



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

석사학위논문

동해 북서부 중규모 순환 분석:
동해 중층수와의 연관성

제주대학교 대학원

지구해양과학과

조 형 준

2020 년 8 월

동해 북서부 중규모 순환 분석: 동해 중층수와의 연관성
조형준
2020

동해 북서부 중규모 순환 분석: 동해 중층수와의 연관성

지도교수 문재홍

조형준

이 논문을 이학 석사학위 논문으로 신청함

2020 년 6 월

조형준의 이학 석사학위 논문을 인준함

심사위원장

송 상 근



위 원

문 재 홍



위 원

김 태 균



제주대학교 대학원

2020 년 6 월



An Investigation of Mesoscale variation in the
Northwestern part of the East Sea: Possible Linkage to
the East Sea Intermediate Water

Hyeong-Jun Jo

(Supervised by professor Jae-Hong Moon)

A thesis submitted in partial fulfillment of the requirement for the degree of Master of
Science

June 2020

This thesis has been examined and approved.

.....
Thesis director, Sang-Keun Song, Prof. of Earth Marine Sciences

.....
Jae-Hong Moon, Prof. of Earth Marine Sciences

.....
Taekyun Kim, Dr. of Earth Marine Sciences

Date 2020. 6.

Department of Earth and Marine Sciences
GRADUATE SCHOOL
JEJU NATIONAL UNIVERSITY

목 차

목차	i
List of Figures	ii
Abstract	iii
1. 서론	1
2. 자료 및 방법	7
3. 결과	11
3.1 동해 북부 중규모 구조의 특성	11
3.1 중규모 구조의 형성 요인	20
3.3 동해 중규모 구조와 동해중층수와의 연관성	29
4. 토의	36
5. 요약 및 결론	38
참고문헌	41

List of Figure

Figure 1. Bottom topography of the ES. KTS: Korea/Tsushima Strait, TS: Tsugaru Strait, SS: Soya Strait, TTS: Tatar Strait. Shaded area is research area in this study	5
Figure 2. Schematics of surface circulation of East Sea adopted (Park et al., 2013). (red line: warm current, blue line: cold current, grey line: deep current)	6
Figure 3. First EOF mode of the SSH variability over the Northern EJS: (a) spatial structure of the mode 1, (b) temporal variation of the mode 1, and (c) time series of climatological monthly mean temporal distribution of the mode 1(after Kim and Yoon, 2010)	14
Figure 4. First EOF mode of the SSH variability over the Northern EJS: (a) spatial structure of the mode 1(remove mode1), (b) time series of climatological monthly mean temporal distribution of the mode 1(remove mode1)	15
Figure 5. Tracks of surface ARGOS floats deployed off Vladivostok on July 16, 1994 during CREAMS'93, 94 summer cruises. The blue line indicates the anti-cyclonic current, the red line indicates the cyclonic current(after Yoon et al., 2005)	16
Figure 6. Sea Surface Temperature distributions from HYCOM reanalysis during October to January averaged from 1993 to 2017	17
Figure 7. Seasonal SST front ($^{\circ}\text{C}/\text{km}$) maps for 1990-1995 (winter: Dec.-Feb., spring: Mar.-May., summer: Jun.-Aug., and autumn: Sep.-Nov.) (after Park et al., 2004)	18
Figure 8. Histogram of times of the maximum fronts in the frontal zones: (a) the SPF, (b) the NWSPF, and (c) off the east cost of Korea (after Park et al., 2004) ..	19
Figure 9. Time series of wind stress curl integrated over the Northern East Sea (after Kim and Yoon, 2010)	23
Figure 10. Wind-stress curls distributions from CCMP wind data during September to	

February averaged from 1993 to 2017. The blue areas represent negative values, and red areas represent positive values	24
Figure 11. Same as Figure 10 except from March to August	25
Figure 12. Temperature and Salinity distributions at depth 20m from HYCOM reanalysis during October to January averaged from 1993 to 2017	26
Figure 13. Sea surface current distributions from HYCOM reanalysis during October to December averaged from 1993 to 2017	27
Figure 14. Sea current distributions at 50m depth from HYCOM reanalysis during October to December averaged from 1993 to 2017	28
Figure 15. East Sea Intermediate Water thickness distributions from HYCOM reanalysis during September to February averaged from 1993 to 2017	32
Figure 16. Same as Figure 15 except for 1°C isotherm depth	33
Figure 17. Vertical section for 1°C(solid line) and 5°C(dash line) isotherm depth at latitude 41.04(upper), 41.52(lower)	34
Figure 18. Time series of mean sea surface height and isotherm(1°C) depth over the Northern East Sea	35

Abstract

The spatiotemporal variability in the northern part of the East Sea(ES) and its mechanism are investigated using empirical orthogonal function (EOF) analysis of sea surface height (SSH) measured by satellite altimetry during the 1993-2017, meteorological and oceanic reanalysis data. The results show that there is a noticeable mesoscale variability in the northwestern region of the ES during wintertime as well as the prevailing semiannual variation in the cyclonic gyre in the northern ES. The variability of the mesoscale aspects which appears form of a dipole structure shows a maximum from October to December and small values in warm period with a minimum in August. The timing of the development and spatial structure of the EOF mode correspond well to the mesoscale structures observed by Argos drift buoys which appear in the northwestern region of the ES, such as anticyclonic eddies accompanied by the northward coastal current reversal and the northwestern thermal front(NWTF). Some of these mesoscale aspects are closely related to atmospheric submesoscale disturbance south of Vladivostok. The wind forcing is dominant on the shelf areas of the northwestern region of the ES where the dipole of wind stress curl exists during wintertime. The NWTF is accompanied by a cold anomaly in the eastern side and a weak warm anomaly in the western side. NWTF is consistent with the NWSPF mentioned in Park et al. (2004). The cold and warm anomalies are generated by the dipole wind stress curl structure; the cold anomaly may be generated by the Ekman divergence due to the positive wind-stress curl, while a warm anomaly appears below the negative wind stress curl in the process of the downwelling imposed by the anticyclonic vortex off Vladivostok. And anticyclonic eddies accompanied by northward coastal current reversal are generated by negative wind stress curl. Also, strong wind-driven Ekman convergence plays an important role in thickening the East Sea intermediate water(ESIW).

1. 서론

동해는 북서태평양에 위치한 반 폐쇄적인 연해로서 비록 크기는 대양에 비해 아주 작지만 평균 수심이 1,500m, 최대 수심이 4,000m 이상에 달하며, 표층 해류 순환 및 물리해양학적 열염분 순환 체계와 해양학적 특성이 대양과 유사하게 나타나고 있어 ‘작은 대양(Miniature Ocean)’이라고 불리고 있다 (Ichiye, 1984; Kim et al., 2001; Part et al., 2013; Yoon et al., 2016). Figure 1에서 볼 수 있듯이 동해는 인접한 바다와 연결된 4개의 얇은 해협을 통해 물 교환이 이루어진다 (Kawabe et al., 1982). 쓰시마 해협(Korea/Tsushima Strait, KTS)을 통해 동중국해와 연결되어 있으며, 쓰가루 해협(Tsugaru Strait, TS)은 태평양과 연결되어 있다. 또한, 소야(Soya Strait, SS) 및 타타르 해협(TaTar Strait, TTS)을 통해 오호츠크 해와 맞닿아 있다. 동해에서 나타나는 주요 해류로는 대마 난류(Tsushima Warm Current, TWC), 동한 난류(East Korean Warm Current, EKWC), 리만 한류(Liman Cold Current, LCC) 그리고 북한 한류(North Korean Cold Current, NKCC)가 있으며, Figure 2에 도식화한대로 동해 남부에서는 난류가 지배적으로 나타나고, 동해 북부에서는 한류가 지배적으로 나타나는 순환 구조의 특성을 가진다. 지난 수십 년간 이러한 해류들을 기반으로 선행 연구에서 동해에서의 순환 및 물리적으로 나타나는 특성에 대해 보고한 바 있다(kim and Yoon, 2010). 하지만 대부분의 선행 연구에서는 관측 자료가 풍부한 동해 남부 해역에 대한 연구가 집중되었다. 이는 동해 북부에서 지속적으로 관측된 장기간의 자료가 거의 없기 때문에 상층 순환의 시공간적 변동성을 분석하기에는 어려움이 있었다. 그럼에도 불구하고 Yoon et al.(2005)에서는 동해 북부에서 저기압성 형태로 나타나는 대규모 순환과 쌍극자 형태로 나타나는 중규모 순환의 존재에 대해 보고한 바 있다. 이후 몇몇의 연구자들은 동해 북부에서 우세하게 나타나는 저기압성 대규모 순환 이외에 현장 관측 자료를 활용하여 동해 북부에서의 중규모 특성에 대해 보고한 바 있다 (Danchenkov et al., 2003a; Yoon et al., 2005; Trusenkova et al., 2009; Yoon and Kim, 2009). 다만, 선행 연구에서는 동해 북부에서의 중규모 현상에 대해 다루고

분석하긴 했지만, 중규모 측면에서 시공간적 변동에 대해서는 장기적인 관점에서 분석하지는 못했다. 이는 동해 북부에서의 현장 관측 자료가 많이 부족하였고, 그나마 존재하는 자료들도 수개월 정도만 수집된 단기 관측 자료로 한정되었기 때문이다. 이러한 이유로 동해 북부 중규모 순환의 장기적 시공간적 변동성에 대한 연구는 현재까지 거의 수행되지 않았다.

하지만 지난 수십 년간 위성 관측이 활발해지고 지속적으로 운영되면서 전지구 해양 표층 변화를 감시하는 데 상당한 진전이 있었다. 이를 통해 장기간의 자료를 활용하여 동해 북부 상층 순환의 계절 변화 및 경년 변동성을 분석할 수 있게 되었다. 최근 Kim and Yoon (2010)은 10년간 위성 고도계로 관측된 해수면 고도 (Sea Surface Height, SSH)의 경험직교함수 (Empirical Orthogonal Function, EOF) 분석과 수치 실험을 통해 동해 북부에서 나타나는 상층 순환의 변동을 분석한 결과, 여름철과 겨울철에 2번의 최댓값을 보이는 반년 주기의 변동을 하는 저기압성 대규모 순환의 존재를 발견했다. 이와는 대조적으로 동해 북부에서의 중규모 순환 측면의 시공간적 변동에 관한 연구는 부족했고, 따라서 중규모 현상에 대한 메커니즘을 이해하기에는 한계가 있었다. 특히, 앞서 설명한대로 중규모 현상의 장기적 변동에 대한 선행 연구는 관측 자료의 부재로 인해 부족한 실정이었으나, 최근에 장기간의 자료가 생산됨에 따라 이를 활용하여 중규모 현상의 메커니즘을 이해하고 어떠한 변동 특성을 갖는지에 대한 연구가 가능해졌으며, 대규모 순환과 다른 특성을 보이는 중규모 순환에 대한 연구가 필요하다고 생각된다.

해양에서의 중규모 변동에 있어서 대기 강제력은 중요한 요소가 될 수 있다 (Orlanski and Polinsky, 1983). 특히 찬 공기 발생 (cold air-outbreak) 및 열대 저기압과 같은 대기 요란은 해양 중규모 특성에 상당한 영향을 미친다 (Kim et al., 2017). Yoon et al. (2005)의 선행 연구의 예를 들면, 동해 북부 해역 중규모 특성과 블라디보스토크 남부에서의 준-중규모 대기 요란과 밀접한 관련이 있다고 보고하였다. 또한, 해양 중규모 순환이 나타나는 해역의 해수면 온도 (Sea Surface Temperature, SST) 아노말리에 의해 유도되는 열역학적 과정을 통해 대기에 영향을 미친다(Wallace et al., 1989; Minobe et al., 2008). 이런 이유로 최근에는 해양의 중규모 순환 특성과 관련된 대기-해양 상호작용의 중요성이 상당히 증가되었고, 관심이 높아지고 있다. 이와 관련하여 최근 연구에서는 이러한 대기-해양 상호작용

의 영향을 받는다고 알려진 동해중층수(East Sea Intermediate Water, ESIW) 두께의 공간 분포와 상층 바람 회전장(Wind Stress Curl)의 공간 분포와 유사한 분포를 보이면서 상층 바람이 동해중층수 형성 및 특성을 결정하는 데 기여한다고 보고한 바 있다(Park and Lim, 2018). 동해중층수는 해양 상층으로 불어오는 바람에 의해 생성되는 바람 회전장의 영향을 받아 나타나는 해수면 변화와 밀접한 관계를 가지면서 두께 변화로 나타난다. 바람 회전장이 양의 값일 경우에는 그 해역에서 침강이 나타나며 동해중층수의 두께가 두꺼워지는 경향을 보이는 반면, 음의 값일 때는 용승이 나타나면서 동해중층수 두께가 얇아지게 된다. 동해중층수는 기후 변화에 민감하게 반응하는 수괴로 주로 수온 약층 아래에 존재하고, 동해 북서부 해역에서 생성된다고 알려져 있으며, 바람의 영향을 크게 받아 대기-해양 상호작용의 결과로 나타난다. 일반적으로 수온 1~5℃, 염분 34.06psu이하, 용존산소 250umol/l 이상인 경우로 정의 한다. 동해에서 나타나는 기후 변화에 따른 반응을 가장 명확하게 볼 수 있는 인자로써 동해 기후 변화의 지시자라고 불리며, 생성 시기의 기후의 특성을 반영하는 만큼 동해중층수의 변동성 확인은 기후 변화의 특성을 확인할 수 있는 중요한 과정이라고 할 수 있다. 동해중층수 수괴는 Uda (1934)에 의해 처음으로 관심 갖기 시작하였으며, 당시에는 수온이 1℃ 이하의 단일 수괴를 동해 고유수라고 불렀었다. 하지만 최근에는 동해 고유수가 2개 이상의 수괴로 구성되어 있는 것으로 보고되었다 (Nitani, 1972; Gamo and Horibe, 1983; Sudo, 1986; Kim et al., 2004). 이후, 일본 연구자들은 수온약층 아래에서 높은 산소 농도와 낮은 염분의 특징을 가진 중층수의 존재를 처음 발견하였다 (Kajiura et al., 1958; Moriyasu, 1972). Kim and Chung (1984)은 울릉 분지에서 용존 산소 농도 측면에서 비슷한 특성을 지닌 수괴를 발견하였고, 이를 동해중층수라고 공식적으로 명명하였다. 이러한 동해중층수가 형성 해역이 동해 북부에서 중규모 구조가 나타나는 해역과 유사하다고 알려져 왔기 때문에 동해중층수와 중규모 구조 간의 상관성을 찾아보는 것은 동해중층수의 형성에 있어서도 의미가 있다고 할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 먼저 동해 북부에서 나타나는 중규모 구조의 시공간적 변동 특성과 메커니즘을 알아보았다. 위성에서 관측된 해수면 자료를 활용하여 경험적교함수 분석을 통해 공간 구조와 시간적 변동 특성을 설명하고, 위성 기반 수온 자료, 바람 자료 등과 같은 현장 관측 자료와 해양 재분석 자료를 활용하여 대기-

해양 상호작용에 따른 대기 강제력과 중규모 구조 변동과의 관계를 설명하였다. 또한 동해 북부 대규모 순환에 역행하여 나타나는 중규모 변동에 따른 해류(reversal current)의 흐름과 동해 북서부 해역에서 나타나는 쌍극자 패턴 (dipole pattern), 그리고 쌍극자 패턴을 중심으로 반대되는 두 영역의 경계인 전선 (front) 발생 현상 등을 확인하였다. 마지막으로 중규모 현상의 변동성과 동해에서 특징적으로 나타나면서 대기-해양 상호 작용의 결과로 알려진 동해중층수의 두께와의 상관관계를 분석하였다.

