

동해에서 potential vorticity와 해류순환과의 관계

이충일* · 조규대** · 윤중휘**

*부경대학교 해양산업개발연구소, **부경대학교 해양학과, ***한국해양대학교 해양경찰학과

Relationship between the variation of the Tsushima Warm Current and current circulation in the East Sea

Chung Il Lee* · Kyu Dae Cho** · Jong Hwui Yun**

*Research Center for Ocean Industrial and Development, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea

**Dept. of Oceanography, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea

***Dept. of Maritime Police Science, Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea

요약 : 포텐셜와도는 해류의 순환을 설명하는데 유용하게 활용된다. 동해에서 포텐셜와도의 분포 특성을 이용하여 쓰시마난류를 포함한 상층부의 해류순환을 설명하였다. 상층부를 표층부분과 쓰시마난류의 분포 층 그리고 수온약층 분포 수층으로 구분하였다. 극전선 남쪽은 쓰시마난류가 해류순환의 중심을 형성하며, 포텐셜와도는 쓰시마난류와 극전선의 분포 특성을 잘 나타내어준다. 포텐셜와도의 분포로부터, 극전선 북쪽은 일본 분지와 그 서쪽해역의 순환 세포로 구분된다.

핵심용어 : 동해, 포텐셜와도, 쓰시마난류, 극전선

ABSTRACT : Potential vorticity is useful to illustrate mechanism and distribution pattern of current circulation. The upper layer in the East Sea is divided into three part following like surface layer, Tsushima Warm Current (TWC) layer, thermocline layer. Potential vorticity shows well the meandering of the TWC and polar front and circulation cell in the northern part of polar front.

KEY WORDS : East Sea, Potential vorticity, Tsushima Warm Current, Polar front

1. 서론

쓰시마난류는 대한해협 (쓰시마해협)을 통해 동해로 유입된 후 쓰가루 해협과 쓰야 해협을 통해 북태평양과 오호츠크해로 유출되는 동안 meandering, 와동류 (eddy)의 형성과 같은 독특한 형태의 특성을 나타낸다. 또한 계절 및 연 변동을 하며, 쓰시마난류에서 분리된 분지류는 한국 동해안과 일본 연안 그리고 한국 동해안과 일본 연안역을 따라 이동하게 된다 (Suda and Hidaka, 1932; Moriyasu, 1972; Kawabe, 1982a, b; Senju, 1999; Yurasov and Yarichin, 1991).

동해 표층부의 해류 순환형태는 크게 극전선을 중심으로 북쪽의 시계반대방향 순환과 남쪽의 시계방향 순환으로 구분되며, 북쪽의 해류 순환은 리만한류와 북한한류가 남쪽은 쓰시마난류가 순환의 중요한 부분을 차지하고 있다 (Fig.1). 대한해협 (쓰시마해협)을 통해 동해로 유입되는 고온, 고염수인 쓰시마난류의 일부는 Tsugaru Strait와 the Soya Strait를 통해 북태평양으로 유출되며, 일부는 동해 극전선 북쪽의 해류

순환과 연결되므로 동해 전체의 표층부 순환에 중요한 인자로 작용한다.

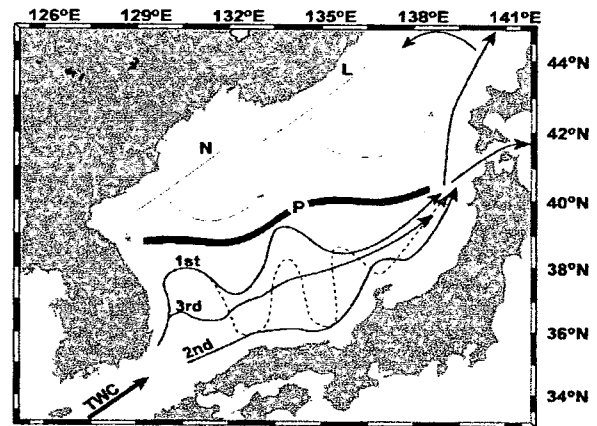


Fig. 1. Schematic diagram showing current pattern in the East Sea (Naganuma, 1973; Yurasov and Yarichin, 1991; Senju, 1999). Abbreviation TWC, P and L represent Tsushima Warm Current (1st, 2nd, 3rd branches), polar front, North Korea Cold Current, respectively.

