

2021년 이른 가을 남해 서부 해역의 수괴 분포 및 식물플랑크톤 군집의 공간분포 특성

윤양호*

전남대학교 해양융합학과

Characteristics on spatial distributions of phytoplankton communities in relation to water masses in the western South Sea, Korea in early autumn 2021

Yang Ho Yoon*

Department of Ocean Integrated Science, Chonnam National University, Yeosu 56828, Republic of Korea

*Corresponding author

Yang Ho Yoon

Tel. 061-659-7142

E-mail. yoonyh@jnu.ac.kr

Received: 17 November 2021

Revised: 17 December 2021

Revision accepted: 20 December 2021

Abstract: A survey was conducted to analyze water masses and spatial distributions of phytoplankton communities at 15 stations on the surface and chlorophyll *a* maximum layers (CML) in the western South Sea of Korea from September 8 to 9, 2021. As a result, water masses were classified into Coastal Waters (CW) with relatively low salinity, the Tsushima Warm Current (TWC) with high water temperature and high salinity, and mixed waters (MW) showing a mixture of these two water masses. Turbidity showed high concentration in both the surface and CML. The chlorophyll *a* concentration was as low as $0.90 \pm 0.43 \mu\text{g L}^{-1}$ in the surface, more than $1.1 \mu\text{g L}^{-1}$ in CW, around $1.0 \mu\text{g L}^{-1}$ in MW, and less than $0.5 \mu\text{g L}^{-1}$ in the TWC. CML was $1.64 \pm 0.54 \mu\text{g L}^{-1}$. Regarding species composition of phytoplankton communities, there were 57 species in 31 genera (diatoms, 57.8%; dinoflagellates, 35.1%; and other phytoflagellates, 7.1%). The phytoplankton standing crop had $4.6 \pm 7.6 \text{ cells mL}^{-1}$ in the surface, more than 30 cells mL^{-1} in the CW, $2\text{--}5 \text{ cells mL}^{-1}$ in the MW, and less than 2 cells mL^{-1} in the TWC. CML was slightly higher than the surface with a variation of $5.7 \pm 8.4 \text{ cells mL}^{-1}$. Dominant species were found to be *Rhizosolenia flagilissima* f. *flagilissima*, *Skeletonema costatum*-ls, and *Nitzschia* sp./small size in the surface. For the CML *Rh. flagilissima* f. *flagilissima* showed a dominance of 12.0%. For the surface, the diversity variation was 2.36 ± 0.40 , which was high for TWC but low for MW. For CML, the diversity variation was 2.29 ± 0.52 , which was slightly lower than that of the surface. The dominance in the surface was 0.50 ± 0.15 , with a fluctuation range of more than 0.5 in MW and less than 0.5 in the TWC, which was different from the diversity. According to correlation analysis and principal component analysis (PCA), the presence of phytoplankton standing crops was high in CW but low in MW and TWC. That is, phytoplankton communities in early autumn were strongly affected by the expansion and mixing of water masses in western South Sea.

Keywords: water masses, phytoplankton community, coastal waters (CW), mixed waters (MW), Tsushima Warm Current (TWC), chlorophyll maximum layer (CML), diversity, dominance, PCA

서론

식물플랑크톤 군집은 해수 중의 무기영양염을 흡수하여 태양에너지를 합성할 수 있는 광합성 생물로서 해양생태계 에너지 공급자로 먹이사슬의 근간이 된다(Parsons *et al.* 1984). 더욱이 식물플랑크톤 군집은 다양한 인간 활동의 부산물로 생성되는 이산화탄소 및 부영양화 물질인 질소, 인 등 오염물질을 직접 이용하기에, 지구 기후변화 및 물질순환에 중심적 역할과 해양환경의 조절자(Behrenfeld *et al.* 2009), 그리고 수산자원 생물을 통한 단백질원 공급원의 생산조절자로서 중요성이 매우 크다(Ryther 1969). 이러한 식물플랑크톤 군집은 운동능력이 미약하거나 전혀 없는 부유생물로서 해수 유동 등 외력에 의해 수동적인 분포를 하기에, 수온, 염분, 영양염류 등 물리·화학적 무생물 인자 및 해양 구조에 따라 성장과 시·공간적 분포 특성을 달리한다(Parsons *et al.* 1984). 때문에 식물플랑크톤 군집 변동은 해양환경을 이해하고, 해양생태계의 군집구조 및 해역의 생물생산 능력을 평가하는 중요한 인자로서 광범위하게 활용되고 있다(Yoon 2011; Yoon *et al.* 2020; Park *et al.* 2021).

