

Review

<https://doi.org/10.7850/jkso.2019.24.3.439>  
pISSN : 1226-2978 eISSN : 2671-8820

## 서지학적으로 본 대마난류의 몇 가지 역학적 쟁점들

승영호\*

(주)지오시스템리서치

# Some Dynamical Issues about the Tsushima Warm Current based on Bibliographical Review

YOUNG HO SEUNG\*

GeoSystem Research Corporation, Gunpo, Gyeonggi-do 15807, Korea

\*Corresponding author: [seung@inha.ac.kr](mailto:seung@inha.ac.kr)

Editor Wonho Yih

Received 25 June 2019; Revised 14 August 2019; Accepted 19 August 2019

### ABSTRACT

지금까지의 연구 결과를 토대로 하여 대마난류의 순환역학에 관한 몇 가지 쟁점들을 정리해 보고 향후 해결할 문제점들을 짚어보는 기회로 삼고자 하였다. 주요 관심 사항은 대마난류의 형성, 그 수송량의 계절변동 및 동해 내부에서의 분지 현상이다. 대마난류는 북태평양 아열대순환의 일부로서 북태평양 전지구적 바람장에 의해 형성된다. 그러나 마찰, 만의 지형, 장벽효과 등에 따라 그 수송량은 민감하게 변한다. 수송량의 계절변동에 대해서는 여러 학자들에 의해 많은 요인들이 제시되어 왔으나 아한대 바람장이 이와 가장 밀접히 연관되어 있는 것으로 밝혀졌다. 그러나 향후, 아한대 바람장 뿐만 아니라 아열대 바람장까지를 포함한 북태평양 전체 바람장과의 관계를 보여줄 수 있는 연구가 필요해 보인다. 대마난류의 두 분지인 동한난류와 일본연안류의 형성 기작으로서 그동안 서안강화 현상과 해저지형 효과가 가장 유력하게 제시되어 왔다. 그러나 서안강화는 동한난류의 계절변동을 설명할 수 없다는 문제점을 갖고 있으므로 이를 대체할 다른 기작에 대한 연구가 필요하다고 사료된다.

Some dynamical issues about the Tsushima Warm Current (TWC) are reviewed and checked for the remaining unresolved problems, focusing on the formation of the TWC, seasonal variation of its volume transport and its branching in the East Sea. The TWC is a part of the North Pacific (NP) subtropical gyre driven by the NP global wind system. However, the quantitative amount of volume transport is sensitive to friction, basin geometry, barrier effect and so on. Among many causes suggested by many scientists, subpolar winds are found to be most closely related with the seasonal variation of TWC volume transport. However, more studies relating the latter not only to the subpolar winds but also to those including the subtropical winds seem to be required. The branching of the TWC has been known to be due to the western intensification for the East Korean Warm Current (EKWC) and to the bottom trapping for the Nearshore Branch. Since the former hypothesis is problematic in explaining the seasonal variation of the EKWC, other candidate mechanisms may need to be considered.

**Keywords:** East Sea, Tsushima Warm Current, dynamics

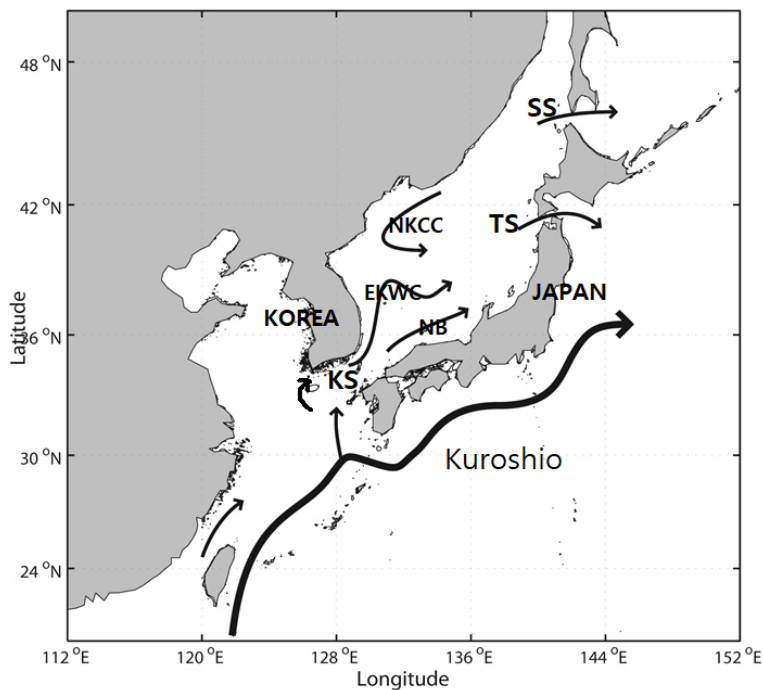
## 1. 서론

대마난류를 포함한 동해 표층순환에 대해서는 Chang *et al.*(2016)에 정리된 바 있으며 그 이후의 후속 연구를 통하여서도 (예: Choi *et al.*, 2018; Park *et al.*, 2019) 많은 사실이 밝혀져 왔다. 이러한 연구 결과는 그동안 수행된 각종 해양관측이나 수치모델 등에 기반하고 있으며 대략적으로 요약해 보면 다음과 같다. 동해의 상층부는 남쪽의 난수역과 북쪽의 냉수역으로 크게 두 구역으로 나눌 수 있다. 난수역에는 대한해협을 통해서 유입된 쿠로시오계의 난수가 존재하며 냉수역에는 동해 고유의 표층수가 존재한다. 난수역에는 대마난류가 흐르는데(EKWC와 NB, Fig. 1), 이 해류는 북태평양 서안경계류인 쿠로시오

(Kuroshio, Fig. 1)에서 갈라져 나온 난류수가 대한해협(KS, Fig. 1)을 통해 유입한 것으로 동해에 유입한 후 시공간적으로 매우 복잡한 형태를 보이며 흐르는 것으로 알려져 있으나 대체적으로 두 개의 분지로 - 한국 동해안을 따라 북상하는 동한난류(EKWC, Fig. 1)와 일본 연안을 따라 북상하는 일본연안류(NB, Fig. 1)로 - 갈라진다.

