

2019년 황해 해역에서 계절적 해양 환경특성에 따른 식물플랑크톤 군집 구조 변화양상

박경우* · 박태규** · 장효근*** · 유만호**** · 오광석***** · 윤석현*****†

*, *** 국립수산과학원 기후변화연구과 박사후연구원, ** 국립수산과학원 기후변화연구과 해양수산연구소,
**** (주)해랑기술정책연구소 책임연구원, ***** 해온부유생태연구소 연구소장,
***** 국립수산과학원 기후변화연구과 해양수산연구소

Seasonal Changes in Phytoplankton Community Associated with Marine Environmental Factors in the Yellow Sea in 2019

Kyung-Woo Park* · Tae-Gyu Park** · Hyo-Keun Jang*** · Man-Ho Yoo**** ·

Kwang-Seok O***** · Seok-Hyun Youn*****†

*, *** Postdoctoral Researcher, Oceanic Climate & Ecology Research Division, National Institute of Fisheries Science, Busan 46083, Republic of Korea

** Senior Researcher, Oceanic Climate & Ecology Research Division, National Institute of Fisheries Science, Busan 46083, Republic of Korea

**** Senior Researcher, HAERANG Technology and Policy Research Institute, Suwon 16229, Republic of Korea

***** Director of Research Institute, Hae On Plankton Ecology Research Institute, Busan 48106, Republic of Korea

***** Principal Researcher, Oceanic Climate & Ecology Research Division, National Institute of Fisheries Science, Busan 46083, Republic of Korea

요약 : 황해 식물플랑크톤의 계절별 군집 구조와 해양환경 요인과의 상관관계를 파악하기 위하여 2019년 계절별로 15개 정점에 대해 조사하였다. 동계와 춘계에는 규조류가 높은 출현율을 나타내었으며, 하계와 추계에는 20 μ m 이하의 미동정 미소편모조류가 높은 출현율을 나타내었다. 이는 낮은 농도의 영양염류로 인한 것으로, 특히 인산염의 경우 검출 한계까지 낮게 나타남에 따라 식물플랑크톤 성장에 심각한 저해 현상을 가져온 것으로 판단된다. 성층이 강화되는 하계와 추계 표층 혼합층에서 초미소형 크기의 식물플랑크톤 기여도가 높았으며, 중복분석 결과 초미소형 크기의 식물플랑크톤은 영양염(질산염, 인산염) 및 수심에 대해 강한 음의 상관성을 나타내고 있었다. 결론적으로 하계와 추계 성층 강화로 인한 표층 혼합층 내에서의 영양염 감소는 영양염류의 요구량이 낮은 상대적으로 크기가 작은 식물플랑크톤 성장에 유리한 환경을 제공하며, 식물플랑크톤 군집 구조는 소형화가 진행된 것으로 판단된다.

핵심용어 : 황해, 식물플랑크톤 우점종, Chl-a 크기별 분석, 식물플랑크톤 소형화, 영양염 감소

Abstract : We carried out a field survey to analyze the spatial distributions of phytoplankton communities at 15 stations in the Yellow Sea in 2019. Diatoms exhibited a high appearance rate in winter and spring, whereas small flagellates (<20 μ m) showed a high appearance rate in summer and autumn. This change in the phytoplankton-community structure may be ascribed to low nutrient concentrations in the area, especially of phosphate, which was below the detection limit, seriously hampering the phytoplankton growth. The composition ratio of picophytoplankton was high in the surface mixed layer in summer and autumn when the water columns exhibited strong stratification. Redundancy analysis revealed strong negative correlations between nutrients (NO_3^- , PO_4^{3-}) and water depth. In conclusion, the reduction in nutrients in the surface mixed layer owing to the strengthening of stratification in summer and autumn creates favorable conditions for the growth of relatively small phytoplankton with low nutrient requirements, leading to a shift towards a smaller phytoplankton-community structure.

Key Words : Yellow sea, Phytoplankton dominant species, Chl-a size fraction, Phytoplankton miniaturization, Reduced nutrients

* First Author : kyungwoopark@korea.kr, 051-720-2247

† Corresponding Author : younsh@korea.kr, 051-720-2233

1. 서론

한국과 중국 사이에 위치한 황해는 반 폐쇄성 연해로 평균 수심은 44 m, 최대 수심은 100 m 내외로 남쪽으로 동중국해를 통하여 외해와 연결되며 생태학적, 경제적 중요성이 매우 큰 해역이다(Naimie et al., 2001; Son et al., 2005; Lin et al., 2005). 지난 수십 년 동안 황해는 기후 변화로 인한 표층 수온의 증가, 인간 활동을 통한 담수로부터의 영양염 유입, 중국 산사댐 건설에 따른 인위적인 담수 유입 조절 및 오염과 같은 요인으로 인해 물리·화학적 특성 변화로 해양생태계에 심각한 영향을 미쳤다. 이러한 환경 변화는 식물성 플랑크톤 군집 구조에 영향을 주어 종 구성, 풍부도 및 기초생산력에 영향을 미치게 된다.

식물플랑크톤은 해양생태계 먹이망에서 일차생산자로서 중요한 역할을 담당하고 있으며, 식물플랑크톤의 군집구조와 일차생산력은 수괴의 분포 특성, 환경요인의 변화 및 상위 포식자의 섭식에 영향을 받는다. 최근 기후변화로 인한 해양의 물리, 화학적인 변화가 해양생태계 미치는 영향에 관한 연구에서 중요한 지시자로서 연구의 기초자료를 제공하며(Tont, 1976; Venrick et al., 1987), 세대교체가 빨라 이화학적 환경변수 보다 더 민감한 환경지표가 된다(Hays et al., 2005). 따라서 식물플랑크톤 군집변화 연구는 해양생태계 변동을 파악할 수 있는 지시자로서 활용할 수 있으며, 해양생태계 구조와 기능을 이해하기 위해서는 해양환경 요인과 관련하여 시·공간적인 식물플랑크톤 군집 구조 변동을 파악하는 것이 필요하다(Smayda, 1978; Falkowski and Raven, 1997; Yoder and Kennelly, 2003; Wassmann et al., 2011; Arrigo and Dijken, 2015). 황해 식물플랑크톤에 대한 연구를 살펴보면 연안역의 혼합수괴와 외해역의 성층수괴 그 사이의 조석전선역 발달에 따른 식물플랑크톤의 영향에 대한 연구가 보고되었고(Choi, 1991; Youn et al., 2007; Lee et al., 2012), 황해 중앙해역에서 계절에 따른 식물플랑크톤 군집에 미치는 영향(Choi 2002), 위성과 현장 배양 실험을 통한 기초생산력 변동(Son et al., 2005; Jang et al., 2016), HPLC를 이용한 식물플랑크톤 군집 조성 연구(Kim et al., 2022) 등이 보고되었지만, 2000년대 초기에 연구가 집중되어 있으며, 대부분의 연구는 제한된 시기에 연구가 이루어져 왔다. 이에 이번 조사에서는 황해 연안 및 외해역에 대한 계절별 식물플랑크톤 군집 조성 및 크기별 구성비를 확인하고 최근 황해 수층 생태계 변화를 이해하는데 필수적인 자료를 제시하고자 수행되었다.

2. 재료 및 방법

2.1 조사 정점 및 시료 채집

황해의 해양환경 및 식물플랑크톤 분포 특성을 파악하

기 위해서 국립수산과학원 해양조사선 탐구 8호(283 ton)를 활용하여 총 15개 정점에서 2019년 계절별(2/22~3/5, 4/3~12, 8/14~26, 10/6~17) 조사를 수행하였다(Fig. 1). 수온과 염분의 수직분포는 보정된 SBE 9/11 CTD(Sea-Bird Electronics, Bellevue, WA, USA)을 이용하여 측정하였으며, CTD 자료는 하강시(down data) 자료를 사용하였다. 식물플랑크톤 현존량 및 우점종과 Chl-*a* 및 영양염 농도 분석을 위해서 CTD/rosette sampler에 부착시킨 니스킨 채수기(8L PVC)를 이용하여 최대 6개의 표준 수심(0, 10, 20, 30, 50 및 75 m)에서 채집하였다.

