

## 한반도 주변 해역 해양기후모델 구축 및 수산분야 적용

김창신\* · 이준수 · 양준용 · 한인성

국립수산과학원 기후변화연구과

# Dynamic Downscaling for Regional Ocean Climate Modeling Around the Korean Peninsula and Its Application in Fisheries

Changsin Kim\*, Joon-Soo Lee, Joon-Yong Yang and In-Seong Han

Division of Ocean Climate & Ecology, National Institute of Fisheries Science, Busan 46083, Republic of Korea

We developed a regional ocean climate model using dynamic downscaling in the Northwest Pacific Ocean to build a climate model for the Korean Peninsula. The past marine environment was reproduced through historical simulations, and the future marine environment in 2100 was predicted according to the shared socioeconomic pathways (SSP) climate change scenario. The future sea surface temperature of the Korean seas is predicted to rise about 1–4°C, and the increase in water temperature in the East Sea is expected to be the largest. The National Institute of Fisheries Science has monitored abnormal seawater temperatures such as high and low seawater temperatures in coastal and inland waters, and predicted that the number of high seawater temperature days in the East, West, South Sea, and the coast of Jeju Island will increase in the future. In addition, the occurrence of Ciguatera fish poison plankton around Jeju Island was projected to increase. This study is expected to provide accurate forecasting information for fishery issues. The aim of this study was to analyze future ocean environment changes around the Korean Peninsula using climate change SSP scenarios and predict fisheries issues through future projections of the regional ocean climate model.

Keywords: Climate change, Dynamic downscaling, Regional ocean climate model, Ocean and fisheries

## 서론

기후변화에 관한 정부 간 협의체(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)에서 발간한 제6차 평가보고서에 따르면, 1850–1900년 대비 2011–2020년에 전지구 지표면 온도가 1.1°C 상승했음을 확인했다. 한반도 주변해역의 표층수온, 해수면 높이, 용존산소량 등 주요 해양환경 기후변수는 전지구 평균 대비 두 배 이상 빠르게 변화하고 있어, 우리바다 해양환경이 급속히 변하고 있음을 시사한다(Belkin, 2009; IPCC, 2013).

급격히 변화하는 우리바다 해역의 계절별 표층수온 변화양상은 2000년대 중·후반까지 겨울철 수온 상승이 연평균 수온 상승을 주도하였다(Kang, 2000; Min and Kim, 2006; Seong et al., 2010; Kim et al., 2011). 그러나 2010년대 이후에는 여름철 수온 상승이 겨울철에 비하여 높아지면서, 우리바다 해역에서 계

절별 표층수온 상승 경향이 달라졌다. 이에 따른 여름철 고수온, 겨울철 저수온 등 극한 수온 현상이 자주 발생하는 것으로 보고되었다(Han et al., 2023). 여름철 극한 고수온 현상의 주요 원인으로서는 여름철 고기압 기단 강화와 난류 수송량의 증가로 설명하고 있다. 최근 10여 년간 여름철 우리바다 해역에 영향을 미치는 기단(북태평양고기압 등)이 강하게 확장하여 과거에 비하여 폭염일수가 증가하였으며, 저위도로부터 대한해협을 통과하여 동해로 열을 수송하는 대마난류 수송량의 세기가 여름철을 중심으로 더욱 강화되어, 고수온이 발생하기에 좋은 조건이 형성되었다 때문이다(Shin et al., 2022; Han et al., 2023; NIFS, 2023). 지구온난화가 고려된 거의 모든 시나리오 및 수치모델로 구현된 경로에서 누적 CO<sub>2</sub> 배출량 증가로 인해 가까운 미래(2021–2040)에 기온은 계속 증가할 것이다. 대부분의 시나리오에서 2030년대 상반기에 기온이 1.5°C 증가할 것으로 예측되

\*Corresponding author: Tel: +82. 51. 720. 2231 Fax: +82. 51. 720. 2266

E-mail address: changsin@korea.com



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

<https://doi.org/10.5657/KFAS.2024.0177>

Korean J Fish Aquat Sci 57(2), 177-185, April 2024

Received 4 April 2024; Revised 11 April 2024; Accepted 19 April 2024

저자 직위: 김창신(연구사), 이준수(연구관), 양준용(연구관), 한인성(연구관)

있으며, 21세기 말까지 2.0°C 온도 상승을 제어하기가 매우 어려울 것이다(IPCC, 2023). 결국, 전 지구 지표 온도 상승을 제한한다 하더라도 해수온 상승 등의 변화들은 지속될 것으로 전망되고 있다. 지구온난화가 심각해질수록 세계의 모든 지역에서 복합적이고 동시적인 위해가 심화될 것이다.

지구온난화는 인간 활동뿐만 아니라 해양생태계에도 영향을 미치고 있으며, 최근 해양열파(marine heatwaves) 등 기후변화에 따른 극한 해양현상들은 연근해 어업과 양식업의 생산량에 큰 영향을 미치고 있다(Kobayashi et al., 1997; Stocker et al., 2013). 최근 심화되고 있는 기후변화의 영향으로 여름철에는 고수온, 겨울철에는 저수온이 빈번하게 발생하여 연안과 내만에 위치한 양식장을 중심으로 양식생물 피해가 매년 끊이지 않고 있다. 이에 해양수산부와 국립수산물품질관리원은 2017년 이상수온 특보 기준을 마련하여 운영하고 있으며, 매년 고수온·저수온 종합 대책을 수립하고, 고수온기/저수온기 양식방법별 관리요령을 어업인에게 제공하고 있다(NIFS, 2019).

시구아테라 독소는 대표적인 어패류 섭취와 관련된 식중독으로 주로 열대와 아열대 해역의 산호초 해역에서 발견되며, 주로 독성이 축적된 열대 어류를 섭취했을 경우에 시구아테라 식중독에 걸리게 된다. 그러나 최근 기후변화의 영향으로 우리나라 제주 해역에서도 시구아테라 어독 플랑크톤이라고 불리는 시구아테라 원인 플랑크톤(*Gambierdiscus australis*)이 발견되고 있으며, 향후 수온상승에 따라 출현이 늘어날 것으로 예상되고 있다(NIFS, 2023).