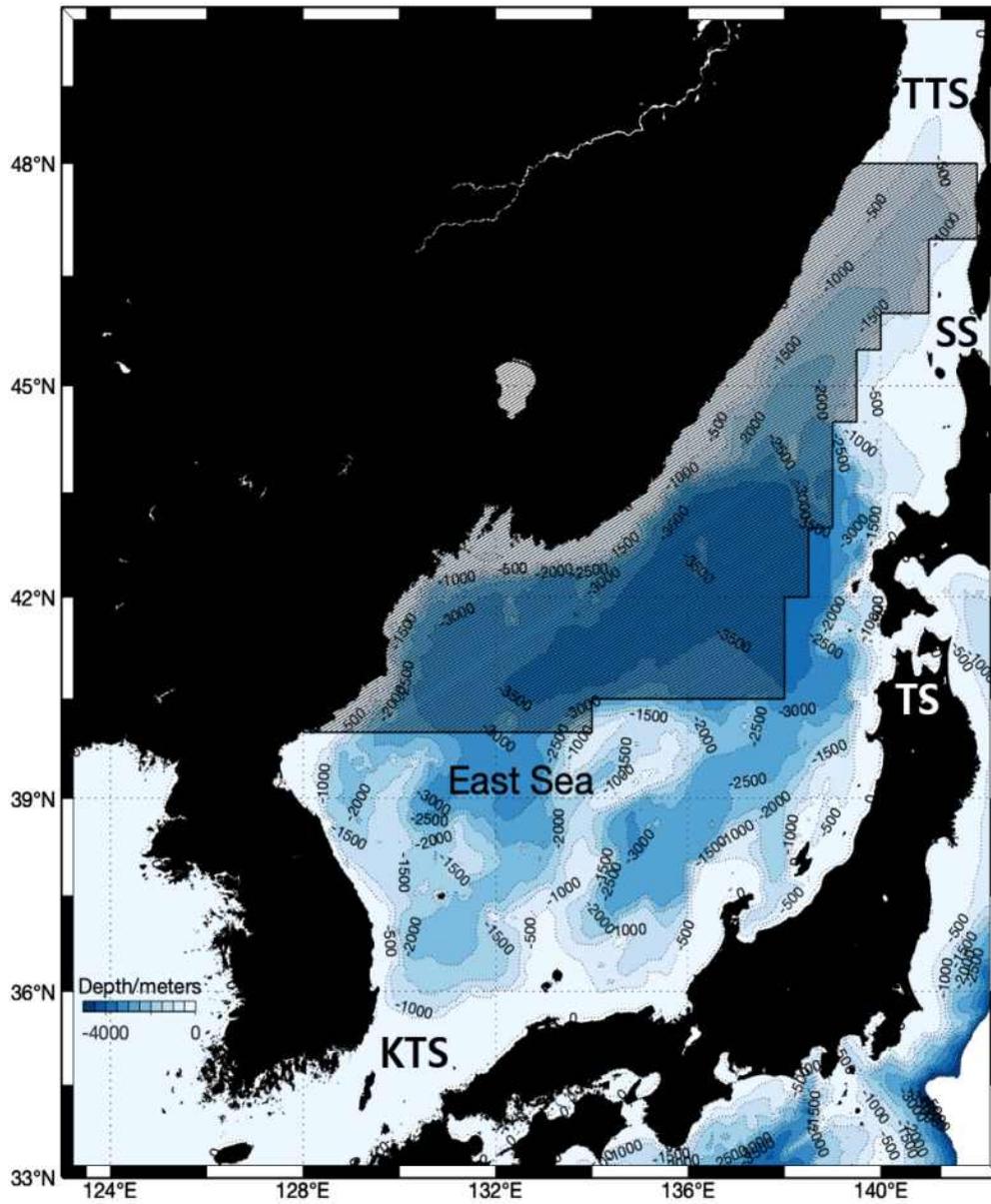


Figure 1. Bottom topography of the ES. KTS: Korea/Tsushima Strait, TS: Tsugaru Strait, SS: Soya Strait, TTS: Tatar Strait. Shaded area is research area in this study

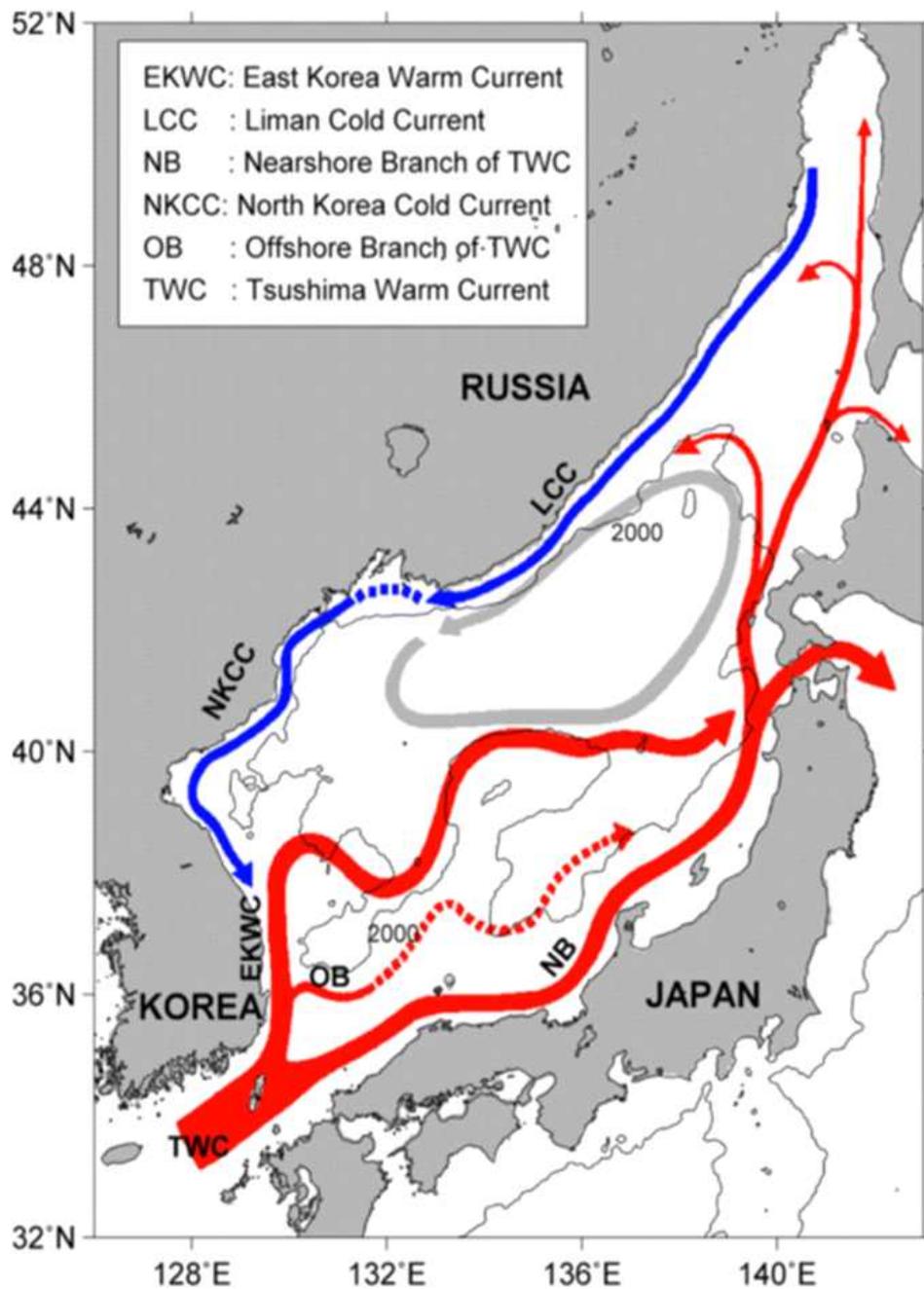


Figure 2. Schematics of surface circulation of East Sea adopted from Park et al. (2013). TWC: Tsushima Warm Current, EKWC: East Korean Warm Current, NKCC: North Korean Cold Current, LCC: Liman Cold Current

2. 자료 및 방법

본 연구에서는 동해 북부에서의 상층 순환의 특성을 분석하기 위하여 위성 자료를 기반으로 해수면 고도를 산출한 후, 경험직교함수 분석 방법을 사용하였다. 경험직교함수 분석을 위해 Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic data (AVISO) 위성 자료의 해수면 고도 (Sea Level Anomaly, SLA) 를 사용하였으며, 기상청 기후예측시스템 Global Seasonal forecasting system 5 (GloSea5)에서 계산된 평균 해수면(Mean Sea Surface, MSS) 와 합산하여 해수면 고도를 산출하였다.

Copernicus Marine Environment Monitoring Service (CMEMS)는 AVISO에서 공식적으로 생산한 위성 자료를 처리하여 제공하고 있다. Ssalto multimission ground segment/Data Unification and Altimeter Combination System (SSALTO/DUACS)에서 가용한 모든 위성 자료를 통합하여 CMEMS를 통해 제공한다. CMEMS에서 제공되는 자료 중 해수면 고도 자료를 격자화 및 통합화하여 재처리한(delayed-time) 레벨 4자료를 사용하였으며, 자료는 1/4° 수평해상도를 가지며, 월별로 평균하여 제공된다. 본 연구에서 사용된 자료의 기간은 1993년 1월부터 2017년 12월까지 25년 자료를 사용하였으며, 자료의 통일성을 위해 다른 자료들의 기간도 최대한 동일한 기간의 자료로 구성하고자 하였다. 평균 해수면 자료는 기상청과 국립기상과학원에서 운영하는 현업 기후예측시스템 GloSea5의 과거 수행자료(Hindcast)에 사용된 해양 초기장을 분석에 사용하였다. 이 초기장은 Ocean modeling and Data Assimilation (ODA) 해양-해빙 재분석 자료이며, Forecast Ocean Assimilation Model (FOAM) 기반으로 만들어졌다. 평균적으로 약 1/4° 수평해상도를 가지며, 극지방의 순환과 해빙을 자세하게 모의하기 위해 ORCA 격자 체계를 채용한다. 재분석장의 자료는 1991년부터 1월부터 2010년 12월까지 총 20년이며, 한 달에 4회(1, 9, 17, 25일) 연직 75개 층에 대해서 생산되었다. 이 자료는 수온, 염분, 해수면고도, 해류 등의 변수를 제공하는데, 본 연구에서는 해수면고도를 평균한 평균 해수면을 계산하여 사용하였다. GloSea5 시스템은 2014년부터 기상청에서 기

후예측시스템으로 소개되어 현재까지 서비스하고 있다.

바람 분석에 사용된 자료는 National Center Atmospheric Research (NCAR)에서 제공하는 Cross-Calibrated MultiPlatform (CCMP) 버전 2.0자료의 10m 바람 자료를 사용하였다. 자료의 공간해상도는 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ (1/4°)이며, 6시간의 시간해상도를 갖고 있다. CCMP 바람 자료는 모델 바람 필드를 배경장으로 사용하여 위성과 계류 부이의 바람 관측 자료를 종합하여 생산된 분석장이다. 위도 $\pm 78^{\circ}$ 이상 극지방을 제외한 전지구 자료를 제공하며, 본 연구에서는 동아시아 지역 자료만 편집하여 사용하였다. 이 바람자료를 기반으로 바람 회전장을 계산하여 사용하였다. 바람 응력(wind stress)은 해양 표면에 바람에 의해 가해지는 단위 면적당 표면에 평행한 힘 성분이다. 해양 표면에 마찰로 인한 바람 응력이 발생한 후, 전향력의 영향으로 회전 성분이 나타나는 것을 바람 회전장으로 표현하며, 양과 음의 값의 따라 해양 순환 양상을 유도할 수 있다. 본 연구에서는 1993년 1월부터 2017년 12월까지 자료를 분석에 사용하였다.

또한 동해중층수를 산출하기 위해 HYbrid Coordinate Ocean Model (HYCOM) 재분석자료 (HYCOM + NCODA Global 1/12° Reanalysis: GLBu0.08, 이하 HYCOM)를 사용하였다. HYCOM자료는 1/12°의 수평해상도를 가지며 3시간 간격으로 연직 40개 층에 대하여 제공된다. 표층에 작용하는 외력은 National Centers for Environmental Prediction (NCEP) 재분석 자료를 사용하였다. HYCOM 자료는 사용 가능한 모든 위성에서 관측된 해수면 온도 및 해수면 고도와 Expendable Bathymetry Thermographs (XBTs), Array for Real-time Geostrophic Oceanography (ARGO) 등 여러 해양 관측 자료를 Navy Coupled Ocean Data Assimilation (NCODA) 시스템으로 실시간 및 준실시간으로 자료 동화(Cummings, 2005)하여 구축한 재분석 자료이다. 본 연구에서는 1993년 1월부터 2017년 12월까지 자료의 연직 수온·염분 자료를 사용하여 위·경도 0.08° 간격마다 동해중층수 두께를 계산하였다. 또한 HYCOM 자료를 활용하여 해수면 온도의 25년 평균 기후장을 생산하였으며, 동해중층수의 변동과 관련된 1°C 등온선의 월별 공간 분포를 계산할 때도 연직 수온 자료를 내삽하여 사용하였다. 마지막으로 HYCOM 자료에서 제공되는 u, v성분을 이용하여, 해류를 계산하여 분석에 사용하였다.

본 연구에서 사용된 경험직교함수 분석 방법은 주성분 분석의 일종으로 데이터의

변동성을 공간패턴과 시간분포로 분해하는 방법이다. 해양 현상의 시공간 자료들에 경험직교함수 분석을 수행하면 원시 자료에 내재되어 있는 공간과 시간적으로 중요한 변화를 분리해 낼 수 있다. 다만 일반적으로 사용되는 분석 방법을 변형하여, 시간 성분과 공간 성분을 상호 교환하여 수행함으로써 계산 시간을 단축하였다.(Kim and Yoon, 2010) 다음은 본 연구에 사용된 계산식을 나타내었다.

먼저, 열 벡터로 이뤄진 해수면 고도의 시계열로 구성된 행렬 X 가 구성된다.

$$X(i,j) = \begin{bmatrix} d_1^1 & \cdots & d_1^{NS} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{NT}^1 & \cdots & d_{NT}^{NS} \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

행렬의 크기는 $NT \times NS$ 이며, 여기서 NT 는 각 시계열의 길이이며, NS 는 총 시계열의 수이다. 본 연구에서는 612개(NS)의 공간 지점과 120개(NT)의 시계열이 분석에 사용되었다. 주성분은 공분산 행렬의 고유 벡터를 찾아서 얻게 되며, 공분산 행렬은 다음과 같이 계산되었다.

$$C = XX^T / (NS - 1) \quad (2.2)$$

여기서, X^T 는 전치 행렬 X 를 나타낸다. 대칭 행렬 C 는 대각선화 또는 고유치 문제를 통해 다음과 같은 방식으로 분해될 수 있다.

$$CE = E\Lambda \quad (2.3)$$

여기서 E 는 고유 벡터가 열로 포함된 행렬이고, Λ 는 대각선을 따라 고유 값이 있고, 다른 곳에 0이 있는 행렬이다. 마지막으로 고유 데이터를 원래 데이터에 투영하여 주성분(Z)을 얻을 수 있다.

$$Z = E^T X \quad (2.4)$$

$$X = EZ \quad (2.5)$$

여기서는 공간에 대한 평균으로 요소가 계산되는 $NT \times NT$ 공분산 행렬 C 의 관점에서 경험직교함수를 통해 분리하도록 만들었다. 따라서 한 모드의 고유 벡터를 나타내는 행렬 E 의 각 열은 해당 모드의 시간적 변화를 나타낸다. 공간 의존성은 주성분으로 구성된 $NT \times NS$ 행렬 Z 에 대응하는 행에 의해 주어진다.

