

Article

<https://doi.org/10.7850/jkso.2023.28.1.001>
pISSN : 1226-2978 eISSN : 2671-8820

기후변화에 따른 동해 심층 해수의 물리적 특성 및 순환 변화 연구 : 현황과 전망

이호준¹ · 남성현^{2,3*}¹해군사관학교 해양학과 조교수, ²서울대학교 자연과학대학 지구환경과학부 부교수, ³서울대학교 자연과학대학 해양연구소 운영위원

Studies on Changes in the Hydrography and Circulation of the Deep East Sea (Japan Sea) in a Changing Climate: Status and Prospectus

HOJUN LEE¹ AND SUNGHYUN NAM^{2,3*}¹Assistant Professor, Department of Oceanography, Republic of Korea Naval Academy, Changwon 51698, Korea²Associate Professor, School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, Seoul 08826, Korea³Steering Committee, Research Institute of Oceanography, Seoul National University, Seoul 08826, Korea*Corresponding author: namsh@snu.ac.kr

Editor Hanna Na

Received 4 October 2022; Revised 2 January 2023; Accepted 17 January 2023

ABSTRACT

동해는 전 세계적으로 가장 빠른 수준의 온난화를 경험하는 해역 중 하나로서, 기후변화에 민감하게 반응할 뿐 아니라 대양에 비해 월등히 짧은 순환 주기를 가지고 있기 때문에 미래의 대양 환경 변화에도 중요한 시사점을 주는 것으로 알려져 있다. 그러나 동해 심층 해수의 특성과 순환의 변화 과정에 대한 연구는 동해 전역의 심층을 정밀하게 조사하기 위한 국제협력 프로그램이 자리잡고, 측정 장비의 분해능을 포함하는 관측기술과 수치모델 모의 능력이 크게 향상된 최근(1990년대 이후)에서야 본격화되고 있다. 여기서는 동해 심층 해수의 물리적 특성과 순환의 변화 과정에 대한 간의 연구 결과를 요약하고, 향후 남은 과제를 제시하고자 한다. 동해는 내부에서 자체적으로 심층 해수가 생성되며 대양과 분리된 독특한 심층 순환 구조를 가진다. 동해의 수백 m 수심 아래에는 수온이 낮고($<1^{\circ}\text{C}$) 염분이 거의 일정(34.0-34.1)한 해수가 분포하기 때문에 오랜 기간 이 해수를 일본해고유수(동해고유수)로 명명된 단일 해수로 여겨 왔다. 그러나 1990년대 이후 정밀한 관측이 이루어지며, 동해 심층을 채우고 있는 해수가 적어도 3개의 서로 다른 물리적 특성을 가진 해수(중양수, 심층수, 저층수)로 구성됨이 밝혀졌다. 이들 3개 해수의 물리적 특성과 해수 사이의 경계 수심은 항상 일정한 것이 아니라, 지난 수십 년 동안 유의한 수준의 변화를 겪어왔다. 동해 북부 해역의 대마난류 재순환, 해양-대기 열과 담수의 교환량, 해빙 형성에 영향을 받는 대류(심층사면대류 및 심층외양대류) 과정에 따라 심층 해수 생성에 뚜렷한 차이가 발생했기 때문이다. 생성된 심층 해수는 수심이 얇은 곳을 오른쪽에 두고 일본 분지에서부터 반시계 방향으로 울릉 분지, 야마토 분지를 차례로 거쳐 다시 일본 분지로 수송되며, 이 수평적인 심층 순환도 변화를 겪어 왔다. 수평적인 심층 순환은 동시에 남북 및 연직 방향의 순환(자오면 순환) 경로와 강도의 변화를 동반한다. 동해는 수천 년 규모의 순환 주기를 가지는 대양에 비해 훨씬 짧은 수백 년 혹은 그 이내의 순환 시간 규모를 가지기 때문에 동해 심층 해수의 물리적 특성과 자오면 순환의 급격한 변화를 더 뚜렷하게 볼 수 있을 것으로 기대 가능하다. 심층 및 자오면 순환 사이의 연계성, 대양과 동해의 유출입 해수 수송을 포함하는 동해 상층 순환과 심층 순환 사이의 연계성은 아직까지 잘 밝혀지지 않았다. 동해 심층 해수 수송의 경로와 강도를 지배하는 다양한 과정들에 대한 후속 연구들이 요구된다.

The East Sea, one of the regions where the most rapid warming is occurring, is known to have important implications for the response of the ocean to future climate changes because it not only reacts sensitively to climate change but also has a much shorter turnover time (hundreds of years) than the ocean (thousands of years). However, the processes underlying changes in seawater characteristics at the sea's deep and abyssal layers, and meridional overturning circulation have recently been examined only after international cooperative observation programs for the entire sea allowed in-situ data in a necessary resolution and accuracy along with recent improvement in

numerical modeling. In this review, previous studies on the physical characteristics of seawater at deeper parts of the East Sea, and meridional overturning circulation are summarized to identify any remaining issues. The seawater below a depth of several hundreds of meters in the East Sea has been identified as the Japan Sea Proper Water (East Sea Proper Water) due to its homogeneous physical properties of a water temperature below 1°C and practical salinity values ranging from 34.0 to 34.1. However, vertically high-resolution salinity and dissolved oxygen observations since the 1990s enabled us to separate the water into at least three different water masses (central water, CW; deep water, DW; bottom water, BW). Recent studies have shown that the physical characteristics and boundaries between the three water masses are not constant over time, but have significantly varied over the last few decades in association with time-varying water formation processes, such as convection processes (deep slope convection and open-ocean deep convection) that are linked to the re-circulation of the Tsushima Warm Current, ocean-atmosphere heat and freshwater exchanges, and sea-ice formation in the northern part of the East Sea. The CW, DW, and BW were found to be transported horizontally from the Japan Basin to the Ulleung Basin, from the Ulleung Basin to the Yamato Basin, and from the Yamato Basin to the Japan Basin, respectively, rotating counterclockwise with a shallow depth on the right of its path (consistent with the bottom topographic control of fluid in a rotating Earth). This horizontal deep circulation is a part of the sea's meridional overturning circulation that has undergone changes in the path and intensity. Yet, the linkages between upper and deeper circulation and between the horizontal and meridional overturning circulation are not well understood. Through this review, the remaining issues to be addressed in the future were identified. These issues included a connection between the changing properties of CW, DW, and BW, and their horizontal and overturning circulations; the linkage of deep and abyssal circulations to the upper circulation, including upper water transport from and into the Western Pacific Ocean; and processes underlying the temporal variability in the path and intensity of CW, DW, and BW.

Keywords: Central water, Deep water, Bottom water, Deep circulation, East Sea

1. 서론

전 지구적인 수문 순환(hydrological cycle), 생지화학적 순환(biogeochemical cycle)과 열, 염, 물질 분배 및 재분배에 대한 영향을 미치며 기후를 조절하는 대양의 자오면 순환(meridional overturning circulation; MOC)은 대양 심층 해수의 온난화(warming), 산성화(acidification), 탈산소화(deoxygenation)와 함께 변화를 겪고 있는 것으로 알려져 있다(Stouffer *et al.*, 2006; Send *et al.*, 2011; Levin and Le Bris, 2015). 특히 대서양 자오면 순환(Atlantic MOC)은 저위도 상층의 고온고염수를 고위도로 수송하고, 고위도에서 생성된 저온고염의 심층 해수를 저위도로 수송하며 남북 및 연직 방향의 순환을 통해 열, 염, 물질 분배 및 재분배와 지구의 기후 시스템 조절에 중요한 역할을 담당한다(Srokosz *et al.*, 2012). 그러나 대서양 자오면 순환은 기후변화에 따라 변동하는 것으로 확인되었으며, 대서양 심층 해수 수송량에도 유의한 수준의 증감 변동이 여러 시공간 규모로 나타나고 있음이 보고되었다(Bryden *et al.*, 2005; Send *et al.*, 2011; Jamet *et al.*, 2020; Worthington *et al.*, 2021). 기후변화가 심화되며 대양의 자오면 순환이 완전히 멈추지는 않겠지만 향후 100년 동안 지속 변동하며 심층 해수의 물리적 특성에도 지속적인 변화를 가져올 것으로 전망된다(Stouffer *et al.*, 2006).

대양과 유사하게 자체적인 자오면 순환 시스템이 존재하는(Senjyu *et al.*, 2002; Chang *et al.*, 2004; Han *et al.*, 2020) 동해는 ‘작은 대양(miniature ocean)’이라 불릴 정도로 대양과 유사한 특성을 보인다(Kim *et al.*, 2004; Talley *et al.*, 2006). 동해는 한-일-러로 둘러싸인 평균 수심 1667 m의 깊은 연해로서 북부, 남서부, 남동부 각각에 수심 2000 m 이상으로 깊은 총 3개 - 일본 분지(Japan Basin), 울릉 분지(Ulleung Basin), 야마토 분지(Yamato Basin) - 의 해저 분지가 존재한다. 수심이 150 m 내외로 얇고 폭이 비교적 좁은 4개의 해협(대한해협; Korea Strait, 쓰가루해협; Tsugaru Strait, 소야해협; Soya Strait, 타타르해협; Tatar Strait)을 통해서만 외해와 연결되기 때문에 동해는 대양과의 해수 교환이 매우 제한적인 반폐쇄성 해역(semi-enclosed sea)이다(Mooers *et al.*, 2006; Gamo *et al.*, 2014). 따라서 심층 해수가 외부로부터 유입하거나 외부로 유출되기 보다는, 내부에서 생성되어 순환하는 뚜렷한 자오면 순환 구조를 보인다(Fig. 1). 이러한 이유로 동해는 대양의 심층 해수에 비해 수온이 낮고, 용존산소 농도가 높은 심층 해수로 채워져 있다(Fig. 2).

