

엘니뇨/라니냐와 한국 연안의 적조 발생 관계

박성식¹ · 김경희^{2,†}

¹부경대학교 해양공학과 대학원생

²부경대학교 해양공학과 교수

Relationship between El Niño/La Niña and Red Tide Occurrence in the Coastal Waters of Korea

Seongsik Park¹ and Kyunghoi Kim^{2,†}

¹Graduate Student, Department of Ocean Engineering, Pukyong National University, Busan 48513, Korea

²Professor, Department of Ocean Engineering, Pukyong National University, Busan 48513, Korea

요 약

본 연구에서는 국내 연안의 적조 발생 현황(1981~2022)을 조사하고, 그 영향인자를 평가하였으며, 엘니뇨/라니냐 현상과의 관계를 조사하였다. 국내 적조 발생의 주요 영향인자로 강수량과 하천 총질소(TN) 농도로 밝혀졌다. 여름철 강수량이 많은 경우 규조류가 종 경쟁에서 유리한 위치를 차지하여 무해 적조 발생이 증가하였다. 반대로 유해 적조는 여름철 강수량이 적어 경쟁 종이 부재하고 최적 수온 조건이 갖춰졌을 때 빈번하게 발생하였다. 여름철(6~10월) 적조 발생 일수는 14~16년 주기로 증감하였으며, 엘니뇨와 라니냐의 주기성과 강한 상관성($R=0.94$)을 보였다. 엘니뇨/라니냐의 국내 영향 지연 시간을 고려하여 분석한 결과, 2~6월에 라니냐가 발생하면 같은 해 여름에는 강수량과 무해 적조 발생이 증가할 수 있음을 확인하였다. 본 연구 결과를 통해 엘니뇨/라니냐 현상과 국내 적조 발생 간의 관계를 밝혀낼 수 있었으며, 국내에 미치는 전 지구적인 이상 기후의 영향에 대한 이해를 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

Abstract – In this study, we investigated the occurrence of red tide along the coastal waters of Korea from 1981 to 2022, evaluated its influencing factors, and examined the relationship with El Niño/La Niña events. The primary influencing factors for red tide occurrences in the coastal waters were identified as precipitation and riverine total nitrogen concentration. In summers with high rainfall, diatoms gained an advantage in species competition, leading to an increase in harmless algal blooms. Conversely, harmful algal blooms occurred frequently when summer rainfall was low, as competitive species were absent, and under optimal water temperature conditions. The annual duration of red tide occurrences showed a fluctuation pattern with a 14-16 year cycle and exhibited a strong correlation with the periodicity of El Niño and La Niña ($R=0.94$). Through an analysis considering the lag time of El Niño/La Niña impacts on domestic conditions, it was confirmed that if La Niña occurs between February and June, there is an increase in precipitation and harmless algal blooms in summer of the year. These findings contribute to a deeper understanding of the relationship between El Niño/La Niña events and red tide occurrences in the coastal waters, providing insights into the effects of global abnormal climates on the coastal environment of Korea.

Keywords: Red Tide(적조), Empirical Mode Decomposition(경험적 모드 분해), multivariate ENSO index(다변량 남방진동 지수), Pacific Ocean Surface Temperature(태평양 표층 수온), SHapley Additive exPlanations

1. 서 론

적조(red tide)란 식물플랑크톤의 대량 증식으로 표층 해수의 색깔이 적색, 황색 등으로 변색되는 현상이나 유해조류의

대번식(Harmful Algal Blooms)을 의미한다. 전 세계적으로 적조의 발생 영역, 기간, 밀도, 그리고 그 피해는 증가하고 있다(Lim *et al.*[2020]; Wells *et al.*[2015]). 국내 남해안에서는 여름철 *Cochlodinium polykrikoides*에 의한 유해 적조가 발생하여 양식 어류에 막대한 피해를 입히고 있다. 적조 발생으로 국내에서는

[†]Corresponding author: hoikim@pknu.ac.kr

‘95년 764억 원, ‘03년 215억 원, ‘13년 247억 원, ‘14년 74억 원에 달하는 어업 피해가 발생하였다(Kang *et al.*[2020]). 적조 피해를 저감을 위해 국립수산과학원에서는 선박, 육상, 항공 예찰을 수행하고 있으며, 적조 속보를 통해 발생 해역, 적조 생물, 밀도, 수온(1981~)에 대한 정보를 제공하고 있다(NIFS[2023b]).

식물플랑크톤은 종에 따라 선호하는 영양염 조건이 다르다. 남해안에서 발생하는 무해 적조 발생의 우점종인 규조류는 표층 영양염 농도가 높은 연안 환경에서 대량 증식하는 경향을 보인다(Baek *et al.*[2015]). 반면에, *C. polykrikoides*에 의한 유해 적조는 표층 영양염 농도는 낮고, 저층 영양염이 풍부한 해역에서 주로 발생한다(Lee and Moon[2008]; Lim *et al.*[2019]). 이는 규조류와 *C. polykrikoides*가 중간 경쟁 관계에 놓여있기 때문이며, 두 종의 운동성 유무에 기인한다. 성층이 형성되어 연직 혼합이 억제되는 여름철, 표층의 영양염 농도가 낮은 조건에서 체인 구조(long chain formation)로 운동성이 강한 *C. polykrikoides*은 낮에는 표층에서 광합성을 하고, 밤에는 저층으로 이동하여 영양염을 흡수·성장하며 중간 경쟁에서 유리한 위치를 차지한다(Baek *et al.*[2009]; Watanabe *et al.*[1991]); 같은 조건에서 운동성이 없는 규조류는 중간 경쟁에서 밀려나 그 세포 수는 감소한다(Lim *et al.*[2021]). 이와 같은 이유로 강수량이 많아 표층 영양염 농도가 높은 6~7월 남해 연안에서는 규조류에 의한 무해 적조가 빈번하게 발생하고, 8~9월에는 표층 영양염 농도가 감소하고 *C. polykrikoides* 성장의 최적 수온 조건이 형성되면서 유해 적조 발생이 증가한다.

수온은 영양염과 함께 적조 발생의 주요 영향인자로, *C. polykrikoides* 성장의 최적 수온은 약 24~27°C이다(Lee *et al.*[2010]). 해양 열파(marine heatwaves)의 강도와 빈도는 최근 증가하는 추세이며, 해양 열파에 의한 이상 고수온 현상은 국내 적조에도 영향을 미치고 있다. 연안 표층에서 발생한 이상 고수온 현상은 성층을 형성하여 중간 경쟁에서 *C. polykrikoides*에게 유리한 환경을 조성한다(Lim *et al.*[2021]). 이로 인해 유해 적조가 평년에 비해 일찍 발생할 수 있다. 하지만, 이상 고수온 현상이 장기간 지속되면 *C. polykrikoides*의 성장을 억제하여 유해 적조의 소멸을 앞당기기도 한다.

