



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

이 학 석 사 학 위 논 문

황동중국해의 위도에 따른
초미소 식물플랑크톤의
군집구조 및 다양성 변화

2021년 8월

부 경 대 학 교 대 학 원

해 양 학 과

이 하 은

이 학 석 사 학 위 논 문

황동중국해의 위도에 따른
초미소 식물플랑크톤의
군집구조 및 다양성 변화

지도교수 박 미 옥

이 논문을 이학석사 학위논문으로 제출함.

2021년 8월

부 경 대 학 교 대 학 원

해 양 학 과

이 하 은

이하은의 이학석사 학위논문을 인준함.

2021년 8월 27일



목차

List of Tables	iv
List of Figures	v
List of Appendix	ix
Abstract	x

I. 서론	1
-------------	---

II. 재료 및 방법	6
-------------------	---

2. 1. 현장 조사	6
2. 2. 물리 환경 관측	8
2. 3. 용존 무기 영양염류	8
2. 4. 광합성 색소 분석	9
2. 5. Flowcytometry 분석	10
2. 6. 16S rRNA gene 및 16S-23S rDNA Intergenic Spacer Region 분석	11

III. 결과	13
---------------	----

3. 1. 환경 요인	13
3. 1. 1. 물리 특성	13
3. 1. 2. 수괴 구분	17

3. 1. 3. 영양염 환경	18
3. 2. 초미소 식물플랑크톤의 군집 구조	21
3. 2. 1. 형광 측정을 통한 chl <i>a</i> 측정	21
3. 2. 2. HPLC를 통한 광합성 색소 분석	25
3. 2. 3. 초미소 식물플랑크톤 개체수	28
3. 3. 초미소 식물플랑크톤 다양성	30
3. 3. 1. <i>Synechococcus</i> 의 다양성	30
3. 3. 2. <i>Prochlorococcus</i> 의 다양성	32
3. 3. 3. Picoeukaryotes의 다양성	32
 IV. 토 의	 37
4. 1. 물리 화학적 특성	37
4. 2. 위도에 따른 초미소 식물플랑크톤의 특성	42
4. 2. 1. 초미소 식물플랑크톤의 색소	42
4. 2. 2. 초미소 식물플랑크톤의 개체수	48
4. 2. 3. 초미소 식물플랑크톤의 다양성	51
 V. 결 론	 61
 VI. 참고문헌	 64

VII. 부 록	93
----------------	----

국문 요약	99
-------------	----



List of Tables

Table 1. Variations of nitrogen:phosphorus ratio and Mean values in this study in September, 2020(parentheses, thermocline depth).	20
Table 2. Integrated dissolved inorganic nutrients (mM) and nitrogen:phosphorus ratio in this study in September, 2020 (NO ₃ , nitrate; NO ₂ , nitrite; NH ₄ , ammonia; PO ₄ , phosphate; DIN, dissolved inorganic nitrogen; DIP, dissolved inorganic phosphorus).	40
Table 3. Integrated chlorophyll <i>a</i> concentration (mg chl <i>a</i> m ⁻²) by water masses in September, 2020.	46
Table 4. Integrated pico-fractionated photosynthetic pigment concentration (μg m ⁻²) by water masses in September, 2020 (n.d, not detected).	47
Table 5. Integrated cell abundances of <i>Synechococcus</i> and picoeukaryotes by water mass in September, 2020.	51
Table 6. Relative percentages (%) of the <i>Synechococcus</i> (sequence proportion over 5% of the total percentage).	60
Table 7. Relative percentages (%) of the picoeukaryotes in class taxonomical level (sequence proportion over 5% of the total percentage), (n.d, not detected)	61

List of Figures

- Figure 1. Location of sampling sites for vertical profiling in northern East China Sea and Yellow Sea in September, 2020. The dashed line represents the boundary between East China Sea and Yellow Sea. The red letters show Korea Ocean Research Station (KORS), (IORS, Jeodo Ocean Research Station; GORS, Gageocho Ocean Research Station; SORS, Socheongcho Ocean Research Station).7
- Figure 2. Vertical distributions of (a) temperature , (b) salinity and (c) density in the study area in September, 2020. The white dot on the graph is the depth of the observation. 15
- Figure 3. Vertical latitudinal profiles of temperature and salinity in station E, G, S in this study (Green line, Temperature; Blue line, Salinity).16
- Figure 4. Water masses distribution along a vertical transection in September, 2020.17
- Figure 5. Vertical distributions of (a) nitrate, (b) nitrite, (c) ammonia and (d) phosphate in this study in September, 2020.19

Figure 6. Vertical distribution of (a) total chlorophyll <i>a</i> (b) size-fractionated chlorophyll <i>a</i> concentration ($\mu\text{g L}^{-1}$) in this study in September, 2020.	23
Figure 7. The bar charts shows (a) size-fractionated chlorophyll <i>a</i> concentration ($\mu\text{g L}^{-1}$) and (b) contribution (%) in the surface layer.	24
Figure 8. Chromatogram of picophytoplankton pigment in this study.	26
Figure 9. Vertical distribution of pico-fractionated pigment concentration (ng L^{-1}) in September, 2020	27
Figure 10. Cell abundances of <i>Synechococcus</i> and picoeukaryotes in this study in September, 2020.	30
Figure 11. The community composition of <i>Synechococcus</i> revealed by sequencing of 16S-23S rDNA Internal Transcribed Spacer region. The bar chart shows relative percentage of higher taxonomic groups (sequence proportion over 5% of the total percentage) belonging to <i>Synechococcus</i> clade.	31
Figure 12. Phylogenetic tree and heatmap displaying the relative percentage (%) of OTUs in surface layer. Neighbor-joining tree composed of representative sequences from each of 21 OTUs identified in this study, which is linearized assuming equal evolutionary	

rates in all lineages. Abundance of OTUs is presented by different colors in the plot to the right.34

Figure 13. Phylogenetic tree and heatmap displaying the relative percentage (%) of OTUs in subsurface chlorophyll maximum layer. Neighbor-joining tree composed of representative sequences from each of 21 OTUs identified in this study, which is linearized assuming equal evolutionary rates in all lineages. Abundance of OTUs is presented by different colors in the plot to the right.35

Figure 14. Phylogenetic tree and heatmap displaying the relative percentage (%) of OTUs in bottom layer (75 m). Neighbor-joining tree composed of representative sequences from each of 21 OTUs identified in this study, which is linearized assuming equal evolutionary rates in all lineages. Abundance of OTUs is presented by different colors in the plot to the right.36

Figure 15. All sampling data is applied by water mass division (Dark red, A water mass; Red, B water mass; Orange, C water mass; Yellow, D water mass; Green, E water mass; Violet, F water mass; Blue, G water mass).40

Figure 16. HPLC derived pigment concentrations (ng L^{-1}) and zeaxanthin:chl *a* ratio (a) in surface and (b) 20 m.45

Figure 17. Correlation between OTUs and environmental variables
belonging to the mamiellophyceae class dominant within
the picoeukaryotes group.59



List of Appendix

Appendix 1. Raw value of nitrate and phosphate concentration (μ M) in this study.	95
Appendix 2. Raw value of T chl a and Pico chl a concentration (μ g L ⁻¹) in this study.	96
Appendix 3. Raw value of cell abundances ($\times 10^4$ cells mL ⁻¹) in this study.	96
Appendix 4. Raw value of photosynthetic pigment concentration (ng L ⁻¹) in this study.	97
Appendix 5. Raw value of photosynthetic pigment concentration (ng L ⁻¹) in this study.	97
Appendix 6. Raw value of photosynthetic pigment concentration (ng L ⁻¹) in this study (n.d, not detected).	98

Latitudinal Distribution of Picophytoplankton Community Structure and
Diversity in the Northern East China Sea and Yellow Sea in September
2020.

Ha Eun Lee

Department of Oceanography, The Graduate School,
Pukyong National University

Abstract

Picophytoplanktons (<2–3 μm), composed primarily of photosynthetic prokaryotes (*Prochlorococcus*, *Synechococcus*) and picoeukaryotic phytoplankton, play essential roles as primary producers in diverse marine systems. It is well known that these picophytoplankton groups are abundant in global marine environment, and *Prochlorococcus* spp. accounts for more than half of the total primary production in the upper layer of oligotrophic marine environment. Recent studies reported increasing trends for the biomass and contribution of picophytoplankton groups in the marine environment of the Korea Peninsula, and further investigation and attention is needed to ascertain such trend of picophytoplankton. Furthermore, the East China Sea and the Yellow Sea, major marine regimes of the Korea Peninsula, show dynamic and complex system influenced by the fluctuating strength of Taiwan Warm Current, the Yellow Sea Warm Current, the Yellow Sea Bottom Cold Water, coastal currents of Korea and China, and Kuroshio Branch

Current. These different water masses varies with time and season impacting regional physical environment as well as the productivity and species composition of phytoplankton. Thus, it is essential to understand the connection between community structure and distribution of picophytoplankton and surrounding environmental characteristics. Based on the water temperature observed during the study period, seven different water masses were identified, and the community structure and diversity of picophytoplankton were analyzed for those different water masses. *Synechococcus* and picoeukaryotes showed high abundance and high diversity in the relatively large water masses of euphotic zone of Yellow Sea and YSCW. In thermocline formed around 30 m in the Yellow Sea also showed high biomass and high diversity despite its relatively small water mass. This suggests that the thermocline formed in the warmer season may play an important function influencing the changes in the community structure and diversity of picophytoplankton. In particular, the size-fractionated chlorophyll concentrations showed relatively high contributions to the total chlorophyll concentration which suggest that picophytoplankton possessing broad spectrum of ecophysiological characteristics are may be rich in clade/OTUs allowing them to adapt to environmental changes. In addition, the appearance of low-salinity species OTU due to the formation of low salinity in the surface water mass of the Yellow Sea due to the influence of low-salinity water in Changjiang diluted waters suggests that an increase in summer rainfall and freshwater discharge may affect the diversity of picophytoplankton communities.

I. 서론

한반도 주변해인 황해와 동중국해 북부수역은 지난 1982-2006년 사이에 전 지구적 평균보다 빠르게 수온이 증가하고 있음이 보고되었다(Belkin 2009). 하계에는 장강 저염수가 표층을 따라 확장하며 동중국해와 황해의 수온 증가에 영향을 주는 것으로 나타났다. 실제로 1968-2018년 사이에 한반도 주변해의 표층수온은 전 지구 평균에 비해 2.5 배 높은 증가를 나타냈음이 발표되었다(Han and Lee 2020). 또한 미래의 온실가스에 의해 해수온의 상승과 연동되는 성층 강화로 표층수온의 원격상관이 강화 될 것으로 예측되며, 한반도 주변해를 포함한 광역적 수온변동 시나리오를 제시했다(Cai *et al.* 2018). 동중국해의 환경변화 현상과 미래예측 연구는 한반도 주변해의 생태계 변화 가능성을 나타내고 있다(Wu and Wang 2021).

중국대륙의 강으로부터 바다로 유출되는 담수량은 평균 $1,800 \times 10^9 \text{ m}^3 \text{ yr}^{-1}$ 이며, 장강으로부터는 $930 \times 10^9 \text{ m}^3 \text{ yr}^{-1}$ 의 담수가 유출된다(Zhang 1999). 장강으로부터 유출되는 담수는 7월에서 10월 사이에 전체의 70-80%가 유출되고 있다. 이와 같은 담수의 유출은 동중국해와 황해의 계절별 염분 분포에 매우 중요한 영향을 미치며 장강하구 뿐 아니라 제주도 인근 해역까지 영향을 줄 수 있다(Bai *et al.* 2014; 박 등 2018; Tan and Cai 2018). 장강 저염수 이동과 관련된 해파리의 이동을 예측하기 위해 입자 추적 모델과(Moon *et al.* 2010), 삼협댐 건설 전과 후의 담수 및 부유물질 배출량 변화

의 연구가 있었다(Chen *et al.* 2008; Xu and Milliman 2009).기후변화에 따른 장강 유역의 강수량 변화는 장강 유역과 동중국해의 다양한 환경 및 생태계의 변화 동력을 제공할 것이라는 모델 연구가 생태계 변화를 예측할 수 있는 배경지식을 제공하고 있다(Yang *et al.* 2021).

황해는 동중국해의 북쪽에 위치하고 있으며 발해만을 포함한 총 면적은 380,000 km²이며 평균 수심은 44 m인 대륙붕으로 구성된 천해 바다이다(Wikipedia). 황해의 중앙수역의 표층도 하계에는 장강 저염수의 확장에 영향을 받게 된다(Chen 2009). 황해도 동중국해와 같이 기후변화 및 자연적/인위적 환경변화가 빠르게 진행되는 Large Marine Ecosystem (LMEs)으로 분류된다(Belkin 2009). 황해의 연안 환경은 간척사업이 활발히 진행되며 국가적 이슈화의 중심에 놓였다. 시화방조제와 새만금 방조제 건설의 환경적 문제들이 보고가 되었으며(유 등 2006; 김 등 2009), 방조제 건설에 따른 환경변화를 다양한 관점에서 살펴보는 연구들이 진행되고 있다(Lee *et al.* 2015; Ryu *et al.* 2014). 황해 저층냉수대를 포함한 중앙 수역의 연구는 한국해양과학기술원의 기관 주요사업으로 수행되어 연구 결과들을 발표하였다(Jang *et al.* 2013; Kang *et al.* 2013). 이들 연구는 황해 저층냉수대 수온약층과 밀도약층의 변화와 조석작용, 요각류의 수직이동을 다루었다. 국립 수산과학원은 황해 정선관측조사의 일부 정점에서 저층냉수대를 포함한 기초 환경을 모니터링 하고 있다(<http://www.nifs.go.kr/kodc/index.kodc>).

동중국해는 서태평양에서 가장 넓은 대륙붕이 펼쳐진 주변해로서

하계 일차생산력이 높아 전통적으로 동북아 3국(한국, 중국, 일본)의 주요 어장 역할을 해왔다(Zhang *et al.* 2014). 그러나 2009년 삼협댐 건설이 완공되며 인위적 수문조절이 이루어짐에 따라 삼협댐 건설 전과 후의 장강의 담수 및 부유물질 배출량의 변화에 대한 연구 결과들이 발표되었다(Edmond *et al.* 1985; Chen *et al.* 2006; Xu and Milliman 2009). 2000년 이후 동중국해 북부해역에서 하계 장강 저염수 유출에 따른 군집 구조와 다양성 변화에 대한 연구들이 진행되었으며(Noh *et al.* 2005; Guo *et al.* 2014; Sun *et al.* 2018), 한국해양과학기술원은 산사댐 건설로 인한 남해(동중국해)의 해양환경연구 1단계 최종보고서를 발간하였다(2011), 국립수산 과학원은 정선해양관측 자료를 국가해양자료센터(KODC)에 수집한 후 센터의 설립 목적에 맞게 자료의 QA/QC를 거쳐 배포하고 있다(<http://www.nifs.go.kr/kodc/index.kodc>).

황해에서의 위도별 환경 및 생태계 특성 연구는 연안 수역을 대상으로 많은 환경변화와 피해보상 연구가 있었다. 황해의 광역적 연구로는 수괴에 따른 초미소 식물플랑크톤의 생체량 분포와 결정요인의 계절별 특성에 대한 연구가 있었다(Lee *et al.* 2014). 황해는 동중국해와 접하고 있어 황해저층냉수대의 남북이동에 대해 수년간의 관측 결과를 보고하였다(장 등 2007). 또한 위성자료를 활용하여 광역적 생태계 변화 특성을 살펴보았다(Shin *et al.* 2017). 정지궤도 해색 탑재체(GOCI) 자료 활용을 위한 일차생산력 추정방법 비교가 황해 전체 수역을 대상으로 초기 연구를 진행하였다(박과 유 2010). 황해 저층 냉수대에서 영양염 축적과정의 순환에 대한 중요

한 연구도 있었다(Jang *et al.* 2013; Guo *et al.* 2020). 또한 황해에서 시공간적인 초미소 식물플랑크톤의 성장과 섭식 연구는 식물플랑크톤 군집과 다양성 연구에 새로운 시각을 제공하였다(Guo *et al.* 2014). 황해의 동쪽 수역에서 초미소 식물플랑크톤의 생체량 연구가 있었으며(Lee *et al.* 2012), Choi and Noh(2019)는 동중국해 북부 수역에서 *Synechococcus* 배양체를 통해 20 개 clade의 다양성 분포를 밝혔다. 또한 Picoeukaryotes의 다양성 연구를 통해 많은 정보가 산출되었다(Yang *et al.* 2020). 황해의 생태계 변화 메커니즘에 관련된 연구들로는 동물플랑크톤과 바람에 의한 난류가 동물플랑크톤의 시공간적 분포에 미치는 영향(Tanaka 2019), 위성을 이용한 초미소 식물플랑크톤 일차생산력 모델(Liang *et al.* 2017), 초미소 식물플랑크톤 생체량과 수온 관계에 대한 원격탐사(Liu *et al.* 2019) 등의 연구를 들 수 있다.

다양한 환경 및 기후변화로부터 동중국해와 황해의 생태계 변화에 미치는 영향을 이해하기 위해서는 환경변화에 연동되는 메커니즘의 이해가 필요하다. 특히 하계 장강 plume의 변동에 따른 생태계 구조 및 다양성 반응은 미래 기후 변화에 대응하기 위한 필수적 정보를 포함하고 있어 장기적 계획과 단계적 접근이 필요하다(Milliman 1997; Humborg *et al.* 1997; Guo *et al.* 2014).

이 연구는 2020년 9월 1회의 남북 관측선 조사이나, 초미소 식물플랑크톤의 군집구조와 다양성 등 다양한 세부 주제에 대해 살펴보고자 하였다. 이러한 과정을 통하여 황동중국해의 하계 저염수 거동이 초미소 식물플랑크톤 생태계에 미치는 영향에 대해 다양한

방법과 관점을 통해 접근하고자 하였다. 이는 황동중국해의 환경 변화에 따른 식물플랑크톤 군집 구조와 다양성 변화의 이해를 제고하기 위한 과정이라 생각한다. 또한 앞으로 지속적으로 변화 할 황동중국해의 환경과 생태계 변화를 추적할 수 있는 기초 자료와 정보를 제공하기 위한 과정으로 생각할 수 있다.



II. 재료 및 방법

2. 1. 현장 조사

본 연구는 동중국해 북부와 황해중부 해역을 포함한 광역해역에서 환경특성과 이에 반응하여 나타나는 식물플랑크톤의 군집 및 다양성의 연동 과정 파악을 위해 2020년 9월 9일부터 13일까지 현장조사가 진행되었다. 연구 해역은 이어도, 가거초, 소청초 종합해양과학기지과 가장 가까이에 있는 3개 정점을 선정하고 위도별로 9개 정점에서 한국해양과학기술원의 온누리호를 이용하여 조사를 실시하였다(Fig. 1). 채수는 10 L Niskin Bottle을 이용하였고, 표층에서 바닥 깊이까지 표준 수심 및 Subsurface Chlorophyll Maximum (SCM)층에서 진행하였다.

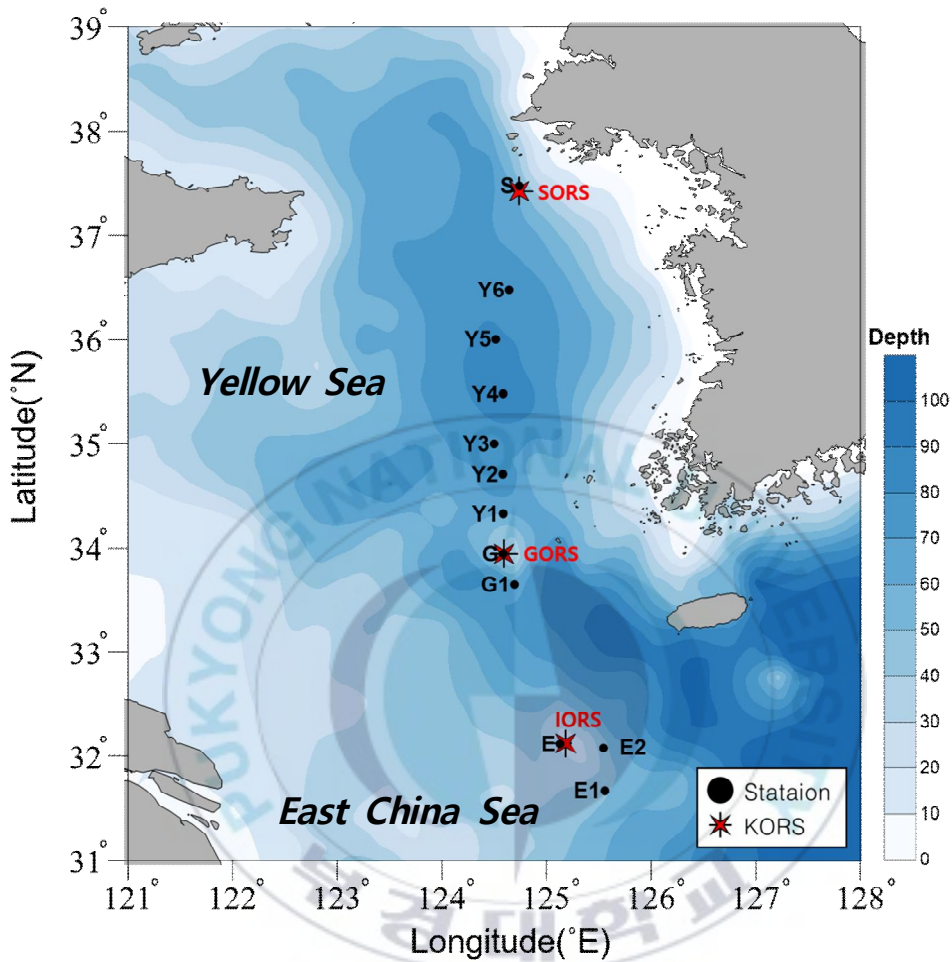


Figure 1. Location of sampling sites for vertical profiling in northern East China Sea and Yellow Sea in September, 2020. The dashed line represents the boundary between East China Sea and Yellow Sea. The red letters show Korea Ocean Research Station (KORS), (IORS, Jeodo Ocean Research Station; GORS, Gageocho Ocean Research Station; SORS, Socheongcho Ocean Research Station).