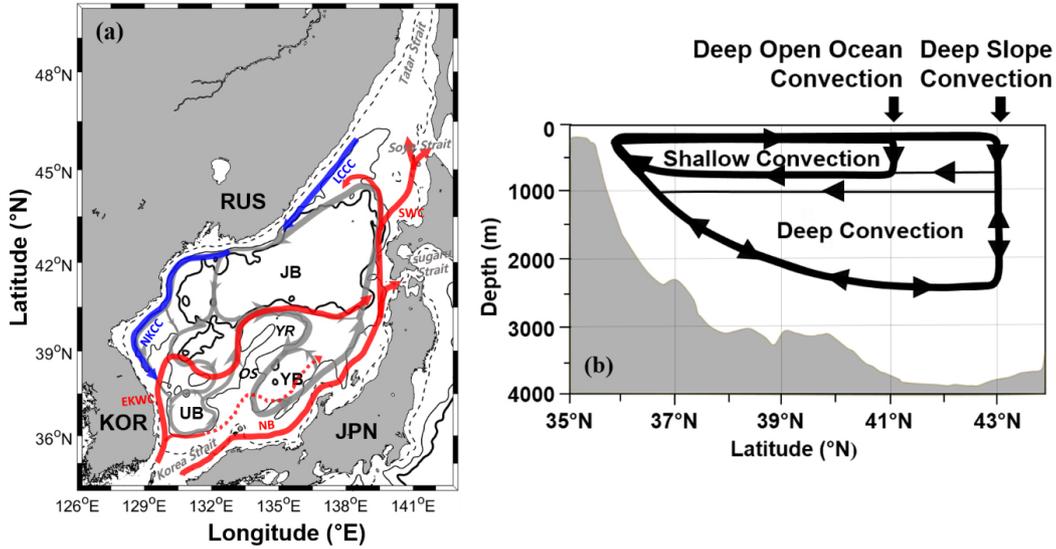


Fig. 1. Schematic of (a) upper ocean circulation (red and blue arrows), deep and abyssal circulation (gray arrows), and (b) meridional overturning circulation (MOC) in the East Sea. In (a), most widely recognized currents and geographical features are highlighted. Isobaths are indicated by thick solid (3000 m), thin solid (1500 m), and thin broken (150 m) lines. KOR, RUS, and JPN indicate Korea, Russia, and Japan, respectively. JB, UB, YB, YR, and OS indicate the Japan Basin, Ulleung Basin, Yamato Basin, Yamato Rise, and Oki Spur, respectively. Surface warm and cold currents are marked by red and blue arrows, respectively: LCCC, NKCC, EKWC, NB, and SWC indicate Liman Coastal Cool Current, North Korea Cold Current, East Korea Warm Current, Nearshore Branch, and Soya Warm Current, respectively. Two modes of MOC where thick and thin arrows indicate circulation cells with strong and weak flows, respectively: (b) double cells with shallow convection (open-ocean convection) vs single cell with deep convection (deep slope convection). Note that the upper cell still exists even when the deep slope convection is active although the mid-depth equatorward flow becomes weak and abyssal poleward flow reverses to equatorward. Here, (a) and (b) are modified from original figures in Senjyu *et al.*(2005) and Han *et al.*(2020), respectively.

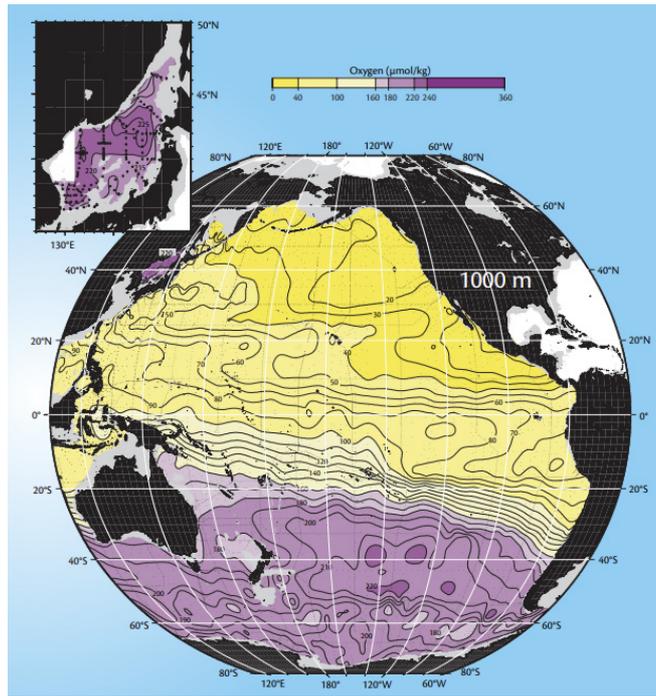


Fig. 2. Oxygen concentrations ($\mu\text{mol/kg}$) at 1000 m in the Pacific Ocean and East Sea (upper-left inset with higher horizontal resolution). High oxygen (purple) indicates more recent ventilation (surface water penetration). The East Sea exhibits ventilation at depth that is much higher than elsewhere in the Pacific, including the Southern Ocean. This map represents the specialty of the deep (~ 3500 m) East Sea. Data are from the World Ocean Circulation Experiment, the National Oceanographic Data Center, summer 1999 surveys from the R/V *Revelle* and R/V *Professor Khromov* in the East Sea, and a 2000 dataset from the Okhotsk Sea. Modified from Talley *et al.*(2006).

동해의 심층 해수는 1) 북서부 대륙붕 해역과 2) 북부 일본 분지 내 외양 해역에서 생성되어 심층에서 수평적으로는 반시계 방향으로 회전하며 순환하는 것으로 알려져 있다(Fig. 1(a)). 동해 북서부 대륙붕 해역의 표층 해수는 겨울철이 되면 대기 냉각으로 수온이 낮아지고 해빙(sea ice) 형성 과정의 염분방출(brine rejection 또는 brine injection) 등으로 염분이 높아져 밀도가 증가하는 것으로 알려져 있다(Talley *et al.*, 2003; Yoon *et al.*, 2018). 이렇게 생성되는 고밀도의 표층 저온고염수는 대륙붕에서부터 대륙사면을 따라 연결되어 심층 해수를 생성하고 일본 분지 심해를 채우게 되며, 이 과정을 심층사면대류(deep slope convection)로 부른다(Fig. 1(b)) (Talley *et al.*, 2003). 한편, 동해 북부 일본 분지 내 외양 해역에서는 겨울철에 강한 해상풍과 함께 혼합층이 깊게 발달하며 심층외양대류(open-ocean deep convection) 또는 중층대류(shallow or intermediate convection) 과정을 통해 다른 성격의 심층 해수를 생성한다(Fig. 1(b)) (Noh *et al.*, 1999; Yoshikawa *et al.*, 1999; Clayson and Luneva, 2004). 생성된 심층 해수는 해저 분지 내에서, 그리고 다른 분지로 수송되는 과정에서 수평적으로는 동해 전체를 반시계 방향으로 회전하며 순환한다(Talley *et al.*, 2003; Senjyu *et al.*, 2005; Kim *et al.*, 2022a).

기후변화에 따라 대양의 심층 순환과 해수 특성에 변화가 발생하고 있는 것과 유사하게 동해 심층 순환과 해수 특성에도 뚜렷한 변화가 나타나는 것으로 알려져 있다(Tanaka, 2014; Yoon *et al.*, 2018). 특히, 동해는 전 세계적으로 가장 빠른 수준의 온난화가 진행 중(Belkin, 2009; Lindsey and Dahlman, 2020)일 정도로 기후변화에 매우 민감하게 반응하는 해역 중 하나이다. 변화하는 기후 조건에서 대양 심층 해수 특성과 순환이 어떻게 변화할 것인지 전망하기 위한 ‘대양 실험실(Laboratory of open ocean)’로서의 동해에 대한 여러 연구가 수행되었는데, 동해 심층 해수의 물리적 특성과 순환에 대한 연구들(Kim *et al.*, 2002; Cui and Senjyu, 2010, 2012; Gamo, 2011; Tanaka, 2014; Yoon *et al.*, 2018; Han *et al.*, 2020, 2021; Kosugi *et al.*, 2021; Jeong *et al.*, 2022; Senjyu, 2022)은 대양에 비해 월등히 짧은 동해의 순환 시간 규모에 특히 주목했다. 선행 연구를 통해 추정된 동해 심층 순환의 시간 규모는 수백 년(Min and Warner, 2005; Postlethwaite *et al.*, 2005; Han *et al.*, 2021; Na *et al.*, 2022)으로 비록 연구에 따라 이 순환 시간 규모를 추정하는 방법과 추정 결과의 차이를 보이기는 하지만, 수천 년 이상의 순환 시간 규모를 가지는 대양에 비해 월등히 짧다는 점은 공통적으로 확인할 수 있는 사실이다. 이러한 점을 고려하면, 빠르게 온난화 중인 동해의 심층 환경 변화는 미래의 대양 환경 변화를 전망함에 있어 매우 중요한 시사점을 제공한다.

따라서 이 논문에서는 기후변화와 함께 나타나고 있는 동해 심층 해수의 물리적 특성과 순환 변화에 대한 그간의 연구 결과를 요약하고 향후 연구 전망을 제시하고자 한다. 이 논문에서 ‘심층’이란 1990년대 동해 전역 관측을 통해 최초로 명명된 (동해) 중앙수(East Sea Central Water; CW), (동해)심층수(East Sea Deep Water; DW), 그리고 (동해)저층수(East Sea Bottom Water; BW)의 정의를 따르며 CW 상부경계 수심(약 400 m) 하부의 해수를 통칭하는 의미로 사용했다(Kim *et al.*, 2004). 2장에서는 동해 심층 해수의 물리적 특성과 변화에 대한 연구 결과를, 3장에서는 동해 심층 순환과 자오면 순환의 변화에 대한 연구 결과를 정리하고, 4장에서는 전체 요약과 향후 연구 전망을 기술했다.

2. 동해 심층 해수의 물리적 특성과 변화

2.1 동해 심층 해수의 물리적 특성

동해 심층 해수의 물리적 특성은 1932년 일본 학자들에 의해 수행된 동해 전역 관측 결과로부터 정의되었고(Kim and Yi, 2017), 이후 1990년대 이전까지 서로 다른 기준으로 구분되었다. 1932년 동해 내 3개 분지를 포함하는 전역에서 수집한 관측 자료를 분석하여 Uda(1934)에서는 수심 수백 m 아래에 분포하는 잠재수온(온위, potential temperature) $0 - 1^{\circ}\text{C}$, 염분 34.0 - 34.1 범위의 매우 균질한 해수를 일본해고유수(Japan Sea Proper Water)로 명명했다(이후 동해고유수; East Sea Proper Water로도 명명). 이렇게 정의된 일본해고유수는 1990년대 이전까지 오랜 기간 동안 동해 심층 해수가 단일 해수로 구성되

어 있다는 패러다임을 뒷받침하는 핵심 근거로 사용되어 왔다(Kim and Yi, 2017). 그러나 일본해고유수는 1990년대 이전까지 연구자에 따라 서로 다른 기준으로 세분되었는데, 수온의 연직 기울기(Nitani, 1972), 용존산소 농도와 성층 정도(Sudo, 1986; Senjyu and Sudo, 1993, 1994), 수온, 용존산소, 그리고 규소의 불연속면(Gamo and Horibe, 1983) 등에 따라 심층수(Deep Water), 상부 저층수(Upper Bottom Water), 하부 저층수(Lower Bottom Water)로 구분하거나(Nitani, 1972), 상부 고유수(Upper portion of the Proper Water) (Sudo, 1986; Senjyu and Sudo, 1993, 1994) 및 심층수(Deep Water)와 저층수(Bottom Water) (Gamo and Horibe, 1983)로 구분되기도 했다.

