creative commons

COMMONS DEED

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

dCollection

이학석사 학위논문

한반도 주변 해수 물리적 특성의 장기(1995-2021년) 변화

2023년 08월

서울대학교 대학원

지구환경과학부

김 대 홍

한반도 주변 해수 물리적 특성의 장기(1995-2021년) 변화

지도 교수 남 성 현

이 논문을 이학석사 학위논문으로 제출함

2023년 5월

서울대학교 대학원

지구환경과학부

김 대 홍

김대홍의 이학석사 학위논문을 인준함

2023년 7월

위 원 장 _____조양기_____ (인)

부위원장 _____남성현_____ (인)

위 원 _____나한나_____ (인)

초 록

한반도 인근 해역 해수의 물리적 특성은 시공간적으로 크게 변동하며 이를 이해하는 것은 기후, 생태, 수산적으로 중요하나, 관련 연구에도 불구하고 해역 간 상호연계된 변동성에 대한 이해는 국지적으로 국한되어 왔다. 특히, 한반도 인근 해역 해수의 물리적 특성이 동해 상층 500 m의 열함량(ocean heat content; OHC) 변동과 어떤 양상으로 연계되어 있는지는 잘 밝혀지지 않았다. 이 연구에서는 과거 27년 동안 한반도 인근 해역에서 연 4~6회 수집된 국립해양조사원의 정선해양관측 상층 500 m 수온 및 염분의 비계절 변동 성분 자료를 1년 nested period의 Cyclostaionary Empirical Orthogonal Function (CSEOF) 모드 분석하여 이러한 연계성을 파악하고자 하였다. 주 변수는 동해 상층 500 m OHC로 선정하였고, 수온 및 염분 분석 결과들을 주 변수 Principal Component Time Series (PCT)에 회귀분석하여 연계된 변동 양상을 조사하였다. 동해 상층 500 m OHC를 약 32% 설명하는 제1모드의 PCT는 전체 기간 동안 증가하는 장기 상승 추세를 보였다. 이와 연계된 수온의 공간 분포는 전 해역 모든 수심에서 계절에 무관한 온난화 추세가 두드러지게 나타났고 염분의 공간 분포는 해역과 수심에 따라 고염화 또는 저염화 추세가 나타났다. 특히 가을철에 강하게 나타나는 동해안 수심 150 m 부근 고온·고염화 추세와 제주도 남서쪽 상층 30 m 저염화 추세는 울릉도를 중심으로 나타나는 강한 해수면 높이 상승 추세와 이에 따른 동해안 해역의 시계방향 순환 구조 강화 그리고 동해와 동중국해 해역 바람에 의한 에크만 수송과 연계되어 나타났다. 이 연구는 전 세계 해역 중 가장 빠르게 변화하고 있는 해역인 한반도 인근 해역 간의 연계된 해수의 물리적 특성 공간 패턴을 확인하고 이러한 공간 패턴의 기인을 제시하였다.

주요어 : Global warming, Ocean heat content, Sea temperature, Sea salinity, Long-term variation

학 번 : 2021-24969

목 차

초 록 i
그 림 목 차 iii

1. 서론 1

2. 자료 및 방법 4
2.1. 연구자료 4
2.2. 연구방법 7

3. 결과 10
3.1 장기 변화 추세와 수심 별 분포 10
3.2 해역 별 단면 구조 13
3.3 해역 별 연직 프로파일 구조 17

4. 토의 20
4.1 수온과 염분의 장기 변동 추세 20
4.2 해양 순환의 장기 변화 22

5. 결론 27

참고문헌 30

Abstract 33

그림 목차

Figure 1. National Institute of Fisheries Science serial oceanographic observation data station map. The data acquisition rate after the quality control is shown by the first colormap. The dashed lines indicate the sea regions that are divided for this study and the solid lines indicate representative lines for each region. Bathymetry around the Korean Peninsula is shown by the second colormap (GEBCO2020). Red and blue arrows represents mean major current structures (KHOA). 3

Figure 2. (a) is the Local Range Test for 10 m temperature collected at station 10608 in April. Mean and standard deviation (s) are calculated with the data obtained in the same station, depth, and month, and the data is removed if the data is over ±2s. This test is performed 5 times. The green and red color in the dots represent pass and fail respectively and the red dashed line is the ±2s line. (b) is the Density Inversion Test for the profile collected at station 10207 in 1995 August. The density profile is calculated with the temperature and salinity profiles. When density inversion occurs, the data that has the biggest difference between the original density profile and smoothed density profile is removed. Blue dotted lines are the original data and orange dotted line is the smoothed density profile. The red cross indicates failed data due to density inversion. 6

Figure 3. (a) is the temperature data collected at station 10208 (blue dot) and 10-day temperature climatology of the data (black dot). The 10-day climatology is calculated with the all data applying weight based on the time. (b) is the temperature anomaly time series with original data (blue dot) and linearly interpolated data (red triangle). 7

Figure 4. Seasonally averaged loading vectors and PC time series of the first CSEOF mode of OHC500. The dashed line in the PC time series is the linear

trend. The first CSEOF mode explains about 32% of OHC500 total variance. 11

Figure 5. Regressed loading vectors of temperature for the first CSEOF mode. Each column represents the season and each row represents the depth. Each row has a different R-squared value and a different color range..... 12

Figure 6. Regressed loading vectors of salinity for the first CSEOF mode. Each column represents the season and each row represents the depth. Each row has a different R-squared value and a different color range..... 13

Figure 7. Regressed loading vectors of temperature for the first CSEOF mode. Each column represents the season and each row represents the representative line in each region shown in Figure 1. 15

Figure 8. Regressed loading vectors of salinity for the first CSEOF mode. Each column represents the season and each row represents the representative line in each region shown in Figure 1. 16

Figure 9. Regressed loading vectors of temperature (a, c, e, g) and salinity (b, d, f, h) for the first CSEOF mode. The loading vectors are regionally averaged. The colored symbols represent the season. 19

Figure 10. (a) is the annual mean regressed loading vectors of temperature and salinity for the first CSEOF mode, and (b) is the temperature and the salinity differences between early-year (1995-2008) and late-year (2009-2021). The differences are calculated by subtracting the early-year structures from the late-year structures. 21

Figure 11. Regressed loading vectors of sea surface height(color) and geostrophic current(vector) for the first CSEOF mode. The loading vectors

are seasonally averaged and R-squared value for the sea surface height is 0.74. 25

Figure 12. (a) is the fall season(SON) mean 10 m wind pattern and (b) is the fall season mean regressed loading vector of 10 m wind for the first CSEOF mode. R-squared values for U and V components of 10 m wind are 0.44 and 0.63 respectively. 26

Figure 13. Schematic of the interconnected relationship between fall season air and sea variables which cause high warming rate in ES region, especially in depth around 150 m and high freshening rate in upper 30 m ECS region. Black, cyan, and red arrows represent the geostrophic current trend, the ekman transport trend, and the major warm current. The color represents the fall season salinity obtained by SMAP. 28

1. 서 론

해수의 물리적 특성인 수온과 염분은 기후, 생태계 그리고 해수면 높이에 많은 영향을 주는 변수이다. 매년 많은 인명 피해와 재산 피해를 주는 태풍의 강도는 표층 수온과 수온의 연직 구조에 많은 영향을 받는 것으로 알려져 있으며 표층 수온이 지구온난화로 인해 증가함으로써 태풍의 강도도 보다 강해질 것으로 예측된다(Emanuel, 1986; Thomas et al., 1998; Park et al., 2019). 생태계적으로도 해수의 물리적 특성이 지속적으로 변화함에 따라 해양 생물들의 서식지가 이동되고 있다는 많은 보도자료와 연구들이 있다(Kim et al., 2007; Son et al., 2020). 지속적인 상승으로 인해 영토 유실과 경제적 피해를 주는 해수면 높이 또한 과거보다 수온이 상승함에 따라 해수의 부피가 팽창하여 많이 상승하였다고 보고되었다(Antonov et al., 2005, Levitus et al., 2012). 이러한 이유들과 선행연구들로 보았을 때, 해수의 물리적 특성의 변동을 이해하는 것이 미래 수문학적으로 매우 중요한 것을 알 수 있다.

특히 한반도 인근 해역의 해수 물리적 특성은 전 지구적으로 보았을 때도 빠르고 큰 변화를 겪고 있다. Belkin (2009)는 어획량이 높은 대규모 해양 생태계 해역들의 1982년과 2006년 표층 수온의 차이를 비교하여 각 해역들의 온난화 정도를 평가하였는데 한반도 인근 해역인 동해와 동중국해는 'super-fast warming' 그리고 황해는 'fast warming' 해역으로 분류되었다. NOAA에서 제공하는 1993-2021년 기간의 열함량 차이를 확인하였을 때도 전 세계 평균은 0.37(±0.05) W/m^2인 반면 동해는 최대 6 W/m^2로 큰 차이를 보였다(NOAA, 2020).

따라서, 한반도 인근 해역의 해수 물리적 특성을 이해하기 위해 많은 연구들이 진행되었다. 우선 Seong et al. (2010)은 41년(1968-2008년) 기간의 국립수산과학원(National Institute of Fisheries Science, 이하 NIFS) 정선해양관측 자료를 이용하여 수층별 수온

자료를 분석하여 수온의 장기변동 특성이 수심과 해역에 따라 달리한다는 것을 확인하였고 Lim and Chang(2016)은 32년(1983-2014년) 기간의 NIFS 정선해양관측 자료를 이용하여 수온과 염분의 해역 별 종합 회귀 도표를 제시하고 이를 통해 기간에 따른 선형 추세가 다르다는 것을 확인하였다.

이러한 해수 물리적 특성을 좀 더 자세하게 파악하기 위해 해역을 나누어 분석한 연구 결과들도 많다. Kim et al. (2018) 은 황해와 동중국해의 1982-2014년 기간 위성 관측 표층 수온 자료를 Cyclostationary Orthogonal Function (이하 CSEOF) 모드 분석을 진행하였다. 첫번째 CSEOF 모드 Principal component time series (PCT) 결과를 통해 연구 해역의 표층 수온이 1982-1998년 기간에는 상승 추세(1.26 per decade)가 있었지만 그 후 기간에는 하강 추세(-0.91 per decade)가 나타나는 것을 확인하였고 이러한 변동이 1998년 이후 겨울철 북풍이 강화되었고 북쪽의 차가운 공기가 유입됨으로써 해양 열속이 대기로 전달되어 나타났다고 제시하였다. Lee and Park (2019)은 동해의 37년(1971-2010년) 위성 관측 표층 수온 자료를 통해 동해의 표층 수온이 처음 10년에는 빠르게 증가하였지만 그 후 20년은 처음보다 완만하게 증가하는 것을 확인하였다. 하지만 계절별로 나누어 보았을 때 여름철에는 수온 상승 추세가 감소하지 않았고 겨울철에는 동해 특정 해역에서 급격한 수온 감소 현상이 나타나는 것을 확인하였다. 이러한 수온 급감 현상이 북극진동(Arctic Oscillation, AO) 지수와 밀접한 관계가 있다는 것도 확인하였다.