2. 2. 물리 환경 관측

수층별 기초 해양 환경의 관측을 위해 CTD (Sea-Bird Electronics, USA)를 이용해 관측을 실시하였다. CTD에 탑재된 각종 센서를 통해 CTD가 하강할 때 얻어진 수온, 염분, 형광, 밀도, 산소 농도, PAR (Photosynthetically Active Radiation) 값을 얻었다. 현장 관측 후 데이터 가공은 Sea Data Processing을 이용하여 각 수층 평균값을 계산하였으며 수심 1 m 간격의 자료를 산출하였다. 수심별로 나타낸 등고선 그래프는 Ocean Data View v4.7.8 program 을 이용하여 작성하였다.

2. 3. 용존 무기 영양염류

용존 무기 영양염류는 표준수심에서 채수한 해수 10 mL를 450℃에서 6 시간 동안 태운 25 mm GF/F 여과지(Whatman, Germany)에 여과하여 10 mL의 분석용 시료를 준비하였다. 시료는 분석 전까지 -80℃ 초저온냉동고에 보관하였다. 용존 무기 영양염류 분석은 영양염 자동분석기 (Smartchem 200; AMS alliance, France)를 이용 질산염, 아질산염, 암모니아, 인산염을 분석하였다.

2. 4. 광합성 색소 분석

10-AU Fluorometer 분석

표층에서 total, 20 μm 이하, 10 μm 이하, 3 μm 이하로 분급하였으며, 나머지 수심에서는 total, 3 μm 이하로 size-fraction 하여 색소분석용 시료를 준비하였다. 준비된 시료 0.5 L를 25 mm GF/F 여과지(Whatman, Germany)에 여과하였고, 여과지는 2 mL cryogenic vial에 넣어 -80°C 초저온냉동고에 보관하였다.

시료 여과지는 95%아세톤 6 mL에 넣은 뒤 5 분간 저온의 상태에서 초음파 분쇄 후 호일로 감싸 20 시간 이상 4°C 로 냉장 보관하여 색소를 추출하였다. 추출된 시료는 0.2 μm PTFE Syringe filter (Hyundai micro, Korea)를 이용하여 이물질 제거한 후 10-AU Fluorometer (Turner designs, United States)를 이용 측정하였다(Arar and Collins 1997).

High-Performance Liquid Chromatography 분석

3 μm pore size Polycarbonate 여과지(GVS, United States)를 통과한 1.5 L의 해수 시료를 47 mm GF/F 여과지(Whatman, Germany)로 여과하여 분석 전까지 -80°C 초저온냉동고에 보관하였다. 분석하기 전 여과지는 동결 건조를 실시하였다. 추출은 95 % 아세톤을 4 mL 씩 넣은 뒤 5 분간 저온의 상태에서 초음파 분쇄를 실시한 후 호일로 감싸 24 시간 동안 4°C 에서 냉장 보관하여 추출을 진행하였다. 추출된 시료는 0.2 μm PTFE Syringe filter (Hyundai micro, Korea)를 이용하여 20 mL

scintillation vial에 4 mL 여과한 후 이 중 1 mL을 갈색 amber vial에 담고 증류수 400 μ L을 넣은 뒤, 고성능 액체 크로마토그래피 (High-Performance Liquid Chromatography; Shimadzu, Japan)를 이용하여 광합성 색소를 분별하고, 농도를 정량화 하였다. 색소의 분별은 C8 컬럼 (Waters, United States)을 이용한 역상크로마토그래피 방법을 사용하였고, 정량은 PDA detector (Shimadzu SPD-M20A, Japan)를 이용하여 440 nm의 크로마토그램을 이용하였다(Zapata *et al.* 2000). Peak 분석은 표준 색소와 retention time을 비교한 후 색소별로 진행 하였다. 주요 색소로 Fucoxanthin (Fuco), 19'-hexanoyloxyfucoxanthin (Hex-fuco), Zeaxanthin (Zea), Chlorophyll *b* (Chl *b*), Peridinin (Perid), 19'-butanoyloxyfucoxanthin (But-fuco), Alloxanthin (Allo), Divinyl Chlorophyll *a* (DV-Chl *a*)를 분석하였다.

2. 5. Flowcytometry 분석

초미소 식물플랑크톤의 개체수 측정은 Flow Cytometer (유세포 분석기; Agilent technologies, United States)를 이용하였다. 해수 1 mL를 40 μ m 나일론 망에 여과한 후 NovoCyte Flowcytometer System을 이용하여 *Synechococcus*, *Prochlorococcus* 및 picoeukaryotes로 나누어 분리 계수하였다(Marie *et al.* 2000).

2. 6. 16S rRNA gene 및 16S-23S rDNA Intergenic Spacer Region 분석

초미소 식물플랑크톤의 다양성은 16S ribosomal RNA gene 및 16S-23S rDNA Internal Transcribed Spacer (ITS)의 염기서열을 분석하였다. 채수한 샘플 0.3 L를 0.2 μ m supor PES 막 여과지(Pall Corporation, UK)에 여과하여, 1 mL의 STE 완충용액(100 mM NaCl, 10 mM Tris-HCl, 1 mM EDTA, pH 8.0)과 함께 2 mL cryovial에 넣고 -80°C에 냉동보관 하였다.

DNA 추출은 Somerville *et al.* (1989)의 방법을 참조하였다. 초미소 식물플랑크톤의 16S rRNA gene의 V3-V4 (hypervariable) 구역의 증폭을 위하여 FO-Plastid_491F (5' -GAGGAATAAGCATCGGCTAA-3') 및 RO-Plastid_907mR (5' -CCGTCAATTCCTTTGAGTTT-3') 프라이머를 사용하였으며(Fuller *et al.* 2006), 초미소 남세균의 16S-23S rDNA ITS 증폭을 위하여 ITS-F (5'-GGATCACCTCCTAACAGGGA G-3') 및 ITS-R (5'-GGACCTCACCTTATCAGGG-3') 프라이머를 이용하였다(Choi *et al.* 2013). 증폭된 PCR 산물은 AMPure XP beads (Beckman Coulter, United States)를 이용하여 정제하였다. Indexing PCR을 통해 각 시료별로 Barcode primer를 합성하여(Kozich *et al.* 2013) 반응이 끝난 산물은 동일한 방법으로 2차 정제를 실시하였으며, 정제된 산물의 정량을 위해 Nanodrop 1000 spectrophotometer (Thermo Scientific, United States)를 이용하였다. 마지막으로 모든 PCR 산물이 동일한 양이 되도록 하나로 모은 후 천랩(Chunlab, Kor

ea)의 Illumina MiSeq 2 × 300 PE platform을 이용하여 염기서열을 얻었다.

얻어진 염기서열은 Choi *et al.* (2013) 의 연구에 인용된 기법을 사용하여 분석하였다. 염기서열 분석은 Mothur 프로그램을 이용하였으며(Schloss *et al.* 2009), 표준분석프로토콜(http://www.mothur.org/wiki/MiSeq_SOP)의 분석 과정을 따랐다(Kozich *et al.* 2013). 각 시료에서 얻어진 염기서열의 개수는 진핵성 초미소 식물플랑크톤에서는 3,355에서 59,174까지 나타났고, 원핵성 초미소 식물플랑크톤에서는 4,093에서 43,031까지 나타났다. 염기서열 숫자에 따른 시료 간 차이를 최소화하기 위해 각각 최소값인 3,355 및 4,093으로 시퀀스를 재추출하여 시료 간 reads 수를 동일하게 한 후 이후의 분석을 진행하였다. 하나의 operational taxonomic units (OTUs)는 98% 이상의 유사한 시퀀스를 클러스터링하여 분류하였다.

Ⅲ. 결과

3. 1. 환경요인

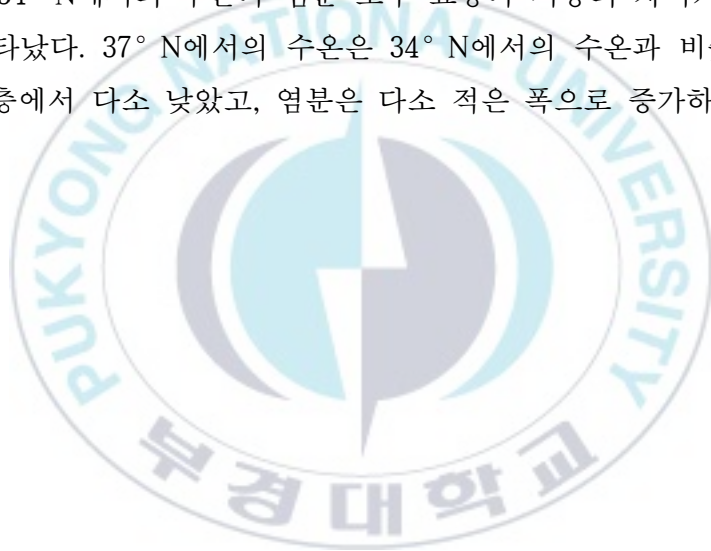
3. 1. 1. 물리 특성

동중국해와 황해의 표층 수온은 각각 24.34~26.14℃와 21.67~23.69℃의 범위를 나타냈다(Fig. 2a). 수온의 수직분포는 동중국해에서 21.77~26.14℃의 변화를 나타냈으며, 황해에선 수심 30 m 이하에서 나타난 8.89~19.90℃의 저수온 수괴로 인해 수온의 수직변화가 뚜렷하였다. 저위도인 동중국해에서 성층이 약화된 형태를 보였으며, 황해의 고위도 정점으로 갈수록 성층이 강화되어 표층과 저층간의 수온 차이가 뚜렷하였다.

동중국해의 표층 염분은 30.18~31.76, 황해의 표층 염분은 25.49~31.65 범위를 나타냈다(Fig. 2b). 염분의 수직분포는 동중국해에서 30.18~33.55로 나타났고, 황해는 25.49~33.48로 비교적 표층과 저층의 염분 차이가 크게 나타났다. E2 정점에서 Y2 정점까지 수심 20 m 이내에서 타 해역에 비해 염분이 낮았다. 특히 장강 하구와 인접한 G1 정점은 수심 6 m 이내에서 28.99에 이르는 낮은 염분의 수괴가 관측됐다.

조사 해역의 밀도약층은 수온약층과 비슷한 구조적 특성을 보였고, 낮은 염분을 보이는 곳을 따라 밀도가 낮게 형성되었다(Fig. 2c).

위도별 대표 정점인 과학 기지 수역의 수온과 염분의 수직 프로파일을 Fig. 3에 나타냈다. 32° N에서는 표층과 저층간의 수온차이가 뚜렷하지 않았으며, 염분은 표층에서 낮고, 저층에서 높게 나타났다. 34° N에서의 수온과 염분 모두 표층과 저층의 차이가 뚜렷하게 나타났다. 37° N에서의 수온은 34° N에서의 수온과 비슷하였으나 표층에서 다소 낮았고, 염분은 다소 적은 폭으로 증가하였다.



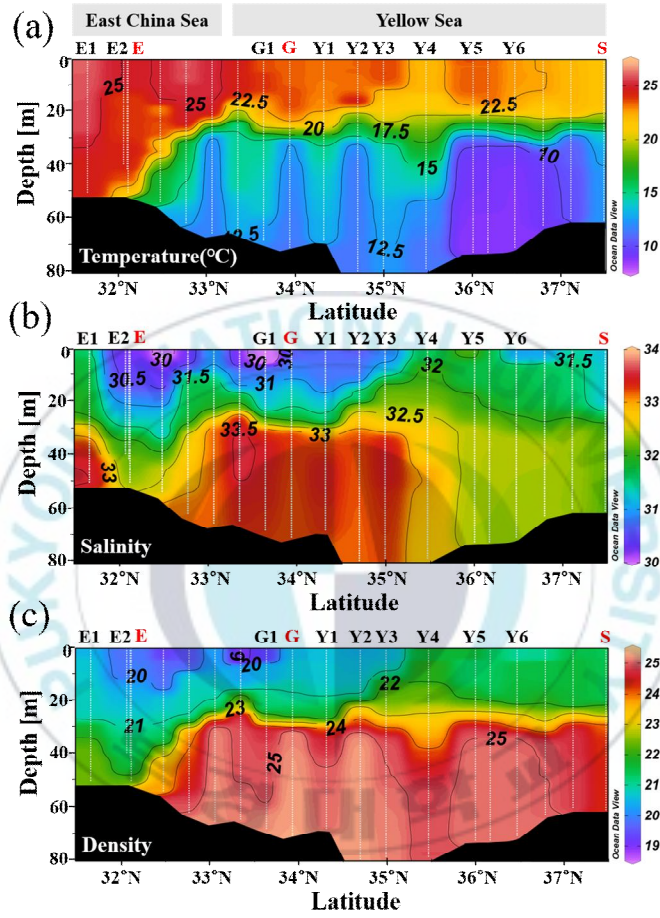


Figure 2. Vertical distributions of (a) temperature , (b) salinity and (c) density in the study area in September, 2020. The white dot on the graph is the depth of the observation.

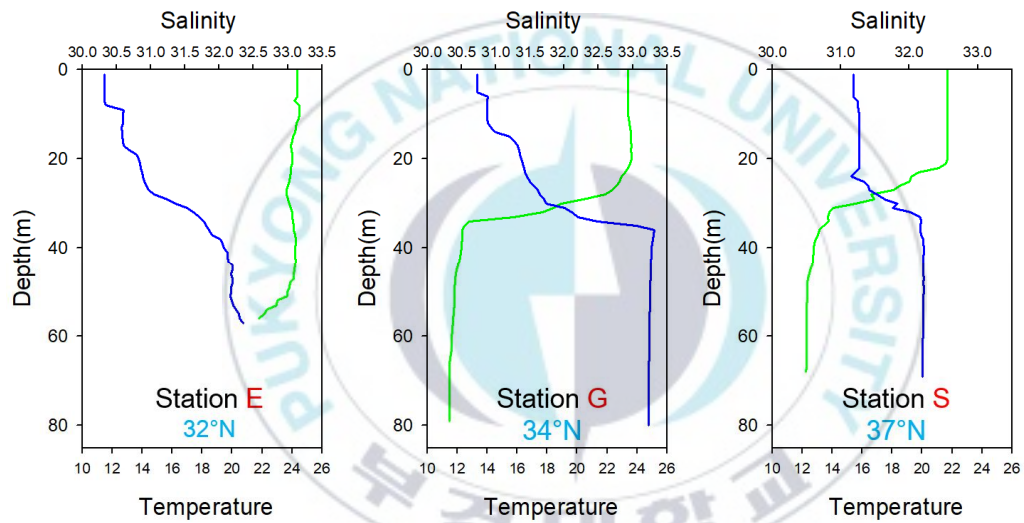


Figure 3. Vertical latitudinal profiles of temperature and salinity in station E, G, S in this study (Green line, Temperature; Blue line, Salinity).

3. 1. 2. 수괴 구분

CTD로 관측한 수온자료를 이용하여 황해와 동중국해를 7 개의 수괴로 구분하여 나타냈다(Fig. 4). 이어도 기지 오른 편 수역에 위치한 A 수괴의 전 수심 평균 수온은 $25.17 \pm 0.86^{\circ}\text{C}$ 로 가장 높았고, 이어도 기지 수역이 $24.07 \pm 0.30^{\circ}\text{C}$ 로 B 수괴로 구분 되었다. A와 B 수괴는 뚜렷한 성층이 형성되지 않은 것으로 나타났다.

C는 황해 가장 남단에서 Y6 정점까지 수심 20 m 내외의 고수온을 나타낸 수괴이며 Y4, Y6 정점에서 감소된 수온의 수괴를 D로 구분하였다. E 수괴는 황해에 형성된 수온약층을 의미하며, 그 아래로 G 수괴인 황해 저층냉수대가 나타났다. F 수괴는 소청초 기지 수역으로 비교적 성층이 약화되어 얇은 수심까지 다소 낮은 수온이 나타났다.

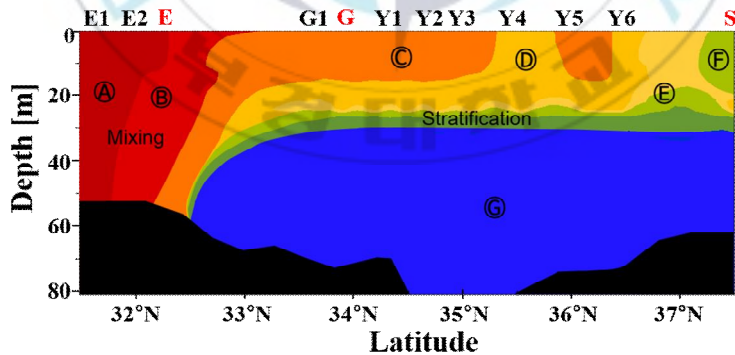


Figure 4. Water masses distribution along a vertical transection in September, 2020.

3. 1. 3. 영양염 환경

본 연구해역의 용존 무기 영양염의 농도는 표층에서 질산염 $0.38\sim 2.96\ \mu\text{M}$, 아질산염 $0.043\sim 0.371\ \mu\text{M}$, 암모니아 $0.52\sim 1.28\ \mu\text{M}$, 인산염 $0.02\sim 0.27\ \mu\text{M}$ 의 범위를 보였다(Fig. 5). 질산염은 표층에서 전 정점 평균 $1.56\ \mu\text{M}$ 로 나타났으나 저층으로 갈수록 $9\ \mu\text{M}$ 이상의 높은 농도를 보였다. 인산염도 표층보다 저층에서 높아 질산염과 비슷한 수직 분포로 나타났다. 아질산염은 다른 용존 무기 영양염류에 비하여 매우 낮은 농도를 보였지만 조사해역의 저위도 정점에서 상대적으로 높은 농도를 띠었다. 암모니아는 Y2 정점에서 상대적으로 높았으나 나머지 해역에서는 편차가 크지 않았다.

DIN:DIP 비는 동중국해에서 표층 평균 41로 높고, 저층으로 갈수록 14로 감소하는 형태를 나타냈다(Table 1). 황해는 표층 평균 26이며, 저층으로 갈수록 10으로 감소하는 형태로 나타나 동중국해에 비해 DIN:DIP 비가 낮았다.

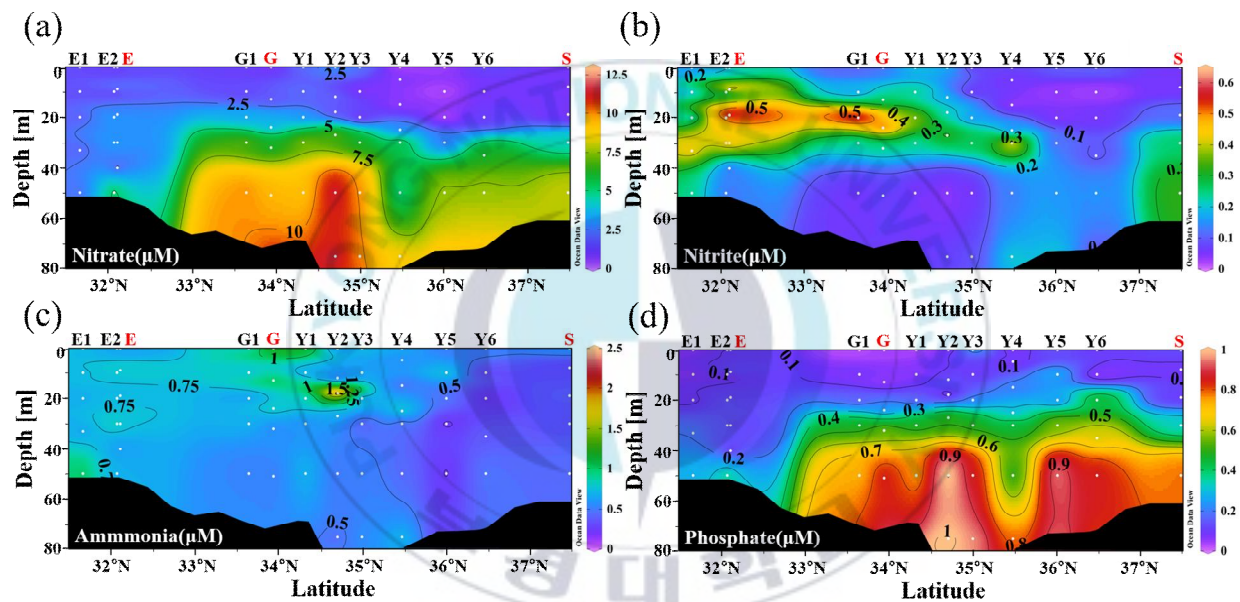


Figure 5. Vertical distributions of (a) nitrate, (b) nitrite, (c) ammonia and (d) phosphate in this study in September, 2020.

Table 1. Variations of nitrogen:phosphorus ratio and Mean values in this study in September, 2020(parentheses, thermocline depth).

Depth (m)	E1	E2	E	G1	G	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6	S	Mean
0	29.5	15.9	79.2	61.8	16.6	93.2	61.1	9.0	5.5	4.2	16.2	9.2	33.46±30.22
10	27.6	24.1	17.5	20.0	33.4	42.3	15.0	8.7	3.7	1.5	22.3	10.7	18.9±11.54
20	24.3	21.0	36.3	23.1	16.0	20.9	43.5	4.0	9.1	1.7	3.2	10.0	17.76±12.59
30	10.3	15.2	21.4	(15.5)	(10.0)	(16.3)	(13.9)	(12.7)	(13.2)	(4.3)	(9.9)	(13.6)	13.02±4.03
50	8.0	14.4	20.4	14.3	10.5	12.7	11.0	11.8	10.0	7.9	8.9	10.2	11.68±3.34
75				12.7	11.6		11.2	10.3	11.1	9.9	11.6		11.21±0.85

3. 2. 초미소 식물플랑크톤의 군집구조

3. 2. 1. 형광 측정을 통한 chl *a* 측정

표층에서 Tchl *a* 농도의 전 정점 평균값은 $0.97 \pm 0.51 \mu\text{g L}^{-1}$ 를 나타냈다(Fig. 6a). E2 정점의 표층 Tchl *a* 농도는 $2.40 \mu\text{g L}^{-1}$ 로 가장 높은 반면 Y5 정점의 표층 Tchl *a* 농도는 $0.3 \mu\text{g L}^{-1}$ 로 가장 낮았다. 동중국해 전 정점의 Tchl *a*를 심을 수직 적분한 후 정점별 평균 평균한 농도는 $0.86 \pm 0.59 \mu\text{g L}^{-1}$, 황해는 $0.55 \pm 0.40 \mu\text{g L}^{-1}$ 를 나타냈다.

