

CMIP6 모형 결과를 이용한 한반도 주변해역 pH의 미래변화 분석

김지선* · 성현민** · 이효미** · 장필훈***† · 변영화***

*국립기상과학원 기후변화예측연구팀 연구원, **국립기상과학원 기후변화예측연구팀 연구사, ***국립기상과학원 기후변화예측연구팀 연구관

Analysis of future changes in surface ocean pH around the Korean Peninsula using CMIP6 model results

Kim, Jisun* · Sung, Hyun Min** · Lee, Hyomee** · Chang, Pil-Hun***† and Byun, Young-Hwa***

*Researcher, Climate Change Research Team, National Institute of Meteorological Sciences (NIMS), Jeju, Korea

**Research Scientist, Climate Change Research Team, NIMS, Jeju, Korea

***Senior Research Scientist, Climate Change Research Team, NIMS, Jeju, Korea

ABSTRACT

In this study, we examined future changes in surface ocean pH around the Korean Peninsula using results from five Earth system models participating in the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6). Analysis of the present-day period (1995 ~ 2014) revealed small inter-model deviations, with pH trends closely matching those of observation-based reconstructions. Projections of future pH under different Shared Socioeconomic Pathway (SSP) scenarios indicated that higher greenhouse gas emissions lead to more significant pH reductions. In particular, under the SSP5-8.5 scenario, pH is projected to decrease by approximately 0.47 units by 2100 relative to the historical period. Furthermore, pH is expected to decline more rapidly in the late 21st century compared to the historical period, with ocean acidification progressing somewhat faster than the global average. In addition to this pH decline, the seasonal amplitude of pH is projected to decrease by around 43.8%, with lower values in winter and higher values in summer. We also explored future changes in the seasonality of factors influencing pH, such as sea surface temperature (SST), dissolved inorganic carbon (DIC), and total alkalinity (TA). While SST showed no significant changes, DIC exhibited a distinct seasonal amplitude increase of approximately 26.4% compared to the historical period, with increases in winter and decreases in summer. This change in DIC seasonality appears to be closely related to the reduced seasonal amplitude of pH.

Key words : pH, Ocean Acidification, Seasonality, Projection

1. 서론

기후변화에 관한 정부간 협의체(Intergovernmental Panel on Climate Change; IPCC)에서 승인된 최근 제6차 평가보고서(Assessment Report; AR6)에서는 인위적인 활동으로 인해 대기 중으로 배출된 이산화탄소의 약 25%가 해양으로 흡수된 것으로 보고하고 있다. 해양의 이산화탄소 흡수 증가는 지구 온난화를 완화시키는 중요한 역할을

하지만, 동시에 해양 내부에서 화학적 변화를 일으키고 해양생태계의 큰 변화를 가져오게 된다. 대표적으로 해양의 이산화탄소 흡수가 증가하면 수소이온(H⁺) 농도가 증가하고 탄산이온(CO₃²⁻)이 감소하며, 이러한 현상을 해양 산성화라고 부른다(Gattuso and Hansson, 2011). 해양산성화에 따른 탄산이온의 감소는 산호, 조개류와 같이 탄산칼슘을 이용하여 껍질이나 골격을 형성하는 석회화(calcifying) 생물에게 치명적이며(Orr et al., 2005), 이는

†Corresponding author : phchang@korea.kr (National Institute of Meteorological Sciences, 33 Seohobuk-ro, Seogwipo-si, Jeju 63568, Korea. Tel. +82-64-780-6782)

ORCID 김지선 0000-0002-8238-3521
성현민 0000-0003-3120-7912
이효미 0000-0001-7491-345X

장필훈 0000-0003-1665-1273
변영화 0000-0002-6074-4461

해양생태계 전반으로 피해가 확산될 수 있어 심각한 문제로 인식되고 있다(Doney et al., 2009).

기후변화에 따른 해양산성화 경향을 파악하기 위해 pH를 지표로 하는 다양한 선행연구들이 수행되어 왔다. 장기간의 관측자료를 활용하여 pH가 지속적으로 감소(해양산성화의 심화)하고 있다는 연구들이 축적되고 있으며(Bindoff et al., 2007; Byrne et al., 2010; Chau et al., 2024 Dore et al., 2009; Lauvset et al., 2015), 수치모델을 이용한 연구들도 과거와 미래전망에 대해 유사한 결과들을 제시하고 있다(Calderia and Wickett, 2003; Jiang et al., 2019; Kwiatkowski et al., 2020; Orr et al., 2005). 예를 들어, Lauvset et al. (2015)는 SOCAT (The Surface Ocean CO₂ Atlas) 이산화탄소(fCO₂) 관측자료 기반의 pH 자료 분석을 통해 전지구 표층 pH가 20년간(1991~2011) 약 $-0.018 \pm 0.004 \text{ decade}^{-1}$ 의 감소경향이 나타남을 보고하였으며, Chau et al. (2024)는 머신러닝 기법을 통해 1985~2021년 기간의 전지구 표층 pH는 $-0.017 \pm 0.004 \text{ decade}^{-1}$ 의 경향이 나타남을 분석하였다. 또한, 1750년부터 2000년까지 전지구 표층 pH는 평균적으로 약 0.11 감소한 것으로 보고되고 있는데(Jiang et al., 2019), 이러한 수치는 온실가스 배출의 정도에 따라 더욱 가속화될 것으로 보인다. 결합모델 상호비교 프로젝트(Coupled Model Intercomparison Project Phase 6; CMIP6)의 시나리오 자료를 활용한 선행연구(Kwiatkowski et al., 2020)에서도 시나리오의 종류에 상관없이 미래의 전지구 표층 pH는 감소할 것으로 전망되었으며, 특히, 고탄소 시나리오(SSP5-8.5)에서 큰 감소 경향이 나타날 것으로 전망되었다(Bopp et al., 2013).

한반도 주변 해역을 포함하는 북서태평양은 이산화탄소 흡수가 우세한 해역으로 잘 알려져 있다. Ono et al. (2019)는 북서태평양의 경도 137°E를 따라 약 35년간 수집된 선박 관측자료를 이용하여, 대기 중의 이산화탄소 농도 증가가 가속화되는 것과 함께 특히 최근(2008~2017)의 산성화 속도가 과거기간(1983~2017)에 비해 약 30% 빨라진 것을 보고하였다. 또한, 열대해역(5°~10°N)에서 $-0.0124 \pm 0.0008 \text{ decade}^{-1}$ 를, Kuroshio recirculation 해역(26°~30°N)에서는 $-0.0193 \pm 0.0008 \text{ decade}^{-1}$ 의 감소율이 나타나 고위도로 갈수록 pH 감소율이 크게 나타남을 확인하였다. 일본 기상청 홈페이지에서 제공하는 일본 주변 해역 및 북서태평양 선박관측자료에서도 1998년부터 2023년 기간에 대해 약 $-0.021 \text{ decade}^{-1}$ 의 변화율을 제시하고 있다. 국내에서도 국립수산과학원과 포항공과대학

이 2015년부터 우리나라 주변의 83개 정점에 대해 선박관측을 통해 해양산성화를 조사하고 있다. 해당 관측에 의하면, 한반도 주변해역의 표층 pH는 뚜렷한 계절성을 가지고 있으며 2015~2022년 기간에 매 10년 단위로 약 0.019 감소하는 것으로 나타났다(Woo et al., 2023). 이외에도, 지구시스템모델을 이용한 30년간(1980~2000)의 수치실험을 통해, Park et al. (2018)은 동해 표층 pH의 감소를 모의하였고, 이는 이산화탄소의 흡수에 비해 표층수온의 상승과 대한해협을 통해 유입되는 용존무기탄소(Dissolved Inorganic Carbon)의 증가가 지배적으로 작용한 결과라 하였다.