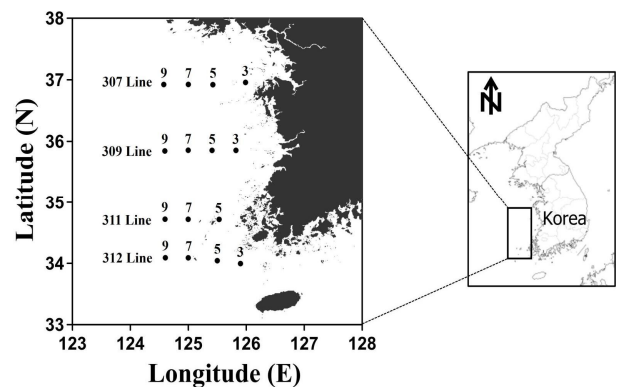


Fig. 1. Sampling stations in the Yellow sea of Korea from 2019.

2.2 용존 유기 영양염 분석

영양염 분석을 위하여 일정량의 해수(10 mL)를 membrane filter(0.45 μ m Disposable membrane filter unit, Advantec, Japan)에 여과한 후 염산(HCl, 10%)으로 세척된 conical tube(15 mL)에 담아 즉시 냉동 보관(-20 $^{\circ}$ C)하였다. 분석 시료는 실온에서 해동한 후 영양염자동분석기(Quattro, Seal Analytical, Norderstedt, Germany)를 이용하여 암모니아염(ammonia nitrogen, NH₄⁺), 아질산염(nitritenitrogen, NO₂⁻), 질산염(nitratenitrogen, NO₃⁻), 인산염(phosphate, PO₄³⁻) 및 규산염(silicate, Si(OH)₄)을 분석하였다.

2.3 식물플랑크톤 우점종

식물플랑크톤의 정량분석은 표준수심에서 채집한 시료를 현장에서 1 L 사각 용기(PE, bottle)에 넣고 Lugol 용액으로 고정(최종농도 1%)하여, 실험실로 운반 후 2일간 정치시켜 1차 200mL로 농축하였으며, 이후 메스실린더로 시료를 옮겨 담은 후 2일간 정치하여 최종부피 20 mL가 되도록 농축하였다. 농축시료는 Sedgwick-Rafter Chamber를 이용하여 광학현미경(Ni-U; Nikon, Japan) 100~1,000배율에서 종을 동정(Round et al., 1990; Shim, 1994; Tomas, 1997) 및 계수하였다. 계수된 자료는 cells L⁻¹로 환산하였고, 총 현존량의 5% 이상을 차지하는 종을 우점종으로 분류하였다.

2.4 Chl-a 크기별 분석

Chl-a 농도를 파악하기 위한 기본 방법 및 계산은 Parsons et al.(1984)의 방법에 의해 수행되었다. 식물플랑크톤 크기별 (>20 μm: 소형(micro); 20 μm≥Chl-a>3 μm: 미소(nano); ≤3 μm: 초미소(pico)) Chl-a 농도를 측정하기 위하여, 20 μm membrane filter (Polycarbonate Track Etched(PCTE) Membrane disk dim, 47 mm, GVS, USA), 3 μm PC membrane filter (3 μm, Polycarbonate membrane filter, 47 mm, Whatman, USA) 및 0.45 μm membrane filter (47 mm, ADVMEC, Japan)가 장착된 filter holder로 순차적으로 여과하여(0.5 L) 소형, 미소 및 초미소 크기의 Chl-a 값을 구하였으며, 총 Chl-a의 값은 이들 3개의 값을 합한 값을 사용하였다. 각 채집된 filter는 냉동(-80°C) 보관 후 실험실로 운반하여 90% 아세톤에 넣어 24시간 동안 냉암소에 보관하여 Chl-a를 추출하였고, 이후 입자 및 추출 여과지를 걸러내기 위하여 Syringe filter (0.45 μm, PTFE, Adventec)로 여과하여 표준 Chl-a (Sigma, USA)로 보정된 형광광도계 (Fluorometer; Turner Designs, 10-Au, San Jose, CA, USA)를 이용하여 측정하였다.

2.5 자료 분석

황해에서 수집된 환경요인 및 식물플랑크톤 그룹간의 통계적 상관성을 분석하기 위하여 R 통계 프로그램(var. 4.3.3)을 사용하였다. R 통계 프로그램 패키지의 decorana 함수를 이용하여 생물 자료 분포를 확인한 결과 DCA1 축의 길이가 3 미만 임에 따라 redundancy analysis(RDA) 분석을 통하여 통계적 분석을 실시하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 수온 및 염분의 시공간적 분포

조사 기간 동안 관측된 수온 및 염분은 Fig. 2, 3, 4에 나타내었다. 계절에 따른 표층 평균 수온 범위는 4.0~28.0°C(13.1 ±6.9°C, 평균±표준편차로 이하 동일 표기)로, 하계 평균 26.2±1.7°C로 가장 높았으며, 동계 평균 6.9±1.3°C로 가장 낮게 나타났다. 공간적으로 연안에서 외해역으로 갈수록 표층 수온은 증가하는 경향을 나타내었으며, 춘계 312라인 3정점에서 비교적 고온, 고염의 특성을 나타내었는데, 이는 제주도 서쪽해역에서 북상하는 황해난류(Yellow Sea Warm Current)의 영향(Nitani, 1972; Byun and Chang, 1988; Beardsley et al., 1985)으로 판단된다. 수온의 수직적 분포는 동계와 춘계 강한 바람과 조석에 의한 영향으로 전체적으로 수직 혼합층을 형성하고 있었으며, 하계에는 표층 수온의 증가로 인하여 수심 20~30 m 내외에서 강한 수온약층이 형성되었고, 추계에는 수심 30~50 m 내외에서 수온약층이 형성되며 수층 간 차

이를 나타내었다. 표층 평균 염분 범위는 30.5~33.7(32.1±0.5)으로 하계 평균 31.8±0.5로 가장 낮았으며, 동계와 춘계 각각 평균 32.4±0.3, 32.4±0.5로 가장 높게 나타났다. 공간적으로 연안역에 위치한 정점에서 낮은 염분을 보이며 담수의 영향이 나타난 반면, 하계에는 311, 312 라인 외해쪽에서 낮은 염분을 나타내었는데, 이는 하계 장강희석수의 세력이 커지면서 (Park, 1986; Kim et al., 1991; Gong et al., 1996)나타난 현상으로 판단된다. 염분의 수직적 분포는 연안쪽 정점에서는 대체로 균일한 분포를 보였는데, 이는 해수가 조석에 의하여 수직 혼합되어 나타난 것으로 생각되며, 하계에는 장강으로부터 유입되는 담수와 강한 수온약층으로 인해 외해역에서는 표층에서 저층으로 갈수록 염분이 증가하는 경향을 나타내었다.

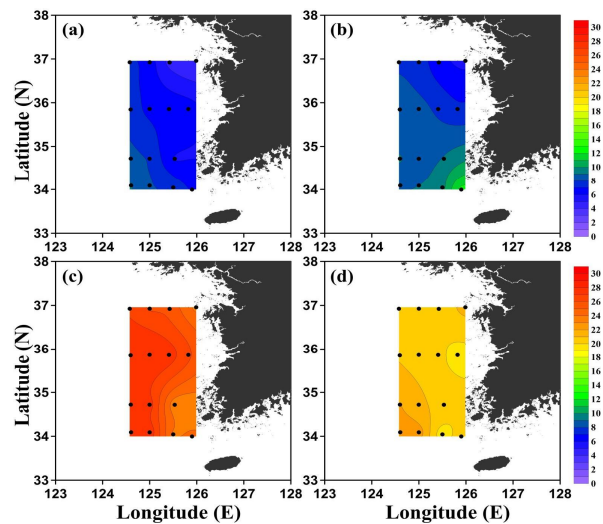


Fig. 2. Surface distribution of temperature(°C) in the Yellow Sea in (a) winter, (b) spring, (c) summer and (d) autumn from 2019.