표층에서 Pico chl *a* 농도의 전 정점 평균값은 $0.51 \pm 0.36 \mu\text{g L}^{-1}$ 로 나타났다(Fig. 6b). E2 정점의 표층 Pico chl *a* 농도는 $1.55 \mu\text{g L}^{-1}$ 로 가장 높은 반면 Y5 정점에서의 표층 Pico chl *a* 농도는 $0.22 \mu\text{g L}^{-1}$ 로 가장 낮았다. 동중국해 정점의 전 수심을 평균한 Pico chl *a* 농도는 $0.44 \pm 0.41 \mu\text{g L}^{-1}$ 로 나타났고, 황해 정점의 전 수심을 평균한 Pico chl *a* 농도는 $0.30 \pm 0.23 \mu\text{g L}^{-1}$ 로 나타났다.

Tchl *a* 와 Pico chl *a* 모두 동중국해는 표층에서 높고, 수심이 깊어짐에 따라 감소하였으나, 황해는 성층이 발달하며 수온약층 수심에서 높은 chl *a* 농도가 나타났다.

식물플랑크톤의 크기별 기여도를 알아보기 위하여 표층에서 size-fraction 여과를 실시하여 전 정점의 크기별 엽록소 농도 평균 값을 비교한 결과, 20 μm 이상 $0.14 \pm 0.18 \mu\text{g L}^{-1}$, 20~3 μm 는 $0.29 \pm 0.14 \mu\text{g L}^{-1}$, 3 μm 이하는 $0.55 \pm 0.36 \mu\text{g L}^{-1}$ 의 값을 보였다 (Fig. 7a). 이를 토대로 크기별 chl *a* 의 기여도를 비교하였다(Fig. 7b). 표층에서의 소형 식물플랑크톤(>20 μm) 점유율은 전 정점 평균 $13.2 \pm 12.8\%$ 로 식물플랑크톤 중 가장 낮은 기여도를 보였다. 미소 식물플랑크톤(20~3 μm) 점유율은 전 정점 평균 $31.2 \pm 8.4\%$ 로 두 번째로 높은 기여도를 보였다. 초미소 식물플랑크톤의 점유율은 전 정점 평균 $55.6 \pm 11.6\%$ 로 식물플랑크톤 중 가장 큰 기여도를 보였다. 크기별 식물플랑크톤 기여도는 소형 식물플랑크톤의 점유율이 높은 S 정점을 제외하고 정점 간에 유사한 양상을 보였고 연구 해역 내에서 가장 큰 점유율을 차지하는 것은 초미소 식물플랑크톤으로 나타났다.

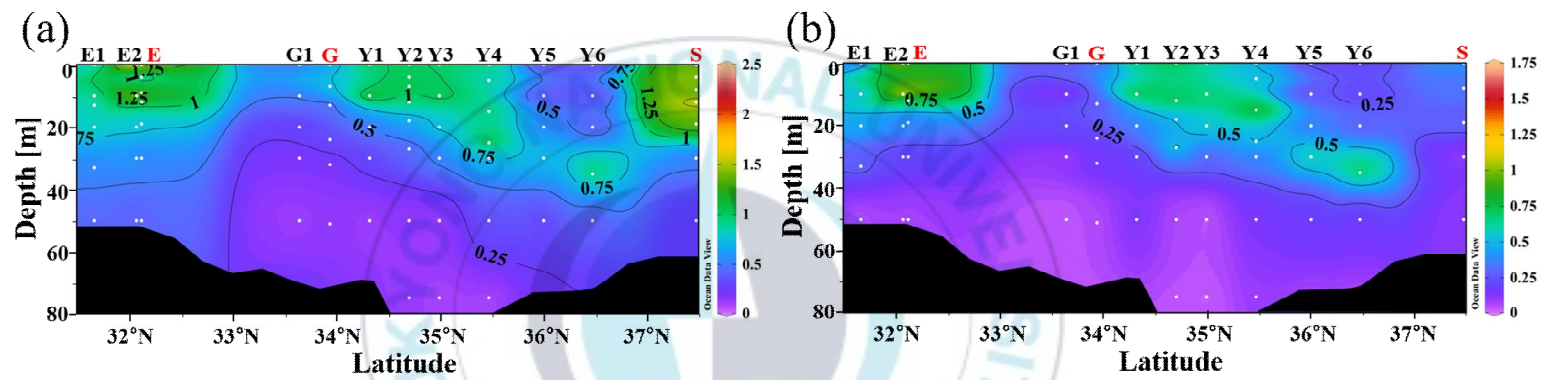


Figure 6. Vertical distribution of (a) total chlorophyll *a* (b) size-fractionated chlorophyll *a* concentration ($\mu\text{g L}^{-1}$) in this study in September, 2020.

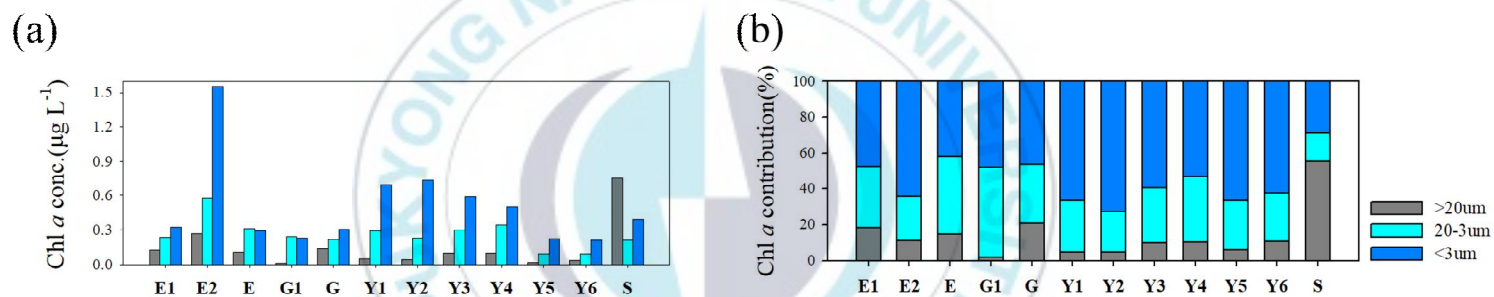


Figure 7. The bar charts shows (a) size-fractionated chlorophyll *a* concentration ($\mu\text{g L}^{-1}$) and (b) contribution (%) in the surface layer.

3. 2. 2. HPLC 를 통한 광합성 색소 분석

초미소 식물플랑크톤의 군집 조성을 파악하기 위하여 3 μm 로 size-fraction하여 HPLC 분석을 진행하였다(Fig. 9).

녹조류(Chlorophyte)의 지시색소인 Chlorophyll *b* (Chl *b*)는 조사해역에서 가장 높은 농도로 검출된 색소로 각 정점의 시료채집 수심 농도의 평균값을 전 정점으로 평균한 농도가 $58.29 \pm 56.29 \text{ ng L}^{-1}$ 로 나타났다. Chl *b*는 E2 정점의 표층에서 245.64 ng L^{-1} 로 가장 높은 농도를 나타냈다.

착편모조류(Prymnesiophyte)의 지시색소로 알려진 19'-hexanoylox yfucoxanthin (Hex-fuco)는 각 정점의 시료채집 수심 농도의 평균값을 전 정점으로 평균한 농도가 $29.63 \pm 29.10 \text{ ng L}^{-1}$ 로 나타났으며 동중국해보다 황해에서 더 높은 농도를 나타냈다.

Zeaxanthin (Zea)는 *Synechococcus*, *Prochlorococcus* 및 일부 녹조류, 홍조류의 지시색소로서 *Prochlorococcus* 등 다른 cyanobacteria가 검출되지 않은 현 조사에서는 *Synechococcus*의 생체량을 나타낸다고 볼 수 있다. Zea는 각 정점의 시료채집 수심 농도의 평균값을 전 정점으로 평균한 농도가 $29.19 \pm 44.06 \text{ ng L}^{-1}$ 로 나타났으며 Y2 정점의 표층에서 218.96 ng L^{-1} 로 가장 높았다.

규조류(Diatom)의 지시색소(marker pigment)인 Fucoxanthin (Fuco)는 각 정점의 시료채집 수심 농도의 평균값을 전 정점으로 평균한 농도가 $39.09 \pm 36.10 \text{ ng L}^{-1}$ 로 나타났으나 Y4 정점의 30 m

에서 193.57 ng L^{-1} 의 농도를 보이며 해역에 따라 큰 편차를 보였다.

Alloxanthin (Allo)는 Cryptophyte의 지시색소로 각 정점의 시료채집 수심 농도의 평균값을 전 정점으로 평균한 농도가 $10.03 \pm 9.89 \text{ ng L}^{-1}$ 로 낮은 농도를 보였지만 E2 정점의 표층에서 49.54 ng L^{-1} 로 높았다. Pelagophyte의 지시색소인 19'-butanoyloxyfucoxanthin (But-fuco)는 각 정점의 시료채집 수심 농도의 평균값을 전 정점으로 평균한 농도가 $7.58 \pm 6.24 \text{ ng L}^{-1}$ 로 매우 낮은 농도를 보였으며 정점 간 변화는 뚜렷하지 않았다. Dinoflagellate의 지시색소인 Peridinin (Perid)는 각 정점의 시료채집 수심 농도의 평균값을 전 정점으로 평균한 농도가 $0.30 \pm 1.27 \text{ ng L}^{-1}$ 로 매우 낮은 농도를 보였으며 수온약층이 형성된 황해의 수심 30 m 에서 검출되었다. *Prochlorococcus*의 지시색소인 Divinyl Chlorophyll *a* (DV-Chl *a*)는 검출되지 않았다(Fig. 8).

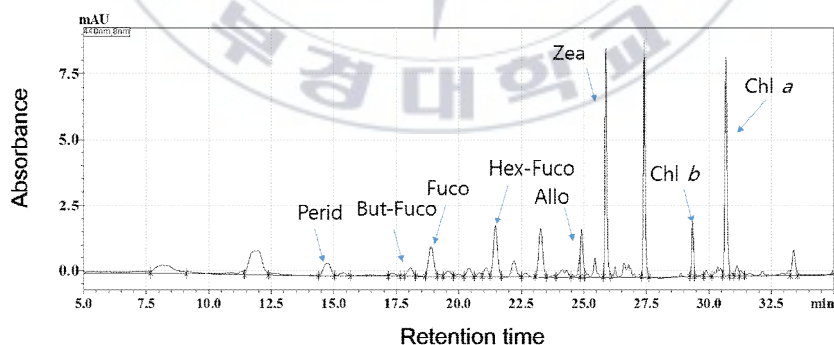


Figure 8. Chromatogram of picophytoplankton pigment in this study.

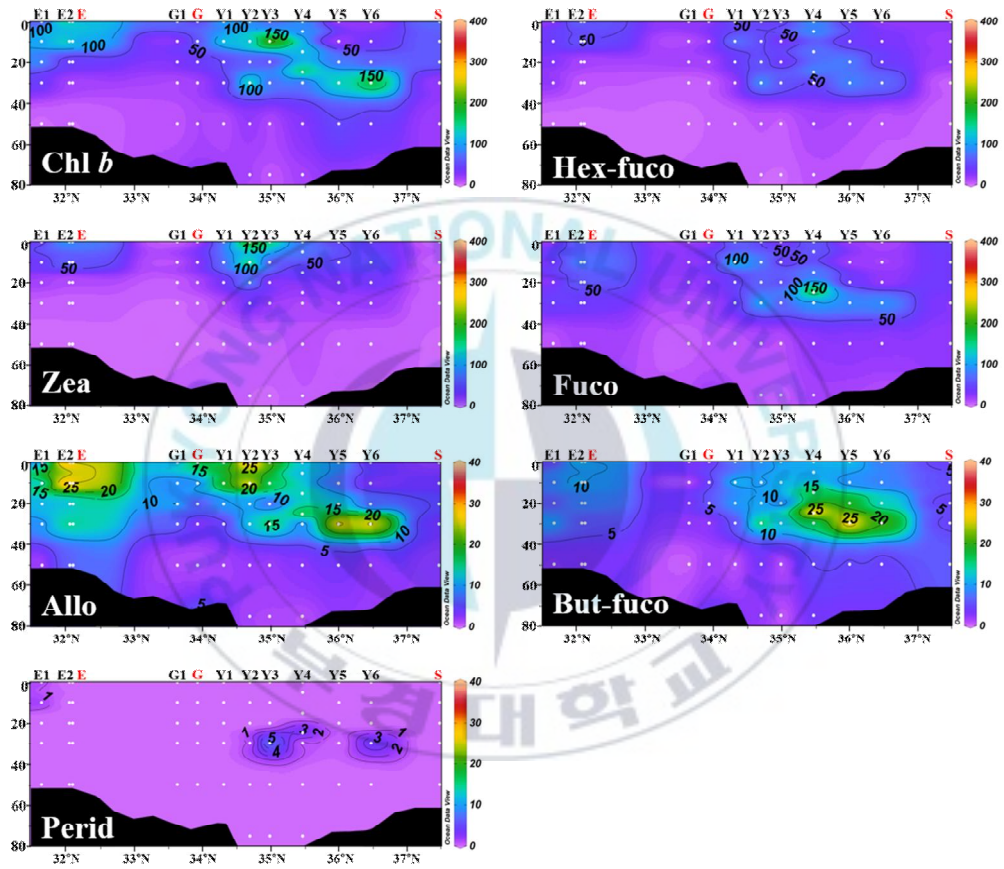


Figure 9. Vertical distribution of pico-fractionated pigment concentration (ng L⁻¹) in September, 2020

3. 2. 3. 초미소 식물플랑크톤 개체수

초미소 식물플랑크톤의 개체수를 파악하기 위하여 Flowcytometry를 통해 *Synechococcus*와 *Prochlorococcus* 및 picoeukaryotes의 계수를 실시하였고(Fig. 10), *Prochlorococcus*의 분류군이 검출되지 않았다.

*Synechococcus*는 표층에서 전 정점 평균 $1.45 \pm 1.48 \times 10^5$ cells mL^{-1} 로 나타났고, E2 정점의 표층에서 5.24×10^5 cells mL^{-1} 로 가장 높았다. Picoeukaryotes는 표층에서 전 정점 평균 $7.2 \pm 5.2 \times 10^3$ cells mL^{-1} 로 나타났고, E2 정점의 표층에서 2.14×10^4 cells mL^{-1} 로 가장 높은 개체수로 나타났다. *Synechococcus*는 표층에서 가장 높은 개체수를 보인 반면 picoeukaryotes는 Y3 정점의 수심 10 m에서 3.73×10^4 cells mL^{-1} 로 가장 높았다.

*Synechococcus*와 picoeukaryotes는 각각 수심 30 m, 50 m 이하에서 개체수가 급격히 낮아짐과 동시에 정점에 따른 변화가 적었다.

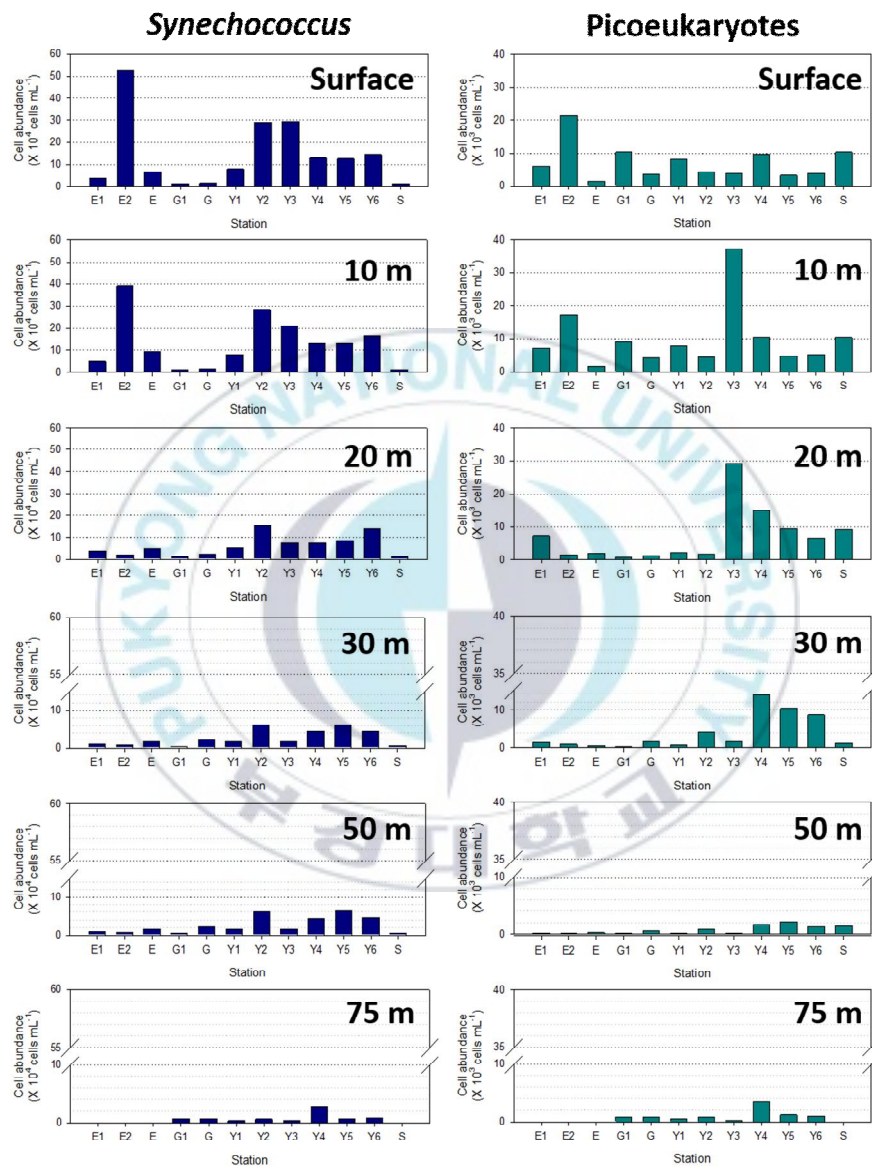


Figure 10. Cell abundances of *Synechococcus* and picoeukaryotes in this study in September, 2020.

3. 3. 초미소 식물플랑크톤의 다양성

3. 3. 1. *Synechococcus*의 다양성

조사 본 연구해역에서의 초미소 식물플랑크톤의 다양성 파악하기 위하여 NGS 분석을 수행한 결과, *Synechococcus*로 분류된 OTU는 22 개이다. 분류된 OTU 중에서 조사 기간 중 하나의 시료에서 최소 5% 이상의 빈도를 보인 OTU를 선별한 결과 *Synechococcus*의 7~9 개의 OTU가 선별되었다.

선별된 *Synechococcus*에 속한 clade의 전 정점의 전 수심 평균값을 비교하였을 때 clade II의 점유율이 $65.9 \pm 22.3\%$ 로 가장 높았다 (Fig. 11). Clade II는 저위도에 속한 정점의 전 수심에서 가장 높은 점유율을 보였다. 또한 clade II는 수심이 깊어짐에 따라 감소하는 경향을 보였다. Clade I의 전 정점의 전 수심 평균 점유율은 $8.4 \pm 11.7\%$ 로 나타났고, clade IV의 전 정점의 전 수심 평균 점유율은 $9.6 \pm 13.7\%$ 로 나타났다. 동중국해에서는 비교적 clade II에 비하여 낮은 점유율을 나타냈지만 고위도로 올라갈수록 수심 30 m 이하에서 clade I과 IV가 더 높은 점유율을 나타냈다.

Clade IX는 동중국해 정점의 전 수심 평균 점유율은 $4.6 \pm 2.4\%$ 로 나타났고, 황해 정점의 전 수심 평균 점유율은 $2.2 \pm 2.8\%$ 로 감소하였다. 그 밖에 clade VI와 III은 전 해역에서 낮은 점유율로 나타났다.

고 clade VII은 E2 정점의 표층에서만 출현하였다.

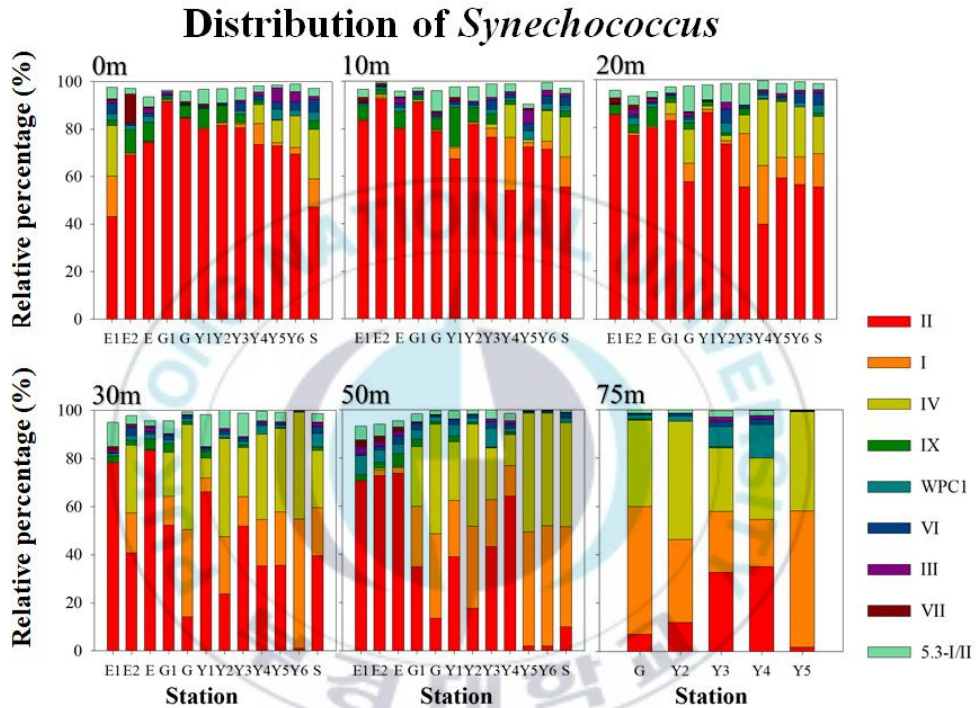


Figure 11. The community composition of *Synechococcus* revealed by sequencing of 16S-23S rDNA Internal Transcribed Spacer region. The bar chart shows relative percentage of higher taxonomic groups (sequence proportion over 5% of the total percentage) belonging to *Synechococcus* clade.

