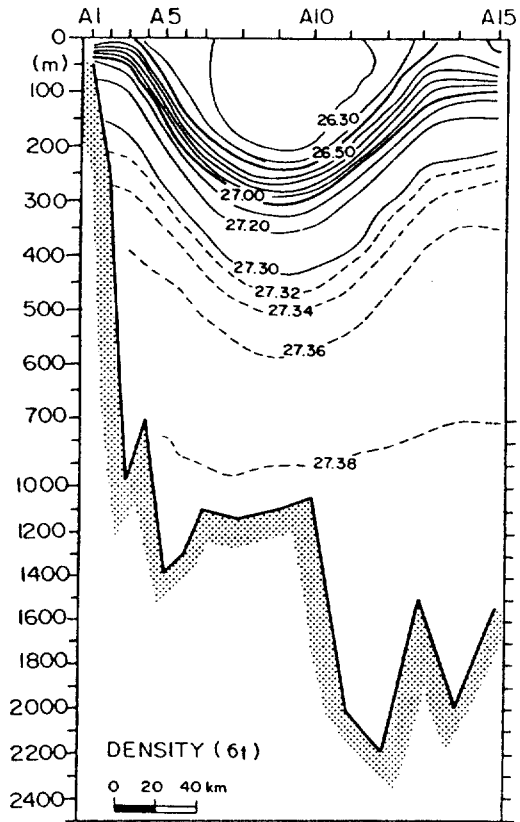


Fig. 5. Vertical distribution of density( $\sigma_t$ ) on section A in March 1992.

분층과 하층부터 해저까지 분포하는 34.10~34.12 psu의 고염분층과의 경계가 되고 있다. 이와 같은 상층과 하층 수괴의 경계가 되는 염분최소층의 중간 수심을 소용돌이의 깊이로 정의할 수 있다면 A9 정점에서 최대수심 약 330 m의 깊이를 갖는다.

2. 밀도분포

밀도의 수평분포(Fig. 4)는 수온의 분포와 비슷하기 때문에 표층에서 등밀도선의 분포는 소용돌이의 존재를 뚜렷이 보여주지 못하고 있다. 수심 100 m와 200 m에서는 속초앞 해역에서 소용돌이의 중심에  $\sigma_t=26.3$  이하의 저밀도수가 고온수의 영향을 나타내고 있었으며, 주위에는 26.3~27.2의 등밀도선이 원형으로 분포하여 난수성 소용돌이의 존재를 나타내고 있었다.

밀도의 수직단면도(Fig. 5)에서는 소용돌이의 상층

내부에 26.3 이하의 균질한 밀도층이 10°C, 34.2 psu의 균질층을 나타내면서 두텁게 존재하고 있었다. 수괴분포의 특징으로 이 난수성 소용돌이의 깊이를 약 330 m로 정의하였지만, 밀도분포에 의하면 소용돌이의 형태를 나타내는 불룩한 밀도구조는 비록 미약하지만 수심 약 1500 m의 해저까지 나타나고 있었다. 일본 동쪽의 쿠로시오해역에서 관측되었던 난수성 소용돌이는 수심 2500 m의 해저까지도 밀도구조가 나타났다는 사실이 보고되었다(Yasuda et al., 1992).

Na and Kim(1990)과 An et al.(1994)이 난수성 소용돌이의 운동이 해저지형과 밀접한 관계가 있음을 제시하였듯이, 해저부근까지 존재하는 소용돌이의 밀도구조는 소용돌이가 형성, 소멸 및 이동되는 과정에서 해저지형의 영향을 받을 수 있으며 반대로 소용돌이의 운동이 해저부근의 해수운동에 영향을 주고 있음을 알 수 있다.

### 3. 유속분포

표층에서 소용돌이의 양상을 나타내는 유속의 분포가 정선 A, B에서 명확히 나타나고 있다(Fig. 6). 표층의 유속분포에서 소용돌이의 폭은 정선 A에서 약 165 km로 수운의 분포를 기준으로 한 값과 거의 일치한다. 정선 B에서는 표층 최대유속이 나타나는데 B3 정점에서北向流로 68 cm/s,南向流의 최대유속은 65 cm/s로 B9 정점에서 나타난다. 표층에서의 최대유속은 약 60 cm/s로 소용돌이의 중심에서 약 50 km 떨어진 지점에 위치하므로 이 값을 근거로 해수의 일주시간을 계산하면 최소 약 6일이 걸린다.

표층(Fig. 6a)에서 정선 A의 서쪽은流向이 주로 북동류, 동쪽은 주로 남향류이고, B정선의 서쪽에서는流向이 주로 북서류, 동쪽에서는 남서류로 나타나고 있는 것으로 보아서 정선 A는 소용돌이의 중심부에서 약간 북쪽에 위치했던 것으로 사료된다. 따라서 정선 A가 소용돌이의 중심부근을 지나고 있었으므로 여기에서 나타난 특성들이 소용돌이를 대표하는 것으로 볼 수 있다.

이와 같은 표층부근의 유속분포는 수심 100 m 부근까지 비슷한 양상으로 나타나지만, 그 아래의 하층에서는 전체적으로 유속이 감소하였다. 수심 200 m에서(Fig. 6c)는 시계방향의 소용돌이 양상이 A, B정선에서 나타나지만 유속이 크게 감소하여

### CURRENT VELOCITY (cm/s)

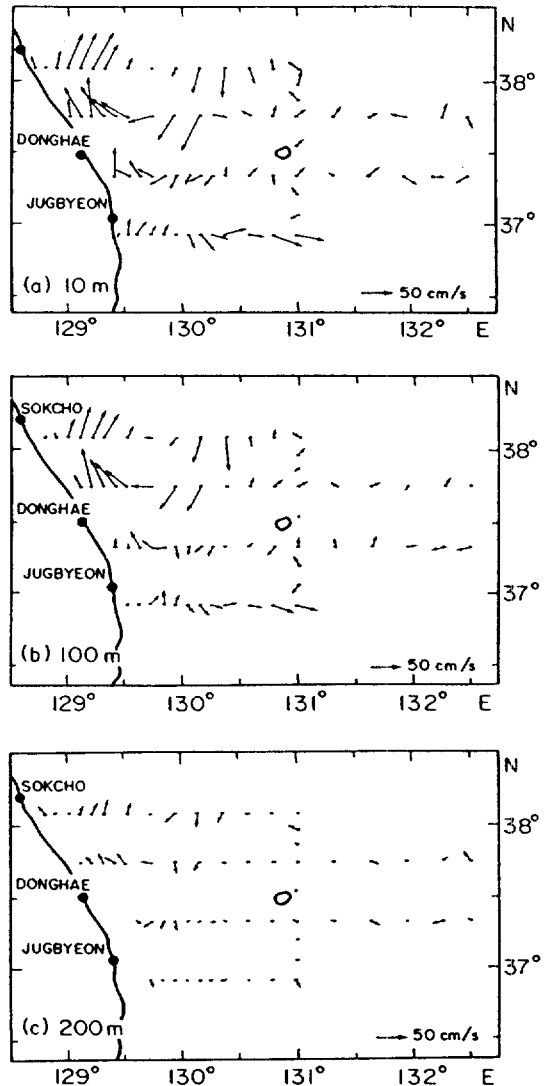


Fig. 6. Horizontal distributions of current velocity at (a) 10 m, (b) 100 m, and (c) 200 m depth in March 1992.

최대유속이 약 25 cm/s였다.