하지만 선행 연구들은 한반도 인근 해의 해수 물리적 특성이 어떻게 연계되어 변동하는 지는 확인하지 못하였다. 한반도 인근 해역들은 쿠로시오 해류의 지류인 고온고염의 TWC(Tsushima Warm Current, 이하 TWC)의 영향을 받는다. 황해와 동중국해는 TWC의 지류인 황해난류(Yellow Sea Warm Current)에 영향을 받는다고 알려져 있으며 동해는 TWC의 지류인 동한난류(East Korea Warm Current, 이하

EKWC)에 영향을 받는다고 알려져 있다(Cho and Kim, 1996; Fei et al., 2009). 즉 한반도 주변 해역 해수 물리적 특성은 어느 정도 같은 기원의 해수를 공유하고 있으므로 분명히 서로 연계되어 변동하는 부분이 있을 것 이다. 이 연구에서는 전 세계 해역 중 빠르게 변화하고 있는 한반도 인근 해역의 연계된 물리적 변동 특성을 파악하고자 하였다.

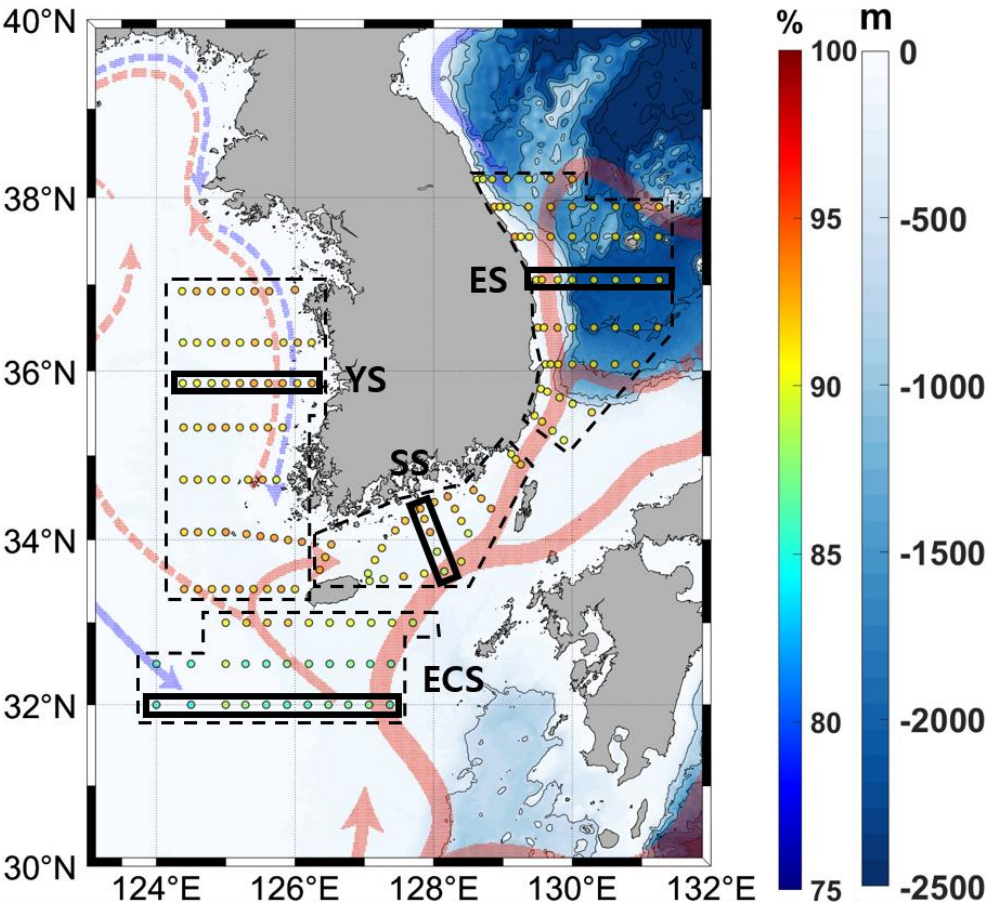

Figure 1. National Institute of Fisheries Science serial oceanographic observation data station map. The data acquisition rate after the quality control is shown by the first colormap. The dashed lines indicate the sea regions that are divided for this study and the solid lines indicate representative lines for each region. Bathymetry around the Korean Peninsula is shown by the second colormap (GEBCO2020). Red and blue arrows represent mean major current structures (KHOA).

2. 자료 및 방법

2.1 연구 자료

이 연구에서는 한반도 인근 해의 연계된 해수 물리적 특성 변동을 확인하기 위해 1995-2021년 기간의 NIFS 정선해양관측 수온 및 염분 자료를 사용하였다. NIFS는 최대 수심이 500 m인 14개 표준 수심으로 자료를 제공 중이며 동해, 황해, 한반도 남해 연안 해역은 연 6회, 동중국해에서는 연 4회 자료를 수집하였다(Figure 1). NIFS 정선해양관측 자료는 1967년부터 시작되지만 1995년 자료부터 사용은 한 것은 1995년 이후로 북위 33도 아래 쪽 동중국해 정점들이 수집되기 시작하였고 CTD 관측 장비가 투입됨으로써 염분의 오차가 많이 줄었기 때문이다(Park et al., 2021).

비록 1995-2021년 기간 동안 CTD 관측 장비가 투입되고 안정적으로 관측이 이루어졌음에도 정선해양관측 자료에는 비정상적인 자료가 존재하고 날씨로 인해 관측이 불가했던 기간이 있기 때문에 자료에 대한 품질 처리와 내삽을 진행하였다. 첫 번 째 품질 처리 과정은 Local Range Test로 각 정점의 동일 수심의 동일 월에 취득된 자료를 평균과 표준편차(σ)를 구하여 ±2σ가 넘어가는 값들을 제거하였다(Figure 2.a). Local Range Test는 총 5번 진행하였다. 그 다음 품질 처리 과정은 Density Inversion Test로 각 정점에서 같은 날 취득된 수온 및 염분 수직 프로파일에서 밀도 값을 구한 후 인접한 수층들의 밀도 값을 비교하여 밀도 역전 여부를 파악하였다. 밀도 역전이 발생했을 경우 이동평균한 밀도 수직 프로파일과 원 밀도 수직 프로파일의 차이를 구해 차이가 가장 큰 수층의 값을 제거하였다(Figure 2.b). 품질 처리가 끝난 후 자료 취득률이 80%가

넘는 186개의 정점들만을 가지고 결측 구간과 품질 처리로 인해 제거된 자료를 메꾸기 위해 내삽을 진행하였다(Figure 1). 내삽은 각 정점의 수심별 10일 간격 평균을 구하여 원 자료에서 10일 간격 평균을 제거한 후 편차 영역에서 선형적으로 내삽을 진행하였다(Figure 3.b). 10일 간격 평균을 구할 때는 동일 정점과 수심에서 취득된 모든 자료를 사용하여 시간에 따른 정규 분포 형태의 가중치를 적용하여 계산하였다(Figure 3.a).

한반도 인근 해의 연계된 해수 물리적 특성 변동이 해양 순환과 어떻게 연계되어 변동하는 지 확인하기 위해 Copernicus Marine Environment Monitoring Service에서 제공하는 다중 위성 고도계 관측 해수면 높이와 지형류 자료(SSALTO/DUACS), 그리고 European Centre for Medium-Range Weather Forecasts에서 제공하는 ERA5 재분석장 자료 중 10 m 바람장 자료를 사용하였다. 위 자료들의 해상도는 0.25° ×0.25° 이며 1995-2021년 기간의 월 간격 자료이다.

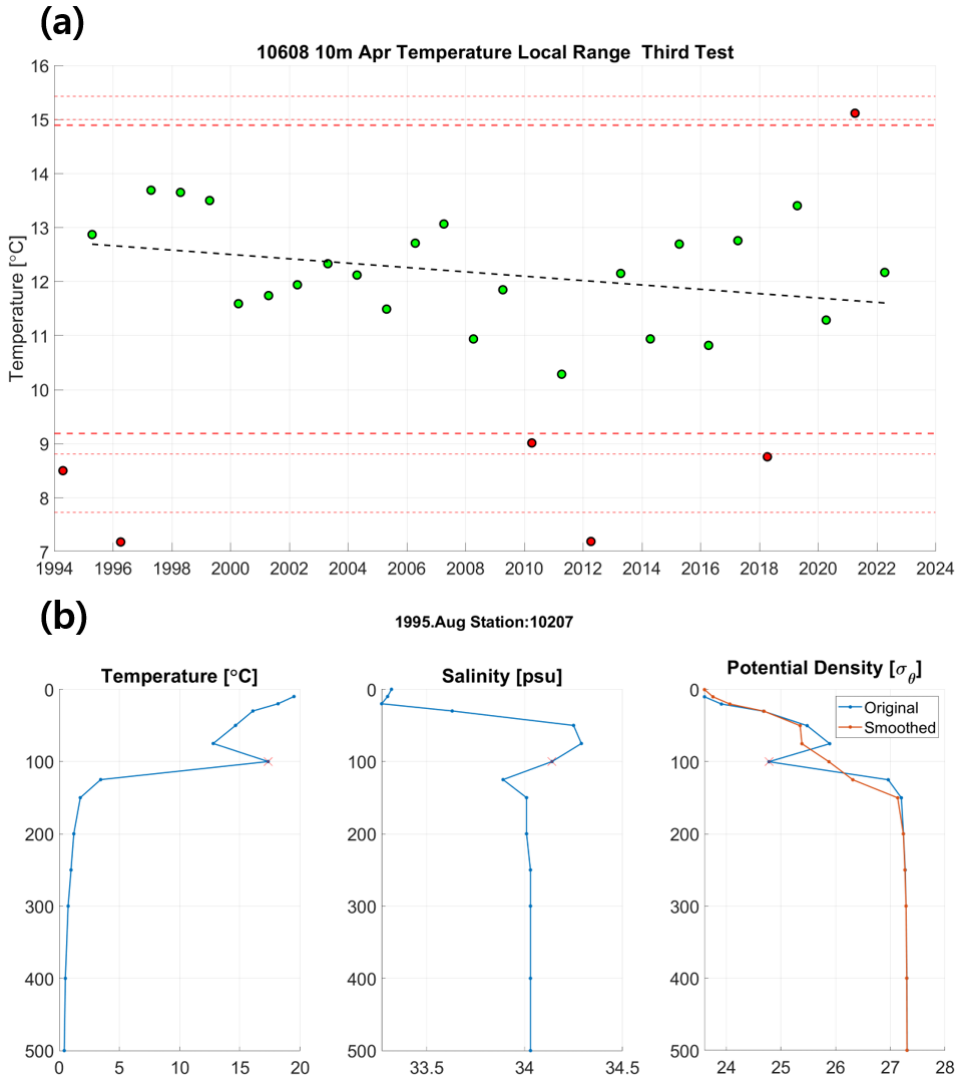

Figure 2. (a) is the Local Range Test for 10 m temperature collected at station 10608 in April. Mean and standard deviation (s) are calculated with the data obtained in the same station, depth, and month, and the data is removed if the data is over ±2s. This test is performed 5 times. The green and red color in the dots represent pass and fail respectively and the red dashed line is the ±2s line. (b) is the Density Inversion Test for the profile collected at station 10207 in 1995 August. The density profile is calculated with the temperature and salinity profiles. When density inversion occurs, the data that has the biggest difference between the original density profile and smoothed density profile is removed. Blue dotted lines are the original data and orange dotted line is the smoothed density profile. The red

cross indicates failed data due to density inversion.