엘니뇨/라니냐와 같은 전 지구적인 이상 기후가 식물플랑크톤의 증식과 적조 발생에 영향을 미칠 수 있다는 연구가 여러 차례 보고되었다. 1998년에 발생한 엘니뇨는 홍콩 연안의 수온에 영향을 미쳐 유해 적조 발생을 유발하였으며, 그 결과 약 3,200만 달러의 어업 피해를 초래하였다(Yin *et al.*[1999]). 이외에도 엘니뇨/라니냐 현상이 캘리포니아 반도(Garate-Lizarraga and Beltrones[1998]), 캘리포니아 만(Gonzalez-Lopez[1994]; Mee *et al.*[1985]), 북동태평양 연안(Smith[1985])의 식물플랑크톤 생체량 변화에도 영향을 미칠 수 있다는 연구 사례가 있다. Lee *et al.*[2023]는 엘니뇨/라니냐와 국내 적조 발생 간의 상관성을 조사하였으나, 조사 해역이 제주도 연안으로 한정되어 있다. 이

외에도 국내 적조 발생에 관한 여러 연구가 수행되었으나, 그 발생 기작에 대한 지식과 관련 자료 부족으로 인해 주로 국지적인 원인 파악에 그치고 있다.

본 연구에서는 국내 연안의 적조 발생 현황(1981~2022)을 조사하고, 그 영향인자를 평가하였다. 국내 적조 발생과 엘니뇨/라니냐 및 태평양 표층 수온과의 관계를 조사하였다. 적조 발생을 *C. polykrikoides*에 의한 유해 적조와 *C. polykrikoides*를 제외한 다른 모든 종에 의한 무해 적조로 나누어 강수량과 수온 조건에 따른 적조 발생 일수를 평가하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 국내 연안 적조 발생 자료

적조 발생 자료는 국립수산과학원의 적조정보시스템에서 1981~2022년 동안 관측된 자료를 취득하여 사용하였다(NIFS[2023b]). 적조정보시스템의 적조예찰 감시체계는 선박감시, 육상감시, 항공감시로 나뉜다. 선박감시는 전국 연안 102개 정점에 대해 매일 1~2회 선박 조사가 수행된다. 육상감시는 전국 130개 정점에 대해 매일 육상에서 육안 관찰을 수행한다. 항공감시는 적조 예보 발령 해역에 대해 수시로 항공 예찰을 수행한다. 또한, 기존 감시체계 외에도 전 국민을 대상으로 적조 감시단을 운영하여 적조 발생에 대한 신고를 받고 있다.

2.2 적조 발생의 영향인자 평가

적조 발생의 영향인자를 평가하기 위해 강수량, 일사량, 남해안 표층 수온, 하천 수질을 사용하였다. 강수량과 일사량 자료는 기상청의 중관기상관측 자료를 취득하여 사용하였다(KMA[2023]). 남해안 표층 수온은 국립수산과학원의 정선해양 관측자료를 사용하였다(NIFS[2023a]). 하천 수질은 국립환경과학원의 물환경정보시스템에서 취득하여 사용하였다(NIER[2023]). 사용된 자료의 관측 정점 위치는 Fig. 1에 나타내었다.

적조 발생의 영향인자 평가를 위해 상관 분석과 SHapley Additive exPlanations(SHAP) 분석을 수행하였다. 상관 분석을 위해서 적조 발생 일수와 환경인자 간의 피어슨 상관계수(Pearson correlation coefficient)를 계산하였다. 상관계수의 절댓값이 클수록 두 변수 간의 상관성이 강함을 의미하며, 상관계수의 부호에 따라 양 또는 음의 상관성으로 나뉜다. SHAP 분석은 입력 자료의 교란 정도에 따라 예측 모델의 출력에 미치는 영향을 바탕으로 개별 특성(Feature)의 기여도를 평가한다(Lundberg and Lee[2017]). 개별 특성의 기여도는 Shapley value로 표현되며, Shapley value가 양수면 출력값 상승에 긍정적인 영향을 미친다. SHAP 분석을 위해 사용된 예측 모델로는 least-squares boosting 기법이 적용된 gradient boosting decision tree 모델을 사용하였다.

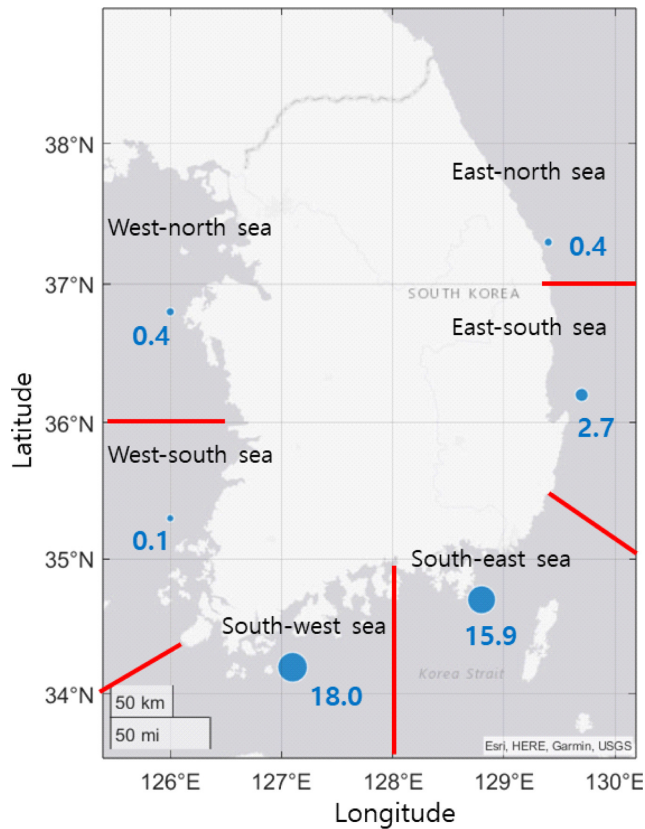


Fig. 3. Average annual occurrences of red tide days by coastal region.