Fig. 7은 정선 A에서 수심에 따른 유속의東西成分과南北成分을 나타내며, 남북성분의 유속이 동서성분에 비하여 우세하다. 남북성분의 유속(Fig. 7b)을 보면, A9 정점을 기준으로 서쪽에서는北向成分의 최대 값이 A5 정점의 수심 26 m에서 64 cm/s였다.南向成分은 A9 정점의 동쪽에서 나타나고 최대

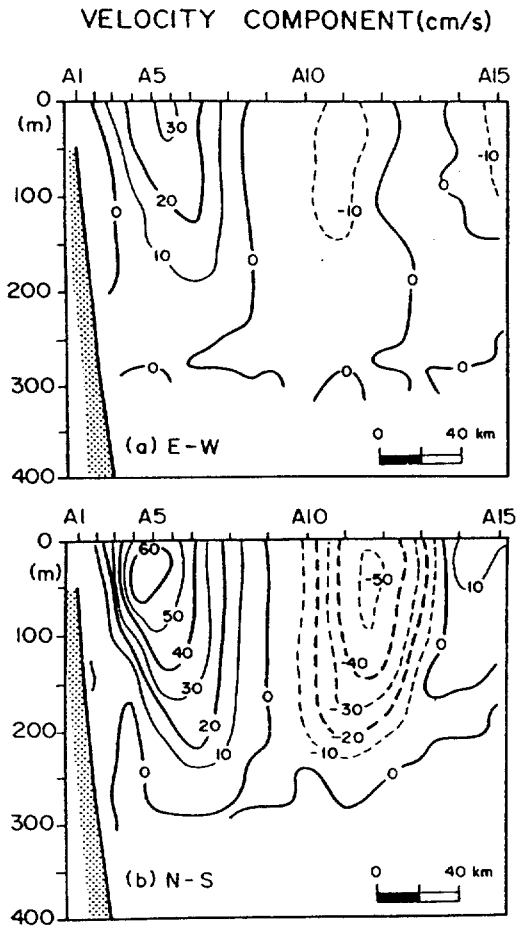


Fig. 7. Vertical distributions of current velocity for (a) east-west and (b) north-south components on section A in March 1992.

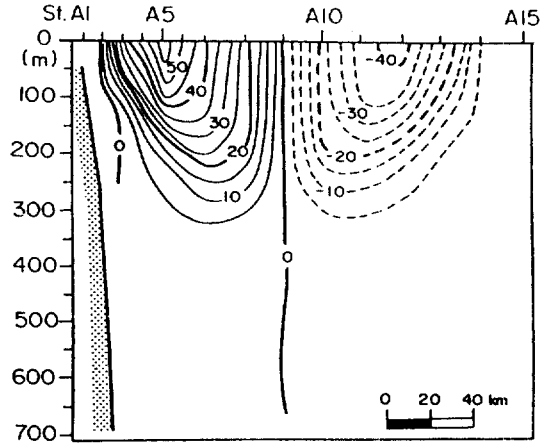


Fig. 8. Vertical distribution of calculated geostrophic current on section A in March 1992. Solid lines indicate northward component and dashed lines indicate southward component.

값은 A12 정점의 수심 34 m에서 51 cm/s였다.

소용돌이가 있는 해역에서는 수심 200~250 m의 상층에서 10 cm/s 이상의 큰 유속 값이 나타나고 있었던 반면에 소용돌이가 없는 해역에서는 해표면 부근에서부터 10 cm/s 이하의 약한 유속을 나타내고 있었다.

이 소용돌이의 地衡流 유속을 조사하기 위하여 정선 A에서 700 m 수심을 無流面으로 가정하여 지형류 계산을 하였다(Fig. 8). 그 결과 소용돌이의 유속분포는 ADCP에 의한 유속분포와 매우 비슷한 양상이고, 최대유속은 서쪽 A5 정점에서 北向流로

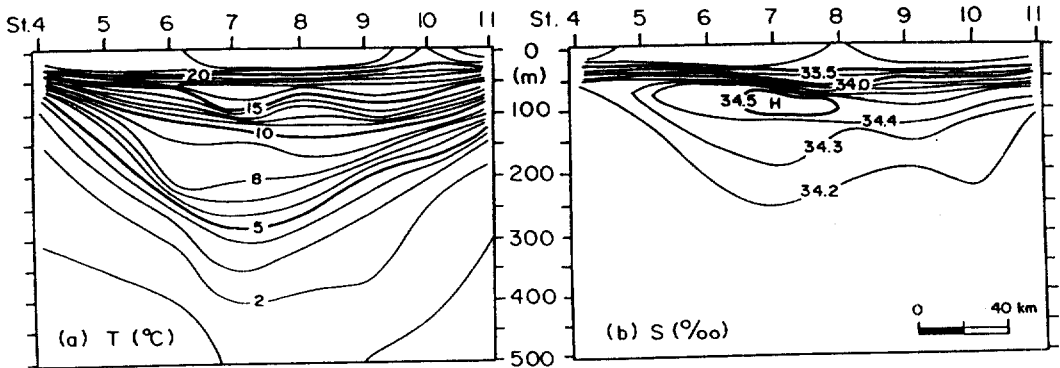


Fig. 9. Vertical distributions of (a) temperature and (b) salinity on line 106 (37° 54'N) in October 1991.



Fig. 10. AVHRR satellite image of sea surface temperature on October 13, 1991(courtesy of Seoul National University/RIO).

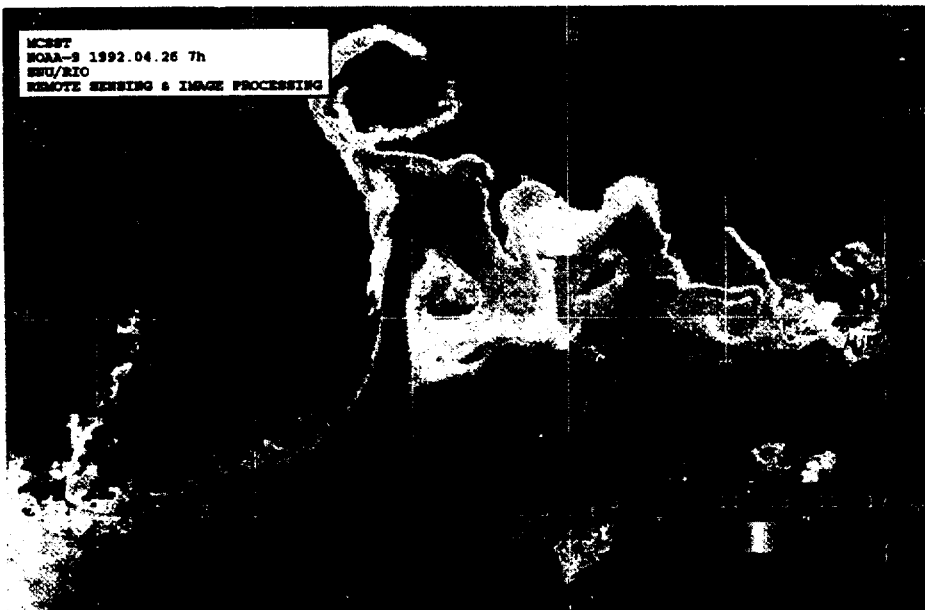


Fig. 11. The same as in Fig. 10 except on April 26, 1992.



60 cm/s, 동쪽 A12 정점에서는 南向流 45 cm/s로 ADCP에 의한 유속과 약 5 cm/s의 차이가 있었다. 이와 같이 지형류 계산에 의한 유속분포가 ADCP에 의한 유속분포와 매우 비슷한 양상을 보이고 있다는 사실은 관측된 난수성 소용돌이가 지형류 평형을 잘 이루고 있었음을 알 수 있다.

## 난수성 소용돌이의 구조변화

### 1. 1991년 10월의 난수성 소용돌이 구조

난수성 소용돌이의 내부에 존재하는 약 10°C, 34.2 psu의 두터운 균질층은 이 난수성 소용돌이가 越冬한 것을 증명해 주고 있었다. 쿠로시오나 대마난류로부터 형성되어 겨울을 거치지 않는 난수성 소용돌이는 이와 같이 낮은 온도의 두터운 균질층이 나타나지 않고 쿠로시오나 대마난류가 보유한 10°C 이상, 34.2 psu 이상의 고온·고염수가 존재하는 성층구조를 갖는다.

