

2019년 여름 동중국해 북부해역의 수괴 분포에 따른 미소플랑크톤의 공간분포 및 생태구조 특성

윤양호*, 박지혜¹, 이현지¹, 서호영

전남대학교 해양융합과학과, ¹전남대학교 대학원 환경해양학과

Characteristics of ecological structure and spatial distribution of micro-plankton in relation to water masses in the northern East China Sea (nECS) in summer 2019

Yang Ho Yoon*, Ji Hye Park¹, Hyeon Ji Lee¹ and Ho Young Soh

Department of Marine Convergence Science, Chonnam National University, Yeosu 59626, Republic of Korea

¹Graduate School of Chonnam National University, Yeosu 59626, Republic of Korea

*Corresponding author

Yang Ho Yoon

Tel. 061-659-7142

E-mail. yoonyh@jnu.ac.kr

Received: 7 July 2020

First Revised: 28 July 2020

Second Revised: 10 August 2020

Revision accepted: 24 August 2020

Abstract: We conducted a field survey to analyze the ecological structure and spatial distribution of microplankton (phytoplankton and ciliates) in relation to water masses at 21 stations on the surface and chlorophyll-*a* maximum layers (CML) in the Northern East China Sea (nECS; 32°–33°N; 124°00′–127°30′E) from August 3 to August 6, 2019. The results showed that the water masses were divided into Chinese Coastal Waters (CCW) and the Tsushima Warm Current (TWC). The CCW showed the environmental characteristics of high temperature and low salinity, and the TWC showed high temperature and high salinity. The characteristics of the phytoplankton community in the CCW showed various community structures related to the nutrients supplied from the large rivers of the Chinese continent. However, the TWC had simple community structures because it originated near the equator and moved northward. The standing crops of phytoplankton and ciliates were very high in the CCW but showed low at the TWC. In particular, from the higher standing crops of protozoa than plant plankton at the TWC, the energy flow at the lower tropic levels caused by the microbial loop that fed on heterotrophic bacteria played an important role in the production of resource organisms. In other words, the marine ecological structure of the nECS in summer could be estimated as a bottom-up system at the CCW and a top-down system at the TWC.

Keywords: water masses, Chinese Coastal Waters (CCW), Tsushima Warm Current (TWC), phytoplankton community, ciliates, microbial loop, top-down and bottom-up system, ecological structure, nECS

서론

동중국해는 중국 동쪽에서 일본 규슈 및 제주도 남쪽의 광활한 해역으로 구로시오해류의 지류인 쓰시마해류의 영향을 강하게 받을 뿐만 아니라 중국의 양쯔강 및 황하 등 대형하천에서 유출된 담수의 영향도 강하다(Beadsley *et al.* 1985; Kim and Rho 1994; Hur *et al.* 1999; Ichikawa and Beadsley 2002; Lie and Cho 2016). 특히 여름은 겨울 활발한 해수혼합으로 냉각되어 황해 저층에 존재하는 황해 저층냉수괴의 영향도 받고 있다(Hu 1986; Liang *et al.* 2018; Zhong *et al.* 2018). 특히, 중국을 따라 남하하는 중국연안수는 동중국해로 유입된 쓰시마난류에 의해 남하가 차단되고, 두 수괴는 혼합하면서 한국 남해로 유입되어, 대한해협과 쓰시마해협을 통해 동해로 유출된다(Fukudome *et al.* 2010).

이와 같은 다양한 수괴의 확장과 혼합으로 동중국해의 해양환경과 해양생물의 생산에 영향을 미치게 되기에, 동중국해의 수괴분포는 상대적으로 뚜렷한 계절 변화를 나타낸다(Li and Zhang 2012). 또한, 중국의 대형하천에서 공급되는 풍부한 영양염은 높은 기초생산을 유지하게 되어, 회유성 어류는 물론 다양한 수산자원생물에 대한 좋은 어장이 형성된다(Mio *et al.* 1984; Kondo 1985; Chen *et al.* 1997; Zhang *et al.* 2016). 그렇기에 동중국해는 우리나라 수산업의 최대 어장으로(Baik *et al.* 2005), 안정된 수산물의 지속적 공급을 위한 생산지로 중요하다(Rho 1985). 또한, 동중국해의 상당 부분은 중국, 한국, 일본 등 인접하는 국가의 공동수역으로 오래전부터 관심이 집중되어 다양한 연구가 진행되었다. 주로 20세기 중반에는 일본에 의한 연구가 보고되었지만(Nagasawa and Murano 1967; Mio *et al.* 1984; Kondo 1985; Matsuda *et al.* 1989; Kamiyama 1991), 20세기 후반부터 중국에 의해 연구가 추진되고 있다(Lu 1991; Chen *et al.* 1997; Chen *et al.* 2004; Liang and Pauly 2017; Xiao *et al.* 2019 etc). 국내에서도 동중국해가 우리나라 해양환경 및 수산업에 미치는 중요성 인식하여, 최근 해양환경(Yang and Kim 1990; Yoon *et al.* 2015; Lee *et al.* 2017) 및 미소플랑크톤을 포함하는 기초생물에 관한 연구(Yoon *et al.* 2003; Yoon *et al.* 2005a, b; Noh *et al.* 2006; Yoon *et al.* 2007; Park *et al.* 2008; Park *et al.* 2019)가 활발하게 수행되지만, 중국이나 일본의 연구결과 등에 비하면 아직도 미흡한 실정이다.

그러나 최근 동중국해는 자원생물의 남획, 지구온난화, 산업발전 등에 따른 해양오염 등으로 어장환경은 악화일로에 있다. 특히 남획에 따른 천적 생물의 감소 등으로 양쯔강 하구역을 중심으로 이상 발생한 노무라깃집 해파리 등 대형해파리의 이동(Uye 2008; Wang *et al.* 2016; Xiao *et al.* 2019 etc) 및 양쯔강 중류의 삼협댐 등 하천공사 영향으로 동중국해 어장환경은 급속하게 변화하여, 특정 계절에 다량으로 유출된 하천수가 제주도 서방해역까지 확장되는 등(Kim *et al.* 1998; Kim *et al.* 2015), 한국 연안해역의 해양환경과 수산업을 포함한 해양산업에까지 커다란 영향을 미치고 있다(Kim *et al.* 2012; Lee *et al.* 2017).

그러기에 이 논문은 동중국해의 자원관리, 효율적 해양환경 이용과 보전 등을 위하여 지속적 모니터링을 수행하는 연구의 한 부분으로 2019년 여름 동중국해 북부해역의 수괴 분포에 따른 식물플랑크톤 군집 및 섬모충을 주로 하는 원생동물의 분포패턴과 수괴 차이에 따른 생태구조의 특성을 해석하였기에 보고한다. 앞으로 지속적인 모니터링으로 동중국해 북부해역의 해양환경 및 기초생물의 변화를 발생시키는 원인 등을 규명하여 효율적 수산자원관리 및 이용은 물론 해역의 효율적 관리와 보전에 필요한 기초자료를 제공한다.

재료 및 방법

여름 동중국해 북부해역의 수괴 분포에 따른 식물플랑크톤 군집 및 섬모충류 생물량 등 미소플랑크톤의 공간분포와 생태구조의 특성을 파악하기 위해 2019년 8월 3일에서 8월 6일까지 21개 정점을 대상으로 현장조사를 하였다(Fig. 1). 조사는 전남대학교 실습선 새동백호(2,996톤)를 이용하였으며, 수괴 분석을 위한 수온, 염분의 자료는 선박에 장착된 CTD(SBE 19, Sea-bird Electronic, USA)로 측정하였다. 식물플랑크톤 군집 및 원섬모충류 표본은 로젯 샘플러(SBE 32, Sea-bird Electronic, USA)를 이용하여 표층과 클로로필 최댓층(Chlorophyll *a* Maximum Layer = 수온약층, 이하 CML로 표기)을 대상으로 1 L의 해수를 채수하였다. 환경인자는 저층(Bottom + 10 m)에 대해서도 분석하였다. 채수된 표본은 현장에서 루골 용액 최종 농도가 2.0%가 되도록 고정된 다음 광분해를 방지하기 위해 차광하였다. 고정된 표본은 실험실에서 차광된 플라

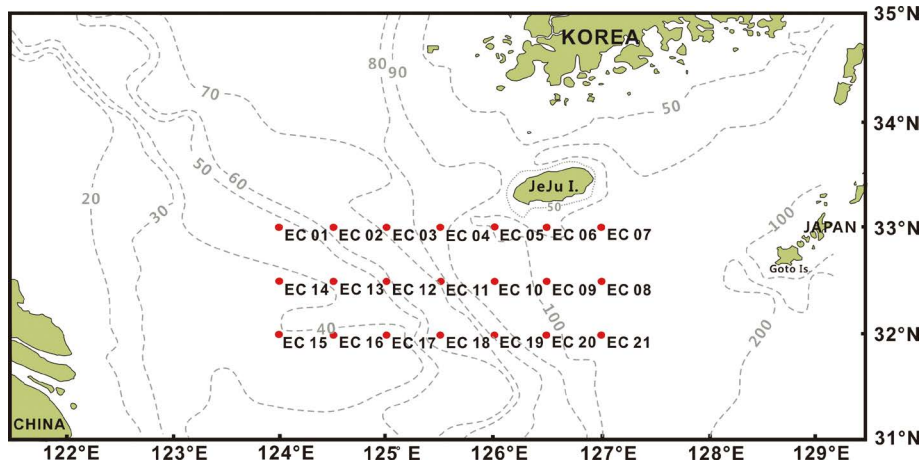


Fig. 1. Map showing the sampling station in the nECS in the summer of 2019.

스틱 메스실린더를 이용 48시간 이상 정치하여 상등액을 제거하는 방법을 수차례 반복하여 최종농도가 10 mL가 되도록 100배 농축하였다(Osc 1986). 검경은 1.0 mm 간격의 가로와 세로 선이 들어 있는 계수판(No. 5608-C, Rigosha, Japan)을 사용하여 농축 시료 0.1 mL를 미분간접 장치(DIC)가 있는 광학현미경(Eclipse 80i, Nikon, Japan)에서 100~400× 배율로 종의 동정 및 계수를 하였다. 식물플랑크톤 종 동정은 식물플랑크톤 관련 도감(Cupp 1943; Chihara and Murano 1997; Tomas 1997; Hallegraeff *et al.* 2010; Omura *et al.* 2012)과 다양한 분류논문을 참고하였다. 그리고 식물플랑크톤 분류체계는 World Register of Marine Species (WoRMS, www.marinespecies.org)를 기준으로 정리하였다. 다만, 섬모충류는 동종정은 실시하지 않았으며, 세포 밀도에 의한 현존량만 산출하였다.

