

동해 식물플랑크톤 군집에 대한 초미소 식물플랑크톤($< 2 \mu\text{m}$) 기여도 장기 경향성 연구

장효근* · 이다빈** · 이상현****

*, ** 부산대학교 해양연구소 연수연구원, *** 부산대학교 해양학과 교수

Long-Term Trend of Picophytoplankton Contribution to the Phytoplankton Community in the East Sea

Hyo Keun Jang* · Dabin Lee** · Sang Heon Lee****

*, ** Postdoctoral researcher, Marine Research Institute, Pusan National University, Busan 46241, Korea

*** Professor, Department of Oceanography and Marine Research Institute, Pusan National University, Busan 46241, Korea

요 약 : 본 연구는 2003년부터 2022년까지 동해 남서부 해역에서 초미소($0.2-2 \mu\text{m}$) 식물플랑크톤의 군집, 표층 수온 상승, 그리고 무기 영양염 간의 복잡한 상호작용을 다루었다. 동해에서 관측된 표층 수온의 상승 추세는 전 지구규모의 수온 상승과 일치하며, 여름에는 최대 온도가 나타나지만 봄에는 최소 온도를 보여 일반적인 온대해역의 계절적 수온 변동과는 다른 양상을 보였다. 표층 무기 영양염의 농도는 겨울에 증가하며 봄을 거치면서 서서히 감소하는 계절적 변동성을 나타냈다. 식물플랑크톤의 생물량을 대표하는 표층 총 chlorophyll-*a* 농도는 온대 해역의 전형적인 쌍봉분포(bimodal distribution) 양상을 보였다. 연구 기간 동안 초미소 식물플랑크톤의 기여도는 연평균 0.5%씩 지속적으로 증가하였으나, 총 chlorophyll-*a* 농도는 약한 감소 추세를 보였다. 초미소 식물플랑크톤의 기여도와 영양염 간에는 강한 상관관계가 나타났으며, 이는 이러한 변동이 식물플랑크톤의 크기별 영양염의 가용성과 밀접하게 연관되어 있음을 의미한다. 이러한 분석 결과는 해양 생태계의 변화 조건에서 식물플랑크톤이 어떻게 반응할는지 예측 가능하게 하므로, 생태학적으로 중요한 의미를 갖는다.

핵심용어 : 동해, 영양염, 식물플랑크톤, Chlorophyll-*a* concentration, 초미소 식물플랑크톤

Abstract : In this study, we unveil the intricate interplay among picophytoplankton ($0.2-2 \mu\text{m}$) communities, warming surface water temperatures, and major inorganic nutrients within the southwestern East Sea from 2003-2022. The observed surface temperature rise, reflecting global climate trends, defies conventional seasonal patterns in temperate seas, with highest temperatures in summer and lowest in spring. Concurrently, concentrations of major dissolved inorganic nutrient display distinct seasonality, with peaks in winter and gradually declining thereafter during spring. The time course of chlorophyll-*a* concentrations, a proxy for phytoplankton biomass, reveals a typical bimodal pattern for temperate seas. Notably, contributions from picophytoplankton exhibited a steady annual increase of approximately 0.5% over the study period, although the total chlorophyll-*a* concentrations declined slightly. The strong correlations between picophytoplankton contributions and inorganic nutrient concentrations is noteworthy, highlighting their competitively advantageous responsiveness to the shifting nutrient regime. These findings reflect significant ecological implications for the scientific insights into the marine ecosystem responses to changing climate conditions.

Key Words : East Sea, Nutrients, Phytoplankton, Chlorophyll-*a* concentration, Picophytoplankton

* First Author : janghk@pusan.ac.kr, 051-510-3931

† Corresponding Author : sanglee@pusan.ac.kr, 051-510-2256

1. 서론

해양에서 식물플랑크톤은 다양한 군집을 형성하며, 이 군집들은 광합성 효율을 조절하여 유기물을 상위 영양단계로 전달하고 탄소를 심층으로 전달하는 등의 일차생산(primary production) 및 생지화학적 과정(biogeochemical process)에 큰 영향을 미친다(Guidi et al., 2009; Uitz et al., 2010; Agustí et al., 2015; Tréguer et al., 2018; Cavan et al., 2019; Zhuang et al., 2021). 특히, 최근 연구들은 총 일차생산 및 생물 탄소 펌프(biological carbon pump)에 기여하는 2 μm 미만의 초미소 식물플랑크톤(picophytoplankton)의 중요성을 강조하고 있다(Lee et al., 2017; Lim et al., 2019; Lee et al., 2021; Zhuang et al., 2021).

일반적으로 수층의 강한 성층으로 인해 영양염이 고갈된 빈영양 수괴에서 우점하는 초미소 식물플랑크톤은 총 일차생산에 부정적인 영향을 미친다(Maraóń et al., 2007; Uitz et al., 2008; Huete-Ortega et al., 2011). 반면, 빛과 영양염이 풍부한 조건에서 우점하는 큰(> 2 μm) 식물플랑크톤은 일차생산의 주요한 기여를 한다(Azam et al., 1983; Richardson and Jackson, 2007; Tréguer et al., 2018). 그러나, 초미소 식물플랑크톤은 전 세계 해역에 걸쳐 널리 분포하고 있으며, 다양한 해양 생태계에서 생물량 및 일차생산에 상당 부분 기여하고 있다(Agawin et al., 2000; Morán et al., 2010; Li et al., 2009; Lee et al., 2012; Lee et al., 2013; Lee et al., 2015). 이전 연구들은 해양의 환경변화(온난화 및 성층화 등)가 식물플랑크톤의 군집 구성을 크기가 작은 식물플랑크톤이 우점하는 구성으로 변화시킬 수 있음을 제시하였으며(Li et al., 2009; Lee et al., 2019a), 이러한 조건 하에서 식물플랑크톤 군집의 평균 크기의 감소를 예측하였다(Daufresne et al., 2009; Li et al., 2009). 이에 따라, 해양의 온난화 및 성층화로 인해 초미소 식물플랑크톤은 해양 생태계 내에서 더욱 중요해질 수 있으며, 식물플랑크톤 군집의 총 생물량과 일차생산에 높은 기여 가능성이 예상된다(Li et al., 2009; Morán et al., 2010; Lee et al., 2013). 이러한 이유로 초미소 식물플랑크톤의 총 생물량과 일차생산에 대한 기여에 관한 연구는 해양 생태계 변화를 감지하기 위한 주요 지표로 활용될 수 있다(Li et al., 2010; Morán et al., 2010).

동해는 최근 많은 환경 변화가 나타나고 있으며, 이로 인해 다양한 물리적·생물학적 특성의 변화가 관측되고 있다(Kim et al., 2001; Kang et al., 2003; Joo et al., 2014, 2017; Lee et al., 2014). 특히, 지난 수십년 동안 동해에서는 전 세계적인 온난화 추세보다 빠른 해수면 온도의 상승이 관측되었다(Kim et al., 2001; Kang et al., 2003; Lee and Park,

2019). 기후와 관련된 동해의 물리적 환경의 변화는 낮은 영양 단계 생물의 변동(계절적 생물량 및 군집 구조의 변화 등)을 유발할 수 있으며, 이는 상위 영양 단계의 생물 및 어업 자원에 잠재적인 영향을 미칠 수 있다(Chiba et al., 2012; Zhang et al., 2004; Lee et al., 2022). 실제로 동해에서 하위 생태계 수준에서의 생물학적 변화가 보고되고 있다(Joo et al., 2014; Lee et al., 2014; Lee et al., 2017; Kang et al., 2020). 예를 들어, 최근 동해 울릉 분지에서는 식물플랑크톤의 연간 일차생산량의 지속적인 감소가 관측되었다(Joo et al., 2015; Kang et al., 2020). 따라서, 동해의 지속적인 환경 변화가 해양 생태계에 미치는 잠재적인 영향을 고려할 때, 초미소 식물플랑크톤의 계절적 변동 및 장기적 추세에 대한 연구는 필요하다.