월동하기 전의 소용돌이의 내부구조를 조사하기 위하여 동해에서 1991년에 관측된 국립수산진흥원의 자료(해양조사연보, 1993)를 분석하였다. Fig. 9는 1991년 10월 5~6일에 106정선(37° 54'N)에서의 수온과 염분의 수직단면도이다. 인공위성 영상자료에 의하면 이 소용돌이는 38°N, 130°E 부근에서 큰 위치변화 없이 1991년 10월부터 1992년 5월까지 계속 존재하였다(Fig. 10과 Fig. 11).

직경 약 150 km의 난수성 소용돌이의 내부에는 15°C 이상의 고온 및 34.5 psu 이상의 고염의 해수가 소용돌이의 중심에 존재하고 있었다. 10°C의 두터운 균질수는 존재하지 않았으며, 특히 34.5 psu 이상의 고염수가 소용돌이의 중심에 나타나고 있는 것으로 보아서 이 소용돌이는 1991년에 형성된 것으로 사료된다. 왜냐하면 소용돌이 외부로부터 내부로 유입된 고염수는 소용돌이의 가장자리에 한정되어 나타나고 중심부에는 영향을 미치지 않기 때문이다(Shin et al., 1992; 김 등, 1994). 또한 1991년에 국립수산진흥원이 관측한 2~8월의 동해 관측자료(102-107정선)를 분석해 본 결과 울릉도 부근의 해역에서는 8월 초순까지 이러한 수온과 염분의 구조 및 고염수를 가진 소용돌이가 나타나지 않았다. 이러한 사실들은 이 난수성 소용돌이가 1991년 8월 중순이후 울릉도 부근의 해역에서 형성되었거나 동

쪽의 다른 해역에서 형성되어 울릉도 부근의 해역으로 이동된 것으로 사료된다.

그후 겨울을 지나는 동안에 난수성 소용돌이의 표층에서 대기 쪽으로 열을 방출함으로써 냉각되면서 대류에 의하여 상층에 두터운 균질층이 형성된다. 약 10°C, 34.2 psu에서 형성되는 두터운 균질층(혼합층)은 쿠로시오 해역에서는 약 400 m의 두께를 갖고 있으며(Tomosada, 1978; Shin et al., 1992), 동해 남서해역에서는 약 200 m의 두께를 갖는다. 이러한 소용돌이 내부 균질층의 수온, 염분 및 두께는 소용돌이가 越冬하는 해역에서 겨울철의 大氣溫度와 바람의 세기에 따라 결정된다고 생각된다. 겨울철의 대기온도가 낮고 바람이 강할 수록 낮은 온도에서 두터운 균질층이 형성될 것이다.

Fig. 12는 1991년 10월과 1992년 3월의 소용돌이 내부(a) 및 5월에 관측된 소용돌이 내부와 가장자리(b)의 T-S 분포를 나타낸 것이다. 표층을 제외한 수심 50~300 m에서 1992년 3월에는 1991년 10월보다 저온·저염의 상이한 수괴특성을 보이고 있었다. 이것은 소용돌이가 겨울을 지나면서 수심 약 300 m 이내의 상층수괴가 대기 쪽으로 열을 방출하면서 혼합이 되어 저온·저염분으로 변질되었기 때문이다.

한편 이 소용돌이가 1992년 5월에 관측되었을 때 소용돌이 가장자리에 동한난류로부터 새로 공급된 고온·고염의 해수(warm streamer)가 존재하였다. 이 warm streamer의 수괴분포(Fig. 12b)는 1991년 10월에 관측된 소용돌이 내부의 수괴분포(Fig. 12a)와 매우 흡사하다. 따라서 1991년 10월은 이 소용돌이가 형성된지 수개월 이내로 보아도 좋을 것이다.

### 2. 1992년 5월에 관측된 난수성 소용돌이 구조

#### 2.1 수온·염분분포

1992년 5월 중순에도 3월과 같은 해역에서 관측을 한 결과 동일한 난수성 소용돌이가 A, B정선에서 관측되었다(Fig. 13). 5월 중순에는 상층이 태양열의 가열과 동한난류의 복상으로 표층에서는 소용돌이의 형태가 전혀 나타나지 않았지만, 수심 200 m에서(Fig. 13c)는 3월의 위치보다 약간 북상한 형태로 소용돌이가 속초앞 해역에 위치하고 있었다.

수심 100 m에서는 동한난류의 복상으로 C, D정선 및 소용돌이의 서쪽과 동쪽에 3월보다 강한 전선이 형성되어 있었으며, 34.3 psu 이상의 고염수도 수심

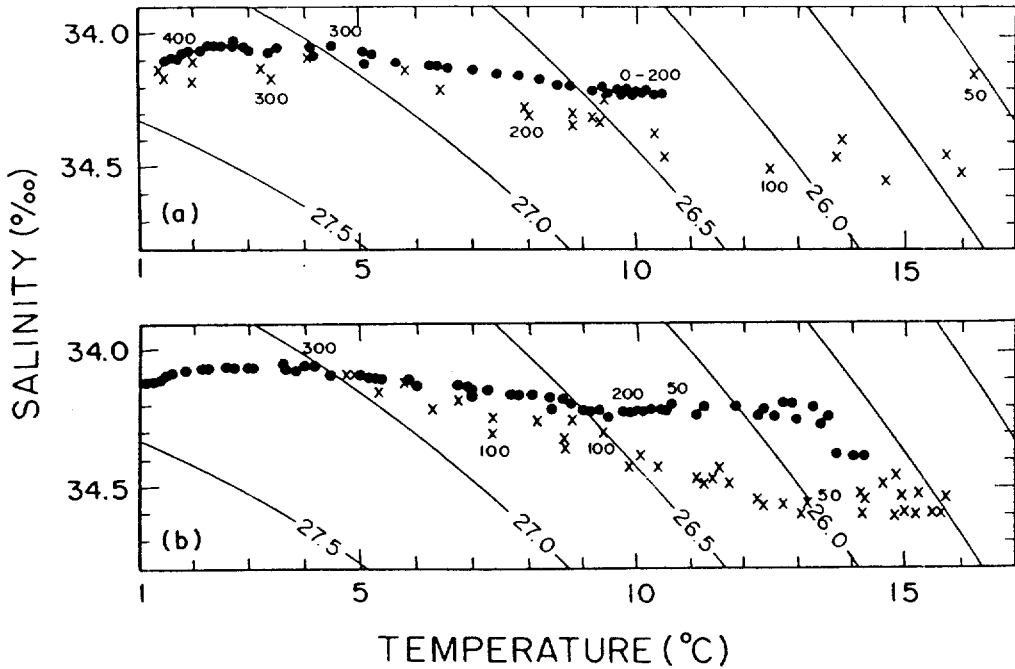


Fig. 12. T-S diagram of the data used. (a) close circles(●) indicate the water mass of warm eddy in March 1992, and crosses(x) indicate that of warm eddy in October 1991. (b) close circles(●) indicate the water mass of the central part of warm eddy, and crosses(x) indicate that of the warm streamer in May 1992.

100 m 이내의 상층에서 넓게 나타나고 있었다(Fig. 13b, e). 즉, 남쪽으로부터 북상하는 동한난류수의 영향은 수심 100 m 이내의 상층에만 한정되어 있었다.

정선 A의 수직단면도(Fig. 14)를 기준으로 한 소용돌이의 크기는 약 150 km, 수심은 약 330 m로 3월 관측시와 거의 같았다. 또한 소용돌이 내부의 수피 분포도 3월 관측시와 거의 변화가 없었다(Fig. 12b).