동해 심층 해수의 수온과 염분을 정밀하게 측정할 수 있는 장비(SBE-9, Yoon *et al.*, 2018)와 용존산소 농도를 보다 정확하게 측정하는 방법(Pai *et al.*, 1993)이 1990년대부터 본격적으로 활용되면서 동해 심층 해수의 물리적 특성이 구체화됨에 따라 일본해고유수라는 단일 해수 패러다임은 중앙수(CW), 심층수(DW), 저층수(BW)의 3개 해수 패러다임으로 발전했다. 특히, 동해 심층 해수의 특성과 순환 경로를 밝히기 위해 1993년부터 1999년까지 동해 전역에서 수행된 동아시아 연해순환연구(Circulation Research of the East Asian Marginal Seas; CREAMS) 관측 프로그램을 통해 기존에 알려지지 않았던 동해 심층 해수의 정밀한 물리적 특성과 세밀한 구조가 최초로 발견되었다. 대양 심층 해수에 비해 동해 심층 해수의 수온은 월등히 낮고 용존산소 농도는 3-4배가 높으며, 해수 특성의 연직 변화폭이 매우 작지만, 그럼에도 불구하고 대양 심층에서와 유사한 연직 변화(수층 내에서 최대 및 최소를 보이는 구조)가 존재함이 알려졌다(Kim and Kim, 1996; Kim *et al.*, 1996). 예를 들면, 수심 약 1500 m 부근의 염분 최소로부터 알 수 있는 심해염분최소층(Depth Salinity Minimum), 수심 약 2000 m 부근의 용존산소 최소로부터 알 수 있는 심해용존산소최소층(Depth Oxygen Minimum), 그리고 수심 약 2500 m 아래에서 수온, 염분, 그리고 용존산소 농도가 매우 일정한 균질층이 존재한다(Fig. 3) (Kim *et al.*, 1996; Kim *et al.*, 2004). 대양에 비해 매우

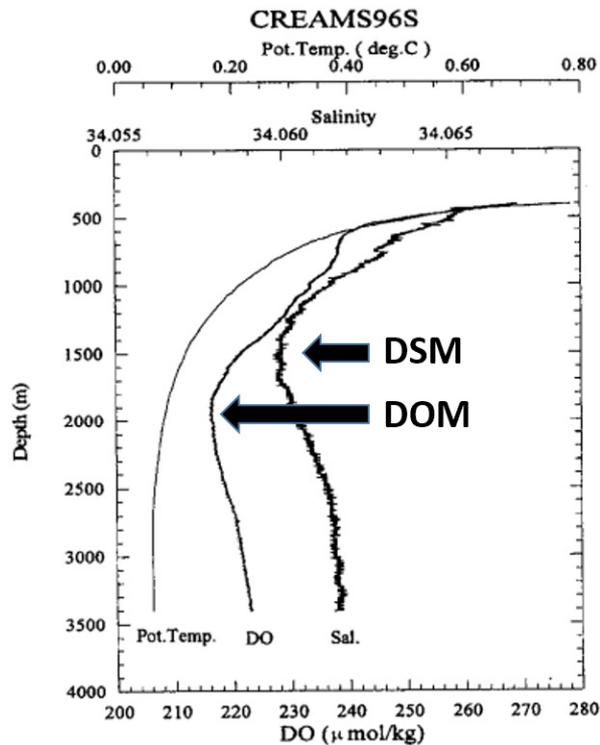


Fig. 3. Vertical profiles of potential temperature, practical salinity, and dissolved oxygen concentration at a station in the western Japan Basin during the summer of 1996. DSM and DOM denote the deep salinity minimum and dissolved oxygen minimum, respectively. Modified from Kim and Kim(1996).

작은 변화폭이므로 정밀한 측정이 불가능했던 1990년대 이전에는 확인할 수 없었지만, 수심 1500 m 부근의 심해염분최소층과 수심 2500 m 부근을 기준으로 동해 심층 해수를 CW, DW, 그리고 BW의 3개 해수로 구분한 결과, CW는 수심 400–1500 m에서 잠재수온 0.12–0.60°C 범위와 염분 34.067 이상, DW는 수심 1500–2500 m에서 잠재수온 0.12°C 미만과 염분 34.067–34.070 범위, 그리고 BW는 수심 2500 m 아래 해저면까지 분포하며 잠재수온 0.073°C 미만과 염분 34.070 내외의 물리적 특성을 갖는 해수로 정의할 수 있었다(Kim *et al.*, 2004). 대양의 심층 해수에서도 종종 발견되는 심해용존산소최소층이 DW 내에서 발견되므로 DW가 동해 심층 해수 중 생성된 지 가장 오래된 해수라고 볼 수 있다(Kim *et al.*, 2001; Yoon *et al.*, 2018).

2.2 물리적 특성의 변화

동해 심층 해수(CW, DW, BW)의 물리적 특성은 서로 다른 심층 해수 생성 기작(심층사면대류 및 심층외양대류)과 생성 과정에 따라 유의한 변화를 겪은 것으로 해석된다. 심층사면대류는 동해 북부 해역에서 냉각과 함께 해빙 형성 시 염분방출 과정에서 발생하며, 북서부에 위치한 표트르 대제만(Peter the Great Bay) 등 수심이 얇은 대륙붕 해역에서 밀도가 증가한 저온고염 특성의 표층 해수가 대륙사면을 따라 수심 2000 m 이상 침강하여 BW를 생성하므로 BW가 위치하는 수심 2500 m 아래에서 수온을 낮게, 염분과 용존산소 농도는 비교적 높게 유지할 수 있다(Fig. 4(a)) (Kim *et al.*, 2002; Senjyu *et al.*, 2002; Talley *et al.*, 2003; Tanaka, 2014; Kim *et al.*, 2022a). 한편, 심층외양대류(또는 중층대류)는 수심이 깊은 일본 분지 내 외양 해역에서 발생하는데, 겨울철 강한 해표면 냉각 작용에 따라 대류가 강화하고 혼합층이 깊어지며, 전선 부근에서는 섭입과 침강도 발생하기 때문에 CW 생성이 활발하게 나타난다(Marshall and Schott, 1999; Clayson and Luneva, 2004). 수온이 낮고 염분과 용존산소 농도가 높은 해수가 심해염분최소층 상부에 새로 공급되면서 해당 수심의 심층 해수(CW) 수온이 감소

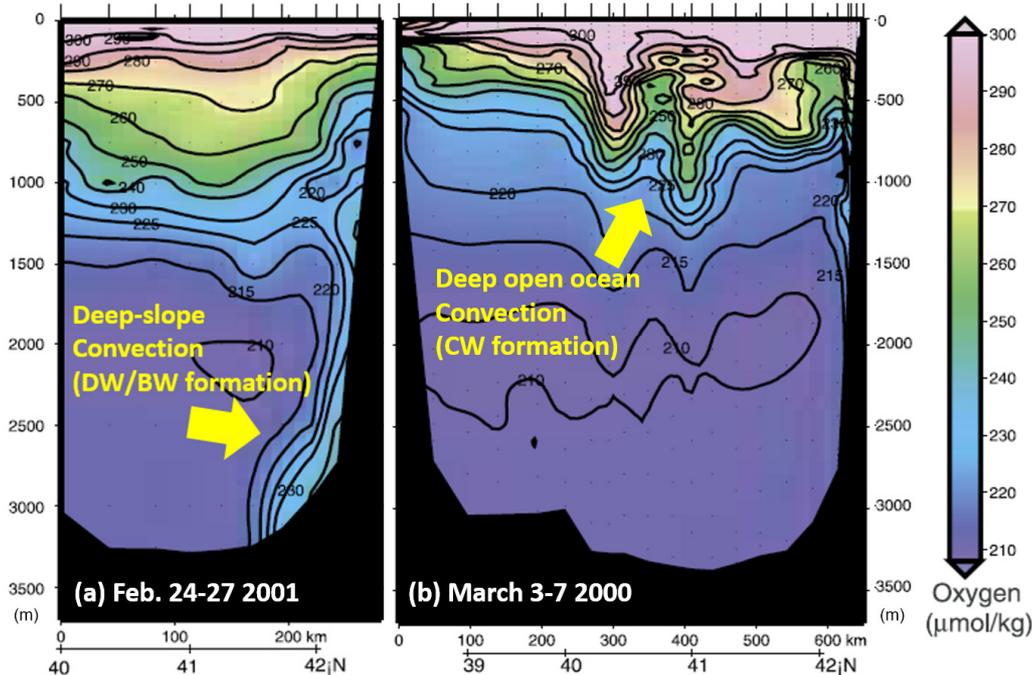


Fig. 4. Cross-section of dissolved oxygen (DO) concentrations ($\mu\text{mol/kg}$) along 131.30°E during (a) February 24–27, 2001 (deep slope convection occurred) and (b) March 3–7, 2000 (open-ocean deep convection dominant). Deep slope convection occurred along the continental slope north of 41.5°N, resulting in deep water (DW) and bottom water (BW) formation, whereas open-ocean deep convection occurred south of Vladivostok, resulting in central water (CW) formation. Modified from Talley *et al.*(2003).

하고 염분과 용존산소 농도가 증가한다(Fig. 4(b)) (Talley *et al.*, 2003). 대륙붕 해역 내 해표면 냉각과 염분방출이 충분하지 않아 BW 생성이 활발하지 않았던 반면, 심층외양대류 방식의 CW 생성은 활발했던 1990년대 중반에는, 용존산소 농도가 심해염분최소층 상부에서는 증가하고, 하부에서는 감소하는 독특한 연직 구조의 변화를 보였다(Kim *et al.*, 1996; Gamo *et al.*, 2001). 동해에서 전반적인 심층사면대류의 약화는 1965년부터 1995년까지 아파토 분지의 DW와 BW 수심 범위에서 염분과 용존산소 농도를 지속적으로 감소시켰고(Kwon *et al.*, 2004), 그 결과 심해용존산소최소층 수심은 1960년대 후반 1000 m 이내에서 1990년대 중반 약 2000 m로 약 1000 m 이상 더 깊어지게 되었다(Gamo *et al.*, 1986; Kim and Kim, 1996; Kim *et al.*, 2004). 그러나 2000년대부터는 다시 심층사면대류가 재활성되면서 CW 생성보다 BW 생성이 우세해지고, 그 결과 심해