3. 3. 2. *Prochlorococcus*의 다양성

조사 본 연구해역에서의 초미소 식물플랑크톤의 다양성 파악하기 위하여 NGS 분석을 수행한 결과, *Prochlorococcus*로 분류된 OTU는 6 개로 최고 점유율이 2% 미만으로 매우 낮은 점유율을 보였다.

3. 3. 3. Picoeukaryotes의 다양성

Picoeukaryotes는 시료별로 25~64 개의 OTU를 가졌고, 하나 이상의 시료에서 최소 5% 이상의 빈도를 보인 OTU를 선별한 결과, 시료별로 14~20 개 OTU가 검출되었고 10 개의 강으로 분류되었고 종 수준에서 21 개로 분류되었고 21 개 OTU의 표층, SCM층, 저층에서의 분포의 변화를 Fig. 12~14에 나타내었다.

Mamiellophyceae는 *Ostreococcus* sp., *Micromonas pusila*, *Micromonas* sp., *Bathycoccus* sp.와 유사한 OTU가 포함되어 전 정점의 전 수심 평균 점유율이 $35.0 \pm 23.8\%$ 로 전 해역에서 가장 높았다.

Prymnesiophyceae는 전 정점의 전 수심 평균 점유율이 $28.6 \pm 16.0\%$ 로 해역에서 두 번째로 많은 시퀀스 비율을 차지하였다. Prymnesiophyceae는 *Phaeocystis globosa*, *Braarudosphaeraceae* sp.와 유사한 OTU로 분류되었는데 이들은 각각 동중국해와 황해에 분포하며 서로 대비되는 양상을 띠었다.

Cryptophyceae는 *Pyrenomonadales* sp.와 유사한 OTU로 분류되었는데 최대 점유율이 Y2 정점의 수심 50 m에서 32.8%로 나타났으나 매우 낮았다. Dinophyceae는 *Amphidinium testudo*와 유사한 OTU로 분류되었는데 최대 점유율이 E1 정점의 수심 30 m에서 29.3%의 높은 점유율 나타났으나 다른 정점에서는 매우 낮았다.

Ochrophyta에 속하는 OTU는 7 개로 나타났고, 위도에 따른 차이는 미미하였다. Ochrophyta는 저층에서 일부 정점에 한해 출현하였고, 이 중 Y2 정점의 수심 75 m 에서 출현한 *Cymatosiraceae* sp.가 최대 20.5%로 Ochrophyta 중에서 가장 높은 점유율로 나타났다. 그 밖에 *Chrysophyceae-Synurophyceae* sp., *Chrysophyceae* sp.는 저위도인 동중국해에서 출현하였고, *Nannochloropsis* sp., *Bacillariophyceae* unclassified는 황해 저층에서 일부 출현하였다. 이외의 분류군은 정점 및 수심에 따라 기회적으로 출현하는 모습이 나타났다. 또한 표층에 비하여 저층으로 갈수록 출현 분류군 수가 감소하여 비교적 낮은 다양성을 보였다.

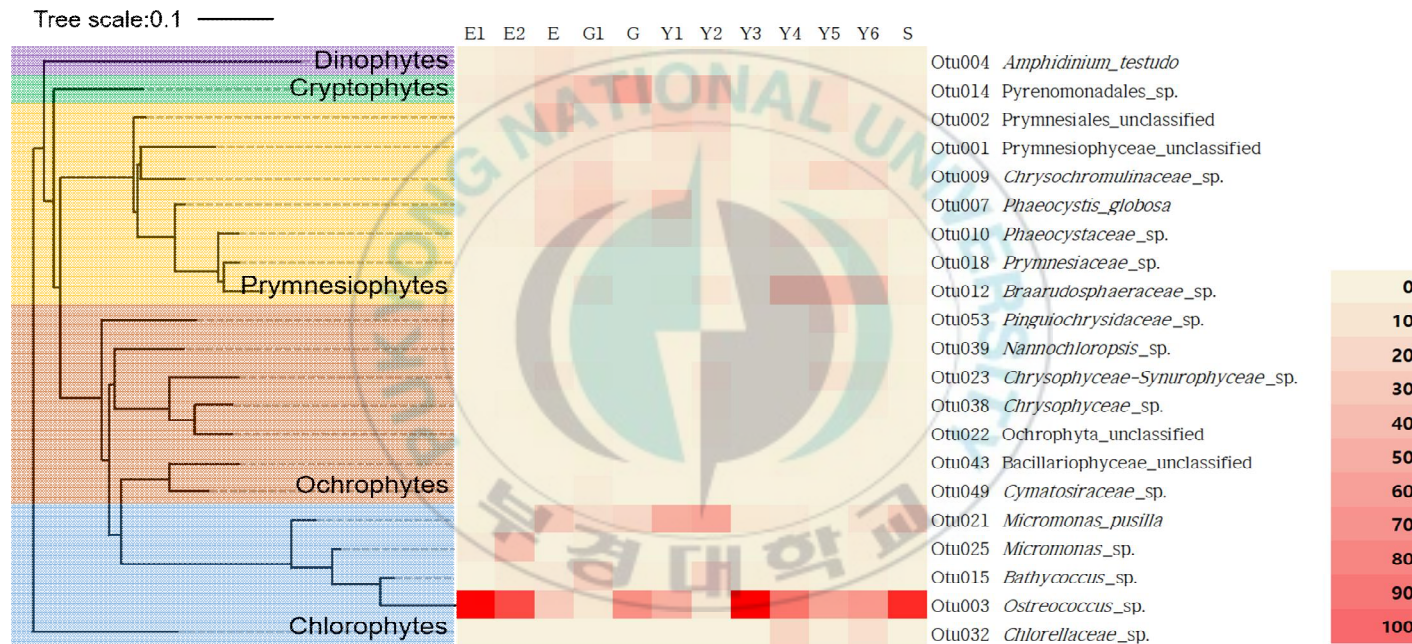


Figure 12. Phylogenetic tree and heatmap displaying the relative percentage (%) of OTUs in surface layer. Neighbor-joining tree composed of representative sequences from each of 21 OTUs identified in this study, which is linearized assuming equal evolutionary rates in all lineages. Abundance of OTUs is presented by different colors in the plot to the right.

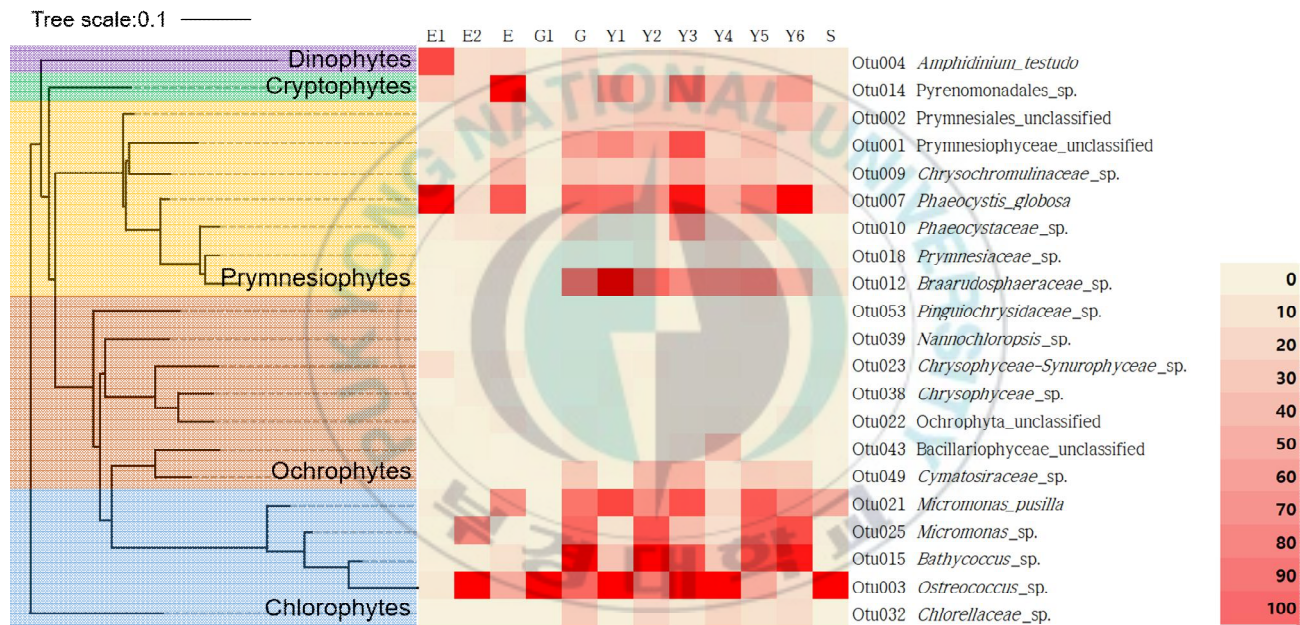


Figure 13. Phylogenetic tree and heatmap displaying the relative percentage (%) of OTUs in subsurface chlorophyll maximum layer. Neighbor-joining tree composed of representative sequences from each of 21 OTUs identified in this study, which is linearized assuming equal evolutionary rates in all lineages. Abundance of OTUs is presented by different colors in the plot to the right.

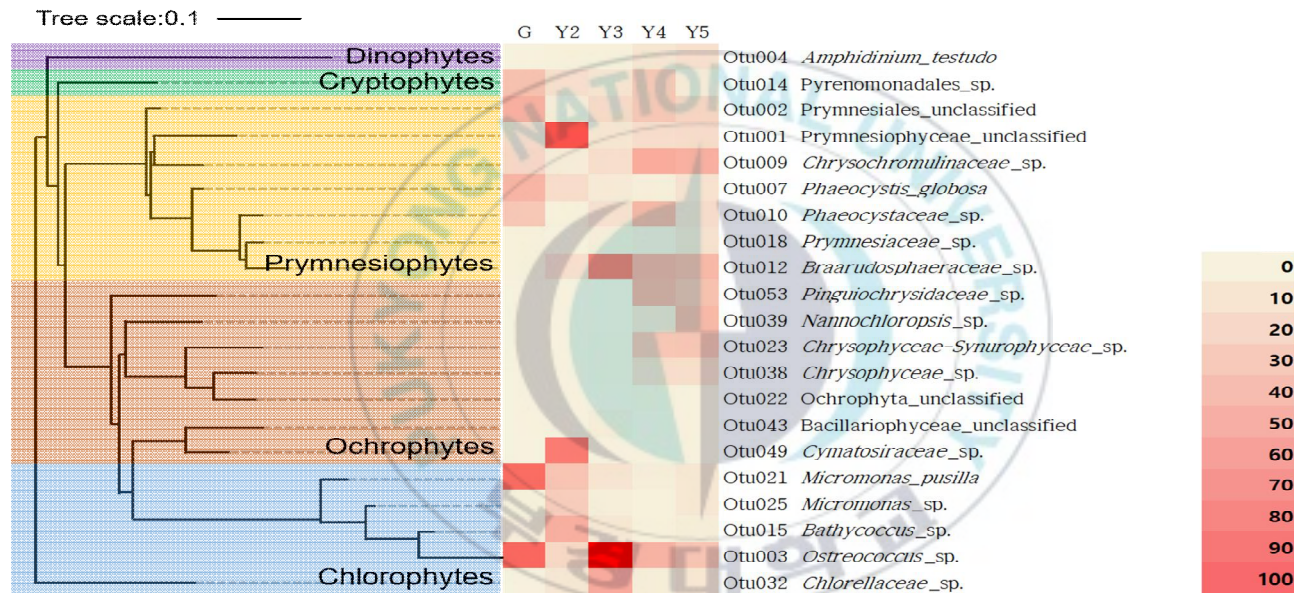


Figure 14. Phylogenetic tree and heatmap displaying the relative percentage (%) of OTUs in bottom layer (75 m). Neighbor-joining tree composed of representative sequences from each of 21 OTUs identified in this study, which is linearized assuming equal evolutionary rates in all lineages. Abundance of OTUs is presented by different colors in the plot to the right.

IV. 토의

2020 년 9 월 수행된 조사 해역을 7 개의 수괴로 구분지어 각 수괴별 환경 특성과 초미소 식물플랑크톤의 군집 구조와 다양성을 비교하였다. 특히 초미소 식물플랑크톤이 전체 식물플랑크톤에서 기여하는 바를 파악하여 해역에서 일차생산자로서 작용하는 역할과 중요성에 대해 고찰해보고자 하였다.

이를 위해 광합성 색소를 통해 수괴별로 강(class) 수준에서의 초미소 식물플랑크톤의 군집 구조를 비교하고, 유전자 분석을 통해 종(species) 수준에서 초미소 식물플랑크톤의 다양성에 기여한 분류군에 대해 파악하였다. 이를 통해 조사 중 초미소 식물플랑크톤이 의존한 환경 요인에 대해 면밀히 고찰해보고자 하였다.

4. 1. 물리·화학적 특성

황해와 동중국해는 대마 난류, 황해 난류, 황해저층냉수, 우리나라 및 중국의 연안수, 쿠로시오 지류가 복잡하게 얹혀 다양한 수괴를 형성하며 각 수괴별로 가지는 물리·화학적 특성이 서로 달라 식물플랑크톤의 생산력과 군집 구조에 영향을 준다(Edmond *et al.* 1985; Gong *et al.* 1996; Chen *et al.* 2008, 2009). 따라서 물리, 화학적 요인에 의한 영향을 명확히 하기 위해 해역을 이루는 수괴를 구분하여 비교하는 것이 필요하다.

본 연구에서는 황해와 동중국해에서 관측된 수온 자료를 이용하여 주변과 수온의 차이가 형성된 곳을 기준으로 7개의 수괴로 구분하였다. 저위도의 동중국해 정점에서는 성층이 파괴되어 혼합이 이루어진 형태로 고온, 고염의 수괴가 형성되었는데 이어도 기지 수역을 중심으로 차이를 보였다. A 수괴는 가장 높은 수온을 나타낸 수괴로 B와 C 수괴보다 1℃ 가량 높았다. 이는 A 수괴의 위치가 이어도 기지에서 동경 1°의 거리가 있어 B와 C 수괴와 뚜렷하게 구분된 것으로 보인다. 반면 황해 G1 정점부터 저염 수괴가 나타났는데 조사 전 해당 해역을 통과한 수차례의 태풍의 영향에 의해 황해 남부가 동중국해에 비해 장강의 영향을 크게 받은 것으로 보인다. 황해는 수심 30 m에 강한 수온약층이 형성되었고 저층에 수온이 매우 낮은 황해저층냉수대가 분포하였는데 이는 하계에 세력이 강화하는 저층냉수대의 특성이 잘 반영된 것으로 여겨진다. 가장 고위도인 소청초 기지 수역은 비교적 성층이 덜 형성되어 다른 수괴에 비해 표층에도 낮은 수온이 형성되었다. 이와 같이 수온이 수괴를 차이를 이끌었고 해역의 환경에 영향을 준 것으로 보인다.

따라서 수괴의 차이에 따라 본 연구를 통한 수괴별 적분 자료를 Fig. 15의 기준으로 기술하고자 한다. 용존 무기 영양염의 농도를 수괴별로 비교한 결과(Table 2), 질산염과 인산염은 황해저층냉수의 영향을 받은 G 수괴에서 가장 높았다. 황해저층냉수대는 영양염이 풍부한 특성을 가지는데(Li *et al.* 2015; Duan *et al.* 2016), 표층에는 영양염이 고갈된 것과는 반대로 저층에 영양염이 풍부한 분포 특성은 표층 영양염이

식물플랑크톤의 성장에 이용됨과 동시에 황해에 형성된 수온약층이 저층의 영양염을 표층 가까이 공급하기에 어려움이 있었을 가능성이 크다. 식물플랑크톤이 사용하기 전 상태인 아질산염은 D 수괴에서 매우 낮았던 점을 제외하고 다른 수괴에서는 서로 비슷한 농도를 보였으며 암모니아 또한 수괴에 따른 편차가 미미하였는데 두 영양염류는 매우 낮은 농도로 인해 식물플랑크톤의 영양염 이용에 영향을 주지 않은 것으로 보인다. 이러한 영양염 분포를 이루게 된 공급원에 대해 고찰해보면 황해와 동중국해의 주요 영양염의 공급원 중 하나인 장강에서의 담수 유출을 고려해 볼 수 있다. 장강 저염수는 계절에 따라 차이를 보이며 하계에 가장 강화되는 특성을 지니고 있다(Zeng *et al.* 2017; Hou *et al.* 2021; Liu *et al.* 2021; Sun *et al.* 2021). 하지만 2009년 완공된 산사댐의 건설 이후 유량을 인위적으로 조절하여 담수와 부유물질의 양이 감소하게 되고, 이는 식물플랑크톤의 일차생산과 군집구조에도 영향을 주는 것으로 보고된 바 있다(Li *et al.* 2007; Wang *et al.* 2018; Wang *et al.* 2020). 본 조사에서도 장강 저염수의 영향을 받아 낮은 염분을 보인 수괴가 존재하였으나 영양염의 농도가 낮았던 점으로 보아 저염수가 확산되는 과정에서 이미 영양염이 소모된 채 황해로 도달하였을 가능성도 배제할 수 없다. 또한 수온약층인 E 수괴와 황해 저층냉수대인 G 수괴의 영양염 농도가 높은 점으로 보았을 때, 조사 중 황해 저층냉수대가 영양염 공급에 영향을 준 요인 중 하나로 사료된다.

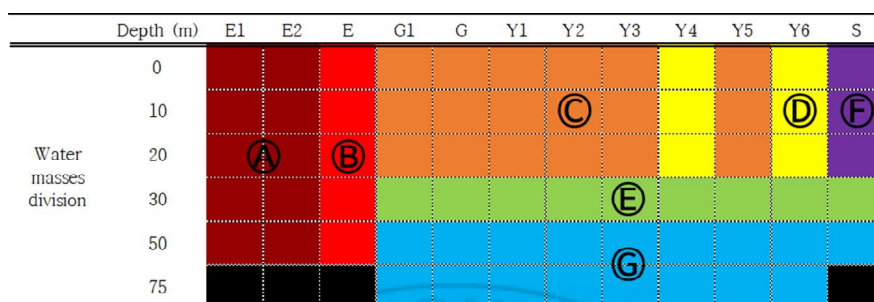


Figure 15. All sampling data is applied by water mass division (Dark red, A water mass; Red, B water mass; Orange, C water mass; Yellow, D water mass; Green, E water mass; Violet, F water mass; Blue, G water mass).

Table 2. Integrated dissolved inorganic nutrients(mM m^{-2}) and nitrogen:phosphorus ratio in this study in September, 2020 (NO_3 , nitrate; NO_2 , nitrite; NH_4 , ammonia; PO_4 , phosphate; DIN, dissolved inorganic nitrogen; DIP, dissolved inorganic phosphorus).

	A	B	C	D	E	F	G
NO_3	268.57	168.08	223.63	51.80	316.67	20.40	3033.19
NO_2	26.14	21.29	24.08	2.49	66.60	1.58	51.37
NH_4	80.84	27.90	99.10	20.52	43.07	9.64	175.02
PO_4	17.69	7.18	15.49	7.55	43.79	2.04	275.90
DIN:DIP	1872.16	1489.56	3176.64	445.54	1193.31	213.22	4084.41

한편 식물플랑크톤이 흡수할 수 있는 질소와 인의 비율은 해역에 따라서 조금씩 다르며 식물플랑크톤의 성장 조건에도 영향을 준다(Stelzer and Lamberti 2001; Chorus and Spijkerman 2020). 더불어 관측된 영양염의 상대비를 이용하여 해역 내의 영양 상태를 파악하는 데 지표로 활용하기도 한다. DIN:DIP 비는 B와 C 수괴에서 35 ± 23 , 26 ± 24 로 높았고, 황해에 위치한 수괴로 갈수록 16 이하의 비를 보였다. 황해 중앙해역에서는 나타난 DIN:DIP 비는 1990년대 이후 16:1 이상으로 증가하는 추세를 보이다 2004년 최대치를 보이며 지속적으로 증가하는 연구가 보고된 바 있다(Wei *et al.* 2015). 특히 Y1 정점이 속한 C 수괴에서 93:1에 달하는 높은 DIN:DIP 비를 보인 점은 인이 주요 제한요인으로 작용하는 장강의 특성에 의한 것으로 판단된다(Harrison *et al.* 1990; Wang *et al.* 2003; Wu *et al.* 2020). 반면 가장 낮은 DIN:DIP 비를 보인 해역은 황해 저층 냉수대에 고립되어 있는 높은 농도의 인산염을 포함하기 때문인 것으로 판단된다. 이와 같이 동중국해 북부 해역에서는 낮은 농도의 인산염에 의하여 인이 식물플랑크톤의 성장에 제한을 주는 요소로 작용되지만 황해에서는 풍부한 인산염에 의하여 질소가 제한요인으로 작용하는 것으로 유추할 수 있다.

4. 2. 위도에 따른 초미소 식물플랑크톤의 특성

4. 2. 1. 초미소 식물플랑크톤의 색소

형광 측정을 통해 밝혀낸 chl *a* 농도를 수심별로 적분하여 수괴별로 비교하였을 때(Table 3), F 수괴는 규모에 비하여 chl *a* 농도가 높았는데 20 μ m 이상의 미소 식물플랑크톤의 기여도가 크게 나타나 황해의 일부 섬들과 인접한 지리적 특성에 의해 크기가 큰 식물플랑크톤이 우점한 것으로 판단된다.

반면 Pico chl *a* 농도가 높았던 A 수괴는 고온의 해역으로 초미소 식물플랑크톤이 아열대 및 열대 환경에 주로 서식하여 크기가 큰 식물플랑크톤보다 비교적 영양염을 덜 요구할 뿐만 아니라 수온이 높은 환경을 선호하는 특성이 잘 반영된 것으로 여겨진다.