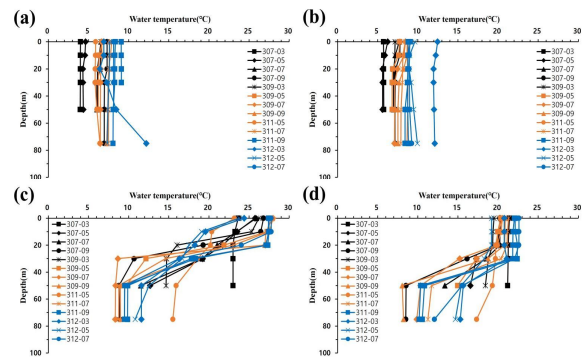


Fig. 3. Vertical distribution of water temperature in the Yellow Sea in (a) winter, (b) spring, (c) summer and (d) autumn from 2019. For each sample station, refer to Fig. 1.

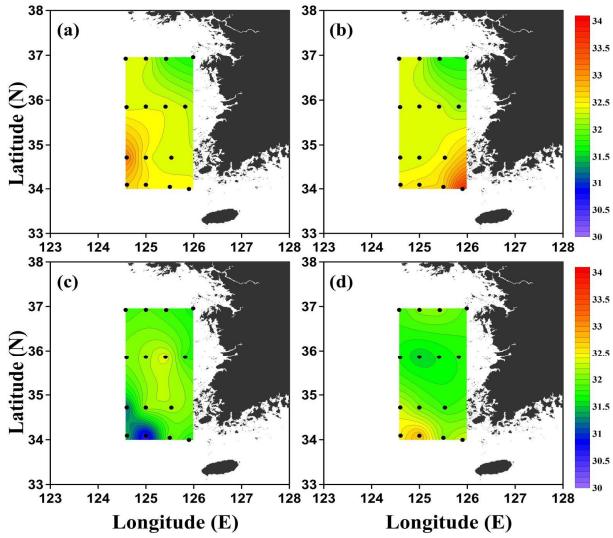


Fig. 4. Surface distribution of salinity in the Yellow Sea in (a) winter, (b) spring, (c) summer and (d) autumn from 2019.

3.2 용존무기영양염 분포 경향

황해 주요 용존무기영양염의 수심별 농도는 Table 1에 제시하였다. 연구 기간 중 암모니아염, 아질산염 및 질산염의 표층 농도는 각각 0.2~1.1 μM ($0.4 \pm 0.2 \mu\text{M}$), 0.0~0.4 μM ($0.1 \pm 0.2 \mu\text{M}$) 및 0.2~12.7 μM ($4.2 \pm 3.2 \mu\text{M}$)로 나타났으며, 인산염과 규산염은 각각 0.0~0.8 μM ($0.3 \pm 0.2 \mu\text{M}$) 및 1.2~12.0 μM ($5.9 \pm 2.7 \mu\text{M}$)로, 계절적으로 동계에 가장 높았으며, 하계에 가장 낮은 농도를 나타내었다. 공간적으로 연안역에서 외해역으로 갈수록 영양염 농도는 감소하는 경향을 나타냈다. 수직적으로 동계와 춘계에는 전체적으로 수직 혼합층이 형성되어 표층에서 저층까지 영양염 농도의 차이는 나타나지 않았다. 반면 수온약층이 형성되는 하계 및 추계 표층 혼합층(표층~30 m 내외)에서 낮은 영양염 농도를 나타내었고, 저층으로 갈수록 농도가 증가하는 계절적 특성을 나타냈으며, 특히 하계와 추계 표층~20 m 내외 수심에서 인산염의 농도는 0.1 μM 이하의 매우 낮은 농도를 나타냈다. 이러한 하계와 추계 표층 혼합층에서의 영양염 감소는 기후 변화로 인한 표층 수온 상승이 주된 원인으로, 최근 55년간(1968~2022) 한국 해역의 연평균 표층 수온 상승률은 $0.025 \text{ } ^\circ\text{C yr}^{-1}$ 로 $1.36 \text{ } ^\circ\text{C}$ 상승한 반면, 같은 기간 전 지구 평균 표층 수온 상승률은 $0.0094 \text{ } ^\circ\text{C yr}^{-1}$ 로 $0.52 \text{ } ^\circ\text{C}$ 상승하여 한국 연근해의 연평균 표층수온 상승률이 전 지구 평균에 비해 약 2.5배 이상 높았으며, 황해의 경우 같은 기간 $1.19 \text{ } ^\circ\text{C}$ 표층 수온이 상승하였다(NIFS, 2023). 이러한 표층 수온 상승은 성층 강화로 이어져 저층으로부터 표층으로 영양염 유입을 감소시켜 하계와 추계 표층 혼합층에서 영양염 감소의 주된 원인으로 판단된다.

3.3 식물플랑크톤 군집구조 변화

2019년 황해 계절별 식물플랑크톤 우점종은 Table 2에 나타내었다. 동계 식물플랑크톤의 총 현존량은 $1.2 \times 10^6 \text{ cells L}^{-1}$ 로, 가장 낮은 현존량을 나타내었다. 초미소형을 제외한 식물플랑크톤 군집은 규조류가 63.2%로 대부분을 차지하고 있었으며, 우점종은 저서성 규조류인 *Paralia sulcata*, *Leptocylindrus danicus*, *Skeletonama* sp. 및 *S. costatum*이 전 정점에서 우점종으로 출현하였다. 반면 312 라인 정점에서는 20 μm 이하 크기의 미동정 미소편모조류(nanoflagellates)가 36.2%로 높은 출현율을 나타내며, 동계 최 우점종으로 출현하였다.

춘계 식물플랑크톤의 정점과 수심 평균 현존량은 $17.5 \times 10^6 \text{ cells L}^{-1}$ 로, 312 라인 정점에서 총 현존량의 82.5%가 출현하며 공간적으로 차이를 나타내었다. 식물플랑크톤의 군집은 규조류가 83.2%로 가장 높았으며, 우점종으로는 *S. costatum*이 67.8%로 최우점종으로 출현하였다.

하계와 추계 식물플랑크톤의 정점과 수심 평균 현존량은 각각 $2.0 \times 10^6 \text{ cells L}^{-1}$ 및 $2.1 \times 10^6 \text{ cells L}^{-1}$ 로 계절적 차이는 나타나지 않았다. 하계 군집 구조를 살펴보면 미동정 미소편모조류와 규조류가 각각 48.5%, 44.8%로 출현하였고, 추계에는 미동정 미소편모조류와 규조류가 각각 48.7%, 43.9%로 대부분을 차지하고 있었다. 하계와 추계 최우점종은 20 μm 이하 크기의 미동정 미소편모조류로 동일하였으며, 하계에는 규조류인 *Guinardis flaccida*(17.1%) 및 *Hemiaulus membranaleus*(8.2%)가 주요 우점종으로 출현하였고, 추계에는 규조류인 *Chaetoceros curvisetus*(7.3%) 및 *Rhizosoleia fragilissima*(5.6%)가 주요 우점종으로 출현하였다.