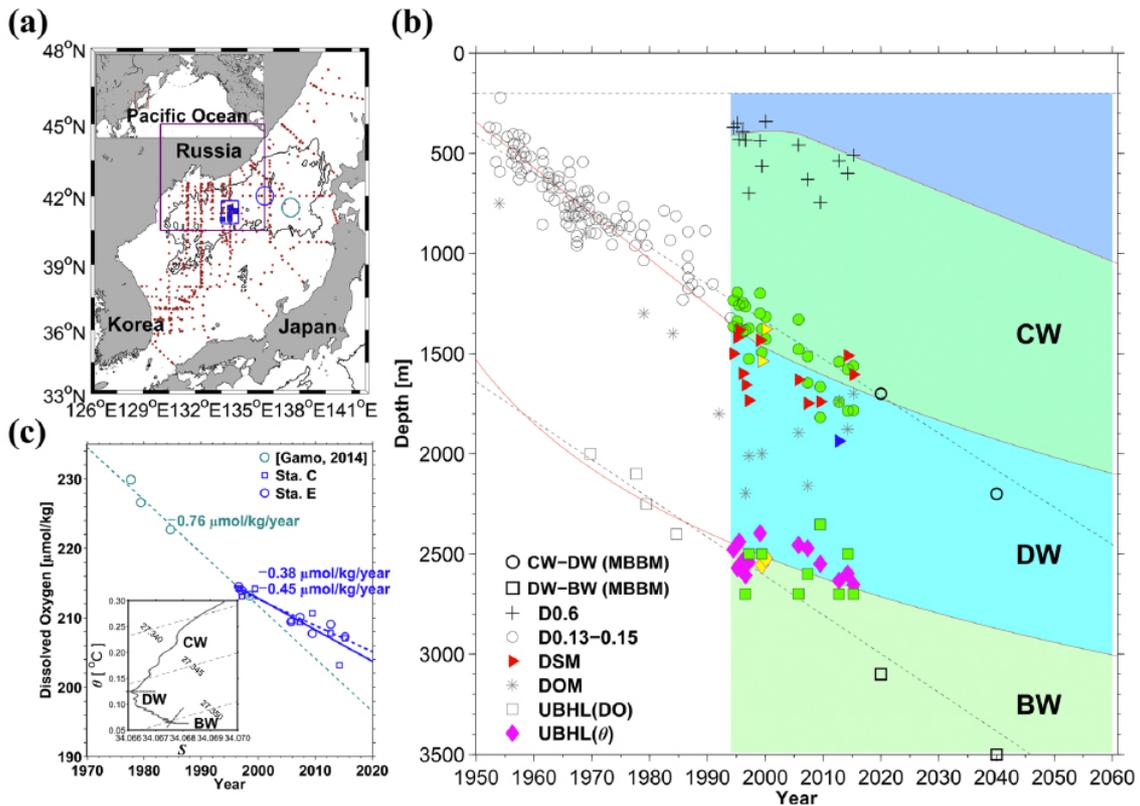


Fig. 5. Deep structural changes in the East Sea (Japan Sea). (a) Locations of the East Sea (brown box in upper-left panel) and hydrographic stations where data were collected during research cruises (brown dots). The Japan Basin (JB) is deeper than 3,000 m (thick black contour), and data collected in the central JB (centered around 41.3°N, 134°E, blue squares) were mainly used. (b) Time series of the boundaries between central water (CW) and deep water (DW) masses defined by 0.13–0.15°C isotherms (open and filled green circles) or deep salinity minimum (DSM, red triangles), and between the DW and bottom water (BW) masses by upper limit of the benthic homogeneous layer (UBHL, derived from potential temperature: magenta diamonds or dissolved oxygen: open and filled green squares), and depth of dissolved oxygen minimum (DOM, gray asterisk) for 67 years (1950–2016). Isotherms of 0.6°C used for the upper CW boundary are shown with crosses. Data collected in 1999, 2000, and 2001 using different conductivity-temperature-depth (CTD) instruments are shown with yellow triangles and diamonds. The DSM observed in 2012 is denoted by a blue triangle. Three black dashed lines denote the upper CW boundary fixed at 200 m, and linear fits to the observed CW-DW and DW-BW boundaries from top to bottom, which were previously reported using data from 1950 to 1996 (not shaded). Red solid lines indicate new fits to the updated boundaries. (c) Time series of BW DO observed from 1977 to 2015 in the eastern JB (green open circles in Fig. 5a) at Stations C (blue squares in Fig. 5a) and E (blue circles in Fig. 5a). Green dashed line indicates the linear declining BW DO in the eastern JB between 1970 and 2020, which was obtained using data collected from 1977 to 1999. Blue dashed (solid) line indicates the same linear trend between 1996 and 2020, but using data collected from Station E (Station C) from 1996 to 2015. A potential temperature-salinity diagram of data collected from Station C in June 1999 is shown in the bottom-left inset. Modified from Yoon *et al.*(2018).

염분최소층 하부에서보다 상부에서 더 큰 폭으로 용존산소 농도가 감소했다(Figs. 4(a), 5(b), 5(c)) (Senjyu *et al.*, 2002; Talley *et al.*, 2003; Yoon *et al.*, 2018).

심층사면대류는 1932년부터 줄곧 우세한 BW 생성 기작으로 작용했을 것이라 추정되지만, 해표면에서부터 심층 해수에 이르기까지 전반적인 동해 내 해수의 수온 상승과 함께 그 생성 과정은 뚜렷한 변화를 겪고 있는 것으로 해석된다. 1950년부터 1990년대 중반까지 심층사면대류를 통한 BW 생성은 지속적으로 약화되어 왔고, 심층외양대류를 통한 CW 생성은 상대적으로 강화되어 왔다. 이에 따라 수심 3000 m에서의 용존산소 농도는 지속적으로 감소하였고, 이 감소 추세로부터 동해 심층의 용존산소는 180 - 530년 혹은 300년 이내에 완전히 고갈되어 동해 심층이 무산소 환경으로 변화될 것이라는 전망이 제시되기도 했다(Chen *et al.*, 1999; Gamo, 1999; Minami *et al.*, 1999). 그러나 이동경계상자모델(Moving Boundary Box Model)을 이용하여, 1980년대 중반과 1990년대 후반 사이에 동해 심층 해수의 주요 생성 방식이 심층사면대류에서 심층외양대류로 변화하며 감소한 BW만큼 CW가 더 많이 생성되어 대체할 뿐, 심층 해수 생성을 통한 심층으로의 산소 공급은 멈추지 않고 지속되어 2040년경 BW는 완전히 사라지지만 CW와 DW로 대체되며 동해 심층이 무산소 환경으로 변하지는 않을 것이라 새롭게 전망되었다(Kang *et al.*, 2003, 2004). 그러나 동해 심층 해수의 생성 방식은 2000/2001년 겨울 심층사면대류를 통한 BW 생성이 재활성하면서 다시 변화를 겪게 된다(Fig. 4(a)) (Kim *et al.*, 2002; Senjyu *et al.*, 2002; Talley *et al.*, 2003; Tanaka, 2014; Kim *et al.*, 2022a). BW 생성이 재개되면서 동일본 분지에서 BW 용존산소의 감소율은 1977 - 1999년 기간 $0.76 \mu\text{mol/kg/yr}$ 에서 1996 - 2015년 기간 $0.38 \mu\text{mol/kg/yr}$ 로 50% 둔화되었고, 과거부터 뚜렷하게 깊어지는 경향을 보였던 BW 상부의 DW-BW 경계 수심은 최근(1995 - 2015년) 거의 일정하게 유지되고 있음이 새롭게 확인되었다(Fig. 5) (Yoon *et al.*, 2018). 따라서 선행 연구들을 통해 제시된 동해 심층의 무산소 환경 전망과 BW의 소멸(다른 심층 해수로 대체) 전망은 더 이상 유효하지 않으며, 2060년까지도 대양에 비해 높은 용존산소 농도를 유지하며 BW가 존재할 것으로 전망할 수 있다.

3. 동해 심층 순환과 자오면 순환

3.1 심층 순환

동해 북서부 대륙붕 해역과 북부 외양 해역에서 생성된 심층 해수는 일본 분지에서부터 울릉 분지, 아마토 분지를 차례대로 거쳐 다시 일본 분지로 복귀하는 경로로 심층에서 동해 전체를 반시계 방향으로 순환한다(Senjyu *et al.*, 2005; Choi and Yoon, 2010). 이론적인 지형효과에 따르면 북반구에서는 심층 해수가 수심이 얇은 해역을 오른쪽에 두고 등수심선을 따라 수송되는 특징을 보인다. 선행 연구결과들을 통해 알려진 동해의 심층 순환은 이러한 이론적인 지형효과와 일관된 특징을 보인다. 동해 전체적으로나 동해의 3개 분지 각각 내에서도 대체로 반시계 방향의 순환이 우세하기 때문이다. 일본 분지에서 생성된 심층 해수가 반시계 방향으로 순환하며 남쪽으로 수송되는 과정에서 울릉도와 독도 사이의 울릉해저간극(Ulleung Interplain Gap) 서측 수로를 통과해 울릉 분지로 유입된다(Teague *et al.*, 2005). 울릉 분지 내에서도 반시계 방향으로 순환 후 울릉해저간극 동측 수로를 통과해 울릉 분지로부터 유출되는데, 동일한 수송량이 서측 수로보다 동측 수로에서 더 좁은 폭으로 빠르게 통과한다(Chang *et al.*, 2002). 그에 따라 울릉해저간극 서측 수로의 남향류에 비해 동측 수로의 북향류는 상대적으로 폭이 더 좁고 강하며 뚜렷하게 관측되기 때문에 이 북향류를 독도심층해류(Dokdo Abyssal Current)로 명명했다(Fig. 6) (Chang *et al.*, 2009; Shin *et al.*, 2020). 울릉 분지를 빠져나온 심층 해수는 수심이 얇은 오키 해산(Oki spur)과 아마토 해령(Yamato Rise)을 오른쪽으로 두고 시계 방향으로 회전 후 다시 남쪽으로 수송되어 아마토 분지로 유입된다. 아마토 분지 내에서도 반시계 방향으로 순환 후 아마토 분지 동부의 대륙사면을 따라 북상하여 아마토 분지로부터 유출되어 일본 분

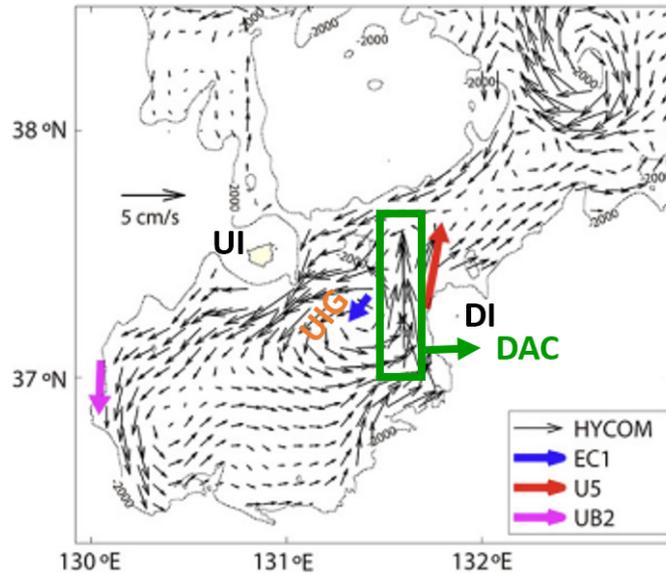


Fig. 6. Mean velocity field obtained using Hybrid Coordinate Ocean Model re-analysis data and mooring observational data collected at sites EC1, U5, and UB2 (blue, red, and purple arrows, respectively). UIG, DAC, UI, and DI denote the Ulleung Inter-plain Gap, Dokdo Abyssal Current, Ulleung Island, and Dokdo Island, respectively. Modified from Shin *et al.*(2020).

