

## 한국 연안역의 해수면온도와 평균해수면 변화에 관한 고찰

이문옥<sup>1</sup> · 김종규<sup>2,†</sup> · 김병국<sup>3</sup><sup>1</sup>전남대학교 조선해양공학과 명예교수<sup>2</sup>전남대학교 조선해양공학과 교수<sup>3</sup>한국가스공사 통영기지본부 안전환경부 과장Characteristics of Sea Surface Temperature (SST)  
and Sea Level Rise (SLR) in the Korean coastal watersMoon Ock Lee<sup>1</sup>, Jong Kyu Kim<sup>2,†</sup>, and Byeong Kuk Kim<sup>3</sup><sup>1</sup>*Emeritus Professor, Department of Naval Architecture and Ocean Engineering,  
Chonnam National University, Yeosu 59626, Korea*<sup>2</sup>*Professor, Department of Naval Architecture and Ocean Engineering,  
Chonnam National University, Yeosu 59626, Korea*<sup>3</sup>*Manager, Tongyeong Terminal Division, Korea Gas Corporation, Tongyeong 53007, Korea*

## 요 약

본 연구에서는 지난 50여년간 국립수산물품질관리원과 해양조사원이 우리나라 연안의 6개 정점(동해의 포항, 울릉도, 남해의 부산, 제주, 서해의 인천, 군산)에서 관측한 해수면온도(SST)와 평균해수면(MSL) 자료를 분석하여 그 변화를 고찰하였다. 조사기간 중 SST는 동계(2월)에는 남해의 부산과 제주도에서 가장 높았고, 서해의 인천과 군산에서 가장 낮은 반면, 하계(8월)에는 서해의 인천과 군산에서 가장 높았고, 동해의 포항과 울릉도에서 가장 낮았다. SST의 평균값은 남해의 부산과 제주도가 동해의 포항과 울릉도에 비해 약 1-2°C, 서해의 인천과 군산에 비해서는 약 3°C 이상 더 높았다. SST의 상승속도 (또는 상승률)는 동해 울릉도가 0.0412°C·yr<sup>-1</sup>로 가장 높았고, 남해 제주도가 0.0101°C·yr<sup>-1</sup>로 가장 낮았으며, 이들 6개 해역에서의 SST의 평균 상승속도는 0.0259°C·yr<sup>-1</sup>로 나타났다. MSL은 6개 해역 모두 상승추세에 있었으며, 계절적으로는 하계(8월)에 가장 높았고, 동계(2월)에 가장 낮았다. 평균 MSL은 폐쇄 해역인 서해의 인천과 군산에서 높았고, 개방 해역인 동해의 포항과 울릉도에서 낮았다. MSL의 연평균 상승속도는 동해의 포항이 0.5218 cm·yr<sup>-1</sup>로 가장 높았고, 남해의 부산이 0.2433 cm·yr<sup>-1</sup>로 가장 낮았으며, 이들 6개 해역의 MSL의 평균 상승속도는 0.3664 cm·yr<sup>-1</sup>로 나타났다. SST와 MSL의 월변화 패턴은 해역에 따라 다르나 동일 해역내에서는 서로 유사하였으며, 따라서 SST의 월변화가 MSL의 월변화를 야기하는 1차적 요인으로 생각된다. 동해의 울릉도는 SST와 MSL의 상승속도 모두 타 해역에 비해 비교적 빠른 지역으로 생각되지만, 그 이유에 대해서는 불명하다. 결론적으로, 서해, 남해, 동해 모두 SST와 MSL은 전반적으로 상승추세에 있는 것으로 나타나, 연안에서의 자연 재해 위험성(취약성)이 그만큼 증가할 것으로 판단된다. 따라서, 지역사회는 물론 연안의 해양생태계도 상당한 변화를 겪게 될 것으로 예상되므로 앞으로 각 해역의 특성에 맞는 구체적인 실효성 있는 환경보전대책이 시급히 마련되어야 할 것으로 생각된다.

**Abstract** – We analyzed a long term data of sea surface temperature (SST) and mean sea level (MSL) NIFS (National Institute of Fisheries Science) and KHOA (Korea Hydrographic and Oceanographic Agency) have acquired at six stations in coastal waters of Korea and then examined their variations. During the investigation period, in February, SST was most high in Busan and Jeju but it was most low in Incheon and Gunsan whereas in August SST was most high in Incheon and Gunsan but it was most low in Pohang and Ulleungdo. The mean value of SST for Busan and Jeju was 1-2°C higher than Pohang and Ulleungdo or 3°C higher than Incheon and Gunsan. The rise rate of SST was most high with 0.0412°C·yr<sup>-1</sup> in Ulleungdo whereas it was most low with 0.0101°C·yr<sup>-1</sup> in Jeju and the mean value of the rise rate of SST for these six stations appeared to be 0.0259°C·yr<sup>-1</sup>. On the other hand, MSL had a tendency to rise at all six stations, with a seasonal variation of most high in August and most low in

<sup>†</sup>Corresponding author: kimjk@jnu.ac.kr

February. The mean value of MSL was high in Incheon and Gunsan, which are located in the semi-enclosed sea, whereas it was low in Pohang and Ulleungdo, which are located in the open sea. The annual mean rise rate of MSL was most high with  $0.5218 \text{ cm}\cdot\text{yr}^{-1}$  in Pohang whereas it was most low with  $0.2433 \text{ cm}\cdot\text{yr}^{-1}$  in Busan and the mean value of the rise rate of MSL at all six stations appeared to be  $0.3664 \text{ cm}\cdot\text{yr}^{-1}$ . The patterns of the monthly variation in SST and MSL indicated differences from sea region to sea region but had similarities within the same sea region. Thus, the monthly variation of SST was deduced to be the first factor to induce the monthly variation of MSL. Ulleungdo in the east sea seemed like the region with a high rise rate of SST as well as MSL but it is still unclear why it is so. Consequently, SST and MSL proved to be in a rising trend for all the west sea, south sea and east sea so that the coastal communities can be more vulnerable to natural disasters. Therefore, we will have to urgently prepare for environmental conservation countermeasures which are concrete and realistic since local communities as well as coastal marine ecosystems are expected to experience substantial changes in the future.

**Keywords:** Sea surface temperature(해수면온도), Mean sea level(평균해수면), Sea level rise(해수면상승률), El Niño southern oscillation(남방진동), Glacial isostatic adjustment(빙하지각균형조정)

## 1. 서 론

우리나라의 기후는 동해, 서해(황해), 남해에 의해 둘러싸여 있어서 해양의 수온분포에 지대한 영향을 받는다. 한반도의 남쪽과 동쪽 연안을 따라 북상하는 쓰시마 난류는 남해안을 연중 대체로 온난한 상태를 유지한다. 또한 태평양의 북서쪽에 위치한 반폐쇄적 수역인 동해의 수온은 연변화나 격년변동 등 다양한 주기를 가지고 변동한다(Park and Oh[2000]; Kim *et al.*[2001]). 이러한 수온의 변동은 동해 주변의 바람장의 변화, 동아시아 몬순, 그리고 해양-대기간의 상호작용 등이 주원인인 것으로 알려져 있다(Minobe *et al.*[2004]). 한편 한반도와 중국 사이에 위치하는 황해는 평균수심이 45 m 정도로 얕고, 조류에 의한 혼합이 활발하며, 외부의 기온변화에 민감하다(Lie and Cho[2002]).

한편, 동해는 동한난류와 북한한류가 교차하여(Kim and Kim [1983]), 어장형성이 유리한 조건을 갖추고 있는 반면, 서해는 동해에 비해 평균 수심은 얕으나 조차가 최대 8 m 이상으로 크고 조간대가 잘 발달되어 있다. 특히, 개펄 조간대는 육상으로부터 유기물이 공급되어 해양생물의 좋은 서식처가 되고 있다. 이에 대하여, 남해안은 생물의 서식환경에 좋은 크고 작은 내만들이 다수 형성되어 있어 생물 생산이 매우 활발한 해역이다(Hue *et al.*[2000]). 이와 같이, 한국 서해, 남해 및 동해 해역은 서로 다른 다양한 해양환경적 특성을 가지고 있다. 그 결과, 이들 해역에 서식하는 생물은 흐름이나 수온, 염분 등 해양환경에 따라 먹이섭취와 성장, 대사에 있어서 다양한 반응을 나타낸다(Bayne *et al.*[1985]). 한 예로서, Shin and Lim[2003]은 여수 갯벌에서 채집한 바지락 *Ruditapes philippinarum*에 대한 실험결과, 2년생과 3년생 바지락의 경우, 수온이나 염분이 증가할수록 여과율도 증가하는 것으로 나타났다.