이처럼 전지구 해양과 함께 우리나라 주변해역에서도 해양산성화가 진행되고 있다. 특히, 한반도 주변에 서식하는 다양한 생물들은 식량자원으로서의 가치가 높기 때문에, 기후변화에 따른 해양산성화 미래전망의 과학정보는 수요가 급증하고 있다. 본 연구에서는 CMIP6 시나리오 자료를 이용하여 21세기 동안 우리나라 주변해역의 해양산성화의 변화를 살펴보았다. 해양 표층의 pH 미래 전망뿐만 아니라, 해수면 온도(Sea Surface Temperature; SST), 용존무기탄소(Dissolved Inorganic Carbon; DIC), 그리고 총 알카리도(Total Alkalinity; TA)에 대해서도 미래전망을 같이 분석하였다. 2장에서는 본 연구에서 사용한 CMIP6 모델과 함께, 모델의 특성 분석에 사용한 관측기반 재구성 자료에 대해서 언급하고, 3장에서는 우리나라 주변해역에서의 현재기후 기간과 미래 시나리오별 pH의 평균적인 변화와 계절적 특성 변화를 중심으로 살펴보았다. 마지막으로 요약 및 제언을 4장에 서술하였다.

2. 자료 및 방법

Fig. 1은 본 연구에서 사용한 SSP 시나리오에 따른 한반도 주변해역 pH 변화전망의 분석영역(검은색 박스)을 보여준다. 분석에 사용한 CMIP6 모델 앙상블은 해양 표층 pH, SST, DIC, TA의 4가지 변수를 모두 제공하는 모델들로 선정하였고, 한반도 주변해역의 값에 대한 신뢰성 향상을 위하여 황해 북부의 해안지역에 값이 없는 모델(MIROC-ES2H, MIROC-ES2L)을 제외하였다. 해당 과정을 통해 최종적으로 5개의 모델이 앙상블 분석에 활용되었다(Table 1). 해양생지화학 과정이 모두 다르지만, CMIP6 결합모델들의 구성에서 널리 사용되는 생지화학 모델들이기 때문에, 본 연구에서 분석된 해양변수들의 미래전망과 불확실성 범위는 과학적 신뢰성을 가진다고 할

수 있다.

CMIP6 모델에서 모의된 현재기후 pH 분포의 성능을 검증하기 위하여 CMEMS-LSCE (Copernicus Marine Environment Monitoring Service - Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement; Chau et al., 2024) 재구성 자료(reconstructed data)를 활용하였다. 해양표면 pH, CO₂ 분압(pCO₂), 총 알칼리도(TA), 총 용존 무기탄소(DIC) 등의 변수들을 0.25° 수평해상도의 전지구 규모로 제공하고 있으며, 1985년부터 2021년까지의 기간에 대한 월별 자료가 제공되고 있다. pCO₂는 surface ocean CO₂ atlas (SOCAT) 프로젝트에서 제공하는 격자 기반의 전지구 관측데이터를 순방향신경망(Feed-Forward Neural Networks) 모델 앙상블을 이용하여 재구성하였고, 해양 표면의 TA는 다중 선형 회귀 접근법을 통해 추정되었으며, 자세한 방법론과 제공 자료의 1σ 불확실성에 대한 신뢰성은 Chau et al. (2024)에 opens source로 제공되어 있다.

선정된 모형의 현재기후(1995~2014)와 SSP 시나리오 4종(SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, SSP5-8.5)에 대한 미래기후(2015~2100)의 월별 표층 pH 자료를 추출하였다. pH의 전망과 함께, 관련한 표층 인자들의 미래 변화도 살펴보고자, 현재기후와 고배출 시나리오(SSP5-8.5) 자료에서 SST, DIC, 그리고 TA 자료를 추가로 추출하였다. 다만, DIC와 TA의 경우 자료 입수가 가능한 4개 모형(CanESM5, CESM2, CMCC-ESM2, NorESM2-LM)의 결과를 이용하였다. 본 연구에서는 각각의 모형에 대해 한 개의 앙상블 멤버를 채택하였다. 모형간 비교와 앙상블 평균의 편이를 위해, 수집된 각각의 자료들을 1° × 1° 수평 간격으로 내삽하였다. 아울러, 3.3절에서는 pH를 포함한 표층 인자들의 미래 계절진폭 변화를 살펴보고자 하였

다. 이를 위해, Kwiatkowski and Orr (2018)가 제안한 방법과 동일하게, 먼저 각 격자에서의 월평균 시계열에서 cubic spline을 적용한 추세(trend)를 계산하고, 이를 전체 시계열에서 제거하였다. 이후, 1년 기간 동안의 최대값과 최소값의 차이로 계절진폭을 정의하였다.

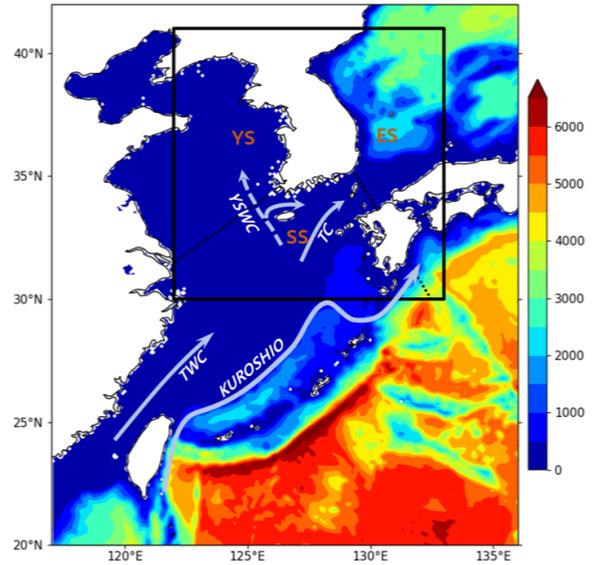


Fig. 1. Study area (black boxed region) and bottom topography. The Yellow Sea (YS), South Sea of Korea (SS), and East Sea are delineated by thin dotted lines. Major currents are schematically shown: Taiwan Warm Current (TWC), TC (Tsushima Current), Yellow Sea Warm Current (YSWC) and the Kuroshio

Table 1. Summary of CMIP6 models used in this study

Model and reference	Ocean and sea ice	Marine biogeo-chemistry	Ensemble
CanESM5 (Swart et al., 2019)	NEMOv3.4.1-LIM2	CMOC	r1i1p2f1
CESM2 (Danabasoglu et al., 2020)	POP-CICE5	MARBL-BEC	r4i1p1f1
CMCC-ESM2 (Lovato et al., 2022)	NEMOv3.6-CICE	BFMv5.2	r1i1p1f1
NorESM2-LM (Seland et al., 2020)	BLOM-CICE	iHANOCC	r1i1p1f1
UKESM1-0-LL (Sellar et al., 2019)	NEMOv3.6-CICE	MEDUSA-2	r1i1p1f2