본 연구에서는 한반도 주변해역에서 해양온난화로 야기되는 이상수온 현상, 시구아테라 어독 플랑크톤 등 수산현안을 해결하고자, 해양기후모형을 구축 및 공동사회경제경로(shared socioeconomic pathways, SSP) 기후변화 시나리오를 적용하여 한반도 주변해역의 미래 해양환경을 전망결과를 생산하였다. 지역해 기후모형 결과를 이용하여 SSP 기후변화 시나리오에 따른 고수온/저수온 일수 변화와 시구아테라 어독 플랑크톤의 발생가능 일수와 같은 주요 수산현안의 미래를 예측하고자 한다. 여기에 사용된 모형, 초기/경계 자료 및 방법을 2장에서 소개하였으며, 3장에서는 수립한 지역해 기후모형을 이용하여 예측 실험을 수행한 결과를, 마지막으로 4장에서 예측실험의 활용 및 수산현안 연구 결과를 요약하여 제시하였다.

## 재료 및 방법

### 해양기후모형 구축

한반도 주변해역에서 해양기후변화를 전망하기 위하여, 해양순환모델인 regional ocean modeling system (ROMS)를 사용하여 물리적인 해양환경을 재현하고 예측 자료를 생산하였다. ROMS는 다양한 지형을 고려하는 자유수면, 정역학, 기본방정식을 계산하는 3차원 수치모델이다. 수평적으로는 Arakawa-C 격자체계에서 직교곡선좌표계(orthogonal-curvilinear coordi-

nate)를 사용하며, 수직적으로는 S-좌표계(stretched terrain-following coordinate)를 이용함으로써 해안선의 변화와 지형 조건을 잘 표현한다(Arakawa and Lamb, 1977; Shchepetkin and McWilliams, 2005).

모델영역은 한반도 주변해역의 해류 순환을 대표하는 쿠로시오, 대마난류, 황해난류, 동한난류 등을 잘 표현할 수 있는 북서태평양 영역(18.5–48.5°N, 117.5–155.5°E)으로 설정하였다. 수평해상도는 약 10 km이며, 연직은 30개 수층으로 구성하였다.

모델에 입력된 수심자료는 한반도 주변해역에서는 수심변화를 잘 모사하는 성균관대 1분 수심자료(Sungkyunkwan University's 1 min digital bathymetric data; Choi et al., 2002)와 그 외 북서태평양 해역에서는 ETOPO5 (5'간격의 전지구 수심자료)를 합성하여 최소 수심을 5 m로 설정하였다.

ROMS 해양모델에 사용된 연직 혼합 모수화 기법은 Mellor and Yamada level-2.5 closure scheme을 사용하였고(Mellor and Yamada, 1982), 수평 이류항과 수직 이류항은 각각 3차 upstream 기법과 4차 중앙 차분법을 이용하여 계산하였다. 개방경계역에서는 전지구 모델결과에서 가져온 해수유동, 수온, 염분 등이 입력자료로 활용되었으며, TPX07 조석효과가 고려되었다. 자세한 세부 조건 설명은 Kim et al. (2014)에 기술되어 있다.

모델 영역의 동·서·남쪽은 개방경계(open boundaries)로 설정하여, 모델의 안정화를 위해 기후평균장을 이용하여 30년간 spin-up을 실시하였다. 안정화 기간 동안 hybrid coordinate ocean model (HYCOM)으로부터 얻어진 수온, 유속, 염분, 해면고도 등이 개방경계에서 강제력으로 사용되었다(HYCOM, 2023). 대기강제력은 European center for medium range weather forecasting 자료를 사용했다(ECMWF, 2023). 본 연구에 사용된 ROMS 모형은 한반도 주변해역의 해수순환 및 해양환경특성(수온, 염분 등) 및 그 연변동성을 비교적 잘 모사하는 것으로 평가되어(Kim et al., 2014), 지역해 기후모델로 활용하고자 한다. 1992년 전지구 기후모델 대기강제력과 개방경계 자료를 이용하여 10년간 spin-up을 수행하였으며, 1993년 이후 생산된 모델결과를 분석에 활용하였다.

### 전지구 기후모델

IPCC의 제6차 평가보고서(sixth assessment report, AR6; 2023년 발간) 작성에 사용된 '제6차 접합모델 비교프로젝트(coupled model intercomparison project phase 6, CMIP6)'는 다수의 전지구 기후모델 결과를 제공하고 있다. IPCC는 CMIP6와 AR6 작성을 위해 국제적으로 합의된 SSP를 발표하였으며, 이는 새로운 미래 온실가스 변화 경로를 따른 미래변화 전망이다. 온실가스 감축과 기후변화 적응정책 수행여부에 따른 4가지 미래사회경제 상 시나리오는 각각 다른 대기복사강제력에 따라 수행된 네 가지 실험(SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, SSP5-8.5)을 사용하여 역학적 상세화를 통한 한반도 주변해역

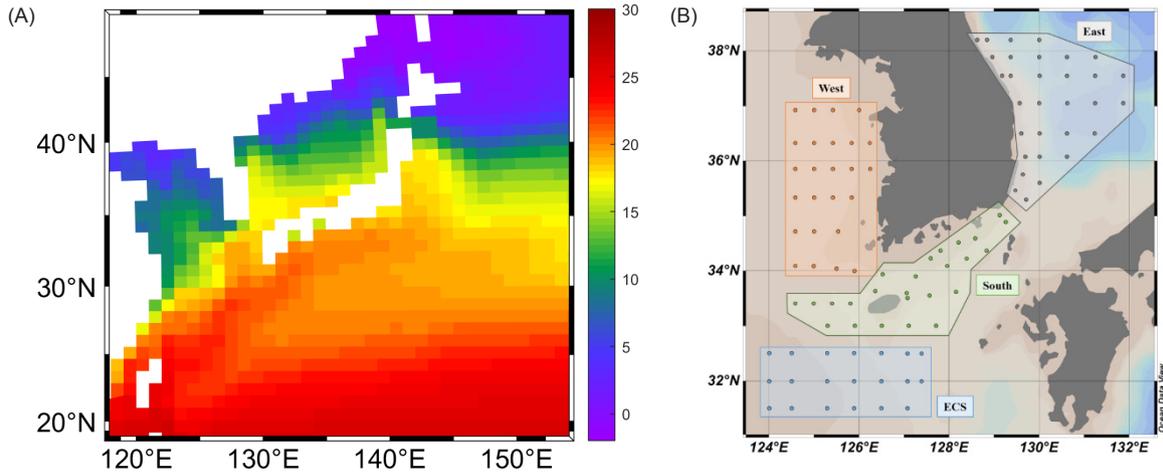


Fig. 1. (A) Global climate model result of sea surface temperature (°C) of around the Korean Peninsula and (B) observation points comparing with model result.