동해에서는 식물플랑크톤의 총 생물량 및 일차생산에 대한 초미소 식물플랑크톤의 기여도에 관한 몇몇 연구가 이루어졌다. 그러나 이러한 연구들은 주로 현장 관측에 기반을 두었기 때문에(Lee et al., 2017; Kang et al., 2020), 초미소 식물플랑크톤 기여도의 계절적인 변동성을 이해하기 위한 정보는 여전히 부족하다. 높은 시·공간적인 해상도를 지닌 위성 원격 탐사 자료는 식물플랑크톤에 의한 해수 상층의 광학적 특성을 종합적으로 파악할 수 있다(Son et al., 2005; Joo et al., 2017; Lee et al., 2019b). 또한, 위성 해색 자료로부터 식물플랑크톤의 기능 및 크기 별 조성을 도출하기 위한 여러 알고리즘들이 개발되고 있다. 이러한 알고리즘을 통해 식물플랑크톤 군집의 시·공간적 변동이 전 지구적인 탄소 순환 및 기후 변화에 미칠 수 있는 영향에 대한 조사가 가능해졌다(Bracher et al., 2017; Lee et al., 2019b). 따라서 본 연구는 해색 위성 자료를 활용하여 동해에서 총 식물플랑크톤에 대한 초미소 식물플랑크톤의 기여도를 도출하고, 이러한 기여도의 장기적 변동성을 분석하여 향후 동해 생태계에 잠재적으로 미칠 수 있는 영향을 탐구하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 표층 수온 및 무기 영양염

동해 남서부 해역에서 장기간의 물리, 화학적 환경변동을 파악하기 위하여 국립수산물과학원 한국해양자료센터(https://www.nifs.go.kr/kodc/soo_list.kodc)에서 제공하는 정선해양 관측 자료를 활용하였다(Fig. 1). 정선해양 관측자료는 1961년부터 현재까지 매년 격월(연 6회; 2, 4, 8, 10, 12월) 조사를 통해 자료를 축적하고 있으며(Han et al., 2013), 본 연구에서는 2003년부터 2022년까지(영양염은 2021년까지 활용) 20년간의 자료를 이용하였다. 표층 수온 및 영양염(질산염; NO_3^- , 인산염;

동해 식물플랑크톤 군집에 대한 초미소 식물플랑크톤($< 2 \mu\text{m}$) 기여도 장기 경향성 연구

PO_4^{3-} , 규산염; $\text{Si}(\text{OH})_4$ 자료는 동해의 남서부 연안, 외양을 포함하는 102-108 line과 208-209 line의 관측자료를 월평균 하였다(Fig. 1).

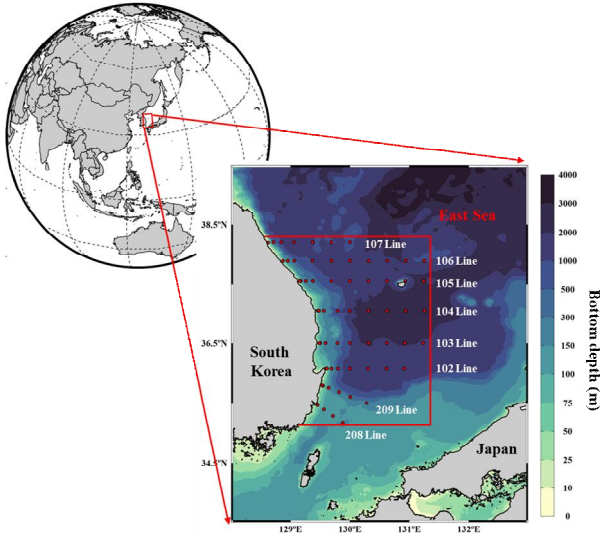


Fig. 1. Field measurement stations in the East Sea from 2012 to 2022. Solid red line indicates the domain for the study area.

2.1 현장 chlorophyll-*a* 농도 측정

해색 위성의 chlorophyll-*a* 농도 검정을 위한 현장관측 표층 chlorophyll-*a* 농도는 2018년부터 2022년까지 국립수산물학원 해양조사선 탐구 3호에 승선하여 19번(2, 4, 8, 10월; 2021년 8월 자료 제외)의 계절별 조사를 통해 획득하였다. chlorophyll-*a* 농도를 결정하는 분석 방법과 계산은 Parsons et al.(1984)이 제시한 방법을 따라 수행되었다. 표층 chlorophyll-*a* 농도를 측정하기 위해 0.1-0.4 L의 해수 샘플을 Whatman GF/F 필터지(지름 25 mm)를 통해 여과하였다. 여과가 완료된 필터지는 15 mL conical tube에 담아 -20°C 냉동고에 보관 후 실험실에서 90% 아세톤을 이용하여 20-24시간 동안 냉암소(4°C)에서 chlorophyll-*a*를 추출하였다. 이후 표준 chlorophyll-*a*를 통해 교정된 형광분광광도계(Turner Designs, 10-AU, San Jose, CA, USA)를 사용하여 농도를 측정하였다.

2.3 위성 자료

동해 남서부 해역에서 장기간의 식물플랑크톤의 표층 chlorophyll-*a* 총 농도 및 초미소($0.2-2 \mu\text{m}$) 식물플랑크톤의 chlorophyll-*a* 농도를 파악하기 위하여 Copernicus Marine Environmental Monitoring Service (CMEMS; <https://marine.copernicus.eu/>)에서 제공하는 $4 \text{ km} \times 4 \text{ km}$ 해상도의 GlobColour-merged

ocean color products를 사용하였다. 총 chlorophyll-*a* 농도에 대한 초미소 식물플랑크톤의 기여도(%)는 초미소 식물플랑크톤의 chlorophyll-*a* 농도를 총 chlorophyll-*a* 농도로 나누어 준 값으로 산출하였다. 2003-2022년의 월별 자료를 활용하였으며, Fig. 1에 제시된 동해의 남서부 해역($128.5-131.4^\circ\text{E}$, $35.1-35.1^\circ\text{N}$)의 값을 평균하였다.

2.4 통계 분석

환경인자(수온 및 영양염)와 초미소 식물플랑크톤의 관계성을 파악하기 위해, 본 연구에서는 R(version 4.3.0; R Core Team 2023) 프로그램의 “stats” package에 포함된 “lm” 함수를 통해 선형회귀분석(Linear regression analysis)을 실시하였다. 또한, *p*-value가 0.05보다 작은 통계적 값을 유의미한 결과로 간주하였다.