한편, 우리 주변에서는 전 지구적 온난화에 따른 표면해수온과 해수면의 상승, 전 지구적 기후 변화에 따른 가뭄과 홍수 등이 빈번하게 발생하고 있으며, 육상과 해양생태계 모두 심각한 변화를 겪고 있다. 특히 기후변화로 인한 해수면 상승이 세계적으로 연안 지역사회에 불균형적으로 영향을 주면서 폭풍 해일의 크기 또한 변할 것으로 예측되고 있다. Ku *et al.*[2021]은 사회경제적 취약지수

(Social-economic vulnerability Index; SVI)와 유사하게 연안 취약지수(Coastal Vulnerability Index; CVI)의 개념을 도입하여 연안지역과 사회경제적 수준에 미치는 해수면 상승 효과를 해석하였다. 그 결과, 기후변화가 야기한 해수면 상승 효과가 CVI에 미치는 가장 우세한 요소로 나타났다. 특히 미래에는 도시지역에 비해 시골지역이 상대적으로 적응능력이 낮아 CVI가 더 높은 (즉, 해수면 상승에 따른 취약성이 더 큰) 것으로 예측되었다. Kang and Jeong[2000]은 최근 보라문어, 청새치, 노랑가오리 등 아열대 어종의 잦은 출현은 한반도 해역의 수온상승과 관련이 있는 것으로 추정하였다. 또한 Seo and Yoon[2008]은 NOAA 위성영상자료에 의한 한반도 주변의 표층수온분포에 따른 어종 변화를 고찰한 결과, 수온상승으로 인해 동물성 플랑크톤의 서식범위가 급격히 증가하면서 한류성 어종이 점차 사라지고 난류성 어종이 증가하였다고 주장하였다. 한 예로서, 그들은 1970년대와 1980년대 대표적 한류성 어종이었던 명태는 1980년대 중반 이후 어획량이 급감한 반면, 난류성 어종인 꽁치와 고등어의 어획량은 증가한 것을 그 증거로 제시하였다. Kim *et al.*[2009]이 국립해양조사원(Korea Hydrographic and Oceanographic Agency; KHOA)의 장기조위관측자료를 분석한 결과, 최근 40년간 한반도 주변 해수면은  $0.216 \pm 0.171 \text{ cm}\cdot\text{y}^{-1}$ 의 속도로 해수면이 상승한 것으로 나타났다. 또한 Kim *et al.*[2011]은 Met Office Hadley Centre(<http://hadobs.metoffice.com>), Goddard Institute for Space Studies(GISS, <http://data.giss.nasa.gov/gistemp/>), National Climate Data Center(NCDC, <http://www.ncdc.noaa.gov/resst/#grid>)에서 공개한 자료를 바탕으로 한반도 주변의 수온변화 경향을 분석하였다. 그 결과, 동계 남해에서의 수온증가는  $1.5^\circ\text{C}$  정도로 전지구 평균 수온증가보다 약 3배 정도 빠르게 진행되고 있었으며, 서해(황해)에서는 약 2배 정도 온난화가 진행되고 있는 것으로 나타났다. 그러나 한반도 주변의 수온변화는 단순하지 않고 다양한 주기의 변동성을 보였으며, 특히 동계는 완만한 수온하강과 급격한 수온상승을 반복하는 톱니형태의 수온변화를 보였다. 그들은 또한 한반도 주변의 장기수온변동에서는 1970년대 중반까지는 PDO(Pacific Decadal Oscillation; 태평양 10년 진동)의 역할이 지배적이며, 최근의 급격한 수온증가는 한반도 주변으로 유입되는 쿠로시오 난류의 강화와

도 연관이 있는 것으로 판단하였다. 특히 하계와 동계에 쿠로시오 해류의 세기 변화가 수온증가에 영향을 준 것으로 나타났다. Min and Kim[2006]은 국립수산과학원이 한국 연안의 동해안, 남해안, 서해안을 포함하는 27개 정점에서 관측한 표층수온을 분석한 결과, 1969년부터 2004년까지 제주의 우도를 제외한 정점에서  $0.01-0.06\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{yr}^{-1}$ 의 속도로 수온이 선형적인 증가를 보인 것으로 나타났다. 이러한 수온 증가는 동해안에서 가장 컸고, 남해안이나 서해안에서는 상대적으로 작았으며, 또한 약 3-5년 주기의 경년변동을 하는 것으로 밝혀졌다. 그들은 이러한 표층 수온의 변화가 북태평양 표층 수온의 변화와 관련이 있으며, 특히 1970년대부터 최근까지 한국 연안에서 동계의 표층 수온이 상승한 것은 PDO지수로 나타난 북태평양 표층 수온의 변화와 관련성이 큰 것으로 판단하였다. Seong *et al.*[2010]은 지난 40년간(1968-2008) 국립수산과학원이 한국 근해에서 행한 정선해양관측자료에 근거하여 표층수온은 동해에서  $1.39^{\circ}\text{C}$ , 남해에서  $1.27^{\circ}\text{C}$ , 서해에서  $1.23^{\circ}\text{C}$ 가 각각 상승한 것으로 보고하였다. 그들은 이러한 수온 변동을 일으키는 요인은 바람이나 해류 때문이라고 주장하였다. 반면, Jeong *et al.*[2003]은 지난 35년간(1968-2002) 국립수산과학원이 행한 연안정지 및 정선관측자료에 근거하여 표층수온은 동해에서  $0.79^{\circ}\text{C}$ , 남해에서  $0.93^{\circ}\text{C}$ , 서해에서  $0.81^{\circ}\text{C}$ 가 각각 상승한 것으로 보고하였다. Kang and Choi[1995]는 일본기상청(JMA, 1976)이 제공하는 쓰시마 해류와 쿠로시오 해역의 9개 정점에서 30년간(1941-1970) 관측한 수온자료를 분석하여 표층수온의 연변화와 그 변동을 규명하였다. 이들 결과에 따르면, 누년평균 계절변화를 제거한 이상 수온(temperature anomalies)은 약  $1^{\circ}\text{C}$  정도이며, 춘계와 추계보다는 하계와 동계에 이상수온의 변화가 심한 것으로 나타났다. 또한 쓰시마 해역의 이상 수온은 쿠로시오 해역의 이상 수온과 상관관계를 가지고 있었다. Kim *et al.*[2018]은 1995-2016년 동안의 하계(5-8월) 동해 연안역에서 발생하는 용승(upwelling)에 대한 지수(upwelling age, UA)와 해수면온도(Sea Surface Temperature; SST)와의 상관성을 분석한 결과, 이들 양자간에는 음(-)의 상관이 우세하게 나타났다. 즉, 이것은 용승이 강할수록 해수면 온도는 그만큼 하강하는 것을 의미한다.

한편, Oh *et al.*[2011]은 IPCC(2007) AR4 기후예측모델의 결과를 이용하여, 해수면 자료를 분석한 결과, 열팽창을 고려한 한반도 근해의 해수면 상승속도는 전지구 평균보다 최대 2배까지 높았다. 특히 쿠로시오 확장지역에서 가장 높은 해수면 상승속도를 보였다. 그들은 이러한 해수면 상승은 동계 시베리아 고기압의 약화와 북서태평양 해역의 기압장 변화, 그리고 이로 인한 바람장 및 해류 변화로 발생한 수온변화가 그 원인인 것으로 추론하였다. Jung[2014]은 국립해양조사원이 2012년까지 서해와 제주에서 조사한 조위자료를 분석하여 평균해수면을 산출하였다. 그 결과, 서해안의 인천항과 군산항에서는 대규모 해안개발사업에 의해 평균해수면이 상승하였으며, 그 밖에도 평균해수면은 지구온난화 등 자연적 요인에 의해 연평균  $1.1-4.4\text{ mm}\cdot\text{yr}^{-1}$  속도로 상승한 것으로 나타났다. Cho and Maeng[2007]은 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)보고서에 기초하여 해수면 상승 현황 및 영향을 검토하고 그 대응방

안으로 온실가스의 감축과 기후변화 영향에 대한 적응 대책이 필요하다고 주장하였다.

이상에서 살펴본 바와 같이, 우리나라 연안의 표층 수온과 해수면은 전지구적 온난화와 기후변화 영향으로 과거에 비해 계속 상승하고 있는 것으로 나타났다. 그러나 이와 같은 표층 수온과 해수면의 변화는 용승이나 바람 또는 매립이나 준설 등 인위적 행위에 의해서도 야기될 수 있다. 또한 이러한 수온과 해수면 변화를 일으키는 외력은 해역에 따라 다를 것으로 생각된다. 따라서 본 연구에서는 국립수산과학원과 해양조사원이 장기 관측한 수온과 해수면 자료를 분석하여 우리나라 동해, 남해, 서해 연안의 표층 수온과 해수면 변화의 특징을 검토하였다.