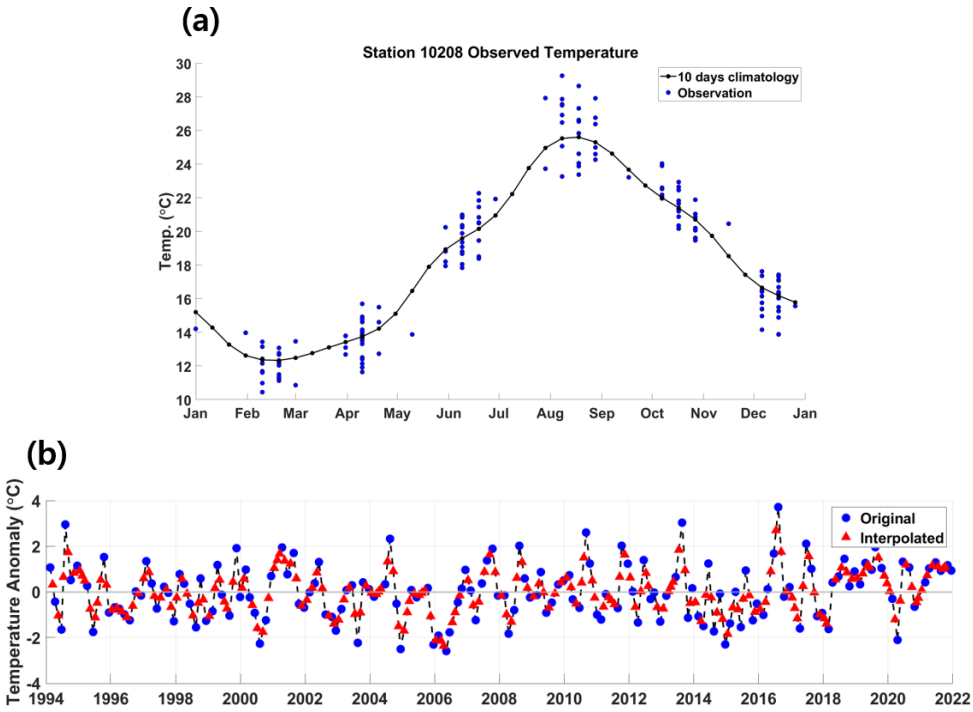

Figure 3. (a) is the temperature data collected at station 10208 (blue dot) and 10-day temperature climatology of the data (black dot). The 10-day climatology is calculated with the all data applying weight based on the time. The weight follows normal distribution. (b) is the temperature anomaly time series with original data (blue dot) and linearly interpolated data (red triangle).

2.2 연구 방법

한반도 인근 해의 해수 물리적 특성이 동해 상층 500 m 열함량(Ocean Heat Content, 이하 OHC500)과 어떻게 연계되어 변동하는 지 확인하기 위해 정선해양관측 동해 정점 중 수심 500 m까지 자료가 취득 된 정점들의 자료를 가지고 OHC500을 식 (1)과 같이 계산하였다.

$$\boldsymbol{OHC = C_p(T,S,0)\rho(T,S,0)\int_{-500}^{0} T(z)dz} \quad (1)$$

식 (1)에서 C_p는 표층 해수의 비열로 4×10^3 J(℃*kg)$^{-1}$이며 ρ 는 표층 해수 밀도로 1025 kg(m)$^{-3}$의 값으로 계산하였다(Levitus et al., 2005).

연계성을 확인하고자 모든 변수에 CSEOF 분석법을 적용하였다. CSEOF 분석은 nested period를 정해 자료의 통계적 성분의 주기를 정할 수 있기에 지구물리 변수와 같이 강한 주기를 가지는 변수들을 분석하기 좋은 방법이다(Kim et al., 1996). CSEOF 분석은 식 (2)와 같이 시공간 자료를 nested period 만큼의 주기를 가지는 cyclostationary loading vectors (CSLVs)와 이것들의 시간적 위상을 나타내는 principal component time series (PCT)로 분해한다.

$$\boldsymbol{T(r,t) = \sum_n B_n(r,t)T_n(t)} \quad (2)$$

식 (2)에서 $T(r,t)$, $B_n(r,t)$, $T_n(t)$는 각각 시공간 자료, CSLVs, PCT를 나타내고 n, r, t는 각각 모드 숫자, 공간, 시간을 나타낸다. 이 연구에서는 CSLVs의 nested period를 12개월로 설정하여 각 모드 당 12개의 공간적인 패턴이 존재한다.

하지만 각 변수의 PCT는 서로 매우 다른 변동을 가지기 때문에 물리적으로 일관된 변동을 보기 위해서는 주 변수를 선정하고 그 외의 예측 변수의 CSEOF 결과를 주 변수 CSEOF PCT에 회귀시켜야 한다. CSEOF 회귀 분석법은 식 (3)과 같이 M개 모드의 예측 변수 PCT가 n번 째 주 변수 PCT에 회귀 되었을 때 가장 작은 오차를 가질 수 있게 하는 회귀 계수를 계산한 후 식 (4)와 같이 계산된 회귀 계수를 예측 변수 CSLVs에 곱하여 진행된다.

$$\boldsymbol{T_n(t) = \sum_{m=1}^{M} \alpha_m^{(n)} P_m(t) + \varepsilon^{(n)}(t)} \quad (3)$$

$$\boldsymbol{C_n^{(reg)}(r,t) = \sum_{m=1}^{M} \alpha_m^{(n)} C_m(r,t)} \quad (4)$$

이 때의 $\alpha_m^{(n)}$은 회귀 계수이고 $P_m(t)$, $\varepsilon^{(n)}(t)$, $C_m(r,t)$, $C_n^{(reg)}(r,t)$는 예측 변수의 PCT, 회귀 오차, CSLVs 그리고 회귀된 CSLVs를 나타낸다. 따라서 예측 변수의 $C_n^{(reg)}(r,t)$ 는 주 변수의 PCT를 공유한다고 해석할 수 있다. 이 연구에서는 주 변수를 OHC500으로 선정했고 OHC500 CSEOF 첫 번째 모드 결과에 예측 변수(수온, 염분, 해수면 높이, 지형류, 10 m 바람)들의 CSEOF 10개 모드를 가지고 회귀 분석을 진행하였다. 또한 모든 변수의 월별 평균을 제거한 후 CSEOF 분석을 진행하였다.

각 해역 마다 대표 단면 그림과 수직 프로파일을 나타내기 위해 해양관측정선 자료를 총 4개의 해역(ES, SS, YS, ECS)으로 나누고 각 해역 마다 대표 정선을 선정하였다. 대표 단면은 Figure 1에서 굵은 선으로 표시하였고 대표 프로파일은 Figure 1의 점선 안의 정점 자료들을 평균하여 나타내었다.

3. 결　　과

3.1 장기 변화 추세와 수심 별 분포

계절 성분을 제거한 1995-2021년 기간의 OHC500을 nested period 12개월의 CSEOF 분석을 통해 12개의 CSLVs와 PCT로 분해하여 나온 첫 번째 모드 결과를 분석하였다(Fig 4.). PCT의 위상은 음에서 양으로 증가하는 형태로 0.08 yr^{-1}의 선형 추세를 가지며 자료 기간 초반인 1996년에 negative peak가 나타나고 자료 기간 후반인 2019년에 positive peak가 나타났다(Fig 4.b). 12개의 CSLVs를 4계절로 나누어 확인하였을 때. 전 계절 평균적으로 OHC500이 양의 양상을 띄고 있다(Figure 4.a). 특히 울릉도 밑 쪽으로 OHC500 양의 양상 코어가 형성되고 계절에 따라 연안/외해 쪽으로 이동하는 것을 확인하였다. PCT의 선형 추세와 계절별 OHC500 CSLVs 평균을 곱하였을 때, 봄(MAM), 여름(JJA), 가을(SON). 겨울(DJF)의 OHC500 상승 추세가 4.79×10^{7} J/(m2*yr), 5.81×10^{7} J/(m2*yr), 5.56×10^{7} J/(m2*yr), 4.69×10^{7} J/(m2*yr)로 여름철에 가장 강하게 나타났다. 첫 번 째 모드는 비계절 성분의 OHC500의 전체 변동성을 약 31.8% 설명하고 있고 장기 증가 추세를 가지는 PCT와 평균적으로 양의 양상을 가지는 CSLVs로 보았을 때 지구온난화를 나타낸다.

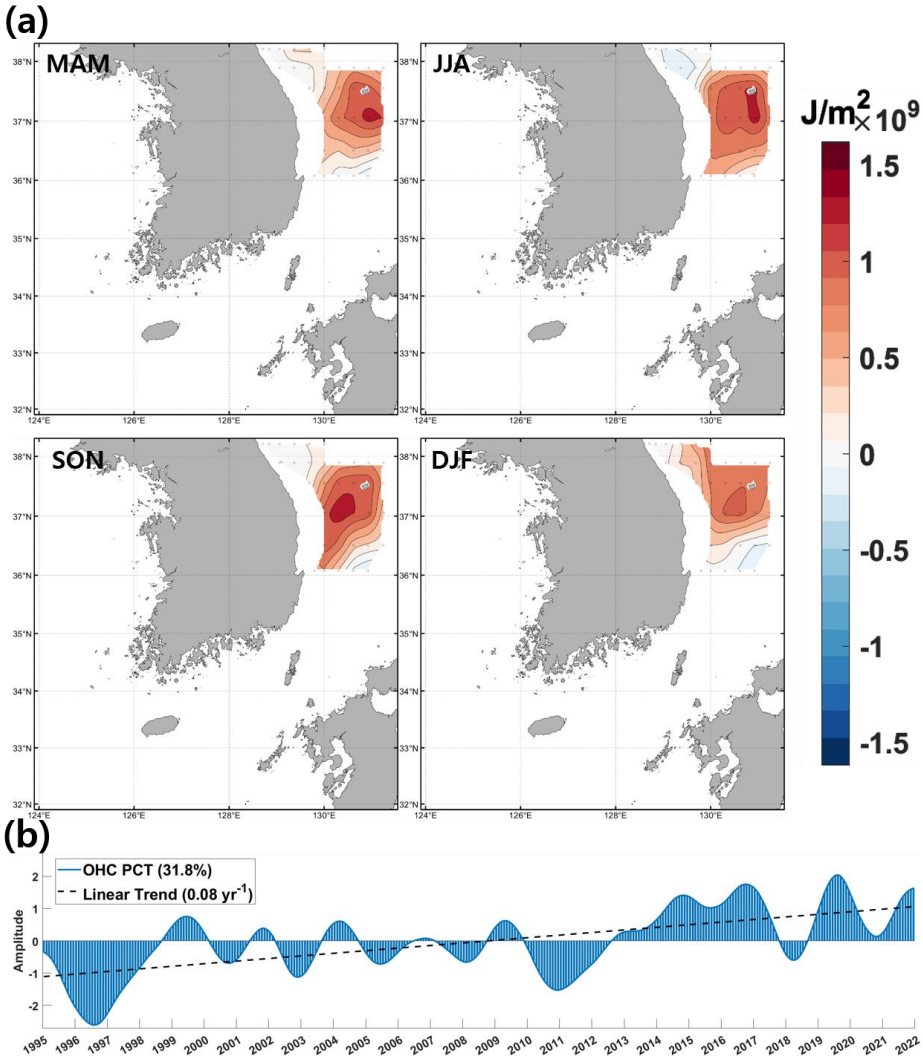

Figure 4. Seasonally averaged loading vectors and PC time series of the first CSEOF mode of OHC500. The dashed line in the PC time series is the linear trend. The first CSEOF mode explains about 32% of OHC500 total variance.