3. 결과

3.1 표층 수온 및 영양염의 장기변동

2003년부터 2022년까지 동해 남서부 해역에서 측정된 표층 수온은 Fig. 2와 같이 나타났다. 연구 기간 동안 표층 수온은 $9.7-27.3^\circ\text{C}$ 의 범위를 가지며, 평균 $17.3 \pm 4.9^\circ\text{C}$ 로 나타났다. 여름(6, 8월)에는 표층 수온이 $16.1-27.3^\circ\text{C}$ (평균 \pm 표준편차 = $22.0 \pm 3.1^\circ\text{C}$)로, 네 계절 중 가장 높게 나타났지만, 봄(4월)의 표층 수온이 $11.7-16.8^\circ\text{C}$ ($13.1 \pm 2.4^\circ\text{C}$)로 가장 낮았다. 이는 일반적인 온대해역에서 겨울에 최저, 여름에 최고의 수온이 나타나는 전형적인 특징과는 다소 차이가 있었다. 또한, 2003년부터 2022년까지 동해의 수온은 점차 상승하는 경향($y = 0.08x - 150.2$)을 보였으며, 연간 평균 약 0.06°C 의 수온이 상승하였다.

동해 남서부 해역의 표층 주요 용존유기영양염의 변동성을 Fig. 3과 같이 나타냈다. 연구기간 동안 표층 질산염, 인산염 및 규산염은 각각 $0.2-13.7$, $0.01-1.0$ 및 $1.2-12.8 \mu\text{M}$ 의 범위를 보였으며, 이들의 평균 농도는 3.8 ± 3.1 , 0.2 ± 0.2 및 $5.5 \pm 2.5 \mu\text{M}$ 로 나타났다. 질산염 및 인산염은 겨울(6.9 ± 2.6 및 $0.4 \pm 0.1 \mu\text{M}$)에 가장 높은 농도를 보였으며, 여름(1.8 ± 2.1 및 $0.1 \pm 0.1 \mu\text{M}$)까지 점진적으로 감소하다 다시 가을(10월; 2.2 ± 1.5 및 $0.2 \pm 0.2 \mu\text{M}$)에 소폭 증가하는 계절적인 특징을 나타냈다. 반면, 규산염의 농도는 겨울($8.2 \pm 1.7 \mu\text{M}$)부터 가을($3.5 \pm 1.3 \mu\text{M}$)까지 지속적으로 감소하는 경향을 보였다. 2003년부터 2022년까지 동해의 표층 용존 무기 영양염의 농도는 표층 수온과는 달리 모두 지속적으로 감소하는 경향을 보였다(Fig. 3a).

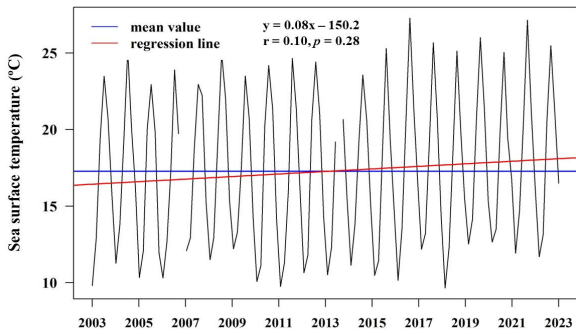


Fig. 2. Time-series of bimonthly mean sea surface temperature in the southwestern East Sea from 2003 to 2022. Solid blue and red lines represent mean value and regression line, respectively.

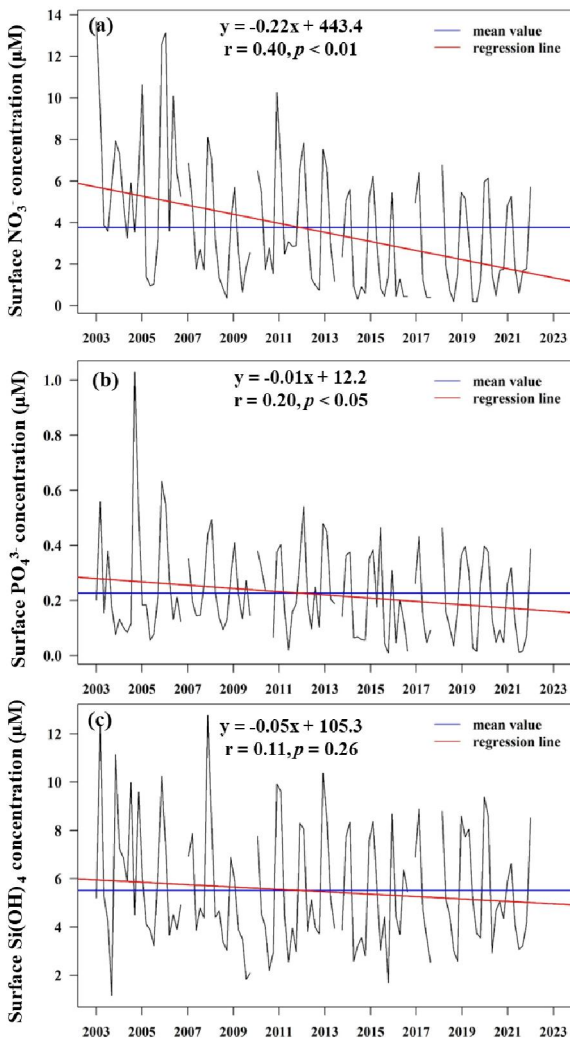


Fig. 3. Time-series of bimonthly mean nitrate (a), phosphate (b), and silicate (c) concentrations in the southwestern East Sea from 2003 to 2021. Solid blue and red lines represent mean value and regression line, respectively.

3.2 표층 chlorophyll-a 농도 및 초미소 식물플랑크톤 기여도의 장기변동

2003년부터 2022년까지 동해 남서부 해역에서의 표층 chlorophyll-a 농도는 $0.2\sim 1.9 \mu\text{g L}^{-1}$ 의 범위를 보였으며, 평균 $0.6\pm 0.3 \mu\text{g L}^{-1}$ 로 나타났다(Fig. 4). 겨울(12, 1, 2월) 및 여름(6, 7, 8월)에는 낮은 chlorophyll-a 농도(0.4 ± 0.1 및 $0.4\pm 0.1 \mu\text{g L}^{-1}$)가 관측되었으며, 식물플랑크톤의 대변성이 나타나는 봄(3, 4, 5월)에는 최대 농도($1.0\pm 0.3 \mu\text{g L}^{-1}$)가, 가을(9, 10, 11월)에는 그 다음으로 높은 chlorophyll-a 농도($0.7\pm 0.2 \mu\text{g L}^{-1}$)가 관측되었다. 2003년부터 2022년까지 동해의 표층 chlorophyll-a 농도는 점차 감소하는 경향($y = -0.004x + 0.78$)을 보였으나, 연간 감소율은 $-0.004 \mu\text{g L}^{-1}$ 로 크게 변동하지 않았다. 또한, 해색 위성 기반의 표층 chlorophyll-a 농도는 2018년부터 2022년까지 현장에서 관측한 값들과 강한 양의 상관관계($r = 0.82, p < 0.01$)를 보였기 때문에(Fig. 5), 본 연구에서의 chlorophyll-a 농도 결과는 계절적 및 장기적인 실제 변동성을 효과적으로 반영했을 것으로 판단된다.

2003년부터 2022년까지 총 chlorophyll-a 농도에 대한 초미소($< 2 \mu\text{m}$) 식물플랑크톤의 기여도는 13.1~78.0%로 나타났으며, 평균 $41.7\pm 14.9\%$ 로 나타났다(Fig. 5). 연구기간 동안 초미소 식물플랑크톤은 봄에 최소의 기여도($28.0\pm 7.9\%$)를 보였지만, 여름에 최대의 기여도($59.7\pm 8.4\%$)가 나타났다. 초미소 식물플랑크톤의 기여도는 2003년부터 2022년까지 점진적으로 증가($y = 0.59x - 1152.43$)하였으며, 연간 평균 약 0.5%의 기여도 증가가 관측되었다. 또한, 이러한 초미소 식물플랑크톤의 기여도는 질산염($r = 0.51, p < 0.01$), 인산염($r = 0.43, p < 0.01$) 및 규산염($r = 0.38, p < 0.01$)과는 강한 음의 상관관계를 나타냈다(Fig. 7a-c). 반면, 수온과는 강한 양의 상관관계($r = 0.88, p < 0.01$)를 나타냈다(Fig. 7d).