지로 유입된다(Senjyu *et al.*, 2005).

그러나 계류 관측을 통해 파악된 심층 유속의 시간 평균은 수 cm/s로서 그 시간 변동폭 수십 cm/s에 비해 작으며, 동해 심층 순환도 항상 일정하게 유지되는 것이 아니라 심층 대류를 통한 심층 해수 생성 과정 등의 변화와 함께 유의한 수준의 변화를 겪는다. 동해 심층 해수 생성 과정은 동해 북서부 대륙붕 해역과 북부 외양 해역의 표층 해수 밀도 변화에 민감한 영향을 받으므로 표층 해수 밀도 변화를 좌우하는 아래 3가지 요인들과 관련하여 심층 순환의 변동을 해석할 수 있다.

- 1) 동해 북동부 해역에서 대마난류(Tsushima Warm Current)의 재순환(recirculation)과 관련된 북서부 해역으로의 열과 염 공급(Park, 2007; Han *et al.*, 2020),
- 2) 동해 북부 해역에서 해양-대기 열 교환(냉각과 가열) 및 담수 교환(증발과 강수)(Noh *et al.*, 1999; Yoon *et al.*, 2018; Han *et al.*, 2020; Kim *et al.*, 2022a), 그리고
- 3) 타타르해협, 동해 북부 러시아 연안, 북서부 표트르 대제만 등에 형성되는 해빙과 염분방출 정도(Talley *et al.*, 2003; Yoon *et al.*, 2018)

동해를 4개의 구역으로 구분하여 단순화 한 상자 모델(Box Model)을 이용한 연구 결과는 동해로 유입되는 고온고염의 대마난류수 수송량이 증가할수록 북부 해역으로의 염분 공급이 증가함을 보였다(Park, 2007). 북부 해역으로의 고염수 수송량 증가는 냉각 및 증발에 의한 염분 증가와 함께 표층 해수 밀도 증가를 통한 심층사면대류 강화에 기여할 수 있다. 동해 북부 해역에서의 대마난류수 재순환은 해양-대기 사이의 열과 담수 교환뿐만 아니라 해상풍의 변화에 의해서도 조절되므로 상층에 크만 수송(Ekman transport) 변화도 심층 순환 변화에 영향을 미칠 수 있다. 또, 현장 관측 자료를 통해 2000/2001년 겨울철에 심층사면대류를 통한 BW 생성이 활발함을 제시한 연구 결과는 표트르 대제만의 해빙 형성 시 염분 방출로 인한 표층 해수 밀도 증가로 해석되었다(Talley *et al.*, 2003). 최근의 수치모델 연구 결과는 심층사면대류(최대 수심 2700 m 아래까지 영향을 미칠 수 있음)를 통해서만 BW가 생성될 수 있으며, 외양중층대류(수심 700 m까지 영향을 미칠 수 있음) 과정을 통해서 생

성될 수 있는 심층 해수는 CW에 해당함을 보였다(Kim *et al.*, 2022a). 따라서, 2000년대 이후 심층사면대류를 통한 BW 생성 과정의 재활성화는 동해 북부 해역의 해표면 냉각 증가, 강수량 대비 증발량의 증가, 북동부 해역에서 북풍 강화에 따른 서향의 에크만 수송량 증가, 북부 해역의 해빙 농도 감소율의 둔화 등이 복합적으로 작용한 결과로 해석할 수 있으며, 필연적으로 심층 순환의 변화를 야기했다고 볼 수 있다(Yoon *et al.*, 2018; Han *et al.*, 2020).

3.2 자오면 순환

대양과 유사한 특성으로 인해 ‘작은 대양’이라 불리는 동해의 자오면 순환(East Sea MOC, ESMOC)에 대한 연구는 비교적 최근까지도 잘 이루어지지 어려웠으나 최근 연구를 통해 2가지 형태의 ESMOC 순환 구조가 존재하는 것으로 알려졌다(Han *et al.*, 2020, 2021). 동해 심층에서 시공간적으로 제한된 관측 자료를 수집하여 심층 해수의 물리적 특성이 장기간에 걸쳐 큰 폭으로 변화함이 밝혀졌고, 여러 관측 및 모델 연구를 통해 이러한 변화가 심층 해수 생성 과정의 변화와 밀접히 관련된 것으로 해석되고 있으나, 여기에 필연적으로 동반되는 ESMOC 순환 구조의 변화에 대해서는 오랜 기간 조사되지 못하였다. 동해 중층 및 심층의 순환 구조를 현실적으로 모의하기 위한 수치모델의 모의 능력 한계점과 함께 수집된 현장 관측 자료의 시공간적인 제약이 존재하기 때문이다. 그러나 수치모의 능력의 향상과 함께 자료동화 기술의 발달로 관측 결과와 일관된 동해 심층의 순환 구조를 나타내는 재분석장 자료들이 생산되며, 최근에는 현실성이 크게 개선된 ESMOC 순환 구조가 조사되고 있다. 최근 연구 결과는 심층사면대류와 심층외양대류의 상대적인 우세 정도에 따라 BW 생성이 우세하여 수심 2000 m 이상의 깊은 대류를 통해 북부 해역에서 생성된 심층해수가 남부에서 용승하고 상층에서 북상하는 ‘단일 순환’ 셀(cell) 구조와 CW 생성이 우세하여 수심 약 1000 m를 기준으로 상부와 하부에 각각의 순환 셀 구조를 가지는 ‘이중 순환’ 형태의 2가지 ESMOC 순환 구조가 교대로 나타남을 밝혔다(Figs. 7(a), 7(b)) (Han *et al.*, 2020, 2021; Kim *et al.*, 2022a). 상부 순환 셀은 지속되거나 심층사면대류가 우세한 경우 중층의 남향 수송이 약화하고, 심층의 북향 수송은 남향으로 그 방향이 바뀌어 하부 순환 셀의 변화와 함께 ESMOC 순환 구조를 바꾼다(Figs. 1(b), 7(a), 7(b), 7(c), 7(d)). 여기서 순환 셀을 따라 흐르는 해수의 순환 주기는 대양 MOC에 비해 월등히 짧은 약 100년 내외로 추정된다(Han *et al.*, 2020, 2021). 특히 수치모델 재분석장으로부터 추정된 중층 순환과 심층 순환 주기는 각각 8.68 – 45.44년과 26.41 – 37.28년, 최대 순환 주기가 58.59년으로 조사되어(Figs. 7(c), 7(d)), 관측된 심층 해수 내 화학적 추적자들(C-14, chlorofluorocarbon, tritium)의 농도 분포로부터 추정된 기존 선행 연구의 순환 주기 약 30 – 300년(Tsunogai *et al.*, 1993; Kumamoto *et al.*, 1998; Gamo *et al.*, 2014)에 비해 더 짧을 가능성도 제기되었다(Han *et al.*, 2021). 관련된 여러 후속 연구가 진행될 필요가 있다.

심층 해수의 순환 주기와 무관하게 ESMOC 순환 구조 자체가 단일 순환과 이중 순환으로 변화하는 시간 규모는 약 10년 내외로 제시되었는데(Han *et al.*, 2020, 2021; Kim *et al.*, 2022a), 앞에서 언급한 심층 해수 생성에 영향을 미치는 요인들의 변동과도 밀접한 관련이 있다. 특히, 2000년 전후로 나타난 중층 및 심층 순환의 유의한 변화에 주목하면, 심층사면대류를 통한 BW 생성 재활성은 2000년대에 우세했던 단일 순환 형태로의 ESMOC 구조 변화를 잘 설명하며, 심층사면대류 이후 비교적 강한(유속 8 cm/s 이상) 심층 해류가 3개월 이상 유지되며 ESMOC를 강화했던 가능성을 뒷받침한다(Fig. 7(b)) (Senjyu *et al.*, 2002; Yoon *et al.*, 2018; Han *et al.*, 2020, 2021; Kim *et al.*, 2022a). 이와 대조적으로 1990년대 후반과 2010년대 초반에는 심층외양대류를 통한 CW 생성이 심층사면대류를 통한 BW 생성보다 더 우세하며 이중 순환 형태의 ESMOC 구조를 보이고(Fig. 7(a)) (Han *et al.*, 2020), 중층(수심 700 m)에서 연안을 따라 남하하는 북한한류(North Korean Cold Current; NKCC)와 심층(수심 2000 m)에서 북상하는 울릉 분지의 DAC 및 야마토 분지의 동아마토심층해류(Eastern Yamato Basin Abyssal Current; EYBAC)가 강화된 특징을 보였다(Figs. 7(e), 7(f), 7(g), 7(h)).