회귀 분석된 수온 CSLVs는 전 계절 모든 수심에서 평균적으로 양의 양상이 나타났고 수심 150 m에서 양의 양상이 가장 강하게 나타남과 동시에 R-squared 값도 가장 높게 계산되었다(Fig 5.). 표층 수온 CSLVs는 봄, 겨울철에 북위 38° 연안 부근에서 양의 양상이 비교적 강하게 나타났다. 50 m 수심 수온 CSLVs는 여름철과 가을철에 EKWC가 흐르는 동해 연안 북위 36° -37.5° 부근에서 양의 양상이

강해졌다. 수심 150 m와 500 m 수온 CSLVs는 OHC500 CSLVs 결과와 비슷하게 양의 양상 코어가 울릉도 남부 쪽에서 형성이 되었다. 수심 500 m를 제외하고 모든 수심에서 계절에 따라 CSLVs가 음의 양상인 해역도 존재하였다.

회귀 분석된 염분 CSLVs는 상층 50 m에서 평균적으로 음의 양상이 나타나고 제주도 남서부 쪽에서 음의 양상이 강하게 나타나지만 계절에 따라 제주도 남동부 쪽에서 양의 양상이 나타났다 (Figure 6.). 150 m 수심에서는 울릉도를 중심으로 양의 양상이 도드라지게 나타났으며 R-squared 값도 0.81로 다른 수심의 염분 CSLVs 보다 비교적 높게 계산되었다. 500 m 수심에서는 반대로 울릉도 중심으로 음의 양상이 나타났다.

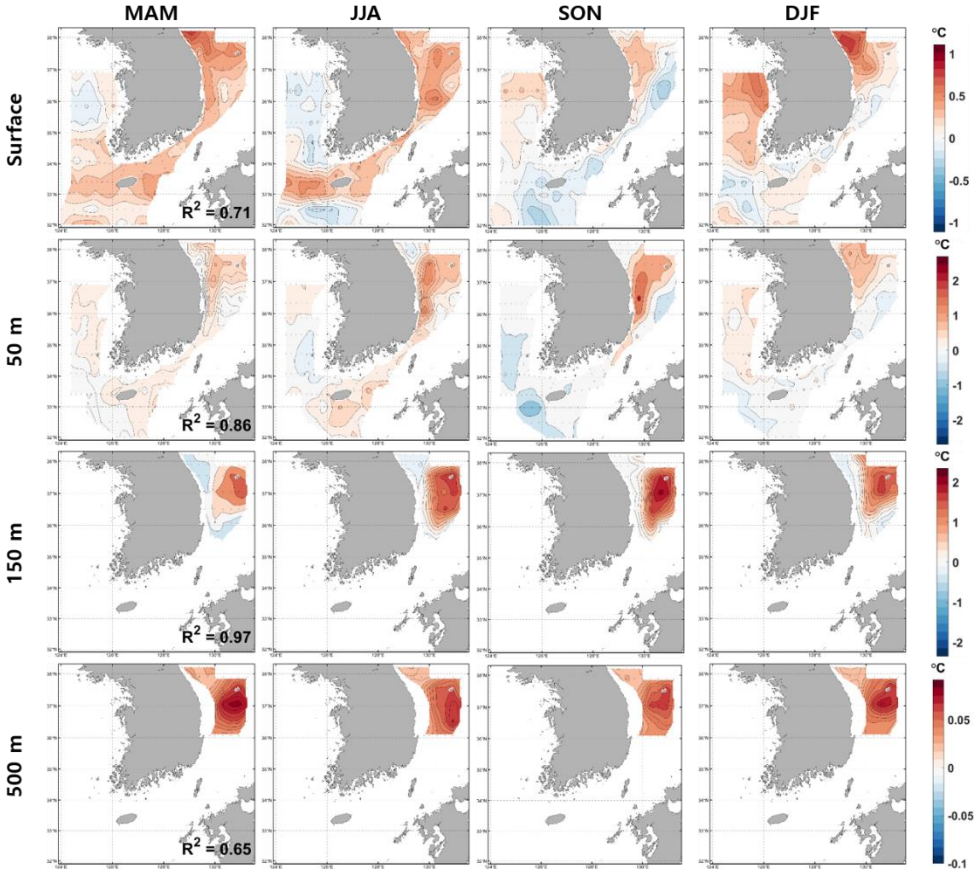

Figure 5. Regressed loading vectors of temperature for the first CSEOF mode. Each column represents the season and each row represents the depth. Each row has a different R-squared value and a different color range.

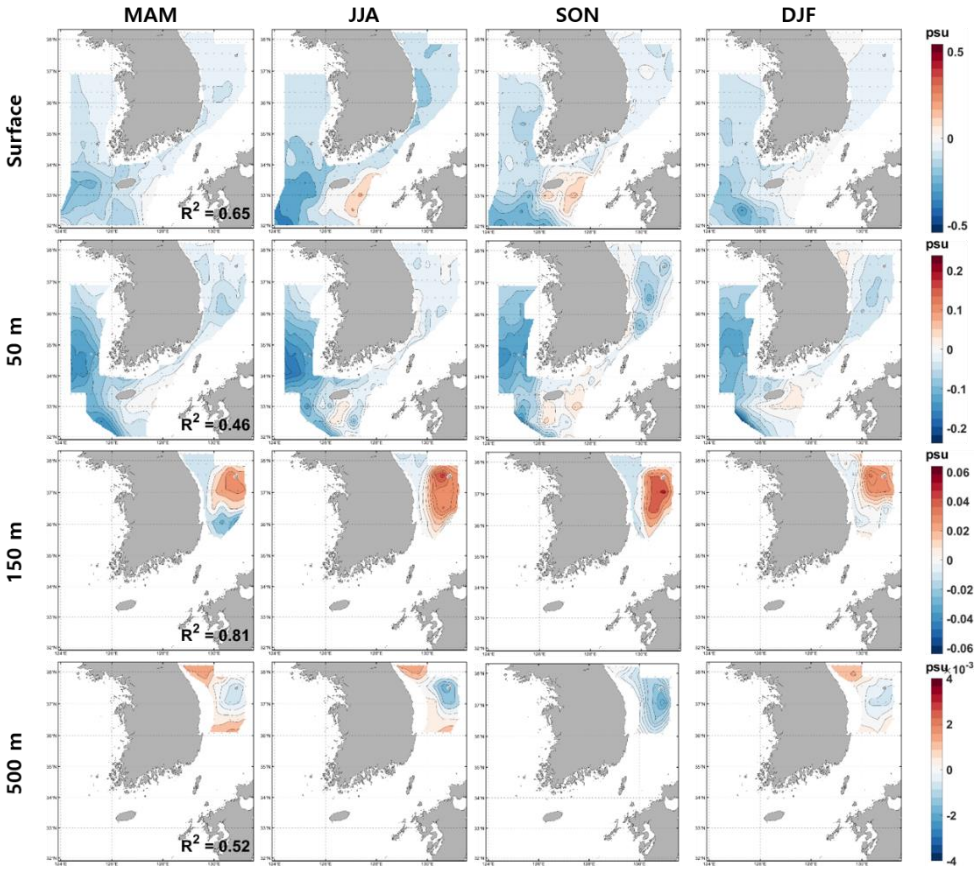

Figure 6. Regressed loading vectors of salinity for the first CSEOF mode. Each column represents the season and each row represents the depth. Each row has a different R-squared value and a different color range

3.2 해역 별 단면 구조

수심 별 구조를 보다 더 자세히 분석하기 위해 해역 별 대표 정선을 선정하여 수온과 염분의 CSLVs 단면 구조를 나타내었다 (Figure 6., Figure 7.).

ES 해역 정선의 수온 CSLVs 4계절 내내 수심 100-300 m 구간에서 양의 양상이 강하게 나타났다. 이러한 양의 양상 코어 구조가 연안(동경 129.5-130˚)과 외해(동경 130.5-131.5˚)에서 다르게 나타나는데 연안 쪽에서는 외해보다 더 얕은 수심에 양의 양상 코어가

위치하고 외해에서는 연안보다 더 깊은 수심에서 나타난다. 또한 평균적으로 외해 쪽 코어가 연안 쪽 코어보다 높게 나타났다. 염분 CSLVs 또한 마찬가지로 수심 100-300 m 구간에서 양의 양상이 나타났지만 수온과 다르게 상층 50 m에서는 음의 양상이 나타났다. 수온과 염분 CSLVs 모두 수심 약 300 m 아래로는 상층 300 m 변동에 비해 변동폭이 매우 낮게 나타났다.

SS 해역 정선의 수온 CSLVs는 계절에 따라 양상이 달리하는 구조를 보였다. 여름철에 양의 양상이 가장 강해지며 특히 수심 30-60 m 구간에서 코어가 나타났다. 가을철에는 연안 쪽 수심 40 m 부근에서 양의 양상이 강하게 나타나지만 그 외 해역에서는 음의 양상이 나타났다. 염분 CSLVs는 4 계절 내내 연안 상층 부근에서 음의 양상이 나타나고 계절에 따라 양상 구조가 바뀌는 복잡한 구조가 보였다.

ECS 해역 정선의 수온 CSLVs는 봄과 겨울철에 양의 양상이 평균적으로 나타났다. ECS 해역 정선의 경우 다른 해역 정선과 다르게 염분 CSLVs 변동이 크게 나타났다. 4 계절 내내 음의 양상이 나타나고 여름철에 음의 양상 코어가 동경 124.5° 부근에 나타나고 가을철에는 동쪽으로 더 확장되는 형태를 보인다.

YS 해역 정선의 수온과 염분 CSLVs 는 각각 양의 양상과 음의 양상을 4계절 내내 유지하고 계절에 따라 변동 크기가 다르게 나타났다.