* 비회원, leeci@mail1.pknu.ac.kr, 051)620-6954

**정회원, kdcho@pknu.ac.kr, 051)620-6211

**정회원, jhyun@mail.hhu.ac.kr, 051)410-4279

동해의 해류순환에 대한 연구는 현장관측치의 부족 등으로 인해 대부분 수치 모델을 이용하여 시도 되어왔다. 수치모델을 이용한 연구는 부족한 현장 관측 자료에서 밝힐 수 없었던 해류순환과 관련된 현상의 기작을 해석하는데 큰 도움을 주었다. 수치모델에서 재현된 해수의 흐름은 주로 표층에서 저층까지 주요 층별 분포를 보여주는 것으로, 공간적으로 동일 층에 대한 해수의 운동을 보여주는 장점을 가지고 있다. 그러나 해류는 이동하는 과정에서 지형적인 영향이나 자체의 불안정성 등 기타 요인 등에 의해 해류의 두께 및 이동 수층이 변할 수 있다. 따라서 특정 수심을 중심으로 한 분석은 해류의 공간적인 이동 경로 및 기작을 이해하기에 부족한 면이 있다.

본 연구는 동해에서 해류의 순환에서 중요한 부분을 차지하는 쓰시마난류의 순환 형태 및 기작을 해석하고자 하며, 그 방법으로 유체의 potential vorticity 보존 원리를 이용하였다.

기의 동시적으로 관측되었기 때문에 자료의 공간적인 분해능의 취약점을 보완할 수 있는 장점이 있다

2.2 방법

동해의 해수 순환의 형태 및 기작을 알아보기 위하여 포텐셜 와도를 계산하였다. 포텐셜 와도의 보존 법칙은 해류의 meandering 현상을 이해하는데 있어서 중요한 정리이다 (Fig. 3).

동해의 경우 연직적으로 밀도 구배가 뚜렷하게 나타나므로 각 층별 수괴의 특성을 고려한 barocline한 상태로 보는 것이 타당할 것이다. 즉 수괴 분포와 밀도 분포로부터 각 층의 특성을 잘 반영할 수 있도록 multi-layer의 개념으로 보아야 할 것이다. Baroclinic 상태에서의 포텐셜 와도 (q)는 표현되며, (식 1)과 같이 근사할 수 있다 (Mcdowell et. al.,1982).

$$q = f \cdot (\partial \Delta_{s,t} / \partial z) \dots \dots \dots \text{(식1)}$$

여기서,

$$f = 2\omega \sin \theta \quad (\omega = \text{지구자전각속도}, \theta = \text{위도})$$

$$\Delta_{s,t} = \text{열염편차}, z = \text{수심}$$

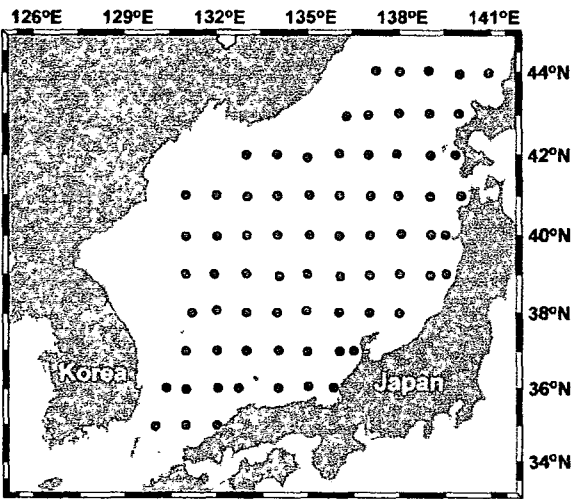
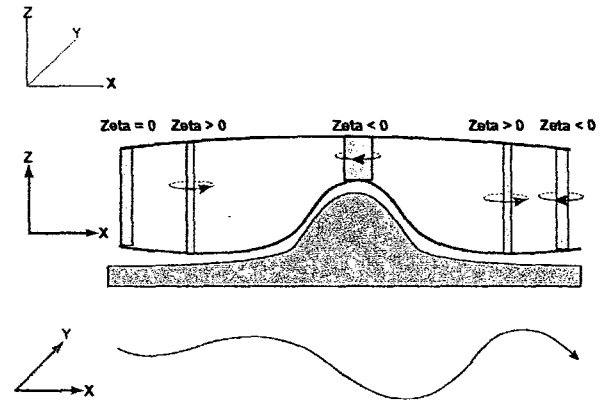


Fig. 2. Station location chart. Field observation was carried out by multi-ship survey of JMA from September 29, 1969 to October 19, 1969. Ryofu Maru, Kofu Maru, Shumpu Maru, Chofu Maru and Seifu Maru are the name of research vessel.