## 2. 자료 및 방법

먼저, 본 연구에서는 Fig. 1에 나타난 바와 같이, 국립수산과학원 한국해양자료센터(KODC)의 동해(포항, 울릉도), 남해(부산, 제주), 서해(인천, 군산) 등 6개 정점에서 관측한 연안정지관측자료의 수온자료를 이용하였다. 이들 자료는 인천(1969-2003), 군산(1969-2016), 포항(1967-2022), 울릉도(1976-2018), 부산(1968-2016), 제주(또는 서귀포)(1969-2016) 등 해역에 따라 조사기간에는 차이가 있으나, 매월 중순경(14-16일) 관측한 값을 그 월에 있어서의 수온으로 가정하였다. 또한 해수면 자료로서는 해양조사원(KHOA)이 포항(1972-2023), 울릉도(1965-2023), 부산(1969-2023), 서귀포(1985-2023), 인천(1999-2023), 군산(1980-2023) 등 6개 해역에서 관측한 평균해면(MSL) 자료를 이용하였다. 이들 자료로부터 각 해역에서의 해수면온도(SST)와 평균해수면의 변화 특징을 고찰하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 해수면온도(SST)의 변화

Fig. 2는 서해의 인천과 군산, 남해의 부산과 제주도, 동해의 포항과 울릉도에 있어서의 SST의 월변화를 나타낸다. 이 결과에 따르면, 수온은 동계(2월)에는 남해 해역인 부산과 제주도에서 가장 높고, 서해 해역인 인천과 군산에서 가장 낮은 반면, 하계(8월)에는 서해 해역인 인천과 군산에서 가장 높고, 동해 해역인 포항과 울릉도에서 가장 낮다. 한편, 동계와 하계 사이의 수온차는 서해 해역인 인천과 군산에서 가장 크고, 남해 해역인 부산과 제주에서 가장 작다. 또한, 수온의 월변화 형태는 동일 해역에서는 (예를 들면 인천과 군산, 부산과 제주도, 포항과 울릉도) 서로 유사함을 알 수 있다. 이와 같은 계절에 따른 수온변화와 수온차는 서해, 남해, 동해가 가진 지리적 특성과 해역 주변을 흐르는 해류와 관련이 있을 것으로 판단된다. 즉, 인천과 군산은 서해(황해)라는 폐쇄적 해역에 위치하여 동계의 복사냉각과 하계의 저열효과가 타 해역에 비해 크게 작용할 것으로 추론된다. 또한 남해 해역의 부산과 제주도는 쓰시마난류의 영향을 받고 있으며, 동해 해역인 포항과 울릉도는 쓰

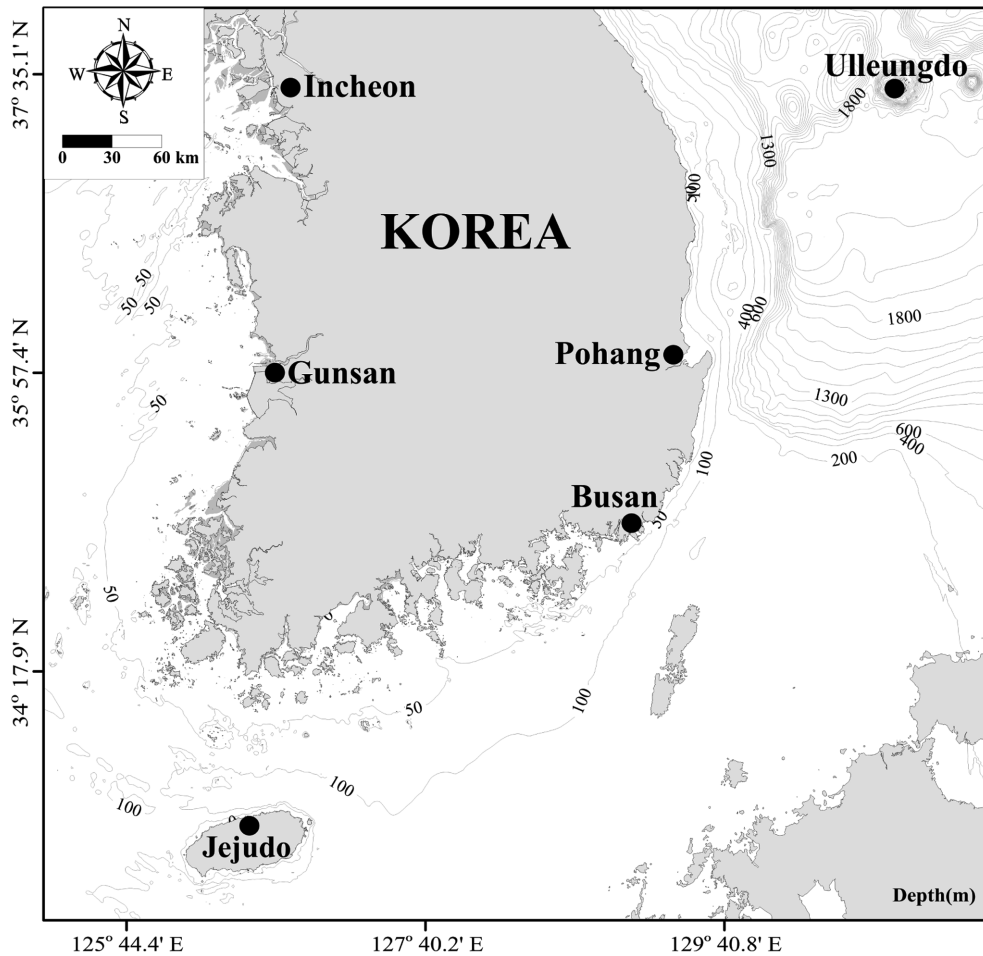


Fig. 1. Study stations in the vicinity of Korean coastal waters.

시마난류는 물론, 동해고유수의 영향도 받고 있을 것으로 생각되기 때문이다(Kwak[1976]; Lee and Oh[1986]; Kwon *et al.*[2020]). 제주해협 남쪽의 표층수온은 남해 연안역 표층수온보다 연중 높고 특히 동계에 더 높다(Rho and Kim[1983]). 이것은 제주해협의 남쪽에 국한되어 흐르는 제주난류는 주로 춘계와 동계에 따뜻한 제주난류계수를 공급하는 것으로 알려져 있다. 이러한 제주난류계수의 이류에 의해 제주도 정점의 표층수온이 남해 연안역보다 연중 높은 것으로 생각된다. Kim and Yug[1983]은 국립수산물과학원의 15년간(1965-1979)의 2월과 8월의 해양관측자료를 사용하여 우리나라 남해에서 일어나는 수온역전현상을 조사하였다. 그 결과, 역전현상은 하계보다 동계에 6배 정도 많이 발생하였으며, 동계 역전현상은 기본적으로 표면 냉각효과에 의해 생기는 것으로 추론하였다.

한편, Fig. 3은 조사기간 중 각 해역에 있어서의 SST의 경년변화를 나타낸다. 이 결과에 따르면, SST의 상승속도(또는 상승률)는 해역에 다소 따라 차이는 있으나 서해, 남해, 동해 해역 모두 지난 50년간 대체로 상승해 왔음을 알 수 있다. 이들의 결과를 요약하여 Table 1에 나타내었다. 이 결과에 따르면, 조사기간 중 SST의 평균 값은 남해의 부산과 제주도가 동해의 포항과 울릉도에 비해서는 약

1-2°C, 서해의 인천과 군산에 비해서는 약 3°C 이상 높았다. 또한 SST의 상승속도는 동해 울릉도가 0.0412°C·y<sup>-1</sup>로 가장 높았고, 남해 제주도가 0.0101°C·y<sup>-1</sup>로 가장 낮았으며, 이들 6개 해역에서의 SST의 평균 상승속도는 0.0259°C·y<sup>-1</sup>로 나타났다. 단, 동해의 울릉도나 남해의 제주도는 모두 개방된 지역이라는 공통점을 가지고 있으나 이와 같이 SST의 상승속도에 현저한 차이를 보이는 이유에 대해서는 불명하다. Kang[2000]은 한국 연안의 18개 정점에서 지난 60년(1936-1995)간 관측한 표층수온자료를 분석하여 표층수온의 선형적 변화를 구하였다. 그 결과, 1966년부터 1995년까지 최근 30년간 연평균 표층수온이 평균 0.024°C·y<sup>-1</sup> 속도로 상승하였으며, 이것은 1936년부터 1995년까지 60년간 연평균 표층수온의 증가율보다 2배 이상 큰 값이라고 주장하였다. 또한 1966년부터 1995년까지 동계 표층수온이 평균 0.035°C·y<sup>-1</sup> 속도로 증가한 데 비해 하계 표층수온은 0.010°C·y<sup>-1</sup> 속도로 감소하였다. Rahman and Lee[2016]는 수온과 기후지수자료를 이용하여 한국 주변해역 상층부의 수온변동과 북태평양 기후체제(climate regime shifts; CRS)와의 관계를 분석하였다. 그 결과, 동해, 서해, 남해 상층부(수심 10 m)의 경우, 1988년의 기후체제전환은 3개 해역의 상층부 수온변화에서