5월이 되어 소용돌이에 생긴 가장 큰 변화는 가장자리에 새로운 고온·고염수가 불룩한 형태로 존재하고 있는 것이다. 수심 100 m 이내의 상층에서 정점 A5와 A12를 중심으로 11°C 이상, 34.3 psu 이상의 고온·고염수가 40~50 km의 폭으로 형성되어 있었다. 3월의 관측에서 소용돌이의 남서쪽 표층에서만 미약하게 존재하였던 이러한 고온·고염수는 3월 중순이후에 동한난류의 북상에 따라 고온·고염의 해수가 좁은 띠모양(warm streamer)으로 남쪽으로부터 유입되어 소용돌이의 가장자리를 따라 시계방향으로 회전하면서 분포하고 있는 것이다.

난수성 소용돌이는 密度形成說(Isostasy) 때문에 그 구조가 표층에 잘 나타나지 않을 때가 많다. 즉 수심 100~200 m 이내의 상층에서는 소용돌이의 중심이 저온·저염의 해수로 구성되어 있는 경우가 많기 때문에, 표층의 수온분포 만으로는 하층의 소용돌이의 존재가 뚜렷이 나타나지 않을 수 있다. 4~5월에 표층에서 소용돌이의 가장자리에 나타나는 이러한 고온·고염의 warm streamer는 인공위성 영상사진에서 반지(ring) 모양으로 보이기 때문에 소용돌이의 위치를 파악하는데 중요한 역할을 한다(Fig. 11).

## 2.2 유속분포

표층의 최대유속은 소용돌이의 서쪽에서 북향류로 55~60 cm/s였으며, 남향류는 동쪽에서 약 50 cm/s로 3월과 거의 비슷하였다(Fig. 15). 정선 A에서 소용돌이의 서쪽에서는 주로 북서류, 동쪽에서는 주로 남서류가 나타나 A정선이 소용돌이의 중심보다 약간 남쪽에 위치하고 있었음을 알 수 있었다. 따라서 3월보다 위치가 약간 북쪽으로 이동하고 있었다.

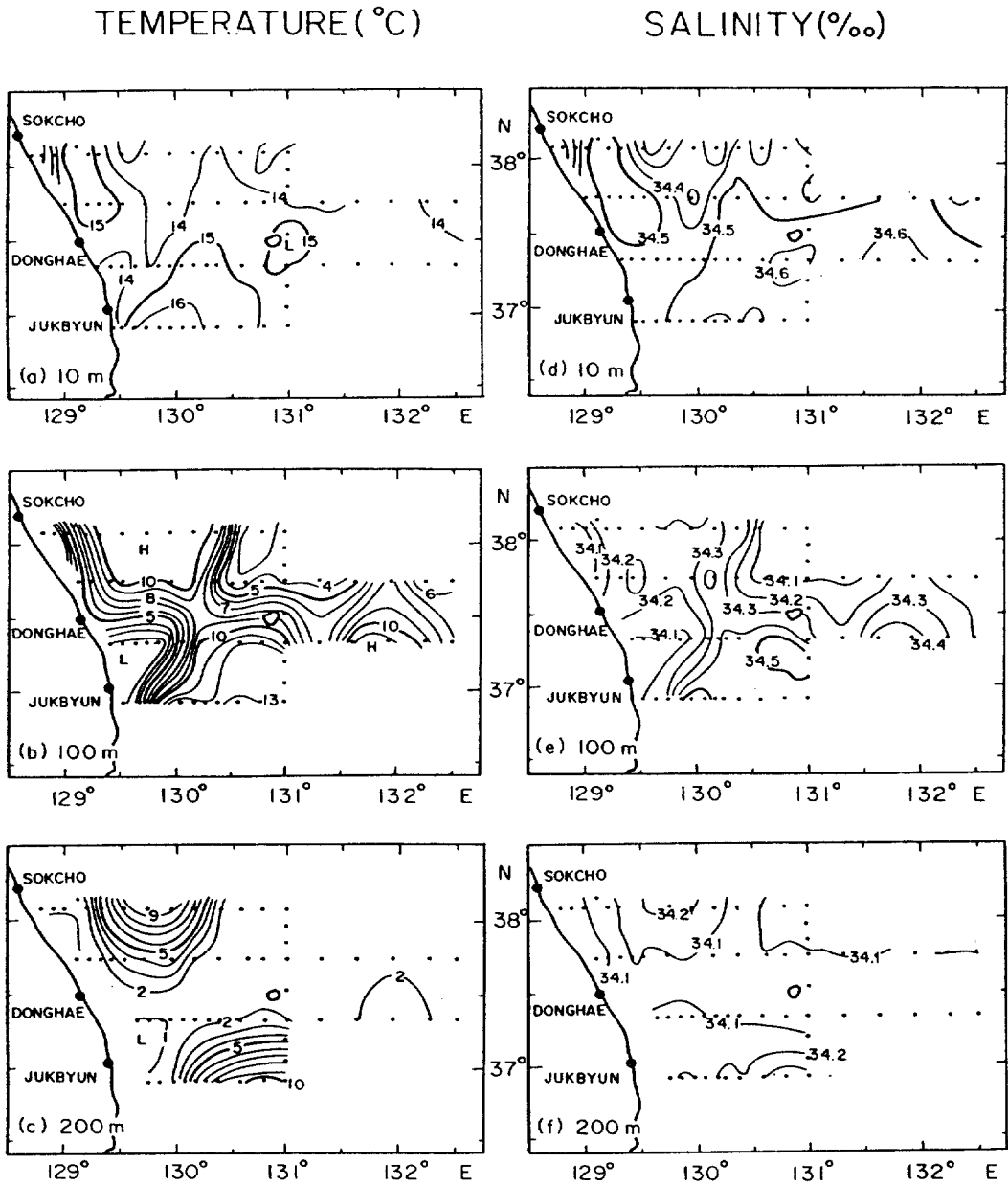


Fig. 13. Horizontal distributions of temperature and salinity at (a) and (d) 10 m, (b) and (e) 100 m, and (c) and (f) 200 m depth in May 1992.

인공위성 영상사진에서 나타난 소용돌이의 위치는 수시로 남북으로 약간씩 이동하고 있었다. 즉 1991년 12월과 1992년 3월에는 중심이 거의 38°N에 위치하였으나, 4월말에는 소용돌이 전체가 38°N 북쪽으로 이동하였다가 5월에는 다시 약간 남하하여

소용돌이의 중심이 38°N 보다 약간 북쪽에 위치하고 있었다.

Fig. 16은 정선 A에서 유속의 東西成分과 南北成分을 나타낸 것이다. 북향성분의 최대 값은 A5 정점의 수심 26 m에서 약 70 cm/s였다. 남향성분의

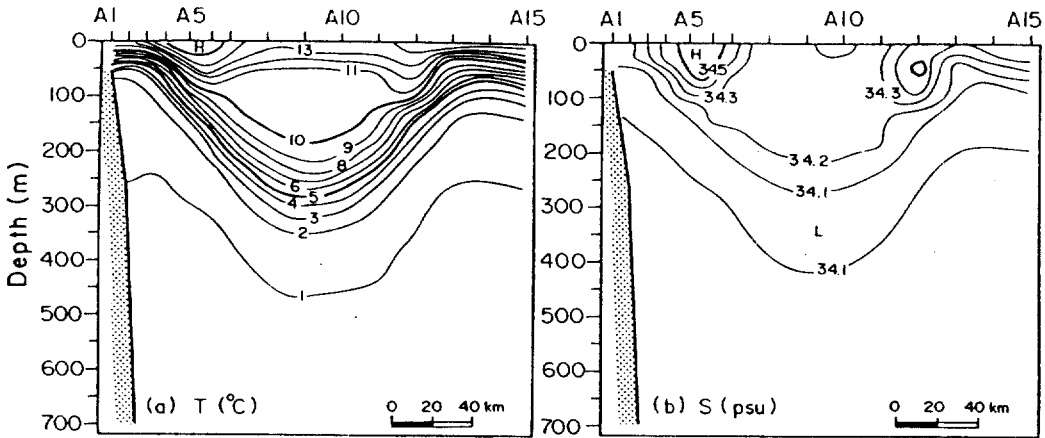


Fig. 14. Vertical distributions of (a) temperature and (b) salinity on section A in May 1992.