이 같은 방법을 통해 해수면 고도의 경험직교함수 분석을 수행하였고, 다음 장에서 그 결과를 나타내었다. 경험직교함수 분석 후(Figure 3), 제1모드에서 나타나는 대규모 순환 성분을 제거하여 다시 경험직교함수를 수행(Figure 4)함으로써 작

은 변동을 보이는 중규모 구조의 시공간적 변동 특성을 확인하였다.

3. 결과

3.1. 동해 북부 중규모 구조의 특성

본 연구에서는 동해 북부에서의 위성 관측 자료를 기반으로 한 해수면 고도의 자료를 이용하여 경험직교함수 분석을 수행하였다. 또한, 해수면 고도의 공간 분포에 따른 표층 해류의 이동을 유추하여 동해 북부 상층 순환의 특성을 분석하였다. 해수면 고도의 경험직교함수 분석 수행 결과, 제1모드에서 많은 선행 연구에서 밝혀진 바와 같이 동해 북부에서 저기압성 순환 형태의 반시계 방향의 흐름을 보이는 대규모 순환이 나타났으며, 이 순환은 동해 북부 전체에서 지배적으로 나타난다. Kim and Yoon (2010)은 이 대규모 순환이 1년에 2번 최댓값을 보이는 반년 주기의 변동 특성을 보이는 것을 발견하였다. 본 연구에서는 제1모드로 지배적으로 나타나는 대규모 순환 성분을 제거하여 중규모 구조의 변동 특성을 분석하고자 하였다. 제1모드로 나타나는 특성을 제외하고 경험직교함수 분석을 다시 수행한 결과 제1모드에서 약 26%를 설명하는 중규모 구조를 확인할 수 있었고, 특히 동해 북서부 해역에서 독특한 구조를 가진 쌍극자 패턴 구조가 확인되었다. Figure 4(a)는 대규모 순환 성분을 제거한 후, 경험직교함수 분석을 재수행하여 계산된 제1모드의 공간 분포를 나타냈다.

Figure 4(a)에서 동해 북서부에 해역을 중심으로 독특한 중규모 구조의 해수면 고도 공간 분포가 나타난다. 이 해수면 고도의 공간 분포는 두만 강 하구 남부에서는 강한 양의 아노말리가 나타나는 것을 확인할 수 있으며, 이와는 대조적으로 블라디보스토크 남부 해역에서는 강한 음의 아노말리가 나타나는 쌍극자 패턴을 보이고 있다. 양의 아노말리 영역과 음의 아노말리 영역의 경계가 분명하여, 그 경계에서는 전선이 나타나고 있다. 이 전선은 Park et al. (2004)에서 해수면 온도의 공간 분포에서 나타난 북서아극전선 (North Western Subpolar Front, NWSPF)과 형태가 비슷할 뿐만 아니라 나타나는 위치도 상당히 일치하는 결과를 보여주며, Figure 7의 winter 기간에 확인할 수 있다. 또한 Figure 8(b)에서 나타낸 북서아극전선의

시계열은 11월과 12월에 최댓값을 보이며, 해수면 고도의 중규모 구조의 시계열과 유사한 변동 경향을 보였다. Figure 6의 해수면 온도 공간 분포 기후 값에서도 10월부터 1월까지 해수면 고도가 쌍극자 형태로 나타나는 해역의 중심으로 전선이 확인되는 것을 알 수 있으며 이를 북서열전선(North Western Thermal Front, NWF)이라 부른다. 이 전선을 중심으로 지엽적인 해역임에도 불구하고 해수면 고도가 반대되는 특성을 지닌 독특한 구조를 보인다. 이렇게 나타나는 해수면 고도의 공간 분포에 따라 해류의 순환 양상을 유추할 수 있으며, 양과 음의 특성에 따라 순환 특성이 다르게 나타난다. 전선의 서쪽 해역에 해당하는 해수면 고도가 양의 아노말리를 보이는 지역에서는 물의 흐름이 상대적으로 높은 중심에서 바깥쪽으로 퍼져 나가는 발산 형태로 나타나고, 여기에 전향력이 작용하면서 오른쪽 방향으로 물의 흐름을 보이게 되며, 이를 통해 고기압성 순환을 유추할 수 있다. 반대로 전선 동쪽 해역에 해당하는 해수면 고도가 음의 아노말리를 보이는 지역에서는 물이 상대적으로 낮은 중심으로 모여드는 수렴 형태로 나타나며, 전향력의 영향으로 수렴 방향의 오른쪽으로 물의 흐름 형성되면서 저기압성 순환 양상을 보이게 된다. 다시 말해, 해수면 고도 분포에 따라 양의 아노말리가 나타나는 해역에서는 고기압성 순환이 나타나며, 음의 아노말리가 나타나는 해역에서는 저기압성 순환이 나타난다. 또한 동해 북서부 해역에서 두드러지게 나타나는 쌍극자 분포 패턴은 주로 겨울철에 발달하며, 중규모 구조의 월별 평균 시계열을 나타낸 Figure 4(b)에서 볼 수 있듯이 1월에서 9월까지 0에 가깝거나 음의 값을 보이면서 Figure 4(a)에서 확인된 동해 북서부에 나타나는 독특한 구조는 거의 나타나지 않는다고 할 수 있다. 하지만 시계열에서 최대가 나타나는 10월부터 12월까지는 이러한 쌍극자 패턴이 강하게 나타난다. 해류의 순환은 해당 기간에 따라 다른 특징을 보인다고 설명할 수 있으며, 중규모 구조가 약한 1월부터 9월까지는 동해 북부에서 지배적으로 나타나는 저기압성 대규모 순환을 보이고, 중규모 구조가 양의 값을 보이는 10월부터 12월까지는 동해 북서부에 한해서 쌍극자 분포를 중심으로 서쪽 해역에서 고기압성 순환을 보인다.

앞에서 설명한 해수면 고도 분포에 따른 계절 변동을 하는 동해 북부 중규모 순환의 특성은 과거 CREAMS 프로그램에서 수행된 표류 부이 관측을 통해 확인된 바가 있다.(after Yoon et al., 2005) 앞서 언급한대로 1월에서 9월까지는 저기

압성 순환이 강해지는 시기로써 중규모 구조가 아주 약하거나 나타나지 않기 때문에 Figure 5에서 파란 선의 궤적처럼 표류 부이가 일반적으로 동해 북부 연안을 따라 나타나는 저기압성 순환을 보이면서 남서향하는 움직임을 보인다. 하지만 10월에 접어들면서 Figure 5의 빨간 선 궤적에서 보이듯이 남서향 방향으로 이동하던 부이가 북동 방향으로 역행하면서 고기압성 순환 궤적을 보이기 시작하였고 12월까지 계속해서 북동진하면서 역행하는 해류(reversal current)가 나타났다. 또한 1월경에는 고기압성 순환에 따라 북동향하던 부이가 두만 강 남부해역 부근에서 앞서 언급한 북서열전선을 따라 남동향하는 궤적을 보였다. 따라서 해수면 고도의 쌍극자 패턴의 공간 분포에서 유도된 순환 형태와 전선역의 존재 등의 중규모 구조 특성이 표류 부이 관측을 통해 확인되었다.

앞서 해수면 고도에서 확인된 쌍극자 분포가 Figure 6의 해수면 온도 공간분포에서도 확인이 된다. 물리적 측면으로 접근하면 해수면 온도의 상승은 해수면 고도의 상승을 유도하게 되며, 따라서 해수면 온도와 해수면 고도는 유사한 분포 경향을 보이게 된다. 이는 본 연구에서 사용된 해수면 온도와 해수면 고도의 관측을 통해서도 일치하는 결과를 보였다. 10월부터 1월까지 월 평균 기후 값의 공간 분포에서 해수면 고도가 높아지는 해역 즉, 전선 서쪽 해역에서 상대적으로 차가운 물을 만나면서 전선이 형성되었고, 이 해역에서는 동일 위도 상에서 상대적으로 높은 해수면 온도를 보였으며, 추운 계절에 접어들면서 그 경계가 극명해지는 모습을 보였다.

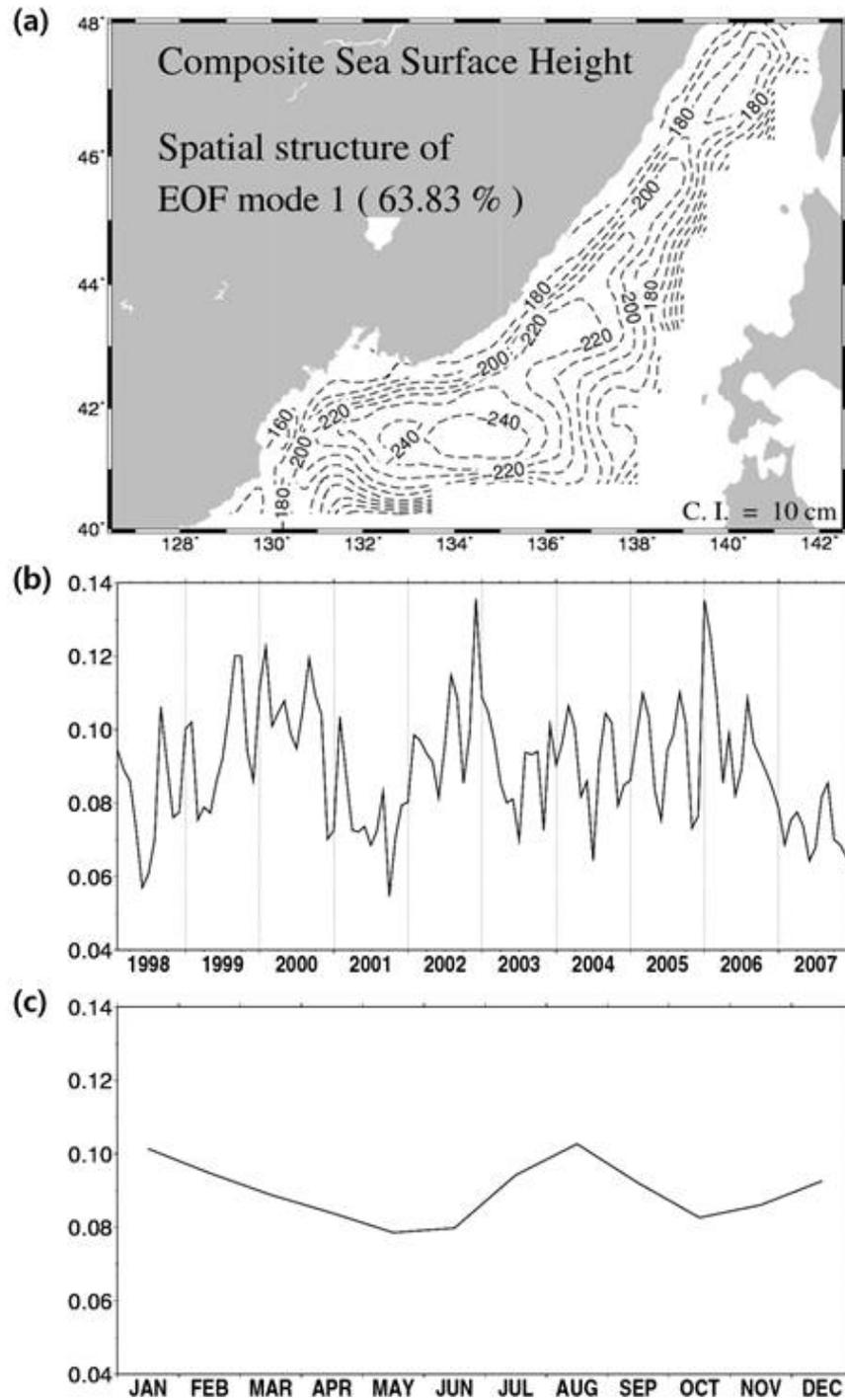


Figure 3. First EOF mode of the SSH variability over the Northern EJS: (a) spatial structure of the mode 1, (b) temporal variation of the mode 1, and (c) time series of climatological monthly mean temporal distribution of the mode 1(after Kim and Yoon, 2010)

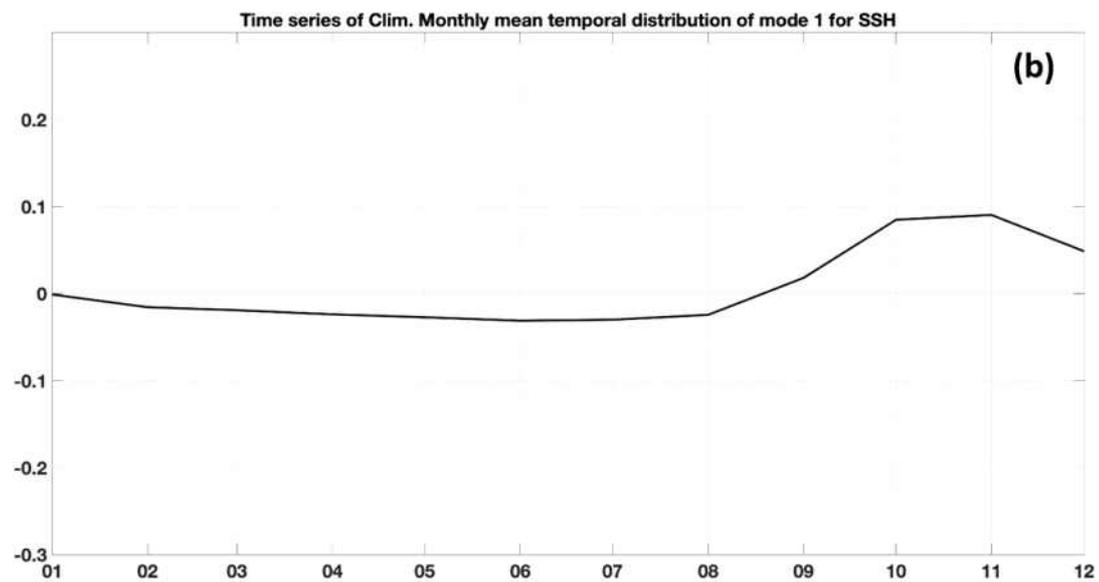
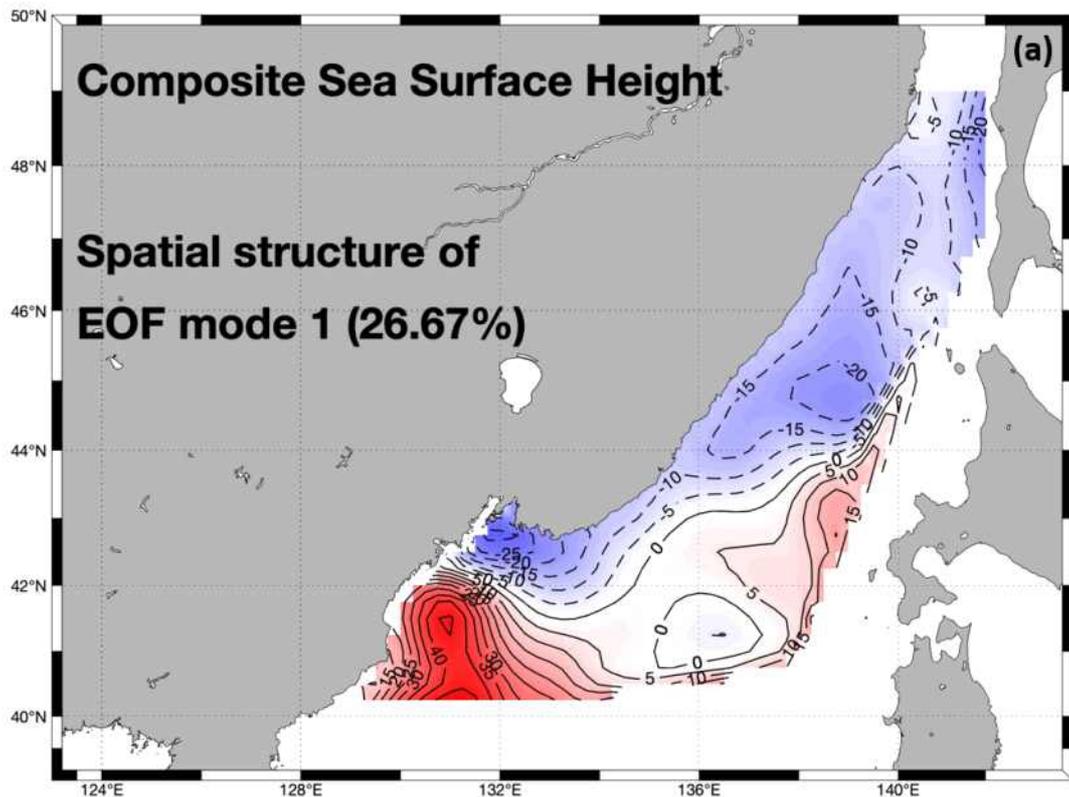