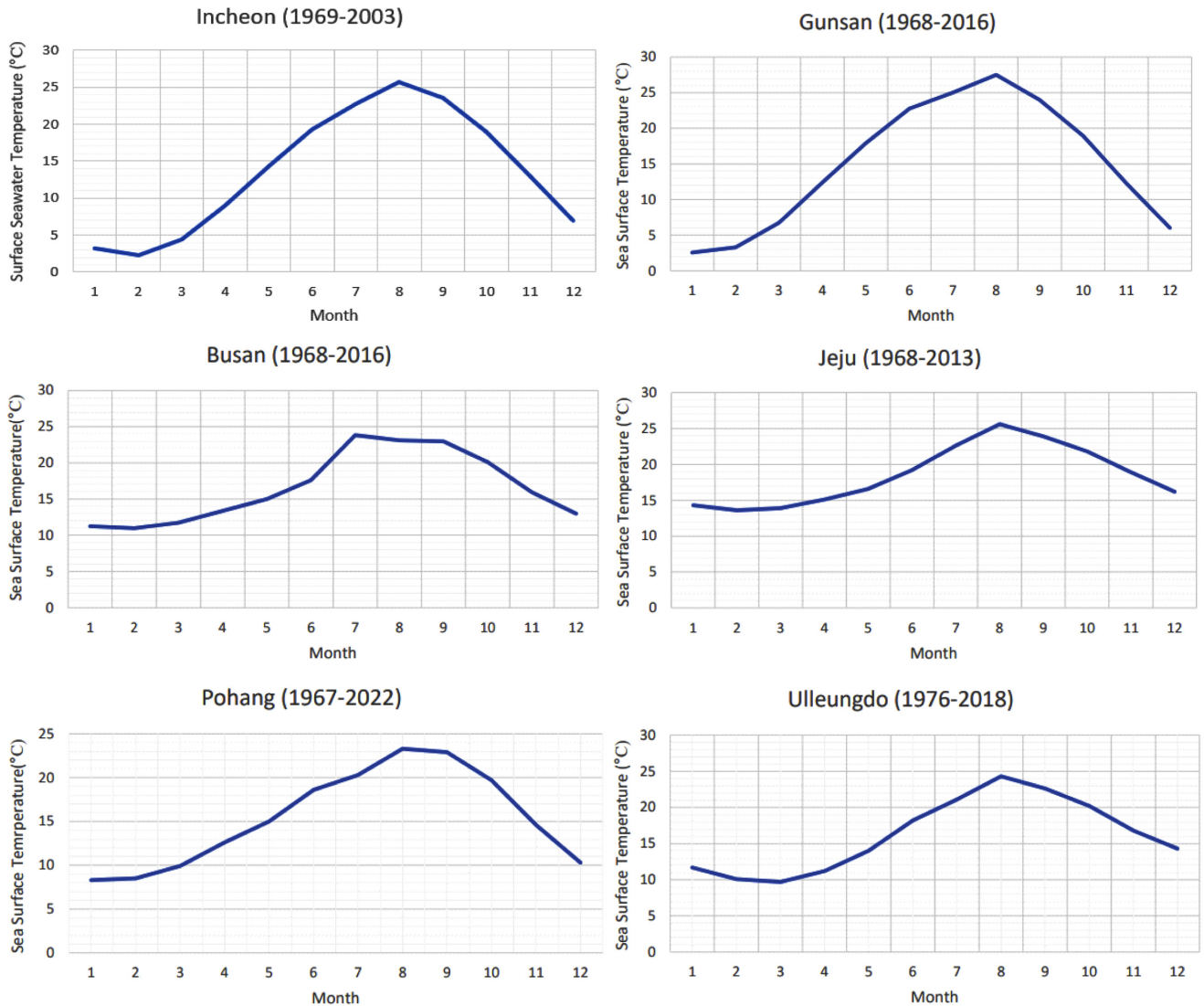


Fig. 2. Mean SST monthly variation for each sea region during the investigation period.

동시에 나타났다. 반면, 1998년은 동해 남부해역과 서해, 1976년의 기후체제전환은 전 해역의 동계 수온변화에서만 그 영향이 나타났다. 1998년 기후체제전환 이후 서해, 동해 남부의 수온은 점차 감소한 반면, 동해 북부 해역은 1998년 기후체제전환 이후 증가하였다. Park *et al.*[2019]은 국립수산과학원의 과거 80년간 한국 연안의 21개 정점에서 관측한 표층수온자료를 분석한 결과, 전반적으로 서해와 남해의 표층 수온은 상승하는 경향을 나타내었다. 반면, 동해는 기존의 연구결과와는 달리 연안역보다 근해역에서 낮은 수온상승을 보였다. Jeong *et al.*[2003]은 국립수산과학원의 과거 35년(1968-2002)간 한국 연안 12개 정점에서 관측한 수온을 분석한 결과, 한국 연안 수온은 하계 냉수가 발생하는 남서역을 제외하고는 상승하는 것으로 나타났다. 그러나 근해 수온은 동해의 경우 표층은 상승한 반면, 50 m, 100 m 수층에서는 하강하였다. 또한 남해에서는 전 수층에서 수온이 상승한 반면, 서해에서는 표층에서는 상승하였고 50 m 수층에서는 하강하였다.

한편, Garcia and Belmonte[2011]는 PO.DAAC(Physical Oceanography Distributed Active Archive Center)가 1985-2007년에 걸쳐 조사한 월별 열위성 영상자료를 사용하여 지중해 서부에서의 SST의 변동성을 분석하였다. 그 결과, SST는 평균  $0.03^{\circ}\text{C}\cdot\text{y}^{-1}$ 의 속도로 선형적인 온난화 경향을 나타내었고, 조사기간 20년 동안 4-6월의 평균 SST가  $0.5-1.0^{\circ}\text{C}$  증가한 것으로 나타났다. Luis and Kawamura[2003]는 서부 인디아 대륙붕에서 1993-1996동안 관측된 AVHRR(advance very high-resolution radiometer), 바람자료, NCEP(National Centers for Environmental Prediction)/National Center for Atmospheric Research(NCAR) 등의 자료를 사용하여 SST의 계절적 변동성을 조사하였다. 그 결과, 겨울문순(12월-3월) 기간에는 4년 평균한 SST는 표층의 열손실 때문에 북위  $15^{\circ}\text{N}$  북쪽에서는 강한 냉각을 나타낸 반면, 그 이남에서는 온난한 적도해수의 침입으로 인해 온난한 SST가 발달하였다. 또한 연안에서는 표층 열손실을 증가시키는 풍응력에 의해 Ekman pumping과 upwelling이 촉진되었다.

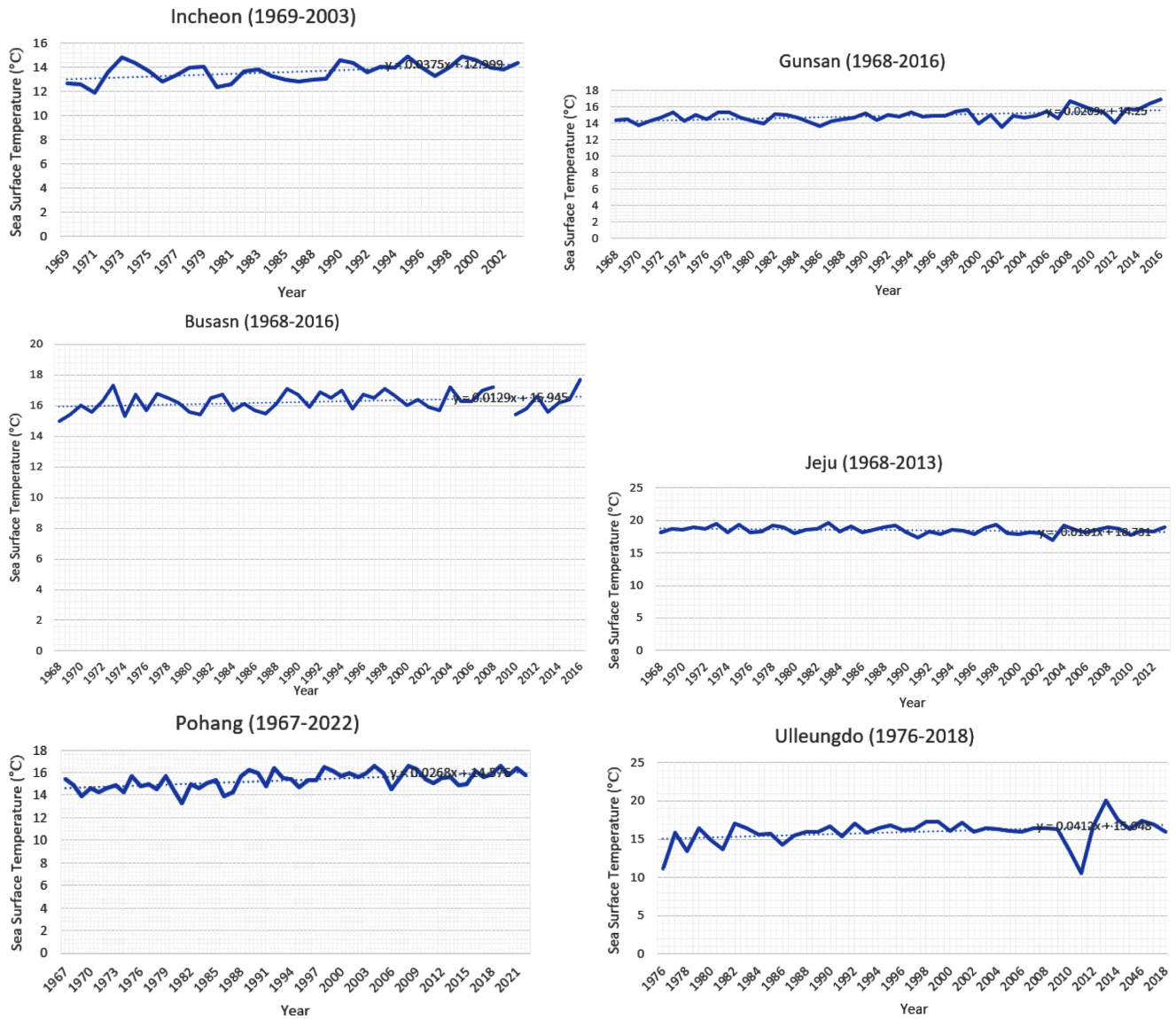


Fig. 3. Mean SST yearly variation for each sea region during the investigation period.