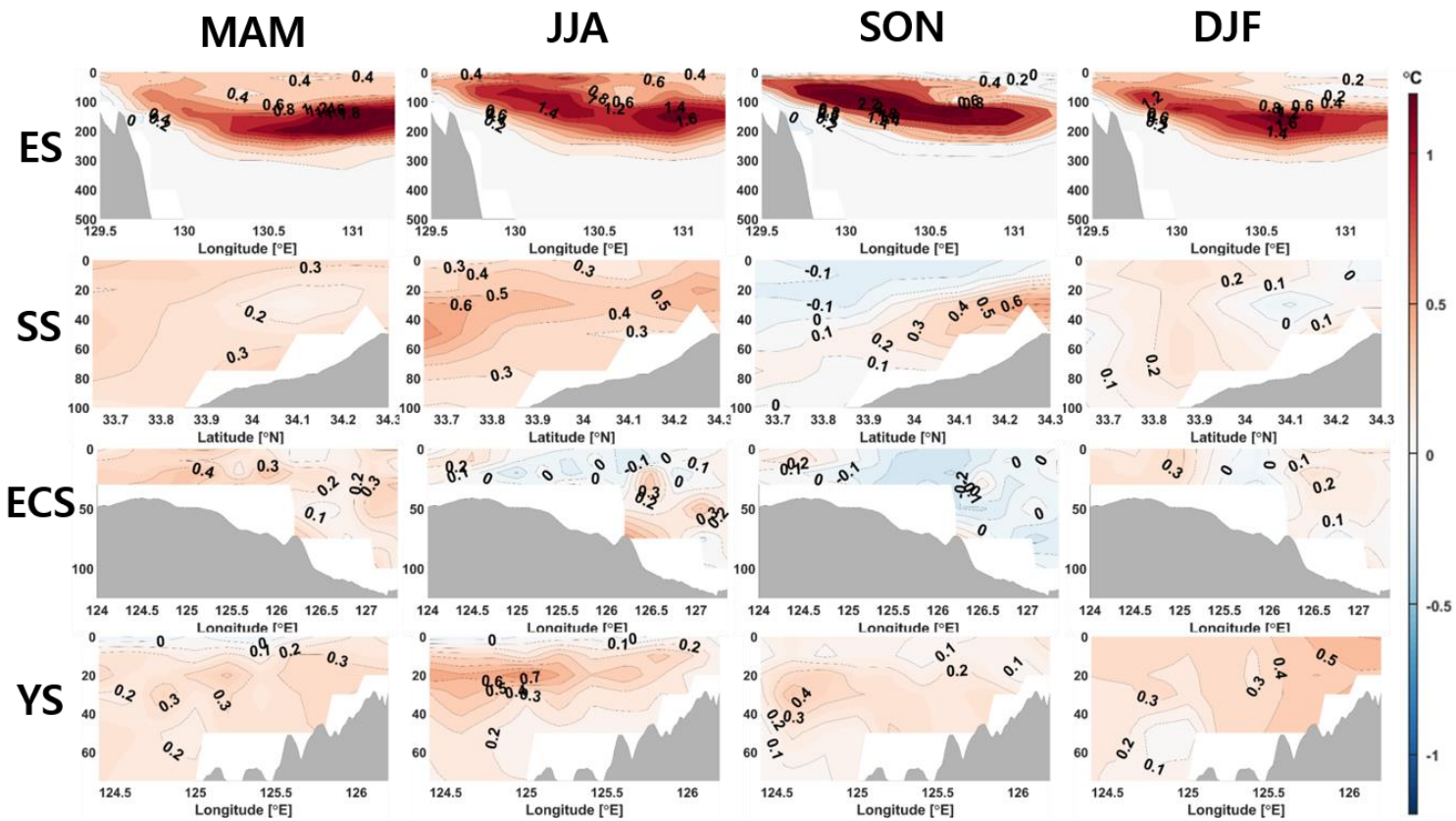

Figure 7. Regressed loading vectors of temperature for the first CSEOF mode. Each column represents the season and each row represents the representative line in each region shown in Figure 1.

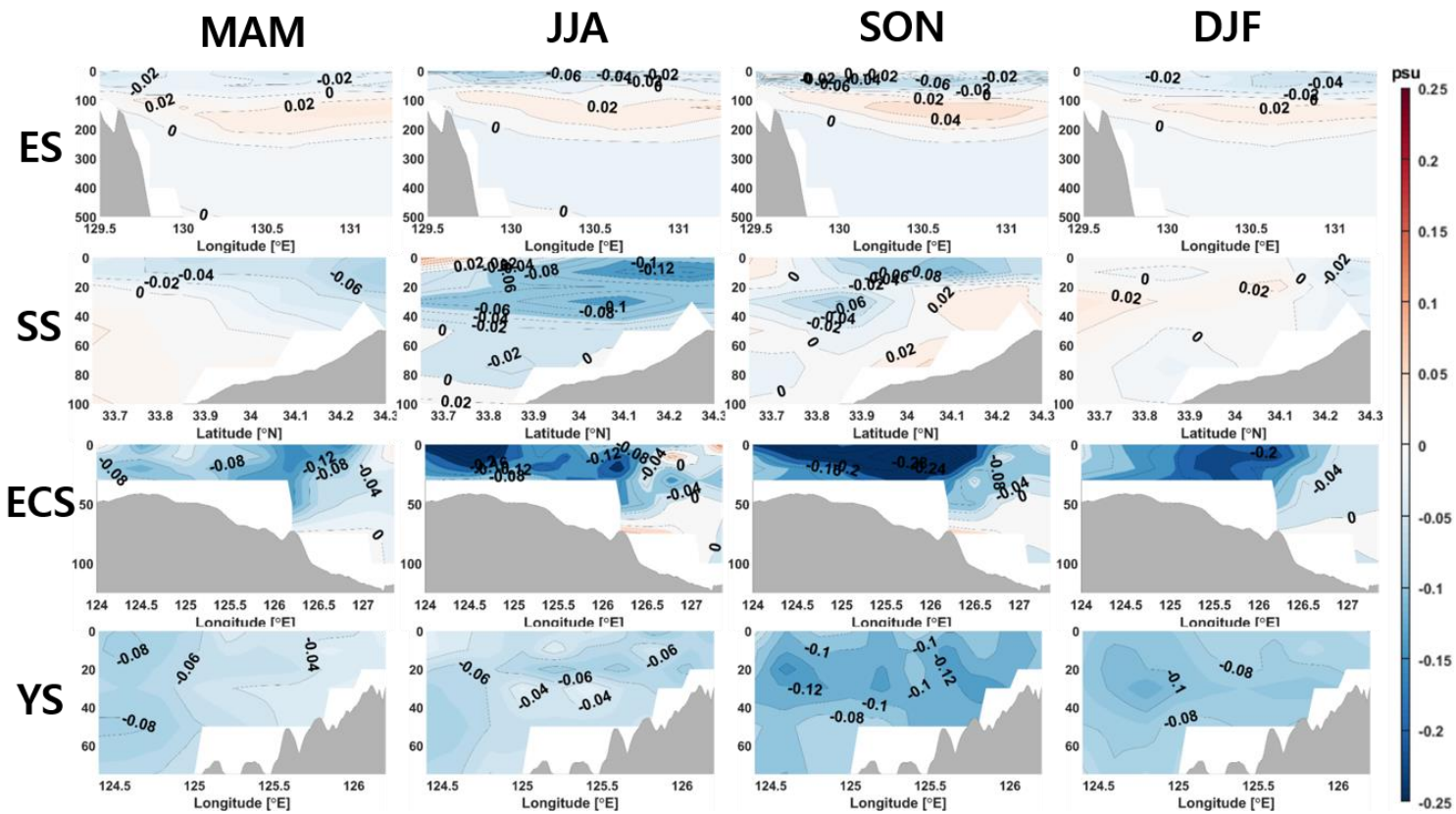

Figure 8. Regressed loading vectors of temperature for the first CSEOF mode. Each column represents the season and each row represents the representative line in each region shown in Figure 1.

3.3 해역 별 연직 프로파일 구조

해역 별 평균적인 수온과 염분의 변동 양상을 파악하기 위해 영역 평균하여 각 해역의 대표 연직 프로파일 구조를 나타내었다(Figure 8.).

ES 해역의 수온 CSLVs 연직 프로파일 구조는 표층에서부터 150 m 수심까지는 수심이 깊어질수록 변동 크기가 증가하고 그 밑의 수심으로는 다시 감소하는 구조를 가진다(Figure 9.a). 염분 CSLVs 연직 프로파일 구조는 75-200 m 수심 구간과 그 외의 수심 구간이 부호를 달리하는 구조가 나타나는데 특히 상층 50 m 위로는 음의 양상이 강하고 125 m 수심 부근에는 양의 양상이 강하게 나타났다(Figure 9.b). 수온과 염분 CSLVs 모두 4계절 내내 수심 125 m를 중심으로 positive peak가 나타나는데 그 peak가 수온과 염분 모두 가을철에 가장 강하게 나타나며 그 다음으로 여름철에 강하게 나타났다.

ECS 해역의 수온 CSLVs 연직 프로파일 구조는 수심에 따른 변동은 크게 안 나타나지만 계절에 따른 변동 차이가 비교적 크게 나타났다. 특히 봄과 여름철에 수온 양의 양상이 크게 나타났고 가을철에는 변동 크기가 0에 가깝고 음의 양상을 띠는 수심도 있었다(Figure 9.c). 염분 CSLVs 구조는 수심 상층 30 m 구간에서 4계절 내내 음의 양상이 강하게 나타났으며 수심 30 m 아래로는 음의 양상 크기가 급격히 줄어들며 수심 75 m 부근에서는 약한 양의 양상이 나타났다(Figure 9.d).

SS 해역의 수온 CSLVs 연직 프로파일 구조 또한 수심에 따른 변동보다 계절에 따른 변동이 비교적 크게 나타났다(Figure 9.e). 봄과 여름철에 양의 양상 강하게 나타나고 겨울철에 약하게 나타났다. 염분 CSLVs 연직 프로파일 구조는 수온과 반대로 봄과 여름철에 음의 양상이 강하게 나타나는데 수심이 깊어짐에 따라 양상의 크기가 줄어들었다(Figure 9.f).

YS 해역의 수온과 염분 CSLVs 연직 프로파일 구조 모두 수심과 계절에 따른 변동이 비교적 작게 나타났다(Figure 9.f, 9.g).