이 후 쓰가루해협(TS, Fig. 1)과 소야해협(SS, Fig. 1)을 통해 북태평양과 오호츠크해로 빠져 나가는데 유출량은 전자가 약 1.5 Sv (Onishi and Ohtani, 1997), 후자가 약 1.0 Sv (Fukamachi *et al.*, 2008) 가량 된다. 대한해협을 통한 유입량은 약 2.0-3.0 Sv 으로서(Teague *et al.*, 2002; Takikawa *et al.*, 2005; Fukudome *et al.*, 2010) 쿠로시오 수송량인 40-50 Sv 보다 상당히 적으나 동해의 해황이나 기상은 물론(Hiorse and Fukudome, 2006) 동아시아의 계절풍에까지도 영향을 줄 만큼 중요한 기후 요소일 가능성도 있다(Yamamoto and Hirose, 2011; Seo *et al.*, 2014). 냉수역에는 국지적으로 형성된 리만해류 또는 북한한류(NKCC, Fig. 1)가 냉수역을 반시계 방향으로 돌아 흐르며 여름철에 강하고 겨울철에 약해지는 것으로 알려져 있다(Kim and Min, 2008). 난수역과 냉수역 사이 즉 대마난류의 북쪽 경계를 따라서는 아극전선이 형성된다.

동해 표층순환에 지대한 영향을 미치는 대마난류에 대해서는 그동안 수많은 연구가 이루어져 왔으나 본 연구에서는 그 중 다음 세 가지 쟁점에 대해서만 논의하고자 한다. 첫째는 대마난류의 형성 기작에 대한 문제이고, 둘째는 대마난류 수송량의 계절변화에 대한 문제이며, 셋째는 동해 내부에서 대마난류의 분지에 대한 문제이다. 대마난류는 북태평양 아열대순환 중 서안경계류의 일부로서 동해를 관통하는 연해관통류(marginal sea throughflow) 라고 할 수 있다. 연해관통류의 형성 및 계절변동은 연해 내부에서의 흐름 형태와는 거의 무관하게 관통류와 연결되어 있는 해양대순환에 의해서만 지배되는 것으로 볼 수 있다. 따라서 첫 번째와 두 번째 쟁점은 동해 내부에서의 대마난류의 형태와는 아무런 상관관계가 없다고 가정하였다. 그러나 이 가정은 세 번째 쟁점 - 즉 대마난류가 동해 내부에서 분지하는 현상 -에 대해서는 성립될 수 없다. 앞서 언급한 바와 같이



**Fig. 1.** Currents in the East Sea. The Tsushima Warm Current (EKWC and NB) occupying the southern half of the basin originates from the Kuroshio in the North Pacific and the NKCC circulates cyclonically in the northern half of the basin. EKWC: East Korean Warm Current, NB: Nearshore Branch, NKCC: North Korean Cold Current, KS: Korea Strait, TS: Tsugaru Strait, SS: Soya Strait.

실제로 대마난류는 동해 내부에서 복잡한 이동 경로를 보이고 있는 것으로(Park *et al.*, 2019) 알려져 있으나 큰 규모에서 보았을 때 대체적으로 한국연안측과 일본연안측으로 양분되고 있다고 볼 수 있기 때문에 이러한 관점에서 이 문제를 다루어 보았다. 첫 번째와 두 번째 쟁점을 선택한 이유는 최근 이와 관련하여 몇 가지 새로운 사실들이 밝혀지는 등 이 분야의 연구가 활발해 질 수 있는 계기가 마련되고 있다고 사료되어 이 문제에 대한 현재까지의 상황을 되짚어 볼 필요성이 제기되었기 때문이다. 세 번째 쟁점을 선택한 이유는 현재의 대마난류의 분지 현상에 대한 역학적 해석이 약 40년 전 수립된 이후 새로운 연구가 시도되고 있지 못하기 때문에 이를 촉진시킬 수 있는 계기를 마련하고자 하는 의도에서 기존 연구의 문제점이 무엇인지 점검해 보고자 하였다.