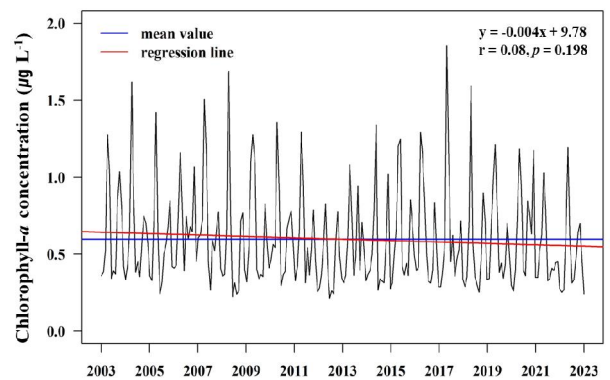


Fig. 4. Time-series of monthly mean values of surface chlorophyll-a concentration in the southwestern East Sea from 2003 to 2022. Solid blue and red lines represent mean value and regression line, respectively.

동해 식물플랑크톤 군집에 대한 초미소 식물플랑크톤($< 2 \mu\text{m}$) 기여도 장기 경향성 연구

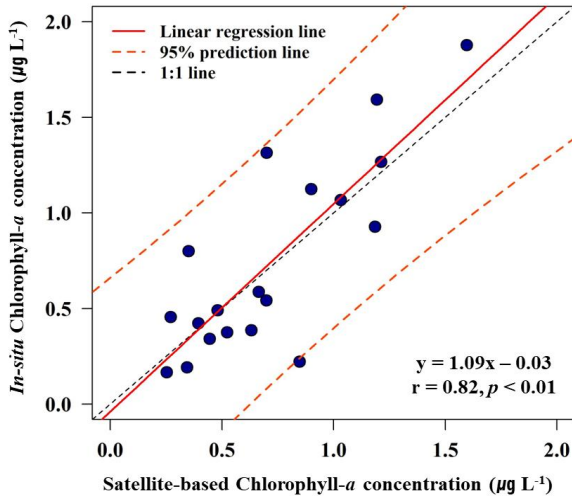


Fig. 5. The linear relationship between field-measured and satellite-based chlorophyll-*a* concentration. Solid red line represents the linear regression line. Dashed black and orange lines represent 1:1 and 95% prediction line, respectively.

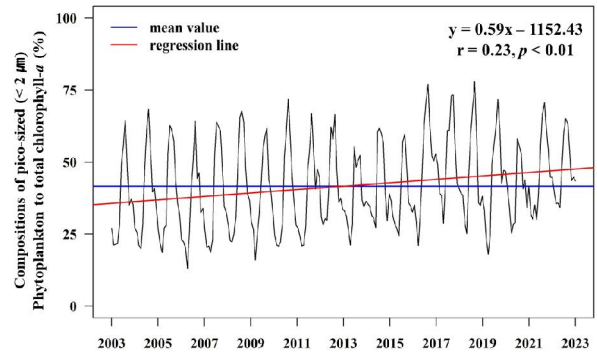


Fig. 6. Time-series of monthly mean contribution of pico-sized ($< 2 \mu\text{m}$) phytoplankton to total chlorophyll-*a* concentration in the southwestern East Sea from 2003 to 2022. Solid blue and red lines represent mean value and regression line, respectively.

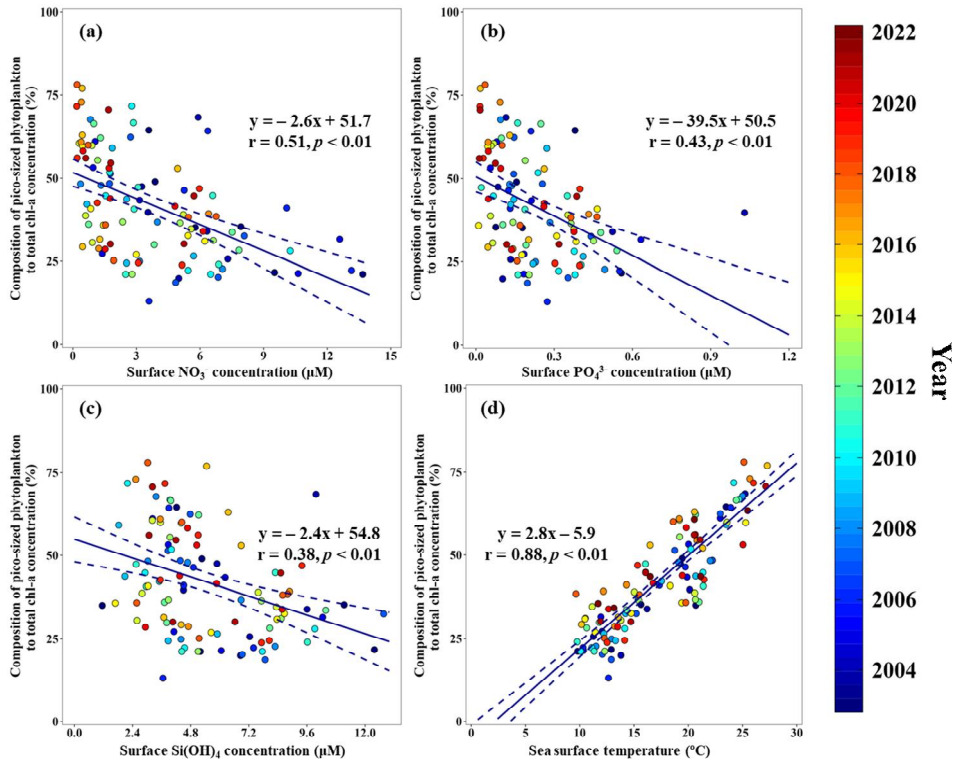


Fig. 7. The linear relationships between contribution of pico-sized ($< 2 \mu\text{m}$) phytoplankton and nitrate (a), phosphate (b), and silicate (c) concentrations and sea surface temperature (d). Solid and dashed lines represent regression and 95% interval line, respectively.

4. 고찰

4.1 표층 수온 및 영양염의 장기변동

연구 기간 동안 동해의 남서부 해역에서 관측된 지속적인 수온 상승(Fig. 2)은 전 세계적인 기후 변화의 경향과 부합하며, 이는 동해의 생태계 변화에 대한 연쇄적인 영향을 발생시킬 수 있다. 식물플랑크톤의 경우, 이전 연구들에서 표층 수온 상승이 식물플랑크톤 크기별 군집 조성 변화에 미치는 영향을 잘 보여주고 있다(Morán et al., 2010; Lee et al., 2019a).