최대 값은 A12 정점의 약 70 m에서 약 60 cm/s로 3월과 마찬가지로 소용돌이의 서쪽에서 유속 값이 더 컸었다. 이와 같이 소용돌이의 상층에서 서쪽의 북향류가 동쪽의 남향류보다 큰 현상은 1993년 4월에 관측한 또 다른 난수성 소용돌이에서도 나타났다(김 등, 1993). 봄철 또는 초여름에 소용돌이의 상층에서 서쪽의 유속이 동쪽보다 더 큰 원인은 북상하는 동한난류의 영향으로 사료된다. 즉, 동한난류의 북상류와 방향이 같은 소용돌이의 서쪽에서의 유속이 반대방향인 동쪽에서의 유속보다 큰 것이다.

### 3. 1992년 6월에 관측된 난수성 소용돌이의 구조

#### 3.1 수온·염분분포

Fig. 17은 1992년 6월에 동일한 해역에서 관측한 수온과 염분의 수평분포를 나타낸다. 1992년 3월에 정선 A~C에 걸쳐있던 난수성 소용돌이의 남쪽 부분이 6월의 관측에서는 수심 200 m 층에서만 정선 A와 B에서 포착되었다. 이것은 동한난류의 북상에 따라 수심 100 m 위의 상층에서는 동한난류와 난수성 소용돌이가 接觸 있었기 때문이다.

수심 100 m(Fig. 17b)에서는 4~10°C의 등온선으로 형성된 전선이 소용돌이의 동쪽과 서쪽에서 남북으로 길게 연결되어 있고 그 가운데에 10°C 또는 12°C의 균질층이 위치하고 있었다. 이러한 양상은 동한난류가 주로 소용돌이의 흐름을 따라 서쪽으로

북상하며, 동쪽 가장자리를 따라서는 남하하고 있음을 나타내고 있는 것이다.

수심 200 m(Fig. 17c) 층에서는 B정선의 북쪽에 난수성 소용돌이가 있었으며, 울릉도 남쪽에도 또 다른 난수성 소용돌이가 위치하고 있었다. 한편 동한난류의 흐름은 나타나지 않는 것으로 보아 동한난류는 수심 200 m 이내의 상층에서만 존재하는 해류인 것을 알 수 있다.

일본의 동쪽해역에서는 때때로 수심이 400~500 m인 난수성 소용돌이가 수심 약 1000 m인 쿠로시오에 흡수되는 경우가 있다(Yasuda et al., 1992). 즉 쿠로시오 해수 내에서는 난수성 소용돌이가 별개의 형태로 존재할 수 없다. 그러나 울릉도 부근 해역에서는 동한난류의 수심이 200 m 이내이므로 수심이 300~400 m인 난수성 소용돌이를 흡수하여 병합할 수 없다. 따라서 동한난류가 난수성 소용돌이보다 북쪽까지 확장되었다 하더라도 난수성 소용돌이는 큰 영향을 받지 않고 동한난류의 해역 내에서 계속 존재할 수 있는 것이다.

수심 200 m 층에서 등온선의 분포를 5월과 비교해 보면, 이 소용돌이는 약 1개월 동안에 더욱 北上하였다. 본 논문에서는 제시하지 않았지만 8월 이후의 관측 자료에 의하면, 그후 이 소용돌이는 7~8월에 울릉도의 북쪽으로 이동하였고, 10월에는 본 조사 해역에서 사라져 더욱 北上 또는 東進한 것으로 판단된다.

수심 100 m 이내의 상층에서 난수성 소용돌이

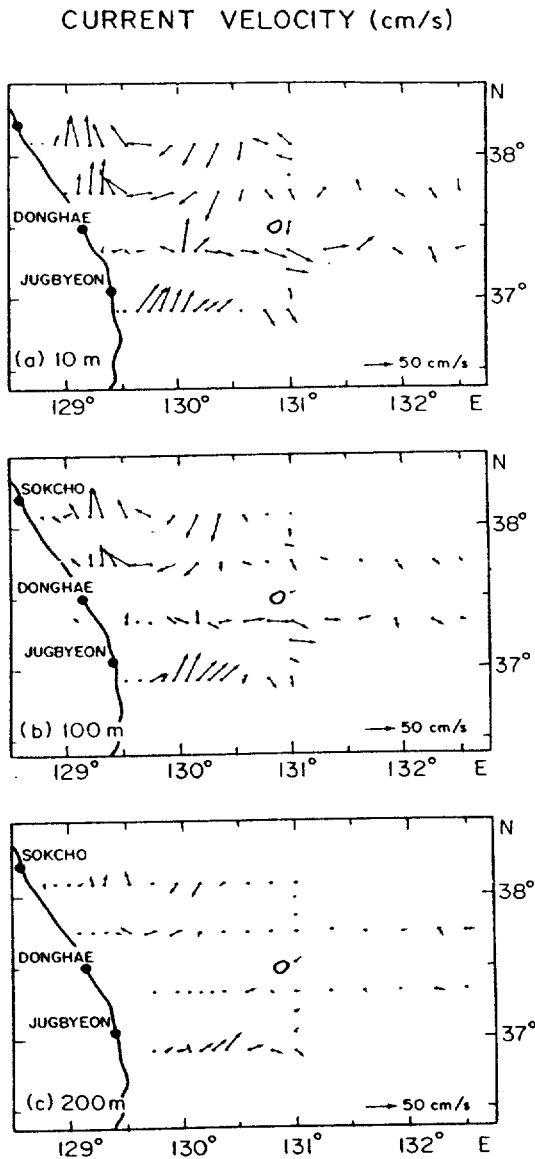


Fig. 15. Horizontal distributions of current velocity at (a) 10 m, (b) 100 m, and (c) 200 m depth in May 1992.

내부의 수온과 염분을 주변해역과 비교하였을 때 항상 고온·고염의 분포를 보이는 것은 아니고 때로는 저온 저염의 분포도 나타난다. 그러나 수심 200 m (Fig. 17c, d) 층에서는 언제나 주위의 해수보다 고온·고염의 분포를 나타내므로 난수성 소용돌이의 위치과약은 수심 200 m의 평면도가 중요한 판단

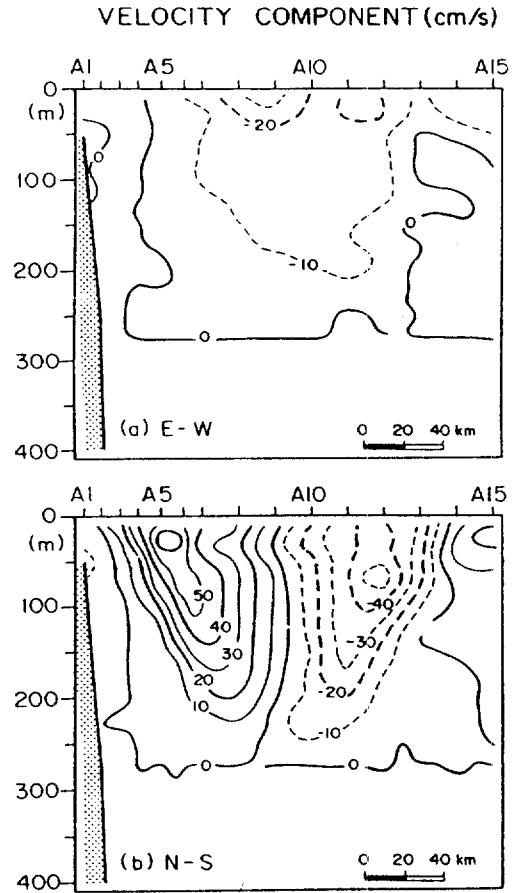


Fig. 16. Vertical distributions of current velocity for (a) east-west and (b) north-south components on section A in May 1992.