HPLC 측정을 통해 초미소 식물플랑크톤의 군집의 조성을 파악할 수 있었고 수괴별로 적분한 값을 비교하였다(Table 4). 이 중 원핵성 초미소 식물플랑크톤의 지시색소인 Zea는 가장 높은 농도를 보인 C 수괴가 두 번째로 높은 농도를 보인 A 수괴보다 2.6 배 높은 농도를 보였다. C 수괴는 *Synechococcus*의 개체수 측정 결과에서 황해의 수심 10-20 m에서 높은 개체수를 보인 것과 일치하는 점이다.

한편 Zeaxanthin 은 *Synechococcus*, *Prochlorococcus* 와 일부 Prasinophyceae 가 함유하는 색소이다(Moore *et al.* 1995). 본 조사 중 DV-Chl *a* 가 검출되지 않아 *Prochlorococcus* 의 출현 가능성을 배제하였고, *Synechococcus* 와 Prasinophyceae 의 기여를 파악하기 위해 zeaxanthin:chl *a* 의 비율을 통해 세포 고유의 zeaxanthin 함량을 진단하였다(Schlüter *et al.* 2006). 일반적으로 Prasinophyceae 는 zeaxanthin:chl *a* 의 비가 0.008~0.065 로 나타나고, *Synechococcus* 는 0.048~0.590 로 나타나 차이를 보인다(Latasa *et al.* 2004; Noh *et al.* 2005). Chl *b* 를 갖는 Prasinophyceae 의 영향과 비교한 결과(Fig. 16), *Synechococcus* 의 개체수가 높았던 표층에서는 chl *b* 와 zeaxanthin 의 농도가 모두 낮았던 정점에서 Prasinophyceae 의 영향이 컸고, chl *b* 보다 zeaxanthin 의 농도가 더 높았던 곳에서는 *Synechococcus* 의 영향이 컸다. 또한 Picoeukaryotes 의 개체수가 높았던 수심 20 m 에서는 chl *b* 보다 zeaxanthin 의 농도가 더 높았는데 마찬가지로 *Synechococcus* 의 영향이 큰 것으로 나타났다. 이는 chl *b* 를 가지면서 zeaxanthin 을 가지지 않는 이외의 분류군의 영향이 컸다는 점을 시사하고 있으며, *Synechococcus* 가 다른 picoeukaryotes 그룹에 비해 크기가 작더라도 flowcytometry 측정을 통한 결과에서도 월등히 높았던 개체수가 zeaxanthin 의 농도에 크게 기여한 것으로 보인다. 이는 같은 초미소 식물플랑크톤 중에서도 한 개체 당 환산되는 색소 농도, 탄소량 등 해역에 내 기여하는 바에 차이를 가져올 수 있음을 시사한다.

전 세계 해양에서 광합성을 하는 진핵성 초미소 식물플랑크톤은 녹조류와 착편모조류, 부등편모조류, 황갈조류 등의 기여도가 크다(Cabello *et al.* 2016). 본 연구에서도 가장 높은 색소 농도를 보인 chl *b*는 녹조류에 의한 것으로 보인다. 해양 녹조류는 연안성 및 중영양 환경에서 강한 점유율을 보인다고 알려져 있다(Cabello *et al.* 2016). 특히 Chl *b*가 G 수괴에서 가장 높았던 점은 영양염이 풍부한 황해 저층냉수의 특성이 반영된 것으로 보인다. 하지만 Zea를 제외한 타 광합성 색소 또한 모두 G 수괴에서 가장 높았는데 이는 황해 저층냉수대에 여러 picoeukaryotes 분류군으로부터 기인한 다양한 색소가 검출된 것으로 보인다. 특히 *Synechococcus*에 의한 Zea 농도와 상반된 결과로 두 분류군이 서로 다른 서식처를 선호하는 것으로 판단된다.

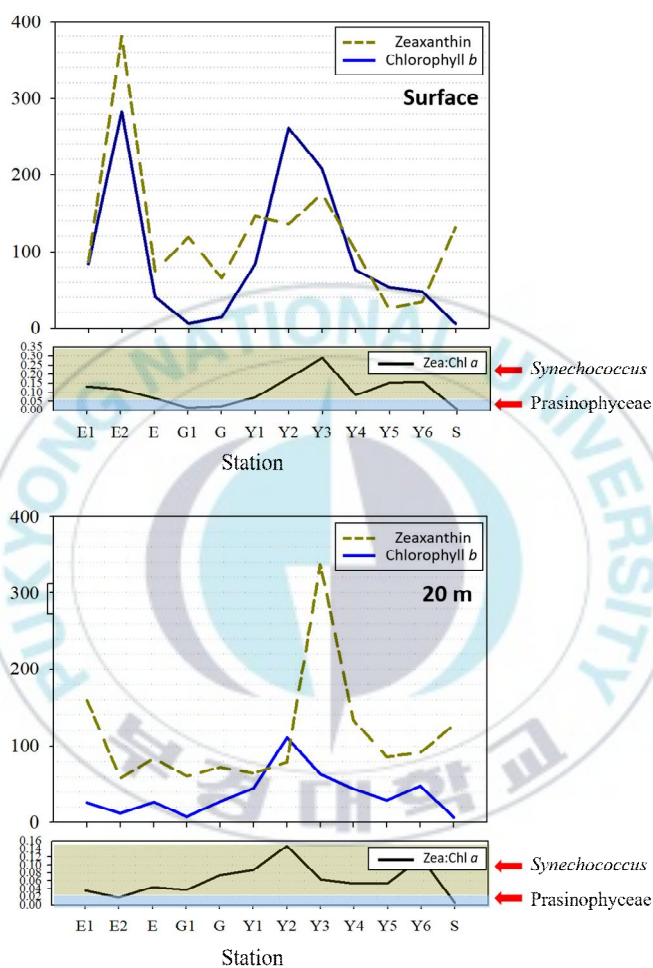


Figure 16. HPLC derived pigment concentrations (ng L⁻¹) and zeaxanthin:chl *a* ratio (a) in surface and (b) 20 m.

Table 3. Integrated chlorophyll *a* concentration (mg chl *a* m⁻²) by water masses in September, 2020.

	A	B	C	D	E	F	G
Total chl <i>a</i>	92.97	29.12	99.71	19.28	52.09	31.09	100.31
Pico chl <i>a</i>	46.87	13.38	54.91	18.53	31.57	7.08	49.61

Table 4. Integrated pico-fractionated photosynthetic pigment concentration ($\mu\text{g m}^{-2}$) by water masses in September, 2020 (n.d, not detected).

	Photosynthetic pigment ($\mu\text{g m}^{-2}$)						
	A	B	C	D	E	F	G
Perid	27.88	n.d	n.d	22.13	87.80	n.d	133.06
But-fuco	848.40	257.04	1011.71	592.20	1035.38	102.07	1856.67
Fuco	4746.30	1610.28	5445.36	2573.40	5077.12	834.05	9058.28
Hex-fuco	2917.17	618.92	4826.51	2423.98	3848.91	426.74	5656.86
Allo	1504.33	624.06	1767.14	369.12	964.20	69.69	1667.42
Zea	2879.38	610.16	7456.96	1861.12	1800.98	93.13	2644.34
Chl <i>b</i>	7151.26	1139.91	9460.95	3499.82	6439.91	1348.07	12709.26

4. 2. 2. 초미소 식물플랑크톤의 개체수

Synechococcus 와 *Prochlorococcus* 가 가진 forward light scattering, phycoerythrin 에 의한 형광특성을 이용하여 같은 Cyanobacteria 에 속하더라도 Flowcytometry 를 통해 두 속을 분리하여 개체수를 측정하는 것이 가능하다(Trask *et al.* 1982; Marie *et al.* 2000; G rikas Ribeiro *et al.* 2016).

Synechococcus 와 picoeukaryotes 의 개체수를 수심별로 적분하여 수괴별로 비교하였을 때(Table 5), *Synechococcus* 는 F 수괴에서 매우 낮았던 것을 제외하고 모든 수괴에서 높은 개체수를 보였다. 특히 C 수괴에서 가장 높은 개체수를 보인 반면 Picoeukaryotes 는 G 수괴에서 가장 높았다. 이는 광합성 색소 분석결과와도 일치이다. 특히 *Synechococcus* 는 동중국해와 황해에서 연중 내내 높은 개체수를 보이며(Jiao *et al.* 2002; Wang *et al.* 2010; Chung *et al.* 2014; Seo *et al.* 2017), picoeukaryotes 는 *Synechococcus* 의 1/10 에 해당하는 개체수를 나타낸다(Chang *et al.* 2003). 하지만 G 수괴에서 두 분류군이 비슷한 개체수를 나타낼 정도로 picoeukaryotes 가 높은 개체수로 나타났으며 이는 picoeukaryotes 가 하계 저층냉수대의 주요 그룹 역할을 하는 것으로 판단된다. Visintini *et al.* (2021)는 전 지구적 관점에서의 기후 변화 등의 시나리오를 고려하여 모델링을 통해 개체수를 예측하였을 때, *Synechococcus* 와 *Prochlorococcus* 는 꾸준히 증가하는 것과는 대조적으로

picoeukaryotes 는 감소할 것이라고 예상했다. 하지만 황해 저층에 높은 개체수를 보인 점은 picoeukaryotes 가 성층조건에서 낮은 영양염 농도와 약간의 고수온 환경을 선호하기 때문인 것으로 보인다(Li 2002; Zhao *et al.* 2013).

한편 *Prochlorococcus* 는 flowcytometry 를 통해 계수가 가능하지만 그 수가 매우 적거나 없을 때는 검출되지 않을 정도로 검출한계가 높다(Chisholm *et al.* 1988; Vaulot *et al.* 1995). 본 조사에서는 flowcytometry 에서 검출되지 않았고 이에 대한 원인은 4. 2. 3 장에서 자세히 고찰해보고자 한다.



Table 5. Integrated cell abundances of *Synechococcus* and picoeukaryotes by water mass in September, 2020.

	Cell abundance ($\times 10^{10} \text{ m}^{-2}$)						
	A	B	C	D	E	F	G
<i>Synechococcus</i>	851.08	206.43	1411.82	568.51	437.85	26.15	544.45
Picoeukaryotes	46.49	5.65	110.52	35.18	57.34	21.24	752.26

4. 2. 3. 초미소 식물플랑크톤의 다양성

Synechococcus

해양의 cyanobacteria 에 속한 *Synechococcus* 와 *Prochlorococcus* 의 생태적인 차이를 구분 짓기 위하여 16S-23S rDNA ITS 부위의 시퀀스를 이용한 분자 생물학적 연구가 활발히 이용되고 있다(Rocap *et al.* 2002). 이 두 그룹은 여러 개의 단계통군(clade)으로 구성되어 있다고 알려져 있으며, *Synechococcus* 는 현재까지 20 개 이상의 clade 가 확인되었다(Ahlgren and Rocard 2012; 최 등 2015). *Synechococcus* 는 전 세계에서 clade I, II 및 IV 가 우점하고(Zwirgmaier *et al.* 2008), 동중국해에서 열대 및 아열대 지역에 서식하는 clade II 가 주로 분포하며 clade III 은 더 따뜻한 해수에서 좁은 분포를 이룬다고 알려져 있다(Brown *et al.* 2005; Mazard *et al.* 2012; Xia *et al.* 2017). 반면 황해는 *Synechococcus* 의 다양성을 clade 수준에서 규명한 연구가 미흡하여 본 연구를 통해 황해와 동중국해 북부까지 연결된 해역의 위도별 자료가 초미소 식물플랑크톤 그룹의 다양성 규명을 위한 기초 자료로서 중요한 의미를 가진다.

Synechococcus 의 다양성을 수괴별로 비교한 결과(Table 6), 우점 그룹인 clade II 은 A~C 수괴의 평균 점유율이 $75.19 \pm 10.08\%$ 로 가장 높았고, 수온이 낮아지는 E 수괴부터 감소하였다. 반면 F 와

G 수괴에서는 clade I 과 IV 가 동시에 우점하였고, B 수괴에서는 거의 출현하지 않았다.

비우점 그룹의 clade 5.3-I/II는 C 수괴에서 $5.07 \pm 2.81\%$ 로 높았으나, 수괴 내에서의 편차가 컸다. clade IX는 B 수괴에서 $6.49 \pm 1.35\%$ 로 다른 수괴에 비하여 두 배 이상 높았다. 그 밖에 모든 수괴에서 낮은 점유율을 나타낸 clade III, VI, VII과 clade 5.3-WPC1는 수괴별 차이가 미미하였다.

본 연구에서는 고온성인 *Synechococcus* 5.1 clade II와 저온성인 I 과 IV가 서로 대비되는 현상으로 나타났다. Clade II는 연안과 외양 사이에 비교적 수온이 높은 해역에서 높은 개체수를 보인다고 알려져 있으며 clade I 과 IV는 약 10~15°C 사이의 수온에서 활발히 번성하는 것으로 알려져 있다(Zwirgmaier *et al.* 2007; Ahlgren and Rocap 2012). 본 연구에서는 고수온이 형성된 저위도 해역과 위도가 높아짐에 따라 황해저층냉수대의 영향을 받아 비교적 저수온이 형성된 고위도 해역이 서로 차이를 보였는데 이는 기존 연구로부터 밝혀진 해역의 *Synechococcus* 다양성 특성을 잘 반영하고 수온이 이들의 다양성에 영향을 준 것으로 판단된다.

이 밖에 clade IX는 전 세계에서 낮은 분포를 보이지만 일부 아열대 해역에서 염분 변화에 적응하는 능력이 있어(Zwirgmaier *et al.* 2008; Xia *et al.* 2015), 저염수가 유입된 패치와 유사한 출현 형태를 보인 것으로 판단된다. 반대로 clade III은 염도가 증가하는 해역에서 출현하여 저염 환경이 형성된 동중국해 표층보다 황해

고위도에서 급격히 증가하는 형태를 보였다. 이러한 점을 토대로 하계에는 동중국해와 황해에 장강 저염수가 영향을 주어 염분 환경의 변화를 이끌었고 *Synechococcus*의 다양성과 분포에 영향을 미칠 것으로 판단된다. 한편 소수 clade로 분류된 subcluster 5.3은 북서태평양과 지중해 등 일부 해역에서 산발적인 출현을 보이고 있어 여전히 서식 특성이 불명확하다(Mella-Flores *et al.* 2011; Ahlgren *et al.* 2014). 본 연구에서도 clade 5.3-CB5가 출현하였지만 매우 낮은 점유율을 보였다. 하지만 아직까지 드문 출현을 보이는 소수 종에 대해서는 특정 환경에 대한 지표성을 평가 가능성이 있으며 이는 원핵성 조미소 식물플랑크톤이 지닌 역할과 특성을 규명하는데 유용한 자료로 활용될 수 있으며 이에 대한 지속적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

Prochlorococcus

*Prochlorococcus*는 Flowcytometry 측정에서 미검출되었고, 지시 색소인 divinyl chlorophyll *a* 또한 모든 수괴에서 검출되지 않았다. 반면 16S-23S rDNA ITS 분석 결과에서는 0.2~0.3%의 매우 낮은 점유율이 나타났다. 하지만 1% 미만의 낮은 점유율은 시퀀스 해석 과정에서 발생할 수 있는 오차 범위로 판단되어 자료 해석에서 무시할 수 있다는 점을 고려하면 이는 *Prochlorococcus*가 출현하지 않은 것으로 보인다. *Prochlorococcus*는 대마 난류가 제주도를 지나 대한해협을 통과하여 동해로 빠져나가면서 출현을 보이지만(Xiao *et al.* 2018; Hasegawa *et al.* 2019; Zhao *et al.* 2019), 본 조사에서는 동중국해의 북부와 황해에 한하여 수행된

조사이기에 *Prochlorococcus*가 출현할 가능성이 매우 낮았다. 또한 빈영양 환경에서 높은 생체량을 가지는 특성과는 대조적으로 비교적 영양염의 농도가 풍부하였기 때문에 다른 분류군의 성장이 우선적으로 이루어졌다고 판단된다. 또한 강한 해수혼합이 발생하면 쉽게 소멸하기 때문에(Campbell and Vaultot 1993; Biller *et al.* 2015) 동중국해 수괴가 혼합되어 있었던 점도 *Prochlorococcus*가 출현할 수 없었던 요인 중 하나로 사료된다.

Picoeukaryotes

진핵성 초미소 식물플랑크톤의 다양성을 수괴별로 비교한 결과 (Table 7), 가장 우점한 Mamiellophyceae와 Prymnesiophyceae는 각각 B와 F 수괴에서 점유율이 낮아지는 경향을 보였다. Cryptophyceae는 B 수괴에서 점유율이 $17.03 \pm 7.69\%$ 로 다른 수괴에 비해 두 배 이상 높았다. Dinophyceae는 A 수괴에서 $6.05 \pm 7.91\%$ 의 점유율을 보였으나, 다른 수괴에서 2% 미만의 매우 낮은 점유율을 보였다. D와 E 수괴에서 Trebouxiophyceae와 Bacillariophyta가 다소 증가하였으나, 5% 미만으로 매우 낮은 점유율을 보였다. 그 밖에 분류군은 해역에 따른 편차가 매우 적었고, 1% 미만의 매우 낮은 점유율을 보였다. 특히 Mamiellophyceae가 연안 환경에서 녹조류의 주요 그룹으로 기여하는 점을 고려하였을 때, 본 조사에서 염기서열 분석 결과로부터 가장 높은 점유율을 차지한 Mamiellophyceae는 조사 해역이 연안 환경의 영향을 많이 받았다는 것을 의미한다. 또한 인이 제한요인으로 작용할 때 해양 녹조류가 급격한 성장을 이루는 것으로 보고된 바 있어(Maat *et al.* 2014; Guo *et al.* 2018)

16:1 이상의 DIN:DIP 비를 보였던 수심에서 인산염이 제한요인으로 작용하였고 chlorophyta가 번성할 수 있었던 것으로 사료된다. 이 중 Micromonas와 Ostreococcus속은 같은 Mamiellophyceae에 속함에도 서로 다른 분포 형태를 보였는데 이는 이들이 서로 다른 광합성 전략을 가지기 때문인 것으로 보인다(Halsey *et al.* 2014). 일반적으로 Micromonas속은 온대해양성이 아닌 해역에서 주로 서식하며, 성층화가 이루어진 해양에서 빛의 이용성을 최적화하기 위하여 단일 편모를 가지는 반면 Ostreococcus속은 온대해양에 주로 분포하여 편모를 가지지 않는다(Not *et al.* 2005; Guillou *et al.* 2004; Foulon *et al.* 2008). 특히 Ostreococcus속은 전체 정점의 20 m 이내에서 높은 점유율을 보이며 염분과 음의 상관관계를 보이고 수온과는 양의 상관관계를 보였다(Fig. 17). 이들은 광변동에 높은 민감성을 가진다고 알려져 있으며(Rodríguez *et al.* 2005; Six *et al.* 2009), Demir-Hilton *et al.* (2011)의 연구에서는 Ostreococcus속을 수온과 염분 조건에 따라 high-light adapted와 low-light adapted의 두 가지 ecotype으로 구분 지을 수 있다고 밝혔다. 본 조사에서 *Ostreococcus* sp.의 분포는 표층 가까이 번성한 high-light adapted 타입으로 보이며 기존 연구보다 낮은 수온 환경임에도 염분 조건이 더 일치하는 것으로 판단된다. 또한 Rodríguez *et al.* (2005)의 연구에서 Ostreococcus속은 무기 질소를 사용하는데 최적화된 활용 유전자를 가지고 있다는 연구를 밝힌 바 있어 높은 우점도를 보이는 곳을 따라 질산염과 암모니아가 낮은 분포를 이루는 것을 미루어 보아 bottom-up control이 작용된 것으로 보인다. 이에 따라 특히

표층과 저층의 수온차이에 의해 성층이 형성된 황해에서는 고수온의 성층 위로 *Ostreococcus*속이 높은 점유율을 차지하고, 저수온의 성층 아래로 *Micromonas*속이 높은 점유율을 차지하는 것으로 보인다. 이밖에 낮은 염분의 영향으로 *Cryptophyceae*, *Trebouxiophyceae*와 같은 저염 특성에 적응한 분류군의 증가가 해역의 환경이 연안수의 영향을 받았으며 다양한 수괴가 혼합되는 해역의 특성 탓에 이와 같은 기회종의 번성이 국지적인 해역에 한해 발생했음을 알 수 있다.



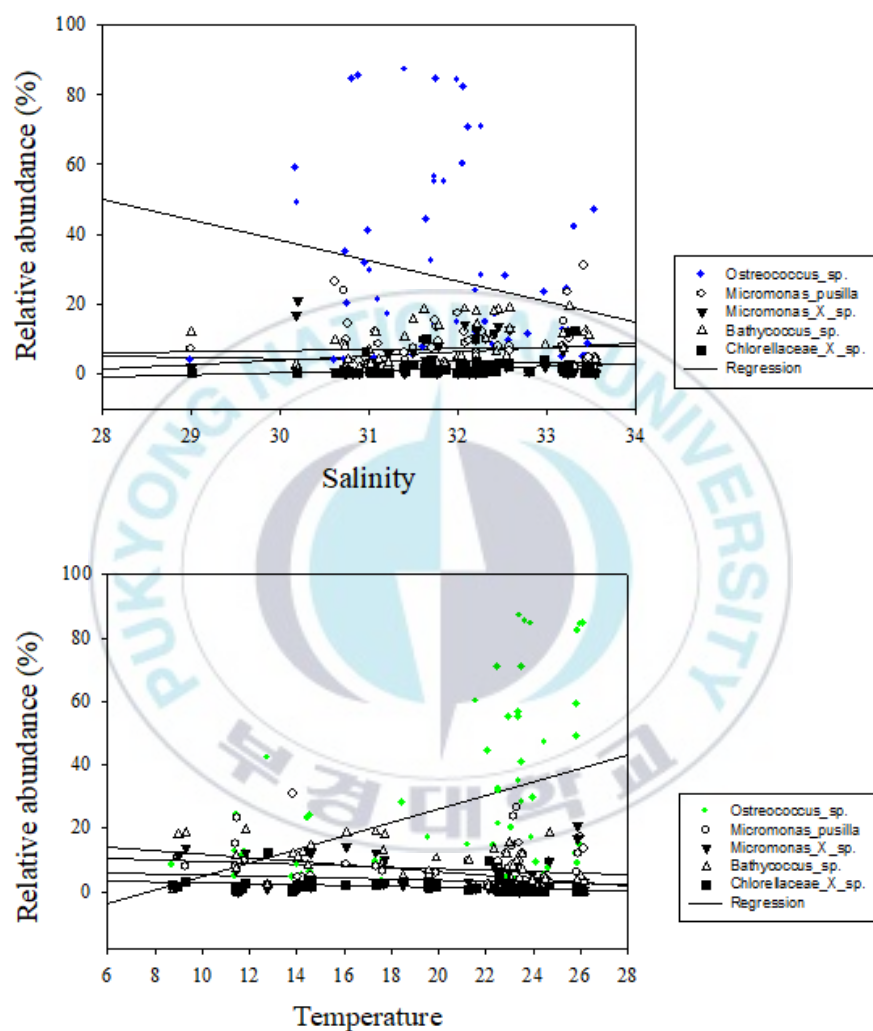


Figure 17. Correlation between OTUs and environmental variables belonging to the mamiellophyceae class dominant within the picoeukaryotes group.