질산염, 인산염 및 규산염을 포함하는 주요 무기 영양염은 식물플랑크톤의 성장에 필수적 요소이다(Paytan and McLaughlin, 2007; Struyf et al., 2009). 질산염과 인산염은 식물플랑크톤이 체내에 단백질을 합성하고 에너지를 전달하는데 중요한 역할을 하며, 규산염은 규조류(diatoms)의 세포벽 형성 과정의 핵심적 요소이다(Hildebrand et al., 2006). 또한, 이러한 영양염의 가용성은 식물플랑크톤 군집의 조성과 일차생산에 큰 영향을 미친다(Dortch et al., 2001; Klais et al., 2011; Rattan, 2017). 연구 기간 동안 관측된 질산염 및 인산염의 계절적 변동성(Fig. 3)은 대부분의 광합성이 일어나는 유광층으로 외부에서의 영양염 유입과 생물학적 과정간의 복잡한 상호작용을 반영한다. 반면, 규조류의 성장에 필수적 요소인 인산염 농도의 겨울부터 가을까지 지속적인 감소 추세는 규조류가 우점적인 생태계에서 비규조류가 우점적인 생태계로의 변동을 의미한다(Jin et al., 2013; Liang et al., 2019). 연구 기간 동안 동해의 표층 수온과 표층 영양염의 장기변동 간에 정반대의 경향이 나타났으며(Fig. 2 and 3), 질산염의 경우 다른 영양염보다 더 두드러지는 변동이 관측되었다(Fig. 3). 이는 동해 내에서 변화하는 환경조건, 특히 수온과 같은 변동 요인이 영양염 순환에 잠재적인 변화를 불러올 수 있음을 의미한다. 특히, 표층 수온 상승으로 인한 수직적인 성층화의 강화는 심층 영양염의 혼합을 제한한다(Lee et al., 2022).

4.2 표층 chlorophyll-a 농도 및 초미소 식물플랑크톤 기여도의 장기 변동

동해 남서부 해역의 표층 총 chlorophyll-a 농도의 장기 변동성은 식물플랑크톤 군집의 복잡한 변동성과 이들의 생태적 중요성을 이해하는 데에 중요한 단서를 제공할 수 있다. 연구 기간 동안 관측된 표층 chlorophyll-a 농도 범위($0.2-1.9 \mu\text{g L}^{-1}$)는 동해 남서부 해역 식물플랑크톤 생물량의 뚜렷한 변동성을 나타냈다(Fig. 4). 시기별로 관측된 chlorophyll-a 농도의 변화는 일반적인 온대 해역에서 관측되는 쌍봉분포(Bimodal distribution)의 계절적 변동성과 일치했다(Yamada et

al., 2004; Lee et al., 2014; Wang and Gao, 2020).

연구 기간 동안, 초미소 식물플랑크톤의 기여도는 특징적인 계절적 변동성을 보여주었다. 봄철의 최소 기여도($28.0 \pm 7.9\%$)는 높은 chlorophyll-a 농도와 일치하며, 여름의 최대 기여도($59.7 \pm 8.4\%$)는 낮은 chlorophyll-a 농도와 대응했다(Fig. 4 and 6). 본 연구에서는 동해 남서부 해역에서 관측된 초미소 식물플랑크톤의 평균 기여도의 수준을 비교하기 위해 다양한 해역에서 관측된 초미소 식물의 기여도를 Table 1에 나타냈다. 이 연구에서 관측된 초미소 식물플랑크톤의 연간 기여도(42%)는 이전 동해에서 보고된 범위(23~56%)에 포함됐다. 여름에 높은 기여도를 나타내는 초미소 식물플랑크톤의 최고 기여도를 제외하면, 본 연구에서의 기여도는 이전 연구 결과와 일치했다. 그러나, Uitz et al.(2010)이 보고한 전 지구적인 초미소 식물플랑크톤의 기여도보다 동해의 기여도가 상대적으로 높게 나타났다. 동해와 유사한 환경 조건을 가진 지중해에서 현장 관측을 통해 측정된 초미소 식물플랑크톤 기여도는 31-92%의 범위를 보였으며(Magazzu and Decembrini, 1995), 1998년부터 2007년까지의 위성에 기반한 결과는 약 33%의 기여도를 나타냈다(Uitz et al., 2012).

본 연구기간 동안 동해에서 관측된 초미소 식물플랑크톤 기여도의 증가(Fig. 6)는 다양한 크기의 식물플랑크톤 간 상대적인 조성의 변화를 의미한다. 연간 약 0.5%씩 증가하는 이러한 변화는 영양염의 가용성 변동과 연관이 있을 것으로 판단된다. 실제로 본 연구에서는 초미소 식물플랑크톤과 모든 영양염 간에 강한 음의 상관관계가 확인되었으며(Fig. 7a-c), 이는 동해에서 초미소 식물플랑크톤의 증가가 영양염의 감소와 밀접하게 연관되어 있음을 의미한다. 일반적으로, 표층 수온의 증가로 인해 강화된 해수의 수직적 성층화는 심층에서 표층으로 전달되는 영양염을 제한하는 경향을 보인다(Lee et al., 2022). 이로 인해 표층으로의 영양염 공급이 장기간에 걸쳐 제한될수록, 특히 큰 식물플랑크톤의 성장에 부정적인 영향을 미치게 된다(Agawin et al., 2000). 한편, 초미소 식물플랑크톤은 큰 식물플랑크톤에 비해 영양염을 효율적으로 이용할 수 있는 특성을 지닌다고 알려져 있어, 일반적으로 빈영양 환경에서 주로 우세한 경향을 보인다(Agawin et al., 2000). 실제로, 연구 기간 동안 동해의 남서부 해역에서의 표층 수온은 초미소 식물플랑크톤의 기여도에 강한 영향을 미치는 것으로 나타났다(Fig. 7d). 이와 유사하게, 몇몇 이전 연구들은 동해의 식물플랑크톤 군집과 관련하여 큰 규조류의 기여도가 이전 연구 결과에 비해 낮게 관측되고 있다고 보고하였다(Park et al., 2022). 이와 같은 식물플랑크톤 군집 크기의 변화는 해양의 Food web의 구조를 변화시킬 수 있다. 일반적으로 상위 영양 단계의 생물은 특정 크기의 먹이를 선호하므로, 식물플랑크톤 군집 크기의 변화는 동물플

동해 식물플랑크톤 군집에 대한 초미소 식물플랑크톤(< 2 μm) 기여도 장기 경향성 연구

Table 1. Pico-sized (< 2 μm) phytoplankton contribution to total chlorophyll-*a* concentration at various regions

Region	Note	Year	Season	Method	Pico-sized phytoplankton contribution(%)	Reference
Global Ocean		1998-2007	Whole season	Satellite	24	Uitz et al. (2010)
Mediterranean Sea	Whole region	1998-2007	Whole season	Satellite	33	Uitz et al. (2012)
			Whole season	<i>In-situ</i>	31-92	Magazzu and Decembrini (1995)
East Sea	Japan Basin	2010	Summer	<i>In-situ</i>	56	Kwak et al. (2013)
	Yamato Basin				56	
	Ulleung Basin				38	
	Ulleung Basin	2003-2012	Whole season		23	Joo et al. (2017)
	Southwestern part	2014	Spring, Summer, Fall	<i>In-situ</i>	34	Jo et al. (2017)
	Northern part	2012	Fall	<i>In-situ</i>	49	Kang et al. (2017)
		2015	Spring		34	
	Southwestern part	2015	Spring, Summer, Fall	<i>In-situ</i>	40	Jo et al. (2018)
	Ulleung Basin	2016	Spring	<i>In-situ</i>	56	Kang et al. (2020)
	Northwestern part				49	
	Southwestern part	2018	Whole Season	<i>In-situ</i>	46	Jang et al. (2021)
	Southwestern part	2018-2020	Whole Season	<i>In-situ</i>	46	Park et al. (2022)
	Ulsan seaport (Coastal region)	2007-2009	Whole Season	<i>In-situ</i>	22-38	Kwon and Kang (2013)
	Southwestern part	2003-2022	Winter	Satellite	33±7	This study
			Spring		28±8	
Summer			60±8			
Fall			46±10			
Whole Season			42±15			