황해 해역에서 계절별 식물플랑크톤의 군집 조성을 살펴보면, Lee(2012)의 연구 결과 동계 황해 중앙해역 전 정점에서 10 μm 이하 크기의 미동정 미소편모조류가 우점하는 결과를 보고하였다. 이번 조사의 최우점종은 20 μm 이하 크기의 미동정 미소편모조류로 나타나 최우점종은 일치하였으나, 312 라인 정점에서 제한적으로 출현하는 공간적 차이를 나타내었다. 반면 규조류는 전 정점에 걸쳐서 높은 출현율을 보이며 전체 식물플랑크톤 현존량에 63.2% 출현하며, 기존 황해 해역에서 동계 규조류가 우점(Choi and Shim, 1988; Choi, 1991; Choi, 2002) 한다는 결과들과 유사한 결과를 나타내었다. 저서성 규조류 *P. sulcata*는 황해 연안역과 황해의 남측해역(312 라인)에서 상대적으로 높은 현존량을 보였다. 이전 연구에서 *P. sulcata*는 연안역뿐만 아니라 황해 전 해역에서 주요 종으로 알려져(Choi and Shim, 1986; Choi, 1991)있으며, 동계 동중국해에서 식물플랑크톤 조성을 살펴보면 전 수층에서 *P. sulcata*가 우점종으로 나타난다고 보고 하였다(Asaoka, 1980; Furuya et al., 1996; Park, 2019). *P. sulcata*는 동계 황해 및 동중국해역에서 흔히 출현하는 종으로 판단되며,

Table 1. The averaged and standard deviation of dissolved inorganic nutrient concentrations from each depth in the Yellow Sea from 2019

Season	Depth m	NH ₄ ⁺	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	PO ₄ ³⁻	Si(OH) ₄
		μM				
Win.	0	0.44±0.15	0.08±0.04	7.14±2.20	0.54±0.13	8.17±2.44
	10	0.47±0.18	0.07±0.03	7.43±2.31	0.57±0.18	8.65±2.66
	20	0.44±0.18	0.07±0.03	6.89±2.33	0.54±0.11	8.45±2.75
	30	0.46±0.19	0.07±0.03	7.21±2.34	0.65±0.24	8.76±2.82
	50	0.45±0.19	0.06±0.03	7.54±2.44	0.60±0.16	8.99±2.83
	75	0.50±0.24	0.05±0.02	7.11±2.02	0.65±0.23	9.40±2.15
Spr.	0	0.44±0.21	0.06±0.02	5.66±3.12	0.50±0.17	6.47±2.31
	10	0.53±0.40	0.06±0.02	5.68±3.55	0.48±0.16	6.59±2.19
	20	0.52±0.37	0.06±0.03	5.80±2.93	0.56±0.23	6.95±2.26
	30	0.49±0.31	0.07±0.02	5.87±2.47	0.54±0.13	7.35±2.65
	50	0.48±0.34	0.07±0.03	6.52±2.34	0.56±0.13	7.99±2.91
	75	0.37±0.20	0.07±0.04	6.48±1.58	0.47±0.07	9.31±2.32
Sum.	0	0.41±0.16	0.02±0.01	1.94±1.92	0.10±0.04	3.12±0.87
	10	0.38±0.15	0.02±0.02	0.74±0.46	0.11±0.05	4.12±1.93
	20	0.44±0.24	0.04±0.03	1.28±0.99	0.15±0.09	4.30±2.19
	30	0.39±0.24	0.07±0.07	2.13±1.71	0.25±0.14	5.48±2.78
	50	0.37±0.21	0.04±0.03	5.79±2.01	0.50±0.12	9.30±2.20
	75	0.33±0.11	0.04±0.02	6.67±10.7	0.52±0.08	10.16±2.08
Aut.	0	0.45±0.16	0.10±0.09	1.91±1.40	0.19±0.16	5.87±1.61
	10	0.39±0.11	0.11±0.12	1.84±1.31	0.17±0.16	5.50±1.52
	20	0.38±0.11	0.12±0.13	1.83±1.58	0.19±0.16	5.42±1.81
	30	0.40±0.14	0.13±0.12	3.85±2.54	0.32±0.20	7.22±2.33
	50	0.31±0.10	0.10±0.14	7.16±2.24	0.57±0.16	9.12±2.01
	75	0.33±0.09	0.04±0.03	7.42±2.17	0.61±0.14	10.04±1.60

* Win: winter; Spr: spring; Sum: summer; Aut: autumn; NH₄⁺: ammonia nitrogen; NO₂⁻: nitrite nitrogen; NO₃⁻: nitrate nitrogen; PO₄³⁻: phosphate; Si(OH)₄: silicate

Table 2. Dominant species of phytoplankton in the Yellow Sea from 2019

	Winter	Spring	Summer	Autumn
First	flagellates (< 20μm)(36.2%)	<i>Skeletonema costatum</i> (67.8%)	flagellates (< 20μm)(48.5%)	flagellates (< 20μm)(48.7%)
Second	<i>Paralia sulcata</i> (20.2%)	<i>Cryptomonas</i> sp. (< 20μm)(12.3%)	<i>Guinardia flaccida</i> (17.1%)	<i>Chaetoceros curvisetus</i> (7.3%)
Third	<i>Leptocylindrus danicus</i> (9.4%)		<i>Hemiaulus membranaleus</i> (8.2%)	<i>Rhizosolenia fragilissima</i> (5.6%)
Fourth	<i>Skeletonema</i> spp.(6.4%)			

이번 조사의 남측 해역에서 높은 현존량을 보인 것은, 황해와 동중국해의 얇은 수심의 넓은 대륙붕에서 동계 수괴 혼합이 활발히 이루어져 저층으로부터 유입이 활발히 이루어진 결과로 판단된다. Choi and Shim(1988)에 의한 기존 하계 연구를 살펴보면 규조류인 *S. costatum*과 *Chaetoceros debilis*가 우점하였으며, Yoon et al.(2007)은 황해 남부해역에서 표층에서는 *P. sulcata*와 *Scrippsiella trochoidea*가 우점하였으며, 수온약층에서는 *S. costatum*과 *P. sulcata*가 우점하며 규조류와 와편모조류가 주요 우점종으로 보고하였다. 반면 Lee et al.(2012)은 황해 연안역에서는 *Skeletonema* spp., *Thalassiosira* spp., *Eucampia zodiacus*, *Chaetoceros* spp. 등의 규조류 혹은 황갈조편모류 *Dictyocha fibula*가 우점하였고, 황해 중앙해역 및 대부분의 정점에서 미동정 미소편모조류가 최우점종으로 출현하였음을 보고하였다. 또한 이번 조사에서도 황해 남부 해역에 제한되어 출현하였지만 20 μm 이하 크기의 미동정 미소편모조류 48.5% 출현함으로써, 황해 해역은 1980-2000년대 규조류와 와편모조류 중심에서 최근 2010년 이후에는 상대적으로 크기가 작은 미동정 미소편모조류 중심으로 군집이 변화된 것을 확인 할 수 있었다. 이는 과거에 비해 영양염류의 감소, 특히 인산염의 감소가 큰 영향을 미친 것으로 판단된다. Lin et al.(2005)의 연구에 따르면 황해의 표층수온 증가와 규산염 및 인산염 농도 감소로 인하여 1980년대에 규조류의 현존량이 1990년대 크게 감소 한 것으로 보고하였다. 또한 Lee(2012)는 하계 황해 중앙해역 연구에서 인산염이 검출한 계선 농도까지 매우 낮은 농도를 나타내었으며, 이로 인하여 일부 저층에서 *Navicula* 속 및 *Skeletonema* spp. 등 규조류의 우점을 제외한 전 정점에서 10 μm 이하의 미동정 미소편모조류가 최우점종으로 나타나 인산염 제한으로 인한 식물플랑크톤 천이가 이루어지고 있다고 보고하였다. 식물플랑크톤이 성장함에 있어 DIN 1.0 μM , 인산염 0.2 μM 및 규산염 2.0 μM 이하일 때 심각한 저해를 일으키는 것으로 알려져 있으며(Dortch and Whitlege, 1992), 인산염은 규조류가 성장하는데 중요한 제한요소로 작용하며(Zhou et al., 2008), 질산염이 풍부함에도 불구하고 인산염이 부족하면 식물플랑크톤은 질산염을 이용하지 않으며 성장에 저해가 일어남을 보고하였다(Chen et al., 1999). 이번 조사에서도 황해 남부 해역에서 인산염 농도는 0.1 μM 이하의 낮은 농도를 나타내며, 크기가 큰 규조류 보다는 상대적으로 영양염 요구량이 낮은 미동정 미소편모조류가 높은 우점율을 나타낼 수 있었던 것으로 판단된다.