Figure 4. First EOF mode of the SSH variability over the Northern EJS: (a) spatial structure of the mode 1(remove mode1), (b) time series of climatological monthly mean temporal distribution of the mode 1(remove mode1)

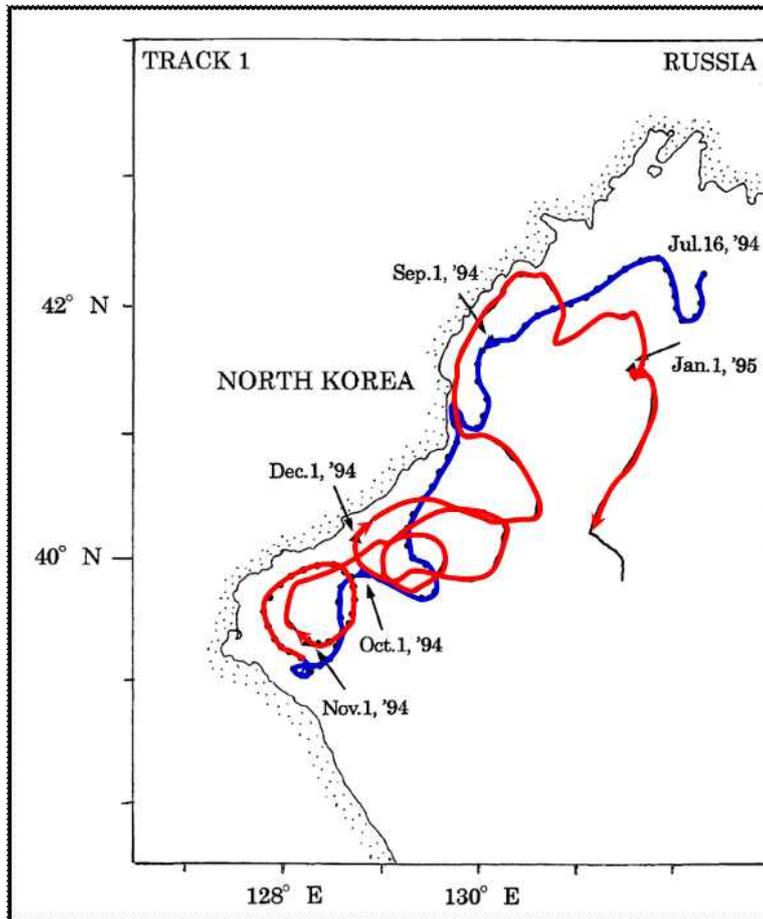


Figure 5. Tracks of surface ARGOS floats deployed off Vladivostok on July 16, 1994 during CREAMS'93, 94 summer cruises. The blue line indicates the anti-cyclonic current, the red line indicates the cyclonic current(after Yoon et al., 2005)

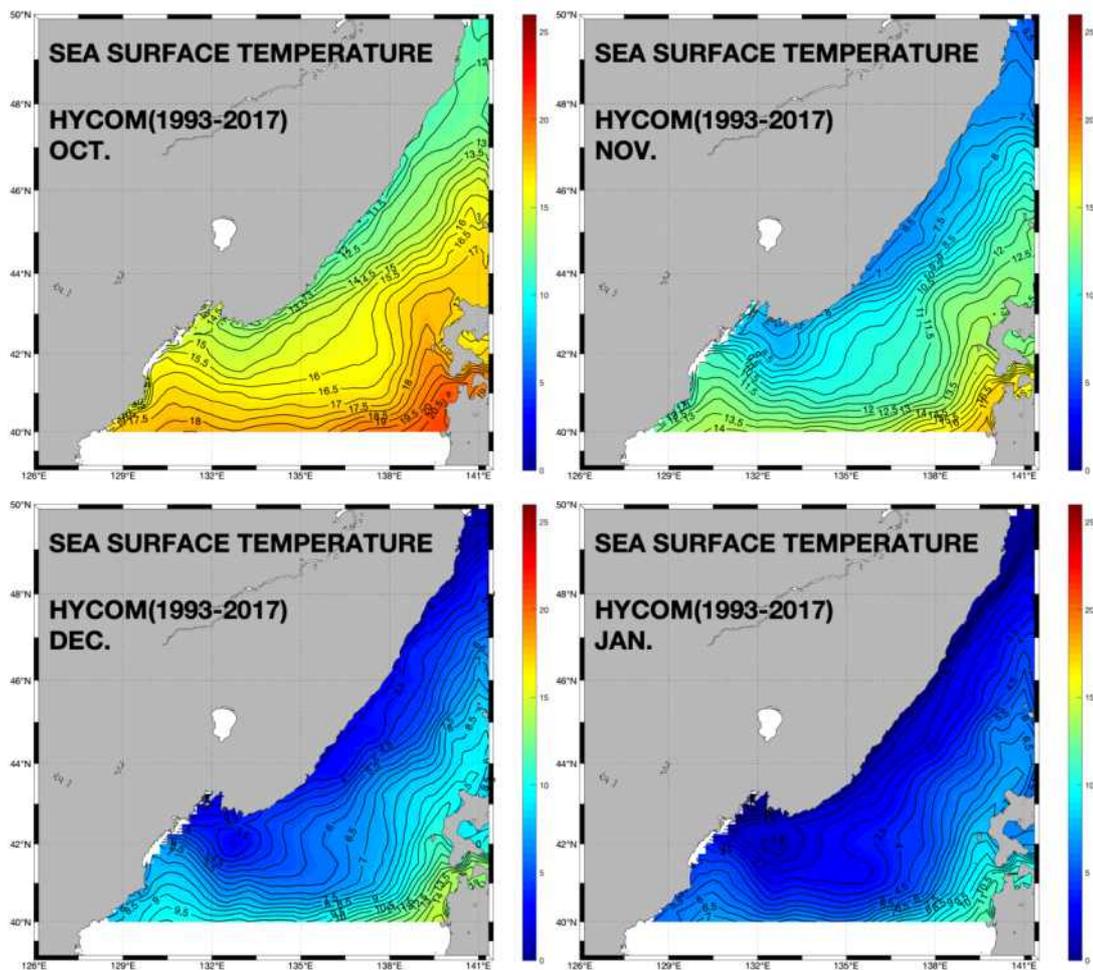


Figure 6. Sea Surface Temperature distributions from HYCOM reanalysis during October to January averaged from 1993 to 2017

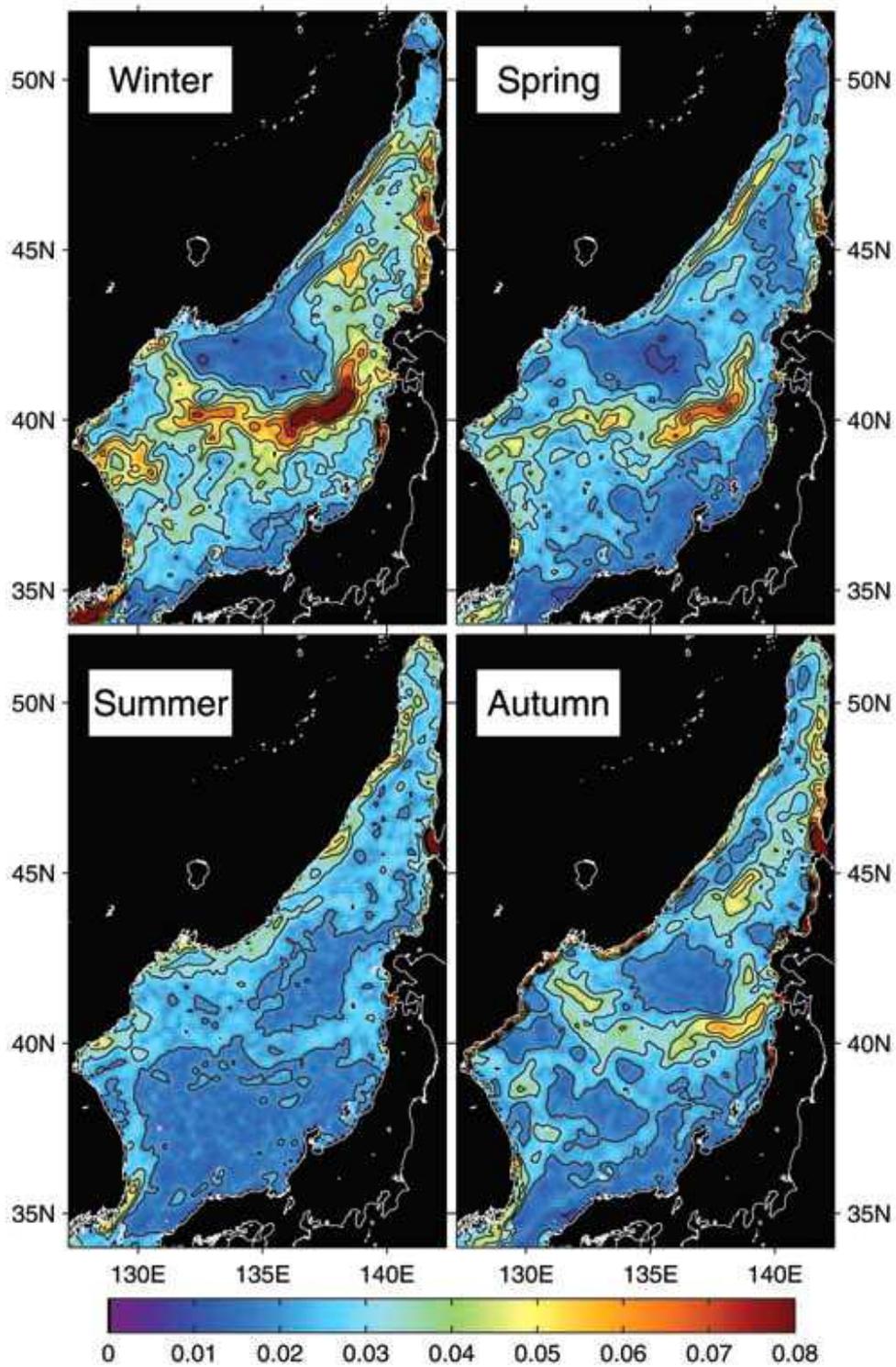


Figure 7. Seasonal SST front ($^{\circ}\text{C}/\text{km}$) maps for 1990-1995 (winter: Dec.-Feb., spring: Mar.-May., summer: Jun.-Aug., and autumn: Sep.-Nov.) (after Park et al., 2004)

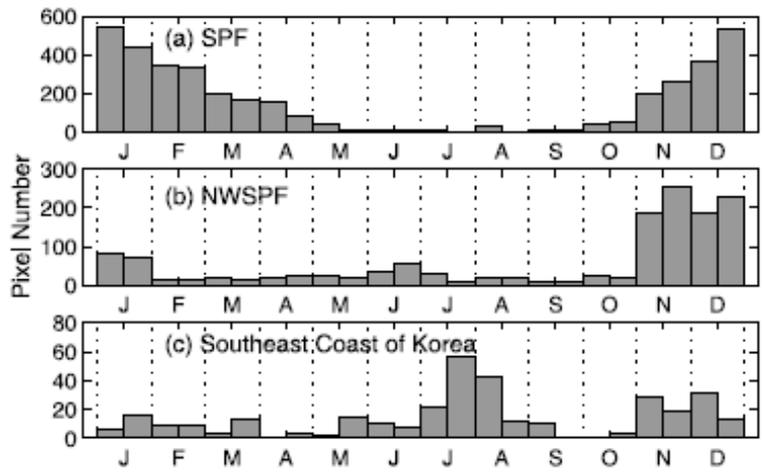


Figure 8. Histogram of times of the maximum fronts in the frontal zones: (a) the SPF, (b) the NWSPF, and (c) off the east coast of Korea (after Park et al., 2004)

3.2. 중규모 구조의 형성 요인

동해 북부에서 나타나는 중규모 구조는 다양한 요인이 복합적으로 작용하여 형성된다. 먼저 바람의 영향에 대해 살펴보면, 바람은 해양에서 나타나는 파랑과 해류 등의 형성에 많은 영향을 미치는 요소 중 하나이다. 바람으로부터 산출된 바람 회전장은 바람에 의해 가해지는 표면에 평행한 힘 성분인 바람 응력을 형성하고, 여기에 전향력에 의한 회전(curl)이 발생하면서 형성된다. 바람은 특히 상층 해양에서의 순환에 크게 영향을 미치며, 바람 회전장의 공간 분포에 따라 해당 해역에서의 순환 양상 및 구조 등을 유추할 수 있다. 해양 순환 양상을 유추하면서 바람 회전장과 해수면 고도의 상관 관계도 확인해 볼 수 있다. Figure 9에는 동해 북부 영역에서 나타나는 바람 회전장을 적분한 결과를 나타내었으며, 월별 시계열에서 볼 수 있듯이 저기압성 순환을 지배하는 양의 바람 회전장이 10월과 11월에는 음의 값을 보이면서 가장 약하게 나타난다. 즉 동해 북부에서 양의 바람 회전장으로 유도되어 지배적으로 나타나는 저기압성 대규모 환류가 약화되게 된다. 이에 따라 상대적으로 중규모 구조의 발달 가능성이 커지면서 10월과 11월에 최대를 보이는 중규모 구조의 순환 형태가 나타나면서 동해 북서부 영역에 한해서 고기압성 순환이 나타나게 된다.