3. 결과 및 토의

3.1. 현재기후 기간의 CMIP6 모델의 pH 모의특성

본 절에서는 CMIP6 모델에서 모의된 현재기후의 pH 특성을 파악하기 위하여 평균분포 및 변화 경향을 CMEMS-LSCE 자료와 비교하였다. 먼저, CMIP6 모델에서 나타난 현재기후의 전지구 평균 pH 추세는 $-0.017 \pm 0.0005 \text{ decade}^{-1}$ 로 나타났고, 이는 CMEMS-LSCE 자료($-0.017 \text{ decade}^{-1}$) 및 Lauvset et al. (2015)이 제시한 1991 ~ 2011년 기간의 값($-0.018 \pm 0.004 \text{ decade}^{-1}$)과 유사한 경향성이다. 또한, 선행연구에서 제시된 전지구 해역별 특성 (Jiang et al., 2019)과 북서태평양 영역($0^\circ \sim 60^\circ\text{N}$; $100^\circ \sim 160^\circ\text{E}$)의 음의 경향성에 대한 위도 패턴(Ono et al., 2019)도 유사하게 모의됨을 확인하였다. 이러한 결과들을 바탕으로, 한반도 주변 해역을 중심으로 표층 pH의 평균장과 변화 경향을 살펴보았다. CMIP6 앙상블 평균과 CMEMS-LSCE 자료의 한반도 주변 pH의 평균은 각각 8.11과 8.12이며, 황해를 제외하고 약 0.005 정도의 차이를 보이기 때문에, CMIP6 모델에서 모의된 한반도 주변 해역의 pH분포가 전반적으로 잘 모의되었음을 확인할 수 있다(Fig. 2). 반면에 황해 연안에서는 상대적으로 큰 차이(약 0.025)가 나타나는데, 이는 Chau et al. (2024)이 언급한 데로 CMEMS-LSCE 자료가 많은 연안역에서 높은 불확실성을 가지는 것이 그 원인으로 판단된다. Figs. 2b와 2c에 점으로 표시된 격자는 CMEMS-LSCE 자료의 불확실성이 높은 해역을 의미하는데(>0.03 ; Fig. S1), 특히 황

해 연안에서 높게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 많은 연안역에서 pH 자료의 불확실성이 높은 것과 관련하여, pH의 추정에 사용되는 $p\text{CO}_2$ 입력자료의 불확실성이 해당해역에서 높은 것을 원인으로 생각할 수 있다(Fig. 1b in Chau et al., 2024). 이는 해당 입력자료를 생성하는데 필요한 관측자료의 밀도가 작거나 시공간 변동이 큰 경우에 발생할 수 있다. 이처럼, 황해의 경우 CMEMS-LSCE의 자료가 가지는 높은 불확실성으로 인해 모델 결과를 정량적으로 비교하기에는 다소 어려움이 있다.

Fig. 3은 과거 10년 평균(1985 ~ 1994년) 대비 현재기후의 해역별 pH 변화 경향을 보여준다. CMIP6 모델에 따른 pH 경향성의 차이는 작은 것으로 나타났으며, 모든 해역에서 pH는 지속적으로 감소하는 경향을 보였다. CMIP6 앙상블에서 분석된 한반도 주변 해역의 pH 감소율은 약 $-0.021 \text{ decade}^{-1}$ 이며, 이는 CMEMS-LSCE 자료에서 나타난 한반도 주변해역 pH 감소율(약 $-0.019 \text{ decade}^{-1}$)과 유사한 결과이다. 황해에서 모델의 감소 추세($-0.021 \text{ decade}^{-1}$)가 CMEMS-LSCE 자료($-0.017 \text{ decade}^{-1}$)에 비해 상대적으로 빠르게 나타났으나, 대체로 모델의 pH는 CMEMS-LSCE 자료와 유사한 변화 경향을 가지고 있는 것으로 판단된다. 이러한 분석결과는, 연구 기간 및 분석해역의 범위가 다를 수 고려하더라도, 국립수산과학원의 관측 pH 시계열(2015 ~ 2022년) 자료 기반의 다른 해역 대비 낮은 황해의 pH 경향성과 해역별 감소경향의 보고결과와 유사한 결과이다(Woo et al., 2023). 해당기간 우리나라 주변의 pH 감소율은 전지구 평균과 유사한 약 -0.0019

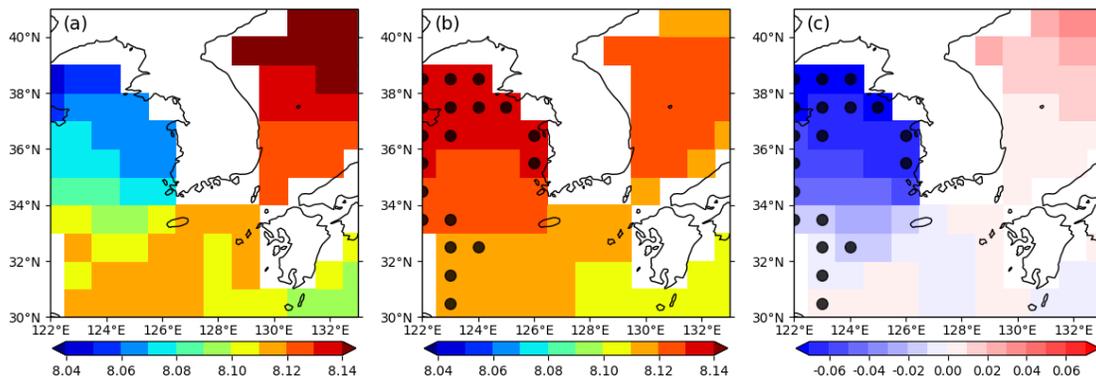


Fig. 2. Spatial distribution of annual mean surface pH averaged over 20 years (1995 ~ 2014). (a) ensemble mean of CMIP6 models, (b) observation-based reconstructed data (CMEMS-LSCV), and (c) their differences. Black dots in the middle and right panels indicate regions where pH uncertainty exceeds 0.03 (Chau et al., 2024)

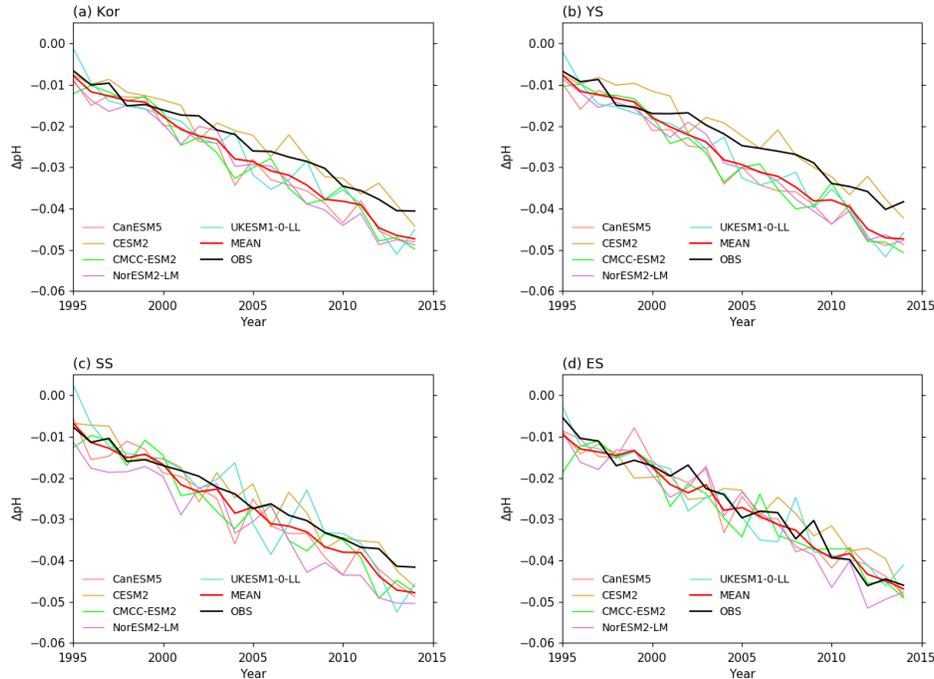


Fig. 3. Time series of pH anomalies in (a) the sea around Korean Peninsula (Kor), (b) Yellow Sea (YS), (c) South Sea of Korea (SS), and (d) East Sea (ES) during 1994–2014. Black solid lines indicate observation-based reconstructed data, and red solid lines show multi model mean. The areas of YS, SS, and ES is referenced in Fig. 1

decade⁻¹로 나타나, 모델이 관측된 특성을 보였다. 이러한 결과를 종합해 볼 때, CMIP6 자료는 전반적으로 재구성 자료의 변화 경향과 유사하며 평균적인 미래 전망을 위한 자료로 적절한 것으로 판단된다.