3.4 식물플랑크톤 크기별 Chl-a 농도 변화

조사 기간 중 Chl-a의 정점과 수심 평균 농도의 범위는 0.3~2.3 $\mu\text{g L}^{-1}$ 로 나타났었다(Table 2). 계절에 따라 동계에 가

장 낮게 나타났으며, 춘계 가장 높은 농도를 나타내며 계절적 변화를 나타내었다. 공간적으로는 전 계절에 걸쳐 가장 남측인 312 라인에서 가장 높은 농도를 나타내었고, 수직적으로는 동계와 춘계에는 고른 분포를 나타내며 수직 혼합층 특성을 나타낸 반면, 하계와 추계에는 표층에서 30 m 내외의 표층혼합층에서 높은 농도를 나타내었고, 저층으로 갈수록 감소하는 특성을 나타내었다.

식물플랑크톤 크기별 Chl-a 농도의 정점과 평균 농도 구성비는 동계에 소형, 미소형 및 초미소형 크기의 식물플랑크톤 수심 평균 구성비는 29.9±22.4%, 46.7±20.3% 및 23.4±22.6%, 춘계 36.0±24.4%, 35.5±19.4% 및 28.5±19.1%, 하계 10.0±15.3%, 25.8±17.0% 및 64.2±19.4%, 추계 14.0±20.3%, 26.9±17.9% 및 59.1±25.7%로 각각 나타났었다(Table 2). 춘계 식물플랑크톤 대 번성 시기에는 소형 크기의 식물플랑크톤 Chl-a 구성비가 높은 반면, 하계 및 추계에는 미소형 및 초미소형 크기의 식물플랑크톤의 Chl-a가 높은 구성비를 나타내며 계절적 특성을 나타내었다.

이번 조사 기간 동안 황해 식물플랑크톤 크기별 Chl-a 연평균 구성비는 소형 22.5%, 미소형 33.7% 및 초미소형 43.8%로 나타났다. 동계와 춘계 소형 크기의 식물플랑크톤 Chl-a 구성비의 평균은 각각 29.9, 36.0%로 현미경적 관찰에서 규조류가 각각 63.2, 83.2% 인거에 비해 다소 낮은 농도를 나타내었다. 반면 동계와 춘계 미소형 크기의 기여도는 각각 46.7, 35.5%로 동계 최우점종이 20 μm 이하 크기의 미동정 미소편모조류와 춘계 20 μm 이하 크기의 *Cryptomonas* sp.가 우점종으로 출현하였지만, 현존량에 비해 전체 식물플랑크톤 기여도에서 높게 나타났다. 이러한 구성비가 높은 이유는 기존 황해 해역에서 HPLC 색소 분석을 통한 식물플랑크톤 군집 구조 연구에서 원인을 확인 할 수 있다. Kim et al.(2022)은 HPLC 색소 분석을 통하여 황해 해역에서 동계와 춘계 규조류의 비율이 평균 각각 61.9, 65.3% 출현함을 보고하였다. 그러나 크기별 색소 분석을 통하여 동계와 춘계 각각 20 μm 이하의 규조류가 72.4, 44.4%가 차지하고 있음을 보고 하였다. 또한 초미소형 크기의 식물플랑크톤의 우점종은 전 계절에 걸쳐 *Synechococcus* spp.(미발표 자료)로, 기존 연구 결과를 살펴보면 북지중해 Blanes Bay에서 동계에는 0.2 d⁻¹, 하계에는 1.5 d⁻¹ 성장률의 차이를 보였고(Agawin et al., 2000), 동중해에서는 3월에 0.2 d⁻¹, 8월에 0.68 d⁻¹의 성장률을 보였다(Chang et al., 2003). 또한 동중국해에서 수직적 분포 차이를 보면, 수온약층이 형성되는 춘계~추계 시기 표층 혼합층에서는 높은 현존량을 나타내는 반면, 저층으로 갈수록 현존량이 감소하는 수직적 분포 특성을 보고하였고(Park et al., 2019), 저수온은 *Synechococcus* 속 성장에 중요한 제한 인자로 알려져 있다(Vaulot and Ning, 1998; Noh et al., 2005; Lee et al., 2014). 이러한

Table 2. The averaged and standard deviation of Chl-*a* concentrations($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) and Chl-*a* size composition(%) from each depth in the Yellow Sea from 2019

Season	Depth m	Chl- <i>a</i> $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	Chl- <i>a</i> M	Chl- <i>a</i> N %	Chl- <i>a</i> P
Win.	0	0.5±0.5	39.6±17.0	36.6±16.5	23.8±21.7
	10	0.7±0.8	29.0±24.4	41.6±17.2	29.4±26.7
	20	0.6±0.7	27.7±23.3	43.0±20.4	29.4±23.6
	30	0.6±0.9	29.4±22.3	48.4±19.3	22.1±19.1
	50	0.7±1.2	29.1±25.3	52.8±19.4	18.1±22.0
	75	0.3±0.1	22.2±13.6	62.8±19.4	15.0±15.4
Spr.	0	2.0±1.4	40.6±25.3	23.1±11.8	36.3±19.5
	10	2.3±1.7	38.2±21.4	28.3±13.9	33.5±16.4
	20	1.9±1.5	40.1±26.8	31.0±16.8	28.9±21.4
	30	1.5±0.7	40.4±21.9	36.2±16.1	23.4±19.5
	50	1.2±0.7	34.6±24.5	42.7±18.4	22.6±11.9
	75	0.8±0.3	15.2±13.2	60.0±18.8	24.9±20.3
Sum.	0	0.5±0.5	21.1±18.7	19.5±8.2	59.4±16.2
	10	0.9±0.8	10.9±13.6	18.9±5.8	70.3±13.1
	20	0.9±0.7	8.2±12.1	16.4±5.4	75.4±13.5
	30	0.9±0.5	11.7±19.6	16.4±8.0	71.9±22.9
	50	0.4±0.03	3.8±6.2	36.9±12.4	59.3±12.8
	75	0.4±0.3	1.5±1.9	57.4±18.4	41.0±17.6
Aut.	0	1.3±0.4	18.7±25.0	14.4±4.5	66.9±28.1
	10	1.4±0.6	16.1±23.4	15.5±6.7	68.4±26.1
	20	1.1±0.4	15.3±19.3	18.0±7.5	66.8±23.3
	30	0.7±0.3	9.1±15.1	26.8±12.2	64.1±18.6
	50	0.3±0.3	14.5±19.1	40.4±14.6	45.1±19.2
	75	0.3±0.2	8.3±13.5	56.3±17.8	35.3±18.0

* Win : winter; Spr : spring; Sum : summer; Aut : autumn; Chl-*a*M : Chl-*a* micro size(> 20 μm); Chl-*a*N : Chl-*a* nano size(20 μm \geq Chl-*a* > 3 μm); Chl-*a*P : Chl-*a* pico size(\leq 3 μm)