또한 동해 전체 영역에서 나타나는 바람 회전장의 월평균 공간 분포를 살펴보았다. 동해 북서부 해역의 공간 분포를 보면 대규모 순환이 약화되는 시기인 10월부터 동해 북서부에서 바람 회전장이 쌍극자 형태로 발달한다. 전선을 중심으로 음의 영역과 양의 영역으로 구분되며, 바람 회전장 에디의 영향으로 양쪽으로 코어가 형성된다. 바람 회전장의 음의 영역에서는 에크만 수렴(ekman convergence)로 인해 침강이 일어나며, 이는 해수면 고도의 양의 아노말리가 나타나는 해역과 일치한다. 앞서 수행된 해수면 고도의 경험직교함수 분석 결과 제2모드(제1모드 성분을 제거하여 재수행한 경험직교함수 제1모드)로 나타나는 동해 북서부 해역의 쌍극자 분포와 바람 회전장의 공간 분포를 연관시켜보면 상당히 유사한 분포로 나타난다.

Figure 10에서는 동해에서 나타나는 바람 회전장의 9월부터 2월의 공간 분포를 나타내었다. 몇몇 선행 연구에서 보고했던 중규모 구조와 바람 회전장과의 상관성을 보고자 중규모 구조의 발생 전후 기간의 월별 기후 값의 공간 분포를 확인하였

다. 해수면 고도와 동일하게 독특한 쌍극자 구조가 12월~2월에 우세하게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 반대로 9월부터 10월에는 특징적으로 나타나는 음과 양의 두드러진 분포가 나타나지 않지만, 10월부터는 약하게나마 쌍극자 분포가 서서히 나타난다. 이는 중규모 구조의 시계열에서 확인된 바와 같이 10월부터 추운 겨울 기간에 강해지는 경향과 일치하는 것을 볼 수 있다. Figure 10에서의 바람 회전장의 공간 분포와 해수면 고도의 공간분포와 비교해 보면 해수면 고도의 양의 아노말리가 분포하는 해역엔 음의 바람 회전장이 나타나며, 해수면 고도의 음의 아노말리가 나타나는 해역에는 양의 바람 회전장이 나타나는 공간적인 상관성을 가지고 있다. 또한 앞에서 언급했던 전선인 북서열전선도 바람 회전장의 공간분포의 경계에서도 확인되었다.

또한 Figure 12에 나타난 수심 20m의 수온·염분 공간 분포와 중규모 구조의 형성 요인을 연관 지을 수 있다. Figure 12는 25년간(1993~2017) 10월부터 1월까지의 월별 평균 자료이며, 수온과 염분의 공간 분포 모두 대마 난류의 지류이자 고온·저염의 특성을 지닌 동한 난류가 한반도 동쪽 연안을 따라 북상하는 형태를 띠는 것을 확인할 수 있다. 앞서 해수면 온도에서도 마찬가지로 확인되었던 동일 위도 상에서 상대적으로 높은 온도를 보이는 경향이 수심 20m 수온에서도 나타나고 있다. 염분 역시 해당 해역에서 낮은 염분 중심이 보이며, 겨울 동안 그 위치가 북상하면서 전선을 중심으로 서쪽 부근에서는 저염 분포가, 동쪽 부근에서는 상대적으로 고염 분포를 형성하는 것을 알 수 있다. 따라서 고온·저염의 특성을 지닌 대마난류에서 파생된 동한 난류가 10월부터 점차 동해 북서부 해역으로 이루어져 전선역 서쪽 부근에서 높은 수온을 가진 물이 모이게 되고, 상대적으로 따뜻한 그 물이 해수면 고도의 상승을 유도했을 것이다. 반대로 전선역 반대 해역에서는 차가운 물이 존재하면서 따뜻한 물과 만나면서 그 경계에 전선이 형성되고, 차가운 물의 해역에서는 해수면 고도가 낮아지게 된다. 여기에 10월 바람 회전장의 분포에서 확인했듯이 추운 겨울에 비해서는 약하지만, 쌍극자 패턴의 바람 분포로 인해 이러한 물의 순환 형태를 강화시켰다고 설명할 수 있다. 추가적으로 대마 난류의 지류가 동해 북부까지 이동되었다는 것을 확인하기 위하여 9월부터 12월까지의 해류를 확인하였다. Figure 13, 14에서 표층 해류와 수심 50m의 해류를 나타내었고, 두 수심 모두 한반도 남부로부터 북향하는 해류가 우세하게 나타나는 것을 확인할 수 있었고, 그

정도는 10월부터 점차 강해지는 것을 확인할 수 있다. 다시 말해 고온·저염의 물이 북상하면서 상대적으로 저온·고염의 물을 만나면서 경계에 전선이 형성되었고, 동해 북부 전체에서 약화된 저기압성 순환의 영향과 바람 회전장의 쌍극자 분포의 영향이 복합적으로 작용하면서 동해 북서부에서의 독특한 구조를 지닌 중규모 순환 구조가 형성되었다고 말할 수 있다.

반대로 1월과 2월에는 동해 북부 전체에서 양의 바람 회전장이 최대를 보이면서 동해 북부를 지배하는 대규모 환류가 동해 북부에서 우세하게 나타나기 때문에 중규모 구조 순환이 약화, 소멸되면서 1월 이후 바람 회전장이 중규모 구조 해역에서 더욱 강하게 나타남에도 불구하고 중규모 구조가 나타나지 않는다고 설명할 수 있다.

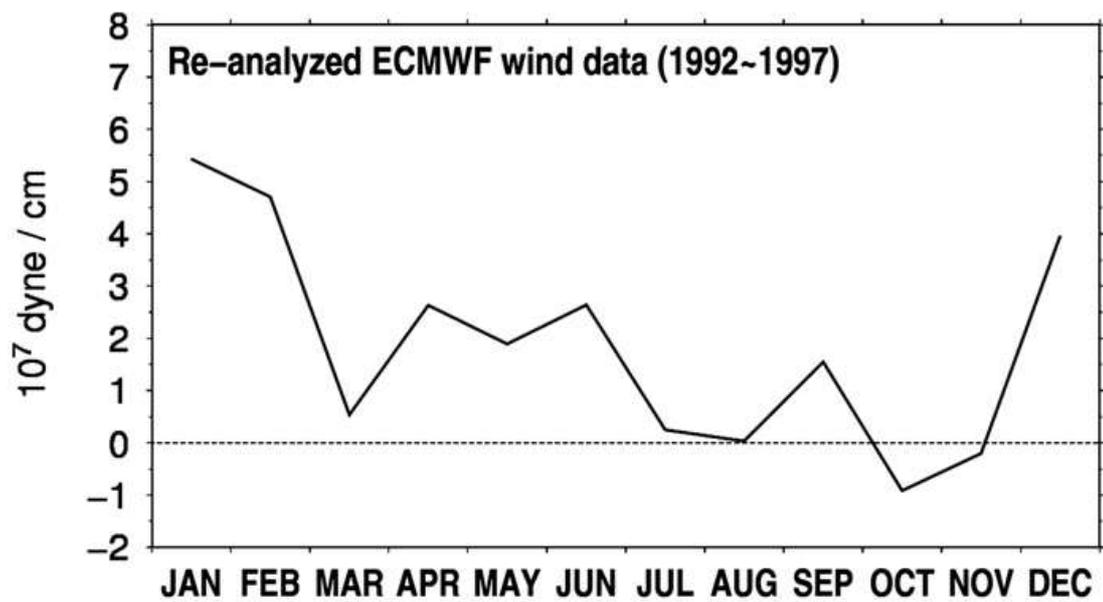


Figure 9. Time series of wind stress curl integrated over the Northern East Sea (after Kim and Yoon, 2010)

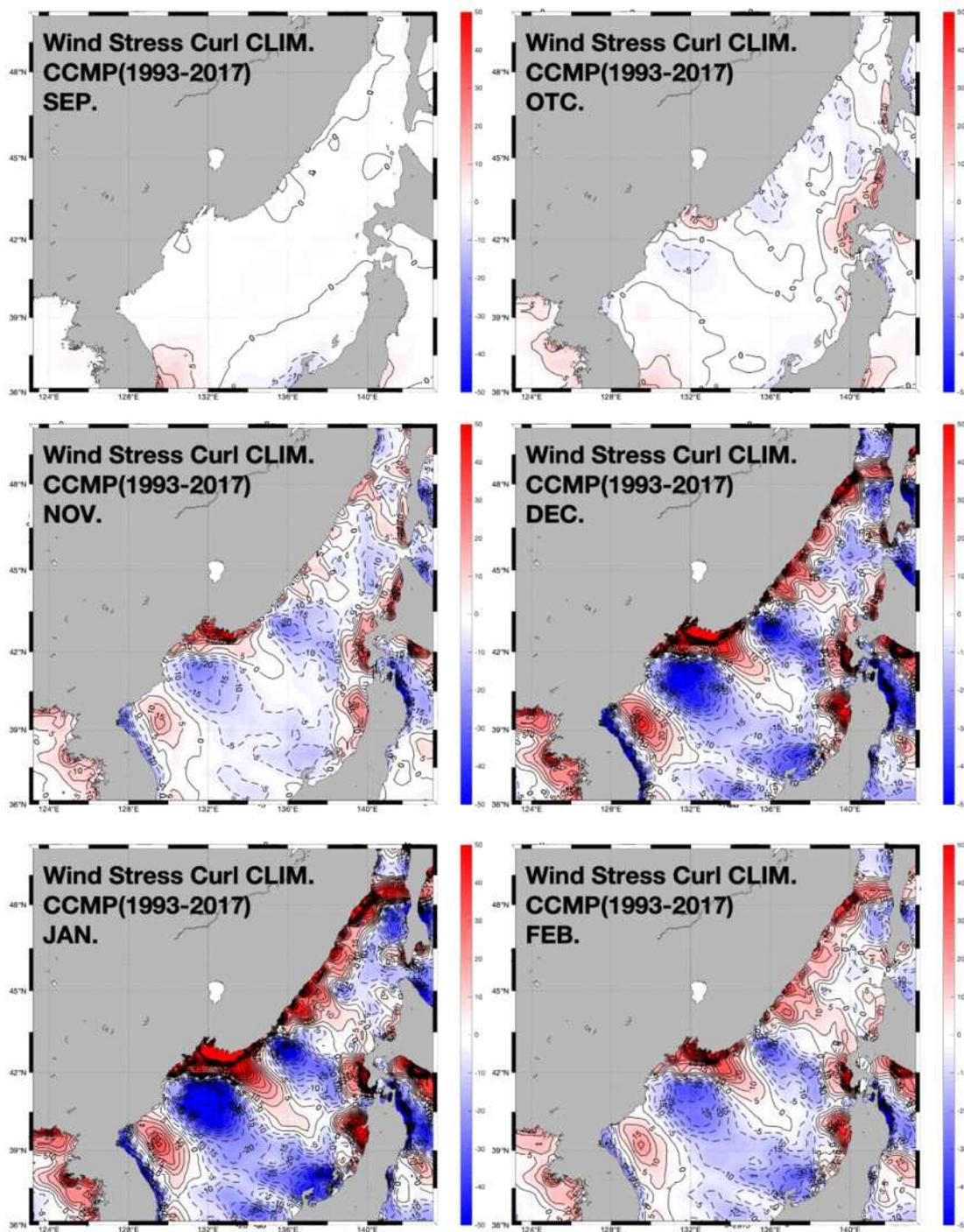


Figure 10. Wind-stress curls distributions from CCMP wind data during September to February averaged from 1993 to 2017. The blue areas represent negative values, and red areas represent positive values