3.2. 한반도 주변해역의 미래 pH 변화

Fig. 4는 SSP 시나리오 4종에 따른 현재기후 대비 21세기의 전지구와 한반도 주변 해역에서의 pH 변화를 나타낸 시계열이다. 앞 절에서 설명한 현재기후에서의 CMIP6 모델별 pH 모의결과의 유사성과 같이, 시나리오에 따른 미래전망 분석결과에서도 CMIP6 모델에 따른 불확실성은 작은 것으로 나타났다. 먼저, 전지구와 한반도 주변해역의 pH는 가까운 미래까지 감소 추세가 비슷하나, 2030년 이후 한반도 주변 해역에서 산성화가 더 빠르게 진행되는 것으로 전망된다. 이는 기존의 선행연구들을 통해 널리 알려져 있는 바와 같이, 한반도 주변의 해역은 상대적으로 폐쇄적 특성이 있기 때문에, 해양이 흡수한 CO₂가 축적되기

쉬운 환경적 요인의 영향으로 해석할 수 있다. 한반도 주변 해역의 미래 전망값을 살펴보면, 2030년 정도까지는 시나리오에 따른 pH의 변화는 뚜렷하지 않은 것으로 전망되고, 2040년 이후부터 SSP1-2.6 시나리오를 제외한 모든 시나리오에서 21세기 말까지 pH는 뚜렷하게 감소하는 경향이 나타났다. 이러한 경향은 온실가스 배출이 높은 시나리오일수록 더 뚜렷하게 나타났다. 특히, 21세기 후반(2081~2100)에는 고탄소 시나리오(SSP5-8.5)에서의 감소경향(약 -0.059 decade⁻¹)이 더욱 가속화되어 현재기후 대비 약 3배 정도의 변화율이 나타날 것으로 전망되며, 선행연구의 결과(Sung et al., 2020)와 유사한 전망결과이다. 결과적으로 2100년에는 현재기후 대비 약 -0.47 단위의 큰 감소 전망을 보였다. 반면, SSP1-2.6 시나리오에서는 2060년 이후에는 pH가 서서히 회복되는 경향을 보였다. 이는 SSP1-2.6 시나리오는 21세기 말까지 CO₂의 배출을 지속 감축시켜 전지구 온난화 수준을 산업혁명 이전 대비 2도 이내로 억제하는 미래사회를 나타내는 시나리오이기 때

문에, SSP1-2.6 시나리오에 따른 미래 기후상태에서는 해양에 유입되는 CO₂가 감소하였고, 해양의 TA는 비슷한 수준으로 유지가 되었지만, DIC 감소가 유도되어 pH 감소율이 완화되고, 21세기 말에는 다소 회복되는 수준의 미래 변화가 나타나는 것으로 해석할 수 있다(Table S1).

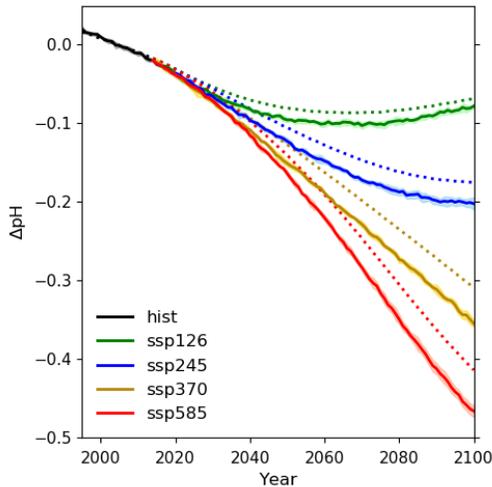


Fig. 4. pH projections for the sea around Korean Peninsula (solid lines) and global mean (dotted lines). CMIP6 mean anomalies for the historical and SSP simulations are shown as solid lines, with shading representing inter-model standard deviation

Fig. 5는 SSP5-8.5 시나리오에서 전망된 현재기후 대비 21세기 말(2081~2100년)의 pH, SST, DIC, TA의 변화에 대한 공간분포를 보여준다. pH는 한반도 주변 해역에서 전반적으로 감소하는 것으로 나타나며, -5.1%의 평균 변화율이 전망된다. 또한, SST와 DIC는 각각 현재기후 대비 약 26.0%와 4.8% 증가하고 TA는 약 -2.7% 감소할 것으로 전망된다. 선행연구(Jiang et al., 2019)에서 알려진 바와 같이, SST가 상승함에 따라 해양의 CO₂ 용해도가 현재기후 대비 낮아지겠지만, 고탄소 시나리오의 미래기후이기 때문에 대기 중에는 지속적으로 매우 많은 양의 CO₂가 존재하고, SST 상승에 따라 가속화된 해양의 탄산화 반응이 낮아진 해양의 CO₂ 흡수율 영향을 상쇄하여 종합적으로는 pH 감소를 가속화 유도하는 것으로 해석할 수 있다. 또한, 21세기 후반에는 DIC의 증가율이 다소 줄어들었지만, TA가 이전 시기 대비 2배 이상 급증하면서 한

반도 주변 해역의 pH 감소의 가속화에 기여할 것으로 분석된다(Table S2).

한편, pH를 비롯한 각 인자들의 공간분포를 살펴보면, 전반적으로 남해(또는 동중국해 북부)에서 동해로 이어지는 해역에서 비슷한 크기의 변화폭을 보이는 경향이 있다. 대체로 황해는 남해-동해와는 다소 구분되며 북부로 갈수록 차이가 나는 패턴을 보인다. 이러한 변화 경향은 남해-동해를 흐르는 대마난류를 포함해서 한반도 주변의 해양순환 구조와 상관성을 가지는 것으로 보인다. 한반도 주변해역의 순환은 북서태평양의 영향을 받는데(Lyu and Kim, 2005), Jeong et al. (2021)은 CMIP6 모델의 분석을 통해 온난화 정도가 강한 시나리오일수록 북서태평양에서 남해를 통해 동해로 유입되는 수송량이 증가하는 경향이 있다고 하였다. 또한, Park et al. (2018)은 과거기간 동해 중부에서 모의된 pH 감소가 북서태평양에서 유입되는 DIC의 증가와도 관련이 있음을 보인 바 있다. 이러한 결과에 비추어 볼 때, 남해-동해에서의 DIC 증가는 한반도 주변을 포함하는 북서태평양의 순환구조 변화와 연계되고, 결과적으로 수온 상승에 의한 탄소화학 과정의 변화와 함께, 한반도 주변 해역의 pH 감소에 기여하는 것으로 해석할 수 있다.