3. 결과 및 고찰

3.1 국내 연안 적조 발생 현황

1981~2022년 동안 관측된 연도별·월별 국내 연안의 적조 발생 일수를 Fig. 2에 나타내었다. 관측 기간 동안 한 달 평균 3.3일의 적조가 발생했으며, 수온이 높고 강수량이 많은 6~10월에는 한 달 평균 6.9일의 적조가 발생하였다. 특히, 8월 평균 적조 발생 일수는 11.6일로 가장 높게 나타났으며, 2012~2015년 8월의 적조 발생 일수는 28~30일로 한 달 내내 적조가 발생하였다.

적조 발생 일수는 약 14~16년 주기로 급격히 증가하는 경향을 보였다. 1984~1985년, 1998~2000년, 그리고 2012~2014년의 연평균 적조 발생 일수는 각각 59.5, 65.0, 73.7일로 전체 기간 평균인 40.0일에 비해 48.8, 62.5, 84.3% 높게 나타났다.

해역별 연평균 적조 발생 일수를 Fig. 3에 나타내었다. 남서해역과 남동해역의 연평균 적조 발생 일수는 각각 18.0, 15.9일로 다른 해역에 비해 적조가 빈번하게 발생하였다. 그다음으로

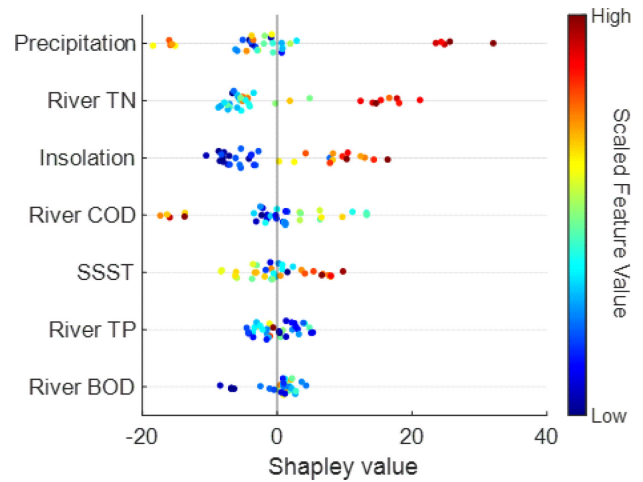


Fig. 4. Shapley summary plot between red tide days and the influencing factors.

는 동남 해역에서 연평균 2.7일의 적조가 발생했으며, 그 외 해역은 0.1~0.4일로 적조가 거의 발생하지 않는 것으로 나타났다.

3.2 적조 발생의 영향인자 평가

전국 연 적조 발생 일수와 남해안의 연 합계강수량, 합계일사량, 연평균 표층 수온, 연평균 하천 총질소(TN), 총인(TP), COD, BOD 농도 간의 상관계수를 Table 1에 나타내었다. 적조 발생 일수와 상대적으로 강한 상관성을 보인 환경인자는 강수량과 하천 TN 농도였으며 상관계수는 각각 0.36, 0.27로 양의 상관성을 보였다. 그다음으로는 일사량이 0.10으로 양의 상관성을 보였으며, 그 외 환경인자는 적조 발생 일수와 상관성을 보이지 않았다.

연 적조 발생 일수와 환경인자 간의 SHAP 분석 결과를 Fig. 4에 나타내었다. SHAP 분석에서도 강수량과 하천 TN 농도가 적조 발생 일수를 결정하는 가장 중요한 두 변수로 평가되었다. 강수량과 하천 TN 농도가 높을수록 Shapley value 또한 높은 경향을 보였는데, 이는 강수량과 하천 TN 농도가 높을수록 적조 발생이 증가하는 것으로 해석될 수 있다.

상관 분석과 SHAP 분석 결과에서 강수량과 하천 TN 농도가 높을수록 적조 발생이 증가하는 것으로 나타났다. 즉, 육지 기원 오염 부하량이 연안 적조 발생의 중요한 요인임을 알 수 있다. 이와 같은 이유로 강수량이 상대적으로 많은 6~10월에 적조 발생 일수가 높게 나타난 것으로 판단된다. 또한, 높은 오염 부하량과 반폐쇄적인 지리적 특성으로 부영양화가 자주 발생하는 남해안에서 상대적으로 많은 적조가 발생한 것으로 판단

Table 1. Correlation coefficient (R) of annual red tide days with south sea surface temperature (SSST), precipitation, insolation, and concentrations of river total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), COD, BOD

	SSST	Precipitation	Insolation	river TN	river TP	river COD	river BOD
R	-0.08	0.36	0.10	0.27	0.06	0.09	0.03