## 2. 대마난류의 형성

대마난류의 형성에 관한 문제는 오래 전부터 매우 흥미있는 과제로서 많은 학자들의 관심의 대상이 되어 왔다. 대마난류의 발생에 있어서 동해 내부와 외부 간의 해수면 차이와 같은 국지적인 요인을 강조한 연구들(Toba *et al.*, 1982; Oshima, 1994; Tsujino *et al.*, 2008)도 있었으나 더 큰 규모에서 북태평양 아열대순환과 연관시켜 설명하려는 시도가 많았다. Minato and Kimura(1980)는 동해를 북태평양 아열대순환역과 좁은 통로로 연결되어 있는 작은 연해로 보았으며 간단한 해양대순환 모델을 적용하여 대마난류가 실제로 바람에 의해서 생성됨을 성공적으로 보였다. 그러나 이 모델에서 계산된 수송량은 실제보다 크게 나왔는데 아마도 모델에서 실제 지형을 너무 단순화하여 마찰이나 지형효과, 장벽효과(barrier effect) 등이 고려되지 않았기 때문이 아닐까 사료된다. Yang *et al.*(2013)에 의하면 좁고 얇은 통로에서는 해저 압력 토크에 의한 마찰(form drag), 수평 마찰에 의해 형성된 횡류, 통로 밖에 존재하는 압력장의 이동에 의해 해수유동이 제약을 받는 데 이것을 장벽효과라 정의 하였다. Nof(1993)는 대마난류의 형성을 해수면이 높은 쿠로시오 난수가 좁은 통로를 통해 해수면이 낮고 냉수로 차 있는 동해로 유입하여 적응하는 현상으로 보았다. 이 이론( $\beta$ -제어 이론)에 의하면 대마난류의 수송량은 유입, 유출구의 위도 차이와 난수-냉수 간의 밀도 차이에 의해서만 결정된다. 또한 그는 1.5층 수치모델(Bleck and Smith, 1990)과 Godfrey의 island rule (Godfrey, 1989)도 이 문제에 적용해 보았다(Nof, 2000).  $\beta$ -제어 이론과 1.5층 수치모델은 비선형 모델이나 지형을 무시하였고 island rule은 선형 모델이며 마찰을 무시하였다. 모든 모델의 결과에서는 수송량이 10 Sv으로 실제 값인 2.5 Sv (Teague *et al.*, 2002; Takikawa *et al.*, 2005; Fukudome *et al.*, 2010)보다 높게 나왔다. 이들 연구의 결과를 보면 대마난류의 수송량에 있어서 비선형 효과는 그다지 중요하지 않으며 오히려 지형이나 마찰이 더 중요한 요인이 될 수 있음을 시사하고 있다. Seung(2003)은 마찰효과를 고려한 island rule을 적용하여 적절한 마찰계수에 대하여 수송량 2.5 Sv을 얻었다. 지형을 고려하지 않았음에도 실제와 비슷한 수송량을 얻은 이유는 아마도 마찰, 지형, 장벽효과(barrier effect)가 마찰계수로 적절히 매개변수화 되었기 때문이 아닐까 사료된다. 결론적으로, 대마난류는 북태평양 바람장에 의해 형성되는 북태평양 아열대순환의 서안경계류의 일부로서 그 수송량의 산정에 있어서 기본적으로 island rule이 적용될 수 있으나 - 즉, 유입, 유출구 사이의 바람장에 의해 수송량이 결정 - 유입, 유출 통로에 작용하는 마찰, 지형효과, 장벽효과(barrier effect) 등에 따라 수송량이 민감하게 달라질 수 있으므로 정확한 수송량의 산정을 위해서는 이들 효과를 적절히 반영할 필요가 있다.

## 3. 대마난류 수송량의 계절변동

대한해협을 통한 대마난류 수송량의 계절변동에 대하여는 그동안 많은 조사가 이루어져 왔으며(예: Lyu and Kim, 2003) 변동 폭은 0.8-1.7 Sv 으로서 여름철에 최대, 겨울철에 최소로 나타나는 것으로(Teague *et al.*, 2002; Takikawa *et al.*, 2005;

Fukudome *et al.*, 2010) 알려졌다. 쓰가루해협과 소야해협을 통한 수송량에 대한 조사는 상대적으로 빈약하나 전자의 계절 변동 폭은 약 0.4 Sv (Nishida *et al.*, 2003), 후자의 경우는 약 1.5 Sv (Fukamachi *et al.*, 2008)인 것으로 알려졌다.

그동안 대마난류 수송량의 계절변동을 대한해협 인근 해양에서의 계절변동과 연관시키고자 하는 연구가 많았다. 예를 들면 Lyu and Kim(2005)은 대한해협 태평양 쪽의 해수면 계절변동의 중요성을 언급하였고, Ma *et al.*(2012)은 쿠로시오의 계절변동과의 연관성을 주장하였다. Fukudome *et al.*(2010)은 대한해협 부근에서 에크만 수송이 대한해협 수송량의 계절변동에 미치는 영향이 약 0.1 Sv 에 지나지 않음을 밝혔다. Moon *et al.*(2009)은 9월 태풍의 통과로 인하여 대한해협 수송량이 감소할 가능성을 보였다. Cho *et al.*(2013)은 동중국해의 바람장의 영향을 받아 가을철 대한해협 수송량이 늘어날 수도 있음을 보였다. 이들 연구를 통하여 유입구인 대한해협 수송량의 계절변동에 대한 이해는 증진되었으나 대마난류 수송량의 계절변동이 유출구인 쓰가루해협과 소야해협 주변 해양, 기상의 상황과 밀접히 연관되어 있다는 사실은 이들 유출구에서 관측된 수송량의 년 변화가 주목을 받으면서부터 알려지기 시작하였다.