근거가 된다.

정선 A에서의 수온과 염분의 수직단면도(Fig. 18)에 의하면, 6월에 관측된 소용돌이의 수온과 염분의 구조는 5월과는 약간 다르게 나타났다. 정선 A에서 소용돌이의 폭은 약 140 km로 축소되었으며, 소용돌이의 표층에서 수심 약 70 m 사이에는 태양의 가열에 의한 11~17°C의 成層構造가 생겨 계절수온약층이 더욱 강화되었다.

3월에는 수심 230 m까지 두텁게 존재하였던 10°C, 34.2 psu 균질층은 수심 145 m 이내에서 최대두께 약 100 m, 폭은 약 90 km로 축소되었다. 또한 34.1 psu 이하의 염분최소층이 A8 정점에서 수심 215~415 m 사이에 존재하며, 염분최소값은 수심 280 m

TEMPERATURE (°C)

SALINITY (‰)

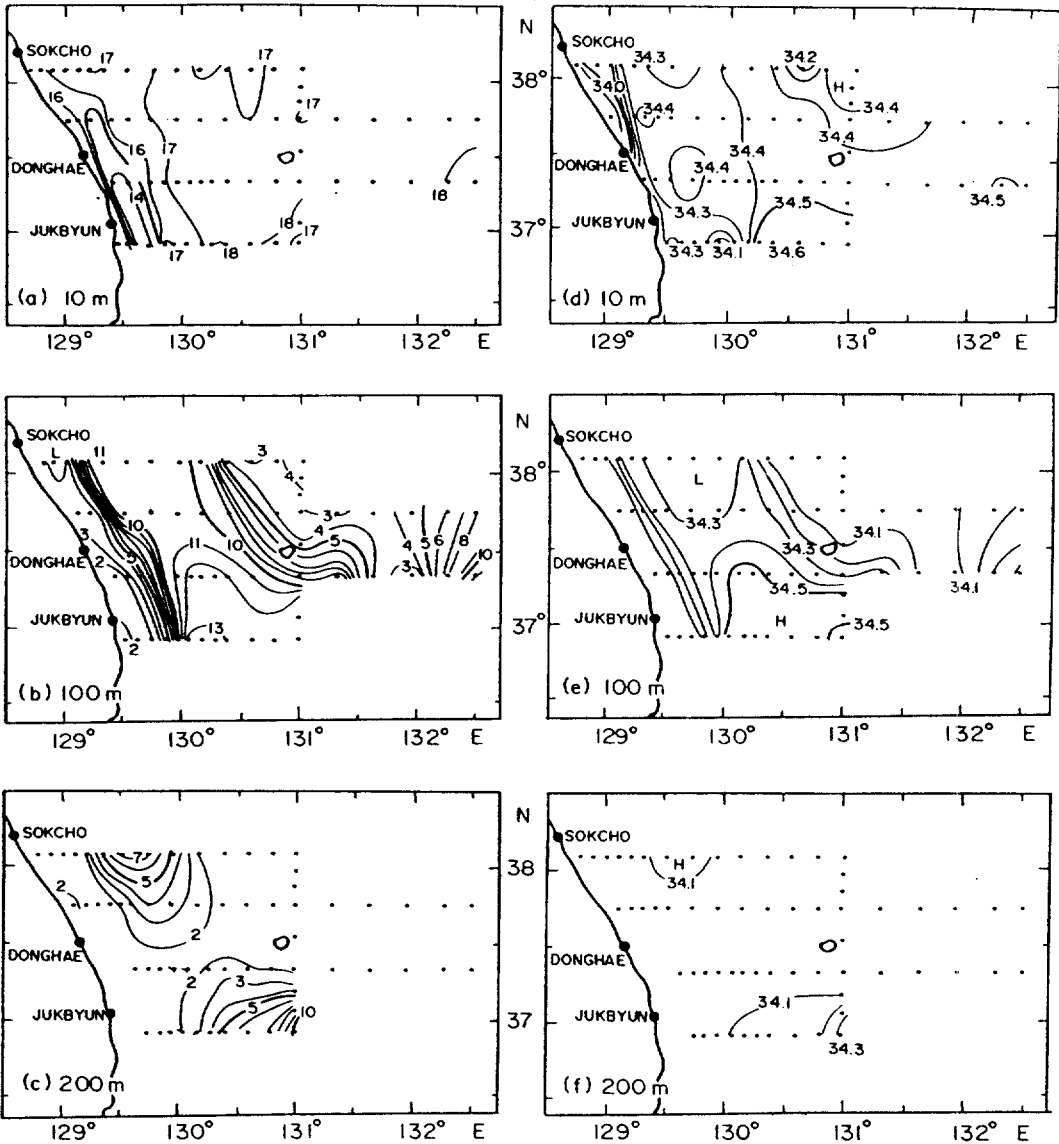


Fig. 17. Horizontal distributions of temperature and salinity at (a) and (d) 10 m, (b) and (e) 100 m, and (c) and (f) 200 m depth in June 1992.

에서 나타나고 있다. 정선 A에서 염분최소값에 의한 소용돌이의 최대수심은 280 m로 3월의 330 m와 비교하면 약 50 m 정도 얕아졌다. 이것은 그 동안 소용돌이의 구조가 바뀐 요인도 있지만, 소용돌이의 복상에 따라 정선 A가 소용돌이의 중심보다 약간

남쪽 부분을 통과한 원인도 있을 것으로 사료된다. 소용돌이 내부의 균질층은 6월 이후로도 상당기간 동안 소용돌이의 내부에 존재했을 것으로 추정된다. 한국해양연구소의 연구팀에 의하여 1992년 12월부터 1993년 11월까지 계속 추적되었던 별개의 난수성

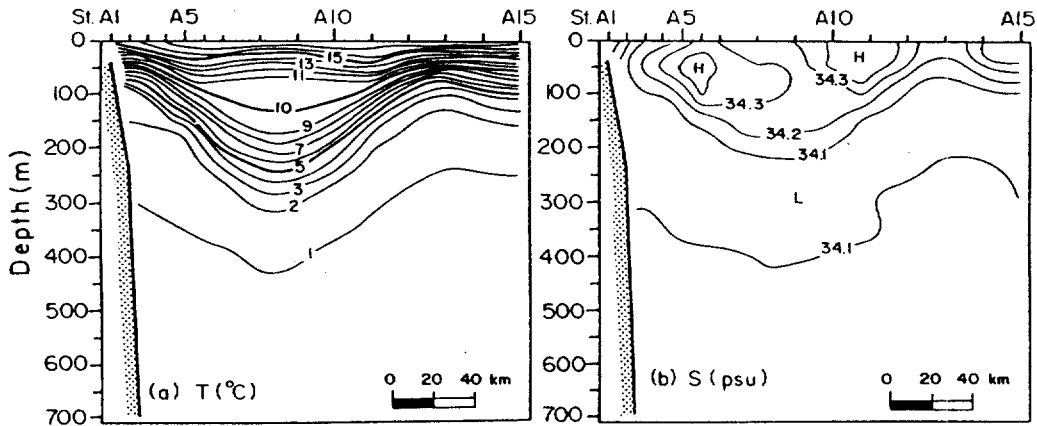


Fig. 18. Vertical distributions of (a) temperature and (b) salinity on section A in June 1992.