3.3. pH 계절특성 변화

앞 절에서 살펴본 바와 같이, SSP 시나리오에 따른 미래 한반도 주변 해역의 해양산성화는 전지구보다 빠른 속도로 진행되며, 21세기 후반으로 갈수록 더욱 가속화될 전망이다. pH는 다양한 요인으로부터 기인한 복잡한 관계의 영향을 받음과 동시에, 한반도 주변 해역의 비교적 좁고 폐쇄적 특성으로 인해 미래 전망에 대한 불확실성은 높은 편이다. 또한, pH는 수온 등 계절적으로 변화하는 여러 인자들에 의해 영향을 받으며, 이러한 특성은 해양 생태계에 있어 중요한 영향을 미치게 된다. 즉, pH의 계절성의 변화에 따라 해양 생물은 해로운 조건에 더 일찍 노출될 수 있는데, 예를 들어 여름철과 같이 온난화의 영향이 정점에 이르는 시기에 산성화가 강해지면 부정적인 영향을 예상보다 빠르게 경험할 수 있다(Kwiatkowski and Orr, 2018). 반대의 경우에는 산성화의 영향이 다소 경감될 수 있다. 따라서, 기후변화에 따른 해양산성화의 미래 전망을 정책적으로 활용하기 위해서는 평균적인 변화와 함께 계절변동성을 고려해야할 필요가 있다. Fig. 6은 1994년부터 2100년까지의 한반도 주변해역에서의 pH의

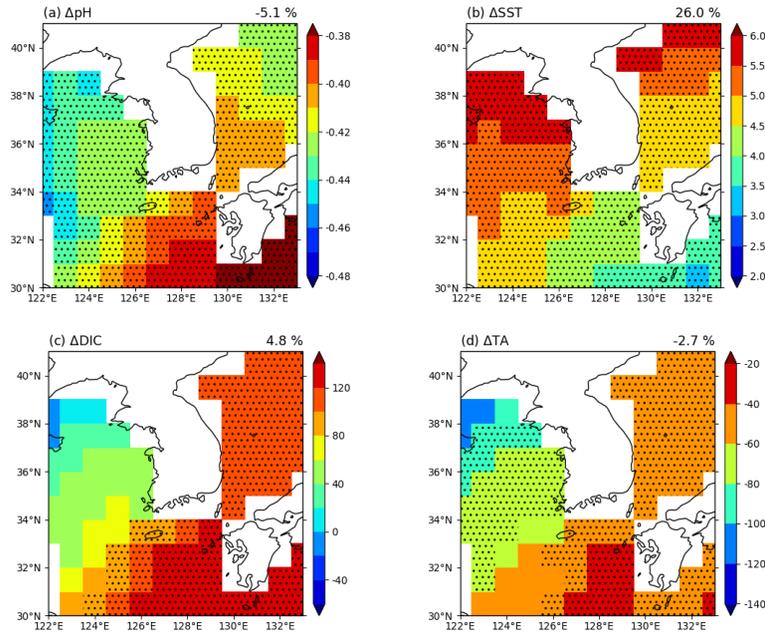


Fig. 5. Projected changes in (a) pH, (b) SST (°C), (c) DIC ($\mu\text{mol/kg}$), and (d) TA ($\mu\text{mol/kg}$) for the future period (2081 ~ 2100) compared to the historical period (1995 ~ 2014) under the SSP5-8.5 scenario. Values in the upper right corner of each panel indicate the rate of change as a percentage and dotted grids represent 95% confidence level

계절변동성의 변화를 나타낸다. pH의 계절변동성의 크기는 Kwiatkowski and Orr (2018)의 선행연구 방법을 적용하여, 분석기간의 추세를 제거한 후, 월별 시계열에서의 최대값과 최소값 차이로 정의하였다. pH의 연평균 변화에 비해, 계절변동성의 진폭은 모델간 불확실성이 다소 크게 나타났다. SSP1-2.6 시나리오를 제외하고 모든 시나리오에서 pH 진폭이 2100년까지 지속적으로 감소하는 결과를 보였다. 전반적으로 2040년 이전까지 시나리오별 차이는 크지 않으나, 이후 높은 온실가스 배출을 가정한 시나리오에서 감소 경향이 더 크게 나타났다. 특히, SSP5-8.5 시나리오를 2050년을 기준으로 pH 진폭이 이전에 비해 더 빠르게 감소하는 것을 확인할 수 있다.

pH의 계절변동성은 DIC, TA, 그리고 SST 등 영향요인의 변동 진폭에 영향을 받는다. 예를 들어, Takahashi et al. (2014)은 식 (1)과 같이 SST, TA, 그리고 염분의 관측값과 모델로 계산한 해당 인자들의 pH에 대한 민감도를 이용하여 pH 계절변동성의 크기를 계산하였는데, 결과적으로 열대와 아열대의 pH 계절변동성에는 수온의 영향이 우세하다고 하였다. 식 (1)에서 Δ 는 계절진폭을, D와 T_A 는 각각 용존무기탄소(DIC)와 총 알카리도(TA)를, T와 S

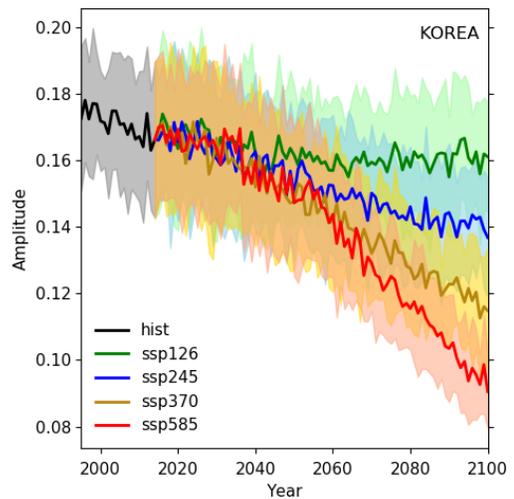


Fig. 6. Projections of pH seasonal amplitude for the sea around Korean Peninsula. CMIP6 mean anomalies for the historical and SSP simulations are shown as solid lines, with shading representing inter-model standard deviation