Table 1. SST variations with season for each sea region

Sea Region Station	Season	Mean SST (°C)					
		West		South		East	
		Incheon	Gunsan	Busan	Jeju	Pohang	Ulleungdo
	Feb	2.2	3.3	11.0	13.6	8.5	10.1
	May	14.3	17.9	15.0	16.6	15.0	14.0
	Aug	25.7	27.5	23.1	25.6	23.3	24.3
	Nov	13.0	12.3	16.0	18.9	14.6	16.8
Average for all the period		13.7	14.9	16.3	18.5	15.3	16
Rate of SST rise (°C·yr <sup>-1</sup> )		0.0375	0.0269	0.0129	0.0101	0.0268	0.0412

한편 스펙트럼 분석에서는 SST와 외력 함수(forcing function)에 있어서 반년과 연주기의 극대치를 보여주었으며 이것은 서부 인디아 대륙봉에서의 SST 변동성에 미치는 문순의 영향력을 보여주었다. Severov *et al.*[2004]은 1868-2000년 기간동안 남방진동(Southwestern

Atlantic Ocean)에 있어서의 SST anomalies, El Niño, La Niña event 사이의 관계를 연구하였다. 그 결과, El Niño event는 평균적으로 해당하는 해의 겨울에 브라질 해류의 SST가 positive anomalies이고 Malvinas 해류의 SST가 negative anomalies일 때 발생하는 것

이 판명되었다. 반면, La Niña event는 브라질 해류가 이례적으로 차고 Malvinas 해류가 따뜻할 때 발생하였다. 이들은 또한(가장 강한 event를 제외한) El Niño는 남서대서양에서의 SST anomalies의 변동성으로부터 3-6개월 앞서서 예측할 수 있다고 주장하였다. Scrosati[2020]는 대서양의 캐나다 해안의 조간대에서 SST의 변화 원인(source)을 조사한 결과, 2019년 9월 대서양 캐나다 해안에 태풍 Dorian이 도착 수시간 후, 조간대내의 SST가 10-12°C까지 하강한 것으로 나타났다. 또한 이때의 풍속과 풍향 자료는 태풍에 의한 연안 용승이 조간대 SST의 급격한 하강을 일으켰다는 사실을 강하게 암시하였다. 그러나 이러한 SST의 현저한 하강이 조간대 생물체에 어떤 영향을 주었는지에 관해서는 과제로 남아있다. Varela *et al.*[2018]은 Yucatan의 북부 연안역에서 1982-2015년 기간에 발생한 이상적인 냉각(SST의 하강) 원인을 조사하였다. 그 결과, 지난 10년간에 걸쳐 관측된 Yucatan Current의 동쪽에서의 이동(shift)이 연안 냉각의 가장 가능한 원인으로 추론되었다. 그 이유는 Yucatan

Current가 동쪽으로 이동하면 용승에 유리한 서풍이 대륙붕 표층으로 찬 심층수의 연직수송을 높이기 때문이다. Yun *et al.*[2012]은 Weather Research and Forecasting(WRF) 모형을 사용하여 태풍 매미(2003)기간 동안 동아시아 주변해역에서 북동방향의 태풍 이동에 미치는 SST의 수평경사(horizontal gradient)와 해수면온도(SST) 크기의 효과를 조사하였다. 그들은 PVT(potential vorticity tendency)의 개념을 도입하여 열대저기압(TC)의 이동(motion)에 미치는 SST의 효과를 설명하였다. 이들의 결과에 따르면, 온난한 SST는 TC 강도를 현저하게 강화시켜 TC를 동쪽 방향으로 더 크게 이동시켰다. 또한 SST 크기가 증가하면 남서방향에서의 흐름은 TC를 더 효과적으로 북동쪽으로 이류시켰다. 한편 서쪽에서 동쪽까지 SST가 증가하면 TC 이동시 좌우선방향의 SST 경사(gradient)와 SST 크기보다 더 큰 동쪽으로의 편향을 일으켰다. 그들은 이러한 SST gradient는 비대칭적인 vortex와 흐름을 강화하여 TC 이동시 더 큰 동쪽방향으로의 이동(drift)을 야기할지도 모른다고 주장하였다.

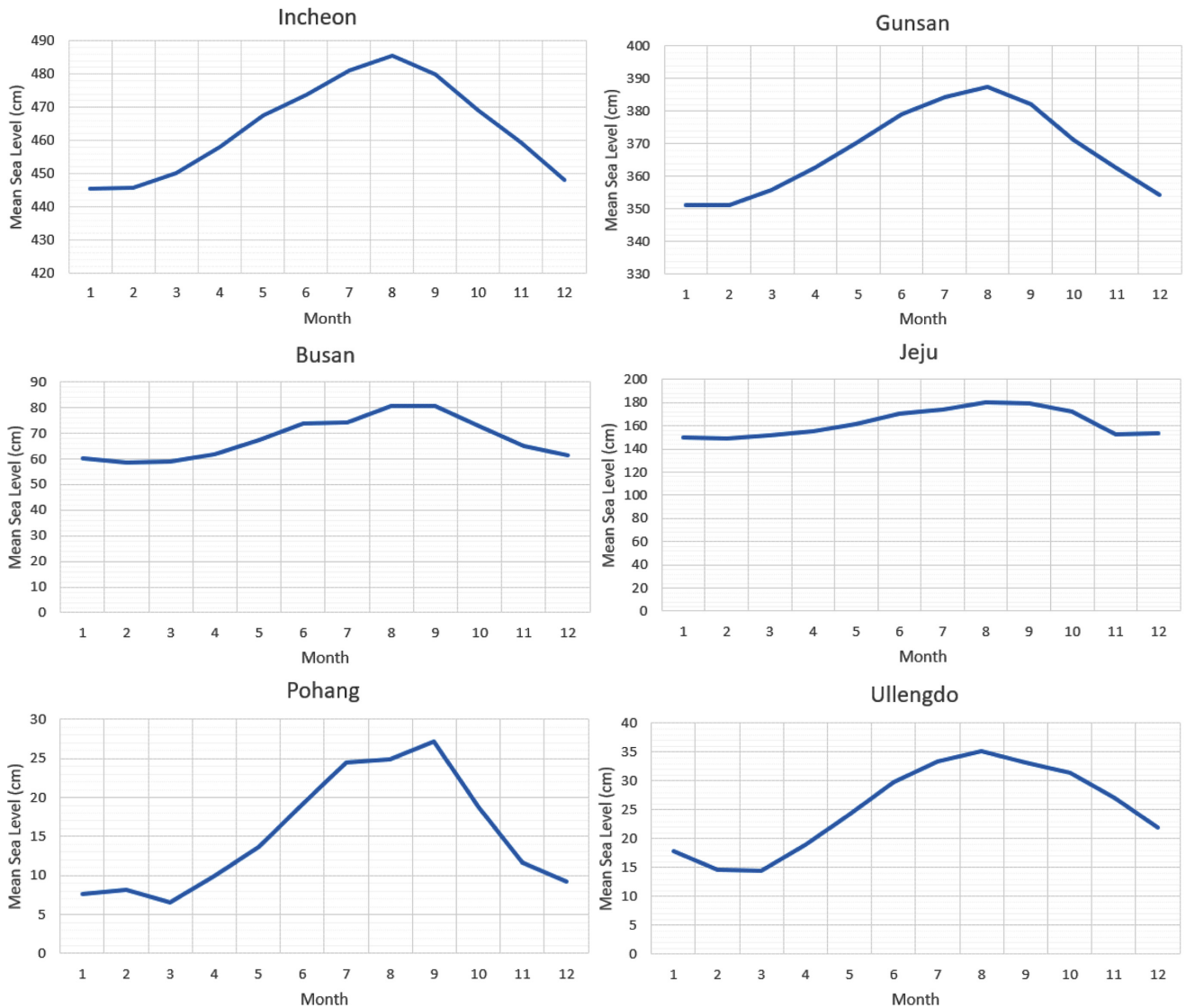


Fig. 4. Mean MSL monthly variation for each sea region during the investigation period.

3.2 평균해수면(MSL)의 변화

Fig. 4는 조사기간 중 각 해역에서의 MSL의 월변화를 나타낸다. 이 결과에 따르면, 서해의 인천과 군산, 동해의 포항과 울릉도, 그리고 남해의 부산과 제주도 등 동일 해역내에서의 MSL의 변화 패턴은 서로 유사하다. 그러나 남해의 부산과 제주도에에서의 MSL의 연간 변화폭은 서해의 인천과 군산 또는 동해의 포항과 울릉도에 비해 상대적으로 작다.

한편, Fig. 5는 조사기간 중 MSL의 연변화추이를 나타낸다. 이

결과에 따르면, 지난 40-60년간 6개 해역의 MSL은 모두 전반적으로 상승추세에 있음을 알 수 있다. 그러나 동해의 포항과 울릉도는 결측자료가 많아 MSL의 변화 추이를 정확하게 판단하기는 어렵다.