랑크톤 군집의 구성을 변화시킬 수 있으며, 결과적으로 어업 자원에도 영향을 미치게 된다(Parsons, 1967; Hansen et al., 1994; Irigoien et al., 2003). 뿐만 아니라, 일차생산과 관련된 여러 선행 연구들은 다양한 해역에서 초미소 식물플랑크톤의 기여도가 증가할수록 총 일차생산이 감소하는 결과들을 제시하였다(Joo et al., 2017; Lee et al., 2017; Jang et al., 2018; Lim et al., 2019; Kang et al., 2020; Lee et al., 2022; Lee et al., 2023). 이러한 관계는 동해에서 초미소 식물플랑크톤의 증가로 인해 일차생산이 감소할 수 있는 중요한 생태학적 의미를 갖는다. 또한 식물플랑크톤의 일차생산과 어업생산량은 강한 연관성을 가지고 있으므로(Chassot et al., 2007; Friedland et al., 2012), 초미소 식물플랑크톤의 증가로 인한 일차생산 감소는 동해의 어업생산에 부정적인 영향을 미칠 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구는 위성을 통해 관측한 초미소 식물플랑크톤 기여도의 장기적인 변동을 통해 동해 남서부 해역의 식물플랑크톤의 크기별 군집 변화를 종합적으로 분석했다. 본 연구에서 장기적인 추세와 상관관계 분석을 통해 수온, 영양염, 및 식물플랑크톤 반응 간의 밀접한 연관성을 확인했다. 이러한 연구결과는 해양 생태계의 생산성과 생태적 균형 조절에 중요한 역할을 할 것으로 예측된다. 다양한 해역에서 식물플랑크톤 군집의 평균 크기 변화가 지속적으로 보고되는 만큼, 초미소 식물플랑크톤의 기여도를 지속적으로 모니터링 하는 것이 동해의 생지화학적 과정과 생태계 변화를 이해하는 데 필수적이다. 따라서, 초미소 식물플랑크톤 기여도의 증가와 관련한 생태계의 잠재적 반응을 심층적으로 연구함

으로써 향후 동해 해양 생태계 변화의 방향성에 대한 중요한 정보를 도출할 수 있을 것이다.

사 사

이 논문은 2021년도 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(20210046, 천리안 2B호 산출물 정확도 향상 연구).

References

- [1] Agawin, N. S., C. M. Duarte, and S. Agustí(2000), Nutrient and temperature control of the contribution of picoplankton to phytoplankton biomass and production, *Limnol. Oceanogr.*, Vol 45, No. 3, pp. 591-600.
- [2] Agustí, S., J. I. González-Gordillo, D. Vaqué, M. Estrada, M. I. Cerezo, G. Salazar, J. M. Gasol, and C. M. Duarte(2015), Ubiquitous healthy diatoms in the deep sea confirm deep carbon injection by the biological pump, *Nat. Commun.*, Vol. 6, No. 3, pp. 7608.
- [3] Azam, F., T. Fenchel, J. G. Field, J. S. Gray, L. A., Meyer-Reil, and F. Thingstad(1983), The ecological role of water-column microbes in the sea, *Marine ecology progress series. Oldendorf*, Vol. 10, No. 3, pp. 257-263.
- [4] Bracher, A., H. A. Bouman, R. J. Brewin, A. Bricaud, V. Brotas, A. M. Ciotti, L. Clementson, E. Devred, A. D. Cicco, S. Dutkiewicz, N. J. Hardman-Mountford, A. E. Hickman, M. Hieronymi, T. Hirata, S. N. Losa, C. B. Mouw, E. Organelli, D. E. Raitsos, J. Uitz, M. Vogt, and A. Wolanin(2017), Obtaining phytoplankton diversity from ocean color: a scientific roadmap for future development. *Front. Mar. Sci.*, Vol. 4, pp. 55.
- [5] Cavan, E. L., E. C. Laurenceau-Cornec, M. Bressac, and P. W. Boyd(2019), Exploring the ecology of the mesopelagic biological pump. *Progress in Oceanography*, Vol. 176, 102125.
- [6] Chassot, E., F. Mélin, O. Le Pape, and D. Gascuel(2007), Bottom-up control regulates fisheries production at the scale of eco-regions in European seas. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, Vol. 343, pp. 45-55.
- [7] Chiba, S., S. Batten, K. Sasaoka, Y. Sasai, and H. Sugisaki(2012), Influence of the Pacific Decadal Oscillation on phytoplankton phenology and community structure in the western North Pacific. *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 39, No. 15.
- [8] Daufresne, M., K. Lengfellner, and U. Sommer(2009), Global warming benefits the small in aquatic ecosystems. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Vol. 106, No. 31, pp. 12788-12793.
- [9] Dortch, Q., N. N. Rabalais, R. E. Turner, and N. A. Qureshi(2001), Impacts of changing Si/N ratios and phytoplankton species composition, *Coastal hypoxia: consequences for living resources and ecosystems*, Vol. 58, pp. 37-48.
- [10] Friedland, K. D., C. Stock, K. F. Drinkwater, J. S. Link, R. T. Leaf, B. V. Shank, J. M. Rose, C. H. Pilskaln, and M. J. Fogarty(2012), Pathways between primary production and fisheries yields of large marine ecosystems, *PloS one*, Vol. 7, No. 1, e28945.
- [11] Guidi, L., L. Stemmann, G. A. Jackson, F. Ibanez, H. Claustre, L. Legendre, M. Picheral, and G. Gorskya(2009), Effects of phytoplankton community on production, size, and export of large aggregates: A world ocean analysis, *Limnology and Oceanography*, Vol. 54, No. 6, pp. 1951-1963.
- [12] Han, I. S., Y. S. Suh, J. S. Lee(2013), Analysis of Long-term Oceanic Data for the Prediction of *Undaria pinnatifida* Aquaculture Production off the Coast of Busan, *Korean J Fish Aquat Sci*, Vol. 46, Issue6, pp. 941-947.
- [13] Hansen, B., P. K. Bjornsen, and P. J. Hansen(1994), The size ratio between planktonic predators and their prey, *Limnology and oceanography*, Vol. 39, No. 2, pp. 395-403.
- [14] Hildebrand, M., E. York, J. I. Kelz, A. K. Davis, L. G. Frigeri, D. P. Allison, and M. J. Doktycz(2006), Nanoscale control of silica morphology and three-dimensional structure during diatom cell wall formation, *J. Mater. Res.*, Vol. 21, No. 10, pp. 2689-2698.
- [15] Huete-Ortega, M., A. Calvo-Díaz, R. Graña, B. Mouriño-Carballido, and Marañón, E.(2011), Effect of environmental forcing on the biomass, production and growth rate of size-fractionated phytoplankton in the central Atlantic Ocean, *J. Mar. Syst.* Vol. 88, No. 2, pp. 203-213.
- [16] Irigoien, X., J. Titelman, R. P. Harris, D. Harbour, and C. Castellani(2003), Feeding of *Calanus finmarchicus* nauplii in the Irminger Sea, *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, Vol. 262, pp. 193-200.
- [17] Jang, H. K., J. J. Kang, J. H. Lee, M. Kim, S. H. Ahn, J. Y. Jeong, M. S. Yun, I. Han, and S. H. Lee(2018), Recent primary production and small phytoplankton contribution in the Yellow Sea during the summer in 2016, *Ocean Sci. J.*, Vol. 53, pp. 509-519.