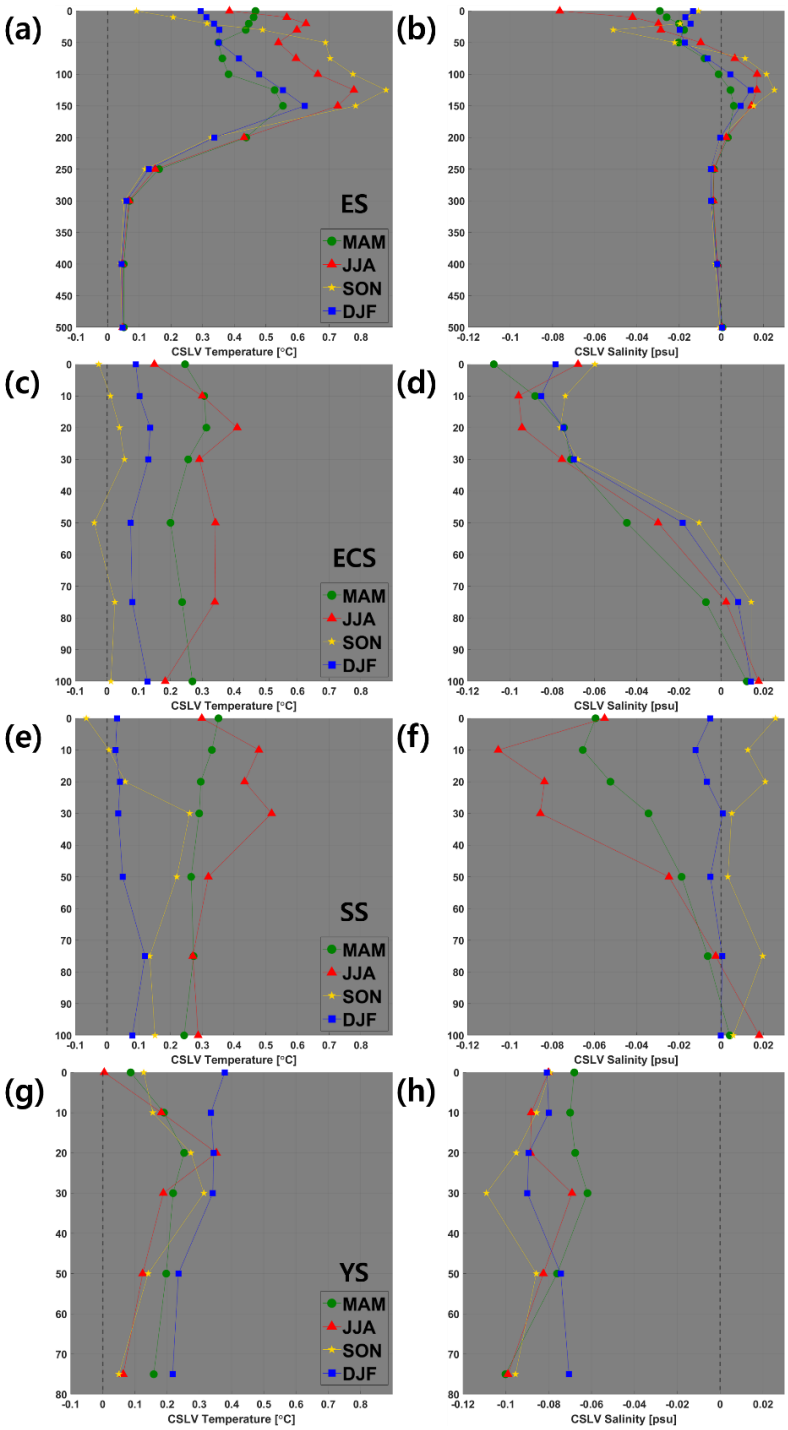

Figure 9. Regressed loading vectors of temperature (a, c, e, g) and salinity (b, d, f, h) for the first CSEOF mode. The loading vectors are regionally averaged. The colored symbols represent the season.

4. 토　　의

4.1 수온과 염분의 장기 변동 추세

비계절 성분의 OHC500 을 CSEOF 분석하였을 때 첫 번째 모드로 나타난 평균적인 공간 패턴은 모든 계절에 양의 양상이 나타나고 PCT 의 선형적인 장기 증가 추세가 뚜렷하게 나타난다. 이는 OHC500 CSEOF 첫 번째 모드가 지구온난화 모드를 의미하고 이 모드에 비계절 성분의 수온과 염분 CSEOF 결과를 회귀 분석하고 해석하였을 때 수온은 평균적으로 4 계절 내내 상승하는 추세와 염분은 상층 75 m 부근에서는 저염화 추세 그리고 그 밑의 수심에서는 해역과 계절에 따른 고온/저염화 추세가 나타났다. 이러한 장기 변동 추세가 실제 자료에도 나타나는 지 확인하기 위해 자료 기간을 전반기(1995-2008 년)와 후반기(2009 년-2021 년)로 나눈 후 차이를 구해 회귀된 수온과 염분 CSLVs 연평균 단면 구조와 비교하였다(Figure 10.).

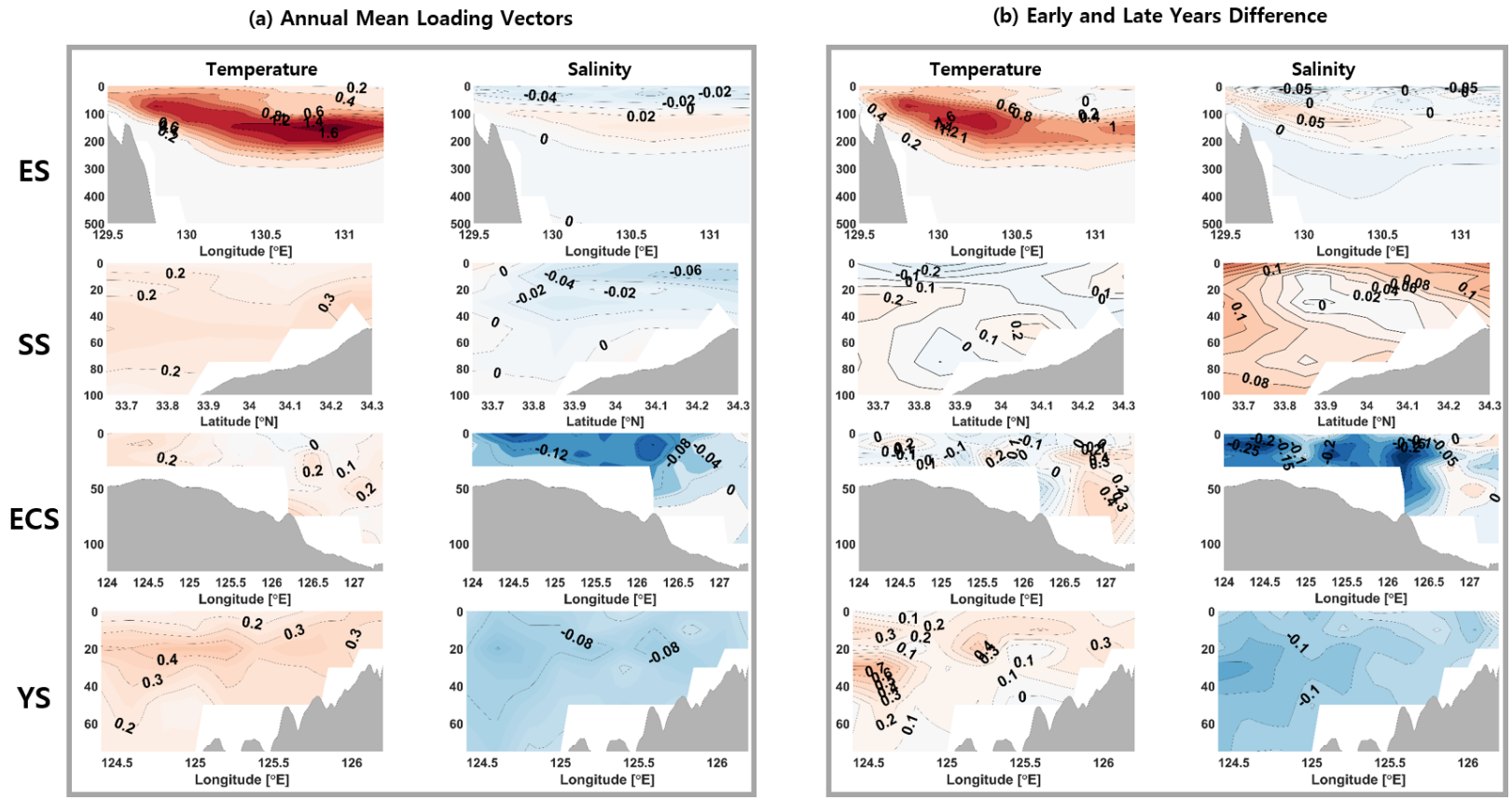

Figure 10. (a) is the annual mean regressed loading vectors of temperature and salinity for the first CSEOF mode, and (b) is the temperature and the salinity differences between early-year (1995-2008) and late-year (2009-2021). The differences are calculated by subtracting the early-year structures from the late-year structures

ES 해역은 CSLVs 구조와 전후반기 차이 구조가 비슷하게 나타났다. 특히 수심 150 m 부근에서의 고온고염화 추세와 상층 50 m 에서는 저염화 추세가 두 구조에서 나타났다. 또한 전후반기 차이에서도 고온화 추세가 연안쪽에서는 외해 쪽 보다 얕은 수심에서 나타났다. SS 해역 같은 경우 CSLVs 구조와 전후반기 차이 구조가 다르게 나타났다. 이러한 구조적 차이는 SS 해역이 장기 변동 추세보다 다른 주기의 변동에 더 많은 영향을 받아서 나타나는 것으로 해석할 수 있다. ECS 해역은 상층 30 m 수심에서 저염화가 강하게 나타는 것이 CSLVs 구조와 전후반기 차이 구조에서 잘 나타났으며 YS 해역 또한 수온과 염분 모두 모든 수심에서 고온저염화되는 추세가 두 구조에서 잘 나타났다. 따라서 1995 년부터 2021 년 기간의 한반도 인근 해수 물리적 특성인 수온과 염분이 OHC500 CSEOF 첫 번째 모드 PCT 의 변동 추세에 따라 서로 연계되어 변동하고 있는 부분이 있다고 해석할 수 있다.

4.2 해양 순환의 장기 변화

CSEOF 분석으로 확인한 연계된 한반도 주변 해의 해수 물리적 특성의 기작을 살펴보기 위해 계절 성분을 제거한 해수면 높이, 지형류 그리고 10 m 바람의 CSEOF 10 개 모드를 OHC500 CSEOF 첫 번째 모드 PCT 에 회귀 분석하였다.