물리 환경과 20 μm 이하 크기의 미동정 미소편모조류와 *Cryptomonas* sp.외에 작은 크기의 규조류로 인하여 미소형 크기의 식물플랑크톤 기여도가 높게 나타난 것으로 판단된다. 하계와 추계에는 전 수층에 걸쳐 미소형과 초미소형 크기의 식물플랑크톤 구성비 합이 각각 90.0, 86.0%로 매우 높았으며, 특히 성층으로 인한 표층에서 30 m 수심까지의 표층 혼합층에서 하계와 추계 초미소형 크기의 기여도가 각각 69.2, 66.6% 높게 나타나고 있었다. 이러한 초미소형 크기의 높은 기여도는 빈영양해역에서 자주 나타나는 현상으로, 동해 해역에 대한 식물플랑크톤의 크기 분석 결과 영양염 농도가 높은 곳에서는 소형 크기의 식물플랑크톤이 기여도가 높은 반면, 연근해 해역같이 영양염 농도가 낮은 곳에서는 미

소형 및 초미소형 크기의 식물플랑크톤의 구성비가 높음을 보고하였다(Shim et al., 1991; Choi et al., 2004; Kang et al., 2005, 2006; Yoon, 2016). 지중해에서 위성자료와 승선 조사를 통한 초미소형 크기의 식물플랑크톤 기여도는 계절에 따라 31-92%로 초미소형 크기의 높은 기여도는 낮은 질소와 인이 주요 요인임을 보고하였고(Magazzu and Decembrini, 1995), Agawin et al.(2000)은 지중해 Blanes Bay에서 초미소형 크기의 Chl-*a* 농도의 하계 평균 기여율이 50% 이상으로 나타났으며 이는 고수온과 영양염 결핍이 주된 원인으로 보고하였다. 이 외에도 빈영양해역에서 미소 및 초미소형 크기의 구성비가 60% 이상으로 보고된 바 있다(Revelante and Gilmartin, 1995; Marañón et al., 2001; Morán et al., 2001; Ning et al., 2005).

이러한 결과는 빈영양환경에서 식물플랑크톤은 세포 크기가 작을수록 단위 부피당 표면적이 넓어져 세포 표면을 통한 영양염 교환이 빠르게 할 수 있기 때문에 상대적으로 작은 크기의 식물플랑크톤의 기여도가 증가한 것으로 보여진다(Raven 1998; Litchman et al., 2007; Longhurst, 2010). 이번 조사에서도 환경인자와 Chl-a 크기에 따른 redundancy analysis 분석 결과 초미소형 크기의 식물플랑크톤은 수심과 영양염류와 음의 관계를 나타냄으로써, 표층 혼합층 내에서의 낮은 농도의 영양염 환경에서 높은 기여도 결과를 잘 반영하고 있었다(Fig. 5). 반면 미소형 크기의 식물플랑크톤 기여도는 영양염류와 양의 상관성을 나타내었는데, 이는 앞선 Kim et al.(2022)의 결과에서 20 μm 이하의 규조류가 하계와 추계에도 각각 61.6, 70.9% 기여 함으로써 나타난 결과로 판단된다. 전 계절에 걸쳐 미소형 식물플랑크톤 기여도는 표층에서 최소, 저층에서 최대가 나타난 원인에 대해서는 추가적인 심층 연구가 필요할 것으로 보인다.

규조류 중심의 식물플랑크톤 군집 구조에서 비규조류 중심의 식물플랑크톤 소형화는 부유생태계의 생산성을 감소시킬 수 있다(Joo et al., 2016; Lee et al., 2017a). Choi et al.(1995)은 하계 황해 해역에서 식물플랑크톤 배양을 통한 기초생산력 측정 결과 일일 탄소 흡수율이 739.9 $\text{mgCm}^{-2}\text{d}^{-1}$ 로 보고하였으며, Son et al.(2005)은 1998년에서 2003년까지 6년동안 연안 해역을 제외한 하계 황해 전체에 대한 위성을 통한 기초생산력 추정값으로 723 $\text{mgCm}^{-2}\text{d}^{-1}$ 로 보고하며 1990년대 연구와 유사한 값을 보고하였다. 반면 최근 Jang et al.(2018)의 연구 결과에서는 황해 해역에서 초미소형 크기의 식물플랑크톤의 기여도는 평균 72%를 차지하고 있었으며, 기초생산력은 291 $\text{mgCm}^{-2}\text{d}^{-1}$ 로 기존 연구에 비해 기초생산력은 작은 식물플랑크톤의 기여도가 증가함에 따라 감소하고 있다고 보고되었다(Agawin et al., 2000; Joo et al., 2017; Lee et al., 2017a, 2017b). 이러한 식물플랑크톤의 소형화는 전통적인 규조류 중심의 1차 생산력을 가지는 먹이망 구조보다 복잡한 미생물 먹이망 구조를 형성하며 상위 소비자 단계로 전달되는 총 탄소량이 감소하여 전체적인 해양 생산성이 감소할 것으로 생각된다.

4. 결론

본 연구는 2019년 황해 해역에서 계절별로 물리·화학적 환경요인들과 식물플랑크톤 군집 구조 분포를 살펴보았다. 본 연구에서는 동계와 춘계에는 연안역과 황해 중앙 해역을 중심으로 규조류가 높은 출현율을 나타내었으며, 하계와 추계에는 20 μm 이하 크기의 미동정 미소편모조류가 높은 출현을 나타내었다. 특히 인산염 농도가 0.1 μM 이하의 낮은 농도를

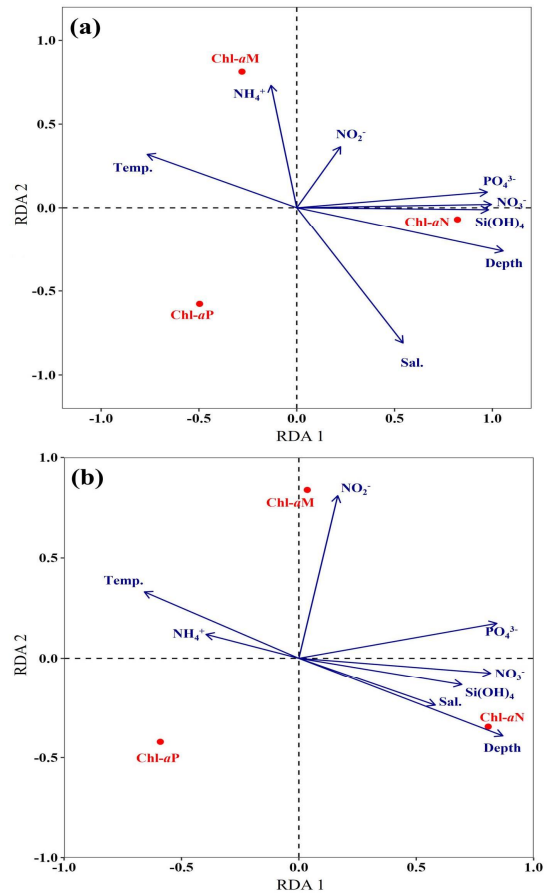


Fig. 5. RDA ordination plots showing relationships between environmental and biological conditions in the Yellow Sea. Temp.: temperature; Sal.: salinity; NH_4^+ : ammonia nitrogen; NO_2^- : nitrite nitrogen; NO_3^- : nitrate nitrogen; PO_4^{3-} : phosphate; Si(OH)_4 : silicate; Chl-aM: Chl-a micro size (> 20 μm); Chl-aN : Chl-a nano size (20 μm \geq Chl-a > 3 μm); Chl-aP : Chl-a pico size (\leq 3 μm).