의 변화를 살펴보았으며, 각각의 실험들에 대한 상세한 설명은 다음과 같다(KMA, 2019).

**Historical simulation** (과거 기후 실험): 과거 기후(1850–2014) 기간의 온실기체 및 에어로졸에 의한 강제력을 적용한 시뮬레이션 결과.

**SSP1-2.6** (지속 성장): 사회 불균형의 감소와 친환경 기술의 빠른 발달로 기후변화 완화, 적응능력이 좋은 지속성장가능 사회경제 구조의 저탄소 시나리오.

**SSP2-4.5** (중도 성장): 중도성장의 사회경제 시나리오로 기후변화 완화 및 사회경제 발전 정도가 중간 단계를 가정하는 경우 (SSP1과 SSP3의 중간사례).

**SSP3-7.0** (불균형 성장): 사회경제 발전의 불균형과 제도적 제한으로 인해 기후변화에 취약한 상태에 놓이는 사회경제 구조의 시나리오 (비교 기준치, Baseline).

**SSP5-8.5** (고속 성장): 기후정책 부재, 화석연료 기반 성장과 높은 인적 투자로 기후변화 적응능력은 좋지만, 완화능력이 낮은 사회경제 구조의 고탄소 시나리오.

각각의 SSP 실험들은 CMIP5 (coupled model intercomparison project phase 5)의 대표농도경로(representative concentration pathway, RCP) 실험들과 같이 2100년 기준의 복사강제력(각각 2.6, 4.5, 7.0, 8.5  $W/m^2$ )을 목표로 실험을 수행하였기 때문에 CMIP5 RCP 실험 결과들과 비교 할 수 있다.

Oh et al. (2023)은 CMIP6 전 지구 기후모델들을 비교하여 북서태평양 해역에서 역학적 상세화 수행에 적합한 모형들을 각각 평가하여 정량화하였다. 그 결과 중 북서태평양 재현성이 가장 뛰어난 모델로 평가된 프랑스 국립기상연구센터(Centre National de Recherches Météorologiques, CNRM)의 CNRM-ESM2-1 모델을 지역해 기후모델에 적합한 모델로 선정하였으

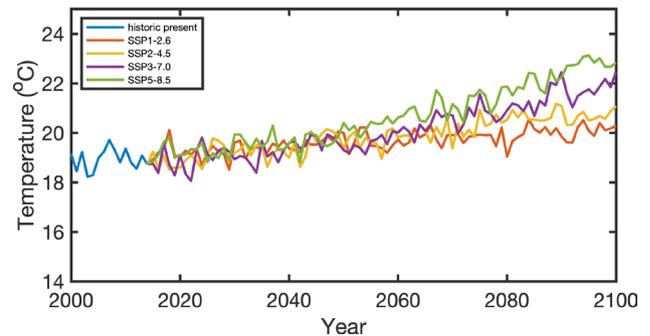


Fig. 2. Time series of sea surface temperature by scenario from the global climate model result.

며, 모델 수행하기 전에 전지구 기후모델의 한반도 주변해역의 수온의 공간적인 분포를 살펴 보았으며(Fig. 1A), 비교 정점은 추후 관측자료와 비교를 위해 국립수산과학원 정선해양조사 정점으로 선정하였다(Fig. 1B).

본 연구에서는 SSP 시나리오 실험결과에 따른 한반도 주변해역 표층 수온 변화를 분석하기 위하여, 네개의 SSP 시나리오 실험결과 중 21세기 마지막 10년(2091–2100)과 과거기후 실험(historic simulation)의 마지막 10년(2005–2014)의 평균 해면 수온을 각 실험별로 비교하여 기후변화에 따른 수온 변화로 가정하였으며, 5 m 수층의 수온을 평균 해면 수온으로 표현하였다. 또한, 현재 기준의 차이는 연구자마다 다르게 나타날 수 있으므로, 본 연구에서는 수온차이뿐만 아니라 상승율을 이용한 수온 변동도 같이 기술하였다.

연간 상승률을 이용하여 2015년부터 2100년까지의 수온 변화율은 1.0–4.0°C이며, 미래전망 마지막 10년(2091–2100) 평균과 과거기후 실험의 마지막 10년(2005–2014) 평균의 온도차이는 약 1.0–3.7°C이다(Fig. 2, Table 1).

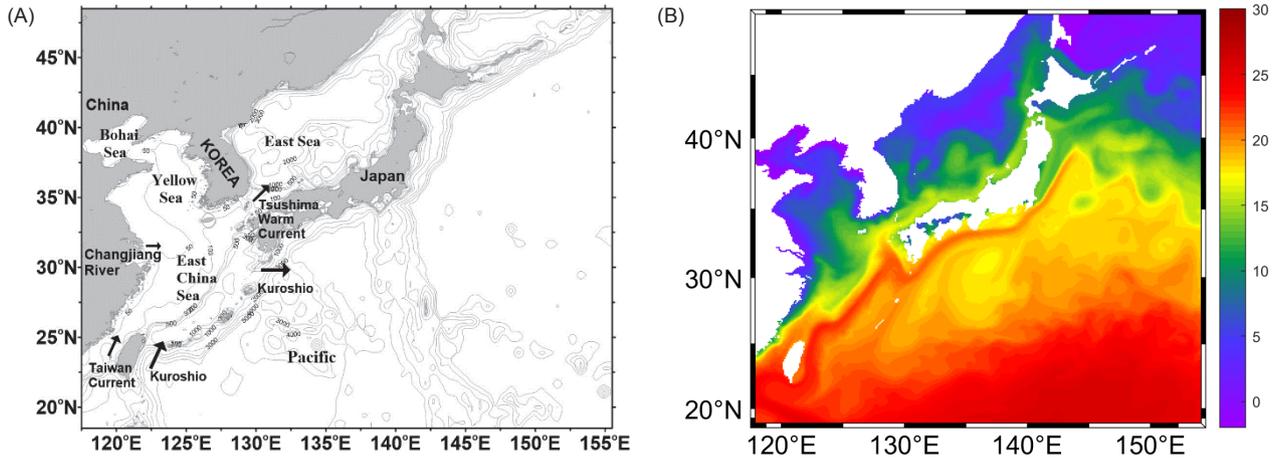


Fig. 3. Region climate model of (A) domain and (B) its result of sea surface temperature.