검경 자료를 이용하여 식물플랑크톤 출현 종조성, 세포 밀도에 의한 현존량 및 우점종 등을 도출하였고, Primer 프로그램을 이용하여 정점별로 생태지수 중에 다양성 지수(H')와 우점도 지수(D)를 아래 계산식을 이용하여 산출하였다.

$$\textcircled{1} \text{ 다양성 지수: } H' = -\sum P_i \times \ln(P_i)$$

(Shannon and Weaver 1963)

P_i : i 번째 종의 점유율

$$\textcircled{2} \text{ 우점도 지수: } D = (Y_1 + Y_2) / Y \text{ (McNaughton 1968)}$$

Y : 총 세포수, Y_1 과 Y_2 : 첫 번째와 두 번째 우점종의 세포수

또한, 식물플랑크톤의 주요 분류군 및 5% 이상의 우점종을 나타내는 우점종, 출현 종수 등 식물플랑크톤 관련 인자 및 수온, 염분, 탁도, 용존산소, Chl- a 농도 등의 환경자료를 이용하여 주성분 분석을 하였다. 주성분 분석은 SPSS 프로그램을 이용하여 누적 기여율 70%를 기준으로 계산하였다(Yoon 1989). 계산된 주성분 분석의 인자 부하량 분포로 동중국해의 생물해양학 특성을 결정하는 주요 환경인자의 파악과 함께 식물플랑크톤 분류군 및 우점종의 출현 환경특성을 해석하였고, 득점을 이용하여 동중국해 북부해역의 해역 구분 및 해역 특성을 해석하였다.

결과 및 고찰

1. 수괴 분포

2019년 여름 동중국해 북부해역의 수온은 표층에서 27.1~29.4°C의 범위에서 28.4±0.53°C(표준±표준편차로 이하 같음)의 변동 폭을 보여, 전체 해역에서 균일하였다. CML은 14.7~29.3°C의 범위에서 21.4±4.07°C의 변동 폭으로 해역에 따른 차이가 크게 나타났으며, 저층은 12.2~23.4°C의 범위에서 16.0±3.33°C의 변동 폭으로 CML과 유사하였다. 공간분포는 표층에서 중국에 가까운 서부해역에서 28.5°C 이상으로 높았고, 중앙부에서 동부해역에 걸쳐서는 28.5°C 이하로 낮았으나, 그 차이는 크지 않았다(Fig. 2A). CML은 남서해역에서 25.0°C 이상의 수온을, 그리고 남서해역에서 중앙부로 확대된 해역 및 제

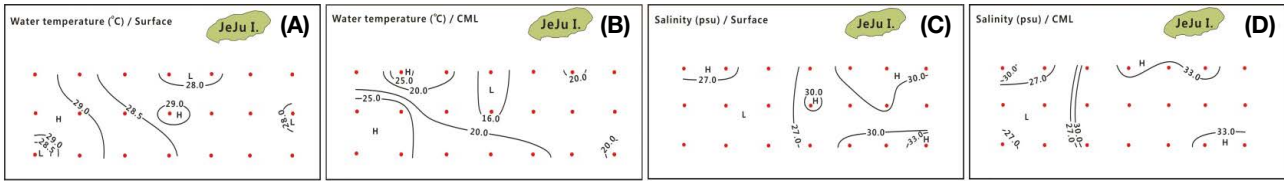


Fig. 2. Horizontal distributions of water temperature (A, B) and salinity (C, D) at the surface (A, C) and CML (B, D).

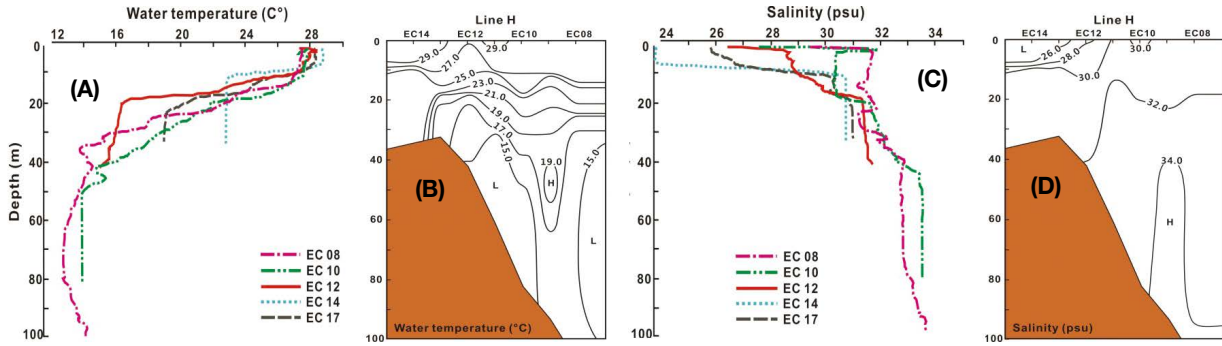


Fig. 3. Vertical profiles (A, C) and cross-sectional distribution (B, D) of water temperature (A, B) and salinity (C, D) at Line H.

주 남서해역의 정점 EC02 및 EC03에서 20.0°C 이상의 수온을 보이지만, 중앙부에서 동부해역에 걸쳐서는 20.0°C 이하의 수온을 나타내었다. 특히 제주 남서부해역의 정점 EC04 및 EC11에서 16.0°C 이하의 낮은 수온을 나타내었다(Fig. 2B).

일부 정점의 수온 연직 분포는 중국에 가까운 정점 EC14 및 EC17에서 수온약층은 수심 10~20m에 형성되었지만, 상대적으로 깊은 동부해역의 정점 EC08 및 EC10에서는 수심 20~40m에 강한 수온약층이 형성되었다. 그리고 정점 EC12는 수심 20m에서 급격하게 수온이 감소하는 모습을 나타내었다(Fig. 3A). 또한, 위도 32°30'N의 수심 약 40m인 서부해역 EC14(124°E)에서 수심 100m인 동부해역 EC08(127°E)까지의 동서를 연결하는 선인 line H를 설정하여, 수온의 단면분포를 살펴보았다. 라인은 정점 EC12(125°E)에서 수심이 급격하게 증가하였다. Line H의 수온 단면분포는 서부해역 두 개 정점 표층에서 29.0°C 이상으로 높았으나, 수심이 증가함에 따라 감소하여, 10m 수심에서는 전체 라인에서 27.0°C로 낮아졌으며, 낮은 수심에서는 혼합이 발생하였다. 그러나 수심 20m 부근에서 23°C 이하의 수온으로 강한 수온약층이 관찰되었다. 이후 수심 증가와 함께 수온은 감소하였으며, 정점 EC12와 EC09 사이의 급격하게 변하는 해저사면을 따라 심층 해수가 CML

까지 용승하는 모습이 관찰되었다(Fig. 3B).

표층 염분은 24.06~33.07 psu의 범위에서 28.81 ± 2.67 psu의 변동 폭을 보였고, CML은 24.10~33.77 psu의 범위에서 30.96 ± 2.38 psu의 변동 폭을, 그리고 저층은 31.07~34.53 psu의 범위에서 33.05 ± 1.21 psu의 변동 폭으로, CML까지 염분은 해역에 따라 상대적으로 큰 변화를 보였으나, 저층은 비교적 균일하였다. 공간분포는 표층에서 중앙부 정점 EC03과 EC04 사이의 남북 연결선을 중심으로 강한 염분 경계가 형성되어, 서부해역은 27.0 psu 이하의 낮은 농도를 보이나, 동부해역은 27.0 psu 이상의 농도를 보였다. 특히 북쪽 및 남쪽의 동서 방향에서 30.0 psu 이상 염분을 나타내었지만, 전체적으로 낮은 농도였다(Fig. 2C). 그리고 중앙부인 정점 EC11에서 30.0 psu 이상의 패치 분포는 중층해수가 용승한 것이다(Fig. 3D). CML은 표층과 유사하나, 27.0 psu 이하의 낮은 염분을 나타내는 해역이 표층보다 서쪽으로 축소되었고, 중앙부에서 동부해역에 걸쳐서는 30.0 psu 이상의 염분을 보였다. 특히 표층과 유사하여 북쪽 및 남쪽 라인의 일부 정점에서는 33.0 psu 이상의 높은 염분을 나타내었다(Fig. 2D).

염분의 연직 분포는 얇은 수심을 보이는 서부해역의 정점 EC14 및 EC17에서 수심 5m 전후에서 염분약층이 형성되지만, 깊은 수심인 동부해역의 정점 EC08 및 EC10은

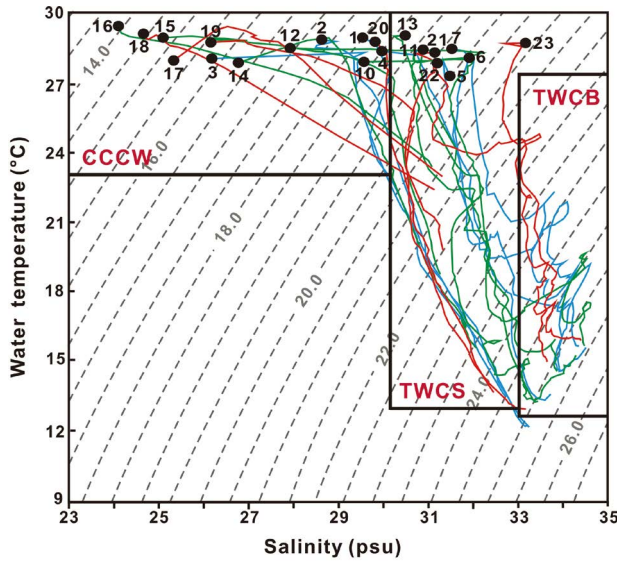


Fig. 4. T-S diagrams of each station in the nECS in the summer of 2019.

수심 20~40 m에서 염분약층이 형성되어, 서부해역보다 깊어졌다. 그리고 정점 EC12는 수심 2~20 m에 걸쳐 급격하게 염분이 감소하였다(Fig. 3C). 또한, line H의 단면분포는 서부해역의 두 개 정점 표층에서 26.0 psu 이하의 낮은 농도를 보이지만, 수심 증가에 따라 염분도 증가하여 EC11의 표층에서 서부해역의 두 정점의 10 m 수심까지 30.0 psu 농도까지 증가하였다. 그러나 서부해역의 해저에서 동부해역의 표층에서 15 m 수심까지는 혼합된 특성으로 30.0~32.0 psu 범위의 염분이 분포하였다. 동부해역의 15 m보다 깊은 수층은 수심의 증가에 따라 염분도 증가하여 해저 부근에서는 34.0 psu 이상의 높은 염분을 나타내었다. 또한, 염분도 수온과 같이 EC12와 EC09 사이에서 수심 50~90 m까지 급격하게 변하는 해저 사면을 따라 저층 해수가 CML까지 용승되었다(Fig. 3D).