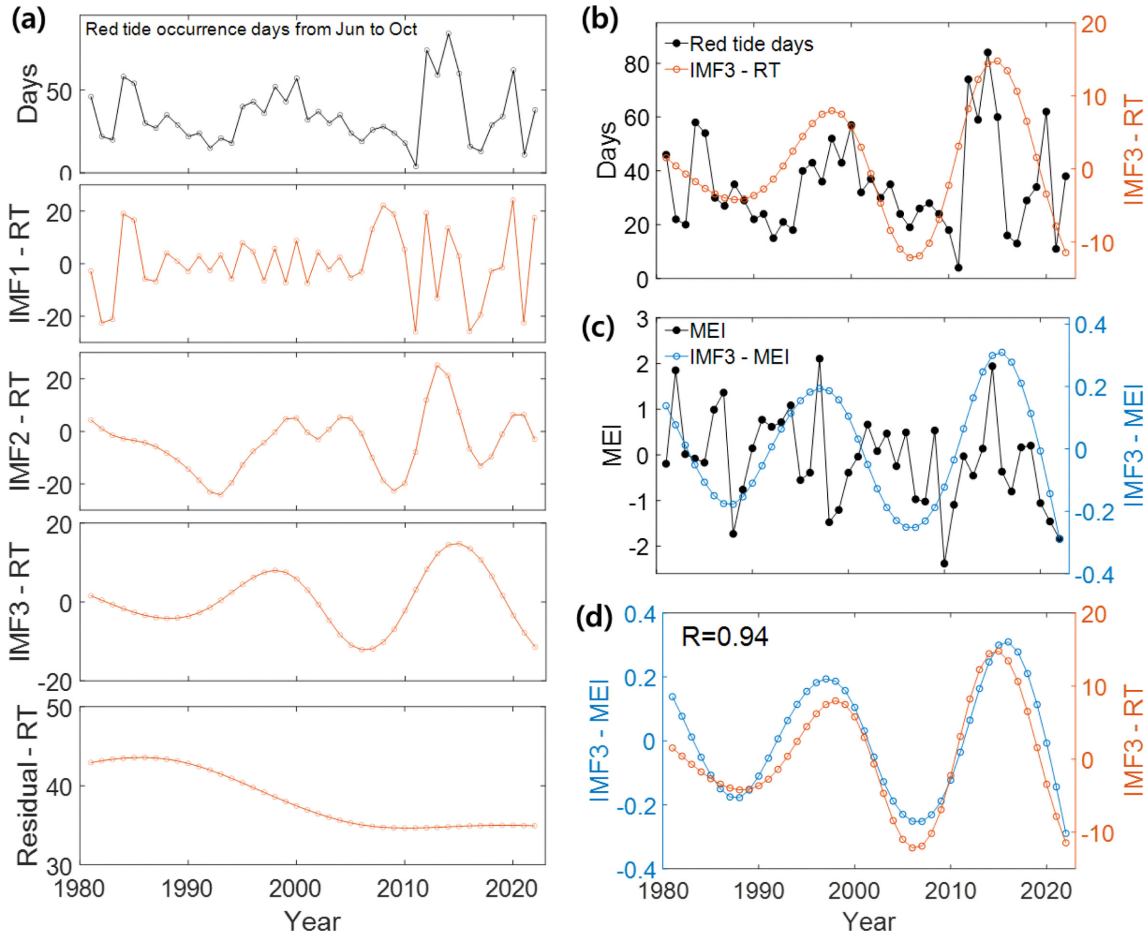


Fig. 5. (a), (b) Annual red tide days occurred between Jun and Oct and its decomposed signals(IMF1~3-RT) and residual signal(Residual-RT). (c) Annual multivariate ENSO index(MEI) averaged between Jun and Oct and its thirdly decomposed signal(IMF3-MEI). (d) Time series of IMF3-MEI and IMF3-RT.

된다. 남해안은 여름 강우로 인해 육지 기원의 질소 영양염이 공급되는 환경으로, 이로 인해 식물플랑크톤이 대량 증식하는 것으로 알려져 있다(Kang *et al.*[1999]).

3.3 적조와 엘니뇨/라니냐 간의 관계

약 14~16년 주기로 증감하는 적조 발생 일수의 주기성은 EMD 신호 분해를 바탕으로 해석되었다(Fig. 5). 6~10월 적조 발생 일수의 연도별 자료는 EMD를 통해 세 개의 신호와 한 개의 잔차로 분해되었으며, 그중 세 번째로 분해된 신호인 IMF3-RT는 적조 발생 일수의 주기성을 가장 잘 나타내었다(Fig. 5(a), (b)). 같은 방법으로 6~10월 평균 MEI의 연도별 자료를 신호 분해하였다(Fig. 5(c)). MEI로부터 세 번째로 분해된 IMF3-MEI 또한 IMF3-RT와 유사한 주기성을 보였으며, 두 신호 간의 상관계수는 0.94로 강한 양의 상관성을 보였다(Fig. 5(d)).

국내 6~10월 적조 발생 일수와 태평양 6~10월 평균 SST 간의 위·경도별 상관계수를 Fig. 6(a)에 나타내었다. 국내 적조 발생 일수는 동태평양의 SST(230°E-260°E, 10°N-40°N)와 양의 상관성

을 보였다. 즉, 동태평양의 SST가 평년보다 높은 엘니뇨 시기에 국내의 적조 발생이 증가할 수 있음을 의미하며, 이는 앞서서 IMF3-RT와 IMF3-MEI가 양의 상관성을 보인 결과와 일치한다.

Lee[1998]와 Cha *et al.*[1999]는 엘니뇨/라니냐의 영향이 한국 기상에 미치기까지 수개월의 지연 시간이 존재한다고 보고하였다. 본 연구에서도 4개월의 지연 시간을 고려하여 6~10월의 적조 발생 일수와 같은 해 2~6월 평균 SST 간의 상관계수를 구하여 Fig. 6(b)에 나타내었다. 적조 발생 일수와 4개월 선행 서태평양의 SST(115°E-170°E, 5°N-20°N)는 양의 상관성($R=0.42$)을 보였으며, 중태평양의 SST(190°E-220°E, 10°S-10°N)와는 반대로 음의 상관성($R=-0.20$)을 보였다. 이와 같은 분포는 라니냐 시기의 태평양 SST Anomaly 분포와 매우 흡사하다(Fig. 6(c)). 즉, 2~6월에 라니냐가 선행하여 발생하면 같은 해 6~10월 국내 연안에서는 적조 발생이 증가할 수 있음을 의미한다.