전지구모델에서 모사하는 한반도 주변해역의 수온변화에 대해서 살펴 보았으며, 다음장에서는 네 가지 실험(SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, SSP5-8.5)을 사용하여 역학적 상세화를 통한 한반도 주변해역의 상세 변화를 살펴보겠다.

**지역해 기후모델: 상세 기후변화 시나리오**

지역해 기후모델은 역학적 상세화 과정을 통해 고해상도 우리나라 바다 해양기후모델을 구축하였다. 역학적 상세화는 공간 해상도가 약 100 km인 전지구 기후모델 과거 재현 및 시나리오 별 해양-대기 예측자료를 경계값으로 사용하여, 북서태평양해역에서 공간해상도 약 10 km인 지역해 해양기후모델의 격자로 구성하여 고도화 하였다(Fig. 3A). 모델 영역내의 화살표는 한반도 주변해역의 주요 해양현상을 대변하는 해류 등을 표현 하였으며, 모델 영역내의 대표수심은 등수심선으로 표현하였다.

해양수치모델 ROMS를 이용해 지역해기후모델을 구축하고 미래 해양기후변화를 전망하기 앞서서, 1993년부터 2014년까지 과거 재현실험(historical run)을 수행하여 이전의 해양환경을 재현하였다. 과거 재현실험 이후에, IPCC AR6 (2023)에 사용된 온실가스 감축 수준 및 기후변화 적응대책 수행 여부 등을 고려한 SSP 기후변화 4개 시나리오(SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, SSP5-8.5)에 대해 2100년까지의 일평균 3차원 해양물리 요소(수온, 염분, 유속장 등)의 정보생산을 각각 완료하

였다.

지역해 해양기후모형 결과는 전지구 해양기후모형 결과(Fig. 1A)에 비하여, 한반도 주변해역에서 주요 해류인 쿠로시오, 대마난류, 황해난류, 동한난류 등의 재현도가 전지구기후모형에 비하여 크게 향상 되었으며, 우리 바다 상세 해양환경 예측성능 향상과 연안지역의 가능성도 나타났다(Fig. 3B).

지역해 기후모델 결과 분석은 전지구 SSP 시나리오 실험결과와 같은 방법으로, 한반도 주변해역 표층 수온 변화를 분석하였다. 연간 상승률을 이용하여 2015년부터 2100년까지의 수온 상승율은 0.9-4.0°C이며, 미래전망 마지막 10년(2091-2100) 평균과 과거기후 실험의 마지막 10년(2005-2014) 평균의 온도 차이는 약 1.1-3.8°C이다. 이는 전지구모델에서 계산한 한반도 주변 해역의 수온 상승과 비슷한 수준의 결과이다(Table 2). 하지만 지역해 기후모델 구축으로 우리바다의 수온과 해류분포 등 해양환경의 상세구조와 해역별 변화를 보다 자세히 살펴볼 수 있다.

SSP 시나리오별 고해상도 해양기후모델 예측 결과, 2100년까지 우리나라 바다의 표층수온은 과거(2005-2014) 평균과 비교해서 지속 성장 시나리오인 SSP1-2.6의 경우 1°C 내외 상승하였으며, 중도 성장 시나리오인 SSP2-4.5의 경우 2°C 내외 상승하고, 불균형 성장을 가정한 SSP3-7.0의 경우 3°C 내외 상승하며, 고속 성장 시나리오인 SSP5-8.5의 경우 4°C 내외까지 상승

Table 1. SST changes around the Korean peninsula using global climate model result

	SSP1-2.6	SSP2-4.5	SSP3-7.0	SSP5-8.5
Slope (°C/yr)	0.0110	0.0248	0.0382	0.0459
Variation (°C)	0.95	2.14	3.28	3.95
Difference (°C) ( $\bar{T}_{2091-2100} - \bar{T}_{2005-2014}$ )	1.04	1.65	2.63	3.72

SST, Sea surface temperature.

Table 2. SST changes around the Korean peninsula using regional climate model result

	SSP1-2.6	SSP2-4.5	SSP3-7.0	SSP5-8.5
Slope (°C/yr)	0.0108	0.0248	0.0383	0.0464
Variation (°C)	0.92	2.13	3.29	3.99
Difference (°C) ( $\bar{T}_{2091-2100} - \bar{T}_{2005-2014}$ )	1.12	1.62	2.58	3.83

SST, Sea surface temperature.

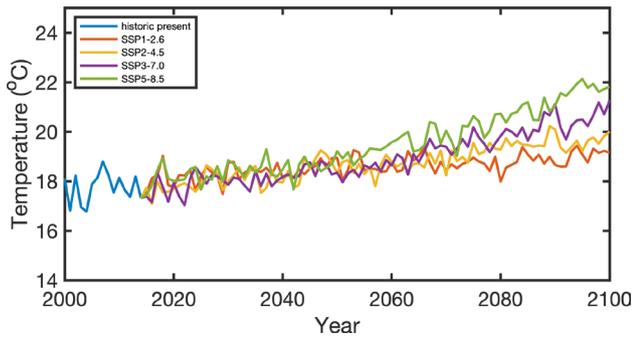


Fig. 4. Time series of sea surface temperature by scenario from the regional climate model result.

하는 것으로 나타났다(Fig. 4).