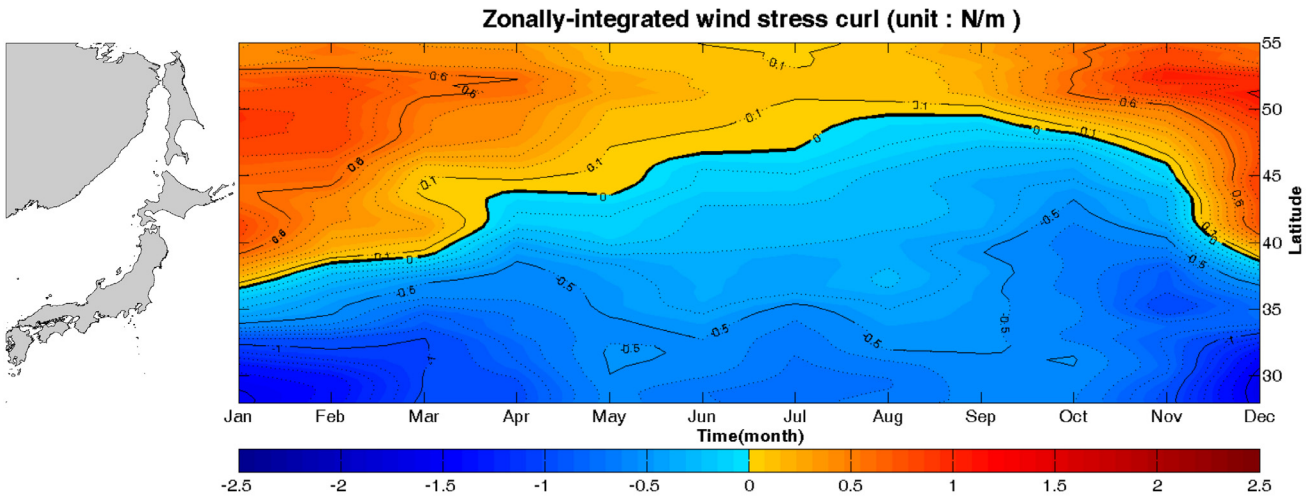
지금까지 관측된 바에 의하면 쓰가루해협과 소야해협을 통한 수송량의 계절변동 특성은 다음과 같다. 첫째, 계절변동의 양상이 세 해협에서 비슷하다는 것이다. 이는 이미 오래 전부터 인지되어 와서 동해순환 수치모델의 경계조건 등으로 활용되어 온 바 있다. 둘째, 소야해협에서 수송량의 계절변동 폭이(~1.5 Sv) 쓰가루해협(~0.4 Sv)보다 더 크다는 것이다. 이 사실은 각 해협의 지형 조건이나 평균 수송량의 크기 등으로 볼 때 쉽게 납득이 가지 않는 매우 흥미 있는 의문점이다. 이 문제에 대하여 Tsujino *et al.*(2008)은 처음으로 유출구(소야해협) 주변 해양 상황의 중요성을 언급하였다. 즉, 오후츠크 바람장에 의하여 소야해협 바깥쪽의 압력장이 변화하고 이것이 동해 내부로 전파되어 대한해협까지 이르러 유입 수송량의 변화를 초래한다는 것이다. 따라서 대한해협과 소야해협에서 수송량의 계절변동이 비슷한 양상으로 나타난다는 관측 결과를 설명할 수 있었다.

이 사실은 Cho *et al.*(2009)의 수치실험에서도 입증이 되었다. 한편 Seung *et al.*(2012)은 마찰효과를 고려한 island rule을 적용하여 이를 다음과 같이 설명하려 하였다. 해협이 세 개인 경우 임의의 두 해협을 통과하는 흐름(“흐름회로 (flow circuit)”)라 정의)의 수송량은 island rule에 의해 결정된다. 동해의 경우 다음과 같이 3개의 “흐름회로”가 성립된다: (1) 소야-쓰가루해협 “흐름회로” (수송량  $q_{st}$ ), (2) 소야-대한해협 “흐름회로” (수송량  $q_{sk}$ ), (3) 쓰가루-대한해협 “흐름회로” (수송량  $q_{tk}$ ). 어느 특정 해협을 통하는 흐름은 이 해협을 통하는 모든 “흐름회로”의 합으로 다음과 같이 주어진다. 즉, 대한해협 수송량( $Q_k$ )은  $Q_k = q_{sk} + q_{tk}$ , 쓰가루해협 수송량( $Q_t$ )은  $Q_t = q_{tk} + q_{st}$ , 소야해협 수송량 ( $Q_s$ )은  $Q_s = q_{sk} + q_{st}$ . 여기서 주목할 점은  $q_{tk}$ ,  $q_{sk}$ 는 항상 시계방향 흐름이나  $q_{st}$ 는 여름에는 시계방향, 겨울에는 반시계방향을 갖는다는 것이다. 그 이유는 북태평양 바람장이 계절에 따라 남-북으로 이동하여 소야-쓰가루해협 인근은 여름철에는 아열대 바람장(남향하는 sverdrup 수송), 겨울에는 아한대 바람장(북향하는 sverdrup 수송)의 영향을 받기 때문이다(Fig. 2). 따라서 소야해협에서는 여름철에 두 성분  $q_{sk}$  와  $q_{st}$ 가 모두 동해 바깥쪽을 향하는 방향이 되어 수송량이 강화되고 겨울에는 서로 반대 방향이 되어 수송량이 약화된다(Fig. 3a). 반대로, 쓰가루해협에서는 여름철에 두 성분  $q_{tk}$  와  $q_{st}$ 가 서로 반대 방향이 되어 수송량이 약화되고 겨울철에 모두 해협 바깥쪽 방향으로 되어 수송량이 강화된다(Fig. 3b). 결과적으로 소야해협에서의 계절변동 폭이 쓰가루해협보다 더 커질 수 있음을 보였다. 이 이론으로 쓰가루해협과 소야해협을 통한 수송량의 계절변동 특성을 정성적으로 설명해 줄 수는 있었으나 각 해협에 작용하는 마찰, 지형, 장벽효과(Yang *et al.*, 2013) 등의 불확실성으로 인하여 정량적인 검증에는 실패하였다.