3.4 라니냐와 국내 강수량 간의 관계

6~10월 국내 강수량과 2~6월 평균 SST 간의 위·경도별 상

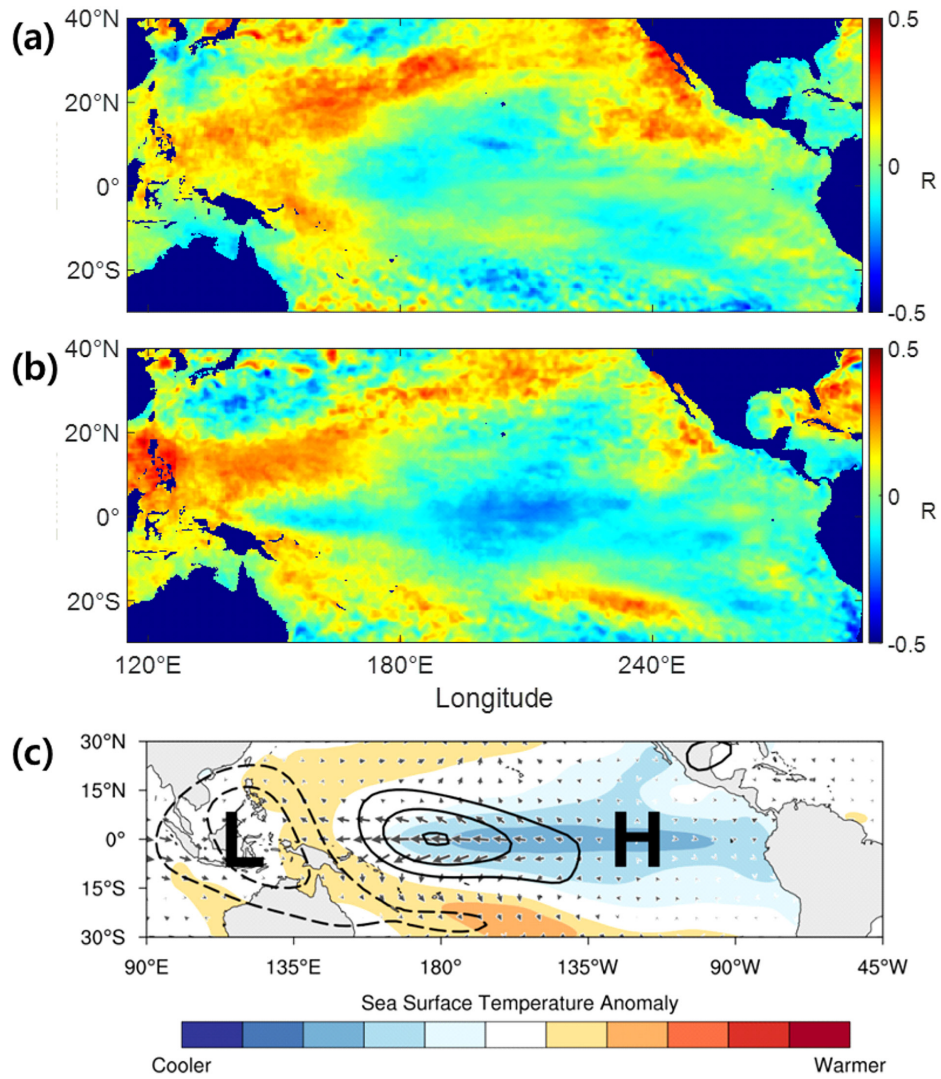


Fig. 6. (a) Correlation coefficient (R) between the annual red tide days from Jun to Oct and the annual average sea surface temperature (SST) during the same period. (b) R between the annual red tide days from Jun to Oct and the annual average SST from Feb to Jun. (c) Schematic diagram showing the SST (shaded) during La Nina event generated by PSL [2023a].

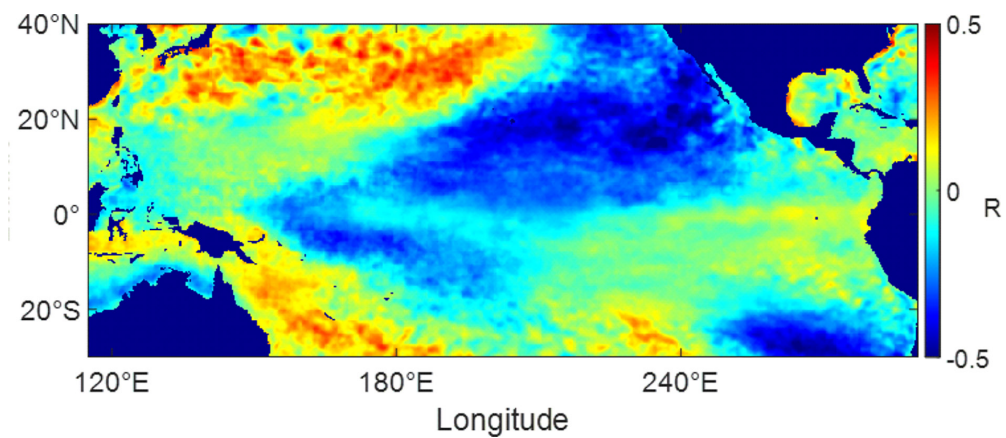


Fig. 7. Correlation coefficient (R) between the annual precipitation from Jun to Oct and the annual average sea surface temperature (SST) from Feb to Jun.

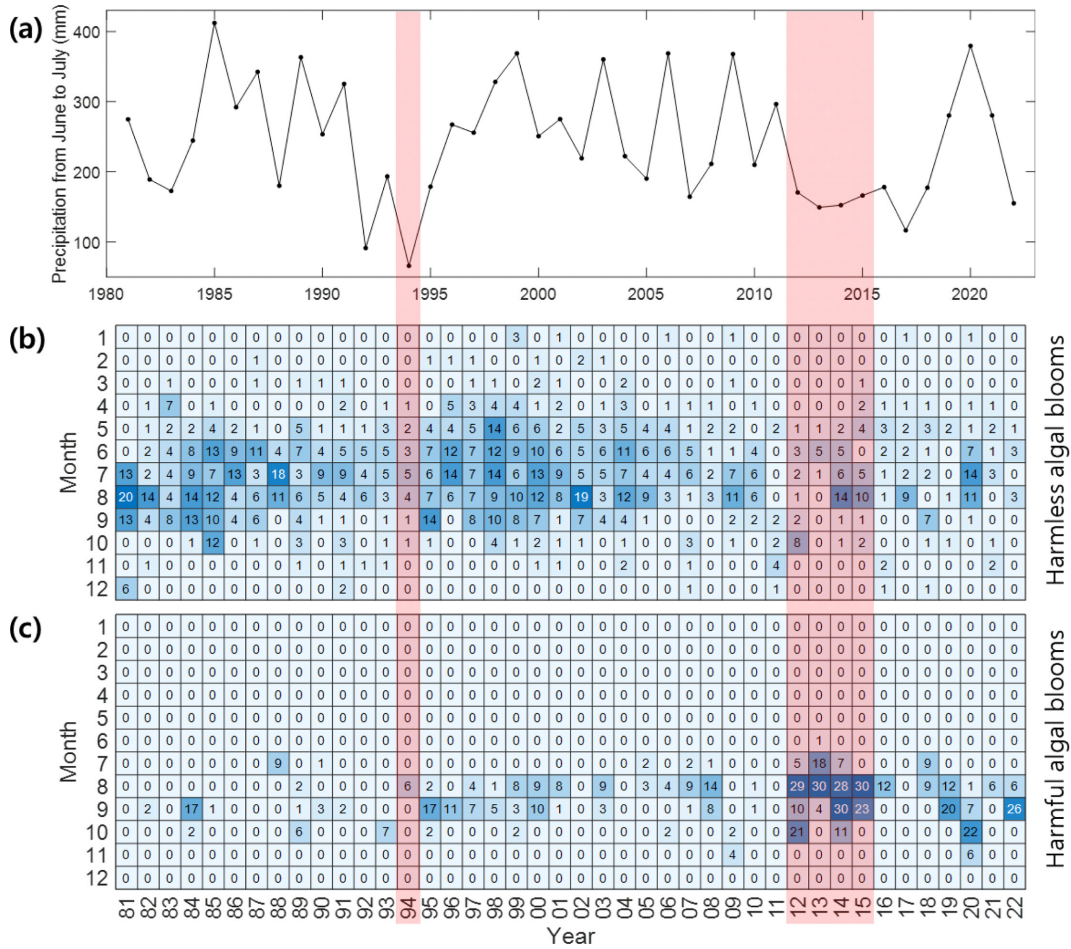


Fig. 8. (a) Precipitation from June to July in the southern coast. (b), (c) Heatmaps for monthly occurrences of harmless and harmful algal blooms, respectively.