각 정점의 표층에서 저층까지 1 m 간격의 수온과 염분에 의해 작성된 T-S diagram에서 서부해역은 표층에서 수온약층까지 고온, 저염 특성을 보이는 수괴가 출현하였다. 그러나 중앙부에서 동부해역에 걸쳐서는 표층에서 고온, 고염, 중·저층은 넓은 수온 폭에 고염 특성을 보이는 수괴가 관찰되었다(Fig. 4). 고온, 저염 특성을 보이는 수괴를 Gong *et al.* (1996)은 양쯔강 희석수로 정의하였으며, 수온 변화 폭이 큰 고염 특성을 보이는 수괴를 Hur *et al.* (1999)은 구로시오 확장수라고 하였으나, 구로시오 확장수는 재차 표층수 및 저층수로 구분하였다(Fig. 4). 그러나 동중국

해의 여름은 구로시오 확장수 (=쓰시마난류수), 중국연안수 (=양쯔강 희석수), 황해 저층냉수, 황해 표층수, 황해 저층수, 그리고 이들의 혼합수 등 매우 다양한 수괴가 존재한다(Beardsley *et al.* 1985; Kondo 1985; Hu 1986; Lie and Cho 2016; Liang *et al.* 2018). 2019년 동중국해의 북부해역의 여름 관측결과에서 정점 EC03와 EC04 사이의 남북방향으로 발달된 경계역, 즉 전선이 관찰된다(Hickox *et al.* 2000; Ichikawa and Beardsley 2002). Hickox *et al.* (2000)은 이 전선을 Yangtze bank ring front로 정의하였다.

이러한 결과를 통해 2019년 여름 동중국해 북부해역의 수괴 분포는 크게 서부해역에서 23.0°C 이상의 수온, 31 psu 이하의 염분을 보이는 고온, 저염 특성의 수괴는 Gong *et al.* (1996)이 정의한 양쯔강 희석수에 해당하였다. 그리고 중앙부에서 동부해역에 걸쳐 관찰되는 큰 수온 변화에 고염 특성을 보이는 수괴는 Hur *et al.* (1999)이 40년 장기 수온과 염분 해석에서 7~8월의 수온 13.2°C 이상, 염분 약 30.0 psu 이상으로 0~50 m 수심에 출현하는 구로시오 확장 표층수 및 수온 약 12~28.0°C 범위, 염분 약 33.0 psu 이상으로 50~100 m 수심에 출현하는 구로시오 확장 저층수로 정의된 수괴로서 쓰시마난류수에 해당하였다. 따라서 2019년 8월 동중국해 북부해역은 고온, 저염의 양쯔강 희석수와 고온, 고염의 쓰시마난류수로 양분되기에, 식물플랑크톤 군집에서는 양쯔강 희석수인 중국연안수 (Chinese Coastal Waters, 이하 CCW로 표기) 및 쓰시마난류수 (Tsushima Warm Current, 이하 TWC로 표기)로 표기하여 약자로 설명한다.

2. 식물플랑크톤 군집

1) 종조성

여름 동중국해 북부해역에서 관찰된 식물플랑크톤 종은 전체 57속 95종으로, 분류군별로는 규조류가 22속 30종으로 32.0%, 와편모조류가 30종 60종으로 63.0%, 규질편모조류가 3속 3종으로 3.0%, 그리고 남조류와 유글레나조류가 각 1속 1종으로 약 1.0%의 점유율을 나타내어, 와편모조류에 의한 점유율이 높은 특징을 보였다. 수층별로는 표층에서 50속 80종이 출현하였고, CML은 40종 65종이 출현하여 표층이 저층보다 다양하였으며, 이러한 수층 사이의 차이는 와편모조류에서 분명하게 나타났다(Fig. 5). 출현 종수의 공간분포는 표층에서 5~44종의 범위에서 22±11종의 변화 폭으로 변화하였고, CML에서 3~33종의 범위에

서 16 ± 9 종의 변화 폭으로 변화하여, 표·저층 모두에서 해역에 따른 출현 종수의 차이가 큰 특징을 보였다. 수괴별은 표층에서 CCW가 30 ± 7 종의 변동 폭을 보였고, TWC가 12 ± 6 종의 변동 폭을 보여, CCW가 TWC보다 두 배 이상 높은 출현 종수를 나타내었다(Fig. 6A). CML는 표층과 유사하여, CCW 영역이 서쪽으로 축소되어, 24 ± 7 종의 변동 폭으로 남부해역에서 20종 이상을, 북부해역에서 15종 전

후의 출현 종수를 나타내었고, TWC는 10 ± 4 종의 범위로 표층보다 낮은 출현 종수를 나타내었다(Fig. 6B).

2) 현존량

식물플랑크톤 현존량도 출현 종수의 변화와 유사하여, 표층이 $2 \sim 712.8$ cells mL⁻¹의 범위에서 296.9 ± 289.0 cells mL⁻¹의 변화 폭을 보였고, CML은 $0.7 \sim 1,137.8$ cells mL⁻¹의 범위에서 101.3 ± 249.4 cells mL⁻¹의 변화 폭으로 해역에 따라 표층은 두 자릿수, CML은 네 자릿수 차이를 나타내는 매우 큰 불균일 분포를 보였다. 전체 식물플랑크톤 현존량의 공간분포는 표층의 CCW에서 522.5 ± 183.6 cells mL⁻¹의 범위로 남부해역에서 1,000 cells mL⁻¹ 이상의 높은 현존량을 보였으며, TWC는 48.7 ± 132.4 cells mL⁻¹의 범위로 CCW보다 한 자릿수 낮은 현존량으로 해역에 따른 차이가 크고, TWC 대부분에서 10 cells mL⁻¹ 이하의 낮은 현존량을 나타내었다(Fig. 7A-1). CML의 CCW는 230.9 ± 350.0 cells mL⁻¹의 변동 폭으로 표층의 절반 정도의 현존량을 보였고, TWC는 4.2 ± 4.1 cells mL⁻¹의 범위로 CCW보다 두 자릿수 낮은 현존량으로 그 차이가 큰 특징을 보였다(Fig. 7A-2).

규조류 현존량은 표층의 CCW에서 90.9 ± 137.5 cells mL⁻¹의 변동 폭으로 서부해역에서 300 cells mL⁻¹ 이상의 높은 현존량을 나타내지만, 정점 EC01에서 10 cells mL⁻¹ 이하의 낮은 현존량으로 공간적으로 큰 분포 차이를 나타내었다. 한편 TWC는 38.9 ± 119.2 cells mL⁻¹의 변동 폭으로 CCW의 약 1/3 수준의 현존량이며, 공간적 분포는 CCW와 같이 차이가 크게 나타났다(Fig. 7B-1). CML도

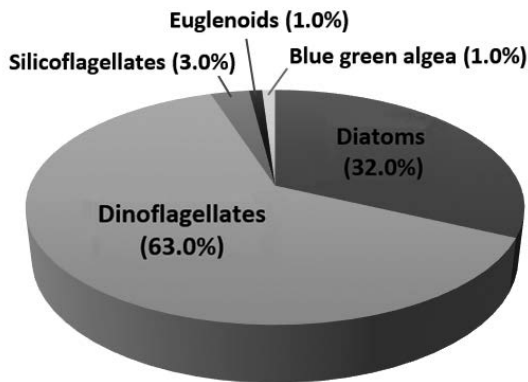


Fig. 5. Species composition of the phytoplankton community in the nECS in the summer of 2019.

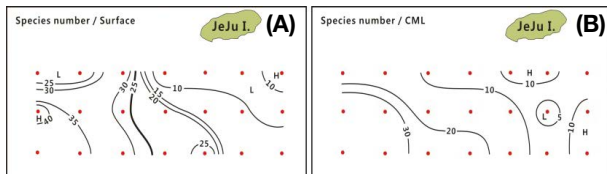


Fig. 6. Horizontal distributions of species numbers in the phytoplankton community at the surface (A) and CML (B).

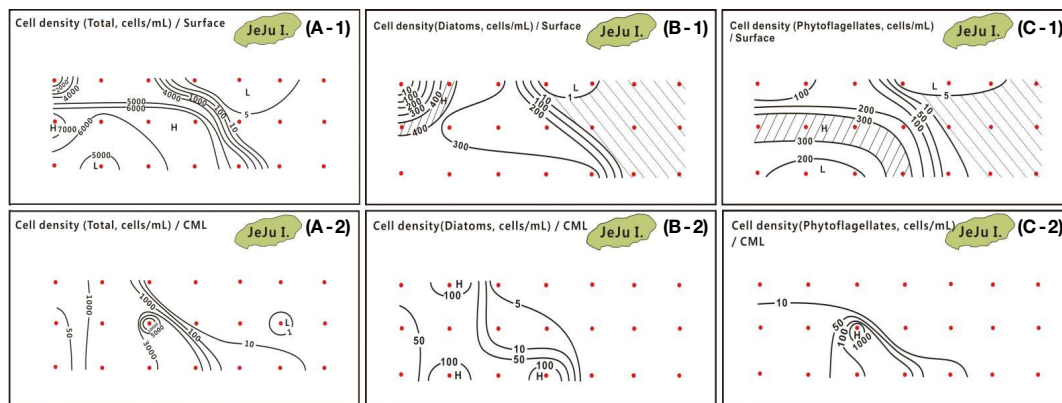


Fig. 7. Horizontal distributions of the cell density of the total phytoplankton (A), diatoms (B), and phytoplankton (C) at the surface (A-C-1) and CML (A-C-2).

Table 1. Dominant species and dominance of the phytoplankton community in relation to water masses such as Chinese coastal waters (CCW) and Tsushima warm current (TWC)

| Dominant species | Dominance (%) | | | | | |
|-----------------------------------|---------------|------|---------|------|---------|------|
| | Total | | CCW | | TWC | |
| | Surface | CML | Surface | CML | Surface | CML |
| DIATOMS | 63.9 | 31.7 | 62.5 | 79.9 | 31.7 | 28.6 |
| <i>Chaetoceros affinis</i> | 4.8 | | 5.2 | | 1.9 | |
| <i>Proboscia alata</i> | | 6.3 | 3.7 | 75.2 | 6.3 | 3.8 |
| <i>Rhizosolenia flaccida</i> | 9.3 | 13.7 | 30.6 | | 13.7 | 12.7 |
| DINOFLAGELLATES | 36.1 | 68.3 | 37.5 | 20.1 | 68.3 | 71.4 |
| <i>Gymnodinium</i> sp./small size | | | | | | 14.5 |
| <i>Gyrodinium dominans</i> | | | | | | 5.2 |
| <i>Scrippsiella trochoidea</i> | 25.5 | 61.3 | 27.1 | 6.2 | 62.0 | 33.3 |

CCW: Chinese Coastal Waters, TWC: Tsushima Warm Current, CML: Chlorophyll *a* Maximum Layer

표층과 유사하여, CCW에서 73.3 ± 65.0 cells mL⁻¹의 변동 폭으로 일부 정점에서 100 cells mL⁻¹ 이상의 현존량을 나타내었지만, TWC는 1.2 ± 1.8 cells mL⁻¹의 변동 폭으로 CCW에 비해 극단적으로 낮은 규조류 현존량이 관찰되었다(Fig. 7B-2).

와편모조류를 주로 하는 식물성 편모조류 현존량은 표층의 CCW에서 195.7 ± 140.2 cells mL⁻¹의 변동 폭으로 남쪽 라인의 오른쪽으로 확장되어 200 cells mL⁻¹ 이상의 현존량을 보였고, TWC는 9.8 ± 13.3 cells mL⁻¹의 변동 폭으로 CCW보다 두 자릿수가 낮은 현존량으로 대부분 해역에서 10 cells mL⁻¹ 이하의 낮은 값을 나타내었다(Fig. 7C-1). CML은 CCW에서 157.5 ± 366.1 cells mL⁻¹의 변동 폭으로 정점 EC12에서 1,000 cells mL⁻¹ 이상의 높은 패치 분포가 관찰되었다. 그리고 TWC는 3.0 ± 3.5 cells mL⁻¹의 변동 폭으로 표층과 같이 CCW에 비해 두 자릿수 낮은 현존량을 나타내었다(Fig. 7C-2).