Table 2에 이들의 결과를 요약하여 나타내었다. 이 결과에 따르면, 조사기간 중 평균 MSL은 폐쇄 해역인 서해의 인천과 군산에서 높고, 개방 해역인 동해의 포항과 울릉도에서 낮다. 또한 MSL은 하계(8월)에 가장 높고, 동계(2월)에 가장 낮다. 한편 MSL의 연평균 상승속도 (또는 상승률)는 동해의 포항이 0.5218 cm·yr<sup>-1</sup>로 가

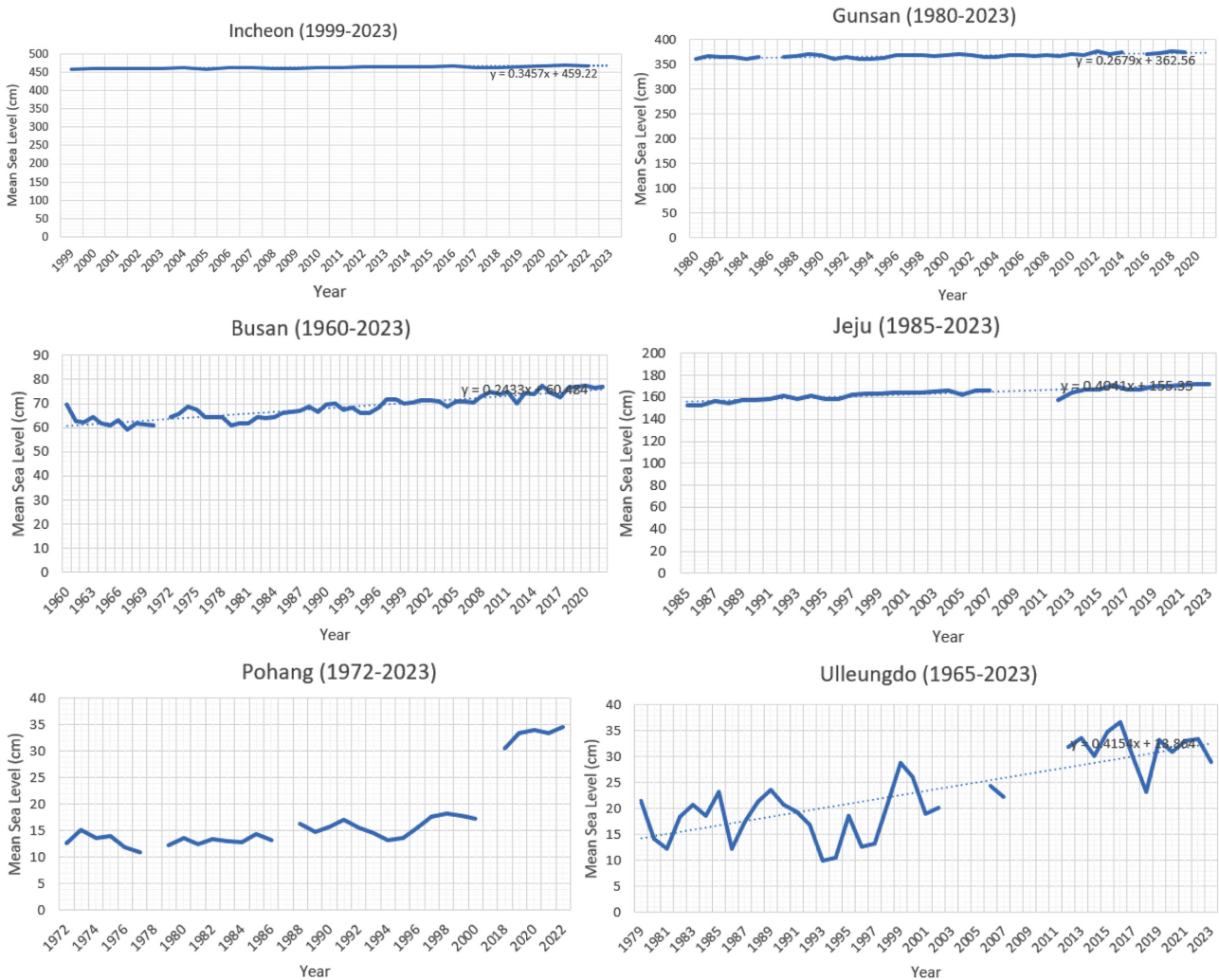


Fig. 5. MSL yearly variation for each sea region during the investigation period.

Table 2. MSL variations with season for each sea region

Sea Region Station	MSL (cm)					
	West		South		East	
	Incheon	Gunsan	Busan	Jeju	Pohang	Ulleungdo
Season						
Feb	445.7	351.2	58.8	148.9	9.2	14.7
May	467.5	370.2	67.5	161.5	14.7	24.2
Aug	485.5	387.6	80.5	180.1	29.1	35.1
Nov	459.2	362.5	65.0	152.9	12.7	27.2
Average for all the period	463.5	368.2	68.3	163.2	17.4	23.0
Rate of MSL rise (cm·yr <sup>-1</sup> )	0.3457	0.2679	0.2433	0.4041	0.5218	0.4154



장 높고, 남해의 부산이  $0.2433 \text{ cm}\cdot\text{yr}^{-1}$ 로 가장 낮다. 이들 6개 해역의 MSL의 평균 상승속도는  $0.3664 \text{ cm}\cdot\text{yr}^{-1}$ 로 나타났다.

Yang[2023]은 장기간의 전지구적 해수면 변화는 맨틀 대류(mantle convection)와 밀접히 관련되어 있다고 판단하였다. 즉, 그는 동력학적 지형에 기인한 해분의 굴절은 해분의 내용적을 변화시킬 수 있으며, 따라서 전지구적 해수면변화를 야기할 수 있다고 주장하였다. 이에 따라 그는 판구조의 재구성으로부터의 과거 해저 연령과 맨틀 대류모형으로부터 동역학적 지형에 기초하여 410Ma 이래 전지구적 해수면 변화에 미치는 동역학적 지형의 영향을 검토하였다. 그 결과, 해저연령분포에 의한 전지구적 해수면 변화는 장기간의 전지구적 해수면 변화를 제어하는 주요 요인인 것으로 나타났다. 한편, Hogarth *et al.*[2021]은 1958년 이전의 PSMSL(Permanent Service for Mean Sea Level) 자료를 보다 확장하고 개량하여 영국 연안에 대한 광범위한 해수면 자료를 단일 체계로 동화하였다. 그들은 1823년부터 2018년에 걸친 영국 연안에서의 해수면 변화 속도는 (GIA를 고려하여) 연평균  $0.212\pm 0.002 \text{ cm}\cdot\text{year}^{-1}$ 로 평가하였다. Roy *et al.*[2023]은 인디아 연안에 있어서의 수면상승에 미치는 기후변화의 잠재적 영향과 연안 서식처에 대한 취약성을 조사하였다. 이들은 연안 취약성(coastal vulnerability index; CVI)의 정량적평가를 위해 지형학(G), 해수면변화(SLC), 연안형상(CS), 상대적 해면변화(RSLC), 평균과고(MWH), 평균조차(MTR), 해안선변화속도(shoreline change rate; SCR), 육지사용과 인간활동(LU), 인구(P) 등의 물리적 요소를 고려하였다. 그 결과(예상된) 계획된 해수면상승(SLR)은 보다 높은 RCP(representative concentrations pathways) 시나리오하에 가장 높은 속도로 증가하고 있는 것으로 나타났다. Wahl *et al.*[2013]은 북해의 연안을 따라 균일하게 분포한 30개 정점에서 지난 200년간 관측한 검조소자료를 분석하여 평균해수면의 역사적 변화를 평가하였다. 그 결과, 상대적인 해수면 변화는 연직적인 육지 운동 패턴과 광범위하게 일치하였으며, 1900년부터 2011년까지 동안의 장기간의 평균해수면 변화 속도는 전체 북해 지역에 대하여  $0.15\pm 0.01 \text{ cm}\cdot\text{y}^{-1}$ 로 추정되었다. 특히, 최근 (20-30년에 걸친) 해수면 상승속도는 높은 공기압축의 변화 때문이며, 이러한 상승률은 장기간의 평균에 비해서는 높지만, 최근 19세기와 20세기의 다른 시간에 관측된 값들과는 비교할만한 것으로 평가되었다. White *et al.*[2014]은 1993년부터 최근까지 관측된 위성-고도계 자료를 포함하여 1880년대부터 현재까지 관측된 오스트레일리아의 해수면 자료를 해석하였다. 그 결과, ENSO의 영향을 제거하고 GIA(Glacial Isostatic Adjustment; 빙하지각균형조정, 즉 빙하가 감소한 지역의 지면은 상승하고 주변 지역의 지면은 상대적으로 하강하는 효과) 영향과 대기압 효과를 허용할 경우, 오스트레일리아의 평균 해수면 변화는 1966년부터 2010년까지 관측된 전지구적 평균 해수면 변화에 유사하였다. 또한 1966년부터 2009년까지 및 1993년부터 2009년까지의 기간 동안, 해안선 주변에서의 상대적인 해수면의 평균 상승속도는 각각  $0.14\pm 0.03 \text{ cm}\cdot\text{y}^{-1}$ 과  $0.454\pm 0.13 \text{ cm}\cdot\text{y}^{-1}$ 으로 나타났는데, 이것은 ENSO와 관련된 신호를 제거하면 각각  $0.16\pm 0.02 \text{ cm}\cdot\text{y}^{-1}$ 과  $0.27\pm 0.06 \text{ cm}\cdot\text{y}^{-1}$ 이었다. 특히 GIA와 대기압 변화를 보