- [18] Jang, H. K., S. H. Youn, H. Joo, Y. Kim, J. J. Kang, D. Lee, N. Jo, K. Kim, S. Kim, and S. H. Lee(2021), First concurrent measurement of primary production in the Yellow Sea, the South Sea of Korea, and the East/Japan Sea, 2018, *J. mar. sci. eng.*, Vol. 9, No. 11, pp. 1237.
- [19] Jin, J., S. M. Liu, J. L. Ren, C. G. Liu, J. Zhang, and G. L. Zhang(2013), Nutrient dynamics and coupling with phytoplankton species composition during the spring blooms in the Yellow Sea, *Deep Sea Res. Part II Top. Stud. Oceanogr.*, Vol. 97, pp. 16-32.
- [20] Jo, N., J. J. Kang, W. G. Park, B. R. Lee, J. H. Lee, Y. Kim, S. H. Ahn, D. Lee, J. O. Min, and S. H. Lee(2018), Carbohydrate-dominant phytoplankton and protein-high zooplankton in the northern part of the southwestern East/Japan Sea in 2015. *J. Coast. Res.*, Vol. 85, pp. 371-375.
- [21] Jo, N., J. J. Kang, W. G. Park, B. R. Lee, M. S. Yun, J. H. Lee, S. M. Kim, D. Lee, H. Joo, J. H. Lee, S. H. Ahn, and S. H. Lee(2017), Seasonal variation in the biochemical compositions of phytoplankton and zooplankton communities in the southwestern East/Japan Sea, *Deep Sea Res. Part II Top. Stud. Oceanogr.*, Vol. 143, pp. 82-90.
- [22] Joo, H., J. W. Park, S. Son, J. H. Noh, J. Y. Jeong, J. H. Kwak, S. Saux-Picart, J. H. Choi, C. -K. Kang, and Lee, S. H.(2014), Long term annual primary production in the Ulleung Basin as a biological hot spot in the East/Japan Sea, *J. Geophys. Res. Oceans*, Vol. 119, No. 5, pp. 3002-3011.
- [23] Joo, H., S. Son, J. W. Park, J. J. Kang, J. Y. Jeong, C. I. Lee, C. -K. Kang, and Lee, S. H.(2015), Long-term pattern of primary productivity in the East/Japan Sea based on ocean color data derived from MODIS-aqu, *Remote Sens.*, Vol. 8, No. 1, pp. 25.
- [24] Joo, H., S. Son, J. W. Park, J. J. Kang, J. Y. Jeong, J. I. Kwon, C. -K. Kim, and S. H. Lee(2017), Small phytoplankton contribution to the total primary production in the highly productive Ulleung Basin in the East/Japan Sea. *Deep Sea Res, Part II Top. Stud. Oceanogr.*, Vol. 143, pp. 54-61.
- [25] Kang, D. J., S. Park, Y. G. Kim, K. Kim, and K. R. Kim(2003), A moving boundary box model (MBBM) for oceans in change: An application to the East/Japan Sea, *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 30, No. 6.
- [26] Kang, J. J., H. Joo, J. H. Lee, J. H. Lee, H. W. Lee, D. Lee, C. K. Kang, M. S. Yun, and Lee, S. H.(2017), Comparison of biochemical compositions of phytoplankton during spring and fall seasons in the northern East/Japan Sea, *Deep Sea Res. Part II Top. Stud. Oceanogr.*, Vol. 143, pp. 73-81.
- [27] Kang, J. J., H. K. Jang, J. H. Lim, D. Lee, J. H. Lee, H. Bae, C. H. Lee, C. -K. Kang, and Lee, S. H.(2020), Characteristics of different size phytoplankton for primary production and biochemical compositions in the Western East/Japan Sea, *Front Microbiol*, Vol. 11, pp. 560102.
- [28] Kim, K., K. R. Kim, D. H. Min, Y. Volkov, J. H. Yoon, and M. Takematsu(2001), Warming and structural changes in the East (Japan) Sea: a clue to future changes in global oceans?, *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 28, No. 17, pp. 3293-3296.
- [29] Klais, R., T. Tamminen, A. Kremp, K. Spilling, and K. Olli(2011), Decadal-scale changes of dinoflagellates and diatoms in the anomalous Baltic Sea spring bloom, *PloS one*, Vol. 6, No. 6, pp. e21567.
- [30] Kwak, J. H., J. Hwang, E. J. Choy, H. J. Park, D. J. Kang, T. Lee, K. -I. Chang, K. -R. Kim, and C. K. Kang(2013), High primary productivity and f-ratio in summer in the Ulleung basin of the East/Japan Sea, *Deep Sea Res. Part I Oceanogr.*, Vol. 79, pp. 74-85.
- [31] Kwon, O. Y., and J. H. Kang(2013), Seasonal variation of physico-chemical factors and size-fractionated phytoplankton biomass at Ulsan seaport of East Sea in Korea. *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 14, No. 11, pp. 6008-6014.
- [32] Lee, D., J. J. Kang, N. Jo, K. Kim, H. K. Jang, M. J. Kim, Y. Kim, S. Park, S. H. Son, J. I. Kwon, M. S. Yun, C. -K. Kang, and S. H. Lee(2022), Variations in phytoplankton primary production driven by the Pacific Decadal Oscillation in the East/Japan Sea, *J. Geophys. Res. Biogeosci. J*, Vol. 127, No. 10, e2022JG007094.
- [33] Lee, D., S. H. Son, C. I. Lee, C. K. Kang, and S. H. Lee(2019b), Spatio-temporal variability of the habitat suitability index for the *Todarodes pacificus* (Japanese common squid) around South Korea, *Remote Sens.*, Vol. 11, No. 23, pp. 2720.
- [34] Lee, E. Y., and K. A. Park(2019), Change in the recent warming trend of sea surface temperature in the East Sea (Sea of Japan) over decades (1982 - 2018), *Remote Sens*, Vol. 11, No. 22, pp. 2613.
- [35] Lee, H. W., J. H. Noh, D. H. Choi, M. Yun, P. S. Bhavya, J. J. Kang, J. H. Lee, K. W. Kim, H. K. Jang, and S. H. Lee(2021), Picocyanobacterial Contribution to the Total Primary Production in the Northwestern Pacific Ocean, *Water*, Vol. 13, No. 11, pp. 1610.