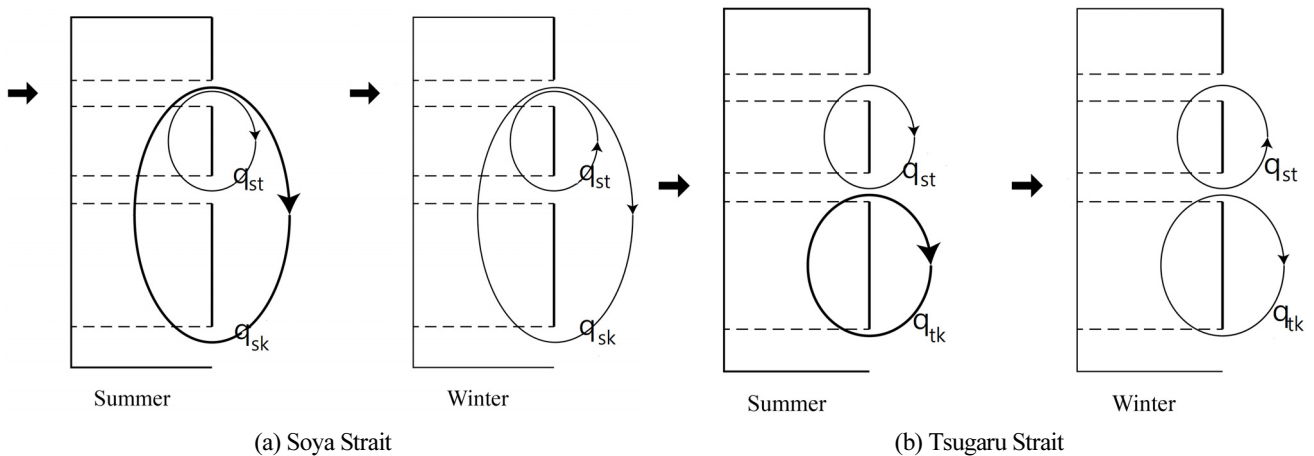
최근 Kida *et al.*(2016)은 수치모형 실험을 통하여 대마난류 수송량의 계절변동이 동해 북쪽의 아한대 바람장에 의한 것임을 보여줌으로써 Tsujino *et al.*(2008)의 주장을 뒷받침 하였다. 이 때, 소야해협 바깥쪽에서 동해 내부로 파의 형태로 진입하는 압력장의 순압성분이 중요한 역할을 한다는 점을 새롭게 밝혀냈다. 이 연구를 통하여 동해 북쪽의 아한대 지역 바람장의 중요성은 입증되었으나 다음과 같은 논란의 소지는 있을 수 있다. 첫째, 앞서 언급한 바와 같이 북태평양 바람장은 계절에 따라



그 위치를 이동하여 여름에는 북상하지만 겨울에는 충분히 남쪽으로 이동하여 소야-쓰가루해협 부근이 아한대 바람장의 영향을 받을 수 있게 된다(Fig. 2). 따라서 소야-쓰가루해협에서 북쪽으로 멀리 떨어진 특정 지역의 바람만 동해순환에 영향을 준다고 볼 수는 없다. 둘째, 대마난류는 아열대순환 서안경계류의 일부이고 이는 아열대 바람장에 의해 조종되는 것으로 알려져 왔다. 따라서 대마난류가 아열대 바람장과 전혀 무관할 수는 없을 것이다. 결론적으로 대마난류 수송량이 계절에 따라 남-북으로 이동하는 북태평양 전체 바람장과는 과연 어떻게 연관되어 있는지, 또 해협을 통하여 연결되어 있는 바깥쪽의 해양 상황과는 어떤 관계에 있을지에 대한 설명이 추가적으로 필요할 것으로 보인다.



**Fig. 2.** Time (month)-latitude diagram of the values obtained by zonally-integrating wind stress curl across the North Pacific, which is proportional to total Sverdrup transport. It is shown that the boundary between the positive and negative values changes its position seasonally with respect to the western boundary (Japanese islands).



**Fig. 3.** Schematic diagram showing the formation of volume transports through the (a) Soya and (b) Tsugaru Straits in summer and winter. The strait considered is marked by a thick horizontal arrow. Volume transport through a strait is the sum of all "flow circuit" transports passing through it. The quantities  $q_{st}$ ,  $q_{sk}$  and  $q_{tk}$  are "flow circuit" transports through, respectively, Soya-Tsugaru, Soya-Korea and Tsugaru-Korea Straits. Directions of flow circuit are marked by arrows with thicker ones implying larger transports.