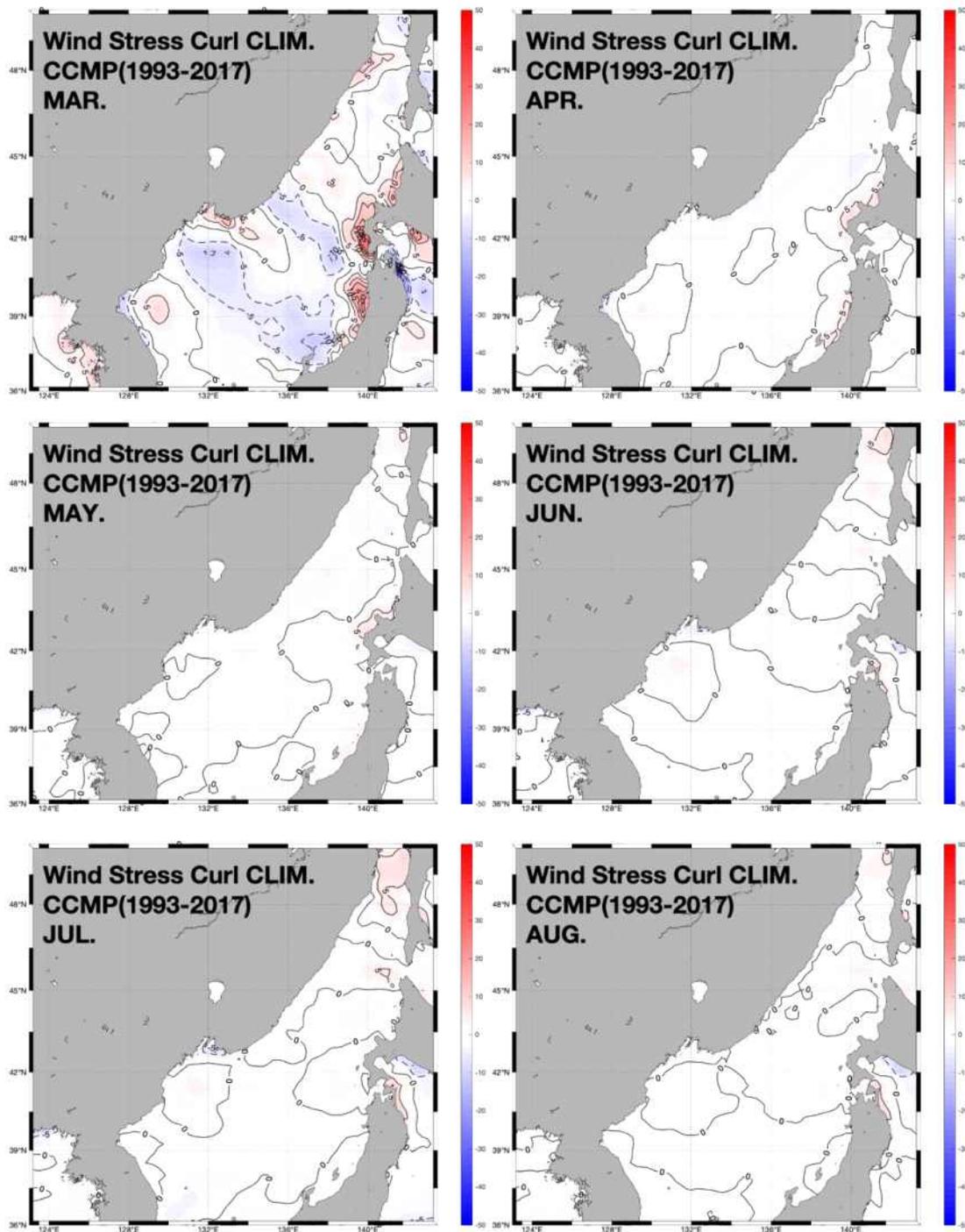


Figure 11. Same as Figure 10 except from March to August

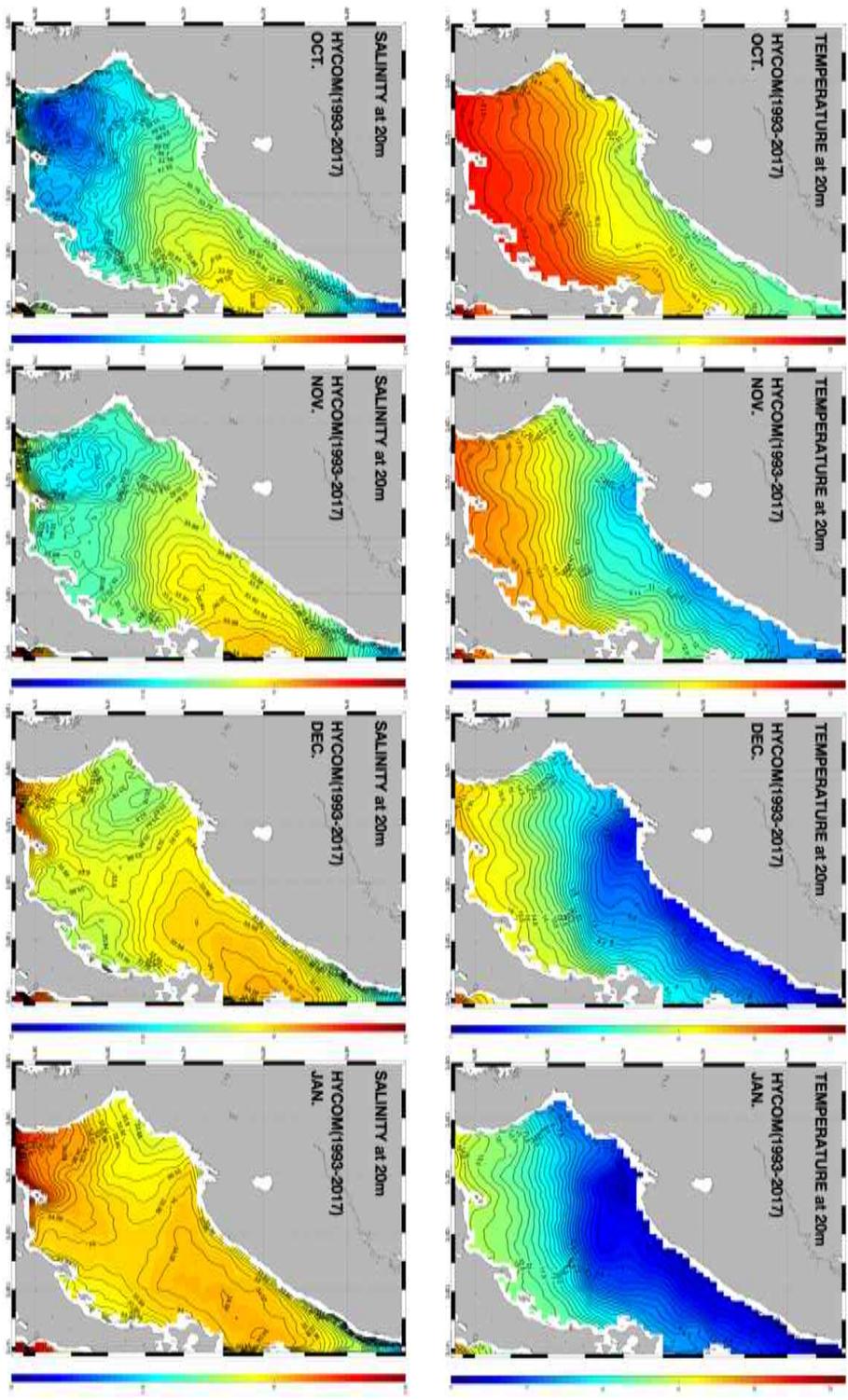


Figure 12. Temperature and Salinity distributions at depth 20m from HYCOM reanalysis during October to January averaged from 1993 to 2017

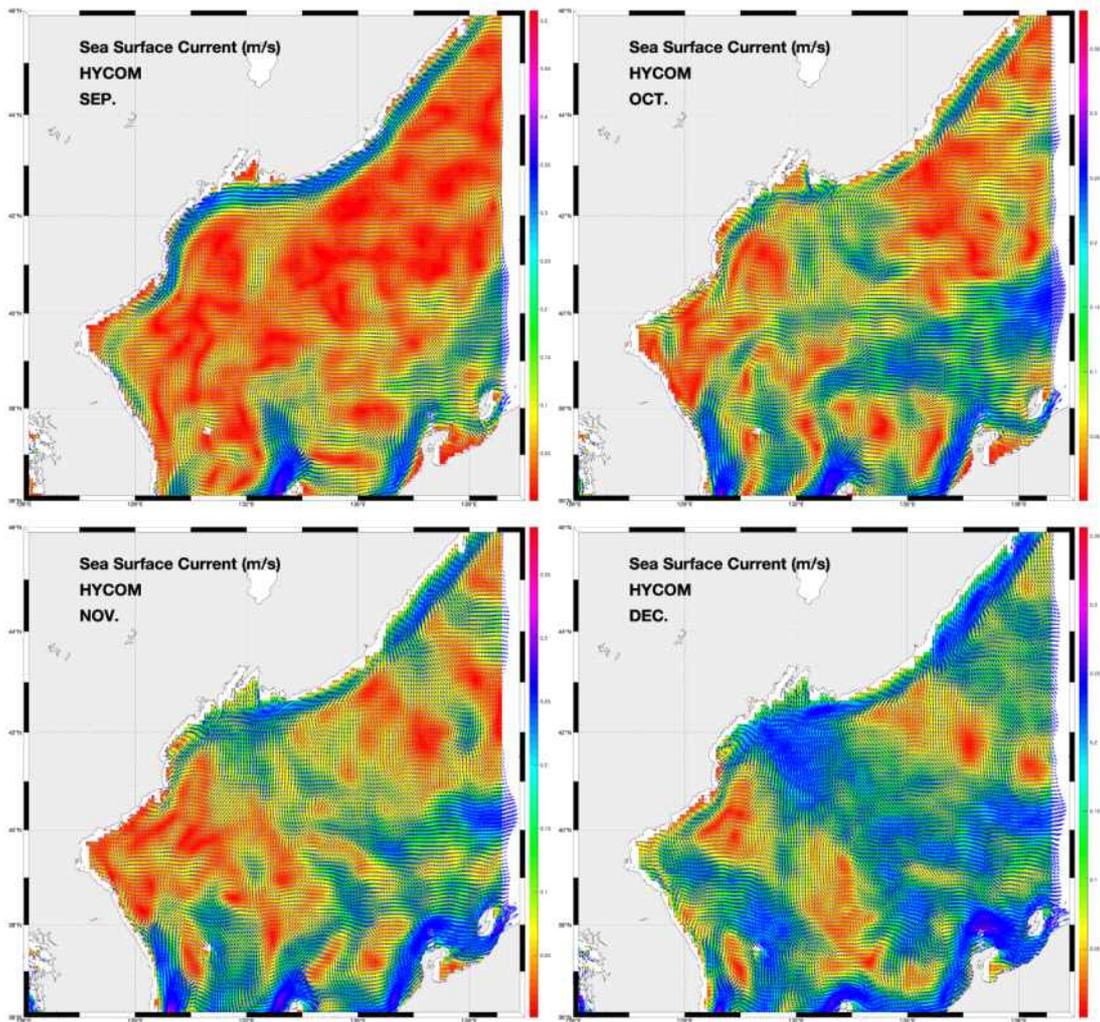


Figure 13. Sea surface current distributions from HYCOM reanalysis during October to December averaged from 1993 to 2017

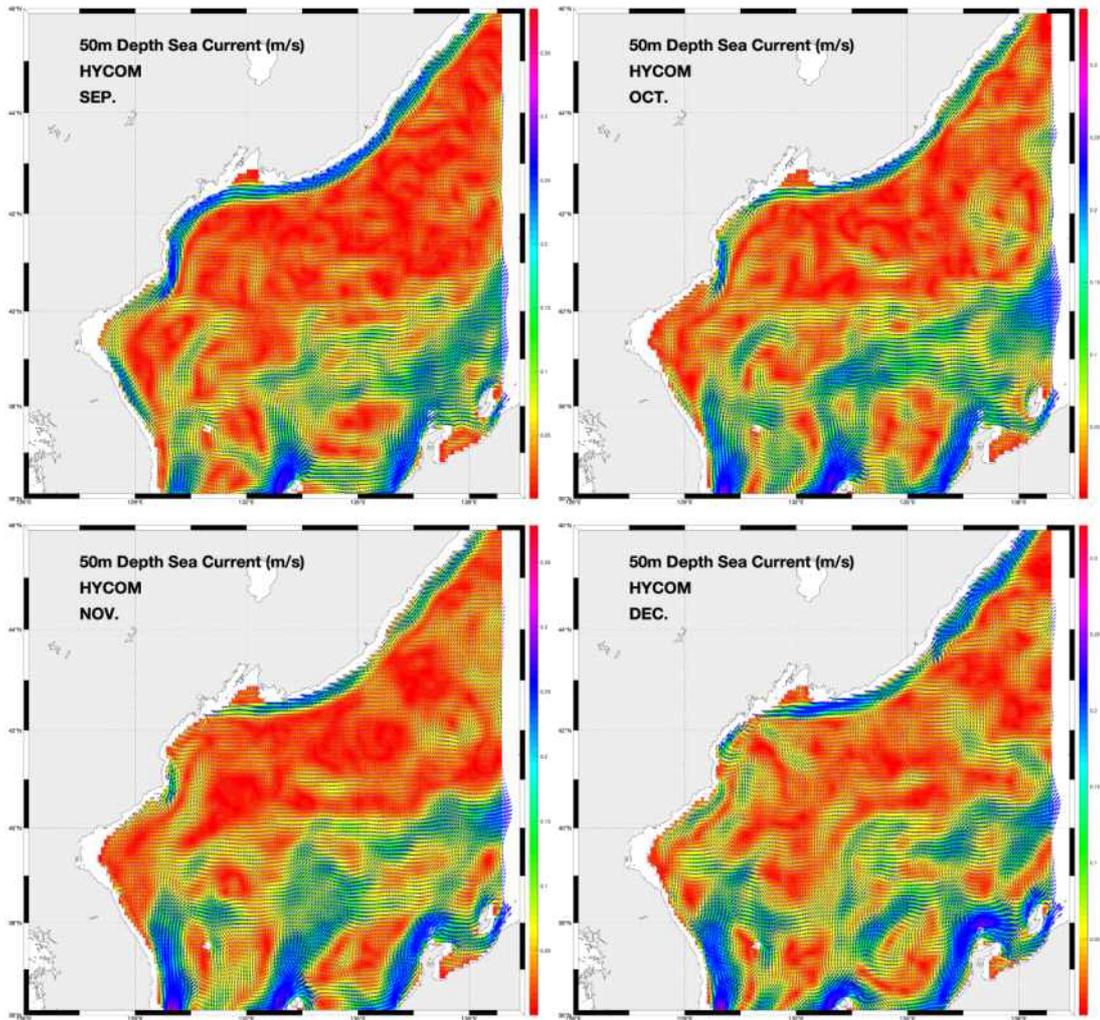


Figure 14. Sea current distributions at 50m depth from HYCOM reanalysis during October to December averaged from 1993 to 2017

3.3. 동해 중규모 구조와 동해중층수와 연관성

해수면 고도의 경험직교함수 분석을 통해 확인한 중규모 구조가 대기-해양 상호 작용의 영향을 받으면서 동해에서 특징적으로 나타나는 동해중층수와 어떤 연관성을 갖는지 확인하였다. 동해중층수는 기후 변화에 민감한 수괴로 널리 알려져 있으며, 동해 기후 변화의 지시자로 불리고 있다. 특히 본 연구에서 확인한 중규모 순환이 나타나는 동해 북서부 해역이 동해중층수의 형성 해역으로 알려져 있기 때문에 두 변수의 상관 관계를 확인함으로써 동해중층수 형성 기작을 이해할 수 있을 것으로 생각된다.

동해중층수는 많은 선행 연구에서 정의된 바 있으며, 공통적으로 적용되는 조건이 낮은 수온과 낮은 염분 그리고 높은 산소 농도를 가지고 있다는 점이다. 본 연구에서도 선행 연구에서 사용된 정의 범위를 참고하여, 수심 100~500m, 수온 1~5°C, 염분 33.95~34.06psu 로 정의하여, 그 중 3가지 조건을 만족하는 경우에 동해중층수로 판단하여, 동해중층수의 두께를 산출하였다. 동해중층수의 두께를 산출한 이유는 동해중층수가 형성된다고 알려진 해역에서 중규모 구조에서 유도된 순환의 영향으로 침강이 나타나게 되며, 이러한 상층으로부터의 침강은 동해중층수 특성을 가진 물이 중층까지 확대되는 형성 기작으로써 동해중층수 두께 변화로 나타나기 때문이다. 따라서 중규모 구조의 영향에 따른 동해중층수의 두께 변화를 보고자 HYCOM 재분석 자료를 사용하여 두께를 산출하였다. Figure 15는 앞서 언급한 3가지 조건인 수심, 수온, 염분을 모두 만족하는 경우에 동해중층수로 판단하여 산출한 월별 공간 분포이다. 중규모 구조의 특성이 나타나는 10월~12월을 포함한 9월부터 2월까지의 25년간 월 평균 기후 값의 공간 분포를 나타냈으며, 선행 연구에서 보고된 바와 같이 해수면 고도가 양의 아노말리가 나타나는 해역, 즉 침강이 활발히 나타나는 해역에서 중층수 두께가 최대 약 200m 이상을 보였으며, 전선을 중심으로 반대되는 특성을 보이는 쌍극자 패턴이 극명하게 나타났다. 또한, 바람 회전장의 공간 분포와도 유사한 공간 패턴을 보이며 음의 바람 회전장이 강하게 나타나고, 침강이 활발하게 일어나는 해역에서 동해중층수의 두께가 두꺼워지는 것을 확인할 수 있었다. 해수면 고도와 바람 모두 동해중층수 형성에 연관되어 있다는 것을 의미하며, 앞서 언급한대로 동한 난류가 이루어지면서 동해 북서부에 따

뜻한 물의 유입으로 인해 해수면 고도가 높아졌고 차가운 물과 따뜻한 물이 만나면서 전선을 가진 쌍극자 구조를 형성하였다. 이 구조는 바람 회전장의 의해 더 두드러졌을 것이며, 그 결과 해수면 고도와 바람이 동해중층수의 형성에 영향을 미쳤다고 생각할 수 있다.