이러한 수온 상승 경향은 과거 관측자료에서도 나타나며, 특히 서안경계류가 흐르는 경로에서 그 표층수온의 증가 속도는 전지구 평균보다 약 2~3배 빠르다고 하였다(Wu et al., 2012; Jeong et al., 2021). 국립수산물과학원 한국근해해양관측자료(정선해양조사)에 의하면, 지난 55년간(1968–2022) 한반도 주변 해역의 수온상승률은 전지구 평균보다 약 2배 이상 빠르며, 우리나라 해역의 경우 남해, 서해 그리고 동해순으로 수온 상승율이 높음을 제시하였다(NIFS, 2023).

전 지구모델 결과와 지역해모델 결과 모두 유사한 수준의 증가율을 보였으며, 역학적 상세화 기법을 활용한 한반도 주변 해양기후모형을 구축결과는 각각 다른 해역특성을 보이는 동·서·남해를 구분하여 미래 수온상승을 살펴보았다.

### 우리나라 바다 해역별 미래 수온 변화 전망

미래기후 시나리오를 적용한 우리나라 해역 별로 살펴보면, 산업기술의 빠른 발전에 중심을 두어 화석연료 사용이 높고 도시 위주의 무분별한 개발이 확대될 것으로 가정한 SSP5-8.5 시나리오의 경우, 동해는 5°C 내외, 서해와 남해, 4°C 내외 상승하는 것으로 전망되었다. 전지구 SSP 시나리오에서 전망된 해역별 수온 상승 정도 차이에서도 유사한 경향을 보인다(Fig. 5).

동해의 수온 증가가 높게 나타나는 요인으로는, 해양온난화 환경에서 대마난류 수송량과 수온이 증가하여, 대한해협을 통과하여 동해로 유입되는 열의 양이 증가하는 것으로 알려져 있다(Choi et al., 2013). 뿐만 아니라, 시나리오 수치모델 실험 (scenarioMIP) 자료들을 분석에 의하면, 온실기체에 의한 지구 온난화가 북서태평양 해면수온 뿐만 아니라 해류의 변화에 미치는 영향을 분석하였다(O'Neill et al., 2016). 지구온난화 환경에서 대기순환의 변동이 바람회전응력이 0 N/m<sup>2</sup>로 나타나는 위도를 따라 음의 바람회전응력 편차를 야기하고, 결과적으로 북태평양 아열대 순환계의 북쪽 부분을 강화시키는 것으로 알려져 있다(Cheon et al., 2012).

이는 동해의 유입되는 수온과 해류의 세기가 해양온난화 환

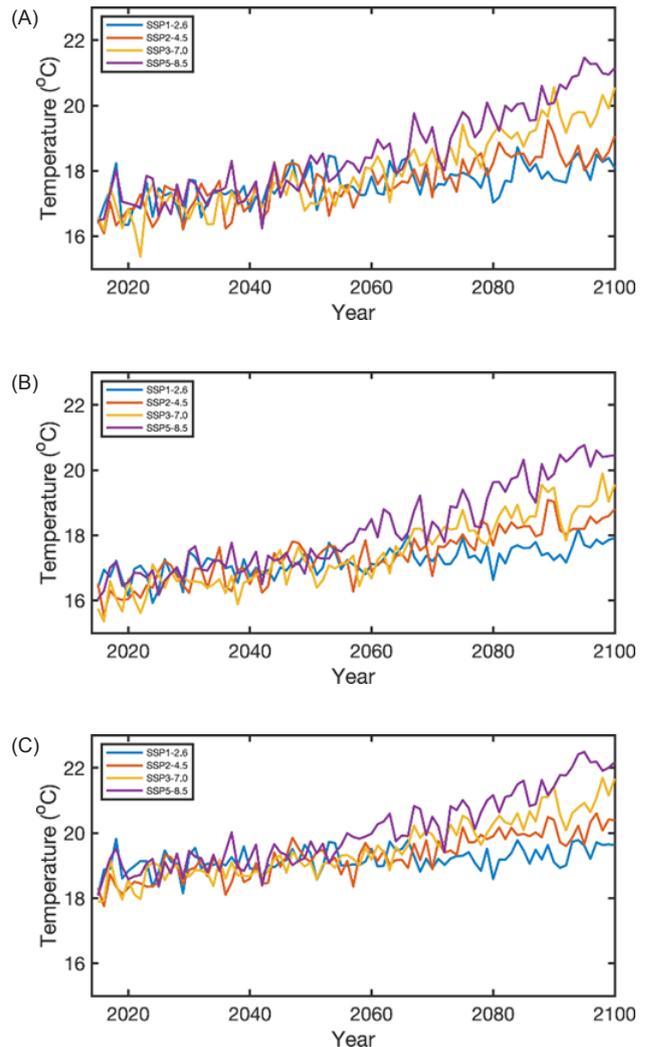


Fig. 5. Timeseries of sea surface temperature averaged from the (A) East, (B) West, (C) South stations (shown in the Fig. 1B.) by scenario from the regional climate model result around the Korea Peninsula.

경에서는 지속적으로 상승할 가능성을 보인다. 지난 55년간 (1968–2022) 동해가 다른 해역에 비해 수온 상승률이 높게 나타나는 것으로 분석되었으며, 이는 과거뿐만 아니라 미래 동해의 수온 상승이 가장 크므로, 동해 기후변화에 대한 연구가 보다 많이 진행되어야 할 것으로 보인다.

## 결 과

### 기후변화 예측모델 적용 수산분야 미래 예측

현재 국립수산물과학원은 우리나라 양식장이 주로 위치한 연안과 내만해역에서 이상수온을 감지하기 위한 모니터링과 예측 업무를 수행하고 있다. 우리나라 주변 해역의 주요 이상수온 현