정하면, 이들 값은 각각  $0.21\pm 0.02 \text{ cm}\cdot\text{y}^{-1}$ 과  $0.31\pm 0.06 \text{ cm}\cdot\text{y}^{-1}$ 로, 동일한 기간 동안의 전지구적 평균 상승속도인 (조위계로부터의)  $0.2\pm 0.03 \text{ cm}\cdot\text{y}^{-1}$ 과 (위성고도계로부터의)  $0.34\pm 0.04 \text{ cm}\cdot\text{y}^{-1}$ 의 상승속도와 유사하였다. Yang *et al.*[2021]은 다양한 수치적 체계(numerical framework)내에서 폭풍 해일에 미치는 황해에서의 해수면상승(sea level rise; SLR)의 영향을 검토하였다. 그들은 이를 위해 지난 100년 동안의 상대적인 평균해수면상승(RMSLR)의 시나리오에 대하여 ICE-6G/VMSa model을 사용하여 GIA의 영향을 조정하였다. 그 결과, 폭풍 해일 높이의 증폭 또는 쇠퇴는 해수면 변화 그 자체의 크기에 의해 영향을 받는 것뿐만 아니라 SLR로 인한 조차와 파랑의 변화에 의해 조절되는 것으로 나타났다. 또한 황해 남부에 있는 방사상의 모래톱(sand ridge)내에서는 조차와 비선형성의 증폭효과가 균일한 시나리오하에서 과소평가되는 경향을 보여, 이 해역에 있어서 폭풍 해일에 미치는 SLR의 영향이 과소평가될 수 있음을 시사하였다.

### 3.3 해수면온도(SST) 변화와 평균해수면(MSL) 변화와의 관계

전술한 서해, 남해, 동해에서의 SST의 월변화(Fig. 2)와 MSL의 월변화(Fig. 4)를 살펴보면, 해역에 따라 변화 패턴은 서로 상이하지만, 각 해역에서의 SST와 MSL의 변화 패턴은 서로 유사한 것을 알 수 있다. 이것은 SST와 MSL의 변화 사이에 유의미한 관련이 있음을 의미한다. 즉, 각 해역에서의 SST의 월변화가 MSL의 월변화를 야기하는 주요인인 것으로 판단된다. 한 예로서, Islek and Yukseil[2023]은 지중해 동부와 흑해에서 1981-2020(또는 1993-2019) 기간 동안 관측한 SST와 MSLP(mean sea level pressure)의 시공간적 변동을 검토한 결과, 최근의 SST의 온난화 경향이 MSLP를 감소시켜 지중해 동부와 흑해에 있어서의 해수면 상승 경향을 촉발하고 있는 것으로 평가하였다. 따라서, 이들 또한 SST의 온난화가 지중해와 흑해에 있어서의 해수면 상승의 원인으로 지목하였다.

한편, 각 해역에서의 SST의 연변화(Fig. 3)와 MSL의 연변화(Fig. 5)의 추이를 살펴보면, SST의 상승속도는 남해 해역인 부산과 제주도에서는 느린 반면, 동해의 울릉도와 서해의 인천에서는 빠른 것을 알 수 있다. 한편, Table 1과 Table 2에 따르면, SST의 상승속도는 남해의 부산과 제주도에서는 느리지만, 동해의 울릉도와 서해의 인천에서는 상대적으로 빠르다. 반면, MSL의 상승속도는 동해의 포항과 울릉도가 서해의 인천이나 군산, 또는 남해의 부산이나 제주도에 비해 상대적으로 빠르다. 따라서 동해의 울릉도는 SST와 MSL 모두 타 해역에 비해 상승속도가 비교적 빠른 곳으로 생각되지만, 이러한 이유에 대해서는 불명하다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 지난 50여년간 국립수산물과학원 한국해양자료센터의 동해(포항, 울릉도), 남해(부산, 제주), 서해(인천, 군산) 등 6개 정점에서 관측한 수온자료와 해양조사원이 관측한 평균해면 자료를 분석하여 각 해역에서의 해수면온도(SST)와 평균해수면(MSL)의

변화 특징을 고찰하였다.

SST는 동계(2월)에는 남해의 부산과 제주도에 가장 높았고, 서해의 인천과 군산에서 가장 낮은 반면, 하계(8월)에는 서해의 인천과 군산에서 가장 높았고, 동해의 포항과 울릉도에서 가장 낮았다. 수온의 월변화 형태는 동일 해역(예를 들면 인천과 군산, 부산과 제주도, 포항과 울릉도)에서는 서로 유사하였으며, 이러한 계절에 따른 수온변화는 각 해역의 지리적 특성과 해역 주변을 흐르는 해류와 관련이 있을 것으로 판단되었다.

조사기간 중 SST의 평균값은 남해의 부산과 제주도가 동해의 포항과 울릉도에 비해서는 약 1-2°C, 서해의 인천과 군산에 비해서는 약 3°C 이상 높았다. 또한 SST의 상승속도(또는 상승률)는 동해 울릉도가 0.0412°C·yr<sup>-1</sup>로 가장 높았고, 남해 제주도가 0.0101°C·yr<sup>-1</sup>로 가장 낮았으며, 이들 6개 해역에서의 SST의 평균 상승속도는 0.0259°C·yr<sup>-1</sup>로 나타났다. 이러한 결과는 Kang[2000]에 의한 한국 연안의 지난 30년간(1966-1995년)의 SST의 연평균 상승속도 0.024°C·y<sup>-1</sup> 또는 García and Belmonte[2011]에 의한 지난 20년간(1985-2007)의 SST의 연평균 상승속도 0.03°C·y<sup>-1</sup>과 대체로 유사하였다.

조사기간 중 MSL은 6개 해역 모두 상승추세에 있었으며, 계절적으로는 하계(8월)에 가장 높았고, 동계(2월)에 가장 낮았다. 또한 평균 MSL은 폐쇄 해역인 서해의 인천과 군산에서 높았고, 개방 해역인 동해의 포항과 울릉도에서 낮았다. MSL의 연평균 상승속도(또는 상승률)는 동해의 포항이 0.5218 cm·yr<sup>-1</sup>로 가장 높았고, 남해의 부산이 0.2433 cm·yr<sup>-1</sup>로 가장 낮았으며, 이들 6개 해역의 MSL의 평균 상승속도는 0.3664 cm·yr<sup>-1</sup>로 나타났다. 이 값은 Hogarth *et al.*[2021]에 의한 영국 연안에서의 연평균 상승속도 0.212±0.002 cm·year<sup>-1</sup>나 Wahl *et al.*[2013]의 영국 해협과 북해의 연안에서의 평균해수면의 상승 속도 0.12±0.01 cm·y<sup>-1</sup>나 0.15±0.01 cm·y<sup>-1</sup>보다는 다소 높았다. 그러나, 지난 200년간의 전지구적 평균 상승속도인(조위계로부터의) 0.2±0.03 cm·y<sup>-1</sup>나(위성고도계로부터의) 0.34±0.04 cm·y<sup>-1</sup>와 유사하였다.

서해, 남해, 동해에서의 SST와 MSL의 월변화 패턴은 해역에 따라 상이하지만, 동일 해역내에서는 서로 유사하였다. 따라서, 각 해역에서의 SST의 월변화가 MSL의 월변화를 야기하는 1차적 요인인 것으로 생각된다. 그러나 전지구적으로 MSL의 상승속도(또는 상승률)를 지배하는 요인은 ENSO를 비롯하여 GIA, 지각의 상하운동, 해수 체적의 변화 등이 있으므로 이들을 종합적으로 고려할 필요가 있다고 판단된다. 한편, SST의 상승속도는 남해 해역인 부산과 제주도에서는 느린 반면, 동해의 울릉도와 서해의 인천에서는 빨랐다. 반면, MSL의 상승속도는 동해의 포항과 울릉도가 서해의 인천이나 군산, 또는 남해의 부산이나 제주도에 비해 상대적으로 빨랐다. 따라서 동해의 울릉도는 SST와 MSL 모두 타 해역에 비해 상승속도가 비교적 빠른 지역으로 생각되지만, 이러한 이유에 대해서는 불명하다.

이상에서 살펴본 바와 같이, 우리나라 연안의 SST와 MSL은 해역에 따라 그 상승속도에 차이는 있으나 매년 계속 상승하고 있음을 알 수 있다. 그 결과, 수온과 해수면의 상승에 따른 연안에서의 자연 재해 위험성(취약성)이 그만큼 증가할 것으로 예상된다. 또한 지

역사회는 물론 연안의 해양생태계도 상당한 변화를 겪게 될 것으로 판단되므로 앞으로 각 해역의 특성에 맞는 구체적이고 실효성 있는 대책마련이 시급히 요청된다.