이러한 공간 분포뿐만 아니라 중규모 구조와 동해중층수의 장기적 트렌드의 상관성도 확인하고자 하였다. 앞서 언급한대로 동해중층수 형성 메커니즘을 따르면 해수면 고도가 높을 때, 동해중층수가 두꺼워 짐에 따라 해수면 고도의 경향을 알면 동해중층수의 변동도 유추할 수 있을 것으로 사료된다. Figure 16은 동해중층수의 두께 변동과 가장 큰 관계를 갖는 1°C 등온선 깊이의 월 평균 공간 분포를 나타내었다. 해수면 온도와 동해중층수 두께를 산출했던 HYCOM 자료를 동일하게 사용하였으며, 1°C와 가장 가까운 수온을 갖는 수심을 사용하여 나타내었다. 1°C 등온선 깊이의 공간 분포는 동해중층수 두께의 공간 분포와 비슷한 경향을 보이며, 침강이 나타나는 해역에서 더 깊게 나타났고, 반대로 용승이 나타나는 해역에서는 상대적으로 얇게 나타나는 경향을 보였다. 동해중층수가 형성되는 겨울철 동해 북부에서의 표층 수온이 5°C 이하로 내려가는 경우가 종종 발생하는 것을 고려할 때, 1°C~5°C 범위 내로 정의되는 동해중층수의 두께는 1°C 등온선 변화가 가장 큰 영향을 미친다고 판단할 수 있다. 따라서 1°C 등온선과 동해중층수 두께의 변화를 일으키는 침강의 원인인 해수면 고도의 장기 변화와 어떤 관계를 갖는지 확인하였다. Figure 18에서 해수면 고도와 1°C 등온선의 1993년부터 2017년까지 25년간의 변동 시계열을 나타내었고, 파란색 선이 해수면 고도, 초록색 선이 1°C 등온선의 변동을 의미한다. 해수면 고도가 높을 때는 침강이 활발해지면서 1°C 등온선의 수심이 깊어지는 음의 상관관계가 보였으며, 상관 계수도 -0.5868 로 높은 상관성을 나타내었다. 따라서 겨울철 강하게 나타나는 동해중층수의 공간 분포와 1°C 등온선의 공간 분포에서 앞서 언급한 중규모 구조를 유발하는 요인인 해수면 고도와 바람 회전장의 공간 분포와 상당히 유사한 구조를 가지고 있었으며, 특히 블라디보스토크 남부 해역에서 보이는 독특한 쌍극자 구조도 나타났다. 쌍극자 분포의 구조적 특성상 나타나는 변화가 동해중층수 변동과도 물리적으로 잘 일치하며, 동해중층수의 두께 및 1°C 등온선의 변화가 해수면 고도의 장기적 변동도 높은 상관관계를 보이며 상당히 일치하는 결과를 보였다.

Figure 17에는 동경 130~140°의 북위 41.04°와 41.52°에서의 동해중층수 판별 기준 수온인 1℃, 5℃ 연직 단면도를 나타내었다. 10월부터 2월까지의 변동을 보면 침강이 나타나는 해역에서 1℃ 등온선이 깊이 변화를 보이고 있으며, 이는 동해중층수 두께 변화에 크게 기여하는 1℃ 등온선이 앞서 언급한대로 중규모 순환 구조가 발달하면서 침강과 용승의 영향을 받아 변동하는 것을 확인할 수 있다. 다만 5℃ 등온선은 표층에서 이미 5℃ 이하의 물이 나타나는 경우도 있기 때문에 중층수의 깊이 변화에 대해 직접적으로 연결하기에는 다소 무리가 있다고 할 수 있겠다.

향후 동해중층수의 변동과 동해 폭설, 장마 등 기후학적으로 관계가 있는 다양한 대기 현상과의 상관성을 분석해볼 필요가 있을 것으로 판단되며, 동해중층수의 변동을 연구하는 것은 동해에서의 대기-해양 상호작용의 영향 및 기후변화를 분석할 수 있는 중요한 과정이 될 것이라고 사료된다.

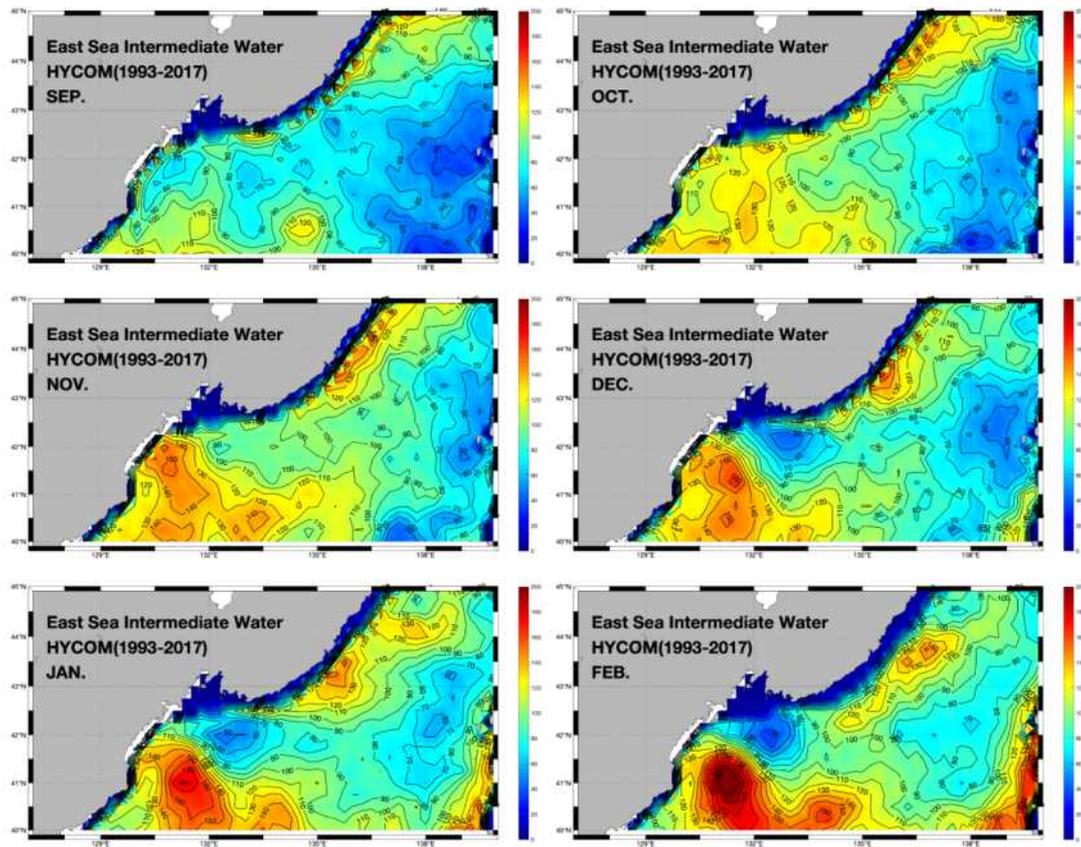


Figure 15. East Sea Intermediate Water thickness distributions from HYCOM reanalysis during September to February averaged from 1993 to 2017

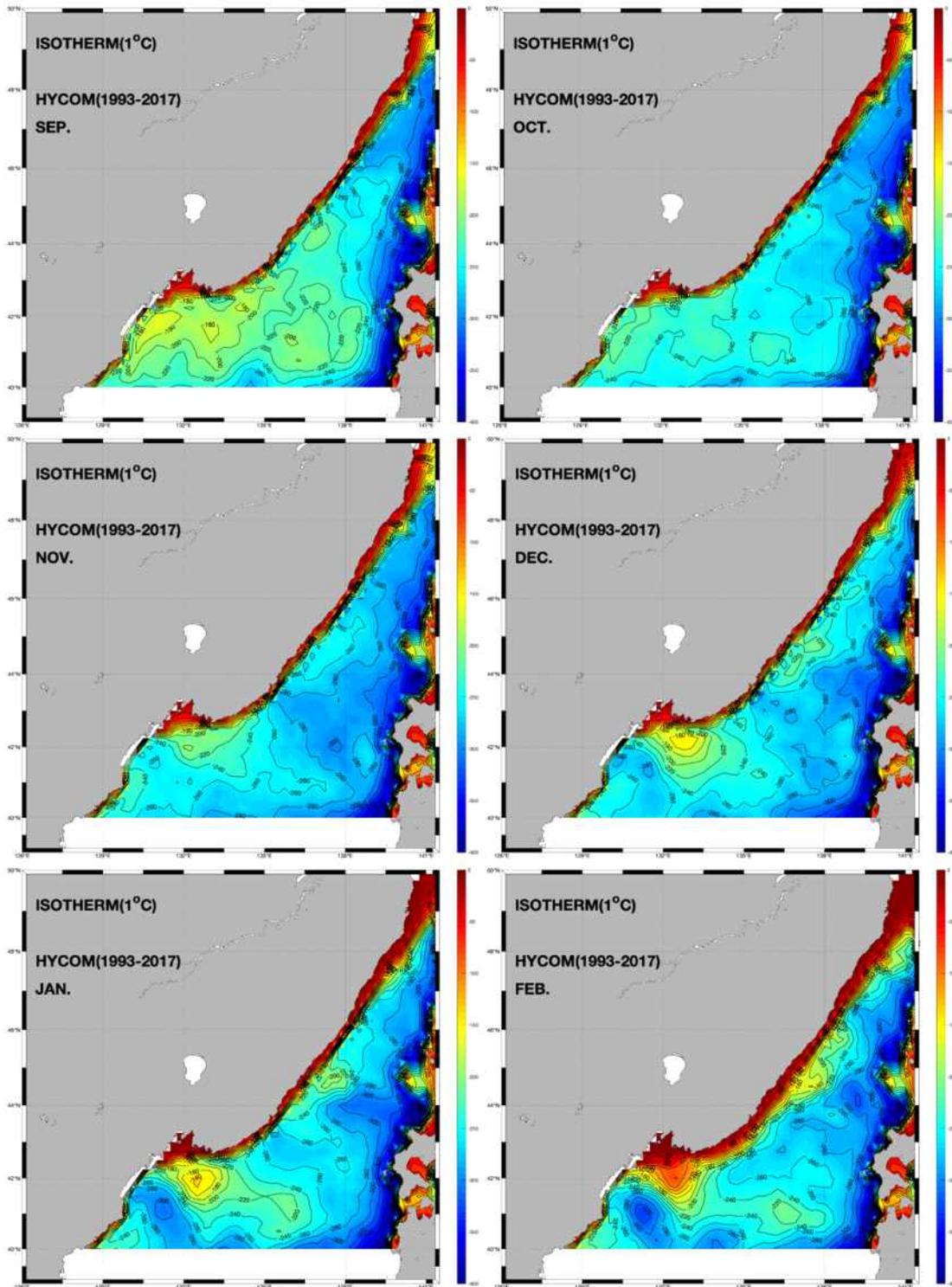


Figure 16. Same as Figure 15 except for 1°C isotherm depth

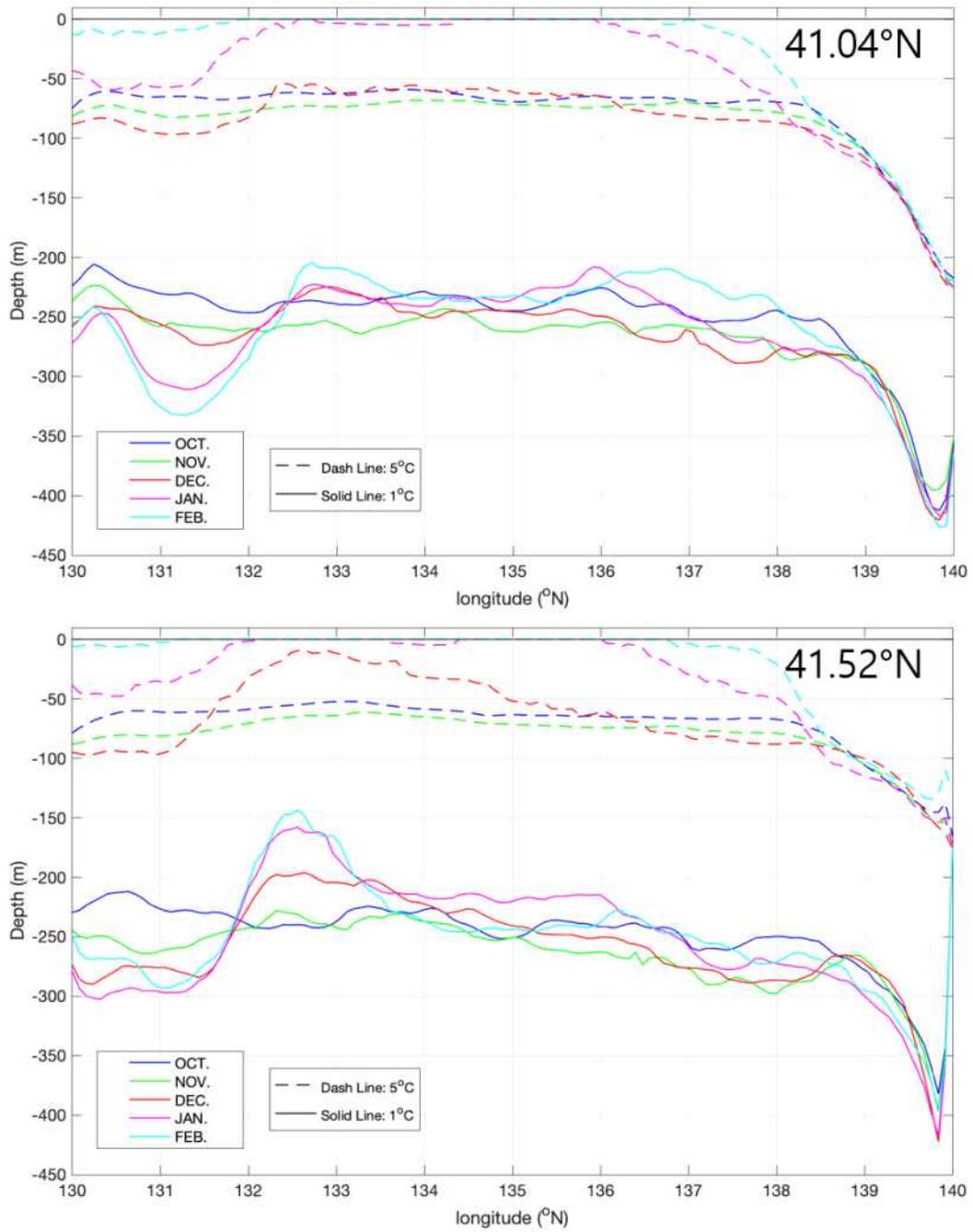


Figure 17. Vertical section for 1°C(solid line) and 5°C(dash line) isotherm depth at latitude 41.04(upper), 41.52(lower)

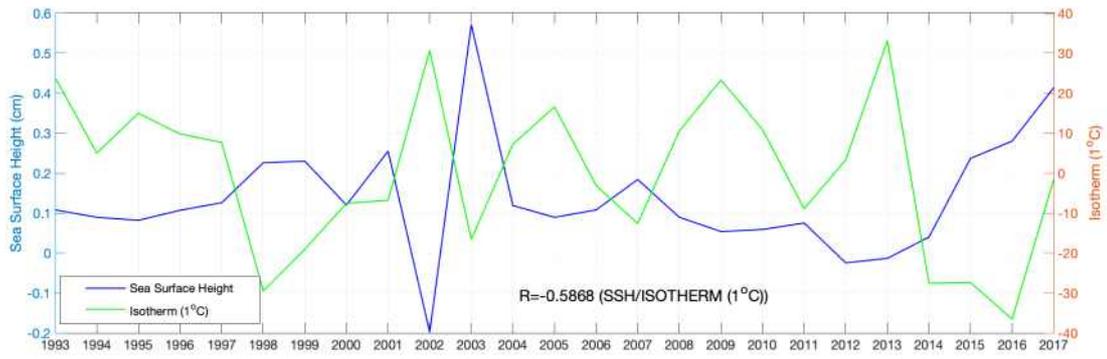


Figure 18. Time series of mean sea surface height and isotherm(1°C) depth over the Northern East Sea

4. 토의

본 연구에서는 위성 관측 자료 및 수치 모델 자료 등을 활용하여 동해 북부에서 나타나는 중규모 순환 구조를 확인하였으며, 겨울철에 강해지는 중규모 구조의 시간적 변동성도 확인하였다. 이러한 계절적 변동은 중규모 구조를 형성하는 요인들의 의해 유발되는데 해양 상층 순환에 큰 영향을 미치는 대기강제력 즉, 바람과 큰 관계를 갖는다고 할 수 있다. 앞서 언급한대로 해수면 고도 분석을 통해 확인한 동해 북부 중규모 구조의 쌍극자 패턴이 바람 회전장의 공간 분포와 거의 일치하는 것을 알 수 있었다. 또한 바람 회전장의 양과 음의 값에서 유도된 해류 순환 양상도 잘 일치하였다. 하지만 중규모 구조는 10월부터 12월에 강하게 나타났으나, 바람 회전장의 월별 기후 값에서는 12월부터 2월까지 강하게 나타났다. 물론 중규모 구조가 나타나는 10월 이후에도 바람 회전장의 영향이 약하게 나타나고 있지만, 두 변수의 관계에는 시간 지연이 존재한다. 이는 중규모 순환 구조의 형성에는 다양한 요인이 복합적으로 작용하기 때문에 나타나는 결과로 사료되며, 동해 북부 전체에서 나타나는 저기압성 순환이 약화된 시기에 바람 회전장이 발달하게 되면서 중규모 구조가 형성된 것으로 생각된다. 다만 그 외에도 동해 북부에서 나타나는 쌍극자 분포에 영향을 미치는 요소에 대해 추가적으로 분석해 볼 필요가 있다고 생각된다. 또한 앞에서 언급한대로 동한 난류가 동해 북부까지 이루어 나타나는 고온·저염의 물이 해수면 고도의 상승을 유발하고 바람 회전장에 의해 그 구조가 강해지는지에 대한 수치 실험을 수행함으로써 중규모 구조의 원인을 좀 더 상세하게 규명할 수 있을 것으로 사료된다.