## 4. 대마난류의 분지

대마난류의 분지 행태에 대하여는 일본 학자들에 의하여 여러 유형이 제시되어 왔는데 대체적으로 3분지설(Suda and Hidaka, 1932; Uda, 1934)이 유력하였다. 제1 분지는 일본연안류(NB, Fig. 1)로서 일본 연안을 따라 북상하고, 제2 분지는 일본 연안의 대륙사면을 따라 북상하며 제3분지는 동한난류(EKWC, Fig. 1)로서 한국연안을 따라 북상한 후 위도 약 38°N 부근에서 이안한다. 이들 분지는 쓰가루 해협 부근에서 합류한 후 쓰가루, 소야해협을 통하여 북태평양으로 빠져나간다. 대한해협을 통하여 유입한 대마난류 중 수심이 얇은 곳을 통과한 해수는 그 위치와도를 보존하기 위하여 등수심선을 따라 흐르는 경향을 보이는데 이 흐름이 일본연안류로 나타난다고 밝혀졌다(Yoon, 1982a). 제2지류는 여름철 대마난류 수송량의 갑작스런 증가로 인해 발생하여 대륙붕파의 형태로 대륙사면을 따라 전파하는 현상으로 알려졌다(Kawabe, 1982). 그러나 최근의 많은 수치모델 실험이나(예: Kim, 2007) 표층 뜰개 실험(예: Lee and Niiler, 2005) 결과에 의하면 이 두 분지는 대부분의 경우 뚜렷이 구분되지 않는 것으로 밝혀졌다. 실제로 일본 연안을 따라서는 대륙붕이 연속적으로 발달되어 있지 않고 대륙사면으로 단절되어 있는 곳이 많아서 연안류의 행태가 지속적으로 존재할 수는 없을 것으로 사료된다. 제3분지인 동한난류(EKWC, Fig. 1)는 대양에서의 서안강화 현상과 같은 기작으로 형성되는 것으로 알려져 왔으나(Yoon, 1982b) 동한난류의 계절변동을 설명하는 데에 다음과 같은 문제점이 제기되고 있다. 많은 수치모델 실험이나(예: Kim, 2007) 표층뜰개 실험(예: Lee and Niiler, 2010)에서 나타나듯이 동한난류는 여름철에 강화되고 겨울철에 약화된다. 이러한 계절변동이 서안강화에 의해서 일어나려면 경압로스비파가 동해를 수일 내에 서에서 동으로 가로지를 수 있을 정도로 그 전파 속도가 매우 빨라야 한다. 실제로 경압 로스비파는 전파 속도가 매우 느려서 동해를 가로지르는 데에는 일 년 이상이 걸린다. 따라서 서안강화가 아닌 다른 기작으로 동한난류의 형성을 설명하려는 시도의 필요성이 대두된다.

Spall(2002)은 일본연안류가 열적작용에 의해서 형성될 가능성을 주장하였다. 즉, 대한해협을 통하여 동해로 유입한 난수(양의 압력편차)가 일본연안을 따라 켈빈파의 형태로 전파한 후 동해 내부의 열적작용(냉각)으로 일본연안에 갇혀서 일본연안류로 나타난다는 것이다. 만약 열적작용(냉각)이 없다면 이 양의 압력편차는 로스비파의 형태로 서쪽으로 퍼져 나가서 일본연안류는 소멸되고 서쪽 육지 경계에서는 서안강화로 나타날 것이다. 만약 그의 주장대로 동해 내부의 열적 작용이 중요한 역할을 하여 동한난류도 이에 의해 형성된다고 하면 동한난류의 계절변동도 설명이 가능하다. Seung and Kim(2011)이 수치 실험으로 보였듯이 동해 북부에 냉수(음의 압력편차)가 자리하고 열적작용으로 유입 난수가 계절에 따라 다르게 냉각된다면 일본연안류와 동한난류는 모두 여름철에 강화, 겨울철에 약화될 수 있을 것이다. 따라서 이 주장은 기존의 가설을 대치할 수 있는 새로운 가설로 대두될 수 있다.

동한난류가 대한해협을 통해 유입하는 대마난류의 관성 때문일 가능성도 배제할 수는 없다. 대마난류와 동한난류가 같은 계절변동을 보인다는 점에서 동한난류의 계절변동도 이 기작으로 설명이 가능하다. Seung(2005)은 간단한 해석 모델을 이용하여 다음과 같이 이 가능성을 입증하려 하였다. 대한해협을 통해 동해로 유입하는 대마난류의 동서단면을 보면 서에서 동으로 가면서 그 두께가 증가한다. 따라서 동쪽에서는 대마난류가 해저면과 접해있고 서쪽에서는 그렇지 않다. 편의상 동쪽 부분을 “순압부” 서쪽 부분을 “경압부”라 정의하자. “순압부”는 등수심선을 따라 흐르려 하여 일본연안 쪽으로 방향을 바꾸나 “경압부”는 관성에 의해 유입시와 같은 방향을 유지하게 되어 서로 갈라지게 되어 결과적으로 두 개의 분지 즉, 일본연안류와 동한난류를 형성하게 된다. Arruda *et al.*(2004)은 간단한 비선형 모델을 이용하여 울릉난수소용돌이가 이동하지 않고 정체되어 있는 이유를 설명하려 하였다. 울릉난수소용돌이가 정체되어 있으려면 울릉난수소용돌이에 남쪽으로 작용하는 코리올리력을 상쇄시킬 수 있는 외력이 작용해야 하는데 동해로 유입하는 대마난류의 북쪽 성분 운동량이 그 역할을 한다는 것이다. 다시 말하면 대마난류의 관성으로 인해 대마난류가 울릉난수소용돌이 부근까지 북상할 수 있다는 가능성을, 즉

동한난류가 대마난류의 관성에 의해 형성될 가능성을, 제시했다고 볼 수 있는 것이다.