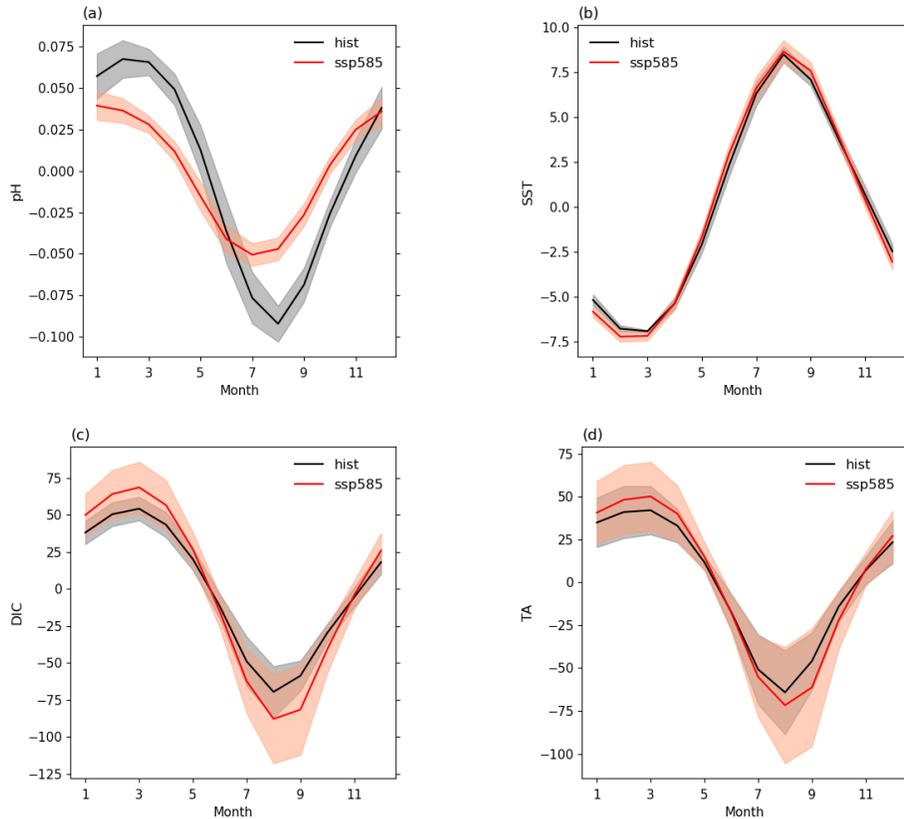


Fig. 7. Seasonal cycles of detrended (a) pH, (b) SST (sea surface temperature), (c) DIC (dissolved inorganic carbon) and (d) TA (total alkalinity) for the periods of 1995 ~ 2014 (black lines) and 2081 ~ 2100 (red lines). The projected variables are based on the SSP5-8.5 scenario

는 각각 수온과 염분을 나타낸다. 비슷한 방법으로, Hagens and Middelburg (2016a)는 DIC, SST, 그리고 TA의 관측자료를 바탕으로 모델링을 수행하였고, 결과 관측과 유사한 pH의 계절변동성을 재현하였다. 해당 모델로 각 인자들의 pH 계절변동에 대한 기여도를 분석한 결과, 저위도에서 중위도까지는 수온의 영향이, 고위도에서는 DIC의 영향이 지배적으로 작용한다는 결과를 제시하였다. 반면, TA의 영향은 전반적으로 약하나 여름철의 경우에는 최대값에 영향을 줄 수 있다고 하였다.

$$\Delta \text{pH} = \left(\frac{\partial \text{pH}}{\partial \text{D}} \right) \Delta \text{D} + \left(\frac{\partial \text{pH}}{\partial \text{T}_A} \right) \Delta \text{T}_A + \left(\frac{\partial \text{pH}}{\partial \text{T}} \right) \Delta \text{T} + \left(\frac{\partial \text{pH}}{\partial \text{S}} \right) \Delta \text{S} + \dots \quad (1)$$

Fig. 7은 SSP5-8.5 시나리오의 미래기후에서 나타난 현재기후 대비 pH, SST, DIC, TA의 계절변동을 나타낸 그림이다. 2장에서 언급한 방법으로 각 인자들의 추세를 제거한 후 20년 기간에 대해 월별로 평균하였다. 계산된 각 인자들의 진폭과 평균값을 Table 2에 나타내었다. pH의 계절변동성의 변화를 살펴보면, 현재기후에 비해 미래의 계절진폭이 약 43.8% 감소하는 것으로 나타났다. 결과적으로 pH는 겨울철은 더 낮아지고 여름철은 높아지는 결과를 보이며, 위상도 1개월 정도의 차이를 가진다. 참고로, 한반도 주변해역에서 나타난 pH의 진폭과 위상의 변화는 Kwiatkowski and Orr (2018)가 제시한 아열대 해역(25°N)에서의 미래 변화와 아주 유사한 특징을 보였다. 동일한 방법으로 SST, DIC, 그리고 TA의 변화도 살펴보았다. 수온의 경우, 연평균은 약 4.91°C의 큰 상승을 보이나 진폭의 차이는 0.46°C로 크지 않았다. 반면에 DIC와 TA는 파

Table 2. Amplitudes of ocean surface pH, SST (sea surface temperature), DIC (dissolved inorganic carbon), and TA (Total Alkalinity) around the Korean Peninsula for the period of 1995 ~ 2014 and 2081 ~ 2100. Values in parentheses indicate 20-year mean for each variable

	pH	SST (°C)	DIC ($\mu\text{mol kg}^{-1}$)	TA ($\mu\text{mol kg}^{-1}$)
Historical (1995-2014)	0.16 (8.10)	15.42 (18.55)	123.9 (1858.08)	106.2 (2100.07)
SSP5-8.5 (2081-2100)	0.09 (7.69)	15.88 (23.46)	156.6 (1943.96)	121.8 (2041.12)

겨대비 각각 26.4%와 14.7% 계절 진폭이 증가하여, 겨울철은 더 증가하고 여름철은 감소하는 계절변동을 보였다.

DIC와 SST의 변화는 서로 상쇄되어 pH의 계절변동에 영향을 미치게 된다. 예를 들어 겨울에 증가하는 DIC는 pH의 감소를 이끌고 반대로 겨울에 감소하는 SST는 pH의 증가에 기여하여 결과적으로 두 요소의 영향이 상쇄된 결과로 pH가 나타난다(Hagens and Middelburg, 2016a). 식 (1)에서 각 인자들의 pH에 대한 민감도가 미래에 변하지 않는다는 가정한다면, 미래 계절성의 변화가 약한 수온에 비해 DIC의 변화가 pH 진폭 변화에 더 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다. 또한, TA의 변화에 대한 pH의 민감도는 상대적으로 약하고, Fig. 7(d)에서 보인 TA 변화는 오히려 pH의 진폭을 강화하는 방향으로 작용할 수 있다.

아울러, pH에 대한 각 인자의 민감도와 관련해서, 지구 시스템모델의 결과를 이용한 시나리오 기반의 기존 연구들은 미래에 수온에 대한 민감도($\partial\text{pH}/\partial T$)는 감소하는 반면, DIC($\partial\text{pH}/\partial D$)와 TA($\partial\text{pH}/\partial T_A$)에 대한 민감도는 점차 증가하는 결과를 제시하였다(Hagens and Middelburg, 2016b; Riebesell et al., 2009). 이러한 민감도의 변화는 정도의 차이는 있으나 고위도(cold water)와 저위도 해수(warm water) 전반에서 나타나는 것으로 연구되었다(Riebesell et al., 2009). 결과적으로, 언급한 인자들로 살펴볼 때, CMIP6 모델에서 나타난 미래 한반도 주변에서의 pH의 계절진폭 감소에는 DIC의 계절적인 변화가 주역하게 작용한 것으로 판단된다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 CMIP6 모델의 결과를 바탕으로 SSP 시나리오에 따른 한반도 주변 표층해역의 미래 pH 변화를 살펴보고자 하였다. 이를 위해 먼저 5개의 CMIP6 모델을 선정하여 현재기후 기간(1995 ~ 2014)에 대한 pH 모의 결과를 관측기반 재구성 자료(CMEMS-LSCE)와 비교하였

다. 결과, 황해 연안역에서 재구성 자료의 불확실성으로 인해 정량적인 비교에는 어려움이 있었지만, 평균적인 크기나 시간에 따른 해역별 감소 추세는 비슷한 결과를 보였다. 또한, 한반도 주변해역의 pH 감소 추세는 전지구와 비슷하게 나타났는데, 이러한 특성은 재구성 자료와 함께 관측결과(Woo et al., 2023)의 특성을 잘 반영하는 결과로 사료된다.

SSP 시나리오별로 pH의 미래 변화(2015 ~ 2100)를 살펴본 결과, 온실가스 배출이 높은 시나리오일수록 한반도 주변에서 pH 감소가 빠르게 진행되는 것으로 나타났다. 또한, 현재기후에 비해 21세기말(2081 ~ 2100) pH의 감소 추세(trend)는 약 3배 증가하였는데, 결과적으로 SSP5-8.5 시나리오에서는 2100년에 현재기후 평균에 비해 약 -0.47 감소하는 큰 변화를 보였다. 전지구와 비교하여, 한반도 주변해역은 근미래(2030)까지 대체로 비슷한 감소 경향을 보이다가 이후부터 산성화가 더 빠르게 진행되는 것으로 전망되었다.