3) 우점종

2019년 여름 동중국해 북부해역 식물플랑크톤 군집에서 우점분류군은 표층에서 규조류가 63.9%이었고, CML은 와편모조류가 68.3%로서 수층에 따라 우점분류군이 차이를 보였다. 우점종은 표층과 CML 모두 와편모조류 *Scrippsiella trichoidea*가 각 36.1%와 61.3%의 우점율을 나타내었고, 다음으로 규조류 *Rhizosolenia flaccida*가 각 9.3%와 13.7%를 나타내었으며, CML은 *S. trichoidea*에 의한 극우점이 관찰되었다. CCW의 표층은 전체와 유사하여 규조류

점유율이 62.5%, 식물성 편모조류가 37.5%로, *Rh. flaccida*가 30.6%의 우점율로 최우점하였고, *S. trichoidea*가 27.1%의 우점율로 차우점하였다. 그러나 CML은 규조류 점유율이 79.9%로 증가하였고, 식물성 편모조류는 20.1%로 감소하였다. 우점종도 표층에서 낮은 우점율을 보였던 *Proboscia alata*가 우점율 75.1%로 극우점하였고, *S. trichoidea*는 6.2%의 우점율로 표층의 1/5 수준을 나타내었다(Table 1). TWC는 표층과 CML 모두에서 규조류 점유율이 각 31.7% 및 28.6%로 감소하였다. 우점종은 *S. trichoidea*가 표층과 CML에서 62.0%와 33.3%의 우점율로 최우점하였고, *Rh. flaccida*는 표층에서 13.7% 우점율로 차우점종을, *Gymnodinium* sp./small size는 CML에서 14.5%의 우점율로 차우점하였다. 그리고 CML에서 *Rh. flaccida*는 12.7% 우점율을 나타내었다(Table 1).

4) 생태지수

2019년 여름 동중국해 북부해역의 식물플랑크톤 군집의 생태지수에서 다양성 지수는 표층에서 1.10~3.49의 범위에서 2.65 ± 0.70 의 변동 폭을 나타내었으며, CML은 0.69~3.28의 범위에서 2.31 ± 0.70 의 변동 폭으로 표층보다 다소 낮았다. 표층의 공간분포는 CCW에서 3.16 ± 0.26 의 변동 폭으로 3.0 이상의 높은 다양성 지수를 보이는 것에 반해, TWC는 2.09 ± 0.59 의 변동 폭으로 CCW에 비해 1 포인트 낮은 값을 보였고, 두 수괴 사이에 분명한 경계가 관찰되었다(Fig. 8A). CML은 현존량 분포에서 남쪽 라인에서 중앙부로 크게 확장된 CCW에서 2.89 ± 0.35 의 변동

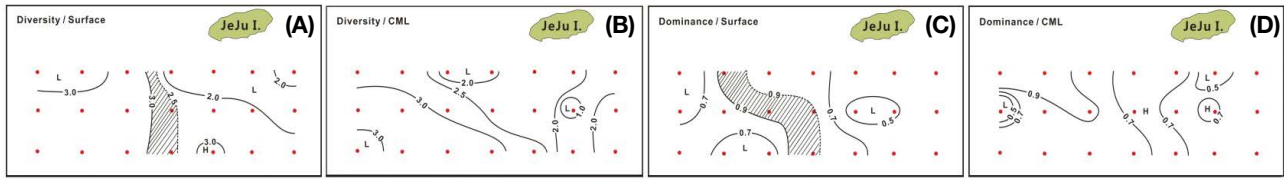


Fig. 8. Horizontal distributions of the diversity (A, B) and dominance (C, D) of the phytoplankton community at the surface (A, C) and CML (B, D).

폭으로 2.5 이상의 다양성 지수를 보이거나, TWC는 1.87 ± 0.56 의 변동 폭으로 표층과 유사하였다(Fig. 8B).

우점도 지수는 표층에서 0.40~0.96의 범위에서 0.70 ± 0.18 의 변동 폭을 보였고, CML은 0.39~1.00의 범위에서 0.70 ± 0.18 의 변동 폭을 보여 수층에 따른 차이가 명확하지 않았다. 표층의 공간분포는 CCW에서 0.9 이하의 지수를 보였으며, TWC에서 0.7 이하의 지수를 나타내었고, 두 수괴 경계역에서 0.9 이상의 매우 높은 우점도 지수를 나타내었다(Fig. 8C). CML은 현존량에서 남쪽 라인에서 중앙부로 크게 확장된 모습으로 CCW에서 0.7 이상의 높은 우점도 지수를 보이는 것에 반해, TWC는 표층과 유사하여 0.7 이하의 지수를 나타내었다(Fig. 8D).

동중국해의 식물플랑크톤 군집은 양쯔강 등 중국의 대형하천을 통해 운반되는 높은 영양염류에 의해 bottom-up system에 의해 조절되는 것이 보고 된다(Bai et al. 2015). 그러나 한편으로는 황해 중앙부 및 남부해역에서 봄에 대발생하는 식물플랑크톤 군집은 미소 동물플랑크톤의 포식압에 의해 조절되고 있다는 top-down system이 관찰되는 등(Sun et al. 2013), 시간 및 공간에 따른 군집 및 생물량 변동 폭이 큰 특징을 나타낸다(Gong et al. 1996; Yoon et al. 2005b).

여름 동중국해 식물플랑크톤 군집은 주로 규조류와 와편모조류로 구성되지만, 기타 녹조류, 황갈조류, 남조류 등이 일부 출현하는 것이 보고된다(Guo et al. 2014). 하지만 본 연구에서는 녹조류가 관찰되지 않았고, 대신 유글레나조류가 관찰되었다. 동중국해 북부해역의 식물플랑크톤 군집을 구성하는 종조성이 매우 단순한 것이 기존 연구에서 확인되며(Yoon et al. 2005a, 2007), 2018년 6월 본 연구의 왼쪽 두 개 남북라인을 포함하는 황해 남부의 연구에서도 매우 단순로운 종조성 나타내었다(Lee et al. unpublished data). 그러나 8월은 6월 및 기존 결과와는 다르게 매우 다양한 종조성을 나타내지만, Guo et al. (2014)이 25°~32°N의 범위의 중국 대륙붕 해역에서 71속 211종(규조류가

64.4%, 와편모조류가 31.8%)의 출현을 보고하는 등, 동중국해 연구해역의 범위, 정점 수, 연구자에 따른 동정 기준 등에 따라 식물플랑크톤 군집의 종조성에 큰 차이를 보였다(Kim et al. 2020).

식물플랑크톤 현존량은 담수에 의해 영양염류가 공급되는 연안해역에서 높고, 남방에서 북상하는 쓰시마난류해역에서 낮지만(Jung et al. 2012), 특히 양쯔강 유출수로 혼탁한 하구역보다, 해수와 혼합되는 해역에서 높다(Yoon et al. 2003; Guo et al. 2014; Liu et al. 2016). 그러나 8월 연구에서 동중국해의 급격하게 수심이 변화하는 해역에서 관찰된 $10,000 \text{ cells mL}^{-1}$ 은 매우 높은 세포 밀도로, 연안수와 쓰시마난류의 경계역인 전선(Ichikawa and Beardsley 2002)이라는 특성과 함께 지형적인 현상으로 발생하는 용승 현상(Fig. 5 참조)이 공조하여 발생하는 것으로 판단되었다. 이러한 결과는 동중국해의 양쯔강 희석수 영향을 받는 해역의 용승역은 비용승역보다 인산염이 최대 10배 이상 차이를 보인다는 결과(Chen et al. 2004)에서도 유추할 수 있었다. 수층별로 식물성 편모조류 현존량이 표층에서 CML보다 높게 나타나는 것은 편모류의 운동력에 따른 일주연직이동(Kamykowski and Zentara 1977; Hall and Paerl 2011)에 영향을 받는 것으로 판단할 수도 있지만, 정점에 따라서는 표본채집이 야간에 이루어져, 일주연직이동에 대한 영향 등에 대해서는 분명하게 판단할 수 없었다.

최근 동중국해의 50년 장기자료에서 전체적인 식물플랑크톤 군집에서 우점종 천이는 대형종에서 소형종, 그리고 온대-아열대의 광온성 종에서 아열대-열대의 광온성 종은 증가하지만, 광염성 종인 *Skeletonema costatum*-ls는 감소하는 특성을 보고하였다(Jiang et al. 2014). 또한, 해역적으로는 동중국해를 양쯔강 플럼역 (< 31 psu), 중앙육붕역 (31.0~33.5 psu), 쓰시마난류역 (> 33.5 psu) 등 3구역에서 본 연구와 관련된 여름 중앙육붕역은 규조류, 남조류 *Synechococcus*, 담녹조류, 쓰시마난류역은 규조류, 남조류 *Synechococcus*와 *Prochlorococcus* 등이 우점하는 것을 보

고하였다(Liu *et al.* 2016). 그리고 Guo *et al.* (2014)은 2009년 8월 위도 25°N에서 32°N 사이의 대륙붕 해역에서 우점종은 해역에 따라 규조류, 와편모조류, 남조류 등 매우 다양한 것으로 보고하였으며, 한국에 인접한 동중국해에서 여름 10% 이상의 우점종을 보이는 종이 *Prorocentrum triestinum*, *Pr. donghaiensis*, *S. trochoidea*, *S. costatum*-ls, *Leptocylindrus mediterraneus*, *Paralia sulcata* 등 와편모조류 및 규조류가 혼재하는 등(Yoon *et al.* 2003, 2005a, 2007), 연구자 및 해역의 범위, 정점 수 등에 따른 차이가 크다. 그러나 2019년 8월의 우점종 *S. trochoidea*, *Gymnodinium* sp./small size는 동중국해에서 일반적으로 관찰되는 종이지만, 규조류 *Rhizosolenia flaccida* (= *Guinardia flaccida*)는 이례적이라 할 수 있었다. *Rh. flaccida*는 남해의 득량만에서 7, 8월 여름 최우점종으로 보고되지만(Yoon 1999), 높은 점유율로 내만 및 연안해역에 출현하는 경우는 많지 않다(Yoon 2011).

동중국해의 식물플랑크톤 군집은 연안수와 구로시오 해류 기원 수괴 사이의 경계역인 전선역에 *P. triestinum*이나 *Ceratium fusus* (= *Triplos fusus*) 등 와편모조류가 우점하며(Lu 1991), 여름 남조류 대발생(Nagasawa and Marumo 1967) 및 부영양화 지표종인 *S. costatum*-ls의 우점(Yoon *et al.* 2005a; Guo *et al.* 2014) 등이 보고되지만, 2019년 8월에는 이러한 현상이 관찰되지 않았다. 그러나 전선역을 중심으로 높은 생물량과 종 특성이 다른 것은 기존의 연구결과(Kamiyama 1991)와 유사하였다. 특히 동중국해 혼합해역 및 쓰시마난류 수괴에 우점하는 남조세균 *Synechococcus*, *Prochlorococcus* (Noh *et al.* 2006; Choi *et al.* 2012; Liu *et al.* 2016)에 대해서는 원생동물 항에서 설명한다.