대마난류의 분지가 국지적인 요인에 의해서 발생할 가능성을 제시한 연구도 있었다. Cho and Kim(2000)은 여름철 대한해협 서수도를 따라서 저층냉수가 남쪽으로 유입하는데 이 때 대마난류에 음의 와도가 발생하여 대마난류가 분지된다고 하였다. Ou(2001)는 동해에 유입하는 대마난류가 대한해협을 통과할 때 해저마찰을 받아서 와도가 변화하기 때문에 대한해협을 통과한 후 두 개의 축으로 갈라지게 되는데 - 즉 분지하게 되는데 - 하나는 연안 쪽, 다른 하나는 외양의 극전선 쪽에 존재하게 된다고 하였다. 한편 정밀관측이나(예: Teague *et al.*, 2002) 고해상도 수치 모델(예: Kim, 2007)에서는 대마난류가 대한해협 중앙부에 위치한 대마도를 통과할 때 대마도 남단에서부터 갈라지는 현상이 나타나는데 마치 강한 제트류가 장애물을 통과할 때 일어나는 현상과 비슷하다. 그러나 이렇게 형성된 갈라짐이 동한난류와 일본연안류로 발전된다고 보기에는 다소 무리가 있을 것으로 사료된다. 결론적으로, 대마난류의 분지에 대한 문제는 아직도 논란의 여지가 많으며 향후 더 많은 연구가 요구된다.

## 사 사

본 기고문 작성에 유익한 조언을 해주신 심사자들에 사의를 표합니다.

## 참고문헌(References)

- Arruda, W.Z., D. Nof and J.J. O'Brien, 2004. Does the Ulleung eddy owes its existence to  $\beta$  and nonlinearity? *Deep Sea Res. I*, **51**: 2073-2090.
- Bleck, R. and L.T. Smith, 1990. A wind-driven isopycnic coordinate model of the north and equatorial Atlantic Ocean 1. Model development and supporting experiments. *J. Phys. Oceanogr.*, **95**: 3273-3285.
- Chang K.I., C.I. Zhang, C. Park, D.J. Kang, S.J. Ju, S.H. Lee and M. Wimbush, 2016. *Oceanography of the East Sea (Japan Sea)*. Springer, 460 pp.
- Cho, Y.K. and K. Kim, 2000. Branching mechanism of the Tsushima Current in the Korea Strait. *J. Phys. Oceanogr.*, **30**: 2788-2797.
- Cho, Y.K., G.H. Seo, B.J. Choi, S. Kim, Y.G. Kim, Y.H. Youn and E.P. Dever, 2009. Connectivity among straits of the northwest Pacific marginal seas. *J. Geophys. Res.*, **114**, C06018, doi: 10.1029/2008JC005218.
- Cho, Y.K., G.H. Seo, C.S. Kim, B.J. Choi and D.C. Shaha, 2013. Role of wind stress in causing maximum transport through the Korea Strait in autumn. *J. Mar. Syst.*, **115-116**: 33-39, doi: 10.1016/j.jmarsys.2013.02.002.
- Choi, B.J., S.H. Cho, H.S. Jung, S.H. Lee, D.S. Byun and K. Kwon, 2018. Interannual variation of surface circulation in the Japan/East Sea due to external forcings and intrinsic variability. *Ocean Sci. J.*, **53**(1): 1-16.
- Fukamachi, Y., I. Tanaka, K.I. Ohshima, N. Ebuchi, G. Mizuta, H. Yoshida, S. Takayanagi and M. Wakatsuchi, 2008. Volume transport of the Soya Warm Current revealed by bottom-mounted ADCP and ocean-radar measurement. *J. Oceanogr.*, **46**: 85-392.
- Fukudome, K., J.H. Yoon, A. Ostrovskii and T. Takikawa, 2010. Seasonal volume transport variation in the Tsushima Warm Current through the Tsushima Straits from 10 years of ADCP observations. *J. Oceanogr.*, **66**: 539-551.
- Godfrey, J.S., 1989. A Sverdrup model of the depth-integrated flow for the world ocean allowing for island circulations. *Geophys. Astrophys. Fluid Dyn.*, **45**: 89-112.
- Hirose, N. and K. Fukudome, 2006. Monitoring the Tsushima Warm Current improves seasonal prediction of the regional snowfall. *SOLA*, **2**: 61-63, doi: 10.2151/sola.2006 - 016.