착편모조류는 염기서열 분석 결과로부터 두 번째로 높은 점유율을 차지한 분류군으로 외양 생태계에서 주로 분포한다고 알려져 있으며 일반적인 하계 황동중국해의 우점 분류군으로 알려져 있다(Rilegman *et al.* 1996; Rousseau *et al.* 2007; Shih *et al.* 2019). 본 조사에서는 A 수괴에서 가장 높은 점유율을 보였는데, 남쪽으로부터 유입되는 온난한 수온의 대만 난류수괴 특성에 의해 꾸준한 성장을 이루는 것으로 여겨진다. 착편모조류 중에서도 *Phaeocystis* sp.는 황해 혼합수에서 우점하고, *Chrysochromulina* sp.는 장강 저염수의 가장자리에서 발생하여 같은 분류군 내에서도 서로 다른 요인에 의해 성장을 이루는 것으로 알려져 있다(Lin *et al.* 2014). 다양성 분석 결과에서도 마찬가지로 OTU 7로 분류된 *Phaeocystis globosa*는 다른 영양염류보다 질소원을 효율적으로 사용하며 군집을 이루는 종으로(Wang *et al.* 2011), A와 C 수괴에 출현한 반면 10% 이하의 점유율로 발견된 Chrysochromulinaceae와 다른 분포 형태를 보였다. 이는 동중국해에 형성되어 있던 성층이 태풍 등에 의해 파괴되기 이전에 Chrysochromulinaceae가 출현하였고 해수 혼합 이후 더 넓은 해역까지 확산된 것으로 판단된다.

Table 6. Relative percentages (%) of the *Synechococcus* (sequence proportion over 5% of the total percentage).

	A	B	C	D	E	F	D
II	71.19±16.13	78.19±3.65	76.22±10.47	60.69±11.99	34.92±21.6	47.84±5.58	22.48±18.34
I	3.89±6.53	0.84±0.75	3.34±5.18	12.26±8.48	23.35±15.41	15.5±3.05	34.04±13.29
IV	5.09±9.93	0.14±0.08	4.43±6.18	16.04±6.38	30.2±13.32	19.8±3.07	34.79±11.52
IX	3.61±2.33	6.49±1.35	3.77±3.83	0.59±0.69	1.25±1.27	1.92±0.97	0.73±0.93
WPC1	2.37±2.36	2.33±0.85	1.34±1.34	1.61±0.62	1.49±0.99	3.65±1.43	3.65±3.71
VI	1.22±1.49	1.65±0.95	1.54±1.54	2.48±1.07	1.1±0.38	4.14±1.02	1.49±0.85
III	1.32±0.99	1.94±0.36	1.49±1.69	1.89±1.2	0.6±0.33	1.55±0.24	0.58±0.55
VII	2.55±3.25	0.74±0.54	0.23±0.37	0±0.01	0.05±0.07	0.05±0.08	0.03±0.06
5.3-I/II	4.22±2.38	2.78±0.66	5.07±2.81	3.27±0.37	5.85±4.34	3.65±0.8	1.86±1.14

Table 7. Relative percentages (%) of the picoeukaryotes in class taxonomical level (sequence proportion over 5% of the total percentage). (n.d, not detected)

	A	B	C	D	E	F	G
Mamiellophyceae	53.51±30.29	25.17±8.69	45.82±23.16	36.22±13.85	30.39±12.38	35.49±21.43	30.47±13.64
Prymnesiophyceae	27.54±20.47	42.11±5.17	31.35±13.99	35.44±5.24	34.19±11.78	20.92±12.15	31.04±7.45
Cryptophyceae	4.63±1.52	17.03±7.69	8.73±6.62	3.12±2	4.74±1.57	2.61±1.49	7.28±8.28
Dinophyceae	6.05±7.91	4.37±1.03	1.19±0.82	0.36±0.36	2.2±1.53	1.43±1.1	2.45±1.88
Chrysophyceae	1.15±1.01	2.88±1.05	1.37±1.88	1.23±2.01	0.47±0.41	0.7±0.47	2.99±3.98
Bacillariophyta	0.53±0.38	0.48±0.26	1.92±2.08	1.53±0.75	4.94±1.74	0.52±0.57	2.93±2.57
Pinguiphyceae	n.d	n.d	0.31±1.22	0.24±0.37	0±0	0.33±0.34	0.77±2.25
Trebouxiophyceae	0.36±0.31	0.59±0.6	0.77±0.78	3.75±3.43	2.34±0.62	1.34±1.22	2.54±3.01
Ochrophyta_unclassified	0.95±1.74	1.41±1.54	0.44±0.4	0.35±0.27	1.2±0.88	0.8±1.14	0.7±0.61
Eustigmatophyceae	0.2±0.3	0.44±0.3	0.2±0.33	0.47±0.5	0.2±0.24	0.07±0.13	1.2±2.59
Raphidophyceae	n.d	0.06±0.12	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d

V. 결론

황해와 동중국해는 하계에 장강 저염수의 대량 유입, 황해저층냉수 등에 영향을 받아 복잡한 수괴가 형성되고 이에 따라 먹이 그룹의 최하위 단계인 일차생산자에게도 영향을 주며 초미소 식물플랑크톤의 군집에 변화를 야기 시킬 것으로 보인다. 이에 따라 환경 변화에 대한 생물의 반응을 파악하기 위해 장강 하구와 인접한 이어도 수역에서 소청초 해양과학기지가 위치한 황해 고위도 해역에 이르기까지 위도에 따른 초미소 식물플랑크톤의 군집 구조와 다양성의 변화를 파악하고자 하였다.

연구 해역은 전형적인 하계의 물리적 특성을 나타내었다. 황해는 저층에 형성된 낮은 수온으로 성층이 강화된 반면 동중국해는 성층이 형성되지 않았다. 또한 장강 하구와 인접한 해역의 얕은 수심에서는 주변보다 낮은 염분이 형성되었다. 조사 해역은 다양한 수온 구조가 나타났고 이를 바탕으로 수괴를 구분하여 초미소 식물플랑크톤 군집의 특성을 밝혔다.

Tchl *a*는 소청초 기지 수역에서 가장 높았는데 20 μm 이상의 소형 식물플랑크톤의 기여도가 높게 나타났다. 반면 나머지 수괴에서는 초미소 식물플랑크톤의 기여도가 50% 이상으로 나타나 해역의 주요 일차생산자로 나타났다. 특히 Pico chl *a*가 높았던 것은 다양한 *Synechococcus* clade와 picoeukaryotes에 속하는 OTU로부터 기인한 것으로 보이며 두 분류군이 수괴별로 뚜렷한

차이를 보였다. *Synechococcus*는 황해 저층냉수대(G)에 비하여 황해 20 m 수심 이내로 형성된 수괴(C)에서 3 배 이상 높은 개체수를 보였고, picoeukaryotes는 황해저층냉수대에서 다른 수괴에 비하여 7 배 이상 높은 개체수를 보였다. 두 수괴가 비슷한 크기의 규모를 가짐에도 불구하고 수온과 영양염 및 광 조건에 따라 다른 특성을 보일 수 있음을 의미한다.

마찬가지로 초미소 식물플랑크톤의 광합성 색소를 통한 군집 구조 결과에서 *Synechococcus*의 지시색소인 zeaxanthin이 C 수괴에서 가장 높은 농도로 나타났으며 picoeukaryotes를 지시하는 여러 색소는 G 수괴에서 가장 높게 나타났다. 특히 이 중에서도 chl *b*가 해역에서 가장 높은 농도를 차지하였는데 이는 chl *b*를 가지는 chlorophytes 중에서도 연안 환경에서 주요 우점 그룹 역할을 수행하는 Mamiellophyceae에 기인한 것으로 보인다. 특히 염기서열 분석 결과에서 Mamiellophyceae에 속하는 *Micromonas*와 *Ostreococcus*속이 분포 형태에 차이를 나타냈는데 이는 서로 다른 광합성 전략을 가지기 때문인 것으로 보인다(Halsey *et al.* 2014). 온난한 해역을 선호하는 *Ostreococcus*속은 수온 약층 위로 높은 점유율을 보여 high-light ecotype이 성장한 것으로 보인다. 반면 *Micromonas*속은 수온 약층 아래로 저온 환경에서 높은 점유율을 차지해 황해 저층냉수대의 우점 그룹으로 나타났다.

저염 환경을 선호하는 Cryptophyceae, Trebouxiophyceae가 C 수괴에서 높은 점유율을 나타내었다. 특히 Cryptophyceae가 가지는 색소인 alloxanthin 농도가 C 수괴에서 가장 높게 나타나

해역에 장강 저염수의 영향이 도달한 것으로 보여 염분 환경 또한 picoeukaryotes 의 다양성에 영향을 준 것으로 보인다.

원핵성 초미소 식물플랑크톤 중에서도 수괴에 따라 주요 clade 가 변화하였다. 온수종인 *Synechococcus* 의 clade II 는 모든 수괴에서 높은 점유율을 보였다. 반면 냉수종인 *Synechococcus* 의 clade I 과 IV 는 넓은 규모의 저층냉수대보다 수온 약층인 E 수괴에서 3 배 이상 높은 점유율을 보여 이들이 냉수종임에도 아주 낮은 수온이 아닌 고온에서 저온으로 전환되는 수역에서 높은 출현을 보이는 것으로 나타났다.

결론적으로 초미소 식물플랑크톤의 군집이 수온과 염분 변화와 같은 물리적 환경요인의 영향을 받은 것으로 여겨진다. 특히 황해에 뚜렷하게 형성된 수온약층이 초미소 식물플랑크톤의 분포를 결정짓는데 영향을 주었으며 표층과 저층 환경의 군집구조 및 다양성에 차이를 이끈 것으로 보인다.

이러한 연구는 황동중국해 내에서 차지하는 초미소 식물플랑크톤의 중요성이 강조되어지고 있는 만큼 비교적 춘계와 추계에 초점이 맞추어져 있는 식물플랑크톤 군집 연구의 한계점을 극복하며 초미소 식물플랑크톤이 가지는 특성을 파악할 수 있는 기초 자료로서 활용될 수 있을 것이라고 사료된다. 특히 우리나라 주변 해역에 형성되는 장강 저염수에서의 생태적 변화와 변동 요인을 규명하는 기초 자료로 활용될 수 있을 것이다.

Ⅵ. 참고문헌

- 김경태, 김은수, 김성수, 박종수, 박준건, & 조성록 (2009). 새만금 방조제 체질 과정 중 새만금 주변해역 표층수의 수질과 중금속 분포 특성. 한국해양환경 · 에너지학회지, 12(1), 35-46
- 노재훈, 유신재, 이미진, 손승규, 김응서 (2004). Flow cytometer를 이용한 열대 동태평양의 독립영양 극미소 플랑크톤 연구. Ocean and Polar Research, 26(2), 273-286
- 박경우, 유만호, 오현주, 윤석현, 권기영, 문창호 (2019). 2016~ 2017 년 동중국해 북부해역의 초미소식물플랑크톤 분포 특성. 환경생물, 37(1), 93-108
- 박광섭, 이태희, & 손영백 (2018). 동중국해에서 하계 표층수온의 변화 분석. 대한원격탐사학회지, 34(6), 953-968.
- 박지수, & 유신재 (2010). 정지궤도 해색탐재체 (GOCI) 자료 활용을 위한 황해의 일차생산력 추정방법 비교. 대한원격탐사학회지, 26 (2), 221-237.
- 유정규, 정정호, 남은정, 정경미, 이순우, & 명철수 (2006). 새만금 수질 환경과 동물플랑크톤 군집 분포: 방조제 건설에 따른 군집 변화. Ocean and Polar Research, 28(3), 215-360
- 윤양호, 박종식, 박영균, & 노일현 (2007). 여름 한국서남해역의 해양환경과 식물플랑크톤 군집분포. 한국해양환경 · 에너지학회지, 10(3), 155-166

- 이영주, 최중기, 손재경 (2012). 황해 동부 해역에서 하계에 조석전선과 용승에 의한 식물플랑크톤군집 분포. *Ocean and Polar Research*, 34(2), 111-123
- 장성태, 홍창수, & 이재학 (2007). 하계 동중국해 북부 해역에서의 해수 혼합. *바다*, 12(4), 390-399
- 장풍국, 현봉길, 차형곤, 정한식, 장민철, & 신경순 (2013). 남해동부해역의 표층 수괴 변화에 따른 환경요인과 식물플랑크톤 군집의 계절적 변화. *Ocean and Polar Research*, 35(2), 157-170
- 최동한, 안성민, 최유리, 노현수, & 노재훈 (2015). 독도 해역 초미소남세균 다양성의 계절적 변동. *바다*, 20(4), 192-198
- Ahlgren, N. A., & Rocap, G. (2012). Diversity and distribution of marine *Synechococcus*: multiple gene phylogenies for consensus classification and development of qPCR assays for sensitive measurement of clades in the ocean. *Frontiers in Microbiology*, 3, 213.
- Ahlgren, N. A., Noble, A., Patton, A. P., Roache-Johnson, K., Jackson, L., Robinson, D., ... & Rocap, G. (2014). The unique trace metal and mixed layer conditions of the Costa Rica upwelling dome support a distinct and dense community of *Synechococcus*. *Limnology and Oceanography*, 59(6), 2166-2184
- Agustí, S., & Llabrés, M. (2007). Solar radiation-induced mortality of marine pico-phytoplankton in the oligotrophic ocean. *Photochemistry and photobiology*, 83(4), 793-801.

- Arar, E. J., & Collins, G. B. (1997) In Vitro Determination of Chlorophyll *a* and Pheophytin *a* in Marine and Freshwater Algae by Fluorescence. UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY.
- Bai, Y., He, X., Pan, D., Chen, C. T. A., Kang, Y., Chen, X., & Cai, W. J. (2014). Summertime Changjiang River plume variation during 1998–2010. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 119 (9), 6238–6257
- Bakun, A. (1990). Global climate change and intensification of coastal ocean upwelling. *Science*, 247(4939), 198–201
- Barton, A. D., Dutkiewicz, S., Flierl, G., Bragg, J., & Follows, M. J. (2010). Patterns of diversity in marine phytoplankton. *Science*, 327(5972), 1509–1511
- Belkin, I. M. (2009). Rapid warming of large marine ecosystems. *Progress in Oceanography*, 81(1–4), 207–213
- Biller, S. J., Berube, P. M., Lindell, D., & Chisholm, S. W. (2015). *Prochlorococcus*: the structure and function of collective diversity. *Nature Reviews Microbiology*, 13(1), 13–27
- Boyce, D. G., Lewis, M. R., & Worm, B. (2010). Global phytoplankton decline over the past century. *Nature*, 466(7306), 591–596
- Brown, M. V., Schwalbach, M. S., Hewson, I., & Fuhrman, J. A. (2005). Coupling 16S-ITS rDNA clone libraries and automated ribosomal intergenic spacer analysis to show marine microbial diversity.

- ty: development and application to a time series. *Environmental microbiology*, 7(9), 1466–1479
- Bryant, D. A (1991) Cyanobacterial phycobilisomes: progress toward complete structural and functional analysis via molecular genetics. In: Bogorad L, Vasil IK (eds) *The photosynthetic apparatus: molecular biology and operation*. Academic Press, San Diego, CA, 257–300
- Buitenhuis, E. T., Li, W. K., Vaultot, D., Lomas, M. W., Landry, M. R., Partensky, F., ... & McManus, G. B. (2012). Picophytoplankton biomass distribution in the global ocean. *Earth System Science Data*, 4(1), 37–46
- Cabello, A. M., Latasa, M., Forn, I., Morán, X. A. G., & Massana, R. (2016). Vertical distribution of major photosynthetic picoeukaryotic groups in stratified marine waters. *Environmental microbiology*, 18(5), 1578–1590
- Cai, W., Wang, G., Dewitte, B., Wu, L., Santoso, A., Takahashi, K., ... & McPhaden, M. J. (2018). Increased variability of eastern Pacific El Niño under greenhouse warming. *Nature*, 564(7735), 201–206
- Campbell, L., & Vaultot, D. (1993). Photosynthetic picoplankton community structure in the subtropical North Pacific Ocean near Hawaii (station ALOHA). *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 40(10), 2043–2060

- Chai, C., Yu, Z., Shen, Z., Song, X., Cao, X., and Yao, Y., (2009), Nutrient characteristics in the Yangtze river and the adjacent East China Sea before and after impoundment of the Three Gorges Dam, *Science of the Total Environment*, 407(16), 4687-4695
- Chang, J., Lin, K. H., Chen, K. M., Gong, G. C., & Chiang, K. P. (2003). *Synechococcus* growth and mortality rates in the East China Sea: range of variations and correlation with environmental factors. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 50(6-7), 1265-1278
- Chen, C.T.A. (2008). Distribution of nutrients in the East China Sea and the South China Sea connection. *Journal of Oceanography*, 64(5), 737-751
- Chen, C.T. (2009). Chemical and physical fronts in the Bohai, Yellow and East China Seas. *Journal of Marine Systems*, 78(3), 394-410
- Chen, B., Liu, H., Huang, B., & Wang, J. (2014). Temperature effects on the growth rate of marine picoplankton. *Marine Ecology Progress Series*, 505, 37-47
- Chen, S. L., Zhang, G. A., Yang, S. L., & Shi, J. Z. (2006). Temporal variations of fine suspended sediment concentration in the Changjiang River estuary and adjacent coastal waters, China. *Journal of Hydrology*, 331(1-2), 137-145
- Chisholm, S. W., Olson, R. J., Zettler, E. R., Goericke, R., Waterb

- ury, J. B., & Welschmeyer, N. A. (1988). A novel free-living prochlorophyte abundant in the oceanic euphotic zone. *Nature*, 334 (6180), 340-343
- Choi, D. H., & Noh, J. H. (2009). Phylogenetic diversity of *Synechococcus* strains isolated from the East China Sea and the East Sea. *FEMS microbiology ecology*, 69(3), 439-448.
- Choi, D. H., Noh, J. H., & Lee, J. H. (2013). Application of pyrosequencing method for investigating the diversity of *Synechococcus* subcluster 5.1 in open ocean. *Microbes and environments*, ME1 3063.
- Choi, D. H., Noh, J. H., & Shim, J. (2013). Seasonal changes in picocyanobacterial diversity as revealed by pyrosequencing in temperate waters of the East China Sea and the East Sea. *Aquatic Microbial Ecology*, 71(1), 75-90
- Chorus, I., & Spijkerman, E. (2020). What Colin Reynolds could tell us about nutrient limitation, N: P ratios and eutrophication control. *Hydrobiologia*, 1-17.
- Chung, C. C., Huang, C. Y., Gong, G. C., & Lin, Y. C. (2014). Influence of the Changjiang River flood on *Synechococcus* ecology in the surface waters of the East China Sea. *Microbial ecology*, 67(2), 273-285
- Demir-Hilton, E., Sudek, S., Cuvelier, M. L., Gentemann, C. L., Zehr, J. P., & Worden, A. Z. (2011). Global distribution patterns of

- distinct clades of the photosynthetic picoeukaryote *Ostreococcus*. The ISME journal, 5(7), 1095-1107
- Duan, L. Q., Song, J. M., Yuan, H. M., Li, X. G., & Li, N. (2016). Distribution, partitioning and sources of dissolved and particulate nitrogen and phosphorus in the north Yellow Sea. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 181, 182-195
- Edmond, J. M., Spivack, A., Grant, B. C., Ming-Hui, H., Zexiam, C., Sung, C., & Xiushan, Z. (1985). Chemical dynamics of the Changjiang estuary. Continental Shelf Research, 4(1-2), 17-36
- Flombaum, P., Gallegos, J. L., Gordillo, R. A., Rincón, J., Zabala, L. L., Jiao, N., ... & Martiny, A. C. (2013). Present and future global distributions of the marine Cyanobacteria *Prochlorococcus* and *Synechococcus*. Proceedings of the National Academy of Sciences, 110(24), 9824-9829
- Flombaum, P., Wang, W. L., Primeau, F. W., & Martiny, A. C. (2020). Global picophytoplankton niche partitioning predicts overall positive response to ocean warming. Nature Geoscience, 13(2), 116-120
- Foulon, E., Not, F., Jalabert, F., Cariou, T., Massana, R., & Simon, N. (2008). Ecological niche partitioning in the picoplanktonic green alga *Micromonas pusilla*: evidence from environmental surveys using phylogenetic probes. Environmental microbiology, 10(9), 2433-2443

- Fu, M., Sun, P., Wang, Z., Wei, Q., Qu, P., Zhang, X., & Li, Y. (2018). Structure, characteristics and possible formation mechanisms of the subsurface chlorophyll maximum in the Yellow Sea Cold Water Mass. *Continental Shelf Research*, 165, 93-105
- Fuller, N. J., Campbell, C., Allen, D. J., Pitt, F. D., Zwirgmaier, K., Le Gall, F., ... & Scanlan, D. J. (2006). Analysis of photosynthetic picoeukaryote diversity at open ocean sites in the Arabian Sea using a PCR biased towards marine algal plastids. *Aquatic Microbial Ecology*, 43(1), 79-93
- Fuller NJ, Marie D, Partensky F, Vaulot D, Post AF, Scanlan DJ . (2003). Clade-specific 16S ribosomal DNA oligonucleotides reveal the predominance of a single marine *Synechococcus* clade throughout a stratified water column in the Red Sea. *Applied and environmental microbiology*, 69(5), 2430-2443
- Gérikas Ribeiro, C., Marie, D., Lopes dos Santos, A., Pereira Brandini, F., & Vaulot, D. (2016). Estimating microbial populations by flow cytometry: Comparison between instruments. *Limnology and Oceanography: Methods*, 14(11), 750-758
- Gomes, H. D. R., Xu, Q., Ishizaka, J., Carpenter, E. J., Yager, P. L., & Goes, J. I. (2018). The influence of riverine nutrients in niche partitioning of phytoplankton communities—a contrast between the Amazon River Plume and the ChangJiang (Yangtze) River diluted water of the East China Sea. *Frontiers in Marine Science*

- e, 5, 343.
- Gong GC, YI Chen and KK Liu. (1996). Chemical hydrography and chlorophyll a distribution in the East China Sea in summer: implications in nutrient dynamics. *Continental Shelf Research*, 16(12), 1561-1590
- Gong, G. C., Chang, J., Chiang, K. P., Hsiung, T. M., Hung, C. C., Duan, S. W., & Codispoti, L. A. (2006). Reduction of primary production and changing of nutrient ratio in the East China Sea: Effect of the Three Gorges Dam?. *Geophysical Research Letters*, 33(7).
- Gong, G. C., Liu, K. K., Chiang, K. P., Hsiung, T. M., Chang, J., Chen, C. C., ... & Tsai, F. (2011). Yangtze River floods enhance coastal ocean phytoplankton biomass and potential fish production. *Geophysical Research Letters*, 38(13).
- Gomes, H. D. R., Xu, Q., Ishizaka, J., Carpenter, E. J., Yager, P. L., & Goes, J. I. (2018). The influence of riverine nutrients in niche partitioning of phytoplankton communities—a contrast between the Amazon River Plume and the ChangJiang (Yangtze) River diluted water of the East China Sea. *Frontiers in Marine Science*, 5, 343
- Guillou, L., Eikrem, W., Chrétiennot-Dinet, M. J., Le Gall, F., Massana, R., Romari, K., ... & Vaulot, D. (2004). Diversity of picoplanktonic prasinophytes assessed by direct nuclear SSU rDNA sequencing.