관계수를 Fig. 7에 나타내었다. 4개월 선행 SST와 국내 강수량 간의 상관성은 앞선 적조 발생 일수와 유사하게 나타났다. 4개월 선행 서-북태평양의 SST(140°E-200°E, 27°N-35°N)는 국내 강수량과 양의 상관성(R=0.20)을 보였으며, 중-동태평양의 SST(190°E-250°E, 5°N-20°N)는 음의 상관성(R=-0.34)를 보였다. 이는 2~6월에 라니냐가 선행하여 발생할 경우, 같은 해 6~10월 국내 강수량이 증가할 수 있음을 의미한다. 실제로 2~6월 평균 MEI는 국내 6~10월 합계강수량과 음의 상관성(R=-0.24)을 보였으며, 특히 비가 많이 오는 6~8월 합계강수량과는 상관성(R=-0.32)이 증가하였다. 3.2절의 상관 분석에서 강수량이 많을수록 적조 발생이 증가할 수 있음을 확인하였다. 즉, 위 결과는 2~6월에 라니냐가 발생할 경우, 같은 해 여름에는 강수량이 증가하고 이에 따라 적조 발생이 증가할 수 있음을 시사한다.

3.5 무해 및 유해 적조 발생 평가

남해안의 6~7월 합계강수량 시계열 그래프와 월별 무해·유해 적조 발생 일수를 Fig. 8에 나타내었다. 6~7월 합계강수량과 6~7월 무해 적조 발생 일수는 양의 상관성을 보였다(R=0.39).

반면에, 6~7월 합계강수량과 7~8월 유해 적조 발생 일수는 음의 상관성을 보였다(R=-0.35).

무해 적조 발생의 우점종인 규조류와 유해 적조 발생 종인 *C. polykrikoides*은 중간 경쟁 관계이며, 규조류는 표층 영양염이 고농도인 조건에서, *C. polykrikoides*는 저농도의 영양염 조건에서 유리한 위치를 차지한다(Kwon *et al.*[2014]; Lim *et al.*[2021]). 우리나라의 장마 기간은 6월 하순부터 7월 하순까지로, 강수량이 많은 6~7월 육지 기원 영양염 부하량이 증가하고 남해 연안 표층에는 고농도의 영양염이 분포한다. 이때, 표층 고농도의 영양염 조건에 유리한 규조류는 중간 경쟁에서 유리한 위치를 차지하고, 그 결과 무해 적조 발생은 증가한다. 이와 같은 이유로 6~7월 합계강수량과 무해 적조 발생 일수는 양의 상관성을 보인 것으로 판단된다.

반대로 여름철 강수량이 상대적으로 적은 경우, 남해 연안 표층의 영양염 농도가 감소하면서 무해 적조 발생도 함께 감소한다. 반면에, 같은 조건에서 운동성이 강한 *C. polykrikoides*은 낮에는 표층에서 광합성을 하고, 밤에는 저층으로 이동하여 영양염을 흡수·성장하며 중간 경쟁에서 유리한 위치를 차지한다

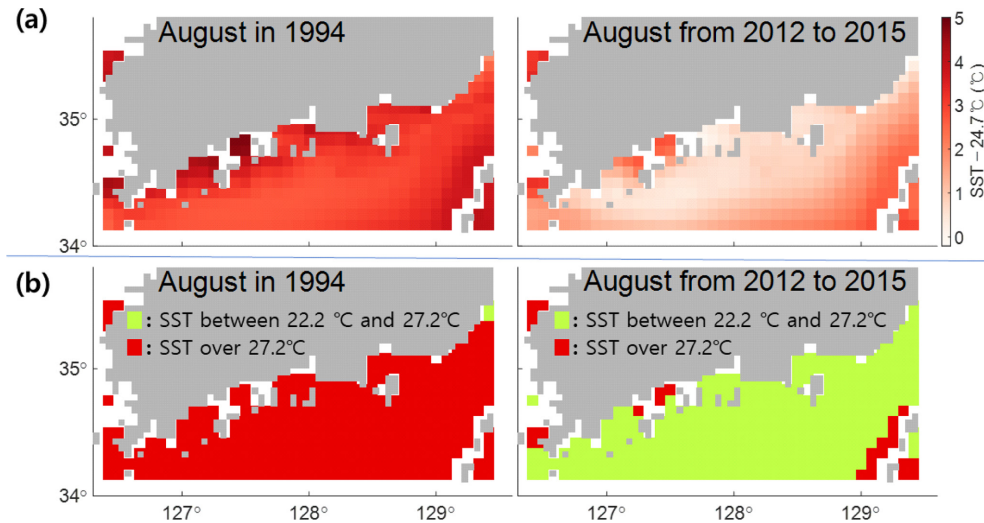


Fig. 9. (a) Distribution for Mean SST-24.7°C in August 1994 and 2012~2015 (24.7°C is optimal water temperature for growth of *Cochlodinium polykrikoides*). (b) Indication of whether SST is between 22.2°C and 27.2°C, which is water temperature range for harmful algal blooms.

(Baek *et al.*[2009]; Watanabe *et al.*[1991]). 이와 같은 이유로 여름철 강수량과 유해 적조 발생 일수는 음의 상관성을 보인 것으로 판단된다. 실제로, 6~7월 합계강수량의 2012~2015년 평균값은 159.5 mm로 1993~2022년 평균값인 241.4 mm에 비해 33.9% 낮게 나타났으며, 그 결과 2012~2015년 8월 유해 적조 발생 일수는 28~30일로 매우 높게 나타났다.