생태지수는 군집 전체에 대한 정확한 동정 등을 기본으로 하는 내용이기 때문에 도출된 지수에 커다란 의미를 부여할 수는 없지만(Kim *et al.* 2020), 동중국해 북부해역의 CCW에서 산출되는 다양성 지수는 금강 하구역과 같이 하천수 유입의 영향을 직접 받는 연안해역의 지수(Shin 2013; Kim *et al.* 2020)보다도 높았으며, TWC의 다양성 지수는 CCW 수괴의 1/3 수준으로 여름 금강 하구역과 유사하였다(Shin 2013). 우점도 지수는 표층과 CML 모두에서 우점종 *S. trochoidea* 및 *Rh. flaccida*의 영향으로 내만/연안해역보다 매우 높은 지수를 나타내어(Shin 2013; Kim *et al.* 2020), 외해적 특징보다 하구역의 현상을 나타내는 것으로 판단되었다.

3. Chlorophyll a 농도

Chl-*a* 농도는 표층에서 0.09~2.09 $\mu\text{g L}^{-1}$ 의 범위에서 $0.72 \pm 0.58 \mu\text{g L}^{-1}$ 의 변동 폭을 보였고, CML에서 $0.67 \sim 7.87 \mu\text{g L}^{-1}$ 의 범위에서 $2.48 \pm 1.76 \mu\text{g L}^{-1}$ 의 변동 폭을, 그리고 저층은 0.04~0.50 $\mu\text{g L}^{-1}$ 의 범위에서 $0.24 \pm 0.16 \mu\text{g L}^{-1}$ 의 변동 폭을 나타내었다. 즉 CML까지는 해역에 따른 Chl-*a* 농도 차이가 크게 나타났지만, 저층은 낮은 농도로 균일한 분포특성을 보였으며, 수층별로는 표층과 저층에서 상대적으로 낮은 농도를 보였고, CML에서 평균 및 최댓값에서 표층의 3배 이상의 높은 농도를 보였다. 공간분포는 표층의 CCW에서 $1.16 \pm 0.69 \mu\text{g L}^{-1}$ 의 변동 폭으로 $1.0 \mu\text{g L}^{-1}$ 이상의 높은 농도를 보였지만, TWC는 $0.18 \pm 0.12 \mu\text{g L}^{-1}$ 의 변동 폭으로 농도가 매우 낮았다(Fig. 9A). CML은 CCW에서 $3.19 \pm 2.27 \mu\text{g L}^{-1}$ 의 변동 폭을 보였고, TWC에서 $1.95 \pm 1.19 \mu\text{g L}^{-1}$ 의 변동 폭을 보여, 두 수괴 사이는 $5.0 \mu\text{g L}^{-1}$ 이상의 매우 높은 Chl-*a* 농도의 띠가 형성되었다(Fig. 9B). 그리고 표층과 CML 모두에서 정점 EC12에서 높은 패치 분포를 보였다. Chl-*a* 농도의 연직 분포는 CCW의 정점 EC17(파선) 및 EC14(점선)의 수심 10~20 m에서 CML이 형성되었으나, TWC의 정점 EC08(일점 파선) 및 EC10(이점 파선)은 수심 30~40 m에 CML이 형성되었고, 최대 Chl-*a* 농도는 $2.0 \mu\text{g L}^{-1}$ 이하를 나타내었다. 그러나 전선 형성과 용승이 발생하는 정점 EC12는 약 $8.0 \mu\text{g L}^{-1}$ 의 Chl-*a* 농도로 수심 20 m 부근에 CML을 형성하여, TWC보다 얇은 수심에 최대 Chl-*a* 농도를 보였다(Fig. 9C).

여름 동중국해의 Chl-*a* 농도에 관한 기존 연구에서 중국에 인접한 연안해역에서 $10.0 \mu\text{g L}^{-1}$ 전후의 농도를 보이며, 연안에서 떨어진 혼합역에서 $1.0 \mu\text{g L}^{-1}$ 이하, 그리고 빈영양해역인 쓰시마난류역에서 $0.1 \mu\text{g L}^{-1}$ 전후의 농도로 양쯔강 희석수와 깊게 연관되며(Gong *et al.* 1996), 혼합역과 쓰시마난류역에서는 표층보다 수온약층에서 높은 농도를 나타낸다(Furuya *et al.* 2003; Chen *et al.* 2004; Yoon *et al.* 2005a; 2007; Guo *et al.* 2014; Liu *et al.* 2016). 그러나 양쯔강 희석수의 확장은 시·공간적으로 차이가 크다(Ichikawa and Beardsley 2002). Chl-*a* 농도의 연직 분포에서 CML은 표층에서 침강하는 규조류 등이 수렴되는 부분도 크지만, 특히 빈영양 상태의 TWC는 표층의 강한 일사량으로 종에 따라서는 광 저해로 인하여 아표층으로 이동되어, CML에서 높은 Chl-*a* 농도가 관찰(Gerla *et al.* 2011; Yoon

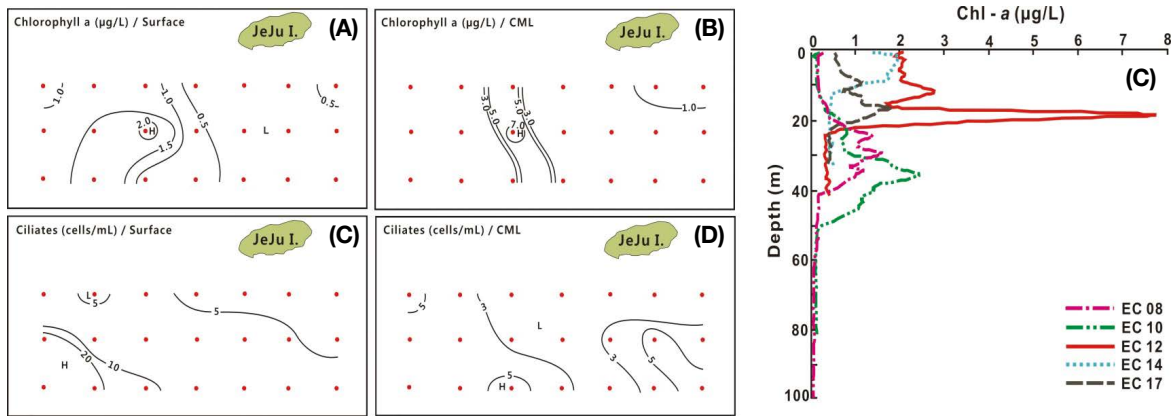


Fig. 9. Horizontal distributions of chlorophyll-a concentration (A, B) and ciliate cell density (D, E) at the surface (A, D) and CML (B, E), and vertical profiles of Chl-a(C).

2013)되기도 한다. 2019년 8월 동중국해의 Chl-a 농도의 수평 및 연직 분포의 패턴도 기존 연구와 기본적으로는 유사하였지만, Chl-a 농도가 높은 특징을 나타내었다.

4. 섬모충의 세포 밀도

여름 동중국해 북부해역의 원생동물 세포 밀도는 표층에서 $2.2 \sim 25.4 \text{ cells mL}^{-1}$ 의 범위에서 $8.4 \pm 9.3 \text{ cells mL}^{-1}$ 의 변동 폭을 보였고, CML에서 $1.2 \sim 9.0 \text{ cells mL}^{-1}$ 의 범위에서 $3.7 \pm 2.1 \text{ cells mL}^{-1}$ 의 변동 폭으로 표층과 저층 모두 식물플랑크톤 현존량과 유사하여 공간분포가 불균일한 특징을 나타내었다. 공간분포는 식물플랑크톤과는 다르게 표층의 CCW에서 $11.7 \pm 7.0 \text{ cells mL}^{-1}$ 의 세포 밀도를 보였으며, TWC는 $4.9 \pm 2.5 \text{ cells mL}^{-1}$ 의 세포 밀도로 CCW보다 평균으로 2배 이상 낮은 밀도를 보였다(Fig 9D). 그러나 CML은 CCW에서 $4.4 \pm 2.2 \text{ cells mL}^{-1}$ 의 세포 밀도를 보였고, TWC는 $3.1 \pm 1.8 \text{ cells mL}^{-1}$ 의 세포 밀도로 표층에 비해 수괴에 따른 차이가 크지 않았다(Fig 9E).

기존 연구에서 여름 동중국해 북부해역 섬모충의 세포 밀도는 봄(4월)에 높고, 가을과 겨울에 낮지만, 2006년 7월은 $1.4 \sim 5.8 \text{ cells mL}^{-1}$ 범위에서 평균 $3.6 \text{ cells mL}^{-1}$, 2007년 7월은 $1.4 \sim 7.4 \text{ cells mL}^{-1}$ 의 범위에서 평균 $4.3 \text{ cells mL}^{-1}$ 로 수심이 증가에 따라 감소하는 것을 보고하였다(Choi et al. 2012). 그리고 동중국해 표층의 미소동물플랑크톤 분포는 식물플랑크톤 현존량처럼 연안에서 멀어질수록 감소하여, 섬모충은 $0.1 \sim 4.8 \text{ cells mL}^{-1}$ 의 범위에서 $1.8 \pm 1.7 \text{ cells mL}^{-1}$ 의 변동 폭으로 매우 낮음을 보고하였다(Zheng

et al. 2015). 그러나 2019년 여름은 CCW에서 기존 연구의 수배에서 수심배 높은 세포 밀도를 보였고, TWC도 기존보다 높은 세포 밀도를 나타내었다. 이러한 결과는 한 번의 연구로 동중국해의 일반적인 현상이라고 하거나, 인과관계를 명확하게 할 수는 없다.