- Kawabe, M., 1982. Branching of the Tsushima Current in the Japan Sea. Part II: Numerical experiment. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, **38**: 183-192.
- Kida, S., B. Qiu, J. Yang and X. Lin, 2016. The annual cycle of the Japan Sea Throughflow. *J. Phys. Oceanogr.*, **46**: 23-39, doi: 10.101175/JPO-D-15-0075.1
- Kim, Y.H. and H.S. Min, 2008. Seasonal and interannual variability of the North Korean Cold Current in the East Sea reanalysis data. *Ocean and Polar Research*, **30**(1): 21-31. (in Korean)
- Kim, Y.J., 2007. A study on the Japan/East Sea oceanic circulation using an ultra-high resolution model. Ph.D. Thesis, Kyushu University, Fukuoka, 249 pp.
- Lee, D.K. and P. Niiler, 2005. The energetic surface circulation patterns of the Japan/East Sea. *Deep Sea Res., Part II*, **52**: 1547-1563.
- Lee, D.K. and P. Niiler, 2010. Surface circulation in the southwestern Japan/East Sea as observed from drifters and sea surface height. *Deep Sea Res., Part I*, **57**: 1222-1232.
- Lyu, S.J. and K. Kim, 2003. Absolute transport from the sea level difference across the Korea Strait. *Geophys. Res. Lett.*, **30**: 1285, doi: 10.1029/2002GL016233.
- Lyu, S.J. and K. Kim, 2005. Subinertial to interannual transport variations in the Korea Strait and their possible mechanisms. *J. Geophys. Res.*, **110**, C12016, doi: 10.1029/2004JC002651.
- Ma, C., D. Wu, X. Lin, J. Yang and X. Ju, 2012. On the mechanism of seasonal variation of the Tsushima Warm Current. *Cont. Shelf Res.*, **48**: 1-7, doi: 10.1016/j.csr.2012.08.013.
- Minato, S. and R. Kimura, 1980. Volume transport of the western boundary current penetrating into a marginal sea. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, **36**: 185-195.
- Moon, J.H., N. Hirose, J.H. Yoon and I.C. Pang, 2009. Effect of the along-strait wind on the volume transport through the Tsushima/Korea Strait in September. *J. Oceanogr.*, **65**: 17-29, doi: 10.1007/s10872-009-0002-3.
- Nishida, Y., I. Kanomata, I. Tanaka, S. Sato and S. Takahashi, 2003. Seasonal and interannual variations of the volume transport through the Tsugaru Strait. *Umi no Kenkyu*, **12**: 487-499.
- Nof, D., 1993. The penetration of Kuroshio water into the Sea of Japan. *J. Phys. Oceanogr.*, **23**: 797-807.
- Nof, D., 2000. Why much of the Atlantic circulation enters the Caribbean Sea and very little of the Pacific circulation enters the Sea of Japan. *Prog. Oceanogr.*, **45**: 39-67.
- Ohshima, K.I., 1994. The flow system in the Japan Sea caused by a sealevel difference through shallow straits. *J. Geophys. Res.*, **99**: 9925 - 9940.
- Onishi, M. and K. Ohtani, 1997. Volume transport of the Tsushima Warm Current, west of Tsugaru Strait bifurcation area. *J. Oceanogr.*, **53**: 27-34, doi: 10.1007/BF02700746.
- Ou, H.W., 2001. A model of buoyant throughflow: with application to branching of the Tsushima Current. *J. Phys. Oceanogr.*, **31**: 115-126.
- Park, J. E., S.Y. Kim, B.J. Choi and D.S. Byun, 2019. Estimation of mean surface current and current variability in the East Sea using surface drifter data from 1991 to 2017. *J. Kor. Soc. Oceanogr.*, **24**(2) : 208-225. (in Korean)
- Seo, H., Y.O. Kwon and J.J. Park, 2014. On the effect of the East/ Japan Sea SST variability on the North Pacific atmospheric circulation in a regional climate model. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **119**: 418-444, doi: 10.1002/2013JD020523.
- Seung, Y.H., 2003. Significance of shallow bottom friction in the dynamics of the Tsushima Current. *J. Oceanogr.*, **59**: 113-118.
- Seung, Y.H., 2005. Branching of the Tsushima Current by an abrupt increase of bottom depth. *J. Oceanogr.*, **61**: 261-269.
- Seung, Y.H. and K.j. Kim, 2011. Boundary currents in a meridional channel subject to seasonally varying buoyancy forcing: application to the Tsushima Current. *J. Oceanogr.*, **67**: 563-575.



- Seung, Y.H., S.Y. Han and E.P. Lim, 2012. Seasonal variation of volume transport through the straits of the East/Japan Sea viewed from the island rule. *Ocean Polar Res.*, **34**: 403-411, doi: 10.4217/ OPR.2012.34.4.403.
- Spall, M.A., 2002. Wind- and buoyancy-forced upper ocean circulation in two-strait marginal sea with application to the Japan/East Sea. *J. Geophys. Res.*, **107**(C1). Doi: 10.1029/2001JC0009666.
- Suda, K. and K. Hidaka, 1932. The results of the oceanographical observations on board RMS Syunpu Maru in the southern part of the Japan Sea in summer, 1929. *J. Oceanogr.*, **3**: 291-375.
- Takikawa, T., J.H. Yoon and K.D. Cho, 2005. The Tsushima Warm Current through Tsushima Straits estimated from Ferryboat ADCP data. *J. Phys. Oceanogr.*, **35**: 1154-1168.
- Teague, W.J., G.A. Jacobs, P.A. Hwang, J.W. Book and H.T. Perkins, 2002. Low-Frequency Current Observations in the Korea/Tsushima Strait. *J. Phys. Oceanogr.*, **32**: 621-1641.
- Toba, Y., K. Tomizawa, Y. Kurasawa, K. Hanawa, 1982. Seasonal and year-to-year variability of the Tsushima-Tsugaru Warm Current system with its possible cause. *La mer*, **20**: 41-51.
- Tsujino, H., H. Nakano and T. Motoi, 2008. Mechanism of currents through the straits of the Japan Sea: Mean state and seasonal variation. *J. Oceanogr.*, **64**: 141-161.
- Uda, M., 1934. The results of simultaneous oceanographical investigations in the Japan Sea and its adjacent waters in May and June, 1932. *J Imp Fish Exp Sta*, **5**: 57-190. (in Japanese).
- Yamamoto, M. and N. Hirose, 2011. Possible modification of atmospheric circulation over the northwestern Pacific induced by a small semi-enclosed ocean *Geophys. Res. Lett.*, **38**, L03804, doi: 10.1029/2010GL046214.
- Yang, J., X. Lin and D. Wu, 2013. Wind-driven exchanges between two basins: some topographic and latitudinal effects. *J Geophys. Res.*, **118**: 4585-4599. doi: 10.1002/jgrc.2033.
- Yoon, J.H., 1982a. Numerical experiment on the circulation in the Japan Sea. Part III. Mechanism of the Nearshore Branch of the Tsushima Current. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, **38**: 125-130.
- Yoon, J.H., 1982b. Numerical experiment on the circulation in the Japan Sea. Part I. Formation of the East Korean Warm Current. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, **38**: 43-51.