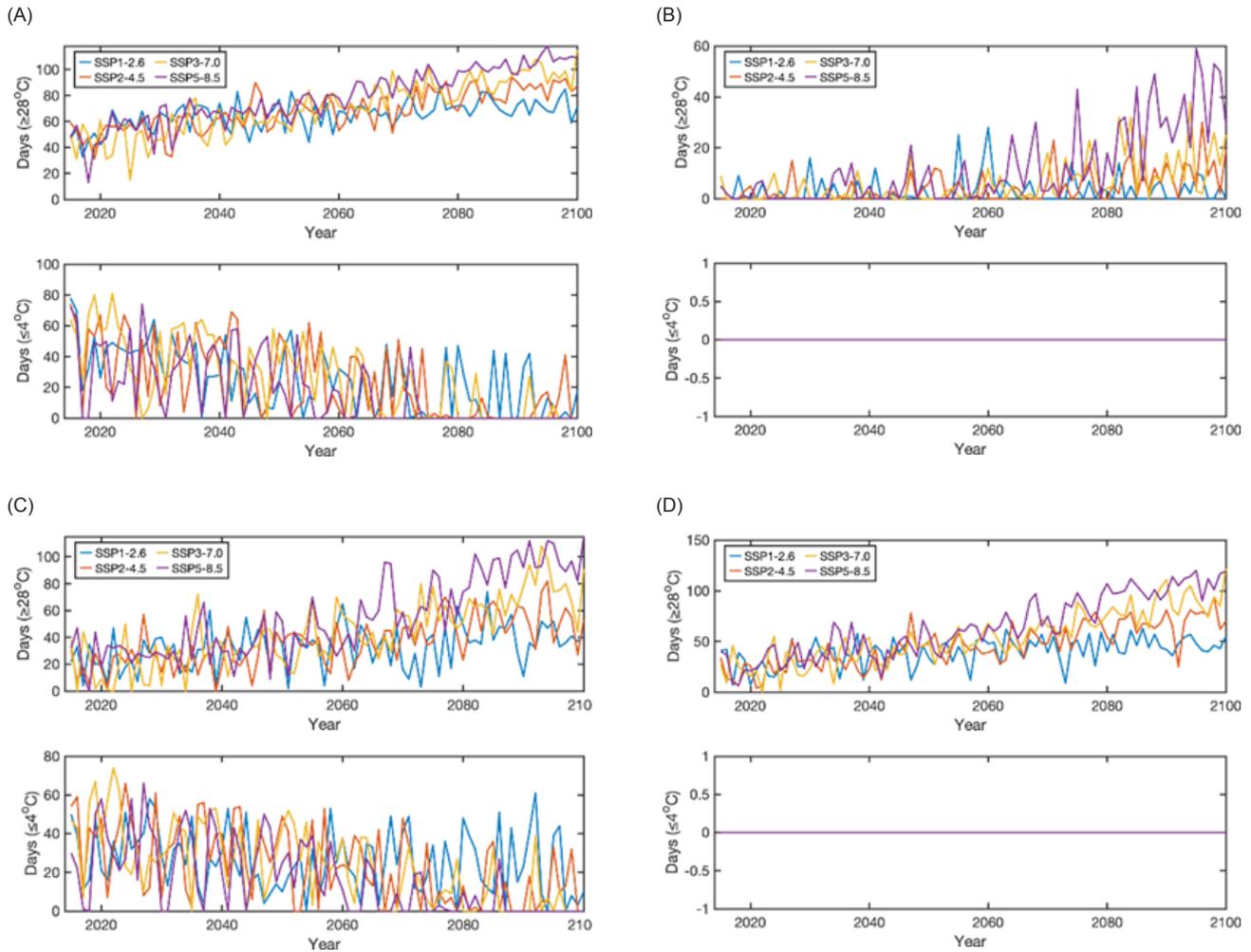


Fig. 6. Comparison of the number of days exceeding the reference of special report by high and low seawater temperature event. (A) Cheonsu Bay in the Yellow Sea, (B) Yeong-il Bay in the East Sea, (C) Jinhae Bay in the South Sea, (d) Seongsan in the coastal area of Jeju Island.

상은 고수온, 저수온, 냉수대 현상 등이 있다. 이상수온 중 여름철 고수온 특보 발표 기준은 28°C이며, 겨울철 저수온 특보 발표 기준인 4°C이다. 현재 특보 기준 수온의 예상시점과 지속시간에 따라 예비주의보, 주의보, 경보 순으로 발표하며, 역순으로 해제한다. 따라서 기후변화에 따른 우리바다 미래 수온 변화 전망결과를 활용하여 동·서·남해와 제주 연안 중 주요 양식시설이 위치한 지역의 고수온·저수온 특보 기준일자의 변화를 결과에서 살펴보았다.

미래 해양환경 변화에 따른 이상수온관련 특보 일수 변화를 살펴보기 위하여, 우리나라 해역별 양식장을 대표하는 동해 영일만, 서해 천수만, 남해 진해만, 제주 성산 양식장에 해당하는 위치의 수온을 추출하였다. 그리고 여름철 고수온 특보 발표 기준인 28°C를 상회하는 연도별 일수와 겨울철 저수온 특보 발표 기준인 4°C를 하회하는 연도별 일수를 계산하였다. 서해 천수만, 남해 진해만, 제주 성산의 SSP5-8.5 시나리오 경우 2090년

이후에는 28°C를 상회하는 일자가 연평균 100일 이상 지속되며, 동해 영일만의 경우 50일 이상 지속되었다. 서해 천수만과 남해 진해만의 경우 2090년 이후에는 4°C를 하회하는 일자가 나타나지 않았다(Fig. 6).

점차 지구 온난화의 영향으로 우리나라 기후도 아열대 기후로 바뀌어가고 있음에 따라 새로운 위해인자로 발생할 수 있는 시구아테라 어독에 대한 미래전망을 알아보려 한다. 시구아테라 어독은 주로 아열대/열대해역에 서식하는 해조류와 산호초 표면에 시구아톡신을 생성하는 플랑크톤(*Gambierdiscus toxicus* 등)이 부착되어 생육하고, 이를 섭취한 물고기를 사람이 다시 섭취 시에 중독을 일으키게 된다.