동중국해의 초미세플랑크톤(피코플랑크톤) 연구(Jiao et al. 2002; Jiao et al. 2005; Noh et al. 2006; Li and Li 2012; Guo et al. 2014; Park et al. 2019)에서 광합성 남조세균인 *Synechococcus*는 양쯔강 희석수와 쓰시마난류수에 모두 출현하지만, 서로 계군을 달리하며, *Prochlorococcus*는 쓰시마난류수만 출현하는 것이 확인되었다(Choi et al. 2012; Liu et al. 2016; Park et al. 2019). 또한, 미소동물플랑크톤에 의한 피코플랑크톤의 포식압은 표층보다 아표층에서 높다는 것이 알려지며(Guo et al. 2014; Zheng et al. 2015), Al-Otaibi et al. (2020)은 원생동물의 핵산농도 개념을 도입하여, 황해 중앙부 해역의 피코플랑크톤 연직분포에서 *Synechococcus*와 저농도핵산 종속영양 원핵생물은 표층에 높지만, *Prochlorococcus*와 고농도핵산 종속영양 원핵생물은 CML에서 높게 분포하는 것을 보고하였다. 이러한 피코플랑크톤의 분포는 동중국해의 원생동물 분포와 밀접하게 관련되고 있는 것으로 보이며, 2019년 8월 동중국해 북부해역의 TWC의 식물플랑크톤 현존량이 CCW에 비해 매우 낮음에도 불구하고, 종속영양 동물인 원생동물의 세포 밀도에서 큰 차이가 없는 것은 종속영양 세균 및 광합성 남조세균인 피코플랑크톤이 원생동물의 먹이원으로 작용하는 미세먹이망(microbial loop)이 중요한 역할을 하고 있기 때문이라 할 수 있었다(Choi et al. 2012; Sun et al. 2013). 즉 지

Table 2. Correlation matrix between the environmental factors and biological factors at the surface (upper) and the CML (lower) in the nECS

| | WT | Sal | DOs | TB | Chl- <i>a</i> | DT | PF | PT | Ca/Pa | Rf | Sp |
|---------------|--------|--------|--------|--------|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| WT | | -0.692 | 0.376 | 0.177 | 0.667 | 0.584 | 0.594 | 0.692 | 0.582 | 0.200 | 0.500 |
| Sal | -0.829 | | -0.533 | -0.251 | -0.846 | -0.607 | -0.673 | -0.813 | -0.852 | -0.044 | -0.510 |
| DOs | 0.755 | -0.628 | | 0.032 | 0.675 | 0.167 | 0.736 | 0.531 | 0.443 | -0.108 | 0.722 |
| TB | 0.132 | -0.262 | -0.291 | | 0.351 | 0.078 | 0.348 | 0.079 | 0.121 | 0.041 | 0.321 |
| Chl- <i>a</i> | -0.024 | -0.093 | -0.174 | 0.780 | | 0.546 | 0.826 | 0.751 | 0.634 | 0.113 | 0.718 |
| DT | 0.542 | -0.421 | 0.573 | 0.218 | 0.311 | | 0.454 | 0.487 | 0.448 | 0.640 | 0.357 |
| PF | -0.174 | 0.020 | -0.487 | 0.851 | 0.727 | -0.022 | | 0.495 | 0.457 | 0.188 | 0.970 |
| PT | 0.181 | -0.176 | 0.016 | -0.015 | -0.177 | 0.238 | -0.183 | | 0.821 | -0.123 | 0.341 |
| Ca/Pa | 0.170 | -0.097 | 0.369 | 0.114 | 0.473 | 0.712 | 0.022 | 0.092 | | -0.278 | 0.274 |
| Rf | 0.343 | -0.153 | 0.446 | 0.046 | 0.270 | 0.782 | -0.012 | 0.005 | 0.576 | | 0.230 |
| Sp | -0.192 | 0.039 | -0.501 | 0.842 | 0.726 | -0.038 | 1.000 | -0.192 | 0.017 | -0.015 | |

(WT: water temperature, Sal: salinity, DOs: saturation of dissolved oxygen, TB: turbidity, Chl-*a*: chlorophyll *a*, DT: diatoms, PF: phytoflagellates, PT: Protozoa, Ca: *Chaetoceros affinis*(surface), Pa: *Proboscia alata*(CML), Rf: *Rhizosolenia flaccida*, Sp: *Scrippsiella trochoidea*) /The block represents $p < 0.005$

중해의 빈영양해역은 용존유기물질을 출발점으로 하는 미세먹이망에서 생산되는 세균생산량은 기초생산량 전체의 60%를 차지하는 것으로 보고하였다(Hagström *et al.* 1988). 동중국해 북부해역에서 육상에서 풍부한 영양염류가 공급되는 CCW 및 빈영양 특성을 보이는 TWC에서 생태구조를 명확하게 파악하기에는 영양염류 및 세균, 그리고 중속 영양편모조류 등에 대한 구체적 자료가 없는 상태에서 쉽게 판단할 수는 없다. 그러나 기존 문헌이나 본 연구의 결과로 추정할 수 있는 것은 빈영양상태의 TWC에서 미세먹이망을 통해 성장하는 섬모충을 중심으로 하는 원생동물이 전통적인 해양의 먹이사슬에 공급되어, 상위 영양단계인 수산자원생물 생산에 중요한 역할을 하는 것은 의심의 여지가 없는 것으로 보여진다(Das and Pandey 2015). 즉 동중국해의 수괴에 따른 생태구조는 CCW가 bottom-up system 구조를 나타낸다면, TWC는 top-down system 구조를 하는 것으로 추정하여 판단할 수 있을 것이다.

5. 플랑크톤 출현 특성

상관분석에서 유의확률 $p < 0.005$ 기준으로 표층의 Chl-*a* 농도는 수온($r = 0.667$), 규조류($r = 0.546$), 식물성 편모조류($r = 0.826$), 원생동물($r = 0.751$), *S. trochoidea*($r = 0.718$) 및 *Ch. affinis*($r = 0.634$)와 양의 상관을 보였고, 염분과 음의 상관($r = -0.846$)을 보였으며, 규조류는 수온($r = 0.584$), *Rh. flaccida*($r = 0.640$)에 양의 상관을, 그리

고 염분($r = -0.607$)에 음의 상관을 나타내었다. 식물성 편모조류는 수온($r = 0.594$), *S. trochoidea*($r = 0.970$)와 양의 상관을, 염분($r = -0.673$)과 음의 상관을 보였지만, 원생동물은 수온($r = 0.692$), *Ch. affinis*($r = 0.821$)와 양의 상관을, 염분($r = -0.813$)과 음의 상관을 보였다. 그리고 식물플랑크톤 광합성 활성을 나타내는 용존산소 포화도는 Chl-*a* 농도($r = 0.675$), 식물성 편모조류($r = 0.736$), 원생동물($r = 0.531$) 및 *S. trochoidea*($r = 0.722$)에 양의 상관을 보였으며, *Ch. affinis*, *S. trochoidea*는 수온과 염분에 유의적 상관을 보였지만, *Rh. flaccida*에 유의적 상관을 보이는 항목은 없었다(Table 2). CML은 Chl-*a* 농도가 수온($r = 0.727$), *S. trochoidea*($r = 0.842$)와 양의 상관을 보였고, 규조류는 *Rh. flaccida*($r = 0.712$) 및 *P. alata*($r = 0.782$)에 양의 상관을 보였다. 식물성 편모조류는 *S. trochoidea*($r = 1.000$)와 양의 상관을 보였다. 그리고 식물플랑크톤 광합성 활성을 나타내는 용존산소 포화도는 규조류($r = 0.573$)과 양의 상관을 보여, 표층과는 다른 양상을 나타내었다. 특히 표층에서는 유의적 상관이 없었던 탁도에 Chl-*a* 농도($r = 0.780$), 식물성 편모조류($r = 0.851$), *S. trochoidea*($r = 0.842$)가 강한 양의 상관을 보였다(Table 2).

측정된 물리·화학적 환경인자와 플랑크톤 인자를 이용한 누적 기여율 70%를 기준으로 계산한 주성분분석 결과(Yoon 1989)는 표층에서 $Z = 5.610Z_1 + 1.673Z_2 + 1.400Z_3$ 로, 제1 주성분 기여율이 53.7%로 집약 특성이 크게 나타났으며, 제3 주성분까지 누적 기여율은 81.6%를 나타내었

Table 3. Eigen-value, eigen-vector, and proportion by principal component analysis (PCA)

| | PC | Eigen value | Proportion (%) | Accumulative proportion (%) |
|---------|-----|-------------|----------------|-----------------------------|
| Surface | 1st | 5.910 | 53.7 | 53.7 |
| | 2nd | 1.673 | 15.2 | 68.9 |
| | 3rd | 1.400 | 12.7 | 81.6 |
| CML | 1st | 3.800 | 34.5 | 34.5 |
| | 2nd | 3.587 | 32.6 | 67.1 |
| | 3rd | 1.502 | 13.7 | 80.8 |

PC: principal component

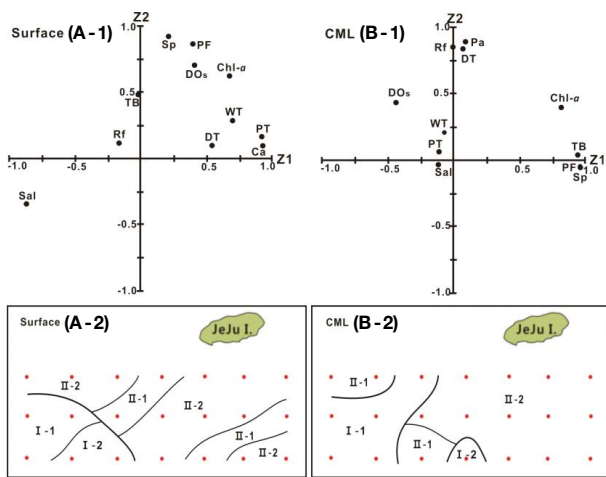


Fig. 10. Distribution of the loading factors (A-1, B-1) and divisions of the sea area with scores (A-2, B-2) by principal component analysis (PCA) at the surface (A) and CML (B). (WT: water temperature, Sal: salinity, DOs: saturation of dissolved oxygen, TB: turbidity, Chl-*a*: chlorophyll *a*, DT: diatoms, PF: phytoplankton, PT: Protozoa (ciliates), Ca: *Chaetoceros affinis*, Pa: *Proboscia alata*, Rf: *Rhizosolenia flaccida*, Sp: *Scrippsiella trochoidea*)

다. CML은 $Z = 3.800Z_1 + 3.587Z_2 + 1.502Z_3$ 로, 제1 및 제2 주성분의 기여율이 각 34.5%와 32.6%로 각 주성분의 집약 정도가 유사하였으며, 제3 주성분까지 누적 기여율은 80.8%로 표층과 비슷하였다(Table 3).

인자부하량에서 표층은 제1 주성분에 원생동물(protozoa), 수온, *Ch. affinis*, 규조류, Chl-*a* 농도 등에 강한 양의 관계를 보이는 것에 반해, 염분과 음의 상관관계를 보여, 고온, 저염의 CCW 수괴 특성을 나타내는 지표로 판단되었으며, 제2 주성분은 식물성 편모조류, *S. trochoidea*, 용존산소 포화도(DOs), Chl-*a* 농도에 강한 양의 상관관계를 보여, 식물성

편모조류의 출현 및 광합성 활성 특성을 나타내는 지표로 판단되었다(Fig. 10A-1). 그리고 그림으로 표현되지 않았으나, 제3 주성분에는 규조류, *Rh. flaccida*에 강한 양의 관계를 보여, 규조류 출현 특성을 나타내는 지표로 판단되었다. CML은 제1 주성분에 탁도, Chl-*a* 농도, 식물성 편모조류, *S. trochoidea*에 강한 양의 관계를 보이는 것에 반해, 용존산소 포화도와 약한 음의 상관관계를 보여, 와편모조류 등 부유물질의 집적 또는 수렴되는 환경특성을 나타내는 지표로 판단되었으며, 제2 주성분은 표층과는 달리 규조류, *Rh. flaccida*에 및 *P. alata*에 강한 양의 관계를 나타내어, 규조류 출현을 지배하는 환경지표를 나타내는 것으로 판단되었다(Fig. 10B-1).