## References

- [1] Bayne, B.L., Brown, D.A., Burns K., Dixon, D.R., Ivanovici, A., Livingstone, D.R., Lowe, D.M., Moore, M.N., Stebbing, A.R.D., Widdows, J., 1985, "The effects of stress and pollution on marine animals (Praeger special studies)", Praeger Scientific, Westport, C.T., 1-9.
- [2] Cho, K., Maeng, J., 2007, "Some thoughts on direction to cope with the sea level rise in Korea", J. Korean Soc. Mar. Environ. Engineering, 10(4), 227-234.
- [3] Islek, F., Yuksel, Y., 2023, "Spatio-temporal long-term evaluations of the mean sea level pressure, sea level change, and sea surface temperature over two enclosed seas", Regional Studies in Marine Science, 66, 103130.
- [4] García, M.J. López, Belmonte, A.M. Camarase, 2011, "Recent trends of SST in the western Mediterranean basins from AVHRR pathfinder data (1985-2007)", Global and Planetary Change, 78, 127-136.
- [5] Hogarth, P., Pugh, D.T., Hughes, C.W., Williams, S.D.P., 2021, "Changes in mean sea level around Great Britain over the past 200 years", Progress in Oceanography, 192, 102521.
- [6] Hue, H.K., Kim, D.H., Ahn, S.H., Park, G.W., 2000, "Characteristics of the sedimentary environment in Yoja Bay in the summer of 1998", Korean Environ. Biol., 18(2), 227-235.
- [7] IPCC, 2007, Report for Global warming, 22-24.
- [8] Jeong, H.D., Hwang, J.D., Jung, K.K., Heo, S., Sung, K.T., Go, W.J., Yang, J.Y., Kim, S.W., 2003, "Long term trend of change in water temperature and salinity in coastal waters around Korean Peninsula", J. Korean Soc. of Mar. Environ. & Safety, 9(2), 59-64.
- [9] Jung, T.S., 2014, "Change of mean sea level due to coastal development and climate change in the western coast of Korean Peninsula", J. Korean Soc. Coastal and Ocean Engineers, 26(3), 120-130.
- [10] Kang, Y., Jeong, G., 2000, "Global warming and seas", NFRDI, 65-69.
- [11] Kang, Y.Q., 2000, "Warming trend of coastal waters of Korea during recent 60 years(1936-1995)", Fish. Sci. Tech., 3(3,4), 173-179.
- [12] Kang, Y.Q., Choi, S.W., 1995, "Annual and interannual fluctuations of coastal water temperatures in the Tsushima Current and the Kuroshio regions", Bull. Korean Fish. Soc., 18(6), 497-505.
- [13] Kim, C.H., Kim, K., 1983, "Characteristics and origin of the cold water mass along the east coast of Korea", J. Korean Oceanol. Soc., 18, 73-83.
- [14] Kim, H., Yug, S., 1983, "Inversion phenomena of temperature in the southern sea of Korea", Bull. Korean Fish. Soc., 16(2), 111-116.
- [15] Kim, J., Han, I., Ahn, J., 2018. Correlation analysis of UA using

- wind data of AWS/ASOS and SST in summer in the East Sea”, J. Korean Soc. Mar. Environ. & Safety, 24(6), 773-784.
- [16] Kim, K., Kim, K., Min, D., Volkov, Y., Yoon, J., Takematsu, M., 2001, "Warming and structural changes in the East (Japan) Sea: a clue to future changes in global oceans?", Geophys. Res. Lett., 28, 3293-3296.
- [17] Kim, K., Shin, J., Koh, E., Koh, G., Lee, K., 2009, "Sea level rise around Jeju Island due to global warming and movement of groundwater/seawater interface in the eastern part of Jeju Island", J. Soil & Groundwater Environment, 14(3), 68-79.
- [18] Kim, S., Woo, S., Kim, B., Hur, S., 2011, "Trends in sea surface temperature (SST) change near the Korean Peninsula for the past 130 years", Ocean and Polar Res., 33(3), 281-290.
- [19] Ku, Hyeyun, Kim, Taeyun, Song, Young-il, 2021, "Coastal vulnerability assesment of sea-level rise associated with typhoon-induced surges in South Korea", Ocean and Coastal Management, 213, 105884.
- [20] Kwak, H., 1976, "General oceanographic factors in Yeongil Bay of Korea, late October 1973", J. Oceanological Soc. Korea, 11(2), 89-95.
- [21] Kwon, Y.J., Park, S.H., Jin, S.J., 2020, "Economic feasibility analysis of restoration project of the Bunam Lake in Cheonsu Bay", Korea Environ. Policy and Admin. Soc., 28(1), 163-183.
- [22] Lee, H.B. and Oh, Y.S., 1986, "A summer algal vegetation in Youngil Bay, eastern coast of Korea", Korean J. Phycol., 1(1), 225-240.
- [23] Lie, H., Cho, H., 2002, "Recent advances in understanding the circulation and hydrography of the East China Sea", Fish. Oceanogr., 11(6), 318-328.
- [24] Luis, A.J., Kawamura, H., 2003, "Seasonal SST patterns along the West India shelf inferred from AVHRR", Remote Sensing of Environment, 86, 206-215.
- [25] Min, H.S., Kim, C., 2006, "Interannual variability and long-term trend of coastal sea surface in Korea", Ocean and Polar Res., 28(4), 415-423.
- [26] Minobe, S., Sako, A., Nakamura, M., 2004, "Interannual to interdecadal variability in the Japan Sea based on a new gridded upper water temperature dataset. J. Phys. Oceanogr., 34, 2382-2397.
- [27] Oh, S.M., Kwon, S.J., Moon, I.J., Lee, E.I., 2011, "Sea level rise due to global warming in the northwester Pacific and Seas around the Korean Peninsula", J. Korean Soc. Coastal and Ocean Engineers., 23(3), 236-247.
- [28] Park, M., Song, J., Han, I., Lee, J., 2019, "A study of long-term trends of SST in the Korean seas by reconstructing historical oceanic data", J. Korean Soc. Mar. Environ. & Safety, 25(7), 881-897.
- [29] Park, W., Oh, I., 2000, "Interannual and interdecadal variations of sea surface temperature in the East Asian Marginal Seas", Prog. Oceanogr., 47, 191-204.
- [30] Rahman, SM, Lee, C.I., 2016, "Temperature variabilities at upper layer in the Korean marine waters related to climate regime shifts in the north Pacific. J. Korean Soc. Mar. Environ. & Safety, 22(1), 145-151.
- [31] Rho, H.K., Kim, Kuh, 1983, "Variation of sea surface temperature between Jeju and Mokpo and between Jeju and Wando", J. Oceanol., Soc. Korea, 18(1), 64-72.
- [32] Roy, P., Pal, S.C., Chakraborty, Chowdhuri, I., Saha, A., Shit, M., 2023, "Effects of climate change and sea-level rise on coastal habitat: Vulnerability assessment, adaptation strategies and policy recommendations", J. Environ. Management, 330, 117187.
- [33] Scrosati, R.A., 2020, "Upwelling spike and marked SST drop after the arrival of cyclone Dorian to the Atlantic Canadian coast", J. Sea Res., 159, 101888.
- [34] 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 korea waters", J. Korean Soc. Mar. Environ. & Safety, 16(4), 353-360.
- [35] Seo, W., Yoon, H., 2008, "Relations NOAA/AVHRR SST between migratory fishes in the Korean seas", J. Korea Institute of Maritime Information & Communication Sciences, 12(12), 2265-2270.
- [36] Severov, D.N., Mordecki, E., Pshennikov, V.A., 2004, "SST anomaly variability in Southwestern Atlantic and El Niño/southern oscillation", Advances in Space Research, 33, 343-347.
- [37] Shin, H.C., Lim, K.H., 2003, "The influence of water temperature and salinity on the filtration rates of the short-necked clam, *Ruditapes philippinarum*", Korean J. Malacology, 19(1), 1-8.
- [38] Varela, R., Costoya, X., Enriquez, C., Santos, F., Gómez-Gesteira, M., 2018, "Differences in coastal and oceanic SST trends north of Yucatan Peninsula", J. Mar. Systems, 182, 46-55.
- [39] Wahl, T., Haigh, I.D., Woodworth, P.L., Albrecht, F., Dillingh, D., Jensen, J., Nicholls, R.J., Weisse, R., Wöppelmann, G., 2013, "Observed mean sea level changes around the North Sea coastline from 1800 to present", Earth-Science Reviews, 124, 51-67.
- [40] White, Neil J., Haigh, Ivan D., Church, John A., Koen, Terry, Watson, Christopher S., Pritchard, Tim R., Watson, Phil J., Burgette, Reed J., McInnes, Kathlee L., You, Zai-Jin, Zhang, Xuebin, Tregoning, Paul, 2014, "Australian sea levels -Trends, regional variability and influencing factors. Earth-Science Reviews, 136, 155-174.
- [41] Yang, An, 2023, "Long-term global sea-level change due to dynamic topography since 410 Ma", Deep-Sea Research Part I, 191, 103944.
- [42] Yang, Jie, Yan, Feng, Chen, Meixiang, 2021, "Effect of sea level rise on storm surges in the south Yellow Sea: A case study of Typhoon Muifa (2011)", Continental Shelf Research, 215, 104346.
- [43] Yun, Kyung-Sook, Chan, Johnny C.L., Ha, Kyung-Ja, 2012, "Effects of SST magnitude and gradient on typhoon tracks around East Asia: A case study for Typhoon Maemi (2003)", Atmospheric Research, 109-110, 36-51.

---

Received 1 July 2024

Revised 20 August 2024

Accepted 21 August 2024