- [36] Lee, S. H., H. Joo, J. H. Lee, J. H. Lee, J. J. Kang, H. W. Lee, D. Lee, and C. K. Kang(2017), Seasonal carbon uptake rates of phytoplankton in the northern East/Japan Sea, *Deep Sea Res. Part II Top. Stud. Oceanogr.*, Vol. 143, pp. 45-53.
- [37] Lee, S. H., H. M. Joo, H. Joo, B. K. Kim, H. J. Song, M. Jeon, and S. H. Kang(2015), Large contribution of small phytoplankton at Marian Cove, King George Island, Antarctica, based on long-term monitoring from 1996 to 2008, *Polar Biol.*, Vol. 38, pp. 207-220.
- [38] Lee, S. H., H. M. Joo, Z. Liu, J. Chen, and J. He(2012), Phytoplankton productivity in newly opened waters of the Western Arctic Ocean, *Deep Sea Res. Part II Top. Stud. Oceanogr.*, Vol. 81, pp. 18-27.
- [39] Lee, S. H., J. Ryu, D. Lee, J. W. Park, J. I. Kwon, J. Zhao, and S. Son(2019a), Spatial variations of small phytoplankton contributions in the Northern Bering Sea and the Southern Chukchi Sea, *GLSci Remote Sens*, Vol. 56, No. 5, pp. 794-810.
- [40] Lee, S. H., M. S. Yun, B. K. Kim, H. Joo, S. H. Kang, C. K. Kang, and T. E. Whitledge(2013), Contribution of small phytoplankton to total primary production in the Chukchi Sea, *Cont. Shelf Res.*, Vol. 68, pp. 43-50.
- [41] Lee, S. H., M. S. Yun, H. K. Jang, J. J. Kang, K. Kim, D. Lee, N. Jo, S. H. Park, J. H. Lee, S. H. Ahn, D. A. Stockwell, and T. E. Whitledge(2023), Size-differential photosynthetic traits of phytoplankton in the Chukchi Sea, *Cont. Shelf Res.*, Vol. 255, pp. 104933.
- [42] Lee, S. H., S. Son, H. U. Dahms, J. W. Park, J. H. Lim, J. H. Noh, J. I. Kwon, H. T. Joo, J. Y. Jeong, and C. K. Kang(2014), Decadal changes of phytoplankton chlorophyll-a in the East Sea/Sea of Japan, *Oceanology*, Vol. 54, pp. 771-779.
- [43] Li, W. K., F. A. McLaughlin, C. Lovejoy, and E. C. Carmack(2009), Smallest algae thrive as the Arctic Ocean freshens, *Science*, Vol. 326, No. 5952, pp. 539-539.
- [44] Liang, Y., G. Zhang, A. Wan, Z. Zhao, S. Wang, and Q. Liu(2019), Nutrient-limitation induced diatom-dinoflagellate shift of spring phytoplankton community in an offshore shellfish farming area, *Mar. Pollut. Bull.*, Vol. 141, pp. 1-8.
- [45] Lim, Y. J., T. W. Kim, S. Lee, D. Lee, J. Park, B. K. Kim, K. Kim, H. K. Jang, P. S. Bhavya, and S. H. Lee(2019), Seasonal variations in the small phytoplankton contribution to the total primary production in the Amundsen Sea, Antarctica, *J. Geophys. Res. Oceans*, Vol. 124, No. 11, pp. 8324-8341.
- [46] Magazzu, G., and F. Decembrini(1995), Primary production, biomass and abundance of phototrophic picoplankton in the Mediterranean Sea: a review, *Aquat. Microb. Ecol.*, Vol. 9, No. 1, pp. 97-104.
- [47] Maraóón, E., P. Cermeóo, J. Rodríguez, M. V. Zubkov, and R. P. Harris(2007), Scaling of phytoplankton photosynthesis and cell size in the ocean, *Limnology and oceanography*, Vol. 52, No. 5, pp. 2190-2198.
- [48] Morán, X.A.G., A. López-Urrutia, A. Calvo-Díaz, W.K.W. LI(2010), Increasing importance of small phytoplankton in a warmer ocean, *Glob Chang Biol*, Vol. 16, No. 3, pp. 1137-1144.
- [49] Park, K. W., H. J. Oh, J. D. Hwang, S. Y. Moon, M. U. Lee, and S. H. Youn(2022), Changes in phytoplankton size structure in the East Sea 2018-2020 due to marine environment change, *Korean J. Environ. Biol.*, Vol. 40, No. 1, pp. 54-69.
- [50] Parsons, T. R.(1967), Some observations on the dependence of zooplankton grazing on the cell size and concentration of phytoplankton blooms, *J. Oceanogr. Soc. Japan*, Vol. 23, pp. 10-17.
- [51] Parsons, T. R., Y. Maita, and C. M. Lalli(1984), A manual of chemical & biological methods for seawater analysis, *Mar. Pollut. Bull.*, Vol. 15, pp. 419-420.
- [52] Paytan, A., and K. McLaughlin(2007), The oceanic phosphorus cycle, *Chem. Rev.*, Vol. 107, No. 2, pp. 563-576.
- [53] Rattan, K. J.(2017), Comparative analyses of physiological assays and chlorophyll a variable fluorescence parameters: investigating the importance of phosphorus availability in oligotrophic and eutrophic freshwater systems, *Aquatic Ecology*, Vol. 51, pp. 359-375.
- [54] Richardson, T. L., and G. A. Jackson(2007), Small phytoplankton and carbon export from the surface ocean, *Science*, Vol. 315, No. 5813, pp. 838-840.
- [55] Son, S., J. Campbell, M. Dowell, S. Yoo, and J. Noh(2005), Primary production in the Yellow Sea determined by ocean color remote sensing, *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, Vol. 303, pp. 91-103.
- [56] Struyf, E., A. Smis, S. Van Damme, P. Meire, and D. J. Conley(2009), The global biogeochemical silicon cycle, *Silicon*, Vol. 1, pp. 207-213.
- [57] Tréguer, P., C. Bowler, B. Moriceau, S. Dutkiewicz, M. Gehlen, O. Aumont, L. Bittner, R. Dugdale, Z. Finke, D. Iudicone, O. Jahm, L. Guidi, M. Lasbleiz, K. Leblanc, M.

- Levy, and P. Pondaven(2018), Influence of diatom diversity on the ocean biological carbon pump, *Nat. Geosci.*, Vol. 11, No. 1, pp. 27-37.
- [58] Uitz, J. U., Y. Huot, F. Bruyant, M. Babin, and H. Claustre(2008), Relating phytoplankton photophysiological properties to community structure on large scales, *Limnology and Oceanography*, Vol. 53, No. 2, pp. 614-630.
- [59] Uitz, J., D. Stramski, B. Gentili, F. d'Ortenzio, and H. Claustre(2012), Estimates of phytoplankton class specific and total primary production in the Mediterranean Sea from satellite ocean color observations, *Glob. Biogeochem.*, Vol. 26, No. 2.
- [60] Uitz, J., H. Claustre, B. Gentili, and D. Stramski(2010), Phytoplankton class specific primary production in the world's oceans: Seasonal and interannual variability from satellite observations, *Glob. Biogeochem.*, Vol. 24, No. 3.
- [61] Wang Y. and Z. Gao(2020), Contrasting chlorophyll-a seasonal patterns between nearshore and offshore waters in the Bohai and Yellow Seas, China: A new analysis using improved satellite data, *Cont. Shelf Res.*, Vol. 203, pp. 104173..
- [62] Zhang, C. I., J. B. Lee, Y. I. Seo, S. C. Yoon, and S. Kim(2004), Variations in the abundance of fisheries resources and ecosystem structure in the Japan/East Sea, *Prog. Oceanogr.*, Vol. 61, No. 2-4, pp. 245-265.
- [63] Zhuang, Y., H. Jin, Y. Zhang, H. Li, T. Zhang, Y. Li, Y. Bai, J. Ren, and J. Chen(2021), Incursion of Alaska Coastal Water as a mechanism promoting small phytoplankton in the western Arctic Ocean, *Prog. Oceanogr.*, Vol. 197, pp. 1026.

Received : 2023. 08. 28.

Revised : 2023. 10. 12.

Accepted : 2023. 10. 27.