주성분 분석의 득점 분포에 따른 해역 구분은 표층에서 기여율 53.7%인 제1 주성분을 기준으로 양의 영역인 높은 원생동물 세포 밀도와 수온을 보이는 해역 I, 즉 CCW의 남서부해역 및 음의 영역으로 높은 염분에 낮은 플랑크톤 현존량을 나타내는 해역 II, 즉 TWC 및 CCW의 북서해역으로 구분되었다. 또한, 해역 I 및 해역 II는 기여율 15.2%를 나타내는 제2 주성분을 기준으로 높은 식물성 편모조류 생물량 및 광합성 활성을 보이는 해역 I-1 및 해역 II-1로 구분되었고, 편모조류 생물량 및 광합성 활성이 상대적으로 낮은 해역 I-2 및 해역 II-2로 구분되지만, 수괴의 특성과 잘 일치되지는 않았다(Fig. 10A-2). CML은 기여율 34.5%인 제1 주성분을 기준으로 와편모조류 *S. trochoidea*를 중심으로 수렴환경을 보이는 해역 I, 대부분 CCW 및 와편모조류 등 편모조류 현존량의 낮은 해역 II, 즉 TWC와 일부 CCW가 포함되었다. 또한, 해역 I 및 해역 II는 제1 주성분과 비슷한 32.6%의 기여율을 나타내는 제2 주성분을 기준으로 높은 규조류에 상대적으로 식물플랑크톤 활성이 좋은 해역 I-1 및 해역 II-1로 구분되며, 규조류 세포 밀도가 낮고 광합성 활성이 상대적으로 낮은 해역 I-2 및 해역 II-2로 구분되었어, TWC는 생물 활성이 낮았다(Fig. 10B-2).

이러한 상관분석 및 주성분 분석 결과, 표층의 식물플랑크톤 군집은 상대적으로 영양염류 농도가 높은 CCW의 영향을 받으며(Gong et al. 1996; Furuya et al. 2003; Yoon et al. 2007; Guo et al. 2014; Liu et al. 2016), 광합성 활성은 *S. trochoidea*를 주로 하는 식물성 편모조류가 수행하고 있지만, *Rh. flaccida*의 활성은 낮아, 개체군이 성장 쇠퇴기에 진입되어있는 것으로 추정되었다(Yoon 1989). 또한, 원생동물은 식물플랑크톤의 광합성 활성과 양의 관련성을 나타

내는 것으로 나타났다(Zheng *et al.* 2015). 그러나 CML은 수괴 특성에 의해 지배되는 부분보다, 용승 및 표층에서 침강한 식물플랑크톤이 수온약층에 집적되어, 높은 세포 밀도를 나타내는 것으로 판단할 수 있었다(Matsuda *et al.* 1989; Yoon *et al.* 2005a). 특히 주성분 분석 득점에 의한 해역 구분은 T-S diagram에 의한 수괴 분석의 결과와 일치하지 않은 것은 CML에서 보여주는 것처럼 생물 인자가 물리 환경인자에 의해 수렴이 발생하는 등, 극단적인 패치 분포를 하고 있기 때문이다(Haury *et al.* 1978).

결 론

여름 우리나라 수산자원 어장형성에 중요한 위치를 차지하는 동중국해 북부해역은 두 개의 수괴, 즉 CCW 및 TCW로 구분되었다. 두 수괴에서 저차영양단계에 속하는 생물군의 공간분포는 매우 다른 특징을 보여, 중국에서 대형하천에 의해 영양염류 공급이 되는 CCW에서 매우 다양한 종조성의 식물플랑크톤 군집구조를 보였고, 식물플랑크톤과 섬모충류 현존량이 높았으나, 빈영양해역인 TWC는 단순한 식물플랑크톤 군집에, 식물플랑크톤과 섬모충류의 현존량이 매우 낮았다. 그리고 이 두 수괴 사이에는 상한 경계역이 형성됨은 물론, 극지적인 용승도 관찰되었다. 그러나 TWC는 식물플랑크톤 현존량이나 생물량과는 달리 높은 섬모충류 현존량을 나타내고 있는 것에서 용존 유기물질을 출발점으로 하는 미세먹이망에 의한 저차영양단계가 중요한 역할을 하는 것으로 판단되었다. 즉 수괴에 따른 해양생태구조에서 CCW는 bottom-up system에 의해 구동된다면, TWC는 top-down system으로 구동되는 것으로 추정되었다. 다만 이러한 결과는 저차영양단계의 미세먹이망을 구성하는 전체 구성인자에 대한 종합적인 판단이 아니라, 일부 인자의 변동 특성에 따른 추정이다. 때문에 동중국해 북부해역의 저차영양단계의 생태구조에 대한 명확한 파악은 국내 주요 어장에서 자원생물 생산구조 및 변동 특성 파악에 매우 중요한 인자이기에 앞으로 지속적인 모니터링에 의한 분석이 요구된다.

적 요

여름 동중국해 북부해역 (32°N~33°N, 124°E~127°

30'E)에서 수괴에 따른 미소플랑크톤에 속하는 식물플랑크톤 군집 및 섬모충류 현존량의 공간분포 및 저차영양단계의 생태구조 특성을 파악하기 위한 현장조사를 2019년 8월 3일부터 8월 6일까지 21개 정점의 표층과 Chl-*a* 최댓층(CML)을 대상으로 채수하였다. 결과 북부해역의 수괴는 크게 중국연안수(CCW) 및 쓰시마난류(TWC)로 구분되었다. CCW는 고온, 저염의 환경특성을, 그리고 TWC는 고온, 고염의 환경특성을 나타내었다. 수괴에 따른 식물플랑크톤 군집특성은 CCW가 중국의 대형하천에서 공급되는 영양염류에 의해 다양한 군집구조를 보인 반면, TWC는 남방의 빈영양 외해역에서 발원하여 북상하고 있어 단조로운 군집특성을 나타내었다. 식물플랑크톤과 섬모충류의 현존량은 CCW에서 매우 높았고, TWC에서 낮은 특성을 보였다. 특히 TWC에서 식물플랑크톤에 비해 높은 섬모충류의 현존량을 보이는 것에서 세균 등을 먹이원으로 하는 미세먹이망에 의한 저차영양단계의 에너지흐름이 자원생물 생산에 중요한 역할을 하는 것으로 판단되었다. 즉 여름 동중국해의 생태구조는 수괴에 따라 CCW가 bottom-up system 구조라면, TWC는 top-down system 구조를 갖는 것으로 추정되었다.

사 사

이 논문은 2020년 해양수산부 재원으로 해양수산과학진흥원의 지원을 받아 수행된 과제임(ICT기반 수산자원관리 연구센터).

REFERENCES

- Al-Otaibi N, TM Huete-Stauffer, ML Calleja, X Irigoien and XAG Moran. 2020. Seasonal variability and vertical distribution of autotrophic and heterotrophic picoplankton in the Central Red Sea. *PeerJ* 8:e8612.
- Bai ML, FS Lin, YC Lee, GC Gong and C Hsieh. 2015. Trophic structure of the pelagic food web in the East China Sea. *Zool. Stud.* 54:7.
- Baik CI, CI Lee, KH Choi and DS Kim. 2005. Variation of fisheries condition of fishing ground of yellow croaker (*Pseudosciaena polyactis* Bleeker) in the East China Sea and the Yellow Sea. *J. Korean Fish. Soc.* 38:413-424.
- Beardsley RC, R Limeburner, H Yu and GA Cannon. 1985. Dis-

- charge of the Changjiang (Yangtze River) into the East China Sea. *Cont. Shelf Res.* 4:57–76.
- Chen WZ, YZ Zheng, YQ Chen and CP Mathews. 1997. An assessment of fishery yields from the East China Sea ecosystem. *Mar. Fish. Rev.* 59:1–7.
- Chen YLL, HY Chen, GC Gong, YH Lin, S Jan and M Takahashi. 2004. Phytoplankton production during a summer coastal upwelling in the East China Sea. *Cont. Shelf Res.* 24:1321–1338.
- Chihara M and M Murano. 1997. *An Illustrated Guide to Marine Plankton in Japan.* Tokai Univ. Press, Tokyo.
- Choi KH, EJ Yang, D Kim, HK Kang, JH Noh and CH Kim. 2012. The influence of coastal waters on distributions of heterotrophic protists in the northern East China Sea, and the impact of protist grazing on phytoplankton. *J. Plank. Res.* 34:886–904.
- Cupp EE. 1943. Marine plankton diatoms of the west coast of north America. *Bull. Scripps Inst. Oceanogr., Univ. of California* 5:1–237.
- Das N and A Pandey. 2015. Role of nanoplanktons in marine food-webs. *Int. Lett. Nat. Sci.* 43:38–47.
- Fukudome KI, JH Yoon, A Ostrovskii, T Takikawa and IS Han. 2010. Seasonal volume transport variation in the Tsushima Warm Current through the Tsushima Straits from 10 years of ADCP observations. *J. Oceanogr.* 66:539–551.
- Furuya K, M Hayashia, Y Yabushita and A Ishikawa. 2003. Phytoplankton dynamics in the East China Sea in spring and summer as revealed by HPLC-derived pigment signatures. *Deep-Sea Res. Part II-Top. Stud. Oceanogr.* 50:367–387.
- Gerla DJ, WM Mooij and J Huisman. 2011. Photoinhibition and the assembly of light-limited phytoplankton communities. *Oikos* 120:359–368.
- Gong GC, YL Lee, L Chen and KK Liu. 1996. Chemical hydrography and chlorophyll *a* distribution in the East China Sea in summer: implications in nutrient dynamics. *Cont. Shelf Res.* 16:1561–1590.
- Guo C, H Liu, L Zheng, S Song, B Chen and B Huang. 2014. Seasonal and spatial patterns of picophytoplankton growth, grazing and distribution in the East China Sea. *Biogeosciences* 11:1847–1862.
- Guo S, Y Feng, L Wang, M Dai, Z Liu, Y Bai and J Sun. 2014. Seasonal variation in the phytoplankton community of a continental-shelf sea: the East China Sea. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 516:103–126.
- Hagström Å, F Azam, A Andersson, J Wikner and F Rassoulzadegan. 1988. Microbial loop in an oligotrophic pelagic marine ecosystem: possible roles of cyanobacteria and nanoflagellates in the organic fluxes. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 49:171–178.
- Hall NS and HW Paerl. 2011. Vertical migration patterns of phytoplankton in relation to light and nutrient availability in a shallow microtidal estuary. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 425:1–19.
- Hallegraeff GM, CJS Bolch, DRA Hill, I Jameson, JM LeRoi, A McMinn, S Murray, MF de Salas and K Saunders. 2010. *Algae of Australia: Phytoplankton of Temperate Coastal Waters.* CSIRO Publ., Cambella.
- Haury LR, JA McGowan and PH Wiebe. 1978. Patterns and processes in the time-space scales of plankton distributions. pp. 277–327. In: *Spatial Pattern in Plankton Communities* (JH Steele (ed.)). NATO Conf. Ser. IV, Vol. 3. Springer, Boston.
- Hickox R, I Belkin, P Cornillon and Z Shan. 2000. Climatology and seasonal variability of ocean fronts in the East China, Yellow and Bohai Seas from satellite SST data. *Geophys. Res. Lett.* 27:2945–2948.
- Hu D. 1986. Signature of El Nino in the East China Sea. *Commission océanographique intergouvernementale, Série technique* 3:43–50.
- Hur HB, GA Jacobs and WJ Teague. 1999. Monthly variations of water masses in the Yellow and East China Seas. *J. Oceanogr.* 55:171–184.
- Ichikawa H and RC Beardsley. 2002. The current system in the Yellow and East China Seas. *J. Oceanogr.* 58:77–92.
- Jiang Z, J Liu, J Chen, Q Chen, X Yan, J Xuan and J Zeng. 2014. Responses of summer phytoplankton community to drastic environmental changes in the Changjiang (Yangtze River) estuary during the past 50 years. *Water Res.* 54:1–14.
- Jiao N, Y Yang, H Koshikawa and M Watanabe. 2002. Influence of hydrographic conditions on picoplankton distribution in the East China Sea. *Aquat. Microb. Ecol.* 30:37–48.
- Jiao N, Y Yang, N Hong, Y Ma, S Harada, H Koshikawa and M Watanabe. 2005. Dynamics of autotrophic picoplankton and heterotrophic bacteria in the East China Sea. *Cont. Shelf Res.* 25:1265–1279.
- Jung SW, JG Park, DH Jeong and D Lim. 2012. Seasonal changes in water masses and phytoplankton communities in the western part of south coastal waters, Korea. *Korean J. Environ. Biol.* 30:328–338.
- Kamiyama H. 1991. The correlation between appearance of phytoplankton and the sea condition. *Umi to Sora* 67:153–161.
- Kamykowski D and SJ Zentara. 1977. The diurnal vertical migration of motile phytoplankton through temperature gradients. *Limnol. Oceanogr.* 22:148–151.
- Kim DH, HN Seo, WD Yoon and YS Suh. 2012. Estimating the economic damage caused by jellyfish to fisheries in Korea. *Fish. Sci.* 78:1147–1152.
- Kim HS, H Kim, D Yang and YH Yoon. 2020. Spatio-temporal distribution patterns of phytoplankton community and the characteristics of biological oceanographic environments in the Geum river estuary, West Sea of Korea in 2018. *Korean J.*