공간적으로 pH는 현재기후 기간과 동일하게 한반도 주변 전역에서 감소하는 결과를 보였다. 또한, pH와 관련된 인자들의 현재기후 대비 미래(2081 ~ 2100)의 차이를 살펴본 결과, SST와 DIC는 미래에 평균적으로 26%와 4.8% 증가하였고 TA는 약하게 감소하는 것으로 나타났다. 아울러, 이들 인자들의 미래 변화의 공간적인 패턴은 pH의 변화 패턴과 상관성을 가지는 것으로 보였는데, 예를 들어 남해(또는 동중국해 북부)에서 동해에 이르는 해역에서의 변화 폭이 비슷하게 나타나, 황해와 구분되는 경향을 보였고 또한 황해 북부로 가면서 변화폭에 차이를 보였다. 이러한 공간적인 변화 특성은 남해에서 동해로 유입되는 대마난류 등 한반도 주변해역에서의 해양순환 구조와 연관이 있는 것으로 보여 향후 순환구조의 변화와 연계한 탄소순환 과정에 대한 이해가 필요할 것으로 보인다.

한반도 주변해역의 pH의 연평균 변화와 함께 미래 계절성(seasonality)의 변화도 살펴보았다. 모델간 편차는 있

지만, 계절진폭도 뚜렷한 감소 추세를 보였으며 연평균 변화와 동일하게 높은 온실가스 배출을 가정한 시나리오에서 감소 정도가 크게 나타났다. SSP5-8.5 시나리오를 기준으로 pH의 계절진폭은 현재기후 대비 2081~2100년 기간에 약 43.8% 작아졌는데, 결과적으로 겨울철은 pH가 낮아지고 여름철은 높아지는 양상을 보였다. 이러한 pH의 계절적인 변화는 해양생물이 수온의 상승과 함께 미래 해양환경의 변화에 적응하는데 있어서 영향을 미칠 수 있을 것으로 사료된다. pH의 계절진폭 감소와 관련하여 SST, DIC, 그리고 TA를 중심으로 계절성의 변화를 살펴보았다. SST의 경우 유의미한 변화를 보이지 않은 반면에, DIC는 계절진폭이 뚜렷하게 증가하며 pH의 계절성 변화와 상관성을 보였다. 아울러, 미래 DIC에 대한 pH의 민감도가 증가한다는 기존 연구결과들(Hagens and Middelburg, 2006b; Riebesell et al., 2009)을 고려할 때, DIC의 영향은 한반도 주변해역의 미래 pH의 계절진폭 감소에 주요한 영향을 주는 것으로 판단된다.

본 연구에서는 CMIP6의 전지구 모델자료를 기반으로 한반도 주변해역 pH의 평균적인 변화 경향에 대해서 살펴보았다. 하지만, 어업자원을 포함해서 다양한 해양생물들은 연안해역에서 높은 밀도로 분포하기 때문에 공간적으로 보다 상세하고 정확한 정보가 중요하다. 따라서, 연안에서의 물리, 생물, 화학환경의 변화를 적절하게 모의할 수 있는 생지화학과정을 포함하는 지역규모의 기후모델에 대한 연구가 선행될 필요가 있다. 예를 들어, 한반도 주변 연안을 고려한다면, 하천수의 유입으로 인한 탄소, 영양염의 변화, 그리고 해류, 성층강도, 연안용승(upwelling) 등의 물성의 변화에 대한 재현과 이를 바탕으로 한 종합적인 이해가 중요하다 하겠다(Kim et al., 2022). 아울러, 황해와 남해의 표층은 중국 양자강으로부터 유입되는 막대한 양의 담수가 지배적인 영향을 미치기 때문에 중국 내륙의 강수 변화와 연계한 방류량의 미래 변화와, 그리고 이에 따른 생물학적인 변화(클로로필 등)에 대한 연구도 한반도 주변해역의 산성화를 이해하는데 기여할 것으로 판단된다.

사사

이 연구는 기상청 국립기상과학원 「기상업무지원기술 개발연구」 “신기후체제 대응 기후변화시나리오 개발·평가 (KMA2018-00321)”의 지원으로 수행되었습니다.

Reference

- Bindoff N, Willebrand J, Artale V, Cazenave A, Gregory J, Gulev S, Hanawa K, Le Quere C, Levitus S, Norjiri Y, et al. 2007. Observations: Oceanic climate change and sea level. In: Solomon S, Qin D, Manning M, Chen Z, Marquis M, Averyt KB, Tignor M, Miller HL (eds). *Climate change 2007, The physical science basis, Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. p. 385-428.
- Bopp L, Resplandy L, Orr JC, Doney SC, Dunne JP, Gehlen M, Halloran P, Heinze C, Ilyina T, Séférian R, Tjiputra J, Vichi M. 2013. Multiple stressors of ocean ecosystems in the 21st century: Projections with CMIP5 models. *Biogeosciences* 10: 6225-6245. doi: 10.5194/bg-10-6225-2013
- Byrne RH, Mecking S, Feely RA, Liu X. 2010. Direct observations of basin-wide acidification of the North Pacific Ocean. *Geophys Res Lett* 37(2). doi: 10.1029/2009GL040999
- Caldeira K, Wickett ME. 2003. Anthropogenic carbon and ocean pH. *Nature* 425: 365. doi: 10.1038/425365a
- Chau TTT, Gehlen M, Metzl N, Chevallier F. 2024. CMEMS-LSCE: A global, 0.25°, monthly reconstruction of the surface ocean carbonate system. *Earth Syst Sci Data* 16(1): 121-160. doi: 10.5194/essd-16-121-2024
- Danabasoglu G, Lamarque JF, Bacmeister J, Bailey DA, DuVivier AK, Edwards J, Emmons LK, Fasullo J, Garcia R, Gettelman A, et al. 2020. The Community Earth System Model Version 2 (CESM2). *J Adv Model Earth Syst* 12(2): e2019MS001916. doi: 10.1029/2019MS001916
- Doney SC, Balch WM, Fabry VJ, Feely RA. 2009. Ocean acidification: A critical emerging problem for the ocean sciences. *Oceanography* 22(4): 16-25.
- Dore JE, Lukas R, Sadler DW, Church MJ, Karl DM. 2009. Physical and biogeochemical modulation of