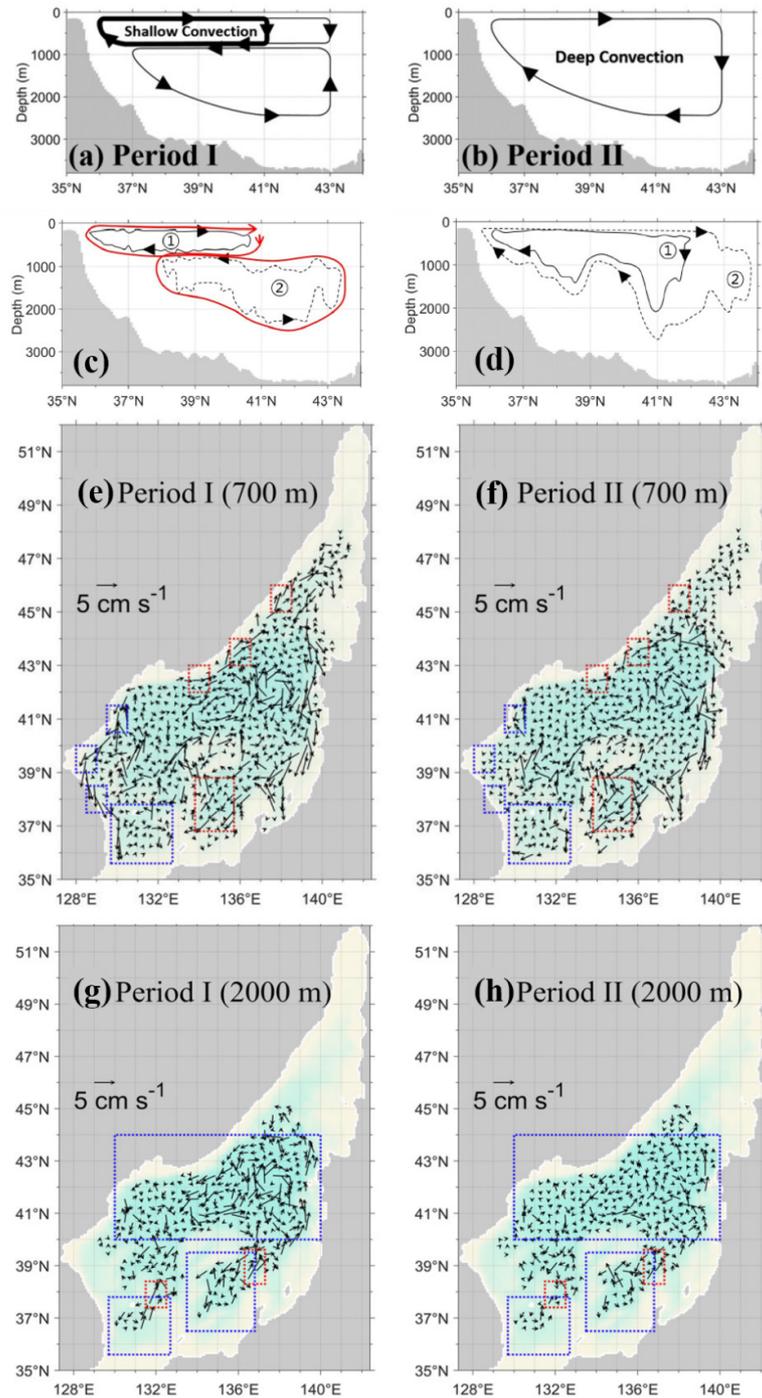


Fig. 7. Schematics of East Sea meridional overturning circulation in the (a) shallow convection period (Period I; dual cell years, late 1990s and early 2010s) and (b) deep slope convection period (Period II; single cell years, 2000s). (c) Streamlines of 0.2 Sv (①: solid line) and -0.3 Sv (②: dashed line) for the shallow convection case of the MOC stream function. Turnover times are ① 8.68 y, ② 36.76 y, and ①+② 45.44 y. (d) Streamlines of 0.3 Sv (①: solid line) and 0.13 Sv (②: dashed line) for the deep convection case of the meridional overturning stream function. Individual turnover times are ① 26.41 y and ② 37.28 y. Horizontal currents at (e, f) intermediate layer (700 m) and (g, h) deep abyssal layer (2000 m), averaged over (left) Period I and (right) Period II. In (e, f), three sequential small blue and red dotted boxes represent the boundary current regions, and large blue and red boxes are UB and YB. Blue dotted boxes represent JB, UB, and YB anticlockwise from the top, and small red boxes are deep abyssal currents such as DAC (left box) and East Yamato Basin Abyssal Current (right box) in (g, h). (a, b) and (e-h) are modified from Han *et al.*(2020), and (c, d) are modified from Han *et al.*(2021).

4. 요약 및 전망

동해 심층 해수는 북부 해역 심층사면대류 및 심층외양대류 과정을 통해 생성되며, 북부 해역의 해상풍과도 밀접히 관련된 대마난류 재순환, 해양-대기 열과 담수 교환, 해빙 형성에 따라 그 생성 과정과 분포 및 물리적 특성의 변화를 겪는다. 태평양 내에서 심층 해수 생성이 가장 활발한 반폐쇄성 해역인 동해의 심층에서는 잠재수온이 $0-1^{\circ}\text{C}$, 염분이 34.0-34.1 로 매우 균질한 해수가 발견되므로 오랜 기간 이를 일본해고유수(동해고유수)로 명명해 왔으나, 1990년대 이후 정밀하고 세밀한 수온, 염분, 용존산소 구조 측정이 가능해짐에 따라 그 내부에 심해염분최소층과 심해용존산소최소층이 존재하여 단일 해수로 구성되어 있지 않음이 밝혀졌다. 그러므로 동해 심층 해수는 심해염분최소층 상부에 위치하는 중양수(CW), 심해염분최소층 하부에 위치하여 심해용존산소최소층을 포함하며 해저면 부근의 균질층 상부에 위치하는 심층수(DW), 그리고 심해용존산소최소층 하부에 위치하여 해저면 부근의 균질층에 해당하는 저층수(BW)로 명명된, 적어도 3개 이상의 서로 다른 해수들로 구성되어 있음이 알려졌다.

이들 3가지 심층 해수(CW, DW, BW) 사이의 경계 수심은 항상 일정한 것이 아니라, 지난 수십 년 동안 그 생성 및 순환 과정에 따라 유의한 수준의 변화를 겪었는데, 전 지구적인 온난화와 함께 1928년부터 2015년까지 관측된 심층 해수의 전반적인 잠재수온은 장기적으로 증가했으며, 염분과 용존산소는 장기적으로 감소했다. 그러나 1990년대 중반에는 심층사면대류가 약화하고 심층외양대류 과정이 강화하여 BW 생성보다 CW 생성이 우세한 변화가 관측자료로부터 확인되었으며, 2000/2001년 겨울에는 다시 심층사면대류가 재활성하며 CW 생성보다 BW 생성이 우세했음이 밝혀졌다. 특히 2000년대 이후 BW 생성의 재활성화는 동해 심층 장기 용존산소 감소율의 둔화(1977-1999년 기간에 비해 1995-2015년 기간 동안 약 50% 둔화)와 과거 장기간 깊어지고 있었던 BW 상부의 DW-BW 경계 수심이 최근(1995-2015년) 거의 일정하게 유지되는 특징을 잘 설명하여, 동해 심층이 무산소 환경으로 변화하거나 BW가 다른 해수로 대체되지는 않을 것으로 새롭게 전망되었다.

동해 북부 해역에서 생성된 심층 해수는 이론적인 지형 효과로부터 예상할 수 있는 것처럼 수심이 얇은 해역을 오른쪽에 두고 등수심선을 따라 수송되며 반시계 방향으로 순환하기 때문에, 일본 분지에서부터 울릉 분지, 야마토 분지, 다시 일본 분지로 차례대로 수송된다. 그러나 이러한 반시계 방향의 심층 순환, 남북 방향의 해수 수송량, 수평적인 해수의 수렴과 발산(용승과 침강을 동반), 그리고 동해의 자오면 순환은 항상 일정한 것이 아니라 시간에 따라 크게 변화할 수 있다. 특히 2000/2001년 겨울 동해 북서부 해역에서 심층사면대류를 통한 BW 생성이 활성화된 후 반시계 방향의 심층 순환이 강화되었을 가능성이 현장 관측 연구 결과로부터 제기되었다. 1950년부터 2016년까지 관측된 심층 해수들(CW, DW, BW)의 경계 수심 변화도 1990년대에 약화되었던 심층 순환이 2000년대 이후 다시 강화되었을 가능성을 뒷받침한다. 동해 자오면 순환(ESMOC)이 1990년대 후반 이중 순환 구조에서 2000년대 단일 순환 구조로, 그리고 2010년대 초반에 다시 이중 순환 구조로 약 10년의 시간 규모를 가지고 유의한 변동을 보임이 최근 수치모델 연구 결과로부터 밝혀졌고, 심층 해수의 순환 주기는 최대 58.59년으로 화학적 추적자 등을 통해 기준에 추정된 수백 년 규모의 평균체류시간보다 짧을 가능성도 보였다. 심층사면대류의 활성-재활성은 동해 북부 해역의 대마난류 재순환에 의한 고염수 수송량, 해양-대기 열 교환(냉각-가열)과 담수 교환(증발-강수)에 따른 해표면 밀도 변화, 해빙 형성 시 염분 배출 과정의 적어도 3가지 요인에 영향을 받는 것으로 해석된다.

동해 심층 해수의 물리적 특성과 순환에 대한 선행 연구들은 동해 심층 해수를 구성하는 주요 해수들(CW, DW, BW)의 물리적 특성, 심층 순환과 자오면 순환, 그리고 이들의 시간에 따른 변화를 주로 다루었다(Table 1). 그러나 심층 해수의 물리적 특성 변화와 심층 및 자오면 순환 사이의 연계성, 대양으로부터 유입하고 대양으로 유출하는 상층 해수의 수송을 포함하는 상층 순환과의 연계성은 아직까지 상당 부분 밝혀지지 않았으며, 심화하는 기후위기 조건에서 심층 해수 수송의 경로와 강도

Table 1. Categorization of previous studies on the hydrography, deep (abyssal) circulation, and meridional overturning circulation in the East Sea (Japan Sea)

Category	Reference
Hydrography (physical properties)	Gamo <i>et al.</i> (2014)
	Kim <i>et al.</i> (1996), (2004)
	Kim and Kim(1996)
	Talley <i>et al.</i> (2006)
	Uda(1934)
Changes of physical properties	Chen <i>et al.</i> (1999)
	Cui and Senjyu(2010)
	Gamo <i>et al.</i> (1986), (2014)
	Gamo(2011)
	Jeong <i>et al.</i> (2022)
	Kang <i>et al.</i> (2003), (2004)
	Kim <i>et al.</i> (2001), (2004), (2022b)
	Kim and Kim(1996)
	Kwon <i>et al.</i> (2004)
Minami <i>et al.</i> (1999)	
Yoon <i>et al.</i> (2018)	
Deep (abyssal) circulation	Chang <i>et al.</i> (2002), (2004), (2009)
	Cui and Senjyu(2012)
	Gamo <i>et al.</i> (2014)
	Kim <i>et al.</i> (2002), (2022a)
	Min and Warner(2005)
	Noh <i>et al.</i> (1999)
	Postlethwaite <i>et al.</i> (2005)
	Senjyu <i>et al.</i> (2005)
	Talley <i>et al.</i> (2003), (2006)
	Tanaka(2014)
	Teague <i>et al.</i> (2005)
Yoon <i>et al.</i> (2018)	
Meridional Overturning Circulation	Gamo <i>et al.</i> (2001)
	Han <i>et al.</i> (2020), (2021)
	Kang <i>et al.</i> (2003), (2004)
	Park(2007)
	Senjyu <i>et al.</i> (2002)

변화를 지배하는 상층 및 중층 순환과 해양-대기 상호작용 과정들에 대한 여러 후속 연구들이 요구된다. 향후 우선적으로 요구되는 후속 연구를 다음과 같이 제시하고자 한다.