- Environ. Biol. 38:254–270.
- Kim IO and HG Rho. 1994. A study on China coastal water appeared in the neighbouring seas of Cheju island. Bull. Korean Fish. Soc. 27:515–528.
- Kim J, H Kim, DG Paeng, TH Bok and J Lee. 2015. Low-salinity-induced surface sound channel in the western sea of Jeju Island during summer. J. Acoust. Soc. Am. 137:1576–1585.
- Kim SS, WJ Go, YJ Jo, PY Lee and KA Jeon. 1998. Low salinity anomaly and nutrient distribution at surface waters of the South Sea of Korea during 1996 summer. The Sea 3:165–169.
- Kondo M. 1985. Oceanographic investigations of fishing grounds in the East China sea and Yellow Sea. I. Characteristics of the mean temperature and salinity distributions measured at 50 m and near bottom, Bull. Seikai Regional Fish. Res. Lab. 62:19–66.
- Lee JH, IJ Moon, JH Moon, SH Kim, YY Jeong and JH Koo. 2017. Impact of typhoons on the Changjiang plume extension in the Yellow and East China Seas. J. Geophys. Res. Oceans 122:4962–4973.
- Li Y and D Li. 2012. Spatial distributions of picoplankton and viruses in the Changjiang Estuary and its adjacent sea area during summer. J. Mar. Biol. 2012:1–11.
- Li Y and Y Zhang. 2012. Fisheries impact on the East China Sea Shelf ecosystem for 1969–2000. Helgoland Mar. Res. 66:371–383.
- Liang C and D Pauly. 2017. Fisheries impacts on China's coastal ecosystems: Unmasking a pervasive 'fishing down' effect. PLoS One 12:e0173296.
- Liang XS, M Huang, H Wu and Y Wang. 2018. The Yellow Sea surface cold patches in warm seasons. pp. 27–45. In: Coastal Environment, Disaster, and Infrastructure - A Case Study of China's Coastline (AS Liang and Y Zhang (eds)). Books on Demand, Norderstedt, Germany.
- Lie HJ and CH Cho. 2006. Seasonal circulation patterns of the Yellow and East China Seas derived from satellite-tracked drifter trajectories and hydrographic observations. Prog. Oceanogr. 146:121–141.
- Liu X, W Xiao, MR Landry, KP Chiang, L Wang and B Huang. 2016. Responses of phytoplankton communities to environmental variability in the East China Sea. Ecosystems 19:832–849.
- Lu D. 1991. Distribution of indicator dinoflagellates in the East China Sea. Acta Oceanol. Sin. 11:109–122.
- Matsuda I, Y Nishii, YH Yoon and T Endo. 1989. Observation of thermohaline structure and phytoplankton biomass in the shelf front of East China Sea during early summer. J. Fac. Appl. Biol. Sci., Hiroshima Univ. 28:27–35.
- McNaughton SJ. 1968. Structure and function in California grassland. Ecology 49:962–972.
- Mio S, M Tagawa, F Shinohara and U Yamada. 1984. Ecological study on the demersal fish associations in the East China Sea. with reference to food relationships. Bull. Seikai Reg. Fish. Res. Lab. 61:1–142.
- Nagasawa S and R Murano. 1967. Taxonomy and distribution of *Trichodesmium* (Cyanophyceae) in the Kuroshio waters. Inf. Bull. Plankton. Japan, Com. no. Dr. Y Matsue's 60th Birth: 139–144.
- Noh JH, S Yoo and SH Kang. 2006. The summer distribution of picophytoplankton in the western pacific. Korean J. Environ. Biol. 24:67–80.
- Omura T, M Iwataki, VM Borja, H Takayama and Y Fukuyo. 2012. Marine Phytoplankton of the Western Pacific. Kouseishakou-seikaku. Tokyo.
- OSJ. 1986. A Manual for Coastal Environmental Survey (Sediments and Biology). The Oceanographic Society of Japan (OSJ). Kouseishakouseikaku, Tokyo.
- Park KW, MH Yoo, HJ Oh, SH Youn, KY Kwon and CH Moon. 2019. Distribution characteristics and community structure of picophytoplankton in the northern East China Sea in 2016–2017. Korean J. Environ. Biol. 37:93–108.
- Park MO, SW Kang, CI Lee, TS Choi and F Lantoiné. 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 13:27–41.
- Rho HK. 1985. Studies on marine environment of fishing grounds in the waters around Cheju Island. Ph.D. Thesis. Tokyo University, Tokyo.
- Shannon CE and W Weaver. 1963. The Mathematical Theory of Communication. Univ. Illinois Press, Urbana, IL.
- Shin YK. 2013. An ecological study of phytoplankton community in the Geum river estuary. Korean J. Ecol. Environ. 46:524–540.
- Sun J, Y Feng, F Zhou, S Song, Y Jiang and C Ding. 2013. Top-down control of spring surface phytoplankton blooms by microzooplankton in the central Yellow Sea, China. Deep-Sea Res. Part II-Top. Stud. Oceanogr. 97:51–61.
- Tomas CR. 1997. Identifying Marine Diatoms and Dinoflagellates. Academic Press, Oxford.
- Uye S. 2008. Blooms of the giant jellyfish *Nemopilema nomurai*: a threat to the fisheries sustainability of the East Asian Marginal Seas. Plankton Benthos Res. 3:125–131.
- Wang L, Q Chen, R Han, B Wang and X Tang. 2016. Characteristics of jellyfish community and their relationships to environmental factors in the Yangtze estuary and the adjacent areas after the third stage impoundment of the Three Gorges Dam. Procedia Eng. 154:679–686.
- Xiao W, Y Zeng, X Liu, X Huang, KP Chiang, T Mi, F Zhang, C Li,

- H Wei, Q Yao and B Huang. 2019. The impact of giant jellyfish *Nemopilema nomurai* blooms on plankton communities in a temperate marginal sea. *Mar. Pollut. Bull.* 149:110507.
- Yang HS and SS Kim. 1990. A study on sea water and ocean current in the sea adjacent to Korea Peninsula 1. Physical processes influencing the surface distributions of chlorophyll and nutrient in the Southern Sea of Korea in summer. *Bull. Korean Fish. Soc.* 23:417-424.
- Yoon SC, SH Yoon, JD Whang, YS Suh and YY Yoon. 2015. Long-term variation in ocean environmental conditions of the northern East China Sea. *J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy* 18:189-206.
- Yoon YH. 1989. Environmental Analysis of Phytoplankton Growth in the Inland Sea of Japan with Special Reference to the Occurrence of Red Tide. Ph.D. Thesis. Hiroshima Univ. Hiroshima, Japan.
- Yoon YH. 1999. The characteristics on the spatio-temporal distributions of phytoplankton communities in Deukryang Bay, southwestern Korea. *Korean J. Environ. Biol.* 17:481-492.
- Yoon YH. 2011. Marine Environments and Phytoplankton in the South-western Sea of Korea. pp. 68-93. In: *The Plankton Ecology in Korean coastal waters* (Choi CK (ed)). Donghwa Pub., Seoul.
- Yoon YH. 2013. Vertical profiles of marine environments and micro-phytoplankton community in the continental slope area of the East China Sea in early summer 2009. *J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy* 16:151-162.
- Yoon YH, JS Park, YG Park, DJ Hwang and HY Soh. 2005a. A characteristics of thermohaline structure and phytoplankton community from southwestern parts of the East China Sea during early summer, 2004. *Bull. Korean Soc. Fish. Tech.* 41:129-139.
- Yoon YH, JS Park, YG Park and IH Noh. 2007. Marine environment and the distribution of phytoplankton community in the southwestern sea of Korea in summer 2005. *J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy* 10:163-174.
- Yoon YH, JS Park, HY Soh and DJ Hwang. 2003. Spatial distribution of phytoplankton community and red tide of dinoflagellate, *Prorocentrum donghaiense* in the East China Sea during early summer. *Korean J. Environ. Biol.* 21:132-141.
- Yoon YH, JS Park, HY Soh and DJ Hwang. 2005b. On the marine environment and distribution of phytoplankton community in the northern East China Sea in early summer 2004. *J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy* 8:100-110.
- Zheng L, B Chen, X Liu, B Huang, H Liu and S Song. 2015. Seasonal variations in the effect of microzooplankton grazing on phytoplankton in the East China Sea. *Cont. Shelf Res.* 111:304-315.
- Zhong F, R Xiang, Y Yang and M Zhao. 2018. Evolution of the Southern Yellow Sea cold water mass during the last 7 kyr from benthic foraminiferal evidence. *Sci. China Earth Sci.* 61:1406-1418.