나타낸 표층 혼합층에서 높은 우점율을 나타내며, 규조류 보다 상대적으로 인산염 요구량이 낮은 미소편모조류가(Chen et al., 1999) 높은 우점율을 나타낼 수 있었던 것으로 판단된다. 또한 해양환경 요인과 식물플랑크톤 크기별 기여도와와의 RDA 결과 초미소형 크기의 식물플랑크톤은 수심과 영양염류(질산염과 인산염)와 강한 음의 상관성을 나타내었다. 이는 최근 55년간 표층 수온은 1.19 $^{\circ}\text{C}$ 상승하며(NIFS, 2023), 예년에 비해 성층이 강화되었고 저층으로부터의 표층으로 영양염 유입이 감소함에 따라 표층 혼합층 내 빈영양환경에서 상대적으로 크기가 작은 초미소식물플랑크톤의 기여도가 증가 할수 있었던 것으로 판단된다. 이러한 식물플랑크톤의 소형화는 기초생산력을 감소시키며(Joo et al., 2017; Lee et

al., 2017a, 2017b; Kim et al., 2022), 상위 소비자 단계로 전달되는 총 탄소량을 감소시켜 전체적인 해양 생산력은 감소할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 연 단위 식물플랑크톤 군집 변동 특성이 최근 황해의 기후변화로 인한 해양환경 변화와 식물플랑크톤 군집 구조 변화와의 상관관계를 분석할 수 있는 기초자료로 활용 될 수 있을 것으로 생각한다.

사 사

본 연구는 국립수산과학원 “유해생물 수산피해 대응 연구(R2024040)”의 일환으로 수행되었으며, 현장 조사 및 분석에 협조해 주신 탐구 8호 승무원 및 과제 관련 연구원들께 감사드립니다.

References

- [1] Agawin, N. S. R., C. M. Duarte, and S. Agusti(2000), Nutrient and temperature control of the contribution of picoplankton to phytoplankton biomass and production, *Limnol. Oceanogr.*, Vol. 45, pp. 591-600.
- [2] Arrigo, K. R. and G. L. V. Dijken(2015), Continued increases in Arctic Ocean primary productivity, *Prog. Oceanogr.*, Vol. 136, pp. 60-70.
- [3] Asaoka, O.(1980), Distribution of *Melosira sulcata* (Ehrenberg) Kutzing, diatom species, in the seas west of Japan, *Oceanography Magazine*, Vol. 31, pp. 1-13.
- [4] Beardsley, R. C., R. Limeburner, H. Yu, and G. A. Cannon(1985), Discharge of the Changjiang (Yangtze River) into the East China Sea, *Cont. Shelf Res.*, Vol 4, pp. 57-76.
- [5] Byun, S. K. and K. I. Chang(1988), Tsushima Current Water at entrance of the Korea strait in Autumn, *Prog. Oceanog.*, Vol. 21, pp. 295-306.
- [6] Chang, J., K. H. Lin, K. M. Chen, G. C. Gong, and K. P. Chiang(2003), *Synechococcus* growth and mortality rates in the East China Sea: range of variations and correlation with environmental factors, *Deep Sea Res. Part 2 Top Stud. Oceanogr.* Vol. 50, pp. 1265-1278.
- [7] Chen, Y. L., H. Lu, F. Shiah, G. Gong, K. Liu, and J. Kanda(1999), New production and f-ratio on the continental shelf of the East China Sea: comparisons between nitrate inputs from the subsurface Kuroshio Current and the Changjiang River, *Estuar. Coastal Shelf Sci.*, Vol. 48, pp. 59-75.
- [8] Choi, H. C., Y. S. Kang, and I. S. Jeon(2004) Phytoplankton community in adjacent waters of Ulchin nuclear power plant, *Korean J. Environ. Biol.*, Vol. 22, pp. 426-437.
- [9] Choi, J. K.(1991) The influence of the tidal front on primary productivity and distribution of phytoplankton in the mid-eastern coast of Yellow Sea, *The Journal of the Oceanological Society of Korea*, Vol. 26, No3. pp. 223-241.
- [10] Choi, J. K., J. H. Noh, K. S. Shin, and K. H. Hong(1995), The early autumn distribution of chlorophyll-a and primary productivity in the Yellow Sea, *Yellow Sea*, Vol. 1, pp. 68-80.
- [11] Choi, J. K. and J. H. Shim(1988) The Ecological study of phytoplankton in Kyeonggi Bay, Yellow Sea. The Successional Mechanism and the IV Structure of the Phytoplankton Community, *J. Plankton. Oceanological Society of Korea*, Vol. 23, pp. 1-12.
- [12] Choi, J. K.(2002), *Phytoplankton Ecology in the Yellow Sea*. In: *Ecology of Korea*, edited by Lee D., Bumwoo Publishing Company, Seoul, Korea, pp. 311-330.
- [13] Choi, J. K., Shim, J. H.(1986), The ecological study of phytoplankton in Kyeonggi Bay, Yellow Sea. 3. Phytoplankton composition, standing crops, tychopelagic plankton. *Hangug Haeyang Haghoeji*, 21, pp. 156-170.
- [14] Dortch, Q. and T. E. Whitledge(1992), Does nitrogen or silicon limit phytoplankton production in the Mississippi River plume and nearby regions?, *Cont. Shelf Res.*, Vol. 12, pp. 1293-1309.
- [15] Falkowski, P. G. and J. A. Raven(1997), *Aquatic Photosynthesis*, 2nd ed. Princeton University Press. Princeton, NJ.
- [16] Furuya, K., K. Kurita, and T. Odate(1996), Distribution of phytoplankton in the East China Sea in the winter of 1993, *Journal of Oceanography*, Vol. 52, pp. 323-333.
- [17] Gong, G. C., Y. L. L. Chen, and K. K. Liu(1996), Chemical hydrography and chlorophyll a distribution in the East China Sea in summer: implications in nutrients dynamics, *Cont. Shelf Res.*, Vol. 16, pp. 1561-1590.
- [18] Hays, G. C., J. R. Anthony, and R. Carol(2005), Climate change and marine plankton, *Trends Ecol. Evol.*, Vol. 20, pp. 337-344.
- [19] Joo, H. T., S. H. Son, J. W. Park, J. J. Kang, J. Y. Jeong, C. I. Lee, C. K. Kang, and S. H. Lee(2016), Long-term pattern of primary productivity in the East/Japan Sea based on ocean color data derived from MODIS-aqua, *Remote Sens*, Vol. 8, 25.