- ocean acidification in the central North Pacific. *Proc Natl Acad Sci* 106(30): 12235-12240.
- Gattuso JP, Hansson L. 2011. Ocean acidification: Background and history. In: Gattuso JP, Hansson L (eds). *Ocean acidification*. New York: Oxford University Press. p. 1-20.
- Hagens M, Middelburg JJ. 2016a. Attributing seasonal pH variability in surface ocean waters to governing factors. *Geophys Res Lett* 43(24): 12528-12537. doi: 10.1002/2016GL071719
- Hagens M, Middelburg JJ. 2016b. Generalised expressions for the response of pH to changes in ocean chemistry. *Geoch Cosm Acta* 187: 334-349. doi: 10.1016/j.gca.2016.04.012
- Jeong S, Choi SH, Kim YH. 2021. A study on future changes of sea surface temperature and ocean currents in northwest pacific through CMIP6 model analysis (in Korean with English abstract). *J Korean Soc Oceanogr* 26(4): 291-306.
- Jiang LQ, Carter BR, Feely RA, Lauvset S, Olsen A. 2019. Surface ocean pH and buffer capacity: Past, present and future. *Sci Rep* 9: 18624. doi: 10.1038/s41598-019-55039-4
- Kim TW, Kim D, Park GH, Ko YH, Mo A. 2022. A review on ocean acidification and factors affecting it in Korean waters (in Korean with English abstract). *J Korean Earth Sci Soc* 43: 91-109.
- Kwiatkowski L, Orr JC. 2018. Diverging seasonal extremes for ocean acidification during the twenty-first century. *Nat Clim Change* 8(2): 141-145. doi: 10.1038/s41558-017-0054-0
- Kwiatkowski L, Torres O, Bopp L, Aumont O, Chamberlain M, Christian JR, Dunne JP, Gehlen M, Ilyina T, John JG, et al. 2020. Twenty-first century ocean warming, acidification, deoxygenation, and upper-ocean nutrient and primary production decline from CMIP6 model projections. *Biogeosciences* 17(13): 3439-3470.
- Lauvset SK, Gruber N, Landschützer P, Olsen A, Tjiputra J. 2015. Trends and drivers in global surface ocean pH over the past 3 decades. *Biogeosciences* 12(5): 1285-1298. doi: 10.5194/bg-12-1285-2015
- Lovato T, Peano D, Butenschön M, Materia S, Iovino D, Scoccimarro E, Fogli PG, Cherchi A, Bellucci A, Gualdi S, et al. 2022. CMIP6 Simulations with the CMCC Earth System Model (CMCC-ESM2). *J Adv Model Earth Syst* 14(3): e2021MS002814. doi: 10.1029/2021MS002814
- Lyu SJ, Kim K. 2005. Subinertial to interannual transport variations in the Korea Strait and their possible mechanisms. *J Geophys Res* 110(C12).
- Ono H, Kosugi N, Toyama K, Tsujino H, Kojima A, Enyo K, Iida Y, Nakano T, Ishii M. 2019. Acceleration of ocean acidification in the Western North Pacific. *Geophys Res Lett* 46(22): 13161-13169. doi: 10.1029/2019GL085121
- Orr JC, Fabry VJ, Aumont O, Bopp L, Doney SC, Feely RA, Gnanadesikan A, Gruber N, Ishida A, Joos F, et al. 2005. Anthropogenic ocean acidification over the twenty-first century and its impact on calcifying organisms. *Nature* 437(7059): 681-686.
- Park YG, Seol KH, Boo KO, Lee J, Cho C, Byun YJ, Seo S. 2018. Acidification at the surface in the East Sea: A coupled climate-carbon cycle model study. *Ocean Sci J* 53(3): 437-448. doi: 10.1007/s12601-018-0018-y
- Riebesell U, Körtzinger A, Oschlies A. 2009. Sensitivities of marine carbon fluxes to ocean change. *Proc Natl Acad Sci* 106(49): 20602-20609. doi: 10.1073/pnas.0813291106
- Seland Ø, Bentsen M, Olivé D, Toniazzo T, Gjermundsen A, Graff LS, Debernard JB, Gupta AK, He YC, Kirkevåg A, et al. 2020. Overview of the Norwegian Earth System Model (NorESM2) and key climate response of CMIP6 DECK, historical, and scenario simulations. *Geosci Model Dev* 13(12): 6165-6200. doi: 10.5194/gmd-13-6165-2020
- Sellar AA, Jones CG, Mulcahy JP, Tang Y, Yool A, Wiltshire A, O'Connor FM, Stringer M, Hill R, Palmieri J, et al. 2019. UKESM1: Description and

- evaluation of the U.K. Earth System Model. *J Adv Model Earth Syst* 11(12): 4513-4558. doi: 10.1029/2019MS001739
- Sung HM, Kim J, Lee JH, Shim S, Boo KO, Ha JC, Kim YH. 2020. Future Changes in the global and regional sea level rise and sea surface temperature based on CMIP6 models. *Atmosphere* 12(1): 90. doi: 10.3390/atmos12010090
- Swart NC, Cole JNS, Kharin VV, Lazare M, Scinocca JF, Gillett NP, Anstey J, Arora V, Christian JR, Hanna S, et al. 2019. The Canadian Earth System Model version 5 (CanESM5.0.3). *Geosci Model Dev* 12(11): 4823-4873. doi: 10.5194/gmd-12-4823-2019
- Takahashi T, Sutherland SC, Chipman DW, Goddard JG, Ho C, Newberger T, Sweeney T, Munro DR. 2014. Climatological distributions of pH, pCO₂, total CO₂, alkalinity, and CaCO₃ saturation in the global surface ocean, and temporal changes at selected locations. *Mar Chem* 164: 95-125. doi: 10.1016/j.marchem.2014.06.004
- Woo DS, Kim JH, Kang SK, Kim KY, Kim DW, Kim CS, Kim HJ, Kim HY, Park KJ, Bae BS, et al. 2023. Annual report for climate change trends in fisheries (in Korean with English abstract). Busan, Korea: National Institute of Fisheries Science. p. 87.

부록

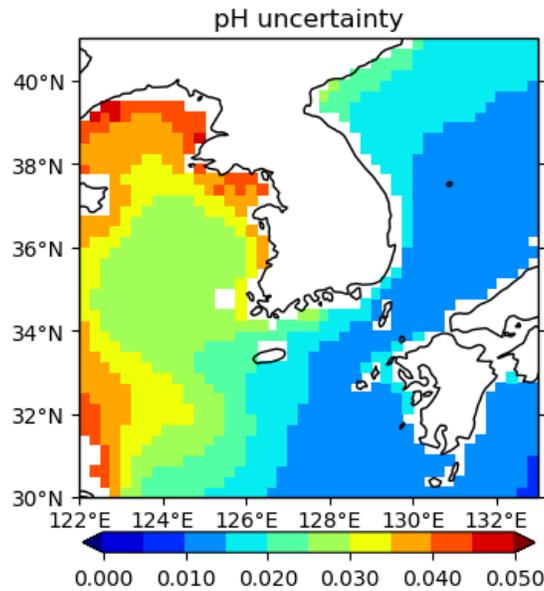


Fig. S1. Spatial distribution of annual mean surface pH averaged over 20 years (1995 ~ 2014) based on CMEMS–LSCE data (Chau et al., 2024)

Table S1. Changes in pH, SST, DIC, and TA around the Korean Peninsula from SSP1–2.6 scenario. Values indicate difference of each 20-year mean for each variable

SSP1-2.6 (%)	Δ pH	Δ SST	Δ DIC	Δ TA
[2021-2040]-[1995-2014]	- 0.8	+ 5.4	+ 1.0	- 0.3
[2041-2060]-[2021-2040]	- 0.4	+ 3.0	+ 0.3	- 0.3
[2061-2080]-[2041-2060]	0.0	+ 1.8	- 0.1	- 0.1
[2081-2100]-[2061-2080]	+ 0.1	+ 0.2	- 0.6	- 0.3

Table S2. Same as Table S1 except for SSP5–8.5 scenario

SSP5-8.5 (%)	Δ pH	Δ SST	Δ DIC	Δ TA
[2021-2040]-[1995-2014]	- 0.9	+ 5.7	+ 1.2	0.3
[2041-2060]-[2021-2040]	1.2	+ 6.6	+ 1.3	0.6
[2061-2080]-[2041-2060]	1.4	+ 6.2	+ 1.5	0.6
[2081-2100]-[2061-2080]	1.6	+ 7.5	+ 0.8	1.2