- 1) 동해 북부 해역의 대류 과정(심층사면대류 vs 심층외양대류) 발생 조건과 해양-대기 상호작용 변동성
- 2) 대류 과정에 따른 심층 순환과 상층 및 중층 순환의 연계성
- 3) 동해 북부 해역의 대류 과정 변동에 따른 (a) 수층별(상층, 중층, 심층) 순환 강도와 경로 변동성, (b) 심층 해수(CW, DW, BW)의 물리적 특성과 분포 특성의 분지별(JB, UB, YB) 변동성, (c) 자오면 순환(ESMOC)의 구조와 강도 변동성
- 4) 동해 심층 순환과 자오면 순환 변동이 생지화학적 순환과 생태계에 미치는 영향

지속적인 전 지구적 온난화와 대양의 심층 해수 생성 조건 및 전 지구적 자오면 순환(MOC)의 변화와 유사하게 동해의 심층 해수 생성 조건 및 자오면 순환(ESMOC)도 여러 요인에 의해 지속적인 변화를 겪을 것으로 전망된다. 특히, 2000/20001년 겨울 심층사면대류에 따른 심층 해수 생성의 재활성과 심층 순환 강화는 향후 충분히 다시 발생할 가능성이 있다. 첫째, 해양-대기 열 교환(가열vs냉각) 관점에서 동해 북부 해역의 러시아 블라디보스토크 겨울철 기온의 최근(1870-2000년) 증가 추세(Kim *et al.*, 2002; Talley *et al.*, 2003)와 해표면 수온의 최근(1982-2018) 증가 추세(Lee and Park, 2019), 그리고 해상풍과 해표면 열속(heat flux) 장기 변화를 통해 동해 북부 해역의 대류 과정 발생 조건과 해양-대기 상호작용이 어떻게 변동할지를 조사할 필요가 있겠다. 또, 중요한 대류 과정 발생 조건인 해표면 밀도는 해표면 수온뿐만 아니라 해표면 염분에도 민감하게 좌우되므로 해양-대기 담수 교환(증발vs강수) 관점에서 1990/2010년대보다 1980/2000년대에 강수 대비 더 활발한 증발을 통해 해표면 밀도를 증가시키는 변동성(Yoon *et al.*, 2018)이 10년의 시간 규모로 지속적인 변동을 보일지 여부 역시 중요한 조사 대상이 되어야 하겠다. 둘째, 타타르해협에서 겨울철 해빙 생성은 온난화와 함께 1980-2015년 기간 동안 줄곧 감소했고 그에 따른 염분 방출은 제한될 가능성이 높으나, 타타르해협에서의 해빙 생성에도 뚜렷한 변동을 보여 1980-1995년 기간에 비해 1995-2015년 기간에 더 활발히 해빙 생성이 이루어졌으므로(Yoon *et al.*, 2018) 해빙 변동에 의한 해표면 염분 변화가 대류 과정 발생 조건에 얼마나 주요한 영향을 미치게 될 것인지에 대한 연구가 필요하다. 셋째, 동해로 유입하는 대마난류 수송량의 증가와 함께 대마난류 재순환을 통한 북부 해역으로의 염분 공급 또한 심층사면대류 발생 해역의 해표면 염분 조건을 결정하는 중요한 요소로 작용할 수 있어(Park, 2007), 이에 대한 후속 연구도 이루어질 필요가 있다.

향후 동해 자오면 순환의 지속적인 변화에 동반되어 동해 심층 해수의 물리적 특성 또한 지속적인 변화를 겪을 것으로 전망할 수 있는데, 특히 현재의 추세가 지속된다면 해표면 수온과 심층 해수의 잠재수온은 전반적으로 증가하고(Yoon *et al.*, 2018; Lee and Park, 2019), 염분과 용존산소 농도는 감소할 것을 예상할 수 있다(Dickson *et al.*, 2002; Kwon *et al.*, 2004). 심층 해수의 전반적인 용존산소 농도는 BW 생성과 심층으로의 산소 공급이 제한되면서 유광층에서 생산된 유기물질의 침강에 따른 분해 과정으로 인해 지속 감소할 것으로 전망되지만(Kim *et al.*, 2022b), 2000/2001년 겨울과 같이 심층사면대류가 재활성하면, 심층 해수의 용존산소 농도 감소 추세는 다시 둔화하거나 오히려 증가할 수도 있다. 이처럼 심층 해수의 물리적 특성 미래 변화 방향을 전망하기 어려운 가장 큰 요인은 동해 북부 해역의 대류 과정 발생 조건과 해양-대기 상호작용 변동성에 대한 불확실성이므로 위 1) 주제의 후속 연구가 보다 우선적으로 요구된다고 할 수 있다. 대류 과정에 따른 미래 심층 해수의 생성 변화를 전망할 수 있게 되면 심층 순환과 자오면 순환의 변화가 동반될 것이며 위 2), 3) 주제들의 후속 연구를 통해 조사가 이루어질 수 있다. 마지막으로 동해의 심층 순환과 자오면 순환 변동은 필연적으로 생지화학적 순환과 생태계 변화로 이어지기 때문에 위 4) 주제의 후속 연구를 통해 그 파급 효과를 이해할 필요가 있다.

이러한 후속 연구들을 진행하기 위해서는 새로운 현장 관측 자료와 원격탐사 자료의 수집은 물론 다양한 수치모델 실험도 요구된다. 동해 북부 해역에서 대류 과정 발생 해역의 물리적 특성과 발생 조건에 대한 지속적인 자료 수집이 필요하며, 심층 순환의 주요 경로에서 심층 해류와 심층 해수(CW, DW, BW)의 부피, 열, 염 수송량을 추정할 수 있는 자료도 수집할 필요가 있다. 특히 3개 분지를 연결하는 주요 길목(예: 울릉해저간극)에서 집중적인 현장 관측 자료 수집 노력이 중요하다. 시공간적으로 제한된 현장 관측 자료의 한계를 극복하기 위한 다양한 원격탐사 자료의 수집과 기법 개발은 물론, 동해 북부 대류 과정 발생 해역을 포함하는 주요 영역을 대상으로 하는 다양한 수치모델과 대류 과정의 난류 모수화 개선(Kim *et al.*, 2022a) 및 해빙 접합 모델의 개발 필요성(Park *et al.*, 2006)도 제기된다. 현장 관측, 원격탐사 관측, 수치모델이 가지는 한계를 극복하기 위한 다양한 인공지능 분석 방법의 적극적인 활용 또한 후속 연구에서는 충분히 고려할 필요가 있다.

사 사

이 논문은 2022년 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(동해 심층해수 및 물질 순환 기작 규명) (20160040).

참고문헌(References)

- Belkin, I.M., 2009. Rapid warming of large marine ecosystems. *Prog. Oceanogr.*, **81**(1-4): 207-213.
- Bryden, H.L., H.R. Longworth and S.A. Cunningham, 2005. Slowing of the Atlantic meridional overturning circulation at 25°N. *Nature*, **438**(7068): 655-657.
- Chang, K.I., K. Kim, Y.B. Kim, W.J. Teague, J.C. Lee and J.H. Lee, 2009. Deep flow and transport through the Ulleung Interplain Gap in the southwestern East/Japan Sea. *Deep Sea Res. Part I Oceanogr. Res. Pap.*, **56**(1): 61-72.
- Chang, K.I., N.G. Hogg, M.S. Suk, S.K. Byun, Y.G. Kim and K. Kim, 2002. Mean flow and variability in the southwestern East Sea. *Deep Sea Res. Part I Oceanogr. Res. Pap.*, **49**(12): 2261-2279.
- Chang, K.I., W.J. Teague, S.J. Lyu, H.T. Perkins, D.K. Lee, D.R. Watts, Y.B. Kim, D.A. Mitchell, C.M. Lee and K. Kim, 2004. Circulation and currents in the southwestern East/Japan Sea: Overview and review. *Prog. Oceanogr.*, **61**(2-4): 105-156.
- Chen, C.T.A., A.S. Bychkov, S.L. Wang and G.Y. Pavlova, 1999. An anoxic Sea of Japan by the year 2200?. *Mar. Chem.*, **67**(3-4): 249-265.
- Choi, Y.J. and J.H. Yoon, 2010. Structure and seasonal variability of the deep mean circulation of the East Sea (Sea of Japan). *J. Oceanogr.*, **66**(3): 349-361.
- Clayson, C.A. and M. Luneva, 2004. Deep convection in the Japan (East) Sea: A modeling perspective. *Geophys. Res. Lett.*, **31**(17).
- Cui, Y. and T. Senjyu, 2010. Interdecadal oscillations in the Japan Sea proper water related to the arctic oscillation. *J. Oceanogr.*, **66**(3): 337-348.
- Cui, Y. and T. Senjyu, 2012. Has the upper portion of the Japan Sea Proper Water formation really been enhancing?. *J. Oceanogr.*, **68**(4): 593-598.
- Dickson, B., I. Yashayaev, J. Meincke, B. Turrell, S. Dye and J. Holfort, 2002. Rapid freshening of the deep North Atlantic Ocean over the past four decades. *Nature*, **416**(6883): 832-837.
- Gamo, T. and Y. Horibe, 1983. Abyssal circulation in the Japan Sea. *J. Oceanogr. Soc. Jpn.*, **39**(5): 220-230.
- Gamo, T., 1999. Global warming may have slowed down the deep conveyor belt of a marginal sea of the northwestern Pacific: Japan Sea. *Geophys. Res. Lett.*, **26**(20): 3137-3140.
- Gamo, T., 2011. Dissolved oxygen in the bottom water of the Sea of Japan as a sensitive alarm for global climate change. *Trends Analyt Chem*, **30**(8): 1308-1319.
- Gamo, T., N. Momoshima and S. Tolmarchyov, 2001. Recent upward shift of the deep convection system in the Japan Sea, as inferred from the geochemical tracers tritium, oxygen, and nutrients. *Geophys. Res. Lett.*, **28**(21): 4143-4146.
- Gamo, T., N. Nakayama, N. Takahata, Y. Sano, J. Zhang, E. Yamazaki, S. Taniyasu and N. Yamashita, 2014. The Sea of Japan and its unique chemistry revealed by time-series observations over the last 30 years. *Monogr Environ Earth Planets*, **2**(1): 1-22.
- Gamo, T., Y. Nozaki, H. Sakai, T. Nakai and T. Tsubota, 1986. Spacial and temporal variations of water characteristics in the Japan Sea bottom water. *J. Mar. Res.*, **44**(4): 781-793.
- Han, M., Y.K. Cho, H.W. Kang and S. Nam, 2020. Decadal changes in meridional overturning circulation in the East Sea (Sea of Japan). *J. Phys. Oceanogr.*, **50**(6): 1773-1791.