2. 자료 및 방법

2.1 자료

동해에서 해류 순환의 기작 및 형태를 파악하기 위하여 일본 기상청에서 1969년 9월 29일부터 1969년 10월 22일 까지 동해 전역에 대하여 5척의 동시관측 (Fig. 2) 으로 측정한 정점별 수온 (°C), 염분 (psu), 열염편차 (10-5cm³/g). 동해의 해류 순환을 조사하기 위해서는 광역에 대한 직-간접적인 해류 측정이 요구되지만, 현재까지 이루어진 해류 측정의 대부분은 극전선 남쪽의 난류수역에 집중되어있기 때문에 북쪽 해역을 포함한 동해 전체의 해류 순환의 기작 및 형태를 파악하기에는 부족한 면이 있다. 따라서 1969년의 일본 기상청 관측 자료는 historical data가 갖는 관측기기의 성능 향상에 따른 정밀도 차이와 관련된 단점이 있는 반면, 동해 전역에 대하여



$$\frac{d(Zeta + F)}{dt} = 0 \quad \text{: Potential vorticity conservation}$$

Where Zeta = relative vorticity, F = planetary vorticity, H = depth

Fig. 3. Schematic diagram showing the theory of potential vorticity conservation. The upper figure shows the change of rotation direction of water column through the variation of thickness and width to conserve its potential vorticity. The lower figure shows the moving path of water column derived from rotation of water column in the upper figure.

3. 결과 고찰

3.1 수온, 염분, 열염편차의 연직 분포

동해의 상층부를 수온, 염분, 열염편차의 특성을 이용하여 구분하여 보면, 위도 39°N 이남이 표층부에서는 고온, 저염분

수가 분포 ($\Delta_{s,t} \geq 300$)하며, 표층 아랫부분에는 두 번째 층에 해당하는 고염분수인 쓰시마난류의 중심 수층 ($\Delta_{s,t} = 200 - 300$)이 분포하고 있다. 쓰시마난류의 중심 수층에 해당하는 열염편차의 등치선의 분포 수심은 남쪽 해역의 수심 100m 부근에서 북쪽해역으로 갈수록 알려져 41°N 이북에서는 해표면으로 이어진다. 세 번째 층은 $\Delta_{s,t} = 100 - 200$ 사이 에 해당하는 층으로 수온약층의 상부 경계와 하부경계 사이에 해당한다. 위도 41°N의 북쪽에서는 표층 30m 부근에 위치하지만 남쪽으로 내려올수록 쓰시마난류를 포함한 고온의 동해표층수의 영향으로 약 180m 수심까지 깊어진다.

3.2 Layer별 potential vorticity의 분포 특성

역학적으로 포텐셜 와도가 보존되는 경로를 따라 이동하는 유체 특성으로 동해 상층부의 해류순환 형태를 설명할 수 있다(Figs. 4-5). 각 그림에서 포텐셜와도의 등치선이 나타나지 않은 곳은 각층의 상부 및 하부경계에 해당하는 열염편차값이 존재하지 않는 곳이다.

$\Delta_{s,t} = 300$ 이상인 표층부는 동해 남부해역에만 국한되므로 여기서는 광역에 대한 분포 특성을 볼 수 있는 100-300 범위에 대하여 주로 설명하겠다.

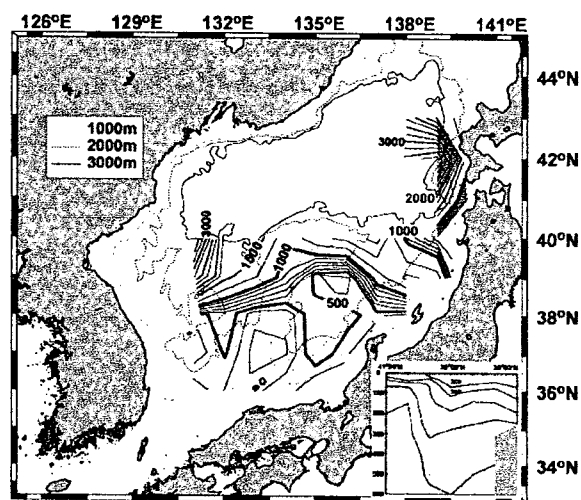


Fig. 4. The distribution of potential vorticity ($\times 10^{-10} \text{cm}^2 \text{s}^{-1}$) computed between $\Delta_{s,t} = 200$ and $\Delta_{s,t} = 300$ surface. Shaded regions indicate eddies.

쓰시마난류의 수층에 해당하는 $\Delta_{s,t} = 200 - 300$ 인 층의 흐름의 특성을 보면, 일본 연안역을 따라 분포하는 등치선과 한국 동해안에서 중앙부를 향해 분포하는 포텐셜 와도의 등치선을 볼 수가 있다 (Fig. 4). 포텐셜 와도의 값이 500인 등치선의 분포 형태는 쓰시마난류의 meandering path를 보여 주며, meandering 과정에서 와류의 형성 가능성을 확인할 수 있

다. 포텐셜 와도의 값이 1000인 등치선의 분포는 극전선의 분포역과 일치하게 나타난다. 극전선의 분포 위치 및 쓰시마난류의 meandering 경로는 위도 38°N-40°N사이에서 거의 나란하게 함을 알 수 있다. 동일 위도 상에서 f의 값이 동일하게 나타나므로 상대와도의 변화에 따라 포텐셜 와도가 보존되게 된다. 즉 공간적인 이동에 따른 수주 두께의 변화와 상대와도의 변화가 나타나며, 이로 인한 포텐셜 와도의 분포는 쓰시마난류의 분포 특성을 잘 설명해준다.