- encing of environmental samples and novel isolates retrieved from oceanic and coastal marine ecosystems. *Protist*, 155(2), 193-214
- Guo, C., Liu, H., Zheng, L., Song, S., Chen, B., & Huang, B. (2014). Seasonal and spatial patterns of picophytoplankton growth, grazing and distribution in the East China Sea. *Biogeosciences*, 11(7), 1847-1862
- Guo, J., Wilken, S., Jimenez, V., Choi, C. J., Ansong, C., Dannebaum, R., ... & Worden, A. Z. (2018). Specialized proteomic responses and an ancient photoprotection mechanism sustain marine green algal growth during phosphate limitation. *Nature microbiology*, 3(7), 781-790
- Guo, J., Yuan, H., Song, J., Li, X., & Duan, L. (2020). Hypoxia, acidification and nutrient accumulation in the Yellow Sea Cold Water of the South Yellow Sea. *Science of The Total Environment*, 745, 141050
- Halsey, K. H., Milligan, A. J., & Behrenfeld, M. J. (2014). Contrasting strategies of photosynthetic energy utilization drive lifestyle strategies in ecologically important picoeukaryotes. *Metabolites*, 4(2), 260-280.
- Han, I. S., & Lee, J. S. (2020). Change the annual amplitude of sea surface temperature due to climate change in a recent decade around the Korean Peninsula. *Journal of the Korean Society of*

- f Marine Environment & Safety, 26(3), 233-241.
- Harrison, P. J., Hu, M. H., Yang, Y. P., & Lu, X. (1990). Phosphate limitation in estuarine and coastal waters of China. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 140(1-2), 79-87
- Hasegawa, T., Kitajima, S., & Kiyomoto, Y. (2019). Phytoplankton distribution in the Kuroshio region of the southern East China Sea in early spring. *Kuroshio current: physical, biogeochemical, and ecosystem dynamics*, 189-205
- Hou, W., Ba, M., Bai, J., & Yu, J. (2021). Numerical Study on the Expansion and Variation of Changjiang Diluted Water in Summer and Autumn. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(3), 317
- Huang, S., Wilhelm, S. W., Harvey, H. R., Taylor, K., Jiao, N., & Chen, F. (2012). Novel lineages of *Prochlorococcus* and *Synechococcus* in the global oceans. *The ISME journal*, 6(2), 285-297
- Humborg, C. (1997). Primary productivity regime and nutrient removal in the Danube estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 45(5), 579-589
- Hwang, J. H., Van, S. P., Choi, B. J., Chang, Y. S., & Kim, Y. H. (2014). The physical processes in the Yellow Sea. *Ocean & coastal management*, 102, 449-457
- Inoue, N. (1975). Bottom current on the continental shelf of the East China Sea. *Mar. Sci. Mon.*, 7, 12-18.

- Jang, L. H., Kim, S. U., Go, U. J., Geleekko, Y., & Seo, Y. S. (2007). 동중국해 북부해역 수온, 염분의 분포 변동 특성. In Proceedings of the Korean Environmental Sciences Society Conference, 331-335. The Korean Environmental Sciences Society.
- Jang, P. G., Lee, T. S., Kang, J. H., & Shin, K. (2013). The influence of thermohaline fronts on chlorophyll *a* concentrations during spring and summer in the southeastern Yellow Sea. *Acta Oceanologica Sinica*, 32(9), 82-90
- Jang, S. T., Lee, J. H., Kim, C. H., Jang, C. J., & Jang, Y. S. (2011). Movement of cold water mass in the northern East China Sea in summer. *The Sea*, 16(1), 1-13
- Jiao, N., Yang, Y., Koshikawa, H., & Watanabe, M. (2002). Influence of hydrographic conditions on picoplankton distribution in the East China Sea. *Aquatic microbial ecology*, 30(1), 37-48
- Jiang, Z., Liu, J., Chen, J., Chen, Q., Yan, X., Xuan, J., & Zeng, J. (2014). Responses of summer phytoplankton community to drastic environmental changes in the Changjiang (Yangtze River) estuary during the past 50 years. *Water Research*, 54, 1-11
- Johnson, P. W., & Sieburth, J. M. (1979). Chroococcoid cyanobacteria in the sea: a ubiquitous and diverse phototrophic biomass 1. *Limnology and oceanography*, 24(5), 928-935.
- Kang, J. H., Seo, M., Kwon, O. Y., & Kim, W. S. (2013). Diel vertical migration of the copepod *Calanus sinicus* before and during

- formation of the Yellow Sea Cold Bottom Water in the Yellow Sea. *Acta Oceanologica Sinica*, 32(9), 99–106
- Kerr, R. A. (1995). It's official: first glimmer of greenhouse warming seen.
- Kostadinov, T. S., Siegel, D. A., & Maritorena, S. (2010). Global variability of phytoplankton functional types from space: assessment via the particle size distribution. *Biogeosciences*, 7(10), 3239–3257
- Kozich, J. J., Westcott, S. L., Baxter, N. T., Highlander, S. K., & Schloss, P. D. (2013). Development of a dual-index sequencing strategy and curation pipeline for analyzing amplicon sequence data on the MiSeq Illumina sequencing platform. *Applied and environmental microbiology*, 79(17), 5112–5120
- Kim, Y. S., Jang, C. J., Noh, J. H., Kim, K. T., Kwon, J. I., Min, Y., ... & Jeong, J. Y. (2019). A Yellow Sea Monitoring Platform and Its Scientific Applications. *Frontiers in Marine Science*, 6, 601
- Latasa, M., Scharek, R., Gall, F. L., & Guillou, L. (2004). PIGMENT SUITES AND TAXONOMIC GROUPS IN PRASINOPHYCEAE 1. *Journal of Phycology*, 40(6), 1149–1155
- Lee, J. K., Park, C., Lee, D. B., & Lee, S. W. (2012). Variations in plankton assemblage in a semi-closed Chunsu Bay, Korea. *The Sea*, 17(2), 95–111

- Lee, Y., Choi, J. K., Youn, S., & Roh, S. (2014). Influence of the physical forcing of different water masses on the spatial and temporal distributions of picophytoplankton in the northern East China Sea. *Continental Shelf Research*, 88, 216-227
- Lee, Y. K., Ryu, J. H., Choi, J. K., Lee, S., & Woo, H. J. (2015). Satellite-based observations of unexpected coastal changes due to the Saemangeum Dyke construction, Korea. *Marine Pollution Bulletin*, 97(1-2), 150-159
- Legendre, L., & Michaud, J. (1998). Flux of biogenic carbon in oceans: size-dependent regulation by pelagic food webs. *Marine Ecology Progress Series*, 164, 1-11
- Li, H. M., Zhang, C. S., Han, X. R., & Shi, X. Y. (2015). Changes in concentrations of oxygen, dissolved nitrogen, phosphate, and silicate in the southern Yellow Sea, 1980-2012: sources and seaward gradients. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 163, 44-55
- Li, M., Xu, K., Watanabe, M., & Chen, Z. (2007). Long-term variations in dissolved silicate, nitrogen, and phosphorus flux from the Yangtze River into the East China Sea and impacts on estuarine ecosystem. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 71(1-2), 3-12
- Li, W. K., & Platt, T. (1987). Photosynthetic picoplankton in the ocean. *Science Progress (1933-)*, 117-132
- Li, W. K. W. (2002). Macroecological patterns of phytoplankton in

- the northwestern North Atlantic Ocean. *Nature*, 419(6903), 154-157
- Liang, Y., Zhang, Y., Zhang, Y., Luo, T., Rivkin, R. B., & Jiao, N. (2017). Distributions and relationships of virio-and picoplankton in the epi-, meso-and bathypelagic zones of the Western Pacific Ocean. *FEMS microbiology ecology*, 93(2)
- Lin, C., Su, J., Xu, B., & Tang, Q. (2001). Long-term variations of temperature and salinity of the Bohai Sea and their influence on its ecosystem. *Progress in Oceanography*, 49(1-4), 7-19
- Lin, J., Zhu, J. R., Zhang, J., Wu, H., & Luo, W. J. (2011). Distribution of phytoplankton biomass and its relationships with the environmental factors off the Changjiang (Yangtze River) Estuary. *Journal of Fisheries of China*, 35(1), 74-87
- Lin, Y. C., Chung, C. C., Gong, G. C., & Chiang, K. P. (2014). Diversity and abundance of haptophytes in the East China Sea. *Aquatic Microbial Ecology*, 72(3), 227-240
- Liu, J. T., Huang, B., Chang, Y., Du, X., Liu, X., Yang, R. J., ... & Chang, Y. P. (2019). Three-dimensional coupling between size-fractionated chlorophyll-*a*, POC and physical processes in the Taiwan Strait in summer. *Progress in Oceanography*, 176, 102129
- Liu, Z., Gan, J., Wu, H., Hu, J., Cai, Z., & Deng, Y. (2021). Advances on Coastal and Estuarine Circulations Around the Changjiang Estuary in the Recent Decades (2000-2020). *Frontiers in Marine*

Science, 8, 43

- Longhurst, A. R. (1991). Role of the marine biosphere in the global carbon cycle. *Limnology and Oceanography*, 36(8), 1507–1526
- Maat, D. S., Crawford, K. J., Timmermans, K. R., & Brussaard, C. P. (2014). Elevated CO₂ and phosphate limitation favor *Micromonas pusilla* through stimulated growth and reduced viral impact. *Applied and environmental microbiology*, 80(10), 3119–3127.
- Marie, D., Simon, N., Guillou, L., Partensky, F., & Vaulot, D. (2000). Flow cytometry analysis of marine picoplankton. In *Living Color* (pp. 421–454). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Marie, D., Simon, N., & Vaulot, D. (2005). Phytoplankton cell counting by flow cytometry. *Algal culturing techniques*, 1, 253–267
- Marrasé, C., Duarte, C. M., & Vaqué, D. (1989). Succession patterns of phytoplankton blooms: directionality and influence of algal cell size. *Marine biology*, 102(1), 43–48
- Mazard, S., Ostrowski, M., Partensky, F., & Scanlan, D. J. (2012). Multi-locus sequence analysis, taxonomic resolution and biogeography of marine *Synechococcus*. *Environmental Microbiology*, 14(2), 372–386
- Mella-Flores, D., Mazard, S., Humily, F., Partensky, F., Mahé, F., Bariat, L., ... & Garczarek, L. (2011). Is the distribution of *Prochlorococcus* and *Synechococcus* ecotypes in the Mediterranean Sea affected by global warming?. *Biogeosciences*, 8(9), 2785–2804

- Milliman, J. D. (1997). Fluvial sediment discharge to the sea and the importance of regional tectonics. In *Tectonic uplift and climate change*. Springer, 239-257
- Molinos, J. G. (2020). Global marine warming in a new dimension. *Nature ecology & evolution*, 4(1), 16-17
- Mundy, C. J., Gosselin, M., Ehn, J. K., Belzile, C., Poulin, M., Alou, E., ... & Stewart, J. (2011). Characteristics of two distinct high-light acclimated algal communities during advanced stages of sea ice melt. *Polar Biology*, 34(12), 1869-1886
- Noh, J. H., Yoo, S. J., & Kang, S. H. (2006). The summer distribution of picophytoplankton in the Western Pacific. *Korean Journal of Environmental Biology*, 24(1), 67-80
- Noh, J. H., & Lee, M. J. (2006). Picophytoplankton Distribution in the Chuuk Lagoon South Pacific. *Korean Journal of Environmental Biology*, 24(1), 81-88.
- Noh, J. H., Yoo, S. J., Lee, J. A., Kim, H. C., & Lee, J. H. (2005). Phytoplankton in the waters of the Jeodo Ocean Research Station determined by microscopy, flow cytometry, HPLC pigment data and remote sensing. *Ocean and Polar Research*, 27(4), 397-417
- Not, F., Massana, R., Latasa, M., Marie, D., Colson, C., Eikrem, W., ... & Simon, N. (2005). Late summer community composition and abundance of photosynthetic picoeukaryotes in Norwegian and Barents Seas. *Limnology and Oceanography*, 50(5), 1677-1686

- Moon, J. H., Hirose, N., Yoon, J. H., & Pang, I. C. (2010). Offshore detachment process of the low-salinity water around Changjiang Bank in the East China Sea. *Journal of Physical Oceanography*, 40(5), 1035-1053
- Moore, L. R., Goericke, R., & Chisholm, S. W. (1995). Comparative physiology of *Synechococcus* and *Prochlorococcus*: influence of light and temperature on growth, pigments, fluorescence and absorptive properties. *Marine Ecology Progress Series*, 259-275.
- Otero-Ferrer, J. L., Cermeño, P., Bode, A., Fernández-Castro, B., Gasol, J. M., Morán, X. A. G., ... & Mourinho-Carballido, B. (2018). Factors controlling the community structure of picoplankton in contrasting marine environments. *Biogeosciences*, 15(20), 6199-6220
- Pan, L. A., Zhang, J., & Zhang, L. H. (2007). Picophytoplankton, nanophytoplankton, heterotrophic bacteria and viruses in the Changjiang Estuary and adjacent coastal waters. *Journal of plankton research*, 29(2), 187-197
- Partensky, F., Blanchot, J., & Vaulot, D. (1999). Differential distribution and ecology of *Prochlorococcus* and *Synechococcus* in oceanic waters: a review. *Bulletin-Institut Oceanographique Monaco -Numero Special-*, 457-476
- Partensky, F., Hess, W. R., & Vaulot, D. (1999). *Prochlorococcus*, a marine photosynthetic prokaryote of global significance. *Micro*

- biology and molecular biology reviews, 63(1), 106-127
- Park, M. O., Kang, S. W., Lee, C. I., Choi, T. S., & Lantoine, F. (2008). Structure of the phytoplanktonic communities in Jeju Strait and northern East China Sea and dinoflagellate blooms in spring 2004: analysis of photosynthetic pigments. *The Sea*, 13(1), 27-41
- Park, M. O., & Lee, Y. J. (2017). Variability of Contribution of Picophytoplankton in the Phytoplankton Community in the Southwestern East Sea. *The Sea*, 22(3), 77-87
- Paul, G., SCHOFIELD, O., KATZ, M. E., & Bas, V. A. N. D. E. (2004). *Why is the Land Green and the Ocean Red?*. Coccolithophores: From Molecular Processes to Global Impact, 429.
- Ralf, G., & Repeta, D. J. (1992). The pigments of *Prochlorococcus marinus*: The presence of divinylchlorophyll a and b in a marine procaryote. *Limnology and Oceanography*, 37(2), 425-433
- Raven, J. A. (1998). The twelfth Tansley Lecture. Small is beautiful: the picophytoplankton. *Functional ecology*, 12(4), 503-513.
- Rebstock, G. A., & Kang, Y. S. (2003). A comparison of three marine ecosystems surrounding the Korean peninsula: Responses to climate change. *Progress in Oceanography*, 59(4), 357-379
- Riegman, R., Kuipers, B. R., Noordeloos, A. A., & Witte, H. J. (1993). Size-differential control of phytoplankton and the structure of plankton communities. *Netherlands Journal of Sea Research*,

- 31(3), 255-265
- Riegman, R., & Van Boekel, W. (1996). The ecophysiology of *Phaeocystis globosa*: a review. *Journal of Sea Research*, 35(4), 235-242.
- Robineau, B., Legendre, L., Michel, C., Budéus, G., Kattner, G., Schneider, W., & Pesant, S. (1999). Ultraphytoplankton abundances and chlorophyll *a* concentrations in ice-covered waters of northern seas. *Journal of plankton research*, 21(4).
- Rocap, G., Distel, D. L., Waterbury, J. B., & Chisholm, S. W. (2002). Resolution of *Prochlorococcus* and *Synechococcus* ecotypes by using 16S-23S ribosomal DNA internal transcribed spacer sequences. *Applied and Environmental Microbiology*, 68(3), 1180-1191
- Rodriguez, F., Derelle, E., Guillou, L., Le Gall, F., Vaulot, D., & Moreau, H. (2005). Ecotype diversity in the marine picoeukaryote *Ostreococcus* (Chlorophyta, Prasinophyceae). *Environmental microbiology*, 7(6), 853-859
- Rousseau, V., Chrétiennot-Dinet, M. J., Jacobsen, A., Verity, P., & Whipple, S. (2007). The life cycle of *Phaeocystis*: state of knowledge and presumptive role in ecology. *Biogeochemistry*, 83(1), 29-47
- Ryu, J., Nam, J., Park, J., Kwon, B. O., Lee, J. H., Song, S. J., ... & Khim, J. S. (2014). The Saemangeum tidal flat: long-term environmental and ecological changes in marine benthic flora and fa

- una in relation to the embankment. *Ocean & coastal management*, 102, 559–571
- Scanlan, D. J. (2003). Physiological diversity and niche adaptation in marine *Synechococcus*.
- Scanlan, D. J. (2012). Marine picocyanobacteria. In *Ecology of Cyanobacteria II* (pp. 503–533). Springer, Dordrecht.
- Schlüter, L., Lauridsen, T. L., Krogh, G., & Jørgensen, T. (2006). Identification and quantification of phytoplankton groups in lakes using new pigment ratios—a comparison between pigment analysis by HPLC and microscopy. *Freshwater Biology*, 51(8), 1474–1485
- Seo, J. H., Kang, I., Yang, S. J., & Cho, J. C. (2017). Characterization of spatial distribution of the bacterial community in the South Sea of Korea. *PLoS One*, 12(3), e0174159
- Shih, C. Y., Lu, H. M., Gong, G. C., & Kang, L. K. (2019). High diversity of haptophytes in the East China Sea revealed by next-generation sequencing and scanning electron microscopy. *Journal of Oceanography*, 75(4), 305–317
- Shin, J. W., Park, J., Choi, J. G., Jo, Y. H., Kang, J. J., Joo, H., & Lee, S. H. (2017). Variability of phytoplankton size structure in response to changes in coastal upwelling intensity in the southwestern East Sea. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 122(12), 10262–10274
- Six, C., Sherrard, R., Lionard, M., Roy, S., & Campbell, D. A. (200

- 9). Photosystem II and pigment dynamics among ecotypes of the green alga *Ostreococcus*. *Plant Physiology*, 151(1), 379-390
- Smayda, T. J., & Reynolds, C. S. (2001). Community assembly in marine phytoplankton: application of recent models to harmful dinoflagellate blooms. *Journal of plankton research*, 23(5), 447-461
- Somerville, C. C., Knight, I. T., Straube, W. L., & Colwell, R. R. (1989). Simple, rapid method for direct isolation of nucleic acids from aquatic environments. *Applied and environmental microbiology*, 55(3), 548-554
- Son, Y. B., Ryu, J. H., Noh, J. H., Ju, S. J., & Kim, S. H. (2012). Climatological variability of satellite-derived sea surface temperature and chlorophyll in the south sea of Korea and East China Sea. *Ocean and Polar Research*, 34(2), 201-218
- Stelzer, R. S., & Lamberti, G. A. (2001). Effects of N: P ratio and total nutrient concentration on stream periphyton community structure, biomass, and elemental composition. *Limnology and Oceanography*, 46(2), 356-367.
- Sun, Y., Liu, Y., Wu, C., Fu, X., Guo, C., Li, L., & Sun, J. (2021). Characteristics of Eukaryotic Plankton Communities in the Cold Water Masses and Nearshore Waters of the South Yellow Sea. *Diversity*, 13(1), 21
- Sun, X., Shen, F., Liu, D., Bellerby, R. G., Liu, Y., & Tang, R. (2018). In situ and satellite observations of phytoplankton size class