하지만, 비가 가장 적게 온 1994년 여름에는 경쟁 종의 부재에도 불구하고 7~8월 유해 적조 발생 일수는 단 6일로 상대적으로 적게 발생하였다. 그 원인은 1994년 남해 연안에 형성된 고수온인 것으로 판단된다. *C. polykrikoides* 적조 발생 시 관측 수온은 평균 24.7°C, 표준편차 2.5°C로 나타났다. 즉, *C. polykrikoides* 성장의 최적 수온 조건은 22.2~27.2°C이며, 이는 다른 문헌들과 일치한다(Lee *et al.*[2010]). 유해 적조가 빈번하게 발생한 2012~2015년 8월 남해안 수온은 대부분 *C. polykrikoides* 성장의 최적 수온 조건에 부합하였다. 반면에, 1994년 8월 남해안 수온은 대부분 27.2°C보다 높게 나타났으며, 고수온을 이유로 유해 적조가 발생하지 못한 것으로 판단된다(Fig. 9). 이상 고수온 현상으로 인해 유해 적조가 평년에 비해 일찍 소멸한 사례는 다른 연도에서도 관측되었다. Lim *et al.*[2021]의 연구에 따르면 2018년 남해안에서는 해양 열파로 인해 *C. polykrikoides*에 의한 유해 적조가 평년에 비해 약 20일 일찍 발생했으나, 그 지속 기간은 3주로 평년값인 34일에 비해 짧게 나타났다; 2016년에는 약 29°C의 고수온에서 *C. polykrikoides*에 의한 유해 적조가 형성된 후 일주일 만에 소멸하였다.

강수량과 수온 조건에 따라 유해 적조와 무해 적조 발생이 달라질 수 있음을 확인하였다. 이를 3.4절 결과와 함께 본다면, 2~6월에 라니냐가 선행하여 발생하면 같은 해 여름에는 강수량이 증가하고, 무해 적조 발생이 증가할 수 있음을 시사한다. 반대로 여름철 강수량이 적어 경쟁 종이 부재하고, 최적 수온

조건이 갖춰진다면 어업 피해를 발생시킬 수 있는 유해 적조가 빈번하게 발생할 수 있다. 하지만, 이와 같은 엘니뇨/라니냐 발생과 그에 따른 강수량 및 적조 발생 변화는 거시적인 관점에서 중요한 의미를 갖지만, 적조 발생에 직접적인 영향을 미치는 인자들을 반영하기에는 한계가 있다. 예를 들어, 앞서 언급한 이상 고수온 현상이 유해 적조 발생에 미치는 영향(Lim *et al.*[2021]), 중국 양쯔강(Yangtze River)의 저염수가 우리나라 남해안에 흘러들어 유해 적조 발생을 감소시키는 것(Lim *et al.*[2022]), 그리고 생리/생태 특성 및 생물 간의 상호 작용이 적조 발생에 직접적인 영향을 미칠 수 있다는 점 등이 있다. 따라서, 엘니뇨/라니냐에 의한 적조 발생에 미치는 영향은 본 연구에서 멈추는 것이 아닌, 엘니뇨/라니냐에 의한 수온·염분·해류 변화와 그것이 적조 발생에 미치는 영향을 미시적인 관점에서 해석할 필요가 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 국내 연안의 적조 발생 현황(1981~2022)을 조사하고, 그 영향인자를 평가하였으며, 엘니뇨/라니냐 현상과의 관계를 조사하였다. 또한, 적조 원인 종에 따라 유해 적조와 무해 적조로 나누어 강수량과 수온 조건에 따른 적조 발생 일수를 평가하였다. 국내 적조 발생 일수는 하천 TN 농도와 양의 상관성을 보였다. 여름철 강수량은 무해 적조 발생 일수와는 양의 상관성($R=0.39$)을 보였으며, 유해 적조 발생 일수와는 음의 상관성($R=-0.35$)을 보였다. 즉, 여름철 육지 기원 오염 부하량이 많은 경우 규조류가 종 경쟁에서 유리한 위치를 차지하여 무해 적조 발생은 증가하고 유해 적조 발생은 감소하였다. 유해 적조는 여름철 강수량이 적어 경쟁 종이 부재하고 최적 수온 조건이 갖춰졌을 때 빈번하게 발생하였다. 적조가 가장 빈번하게 발생하는 시기인 6~10월 적조 발생 일수는 약 14~16

년 주기의 변동 패턴을 보였으며, EMD를 통해 세 번째로 분해된 IMF3-RT가 그 주기성을 가장 잘 설명하였다. MEI로부터 분해된 IMF3-MEI는 IMF3-RT와 강한 양의 상관성($R=0.94$)을 보였으며, 국내 적조 발생의 주기성이 엘니뇨/라니냐와 유사함을 확인하였다. 2~6월에 라니냐가 선행하여 발생하면 그 해 6~10월에는 강수량과 함께 무해 적조 발생이 증가할 수 있음을 확인하였다. 본 연구 결과는 엘니뇨/라니냐 현상과 국내 적조 발생 간의 관계를 밝혀내고 있으며, 전 지구적인 이상 기후가 국내에 미치는 영향에 대한 기초자료를 제공할 것으로 기대된다.

후 기

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2023년)에 의하여 연구되었음.