소용돌이에서도 4월에 존재하였던 10°C, 34.2 psu의 균질층은 비록 규모는 축소되었지만 11월까지 계속 존재하였다(김 등, 1994).

정선 A에서 소용돌이의 내부에 34.3 psu 이상의 고염수가 5월보다 안쪽으로 확장되고 있었으며, 34.5 psu 이상의 고염수가 5월과는 달리 표층에는 존재하지 않고 내부에만 좁게 분포하고 있었다(Fig. 18b). 이러한 분포 양상은 6월 이후에는 고염수의 새로운 공급은 없어졌고, 4~5월에 동한난류로 부터 공급되었던 고염수가 소용돌이의 내부로 확산되었기 때문이다.

### 3.2 유속분포

해안으로부터 20 km 이내의 연안에는 北韓寒流가 좁은 폭으로南下하고 있었으며, 바깥쪽에는 약 35 km 폭의 북향류가 해안선을 따라 존재했다(Fig. 19). 이러한 북향류는 상층에서 북상하고 있었던 동한난류와 소용돌이의 북향류가 연결되어 나타난 것이다. 정선 A에서는 북향류의 동쪽에 남향류가 보여 소용돌이의 존재를 알 수 있으며, 이 정선에서 유속에 의한 소용돌이의 폭은 약 140 km였다.

표층에서 소용돌이의 최대유속은 A5 정점에서 나타나는 북향류로 64 cm/s였다. 반면에 남향류는 A11 정점에서 36 cm/s로 나타나 3, 5월과 마찬가지로 소용돌이의 서쪽에 큰 유속이 존재하였다. 그러나 6월에는 그 차이가 더욱 커져 동쪽에서 약 1/2 정도의 값을 보이고 있었다. 동한난류의 표층유속은 정선 C, D에서 50~70 cm/s로 나타나 소용돌이의

북향류와 거의 비슷한 분포를 보이고 있었다.

수심 100 m 층에서 소용돌이의 최대유속은 북향류가 44 cm/s, 남향류가 40 cm/s로 표층과는 달리 차이가 크지 않았다(Fig. 19b). 동한난류는 30~45 cm/s의 북향류로 표층에 비해 약 20 cm/s 정도 작아졌다.

수심 200 m 층(Fig. 19c)에서 북향류는 10 cm/s 이하로 크게 감소되었으나 남향류는 일부 정점에서 약 20 cm/s로 북향류보다 컸다. C, D 정선에서 동한난류의 유속분포가 잘 나타나지 않는 사실로부터도 동한난류가 수심 200 m 이내의 상층에만 존재한다는 사실을 뒷받침해 주고 있다.

정선 A에서 유속의東西成分의 수직단면도(Fig. 20 a)에 의하면, 주로 西向成分만이 나타나고 또한 그 값도 작게 나타나 A 정선이 소용돌이의 중심에서 약간 남쪽을 통과하고 있었음을 시사하고 있다. 남북성분에서(Fig. 20b)는 A5 정점을 중심으로 수심 15~42 m에서 70 cm/s 이상의 北向성분이 나타났으며, 南向성분은 A10 정점을 중심으로 30 cm/s 이상의 강한 흐름이 수심이 깊은 60~180 m에서 나타나고 있었다.

정선 A에서 수심 700 m를 無流面으로 가정하여 소용돌이에 대한 地衡流 유속을 계산하였다(Fig. 21). 3월에 ADCP로 관측한 소용돌이의 유속분포는 지형류 계산에 의한 유속분포와 양상 및 절대값이 잘 일치하였다. 3개월 정도 지난 6월에 ADCP로 관측한 소용돌이의 유속분포(Fig. 20b)는 지형류 계산에 의

CURRENT VELOCITY(cm/s)

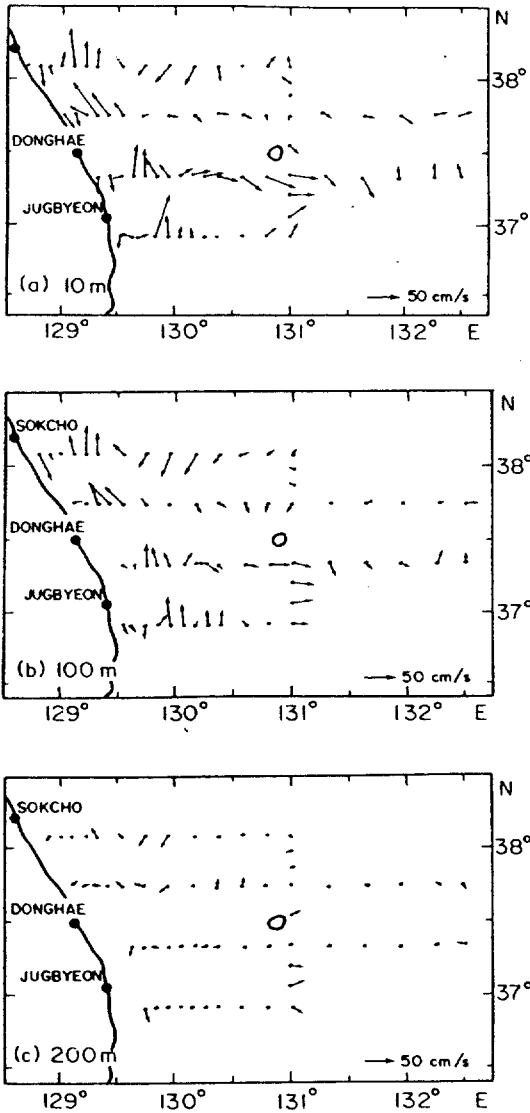


Fig. 19. Horizontal distributions of current velocity at (a) 10 m, (b) 100 m, and (c) 200 m depth in June 1992.

한 유속분포와 양상이 대체로 비슷하지만 약간의 차이는 있었다.

첫번째는 정선 A에서 소용돌이 동쪽의 남향성분 분포양상이 달랐다. ADCP에 의한 유속분포에서는 A10 정점을 중심으로 30 cm/s 이상의 최대유속이 수심 60~180 m 사이에 분포하지만, 지형류 계산결

VELOCITY COMPONENT(cm/s)

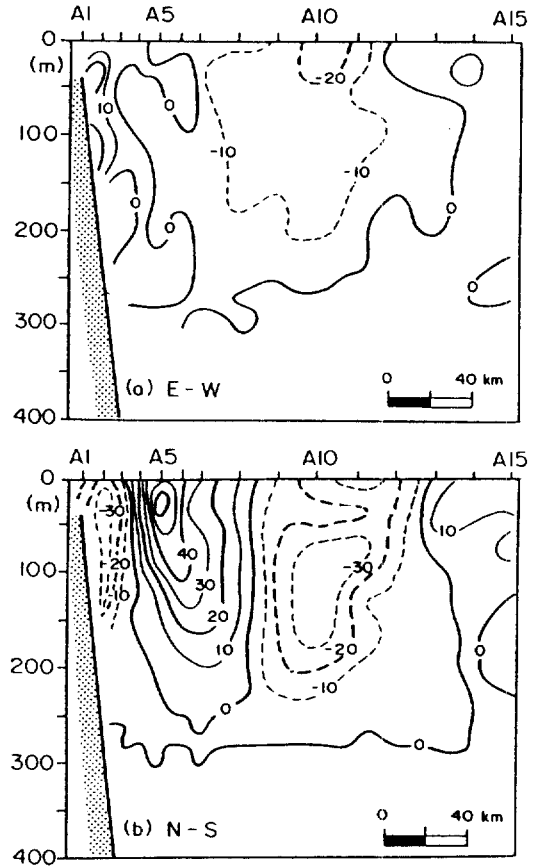


Fig. 20. Vertical distributions of current velocity for (a) east-west and (b) north-south components on section A in June 1992.