- es in the entire continental shelf sea, China. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 123(5), 3523–3544
- Takahashi, M., & Hori, T. (1984). Abundance of picophytoplankton in the subsurface chlorophyll maximum layer in subtropical and tropical waters. *Marine biology*, 79(2), 177–186.
- Tan, H., & Cai, R. (2018). What caused the record-breaking warming in East China Seas during August 2016?. *Atmospheric Science Letters*, 19(10), e853
- Tanaka, M. (2019). Changes in vertical distribution of zooplankton under wind-induced turbulence: A 36-year record. *Fluids*, 4(4), 195
- Timmermann, A., Oberhuber, J., Bacher, A., Esch, M., Latif, M., & Roeckner, E. (1999). Increased El Niño frequency in a climate model forced by future greenhouse warming. *Nature*, 398(6729), 694–697
- Trask, B. J., Van den Engh, G. J., & Elgershuizen, J. H. B. W. (1982). Analysis of phytoplankton by flow cytometry. *Cytometry: The Journal of the International Society for Analytical Cytology*, 2(4), 258–264
- Veldhuis, M. J., & Kraay, G. W. (2000). Application of flow cytometry in marine phytoplankton research: current applications and future perspectives. *Scientia Marina*, 64(2), 121–134
- Visintini, N., Martiny, A. C., & Flombaum, P. (2021). Prochlorococc

- us, *Synechococcus*, and picoeukaryotic phytoplankton abundances in the global ocean. *Limnology and Oceanography Letters*.
- Vaulot, D., Marie, D., Olson, R. J., & Chisholm, S. W. (1995). Growth of *Prochlorococcus*, a photosynthetic prokaryote, in the equatorial Pacific Ocean. *Science*, 268(5216), 1480-1482
- Wang, B. D., Wang, X. L., & Zhan, R. (2003). Nutrient conditions in the yellow sea and the east china sea. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 58(1), 127-136
- Wang, H., Yan, H., Zhou, F., Li, B., Zhuang, W., & Shen, Y. (2020). Changes in nutrient transport from the Yangtze River to the East China Sea linked to the Three-Gorges Dam and water transfer project. *Environmental Pollution*, 256, 113376
- Wang, M., Bai, X. G., Liang, Y. T., Wang, F., Jiang, X. J., Guo, Y. J., & Yang, F. (2008). Summer distribution of picophytoplankton in the north yellow sea. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 32(5), 1184
- Wang, M., Liang, Y., Bai, X., Jiang, X., Wang, F., & Qiao, Q. (2010). Distribution of microbial populations and their relationship with environmental parameters in the coastal waters of Qingdao, China. *Environmental Microbiology*, 12(7), 1926-1939
- Wang, X., Wang, Y., & Smith Jr, W. O. (2011). The role of nitrogen on the growth and colony development of *Phaeocystis globosa* (Prymnesiophyceae). *European Journal of Phycology*, 46(3), 305

- Wang, X., Yang, S., Ran, X., Liu, X. M., Bataille, C. P., & Su, N. (2018). Response of the Changjiang (Yangtze River) water chemistry to the impoundment of Three Gorges Dam during 2010-2011. *Chemical Geology*, 487, 1-11.
- Waterbury, J. B., Watson, S. W., Guillard, R. R., & Brand, L. E. (1979). Widespread occurrence of a unicellular, marine, planktonic, cyanobacterium. *Nature*, 277(5694), 293-294
- Wei, H., Shi, J., Lu, Y., & Peng, Y. (2010). Interannual and long-term hydrographic changes in the Yellow Sea during 1977-1998. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 57 (11-12), 1025-1034
- Wei, Q., Yao, Q., Wang, B., Wang, H., & Yu, Z. (2015). Long-term variation of nutrients in the southern Yellow Sea. *Continental Shelf Research*, 111, 184-196
- Whitton, B. A., & Potts, M. (2012). Introduction to the cyanobacteria. In *Ecology of Cyanobacteria II* (pp. 1-13). Springer, Dordrecht.
- Worden, A. Z., Nolan, J. K., & Palenik, B. (2004). Assessing the dynamics and ecology of marine picophytoplankton: the importance of the eukaryotic component. *Limnology and oceanography*, 49 (1), 168-179
- Wright, S. W., & Jeffrey, S. W. (2006). Pigment markers for phyto

- plankton production. In Marine organic matter: biomarkers, isotopes and DNA, Springer, 71-104
- Wu, M., Yang, F., Yao, Q., Bouwman, L., & Wang, P. (2020). Storm-induced sediment resuspension in the Changjiang River Estuary leads to alleviation of phosphorus limitation. *Marine Pollution Bulletin*, 160, 111628
- Wu, L., & Wang, B. (2021). A Case Study on the Variability of Summer Water Properties in the Southeastern Yellow Sea Based on the Hydrological Data from 1995 to 2019. *Water*, 13(1), 79.
- Xia, X., Vidyarthna, N. K., Palenik, B., Lee, P., & Liu, H. (2015). Comparison of the seasonal variations of *Synechococcus* assemblage structures in estuarine waters and coastal waters of Hong Kong. *Applied and environmental microbiology*, 81(21), 7644-7655
- Xia, X., Partensky, F., Garczarek, L., Suzuki, K., Guo, C., Yan Cheung, S., & Liu, H. (2017). Phylogeography and pigment type diversity of *Synechococcus* cyanobacteria in surface waters of the northwestern Pacific Ocean. *Environmental microbiology*, 19(1), 142-158
- Xiao, W., Wang, L., Laws, E., Xie, Y., Chen, J., Liu, X., ... & Huang, B. (2018). Realized niches explain spatial gradients in seasonal abundance of phytoplankton groups in the South China Sea. *Progress in Oceanography*, 162, 223-239
- Xu, K., & Milliman, J. D. (2009). Seasonal variations of sediment d

- ischarge from the Yangtze River before and after impoundment of the Three Gorges Dam. *Geomorphology*, 104(3-4), 276-283.
- Yang, M., Liu, Q., Mi, C., & Zhao, S. (2020). Seasonal Variations of Picoeukaryote Community Structure in Zhoushan Fishing Ground, East China Sea. *Journal of Ocean University of China*, 19(6), 1471-1479
- Yang, Y. M., Park, J. H., An, S. I., Wang, B., & Luo, X. (2021). Mean sea surface temperature changes influence ENSO-related precipitation changes in the mid-latitudes. *Nature communications*, 12(1), 1-9
- Yarimizu, K., Sildever, S., Hamamoto, Y., Tazawa, S., Oikawa, H., Yamaguchi, H., ... & Nagai, S. (2021). Development of an absolute quantification method for ribosomal RNA gene copy numbers per eukaryotic single cell by digital PCR. *Harmful Algae*, 103, 102008
- Yeh, P. J. (2009). Assessment of Large-scale Terrestrial Water Storage Dynamics at Multiple Timescales from Multiple Sources. In *AGU Fall Meeting Abstracts*, 2009, H53L-03
- Yeo, H. G. (2010). Diversity of planktonic micro algae in Saemangeum water regions. *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, 11(9), 3610-3614
- Yoon, Y. H. (2015). Spatio-temporal distributions of phytoplankton community in the coastal waters of Gogunsan Islands (CoWGs),

- West Sea of Korea. *Journal of the Korea Academia-Industrial co operation Society*, 16(3), 2287-2300
- Zapata, M., Rodríguez, F., & Garrido, J. L. (2000). Separation of chlorophylls and carotenoids from marine phytoplankton: a new HPLC method using a reversed phase C8 column and pyridine-containing mobile phases. *Marine Ecology Progress Series*, 195, 29-45
- Zeng, X., He, R., & Zong, H. (2017). Variability of Changjiang Diluted Water revealed by a 45-year long-term ocean hindcast and Self-Organizing Maps analysis. *Continental Shelf Research*, 146, 37-46
- Zhang, C. I., Lim, J. H., Kwon, Y., Kang, H. J., Kim, D. H., & Seo, Y. I. (2014). The current status of west sea fisheries resources and utilization in the context of fishery management of Korea. *Ocean & coastal management*, 102, 493-505
- Zhang, J. (1999). Heavy metal compositions of suspended sediments in the Changjiang (Yangtze River) estuary: significance of riverine transport to the ocean. *Continental Shelf Research*, 19(12), 1521-1543
- Zhao, Y., Yu, R. C., Kong, F. Z., Wei, C. J., Liu, Z., Geng, H. X., ... & Zhou, M. J. (2019). Distribution patterns of picosized and nanosized phytoplankton assemblages in the East China Sea and the Yellow Sea: implications on the impacts of Kuroshio intrusion

- n. Journal of Geophysical Research: Oceans, 124(2), 1262–1276
- Zhao, Y., Zhao, L., Xiao, T., Liu, C., Sun, J., Zhou, F., ... & Huang, L. (2013). Temporal variation of picoplankton in the spring bloom of Yellow Sea, China. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 97, 72–84
- Zhu, J., Shi, J., Guo, X., Gao, H., & Yao, X. (2018). Air-sea heat flux control on the Yellow Sea Cold Water Mass intensity and implications for its prediction. Continental Shelf Research, 152, 14–26
- Zubkov, M. V., Sleigh, M. A., Tarran, G. A., Burkill, P. H., & Leakey, R. J. (1998). Picoplanktonic community structure on an Atlantic transect from 50 N to 50 S. Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, 45(8), 1339–1355
- Zwirgmaier, K., Heywood, J. L., Chamberlain, K., Woodward, E. M. S., Zubkov, M. V., & Scanlan, D. J. (2007). Basin-scale distribution patterns of picocyanobacterial lineages in the Atlantic Ocean. Environmental Microbiology, 9(5), 1278–1290
- Zwirgmaier, K., Jardillier, L., Ostrowski, M., Mazard, S., Garczarek, L., Vaultot, D., ... & Scanlan, D. J. (2008). Global phylogeography of marine *Synechococcus* and *Prochlorococcus* reveals a distinct partitioning of lineages among oceanic biomes. Environmental microbiology, 10(1), 147–161

VII. 부록

Appendix 1. Raw value of nitrate and phosphate concentration (μ M) in this study.

	Depth (m)	E1	E2	E	G1	G	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6	S
NO ₃	0	1.72	0.61	2.05	1.60	0.80	2.41	2.96	2.42	0.39	0.60	1.57	1.16
	10	1.78	1.01	1.52	1.61	1.94	2.32	2.13	0.85	0.78	0.40	1.22	1.06
	20	1.96	3.59	2.93	3.51	3.26	3.18	1.69	0.90	2.40	0.40	1.42	1.03
	30	2.10	3.67	3.87	7.26	5.79	7.65	7.25	6.13	6.08	2.45	6.16	4.39
	50	2.27	6.32	5.02	10.14	9.46	9.04	12.08	9.96	4.39	7.71	7.73	8.10
	75				9.66	11.33		11.70	9.94	8.76	9.38	9.40	
PO ₃	0	0.06	0.04	0.03	0.03	0.05	0.03	0.05	0.27	0.07	0.14	0.10	0.13
	10	0.06	0.04	0.05	0.08	0.06	0.05	0.14	0.10	0.21	0.27	0.05	0.09
	20	0.08	0.17	0.08	0.15	0.20	0.15	0.04	0.23	0.26	0.24	0.45	0.10
	30	0.20	0.24	0.18	0.47	0.58	0.47	0.52	0.48	0.46	0.57	0.62	0.32
	50	0.28	0.44	0.25	0.71	0.90	0.71	1.09	0.84	0.44	0.98	0.87	0.79
	75				0.76	0.98		1.05	0.96	0.79	0.95	0.81	

Appendix 2. Raw value of T chl a and Pico chl a concentration (ng L⁻¹) in this study.

	Depth (m)	E1	E2	E	G1	G	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6	S
Tchl <i>a</i>	0	0.69	2.40	0.71	0.48	0.67	1.04	1.02	0.99	0.95	0.34	0.34	1.37
	10	0.86	2.23	0.74	0.47	0.36	1.29	0.97	1.05	0.96	0.37	0.34	1.42
	20	0.84	0.85	0.67	0.24	0.36	0.53	0.65	0.81	1.21	0.53	0.39	1.41
	30	0.55	0.71	0.41	0.18	0.15	0.29	0.40	0.53	0.62	0.74	1.05	0.49
	50	0.04	0.32	0.49	0.10	0.15	0.10	0.14	0.08	0.35	0.29	0.34	0.24
	75				0.75	0.69		0.63	0.39	2.74	0.67	0.80	
Pico chl <i>a</i>	0	0.61	2.14	0.15	1.04	0.37	0.83	0.44	0.37	0.99	0.32	0.38	1.04
	10	0.70	1.72	0.16	0.90	0.41	0.79	0.44	3.73	1.06	0.46	0.51	1.05
	20	0.74	0.17	0.21	0.08	0.14	0.22	0.18	2.93	1.50	0.95	0.68	0.92
	30	0.14	0.09	0.05	0.02	0.15	0.07	0.40	0.15	1.39	1.04	0.87	0.12
	50	0.03	0.02	0.03	0.02	0.07	0.02	0.08	0.02	0.17	0.22	0.14	0.15
	75				0.08	0.07		0.08	0.02	0.34	0.12	0.10	

Appendix 3. Raw value of cell abundances ($\times 10^4$ cell mL⁻¹) in this study.

	Depth (m)	E1	E2	E	G1	G	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6	S
<i>Synechococcus</i>	0	3.83	52.47	6.74	1.15	1.46	7.97	29.15	29.46	13.12	12.73	14.69	1.17
	10	4.91	39.01	9.25	1.37	1.64	7.99	28.45	21.04	13.20	13.13	16.58	1.29
	20	3.78	1.98	4.85	1.30	2.33	5.46	15.49	7.60	7.43	8.60	13.98	1.24
	30	1.04	0.86	1.61	0.46	2.34	1.64	6.16	1.55	4.34	6.19	4.54	0.50
	50	0.41	0.45	0.86	0.34	0.62	0.45	0.72	0.46	2.10	1.38	1.25	0.70
	75				0.75	0.69		0.63	0.39	2.74	0.67	0.80	
<i>Picoeukaryotes</i>	0	0.61	2.14	0.15	1.04	0.37	0.83	0.44	0.37	0.99	0.32	0.38	1.04
	10	0.70	1.72	0.16	0.90	0.41	0.79	0.44	3.73	1.06	0.46	0.51	1.05
	20	0.74	0.17	0.21	0.08	0.14	0.22	0.18	2.93	1.50	0.95	0.68	0.92
	30	0.14	0.09	0.05	0.02	0.15	0.07	0.40	0.15	1.39	1.04	0.87	0.12
	50	0.03	0.02	0.03	0.02	0.07	0.02	0.08	0.02	0.17	0.22	0.14	0.15
	75				0.08	0.07		0.08	0.02	0.34	0.12	0.10	

Appendix 4. Raw value of photosynthetic pigment concentration (ng L⁻¹) in this study.

	Depth (m)	E1	E2	E	G1	G	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6	S
Chl <i>b</i>	0	49.8	245.6	25.4	74.3	35.8	109.5	97.8	65.0	94.1	16.7	22.6	70.8
	10	99.8	210.4	33.9	16.3	53.9	130.7	105.3	233.5	117.9	15.9	37.0	62.1
	20	95.1	32.5	43.3	26.4	41.0	49.6	66.6	49.2	176.8	75.2	61.1	61.3
	30	44.6	15.7	13.3	12.6	14.5	23.9	170.8	58.6	60.5	136.8	176.8	19.4
	50	1.9	3.8	2.9	4.4	16.9	6.7	24.2	8.4	27.4	50.9	39.0	18.8
	75				11.2	30.5		17.3	4.1	16.2	22.1	14.8	
Zea	0	32.4	161.0	18.4	3.4	8.4	67.7	219.0	138.8	74.7	49.2	41.3	4.8
	10	33.5	98.4	26.9	5.1	22.2	68.0	186.7	39.1	38.9	48.5	50.4	4.5
	20	18.8	7.6	13.9	3.8	12.2	31.0	104.3	11.0	22.6	23.2	37.4	4.0
	30	6.6	4.4	5.4	2.4	2.6	10.2	40.4	14.1	11.3	18.9	19.7	3.5
	50	0.7	2.5	3.1	1.1	2.9	2.4	6.3	4.4	10.3	5.6	5.1	3.4
	75				2.1	16.1		3.6	1.9	7.8	3.1	2.8	

Appendix 5. Raw value of photosynthetic pigment concentration (ng L⁻¹) in this study.

	Depth (m)	E1	E2	E	G1	G	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6	S
Fuco	0	13.0	102.7	30.3	20.7	13.8	80.1	51.6	25.0	64.3	19.5	13.7	42.7
	10	24.2	110.3	46.6	20.0	16.3	129.6	83.8	32.6	79.8	18.0	17.4	38.2
	20	21.1	71.9	53.0	18.6	24.1	43.1	72.0	46.8	193.6	35.8	19.6	39.6
	30	41.6	56.1	22.2	11.5	7.2	32.2	123.1	53.7	84.1	87.3	92.4	28.3
	50	6.3	19.1	10.9	3.6	7.7	5.1	10.8	7.1	23.1	24.1	23.0	23.2
	75				5.4	27.2		7.0	3.6	16.4	14.1	8.2	
Hex -fuco	0	18.0	104.9	21.0	22.0	20.5	58.8	46.5	40.8	94.1	40.3	23.4	22.6
	10	34.7	77.3	30.4	10.1	11.5	87.1	54.7	27.4	75.2	39.1	31.8	20.0
	20	31.1	15.5	13.7	17.9	8.9	43.3	65.5	28.4	91.8	81.4	36.9	18.6
	30	25.7	10.4	3.6	4.9	3.4	10.6	109.8	51.1	36.7	86.9	70.2	4.9
	50	2.0	2.8	2.4	1.7	3.9	2.6	7.8	3.7	15.4	10.9	6.8	4.4
	75				3.0	8.3		3.7	1.7	9.6	8.3	2.4	

Appendix 6. Raw value of photosynthetic pigment concentration (ng L⁻¹) in this study (n.d, not detected).

	Depth (m)	E1	E2	E	G1	G	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6	S
But -fuco	0	3.8	19.2	3.4	3.1	3.3	8.3	9.1	10.8	11.1	11.9	7.9	4.5
	10	7.7	16.4	4.7	n.d	4.2	12.3	9.1	11.5	17.1	9.3	8.3	5.3
	20	5.7	9.2	8.1	2.1	5.9	10.3	10.7	7.9	29.8	18.7	12.7	4.3
	30	10.8	6.6	5.1	2.3	1.7	4.7	18.2	10.7	14.2	27.8	20.3	4.5
	50	2.6	2.8	3.0	n.d	2.1	n.d	4.2	n.d	5.2	4.4	4.1	6.0
	75				n.d	6.5		2.7	n.d	3.7	2.9	3.2	
Allo	0	6.8	49.5	7.2	9.3	19.4	15.0	33.3	18.9	11.5	9.9	2.8	2.1
	10	10.8	44.6	11.1	9.2	7.8	19.5	28.5	14.1	13.6	7.8	2.0	3.1
	20	11.1	6.6	19.5	11.5	4.1	10.3	11.1	6.1	18.4	12.3	5.9	5.0
	30	8.3	17.6	11.9	7.7	1.3	3.6	12.6	17.8	6.6	27.3	26.4	2.8
	50	0.7	4.7	8.8	1.1	0.6	1.2	2.0	1.6	2.5	3.0	1.6	1.9
	75				1.2	9.7		1.4	1.3	0.9	2.3	1.8	

국문 요약

초미소 식물플랑크톤은 자가영양 원핵생물에 속하는 *Synechococcus* 와 *Prochlorococcus* 및 진핵생물에 속하는 picoeukaryotes 로 구성되며 다양한 해양 환경에서 일차생산자로서 중요한 역할을 수행한다. 전 세계 넓은 해역에서 높은 개체수를 보이며, *Prochlorococcus* 는 빈영양 해역의 상부 층에서 일차생산의 절반 이상의 기여도를 가진 것으로 알려져 있다. 최근 연구는 우리나라 주변 해에서 초미소 식물플랑크톤의 생체량과 기여도가 높아지는 것으로 보고되고 있어 이에 대한 관심과 연구가 필요한 상황이다. 또한, 한반도의 중요한 해역인 동중국해와 황해는 시기별로 세력을 달리하는 대마난류, 황해난류, 황해 저층 냉수, 우리나라 및 중국의 연안수, 쿠로시오 지류가 복잡하게 얹혀 해양의 물리적 환경은 물론 식물플랑크톤의 생산력과 종 구성을 달리하는 것으로 알려져 있다. 따라서 초미소 식물플랑크톤 군집의 분포 특성과 환경 특성과의 연동성에 대한 이해가 필요하다.

조사 중 관측된 수온을 기준으로 7 개의 수괴로 나누었으며, 각 수괴별 초미소 식물플랑크톤의 군집 구조와 다양성을 분석하였다. 수괴 규모가 큰 황해 저층냉수대와 수온 약층 위로 형성된 수괴는 각각 *Synechococcus* 와 picoeukaryotes 가 높은 개체수를 보임과 동시에 높은 다양성을 나타내었다. 더불어 황해 30 m 부근에 형성된 수온약층은 여러 수괴 사이에서 수온 및 염분 변화가

일어나는 수괴로 규모에 비하여 높은 생물량과 다양성을 나타내 초미소 식물플랑크톤 군집의 환경 변화에 따른 변동성을 파악할 수 있었다. 이는 하계 황해에서 뚜렷하게 형성되는 수온약층이 초미소 식물플랑크톤의 군집 구조와 다양성의 변화에 중요한 영향을 줄 수 있음을 의미한다. 특히 분급된(size-fractionated) chl *a* 농도는 전체 식물플랑크톤 chl *a* 농도에서 높은 기여율을 나타냈다. 이는 넓은 스펙트럼의 생태·생리적 특성을 갖는 초미소 식물플랑크톤은 환경변화에 적응할 수 있는 clade/OTU가 풍부할 수 있음을 시사한다. 또한 장강 저염수의 영향이 황해 표층 수괴에 낮은 염분을 형성하여 저염종인 OTU가 출현한 것은 여름철 강우량과 담수 배출량이 증가하면 초미소 식물플랑크톤 군집의 다양성에도 영향을 줄 수 있음을 시사하고 있다. 이러한 특성의 이해는 하계 우리나라 주변해역에 형성되는 장강희석수에서의 생태적 변화와 변동 요인을 규명하는 기초 자료로 활용될 수 있을 것이다.