따라서 본 연구에서는 수산현안 중 하나인 시구아테라 어독 플랑크톤(*Gambierdiscus australes*)이 우리바다 주변에서 미래 기후변화에 따른 출현 가능성을 살펴보았다. 기존 수산분야 기후변화 영향 및 연구 보고서에서는 RCP 8.5 시나리오를 이용하

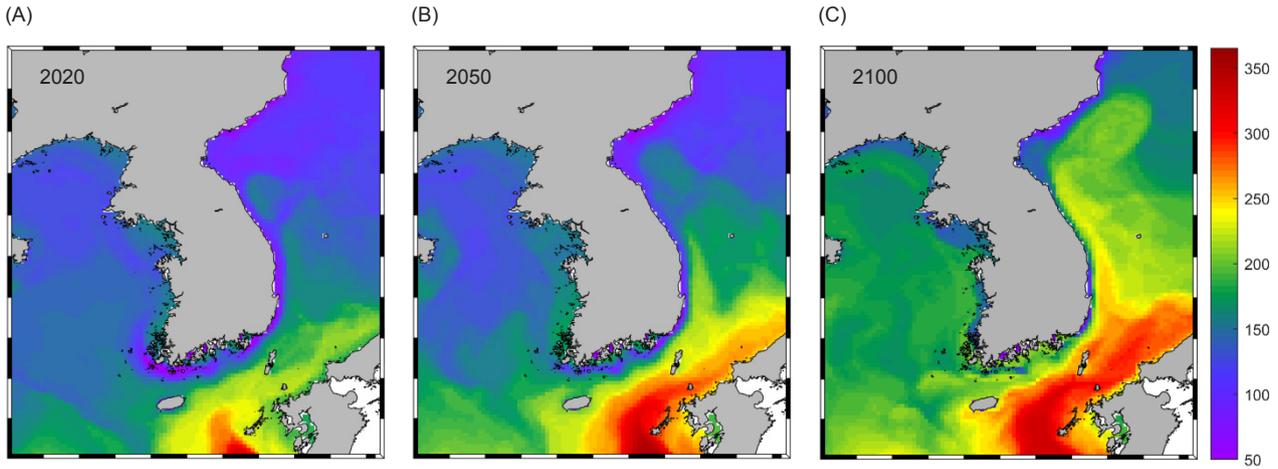


Fig. 7. Critical days of ciguatera fish poison plankton (*Gambierdiscus australes*) around the Korean peninsula using regional climate model result in (A) 2020, (B) 2050, (C) 2100.

여, 19.1–32.4°C의 서식 수온 범위에 분포하는 시구아테라 어독 플랑크톤의 미래 변화를 살펴본 바 있다(NIFS, 2022). 이전 방법과 같은 방법으로 SSP5-8.5 시나리오로 계산한 한반도 주변해역의 미래 수온분포를 이용하여, 미래 시구아테라 어독 플랑크톤의 서식가능한 임계일수(critical days)를 다시 산정한 결과, 2100년에는 출현가능 일수가 제주주변해역에서 약 100일 증가하여 가장 높은 증가를 보인다(Fig. 7).

우리나라 연안에서는 현재까지 시구아테라 독소를 보유한 어류가 발견되지 않고 있으나, 최근 제주도와 남해안 연안에서 시구아톡신을 생성하는 플랑크톤이 서식하고 있다는 것이 확인되었다. 아열대해역에 서식하던 플랑크톤이 지구온난화로 인해 온대해역까지 북상함에 따라 동북아시아 해안지역으로 점차 서식범위를 넓혀가고 있다. 따라서 우리나라도 시구아테라 원인 플랑크톤과 독성을 일으키는 유독성 어류에 대한 해양생태계 감시와 보다 정확한 예측정보를 생산해야 앞으로 증가할 가능성이 높은 수산현안에 효과적으로 대응 및 활용될 것이다.

## 고찰

본 연구에서는 SSP 시나리오를 한반도 주변해역 적용하여 미래 수온변화를 전망하였으며, 수산재해(고수온, 저수온 등)로부터 안정적인 수산물 공급 및 확보를 위해 시나리오 별 고수온 및 저수온 특보 기준 초과 일수를 비교하였다. 또한, 한반도 주변해역별 상세 기후전망 자료는 기후변화 대응과 적응대책 수립에 필요한 정보로 쓰일 것이다.

현재 북서태평양에서 적합한 전지구모형결과를 가지고 미래 한반도 주변해역 기후변화에 따른 반응을 살펴보았다. 그러나, 기후변화에 따른 광범위하게 발생할 수 있는 모든 범위의 미래를 고려하여 신뢰할 수 있는 의사 결정을 위해 불확실성 이해가 필요하다. 따라서 해양온난화에 따른 수온 변동의 불확실성 평

가를 위해 다양한 모델결과를 사용하여 불확실성을 파악하여야 하며, 이를 바탕으로 예측모델의 정확도를 향상시켜야 할 것이다. 본 연구에서는 한가지 기후전망실험(CNRM-ESM2-1) 결과를 역학적 상세화기법을 사용하여, 한반도 주변해역에서 미래 수온을 전망하였다. 그러나 앞서 설명한 바와 같이 장기 수온을 전망하기에는 불확실성이 매우 크므로, 역학적 상세화기법 수행시에 다양한 모델 실험을 추가하여 미래를 전망하는 앙상블(ensemble) 기법을 도입하는 예측결과의 고도화가 요구된다.

수산재해와 관련된 이상수온은 주로 연안과 내만에 위치한 양식어업과 관련성이 높이며, 연안과 내만의 예측성능을 보다 향상시키기 위해 고해상도 미래 전망 자료 생산 및 제공이 요구된다. 현재 약 10 km 해상도로 진행한 역학적 상세화의 공간 해상도를 3–4배 증가하여 수행을 하거나, 한 단계 더 역학적으로 상세화하여 약 3 km 공간해상도의 한반도 주변 해역 해양기후모델을 구축이 가능하며, 연안과 내만 지역에서도 보다 자세한 기후변화에 의한 수온변동을 예측할 수 있을 것이다.

SSP 시나리오 기반 미래 해양환경전망 자료는 다양한 수산현안에 적용 가능하다. 한반도 주변에서의 주요 수산자원의 분포, 서식지, 산란장 분포 및 회유경로 변화 등 수산자원 변동예측에 활용할 수 있으며, 아열대 해역에서 분포하는 아열대성 어종의 유입을 예측하여 수산자원으로 활용 가능성을 파악할 수 있을 것이다. 아울러 어독 플랑크톤뿐만 아니라 패독 플랑크톤, 파란고리선문어 등 아열대성 해양생물의 전망에도 활용 가능할 것으로 보인다.

## 사사

이 논문은 2024년도 국립수산물과학원 수산과학연구소(수산분야 기후변화 영향 평가 및 예측기술 개발, R2024045)의 연구개발비 지원에 의해 수행되었습니다.