과는 A11 정점에서 수심 72 m 이내의 상층에만 존재한다. 두번째는 소용돌이 서쪽에서 유속의 분포는 3, 6월이 서로 비슷하였지만, 북향성분의 관측치와 계산치의 최대유속 절대값이 3월에는 5 cm/s 이내의 차이를 보인 반면에 6월에는 약 20 cm/s의 차이를 나타내었다. 이러한 사실들로부터 6월에는 소용돌이가 부분적으로는 지형류 평형과 일치되지 않고 있음을 알 수 있다.

결론

1992년 3월 속초앞 해역에서 직경 약 160 km,



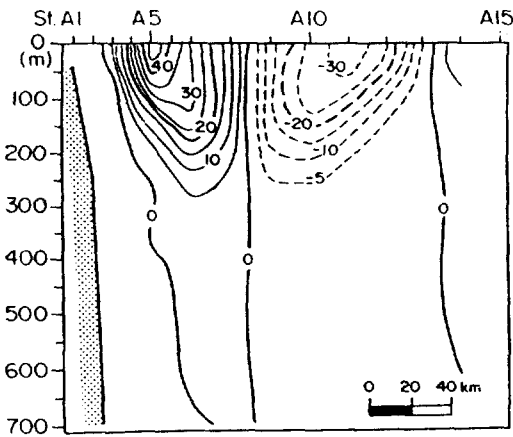


Fig. 21. Vertical distribution of calculated geostrophic current on section A in June 1992. Solid lines indicate northward component and dashed lines indicate southward component.

수심 약 330 m의 크기를 갖는 난수성 소용돌이가 관측되었다. 이 난수성 소용돌이는 1991년 (10월 이전)에 형성되어 38°N, 130°E 부근에서 월동한 것으로, 1992년 6월에는 약 140 km의 크기로 축소되었으며 위치도 약간 북상하여 존재하였다. 그 후 東進하여 8월에는 울릉도 북쪽에 위치하였고, 다시 북상 또는 東進하여 10월에는 조사 해역으로부터 사라졌다.

이 난수성 소용돌이의 상층 내부에는 약 10°C, 34.2 psu의 균질층(혼합층)이 최대 폭 약 125 km, 수심 약 230 m로 넓고 깊게 존재하고 있었다. 이 均質層(혼합층)은 越冬을 한 난수성 소용돌이에서 나타나는 특징으로 시간이 지남에 따라 약간씩 축소되었다.

5월이 되어 소용돌이에 생긴 가장 큰 변화는 가장자리에 새로운 고온·고염수가 불룩한 형태로 존재하고 있는 것이다. 수심 100 m 이내의 상층에서 11°C 이상, 34.3 psu 이상의 고온·고염수가 40~50 km의 폭으로 형성되어 있었다. 이 고온·고염수는 동한난류의 북상에 따라 고온·고염의 해수가 좁은 띠모양(warm streamer)으로 3월 중순부터 5월 사이에 남쪽으로부터 유입되어 소용돌이의 가장자리를 따라 시계방향으로 회전하면서 분포하고 있는 것이다. 6월 이후에 이 고염수는 소용돌이의 내부로 확산된다.

밀도분포에 의하면 소용돌이의 형태를 나타내는

불룩한 밀도구조는 미약하지만 수심 약 1500 m의 해저까지도 나타나고 있었다. 이러한 사실은 소용돌이가 소멸 및 이동되는 과정에서 해저지형의 영향을 받을 수 있음을 나타낸다.

난수성 소용돌이의 표층에서 최대유속은 약 65 cm/s였으며, 수심 200 m 이내에서도 약 20 cm/s 이상의 큰 유속을 갖고 있었다. 이러한 유속구조는 6월까지 큰 변화 없이 유지되었다. 봄철 또는 초여름에 소용돌이의 상층에서 서쪽의 유속이 동쪽보다 더 큰 원인은 동한난류의 북상류와 방향이 같은 소용돌이의 서쪽에서는 유속이 증가되었기 때문이다.

동한난류의 표층유속은 50~70 cm/s로 소용돌이의 북상류와 거의 비슷한 크기를 갖고 있었으며 주로 수심 200 m 이내의 상층에서만 나타나고 있었다. 따라서 동한난류가 난수성 소용돌이 보다 북쪽까지 확장되었다 하더라도 수심이 깊은 난수성 소용돌이는 큰 영향을 받지 않고 동한난류수의 해역 내에서 계속 존재할 수 있는 것이다.

3월에 ADCP로 관측한 소용돌이의 유속분포는 지형류 계산에 의한 유속분포와 양상 및 절대값이 잘 일치하여 소용돌이가 지형류 평형을 잘 유지하고 있었다. 3개월 정도 지난 6월에 ADCP로 관측한 소용돌이의 유속분포는 지형류 계산에 의한 유속분포와 양상이 대체로 비슷하지만 약간의 차이를 나타내 소용돌이가 미약하지만 지형류 평형으로부터 점차 벗어나고 있음을 보여주었다.

### 감사의 글

본 연구 수행을 위하여 현장관측에 많은 도움을 주신 한국해양연구소 해양물리연구부와 이어도호 승조원 여러분에게 감사드립니다. 아울러 인공위성 영상자료를 제공해 주신 서울대학교 해양학과 정종률 교수님께도 감사를 드립니다. 또한 본 논문을 평가하고 수정을 지적하신 두분의 논문심사 위원과 편집위원장께 감사드리는 바입니다.

### 참고문헌

- 국립수산진흥원, 1993. 해양조사연보. 40권, pp. 378.
- 김철수 등, 1993. 동해에서의 중규모 해양변동에 관한 연구

- (1차년도) 한국해양연구소보고서, BSPN 00187-611-1.  
 김철수 등, 1994. 동해에서의 중규모 해양변동에 관한 연구  
 (최종년도) 한국해양연구소보고서, BSPN 00222-721-1.
- 김형륙, 1991. 울릉도 주변 중층권질수의 수직구조와 시간적변화, 서울대학교 이학석사 학위논문, pp 84.
- An, H.-S., K.-S. Shim and H.-R. Shin, 1994. On the warm eddies in the Southwestern part of the East Sea(the Japan Sea). *The Journal of the Korean Society of Oceanography*, **29**(2): 152-163.
- Isoda, Y., and S. Saitoh, 1993. The northward intruding eddy along the east coast of Korea, *Journal of Oceanography*, **49**: 443-458.
- Kang, H.-E. and Y.Q. Kang, 1990. Spatio-Temporal Characteristics of the Ullung Warm Lens. *Bull. Korean Fish. Soc.* **23**(5): 407-415.
- Kim, K., K.-R. Kim, J.-Y. Chung, H.-S. Yoo and S.-G. Park, 1991. Characteristics of physical properties in the Ulleung Basin. *J.Oceanol. Soc. Korea*, **26**(1): 83-100.
- Na, J.-Y. and B.H. Kim, 1990. A laboratory study of formation of the "Warm Core" in the East Sea of Korea. *Bull. Kor. Fish. Soc.*, **22**(6): 415-423.
- Shin, H.-R., Y. Nagata and J. Yoshida, 1992. Detailed structure and water type distribution of the warm core ring 86B. September 1987. *Deep-Sea Research*, **39**(suppl.), s115-s130.
- Tomosada, A. 1968. A large warm eddy detached from Kuroshio east of Japan. *Bull. Tokai Reg. Fish. Res. Lab.* **94**: 59-103.
- Yasuda, I., K. Okuda, and J. Li, 1992. Evolution of a Kuroshio warm-core ring variability of the hydrographic structure, *Deep -Sea Research*, **39**(Suppl.), s 131-s161.

---

Accepted January 29, 1995