해수면 높이와 지형류의 CSLVs 는 4 계절 내내 울릉도를 부근에 해수면 높이 상승 추세가 강하게 나타나고 이에 따라 시계 방향의 순환이 강해지는 구조가 나타났다(Figure 11.). 울릉도 부근에서 빠른 해수면 높이 상승 추세는 선행연구와도 일치한다(Lee et al., 2022). 울릉도 부근의 시계 방향 순환 강화 구조는 동해 연안에서 북향류를 강화시키고 동해 북위 36° 에서는 서향류를 강화시킨다. 이로써 EKWC 가 대한해협을 지나 동쪽으로 사행하기 어려운 환경이 조성되고 북항류 강화로 인해 동해 연안 쪽으로 해류의 축이 치우쳐질 수 있다. EKWC 는

표층에서는 고온·저염수를 수송하고 중층에서는 고온고염수를 수송하기 때문에 EKWC 수송량이 증가하면 ES 해역의 수온 CSLVs 단면 구조와 같이 고온화 추세와 표층에서는 저염, 중층에서는 고염화 추세가 나타난다. 특히 ES 해역에서 표층보다 수심 150 m 부근에서 강한 고온화 추세는 2000-2014 년 기간의 수온 재분석장을 가지고 분석한 선행 연구와 일치한다(Jeong et al., 2022). 더 나아가 울릉도를 중심으로 한 시계방향 순환 강화는 울릉도 주변에 표층의 따뜻한 물을 수렴시켜 결국 따뜻한 물은 침강(downwelling)된다. 이러한 이유로 동해 수온 CSLVs 구조에서 외해 쪽의 고온화 추세가 연안 쪽보다 깊게 나타나는 것으로 사료된다.

수온 CSLVs 단면구조와 연직 프로파일 구조를 확인하였을 때 가을철에 수심 150 m 부근에서 고온화 추세가 가장 강하게 나타나지만 해수면 높이와 지형류 CSLVs 는 4 계절 큰 변화가 없었다. 하지만 비지형류적인 10 m 바람의 CSLVs 를 확인하였을 때 ES 해역에서는 동풍이 강화되고 대마 난류 해류 해역에서는 북동풍이 강화되는 추세가 나타났다(Figure 12.b). 이는 대마 난류의 수송을 대한해협 쪽으로 증가시킬 수 있고 ES 해역에서는 EKWC 가 동해로 들어와서 동쪽으로 사행하지 않고 북쪽으로 수송될 수 있게 한다. 1995-2021 년 기간 가을철 양자강 부근 해역에서는 평균적으로 남동풍이 나타나는데 이는 에크만 수송을 생각했을 때 양자강에서 흘러나오는 저염수가 동쪽으로 유출되기 어려운 환경이다(Figure 12.a). 하지만 10 m 바람 CSLVs 추세와 같이 양자강 부근 해역에서 동풍이 강화되면 양자강 저염수가 과거보다 더 동쪽으로 유출될 수 있는 환경이 조성된다. 이는 ECS 해역 가을철 염분 CSLVs 단면 구조에도 나타난다. 가을철 염분 CSLVs 구조는 4 계절 중 저염화 추세가 가장 동쪽으로 멀리 퍼져있다.

CSEOF 분석으로 나타낸 연계된 한반도 인근 해의 해수 물리적 특성 장기 변동은 해양 순환 구조의 장기 변화와도 연계되어 나타나며 특히 가을철에는 지형류적인 요소와 비지형류적인 요소가 함께 작용하여

ECS 해역 상층 30 m 에서는 저염화 추세가, ES 해역 150 m 부근에서는 고온고염화 추세가 매우 강하게 나타나는 것으로 해석할 수 있다.

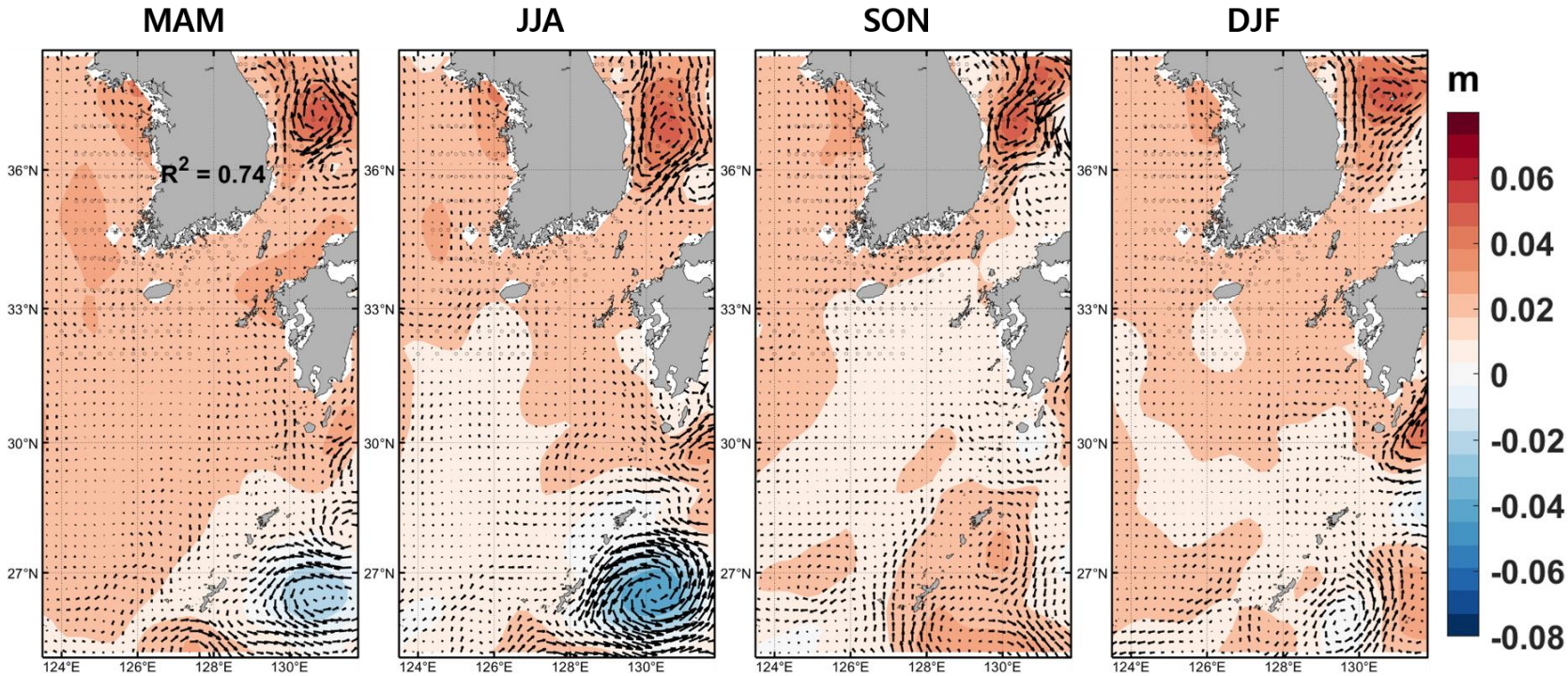

Figure 11. Regressed loading vectors of sea surface height(color) and geostrophic current(vector) for the first CSEOF mode. The loading vectors are seasonally averaged and R-squared value for the sea surface height is 0.74.

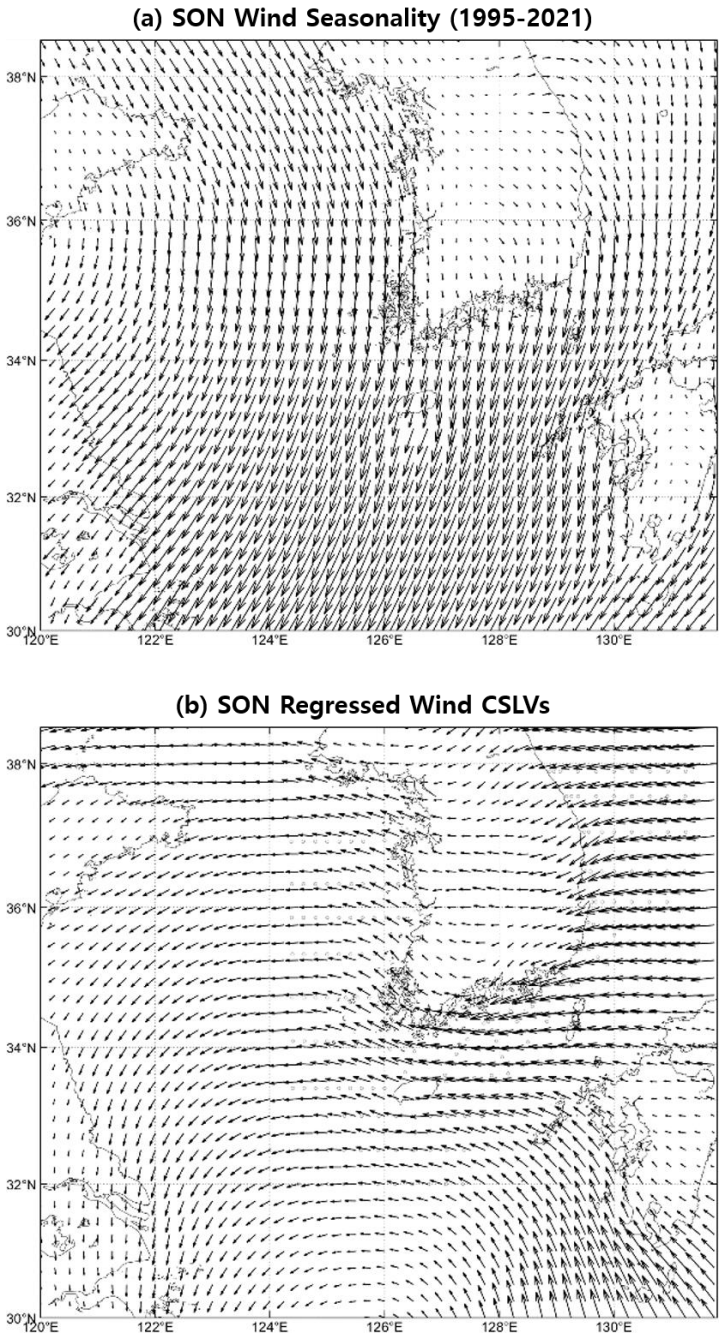

Figure 12. (a) is the fall season(SON) mean 10 m wind pattern and (b) is the fall season mean regressed loading vector of 10 m wind for the first CSEOF mode. R-squared values for U and V components of 10 m wind are 0.44 and 0.63 respectively.

4. 결　　론

본 연구에서는 27년(1995-2021년)간의 한반도 인근 해역에서 수집된 NIFS 해양정선관측 수온과 염분 자료를 간단한 품질 처리 후 CSEOF 분석을 진행하였다. 주 변수를 동해 상층 500 m 열함량으로 선정하여 수온과 염분의 CSEOF 10개 모드 결과를 주 변수 첫 번째 모드 PCT에 회귀 분석하였다. 주 변수 CSEOF 첫 번째 모드 결과는 지구온난화 모드로써 4계절 내내 울릉도 부근에서 열함량 증가 추세가 강하게 나타났다. 첫 번째 모드에 회귀 분석된 수온은 4계절 내내 모든 수심에서 온난화 추세가 평균적으로 나타나고 염분은 상층 50 m 에서는 저염화 그 밑 수심으로는 해역과 계절에 따라 달리하는 고염·저염화 추세가 나타났다. ES 해역은 수심 150 m 부근에서 고온화 추세가 강하게 나타나는데 이는 해수면 높이의 장기 변화에 따른 지형류 구조의 변화로 EKWC 수송량 증가와 EKWC 축이 연안 쪽으로 치우치면서 나타난 것으로 사료된다. 특히 가을철에는 10 m 바람의 동풍 추세가 한반도 인근 해에서 강해지면서 에크만 수송으로 인해 대한해협에서 TWC 수송량을 증가시키고 양자강 저염수의 동쪽 확장길을 열어주어 ES 해역 150 m 수심 부근에서 고온고염화가 4계절 중 가장 강하게 나타나고 ECS 해역 상층 30 m 부근에서는 저염화 추세가 동쪽까지 많이 확장되어 나타났다(Figure 13.).