## References

- Arakawa A and Lamb VR. 1977. Computational design of the basic dynamical processes of the UCLA general circulation model. *Methods in Computational Physics: Advances in Research and Applications* 17, 173-265. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-460817-7.50009-4>.
- Belkin IM. 2009. Rapid warming of large marine ecosystems. *Prog Oceanogr* 81, 207-213. <https://doi.org/10.1016/j.pocan.2009.04.011>.
- Cheon WG, Park YG, Yeh SW and Kim BM. 2012. Atmospheric impact on the northwestern Pacific under a global warming scenario. *Geophys Res Lett* 39, L16709. <https://doi.org/10.1029/2012GL052364>.
- Choi B, Kim KO and Eum HM. 2002. Digital bathymetric and topographic data for neighboring seas of Korea. *J Korean Soc Coast Ocean Eng* 14, 41-50.
- ECMWF (European Center for Medium Range Weather Forecasting). 2023. ECMWF Reanalysis v5 (ERA5). Retrieved from <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/dataset/ecmwf-reanalysis-v5> on Aug 31, 2023.
- Choi AR, Park YG and Choi HJ. 2013. Changes in the Tsushima Warm current and the Impact under a global warming scenario in coupled climate models. *Ocean Pol Res* 35, 127-134. <https://doi.org/10.4217/OPR.2013.35.2.127>.
- Han IS, Lee JS and Jung HK. 2023. Long-term pattern changes of sea surface temperature during summer and winter due to climate change in the Korea Waters. *Fish Aquat Sci* 26, 639-648. <https://doi.org/10.47853/FAS.2023.e56>.
- HYCOM (Hybrid Coordinate Ocean Model). 2021. Data Server. Retrieved from <https://www.hycom.org/dataserver> on Aug 31, 2023.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2013. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Stocker TF, Qin D, Plattner GK, Tignor M, Allen SK, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V and Midgley PM, eds. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, U.S.A., 1-1535.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2023. *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Core Writing Team, Lee H and Romero J, eds. IPCC, Geneva, Switzerland, 1-184. <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>.
- Jeong S, Choi SH and Kim YH. 2021. A study on future changes of sea surface temperature and ocean currents in Northwest Pacific through CMIP6 model analysis. *The Sea* 26, 291-306. <https://doi.org/10.7850/jkso.2021.26.4.291>.
- Kang YQ. 2000. Warming trend of coastal waters of Korea during recent 60 years (1936~1995). *J Fish Sci Tech* 3, 173-179.
- Kim CS, Cho YK, Seo GH, Choi BJ, Jung KT and Lee BG. 2014. Interannual variation of freshwater transport and its causes in the Korea Strait: A modeling study. *J Mar Syst* 132, 66-74. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2014.01.007>.
- Kim SJ, Woo SH, Kim BM and Hur SD. 2011. Trends in sea surface temperature (SST) change near the Korean Peninsula for the past 130 years. *Ocean Pol Res* 33, 281-290. <https://doi.org/10.4217/OPR.2011.33.3.281>.
- KMA (Korea Meteorological Administration). 2019. Climate Information Portal. Retrieved from [www.climage.go.kr](http://www.climage.go.kr) from Mar 10, 2024.
- Kobayashi M, Hofmann EE, Powell EN, Klinck JM and Kusaka K. 1997. A population dynamics model for the Japanese oyster, *Crassostrea gigas*. *Aquaculture* 149, 285-321. [https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(96\)01456-1](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(96)01456-1).
- Mellor GL and Yamada T. 1982. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. *Rev Geophys* 20, 851-875. <https://doi.org/10.1029/RG020i004p00851>.
- Min HS and Kim CH. 2006. Interannual variability and long-term trend of coastal sea surface temperature in Korea. *Ocean Pol Res* 28, 415-423. <https://doi.org/10.4217/OPR.2006.28.4.415>.
- NIFS (National Institute of Fisheries Science). 2019. *Assessment Report on Fisheries Impacts in a Changing Climate*. NIFS, Busan, Korea.
- NIFS (National Institute of Fisheries Science). 2022. *Annual Report for Climate Change Trends in Fisheries, 2022*. NIFS, Busan, Korea.
- NIFS (National Institute of Fisheries Science). 2023. *Annual Report for Climate Change Trends in Fisheries, 2023*. NIFS, Busan, Korea.
- Oh SG, Kim GB, Cho YK and Son SW. 2023. Quantification of the performance of CMIP6 models for dynamic downscaling in the North Pacific and Northwest Pacific oceans. *Asia Pac J Atmospheric Sci* 59, 367-383. <https://doi.org/10.1007/s13143-023-00320-w>.
- O'Neill BC, Tebaldi C, Van Vuuren DP, Eyring V, Friedlingstein P, Hurtt G, Knutti R, Kriegler E, Lamarque JF, Lowe J, Meehl GA, Moss R, Riahi K and Sanderson BM. 2016. The scenario model intercomparison project (ScenarioMIP) for CMIP6. *Geosci Model Dev* 9, 3461-3482. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-3461-2016>.
- Seong KT, Hwang JD, Han IS, Go WJ, Suh YS and Lee JY. 2010. Characteristic for long-term trends of temperature in the Korean Waters. *J Korean Soc Mar Environ Saf* 16, 353-360.
- Shchepetkin AF and McWilliams JC. 2005. The regional oceanic modeling system (ROMS): A split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate oceanic model. *Ocean Model* 9, 347-404. <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2004.08.002>.

- Shin HR, Lee JH, Kim CH, Yoon JH, Hirose N, Takikawa T and 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. *J Mar Syst* 232, 103750. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2022.103750>.
- Stocker T, Dahe Q, Plattner GK, Tignor MMB, Allen SK, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V and Midgley PM. 2013. Working group I contribution to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Cambridge University Press, New York, NY, U.S.A.
- Wu L, Cai W, Zhang L, Nakamura H, Timmermann A, Joyce T, McPhaden M, Alexander M, Qiu B, Visbeck M, Chang PP, Giese B and Wu L. 2012. Enhanced warming over the global subtropical western boundary currents. *Nat Clim Change* 2, 161-166. <https://doi.org/10.1038/NCLIMATE1353>.