- [20] Joo, H. T., S. Son, J. W. Park, J. J. Kang, J. Y. Jeong, J. I. Kwon, C. K. Kang, 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 Pt II*, Vol. 143, pp. 54-61.
- [21] Kang, Y. S., H. C. Choi, J. H. Noh, J. K. Choi, and I. S. Jeon(2006), Seasonal variation of phytoplankton community structure in northeastern coastal waters off the Korean Peninsula, *Algae*, Vol. 21 pp. 83-90.
- [22] Kang, Y. S., H. C. Choi, J. W. Lim, I. S. Jeon, and J. H. Seo(2005), Dynamics of the phytoplankton community in the coastal waters of Chuksan harbor, East Sea, *Algae*, Vol. 20 pp. 345-352.
- [23] Kim, K., H. K. Rho, and S. H. Lee(1991), Water masses and circulation around Cheju-Do in summer. *J. Kor. Soc. Oceanogr.*, Vol 26, pp. 262-277.
- [24] Kim, Y. J., S. H. Youn, H. J. Oh, H. T. Joo, H. K. Jang, Kang, D. B. Lee, N. E. Jo, K. W. Kim, S. H. Park, J. H. Kim, and S. H. Lee(2022), Seasonal compositions of size-fractionated surface phytoplankton communities in the Yellow Sea, *Journal of Marine Science and Engineering*, Vol. 10, No. 8, 1087.
- [25] Lee, S. H., B. K. Kim, Y. J. Lim, H. T. Joo, J. J. Kang, D. Lee, J. Park, S. Y. Ha, and Lee S. H.(2017b), Small phytoplankton contribution to the standing stocks and the total primary production in the Amundsen Sea, *Biogeosciences*, Vol. 14, No. 15, 3705.
- [26] Lee, S. H., H. T. Joo, J. H. Lee, J. H. Lee, J. J. Kang, H. W. Lee, and C. K. Kang(2017a), Seasonal carbon uptake rates of phytoplankton in the northern East/Japan Sea, *Deep-Sea Res Pt II*, Vol. 143, pp. 45-53.
- [27] Lee, Y. J.(2012), Phytoplankton dynamics and primary production in the Yellow Sea during winter and summer, Ph.D. Thesis, Inha University, Incheon, 218pp.
- [28] Lee, Y. J., J. K. Choi, S. H. Youn, and S. M. Roh(2014), Influence of the physical forcing of different water masses on the spatial and temporal distributions of picophytoplankton in the northern East China Sea, *Cont. Shelf Res.* Vol. 88, pp. 216-227.
- [29] Lee, Y. J., J. K. Choi, and J. K. Shon(2012), Phytoplankton Distribution in the Eastern Part of the Yellow Sea by the Formation of Tidal Front and Upwelling during Summer, *Ocean and Polar Research*, Vol. 34, No. 2, pp. 111-123.
- [30] Lin, C., X. Ning, J. Su, Y. Lin, and B. Xu(2005), Environmental changes and the responses of the ecosystems of the Yellow Sea during 1976-2000, *J. Mar. Syst.*, Vol. 55, pp. 223-234.
- [31] Litchman, E., C. A. Klausmeier, O. M. Schofield, and P. G. Falkowski(2007), The role of functional traits and trade-offs in structuring phytoplankton communities: scaling from cellular to ecosystem level, *Ecol. Lett.*, Vol. 10, pp. 1170-1181.
- [32] Longhurst, A.(2010), *Ecological Geography of the Sea*, Academic Press. London, UK.
- [33] 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, pp. 97-104.
- [34] Marañón, E., P. M. Holligan, R. Barciela, N. González, B. Mouriño, M. J. Pazó, and M. Varela(2001), Patterns of phytoplankton size structure and productivity in contrasting open-ocean environments. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 216, pp. 43-56.
- [35] Morán, X. A. G., I. Taupier-Letage, E. Vázquez-Domínguez, S. Ruiz, L. Arin, P. Raimbault, and M. Estrada(2001), Physical-biological coupling in the Algerian Basin (SW Mediterranean): Influence of mesoscale instabilities on the biomass and production of phytoplankton and bacterioplankton, *Deep-Sea Res. Part I-Oceanogr. Res. Pap.*, Vol. 48, pp. 405-437.
- [36] Naimie, C. E., C. A. Blain, and D. R. Lynch(2001), Seasonal mean circulation in the Yellow Sea a model-generated climatology, *Continental Shelf Research*, Vol. 21, pp. 667-695.
- [37] National Institute of Fisheries Science(2023), Annual report for Climate change Trends in fisheries, 2023, NIFS, Busan, Korea, 87pp.
- [38] Ning, X., F. Chai, H. Xue, Y. Cai, C. Liu, and J. Shi(2005), Physical-biological oceanographic coupling influencing phytoplankton and primary production in the South China Sea, *J. Geophys. Res.*, Vol. 109, C10005.
- [39] Nitani, H.(1972), Beginning of the Kuroshio. In: *Kuroshio*, edited by Stommel, H. and K. Yoshida, University of Tokyo Press, Tokyo, pp. 353-369.
- [40] Noh, J. H., S. J. Yoo, J. A. Lee, H. C. Kim, and J. H. Lee(2005), Phytoplankton in the waters of the leodo ocean research station determined by microscopy, Flow cytometry, HPLC pigment data and remote sensing, *Ocean Polar Res.* Vol. 27, pp. 397-417.

- [41] Park, K. W.(2019), Phytoplankton community structure and distribution characteristics in the northern East China Sea, Ph.D. Thesis, Pukyong National University, Busan, 163pp.
- [42] Park, K. W., M. H. Yoo, H. J. Oh, S. H. Youn, K. Y. Kwon, and C. H. Moon(2019), Distribution characteristics and community structure of picophytoplankton in the northern East China Sea in 2016-2017, Korean J. Environ Biol. Vol. 37, No. 1, pp. 216-227.
- [43] Park, Y. H.(1986), Water characteristics and movements of the Yellow Sea Warm Current in summer, Prog. Oceanog. Vol. 17, pp. 243-254.
- [44] Parsons, T. R., Y. Maita, and C. M. A Lalli(1984), Manual of Biological and Chemical Methods for Seawater Analysis, Pergamon Press: Oxford, UK.
- [45] Raven, J. R.(1998) The twelfth tansley lecture. Small is beautiful: the picophytoplankton, *Funct. Ecol.*, Vol. 12, pp. 503-513.
- [46] Revelante, N. and M. Gilmartin(1995), The relative increase of larger phytoplankton in a subsurface chlorophyll maximum of the northern Adriatic Sea. *J. Plankton Res.*, Vol. 17, pp. 1535-1562.
- [47] Round, F. E., R. M. Crawford, and D. G. Mann(1990), The diatoms. In *Biology and Morphology of the Genera*, Cambridge University Press, Cambridge, UK, p. 747.
- [48] Shim, J. H.(1994), Illustrated encyclopedia of flora & fauna of Korea. In *Marine Phytoplankton*, Ministry of Education Republic of Korea, Seoul, Republic of Korea, Vol. 34, p. 487.
- [49] Shim, J. H., H. G. Yeo, and Y. K. Shin(1991), Ecological effect of thermal effluent in the Korean coastal waters I. Significance of autotrophic nano and picoplankton in adjacent waters of Kori nuclear power plant, *J. Oceanol. Soc. Korea*, Vol. 26, pp. 77-82.
- [50] Smayda, T. J.(1978), Biogeographical meaning indicators. In: *Phytoplankton Manual* (Sournia A, ed.). United Nations Educational, Scientific, and Cultural Organization. Paris. pp. 225-229.
- [51] Son, S. H., J. Campbell, M. Dowell, S. J. Yoo, and J. H. Noh(2005), Primaryproduction in the Yellow Sea determined by ocean color remote sensing, *Mar Ecol-Prog Ser.* Vol. 303, pp. 91-103.
- [52] Tomas, C. R.(1997), *Identifying Marine Diatoms and Dinoflagellates*, Academic Press, Inc., Cambridge, MA, USA, p. 874.
- [53] Tont, S. A.(1976), Short-period climatic fluctuations: effects on diatom biomass. *Science*, Vol. 194, pp. 942-944.
- [54] Vaultot, D. and X. Ning(1998), Abundance and cellular characteristics of marine *Synechococcus* spp. in the dilution zone of the Changjiang(Yangtze River, China), *Cont. Shelf Res.* Vol. 8, pp. 1171-1186.
- [55] Venrick, E. L., J. A. McGowan, D. R. Cayan, and T. L. Hayward(1987), Climate and chlorophyll a: Long-term trends in the central north Pacific Ocean, *Science*. Vol. 238, pp. 70-72.
- [56] Wassmann, P., C. M. Duarte, S. Agusti, and M. K. Sejr(2011), Footprints of climate change in the Arctic marine ecosystem, *Glob. Change Biol.*, Vol. 17, pp. 1235-1249.
- [57] Yoder, J. A. and M. A. Kennelly(2003), Seasonal and ENSO variability in global ocean phytoplankton Chl-a derived from 4 years of Sea WiFS measurements, *Glob. Biogeochem. Cy.*, Vol. 17, 1112.
- [58] Yoon, Y. H.(2016), Spatio-temporal Fluctuation of phytoplankton size fractionation in the Uljin marine ranching area (UMRA), East Sea of Korea, *Korean J. Environ. Biol.*, Vol. 34, pp. 151-160.
- [59] Zhou, M. J., Z. L. Shen, and R. C. Yu(2008), Responses of a coastal phytoplankton community to increased nutrient input from the Changjiang (Yangtze) River, *Continental Shelf Research.*, Vol. 28, No. 2, pp. 1483-1489.

Received : 2024. 08. 08.

Revised : 2024. 08. 27.

Accepted : 2024. 08. 29.