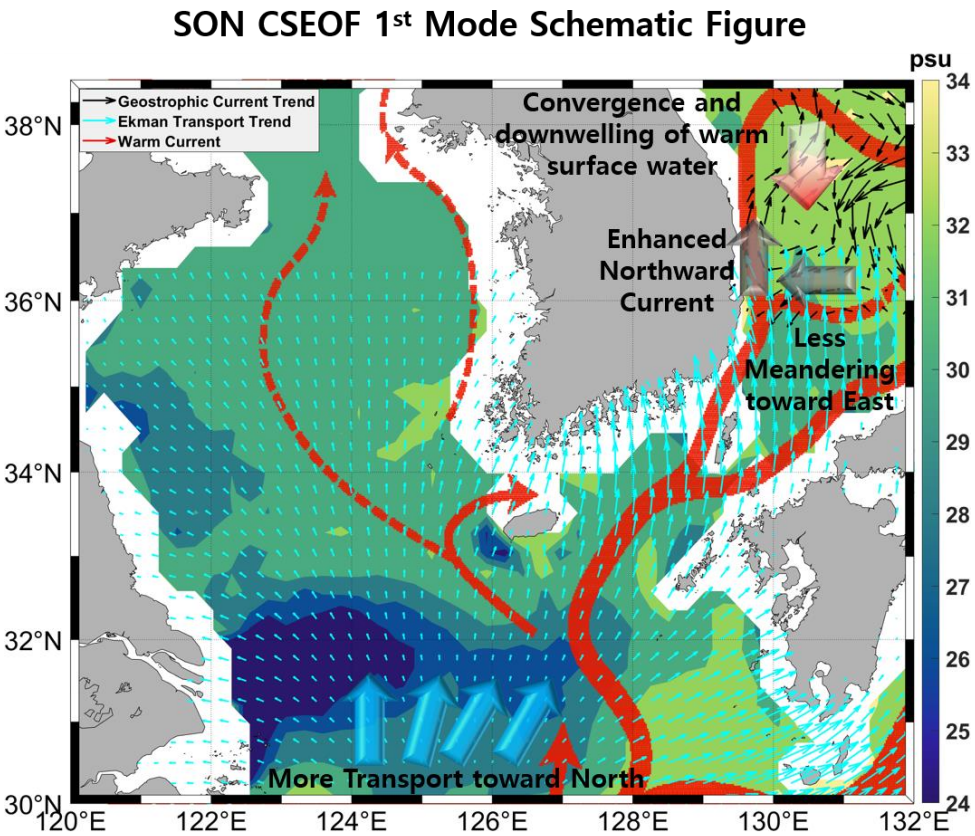

Figure 13. Schematic of the interconnected relationship between fall season air and sea variables which cause high warming rate in ES region, especially in depth around 150 m and high freshening rate in upper 30 m ECS region. Black, cyan, and red arrows represent the geostrophic current trend, the ekman transport trend, and the major warm current. The color represents the fall season salinity obtained by SMAP.

기존의 연구에서는 한반도 인근 해의 해수들을 국한적으로 나누어 분석하였지만 본 연구에선 동해 상층 500 m 열함량 변동과 연계되어 나타나는 한반도 인근해의 해수 물리적 특성 장기 변화를 CSEOF 분석을 통해 계절별로 나타내고 해양 순환의 장기 변화로 이를 설명하였다. 1993-2017년 기간의 위성 고도계 자료를 분석한 선행 연구에서도 동해에 생성된 울릉 난수성 소용돌이 81%가 EKWC와 연결되어 나타났으며 1975-2018년 기간의 조위소 자료를 통해 분석한 선행 연구에서는 TWC 수송량이 대한/쓰시마 해협에서 증가했다고

보고하였다(Shin et al., 2019; Shin et al., 2022). 따라서 본 연구는 연계된 한반도 인근 해의 해수 물리적 특성이 해양 순환의 변화와 밀접한 관계가 있다는 것을 시사한다.

참고 문헌

Belkin, I. M. (2009). Rapid warming of Large Marine Ecosystems. Progress in Oceanography, 81(1–4), 207–213.

CHO, Y.-K., & KIM, K. (1996). Seasonal variation of the East Korea Warm Current and its relation with the cold water. La Mer, 103–113.

Knutson TR, Tuleya RE, & Kurihara Y. (1998). Simulated increase of hurricane intensities in a CO_2-warmed climate. Science 279:1018-20

Jeong, Y., Nam, S. H., Kwon, J. il, Uppara, U., & Jo, Y. H. (2022). Surface Warming Slowdown With Continued Subsurface Warming in the East Sea (Japan Sea) Over Recent Decades (2000–2014). Frontiers in Marine Science, 9. https://doi.org/10.3389/fmars.2022.825368

Kim, S., Zhang, C.-I., Kim, J.-Y., Oh, J.-H., Kang, S., & Lee, J. B. (2007). Climate Variability and Its Effects on Major Fisheries in Korea. In Ocean Science Journal (Vol. 42, Issue 3). http://osj.kordi.re.kr

Kim, K.-Y., NORTH, G. R., & HUANG, J. (1996). EOFs of One-Dimensional Cyclostationary Time Series: Computations, Examples, and Stochastic Modeling. Journal of Atmospheric Science.

Kim, Y. S., Jang, C. J., & Yeh, S. W. (2018). Recent surface cooling in the Yellow and East China Seas and the associated North Pacific climate regime shift. Continental Shelf Research, 156, 43–54. https://doi.org/10.1016/j.csr.2018.01.009

Lee, K. J., Nam, S. H., Cho, Y. K., Jeong, K. Y., & Byun, D. S. (2022). Determination of Long-Term (1993–2019) Sea Level Rise Trends Around the Korean Peninsula Using Ocean Tide-Corrected, Multi-Mission Satellite Altimetry Data. Frontiers in Marine Science, 9. https://doi.org/10.3389/fmars.2022.810549

Levitus, S., Antonov, J., & Boyer, T. (2005). Warming of the world ocean, 1955-2003. Geophysical Research Letters, 32(2), 1–4. https://doi.org/10.1029/2004GL021592

Levitus, S., Antonov, J. I., Boyer, T. P., Baranova, O. K., Garcia, H. E., Locarnini, R. A., Mishonov, A. v., Reagan, J. R., Seidov, D., Yarosh, E. S., & Zweng, M. M. (2012). World ocean heat content and thermosteric sea level change (0-2000m), 1955-2010. Geophysical Research Letters, 39(10). https://doi.org/10.1029/2012GL051106

LIM, B.-J., & CHANG, Y.-S. (2016). Development of Synthetic Regression Diagram for Analyzing Linear Trend of Sea Surface Height, Temperature, and Salinity around the Korean Marginal Seas. The Sea, 21(2), 67–77. https://doi.org/10.7850/jkso.2016.21.2.67

Park, J. (2021). Quality Evaluation of Long-Term Shipboard Salinity Data Obtained by NIFS. J. Korean Soc. Oceanography, 26(1), 49–61. https://doi.org/10.7850/jkso.2021.26.1.049

Seong, K.-T., Hwang, J.-D., Han, I.-S., Go, W.-J., Suh, Y.-S., & Lee, J.-Y. (2010). Characteristic for Long-term Trends of Temperature in the Korean Waters. Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety, 16(4), 353–360.

Shin, H.-R., Kim, I., Kim, D., Kim, C.-H., Kang, B., Lee, E., & Choi, B.-J. (2019). Physical Characteristics and Classification of the Ulleung Warm Eddy in the East Sea (Japan Sea). J. Korean Soc. Oceanogr, 24(2), 298–317. https://doi.org/10.7850/jkso.2019.24.2.298

Shin, H. R., Lee, J. H., Kim, C. H., Yoon, J. H., Hirose, N., Takikawa, T., & Cho, K. (2022). Long-term variation in volume transport of the Tsushima warm current estimated from ADCP current measurement and sea level differences in the Korea/Tsushima Strait. Journal of Marine Systems, 232. https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2022.103750

Son, M. H., Lee, C. il, Park, J. M., Kim, H. J., Riedel, R., Hwang, I., Kim, Y. N., & Jung, H. K. (2020). The northward habitat expansion of the korean top shell turbo sazae (Gastropoda: Vetigastropoda: Turbinidae) in the korean peninsula: Effects of increasing water temperature. Journal of Marine Science and Engineering, 8(10), 1–14. https://doi.org/10.3390/jmse8100782

Yu, F., Zhang, Z., Diao, X., & Guo, J. (2010). Observational evidence of the Yellow Sea warm current. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 28(3), 677–683. https://doi.org/10.1007/s00343-010-0006-2

Abstract

Long-term (1995-2021) Variations of Physical Properties of Seawater in the Seas around the Korean Peninsula

Day Hong Kim
School of Earth and Environmental Sciences
The Graduate School
Seoul National University

The physical properties of seawater around the Korean Peninsula fluctuate significantly in space and time, and understanding them is important for climate, ecology, and fisheries, but despite relevant research, our understanding of the interconnected variability between regions has been limited to localized regions. In particular, how the physical properties of seawater around the Korean Peninsula are linked to ocean heat content (OHC) variability in the upper 500 m of the East Sea is not well understood. In this study, we examined the non-seasonal variability components of the upper 500 m water temperature and salinity data from the National Institute of Fisheries Science, collected four to six times per year in the seas around the Korean Peninsula over the past 27 years, by analyzing the Cyclostaionary Empirical Orthogonal Function (CSEOF) mode with a one-year nested period. The target variable was selected as the

upper 500 m OHC of the East Sea, and the results of temperature and salinity were regressed on the target variable Principal Component Time Series (PCT) to investigate the linked fluctuation patterns. The first-mode PCT, which explains about 32% of the upper 500 m OHC in the East Sea, showed an increasing long-term trend over the period. The associated spatial distribution of temperature showed a pronounced seasonal warming trend at all depths, and the spatial distribution of salinity showed either an increasing or decreasing salinity trend depending on the region and depth. The high warming and salinification trend near 150 m off the east coast, especially strong in autumn, and the decreasing salinity trend in the upper 30 m southwest of Jeju Island were associated with a strong sea-level rise trend centered on Ulleung Island and a corresponding strengthening of the clockwise circulation structure in the East Sea and Ekman transport by winds in the East Sea and the East China Sea. This study identifies spatial patterns in the physical properties of seawater and suggests the origin of these spatial patterns, which are linked to one of the fastest changing regions of the world's oceans, the waters near the Korean Peninsula.

Keywords : Global warming, Ocean heat content, Sea temperature, Sea salinity, Long-term variation

Student Number : 2021-24969