또한, 동해중층수와 중규모 구조의 쌍극자 패턴을 보이는 공간 분포 역시 일치하는 모습을 보였고, 동해중층수가 약하게 나타나는 10월부터 12월에는 높은 상관관계를 보였지만, 마찬가지로 두 변수에도 최댓값이 나타나는 시기의 시간적인 불일치가 나타난다. 중규모 구조에서 해수면 고도가 높은 해역 즉, 음의 바람 회전장이 분포하는 지역에서는 에크만 수렴으로 인한 침강이 나타나게 된다. 동해중층수 형성 기작에 이러한 메커니즘이 작용하여 상층의 특성을 가진 물이 중층까지 내려가

게 된다. 두 변수의 관계에서 나타나는 시간적 불일치는 상층에서 하강한 물이 동해중층수로 형성되는 또 다른 요인에 대해 추가적으로 분석되어야 10월부터 시작되는 중층수의 형성이 3월까지 이어지는 원인을 밝힐 수 있을 것으로 사료된다.

마지막으로 동해중층수와 그 형성 기작에 영향을 미치는 바람 회전장의 장기 변동 시계열의 상관성을 확인해본 결과, 0.328정도의 상관계수를 보였다. 해수면 고도와 1℃ 등온선과의 상관계수보다는 다소 낮은 상관성을 보였으며, 이는 동해중층수가 형성되기 위해서는 침강이 강하게 나타날 때 두꺼워진다고 생각할 수 있겠지만, 침강이 아무리 강하더라도 동해중층수 수괴의 특성을 갖고 있는 물이 상층에 없으면 동해중층수가 두꺼워지지 않을 수 있다고 사료된다. 다시 말해 동해중층수의 수온과 염분 조건을 갖춘 물이 침강이 강하게 나타나는 해역 상층에 존재해야 침강 강도에 따른 동해중층수가 두꺼워진다고 할 수 있다. 다시 말해 고온·저염의 특성을 갖는 대마 난류의 이류가 얼마나 강한지에 따라 그 해당년도의 바람과 연관 지어 동해중층수의 두께를 판단할 수 있을 것으로 사료된다. 동해중층수의 특성을 갖는 물이 침강 해역까지 얼마나 유입되는지와 침강의 강도를 연결 지어 분석해보면 바람 및 해수면 고도와 동해중층수의 두께와 더 큰 상관성을 발견할 수 있을 것이라고 생각된다.

5. 요약 및 결론

한반도 주변에 위치하고 있으며, 대양과 유사한 특성을 지닌 동해에서의 상층 순환 연구는 주로 동해 남부 해역, 그리고 대규모 순환에 초점을 맞춰져왔다. 동해 남부 해역을 중심으로 연구가 활발하게 이뤄진 가장 큰 이유는 관측 자료가 많이 존재하기 때문인 것으로 사료되며, 동해 전체에서 나타나는 지배적인 대규모 순환에 대한 관심은 중규모 순환에 비해 상대적으로 높을 수밖에 없기 때문에 주로 연구되어 왔던 것으로 생각된다. 하지만 중규모로 나타나는 순환에 대해 이해하고 연구하는 것 역시 동해의 순환 구조와 특성을 이해하기 위해서는 중요하다고 할 수 있으며, 최근 위성을 통한 지속적인 관측을 통해 장기적인 자료가 축적되었고 동해 북부에서 나타나는 중규모 순환에 대한 연구가 가능해지면서 그에 대한 연구도 활발해지고 있다.

본 연구에서도 장기적으로 축적된 위성 자료를 기반으로 해양 및 대기 재분석 자료 등을 활용하여 동해 북부에서 나타나는 중규모 구조를 확인하였고, 이러한 현상이 대기-해양 상호 작용과 어떤 연관성이 있는지 알아보았다. 먼저 동해 북부에서 저기압성 순환을 보이는 대규모 순환이 10월과 11월에 동해 북부에서 바람 회전장이 음의 값을(고기압성 순환) 보이며 약화되었고, 따라서 지역적으로 나타나는 중규모 순환이 상대적으로 강해지게 되었다. 여기에 바람 회전장이 중규모 구조가 나타나는 해역에서 쌍극자 분포로 나타나면서 중규모 순환을 발달시켰을 것이다. 여기에 고온·저염의 특성을 가진 동한 난류가 북상하면서 상대적으로 따뜻하고 저염의 물을 이류시켰고, 이류된 물이 동해 북부의 차가운 물과 만나면서 전선을 형성하게 되었다. 전선이 발생하면서 상대적으로 따뜻한 해역에서는 해수면 고도의 상승으로 이어졌고, 이렇게 상승한 해수면 고도의 영향으로 쌍극자 구조가 더 뚜렷해지게 되었다. 반대로 1월과 2월에는 바람 회전장의 쌍극자 분포가 강하게 분포하더라도 동해 북부 전체에서 저기압성 대규모 순환이 최대를 보이면서 중규모 순환 구조가 소멸되어 나타나지 않는다. 이러한 시간적 변동은 경험직교함수 결과로도 확인할 수 있었다.

해수면 고도의 경험직교함수 분석 결과, 동해 북서부에서의 쌍극자 패턴으로 나타나는 해수면 고도의 독특한 공간 분포를 확인하였다. 해수면 고도의 분포에 따라 해양 순환 양상을 유도할 수 있었고, 그에 따라 전선을 중심으로 양쪽에서 고기압성 순환과 저기압성 순환이 나타나는 것을 확인하였다. 이러한 반대되는 순환은 계절에 따라 변동하며, 특히 겨울철에 우세하게 나타나는 것이 과거 표류 부이 관측의 이동 궤적을 통해서도 확인되었다. 해수면 고도 분포를 통해 확인된 전선은 선형 연구에서 해수면 온도 경도 분포를 통해 확인된 전선과 마찬가지로 겨울철에 뚜렷해지는 계절 변동을 보였으며, 블라디보스토크 남부해역 부근에서 북서-남동 방향으로 나타나는 점 또한 일치하는 것을 알 수 있었다. 바람의 따른 영향으로는 겨울철 바람 회전장이 강해지는 시기에 앞서 언급한 중규모 구조가 강하게 나타나는 유사한 변동 패턴을 보였다.

마지막으로 해수면 고도와 동해에서 특징적으로 나타나는 동해중층수 두께와의 관계를 확인하였다. 해수면 고도의 쌍극자 패턴이 나타나는 해역의 서쪽 부근은 동해중층수가 형성된다고 보고된 바 있는 해역으로써 겨울철 해수면 고도가 높게 나타나는 중규모 구조의 물리적 특성에 따라 겨울철 침강이 나타나며, 상층해수의 침강 작용은 동해중층수 형성 기작과도 연관된다. 이러한 상관성을 확인하기 위해 해수면 고도의 쌍극자 패턴이 강해지는 겨울철 공간분포와 동해중층수 두께의 겨울철 공간분포를 비교해본 결과 그 형태와 발달 위치가 상당한 상관성을 갖는 것을 확인하였으며, 해수면 고도 상승으로 인한 침강 현상이 동해중층수가 두꺼워지는데 기여한다는 물리적 과정과도 연결된다. 또한 동해중층수 두께의 변화를 가장 잘 나타내는 1°C 등온선과 해수면 고도의 장기 변동 경향에서 상관 계수가 -0.58이 넘는 높은 역상관 관계를 보였다. 다시 말해 해수면 고도가 상승하면 1°C 등온선이 깊어지는 변동이 잘 나타나고 있는 것이다. 이렇듯 위성으로 관측된 해수면 고도 자료를 통해 확인한 중규모 구조가 대기 변동과 관련이 있고, 대기 변동이 해양에서의 순환 양상을 유도하고 침강 및 용승 등의 물리적 현상에도 큰 영향을 미친다. 특히, 동해에서는 기후변화의 지시자로 알려진 동해중층수의 형성에 크게 연관되어 있고, 동해중층수의 시간적 변동에도 상당한 영향을 미친다고 볼 수 있다. 따라서 동해중층수의 변동을 대기 현상과 기후 변화 등과 연관 지어 생각해 볼 필요성이 상당하며, 이러한 동해중층수의 변동과

대기-해양 상호작용에 대해 지속적인 연구가 필요하다고 생각된다.

참고문헌

- AVISO (2015), SSALTO/DUACS User Handbook, (M)SLA and (M)ADT Near-Real Time and Delayed Time Products, referece: CLS-DOS-NT-06-034, nomenclature: SALP-MU-P-EA-21065-CLS issue 4.4 edn. http://www.aviso.altimetry.fr/fileadmin/documents/data/tools/hdbk_duacs.pdf
- Chassignet, E.P., H.E. Hurlburt, O.M. Smedstad, G.R. Halliwell, P.J. Hogan, A.J. Wallcraft, R. Baraille, and R. Bleck (2007), The HYCOM (HYbrid Coordinate Ocean Model) data assimilative system. *Journal of Marine Systems* 65:60–83.
- Cummings JA (2005), Operational multivariate ocean data assimilation, *Q J Roy Meteor Soc*, 131(613), 3583-604.
- Danchenkov, M. A., Aubrey, D.G., Feldman, K.L. (2003a), Oceanography of area close to the Tumannaya River mouth (The Sea of Japan). *Pacific Oceanography* 1 (1), 61–69.
- Danchevov, M. A., Lobanov, Y. B., Riser, S.C., Kim, K., Takematsu, M., Yoon, J.-H. (2006), A history of physical oceanographic research in the Japan/East Sea. *Ocenography*, 19, No.3, 18-31.
- Ichiye, T. (1984), Some problems of circulation and hydrography of the Japan Sea and the Tsushima Current. p. 15-54, In *Ocean Hydrodynamics of the Japan and East China Seas*, ed. By T. Ichiye, Elsevier Oceanography Series, 39. Amsterdam.
- Kawabe, Masaki. (1982), Branching of the Tsushima current in the Japan Sea, *Journal of the Oceanographical Society of Japan* 38.2: 95- 107.
- Kim, K., Chung, Y.-Y. (1984), On the salinity minimum and dissolved oxygen maximum layer in the East Sea (Sea of Japan). In: *Ocean Hydrodynamics of the Japan and East China Seas*. Elsevier Science Publishers, Amsterdam, pp. 55-65.
- 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 ocean?, *Geophys. Res. Lett.*, 28(17), 3293-3296.

- Kim, T., S.-H. Choo, J.-H. Moon, and P.-H. Chang (2017), Contribution of tropical cyclones to abnormal sea surface temperature warming in the Yellow Sea in December 2004, *Dynam. Atmos. Oceans*, 80, 97-109, doi:10.1016/j.dynatmoce.2017.10.002.
- Kim, T., Yoon, J.-H. (2010), Seasonal variation of upper layer circulation in the northern part of the East/Japan Sea, *Continental Shelf Research*, 30, 1283-1301.
- Minobe, S., A. Kuwano-Yoshida, N. Komori, S.-P. Xie, and R. J. Small (2008), Influence of the Gulf Stream on the troposphere, *Nature*, 452, 206-209, doi:10.1038/nature06690.
- Naganuma, K. (1977), The oceanographic fluctuations in the Japan Sea. *Kyoe Kagaku*, 9(2), 137-141.
- Orlanski, I., and L.J. Polinsky (1983), Ocean response to mesoscale atmospheric forcing, *Tellus*, 35A, 296-323, doi:10.3402/tellusa.v35i4.11441.
- Park, J.-J., Lim, B.-H. (2018), A new perspective on origin of the East Sea Intermediate Water: Observations of Argo floats, *Progress in Oceanography*, 160, 213-224.
- Park, K.-A., J.-E. Park, B.-J. Choi, D.-S. Byun, and E.-I. Lee (2013), An oceanic current map of the East Sea for science textbooks based on scientific knowledge acquired from oceanic measurements. *The Sea*, 18, 234-265. (in Korean)
- Park, K.-A., Chung, J.-Y., Kim, K. (2004), Sea surface temperature fronts in the East (Japan) Sea and temporal variations, *Geophysical Research Letters*, Vol. 31, L07304, doi:10.1029/2004GL019424.
- Shrenk, L.I. (1874), On the currents of the Okhotsk, Japan and adjacent seas. *Memoires of Emperor Academy of Sciences*, 23(2) Suppl.3, 1-112.
- Uda, M. (1934), The results of simultaneous oceanographical investigations in the Japan Sea and its adjacent waters in May and June 1932. *Journal of the Imperial Fisheries Experimental station*, 5, 57-190.
- Wallace, J. M., T. P. Mitchell, and C. Deser (1989), The influence of sea surface temperature on surface wind in the Eastern Equatorial Pacific: Seasonal and

interannual variability, *J. Climate*, 2, 1492-1499, doi:10.1175/1520-0442(1989)002<1492:TIOSST>2.0.CO;2.

Wentz FJ, Scott J, Hoffman R, Leidner M, Atlas R, Ardizzone J. (2015), Remote sensing systems Cross-Calibrated Multi-Platform (CCMP) 6-hourly ocean vector wind analysis product on 0.25 deg grid, Version 2.0. Remote Sensing Systems; Santa Rosa, CA: [Accessed 31 December 2017]. Available online at www.remss.com/measurements/ccmp.

Yoon, J.-H., Abe, K., Ogata, T., Wakamatsu, Y. (2005), The effects of wind-stress curl on the Japan/East Sea circulation. *Deep Sea Research II*, 52, 1827-1844.

Yoon, J.-H., Kim, Y.-J. (2009), Review on the seasonal variation of the surface circulation in the Japan/East Sea. *Journal of Marine System*, 78, 226-236.

Yoon, Seung-Tae, Kyung-il Chang, Hanna Na, Shoshiro Minobe (2016), An east-west contrast of upper ocean heat content variation south of the subpolar front in the East/Japan Sea, *Journal of Geophysical Research: Oceans*