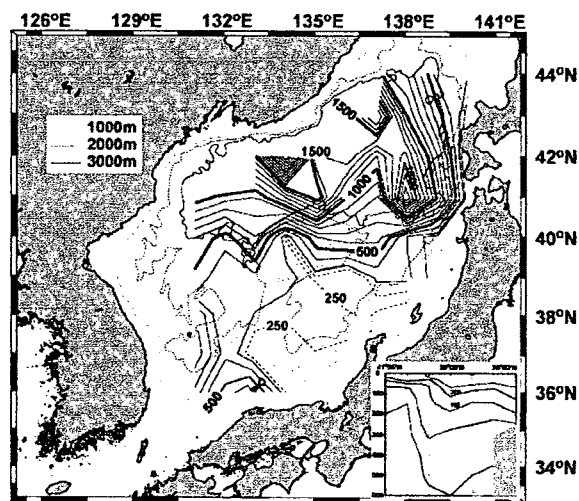


Fig. 5. The distribution of potential vorticity ($\times 10^{-10} \text{cm}^2 \text{s}^{-1}$) computed between $\Delta_{s,t} = 100$ and $\Delta_{s,t} = 200$ surface.

수온약층에 해당하는 $\Delta_{s,t} = 100 - 200$ 인 층의 포텐셜 와도의 분포 특성은 다음과 같다 (Fig. 6). 극전선 남쪽 해역의 경우 경도 132°E를 경계로 하여 한국 동해안과 Noto반도 쪽으로 분리되어 있는 형태를 보인다. 북쪽 해역의 경우 포텐셜 와도가 1000인 등치선을 중심으로 위도와 거의 나란한 형태로 분포하여 커다란 순환 형태를 나타내며 동쪽의 북해도 연안을 따라 북쪽으로 뻗어 있다. 그리고 포텐셜와도가 1500인 등치선을 중심으로 두개의 순환 세포로 분리되어 있다. 특징적인 것은 일본포텐셜와도가 1000인 등치선의 북쪽을 보면 일본 본지와 그 서쪽 해역으로 두 개의 순환 cell (포텐셜 와도의 등치선 = 1500)로 구분됨을 알 수 있다. 이는 극전선 북쪽 해역의 해류 순환이 세부화 되어 있을 가능성을 제시하여 준다.

4. 결론

유체의 포텐셜와도 보존 원리를 이용하여 극전선을 중심으로 남·북쪽 해역에 대한 수평 및 연직방향 순환의 기작 및 특성을 파악하였다.

유체는 역학적으로 포텐셜 와도가 보존되는 경로를 따라 이동하는 특성을 가지며, 이러한 유체 특성은 동해의 해류 순환 형태를 잘 설명해준다.

극전선 남쪽해역은 쓰시마난류가 순환의 중심을 이룬다. 포텐셜와도의 분포로부터 일본 연안과 외양을 따라 이동하는 쓰시마난류의 순환을 잘 나타내며, 특히 이동과정에서 나타나는 meandering과 eddy의 형성을 역학적으로 잘 설명해준다.

극전선 북쪽 해역의 상층부는 일본 분지와 그 서쪽 해역의 해류순환으로 구분되는 것으로 나타난다.

감사의 글

본 연구는 2003년 한국해양수산개발원 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참고 문헌

[1] Kawabe, M. Branching of the Tsushima Current in the Japan Sea. Part I. Data analysis, J. Oceanogr. Soc. Japan, 38, 95-107, 1982a.

[2] Kawabe, M. Branching of the Tsushima Current in the

Japan Sea. Part II. Numerical experiment, J. Oceanogr. Soc. Japan, 38, 183-192, 1982b.

[3] Moriyasu, S. The Tsushima Current, its physical aspects. University of Tokyo Press, Tokyo. 353-370, 1972.

[4] Naganuma, K. On the discussions and the existence of the third branch of the Tsushima Current. New letter of Japan Sea Regional Fisher. Res. Lab., 266, 1-3, 1973

[5] Yurasov, G. I. and V. G. Yarichin. Currents of the Japan Sea. Nauka Press, Russia. 1991.

[6] Senjyu, T. The Japan Sea Intermediate water; its characteristics and circulation. Journal of Oceanography, 55, 111-122, 1999.

[7] Suda, K. and K. Hidaka. The results of the oceanographical observations on board R.M.S Syumpu Maru in the southern part of the Japan Sea in the summer of 1929. Journal of Oceanography, 3, 291-375, 1932.