References

- [1] Baek, S. H., Kim, D., Son, M., Yun, S. M. and Kim, Y. O., 2015, Seasonal distribution of phytoplankton assemblages and nutrient-enriched bioassays as indicators of nutrient limitation of phytoplankton growth in Gwangyang Bay, Korea, *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 163, 265-278.
- [2] Baek, S. H., Shimode, S., Shin, K., Han, M. S. and Kikuchi, T., 2009, Growth of dinoflagellates, *Ceratium furca* and *Ceratium fusus* in Sagami Bay, Japan: The role of vertical migration and cell division, *Harmful algae*, 8(6), 843-856.
- [3] Cha, E., Jhun, J. and Chung, H., 1999, A Study of Characteristics of Climate in South Korea for El Nino/La Nina Years, *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, 35(1), 98-117.
- [4] CMEMS(Copernicus Marine Service Information), Marine Data Store (MDS), <https://doi.org/10.48670/moi-00021> (accessed 2024.01.30.).
- [5] Garate-Lizarraga, I. and Beltrones, D. A. S., 1998, Time variation in phytoplankton assemblages in a subtropical lagoon system after the 1982-1983 "El Nino" event (1984 to 1986), *Pac. Sci.*, 52(1), 79-97.
- [6] Gonzalez-Lopez, I., 1994, Microalgas planctonicas como indicadores biologicas de "El Nino" en el Golfo de California, *Temas selectos sobre microalgas, Serie Cientifica, Universidad Autonoma de Baja California Sur, La Paz, Baja California Sur, No. Esp.*, 2(1), 1-16.
- [7] Huang, N. E., Shen, Z., Long, S. R., Wu, M. C., Shih, H. H., Zheng, Q., Yen, N. C., Tung, C. C. and Liu, H. H., 1998, The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis, in *proc. of the Royal Society of London, Series A: mathematical, physical and engineering sciences*, 454(1971), 903-995.
- [8] Kang, C. K., Kim, P. J., Lee, W. C. and Lee, P. Y., 1999, Nutrients and phytoplankton blooms in the southern coastal waters of Korea: I. The elemental composition of C, N, and P in particulate matter in the coastal bay systems, *Journal of the Korean society of oceanography*, 34(2), 86-94.
- [9] Kang, D., Cho, H. Y., Lee, T. K., Kim, S., Kang, H. K., Baek, S. H., Jung, S. W., L, S. J., Choi, J. Y., Cho, S. H., Moon, J. E., Choi, J. W., Kwon, Y. Y., Kim, M. R., Han, T. H., Lee, Y. W., Jang, S. I., Jo, H. K., Bang, Y. K., Kim, H. J., Lee, G. S., Kim, G., Kang, J., Kim, H. S., Lim, Y. K., Kim, K. E. and Lee, Y. H., 2020, Development and Demonstration of a Red Tide Detection and Prediction System for Minimizing Red Tide Damage: Final Report.
- [10] Kim, H.-J., 2015, Effects of dissolved nitrogen and phosphorus on the interspecific competition between harmful dinoflagellate *Cochlodinium polykrikoides* and diatom *Skeletonema* sp., M.S. thesis, Dept. Oceanogr., Pukyong National Univ., Busan, South Korea.
- [11] KMA (Korea Meteorological Administration), Automated Synoptic Observing System (ASOS), <https://data.kma.go.kr/cmnm/main.do>, 2023 (accessed 2023.08.07.).
- [12] Kwon, H. K., Kim, H. J., Yang, H. S. and Oh, S. J., 2014, The Importance of Dissolved Organic Nutrients on the Interspecific Competition between the Harmful Dinoflagellate *Cochlodinium polykrikoides* and the Diatom *Skeletonema* sp., *J. Korean Soc. Oceanogr.*, 19(4), 232-242.
- [13] Lee, D., 1998, The Relationship Between El Nino and La Nina and Temperature and Precipitation in Korea, *J. Korean Water Resour. Assoc.*, 31(6), 807-819.
- [14] Lee, M. S., Park, K. and Kim, G., 2023, Incidence of harmful algal blooms in pristine subtropical ocean: a satellite remote sensing approach (Jeju Island), *Front. Mar. Sci.*, 10, 1149657.
- [15] Lee, M. O., Choi, J. H. and Park, I. H., 2010, Outbreak conditions for *Cochlodinium polykrikoides* blooms in the southern coastal waters of Korea, *Mar. Environ. Res.*, 70(2), 227-238.
- [16] Lee, M. O. and Moon, J. H., 2008, Marine environments in the neighborhood of the Narodo as the first outbreak region of *Cochlodinium polykrikoides* blooms, *J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy*, 11(3), 113-123.
- [17] Lim, W., Go, W. J., Kim, K. Y. and Park, J. W., 2020, Variation in harmful algal blooms in Korean coastal waters since 1970, *J. Korean Soc. Mar. Environ. Saf.*, 26(5), 523-530.
- [18] Lim, Y. K., Baek, S. H., Lee, M., Kim, Y. O., Choi, K. H. and Kim, J. H., 2019, Phytoplankton composition associated with physical and chemical variables during summer in the southern sea of Korea: implication of the succession of the two toxic dinoflagellates *Cochlodinium* (aka *Margalefidinium*) *polykrikoides* and *Alexandrium affine*, *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, 516, 51-66.
- [19] Lim, Y. K., Park, B. S., Bak, S. H., Baek, S. S. and Baek, S. H., 2022, Potential inhibition of the harmful dinoflagellate *Cochlodinium* (= *Margalefidinium*) *polykrikoides* by the intrusion of Changjiang diluted water into Korea coastal waters, *Ecol. Indic.*, 139, 108924.

- [20] Lim, Y. K., Park, B. S., Kim, J. H., Baek, S. S. and Baek, S. H., 2021, Effect of marine heatwaves on bloom formation of the harmful dinoflagellate *Cochlodinium polykrikoides*: Two sides of the same coin?, *Harmful Algae*, 104, 102029.
- [21] Lundberg, S. M. and Lee, S. I., 2017, A unified approach to interpreting model predictions, *Adv. Neural Inf. Process. Syst.*, 30.
- [22] Mee, L. D., Ramirez-Flores, A., Flores-Verdugo, F. and Gonzalez-Frias, F., 1985, Coastal upwelling and fertility of the Southern Gulf of California: Impact of the 1982–83 ENSO event, *Trop. Ocean Atmos. Newsl.*, 31, 9-10.
- [23] NIER (National Institute of Environmental Research), Water Environment Information System, <https://water.nier.go.kr/>, 2023 (accessed 2023.08.12.).
- [24] NIFS (National Fisheries Research and Development Institute), Korea Maritime Data Center, https://www.nifs.go.kr/kodc/soo_list.kodc, 2023a (accessed 2023.08.09.).
- [25] NIFS (National Fisheries Research and Development Institute), Red Tide Information System, <https://www.nifs.go.kr/red/main.red>, 2023b (accessed 2023.07.20.).
- [26] PSL (NOAA Physical Sciences Laboratory), Multivariate ENSO Index Version 2 (MEI.v2), <https://psl.noaa.gov/enso/mei/>, 2023a (accessed 2023.08.03.).
- [27] PSL (NOAA Physical Sciences Laboratory), NOAA OI SST V2 High Resolution Dataset, <https://www.psl.noaa.gov/data/gridded/data.noaa.oisst.v2.highres.html>, 2023b (accessed 2023.08.05.).
- [28] Smith, P. E., 1985, A case history of an anti-El Nino to El Nino transition on plankton and nekton distribution and abundances, El Nino north: Nino effects in the eastern subarctic Pacific Ocean, 121-142.
- [29] Watanabe, M., Kohata, K. and Kimura, T., 1991, Diel vertical migration and nocturnal uptake of nutrients by *Chattonella antiqua* under stable stratification, *Limnol. Oceanogr.*, 36(3), 593-602.
- [30] Wells, M. L., Trainer, V. L., Smayda, T. J., Karlson, B. S., Trick, C. G., Kudela, R. M., Ishikawa, A., Bernard, S., Wulff, A., Anderson, D. M. and Cochlan, W. P., 2015, Harmful algal blooms and climate change: Learning from the past and present to forecast the future, *Harmful algae*, 49, 68-93.
- [31] Yin, K., Harrison, P. J., Chen, J., Huang, W. and Qian, P. Y., 1999, Red tides during spring 1998 in Hong Kong: is El Nino responsible?, *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 187, 289-294.

Received 10 October 2023

1st Revised 23 January 2024, 2nd Revised 5 March 2024

Accepted 11 March 2024