- Han, M., Y.S. Chang, H.W. Kang, D.J. Kang and Y.S. Kim, 2021. Turnover time of the East Sea (Sea of Japan) meridional overturning circulation. *Front. Mar. Sci.*, **8**.
- Jamet, Q., W.K. Dewar, N. Wienders, B. Deremble, S. Close and T. Penduff, 2020. Locally and remotely forced subtropical AMOC variability: a matter of time scales. *J. Clim.*, **33**(12): 5155-5172.
- Jeong, Y., S. Nam, J.I. Kwon, U. Uppara and Y.H. Jo, 2022. Surface Warming Slowdown with Continued Subsurface Warming in the East Sea (Japan Sea) over Recent Decades (2000-2014). *Front. Mar. Sci.*, **173**.
- Kang, D.J., J.Y. Kim, T. Lee and K.R. Kim, 2004. Will the East/Japan Sea become an anoxic sea in the next century?. *Mar. Chem.*, **91**(1-4): 77-84.
- Kang, D.J., S. Park, Y.G. Kim, K. Kim and K.R. Kim, 2003. A moving-boundary box model (MBBM) for oceans in change: An application to the East/Japan Sea. *Geophys. Res. Lett.*, **30**(6).
- Kim, B.-G., Y.-K. Cho and Y. Noh, 2022a. Deep convection along the continental slope in the East/Japan Sea: A large-eddy simulation study. *Front. Mar. Sci.*, **9**:824256.
- Kim, H., N. Hirose and K. Takayama, 2022b. Physical and Biological Factors Underlying Long-Term Decline of Dissolved Oxygen Concentration in the East/Japan Sea. *Front. Mar. Sci.*, **9**: 851598.
- Kim, K., K.R. Kim, D.H. Min, Y. Volkov, J.H. Yoon and M. Takematsu, 2001. Warming and structural changes in the East (Japan) Sea: a clue to future changes in global oceans?. *Geophys. Res. Lett.*, **28**(17): 3293-3296.
- Kim, K., K.R. Kim, Y.G. Kim, Y.K. Cho, D.J. Kang, M. Takematsu and Y. Volkov, 2004. Water masses and decadal variability in the East Sea (Sea of Japan). *Prog. Oceanogr.*, **61**(2-4): 157-174.
- Kim, K., K.R. Kim, Y.G. Kim, Y.K. Cho, J.Y. Chung, B.H. Choi, S.K. Byun, G.H. Hong, M. Takematsu, J.H. Yoon, Y. Volkov and M. Danchenkov, 1996. New findings from CREAMS observations: Water masses and eddies in the East Sea. *J. Korean Soc. Oceanogr.*, **31**(4): 155-163.
- Kim, K.R. and K. Kim, 1996. What is happening in the East Sea (Japan Sea)?: Recent chemical observations during CREAMS 93-96. *J. Korean Soc. Oceanogr.*, **31**(4): 164-172.
- Kim, K.R., G. Kim, K. Kim, V. Lobanov, V. Ponomarev and A. Salyuk, 2002. A sudden bottom-water formation during the severe winter 2000-2001: The case of the East/Japan Sea. *Geophys. Res. Lett.*, **29**(8): 75-1 – 75-4.
- Kim, Y.-B. and G.-T. Yi, 2017. Historical background and its scientific meaning of the Japanese hydrographic survey of the East Sea in 1932. *J. Fis. Mar. Sci. Edu.*, **29**(5): 1373-1383.
- Kosugi, N., N. Hirose, T. Toyoda and M. Ishii, 2021. Rapid freshening of Japan Sea Intermediate Water in the 2010s. *J. Oceanogr.*, **77**(2): 269-281.
- Kumamoto, Y.I., M. Yoneda, Y. Shibata, H. Kume, A. Tanaka, T. Uehiro and K. Shitashima, 1998. Direct observation of the rapid turnover of the Japan Sea bottom water by means of AMS radiocarbon measurement. *Geophys. Res. Lett.*, **25**(5): 651-654.
- Kwon, Y.O., K. Kim, Y.G. Kim and K.R. Kim, 2004. Diagnosing long-term trends of the water mass properties in the East Sea (Sea of Japan). *Geophys. Res. Lett.*, **31**(20).
- Lee, E.Y. and K.A. Park, 2019. Change in the recent warming trend of sea surface temperature in the East Sea (Sea of Japan) over decades (1982 – 2018). *Remote Sens.*, **11**(22): 2613.
- Levin, L.A. and N. Le Bris, 2015. The deep ocean under climate change. *Science*, **350**(6262): 766-768.
- Lindsey, R. and L. Dahlman, 2020. Climate Change: Ocean Heat Content. *Climate. gov*, August, **17**.
- Marshall, J. and F. Schott, 1999. Open-ocean convection: Observations, theory, and models. *Rev. Geophys.*, **37**(1): 1-64.
- Min, D.H. and M.J. Warner, 2005. Basin-wide circulation and ventilation study in the East Sea (Sea of Japan) using chlorofluorocarbon tracers. *Deep Sea Res. Part II Top. Stud. Oceanogr.*, **52**(11-13): 1580-1616.
- Minami, H., Y. Kano and K. Ogawa, 1999. Long-term variations of potential temperature and dissolved oxygen of the Japan Sea Proper Water. *J. Oceanogr.*, **55**(2): 197-205.

- Mooers, C.N., H. Kang, I. Bang and D.P. Snowden, 2006. JES CIRCULATION. *Oceanography.*, **19**(3): 86.
- Na, T., J. Hwang, S.Y. Kim, S. Jeong, T. Rho and T. Lee, 2022. Large increase in dissolved organic carbon in the East Sea (Japan Sea) from 1999 to 2019. *Front. Mar. Sci.*, **108**. ADD Page number.
- Nitani, H., 1972. On the deep and bottom waters in the Japan Sea, in *Research in Hydrography and Oceanography*, edited by D. Shoji, pp. 151 – 201, Hydrogr. Dep. of Jpn. Mar. Safety Agency, Tokyo.
- Noh, Y., C.J. Jang and J.W. Kim, 1999. Large eddy simulation of open ocean deep convection with application to the deep water formation in the East Sea (Japan Sea). *J. Oceanogr.*, **55**(2): 347-367.
- Pai, S.C., G.C. Gong and K.K. Liu, 1993. Determination of dissolved oxygen in seawater by direct spectrophotometry of total iodine. *Mar. Chem.*, **41**(4): 343-351.
- Park, K.A., K. Kim, P.C. Cornillon and J.Y. Chung, 2006. Relationship between satellite-observed cold water along the Primorye coast and sea ice in the East Sea (the Sea of Japan). *Geophys. Res. Lett.*, **33**(10).
- Park, Y.G., 2007. The effects of Tsushima Warm Current on the interdecadal variability of the East/Japan Sea thermohaline circulation. *Geophys. Res. Lett.*, **34**(6).
- Postlethwaite, C.F., E.J. Rohling, W.J. Jenkins and C.F. Walker, 2005. A tracer study of ventilation in the Japan/East Sea. *Deep Sea Res. Part II Top. Stud. Oceanogr.*, **52**(11-13): 1684-1704.
- Send, U., M. Lankhorst and T. Kanzow, 2011. Observation of decadal change in the Atlantic meridional overturning circulation using 10 years of continuous transport data. *Geophys. Res. Lett.*, **38**(24).
- Senjyu, T. and H. Sudo, 1993. Water characteristics and circulation of the upper portion of the Japan Sea Proper Water. *J. Mar. Syst.*, **4**(4): 349-362.
- Senjyu, T. and H. Sudo, 1994. The upper portion of the Japan Sea Proper Water; its source and circulation as deduced from isopycnal analysis. *J. Oceanogr.*, **50**(6): 663-690.
- Senjyu, T., 2022. Changes in Mid-Depth Water Mass Ventilation in the Japan Sea Deduced From Long-Term Spatiotemporal Variations of Warming Trends. *Front. Mar. Sci.*
- Senjyu, T., H.R. Shin, J.H. Yoon, Z. Nagano, H.S. An, S.K. Byun and C.K. Lee, 2005. Deep flow field in the Japan/East Sea as deduced from direct current measurements. *Deep Sea Res. Part II Top. Stud. Oceanogr.*, **52**(11-13): 1726-1741.
- Senjyu, T., T. Aramaki, S. Otsuka, O. Togawa, M. Danchenkov, E. Karasev and Y. Volkov, 2002. Renewal of the bottom water after the winter 2000-2001 may spin-up the thermohaline circulation in the Japan Sea. *Geophys. Res. Lett.*, **29**(7): 53-1 – 53-3.
- Shin, J., S. Noh and S. Nam, 2020. Intraseasonal abyssal current variability of bottom-trapped topographic Rossby waves in the Southwestern East Sea (Japan Sea). *Front. Mar. Sci.*, **7**: 579680.
- Srokosz, M., M. Baringer, H. Bryden, S. Cunningham, T. Delworth, S. Lozier, J. Marotzke and R. Sutton, 2012. Past, present, and future changes in the Atlantic meridional overturning circulation. *Bull Am Meteorol Soc*, **93**(11): 1663-1676.
- Stouffer, R.J., J. Yin, J.M. Gregory, K.W. Dixon, M.J. Spelman, W. Hurlin, A.J. Weaver, M. Eby, G.M. Flato, H. Hasumi, A. Hu, J.H. Jungclaus, I.V. Kamenkovich, A. Levermann, M. Montoya, S. Murakami, S. Nawrath, A. Oka, W.R. Peltier, D.Y. Robitaille, A. Sokolov, G. Vettoretti and S.L. Weber, 2006. Investigating the causes of the response of the thermohaline circulation to past and future climate changes. *J. Clim.*, **19**(8): 1365-1387.
- Sudo, H., 1986. A note on the Japan Sea proper water. *Prog. Oceanogr.*, **17**(3-4): 313-336.
- Talley, L., D.H. Min, V. Lobanov, V. Luchin, V. Ponomarev, A. Salyuk, A. Shcherbina, P. Tishchenko and I. Zhabin, 2006. Japan/East Sea water masses and their relation to the sea's circulation. *Oceanography.*, **19**(3): 32-49.
- Talley, L.D., V. Lobanov, V. Ponomarev, A. Salyuk, P. Tishchenko, I. Zhabin and S. Riser, 2003. Deep convection and brine rejection in the Japan Sea. *Geophys. Res. Lett.*, **30**(4).
- Tanaka, K., 2014. Formation of bottom water and its variability in the northwestern part of the Sea of Japan. *J. Geophys. Res. Oceans*, **119**(3): 2081-2094.

- Teague, W.J., K.L. Tracey, D.R. Watts, J.W. Book, K.I. Chang, P.J. Hogan, D.A. Mitchell, M.S. Suk, M. Wimbush and J.H. Yoon, 2005. Observed deep circulation in the Ulleung Basin. *Deep Sea Res. Part II Top. Stud. Oceanogr.*, **52**(11-13): 1802-1826.
- Tsunogai, S., Y.W. Watanabe, K. Harada, S. Watanabe, S. Saito and M. Nakajima, 1993. Dynamics of the Japan Sea deep water studied with chemical and radiochemical tracers. In *Elsevier oceanography series*, Vol. 59, Elsevier, pp. 105-119.
- Uda, M., 1934. The results of simultaneous oceanographic investigations in the Japan Sea and its adjacent waters in May and June, 1932. *J. Imp. Fish. Exp. Stn.*, **5**: 57-190.
- Worthington, E.L., B.I. Moat, D.A. Smeed, J.V. Mecking, R. Marsh and G.D. McCarthy, 2021. A 30-year reconstruction of the Atlantic meridional overturning circulation shows no decline. *Ocean Sci.*, **17**(1): 285-299.
- Yoon, S.T., K.I. Chang, S. Nam, T. Rho, D.J. Kang, T. Lee, K.A. Park, V. Lobanov, D. Kaplunenko, P. Tishchenko and K.R. Kim, 2018. Re-initiation of bottom water formation in the East Sea (Japan Sea) in a warming world. *Sci. Rep.*, **8**(1): 1-10.
- Yoshikawa, Y., T. Awaji and K. Akitomo, 1999. Formation and circulation processes of intermediate water in the Japan Sea. *J. Phys. Oceanogr.*, **29**(8): 1701-1722.