한국 남해 서부 해역은 구로시오해류 지류인 쓰시마난류의 영향은 물론, 중국대륙 연안수(양자강 희석수)의 영향을 강하게 받는 해역이다(Kim and Rho 1994; Lie and Cho 2006). 특히 수온 상승기의 남해 서부는 겨울 활발한 해수 혼합으로 냉각되어 저층에 존재하는 황해저층냉수(Lim 1976) 및 한국 연안수의 영향도 크게 받는다(Kim *et al.* 2005). 이 중 중국대륙 연안수는 동중국해로 북상하는 쓰시마난류와 혼합하여 한국 남해로 유입된 다음 대한해협과 쓰시마해협을 통하여 동해로 유출된다(Fukudome *et al.* 2010). 이런 이유로 한국 남해 해양환경은 이러한 수괴들의 세력 확장으로 계절적인 특성이 결정되며, 특히 중국대륙 연안수의 영향으로 비교적 높은 기초생산력을 유지하게 되어, 수산업 대상인 자원생물의 생산도 높게 된다(Ryther 1969; Park *et al.* 2021).

한편으로 한국 남해를 포함하는 동중국해 해역은 자원생물의 남획, 지구온난화, 산업발전에 따른 해양오염, 중국 내륙에 건설된 대형 댐에 의한 하천수 유출 감소 등 다양한 원인에 의해 해양환경 변화가 급격하게 발생하고 있다. 때문에 장마철 대량 유출된 하천수 영향으로 제주 연안해역에 저염수 현상(Kim *et al.* 2015; Lee *et al.* 2017)은 물론,

여름과 가을 양자강 하구에서 발생한 대량의 해파리 이동(Xiao *et al.* 2019) 등으로 해양생태계와 수산업을 포함한 해양산업에 심각한 피해를 발생시키고도 있다.

이 논문은 해양환경의 급속한 변화는 물론, 한국 수산업에 중요한 역할을 제공하는 한국 남해를 포함하는 동중국해 북부 해역에서 효율적인 해역 및 자원생물의 이용과 관리, 그리고 해양환경 보전 등에 필요한 기초자료 축적을 목적으로 모니터링 연구 과제의 한 부분으로, 2021년 이른 가을 한국 남해 서부 해역의 수괴 분포와 식물플랑크톤 군집에 따른 생태구조 특성을 해석하였다.

재료 및 방법

가을 남해 서부 해역의 수괴 분포와 식물플랑크톤 군집의 공간분포 특성 파악을 위한 조사는 2021년 9월 8일과 9일 양일간 15개 정점의 표층과 엽록소 *a* 최댓층(Chlorophyll *a* Maximum Layer ≡ 수온약층, 이하 CML로 표기)을 대상으로 조사하였다(Fig. 1). 조사는 전남대학교 실습선 새동백호(2,996톤)를 이용하여, 수괴 분석에 필요한 수온, 염분과 기타 기초해양 환경자료인 용존산소 포화도, 탁도 및 엽록소 *a* 농도 등에 대해 현장에서 직접 연속 측정이 가능한 휴대형 잠수형 형광광도계(ASTD102; JFE Advantech Co., Ltd, Japan)로 표층에서 저층까지 측정하였다. 식물플랑크톤 군집 파악을 위한 시료는 로젯샘

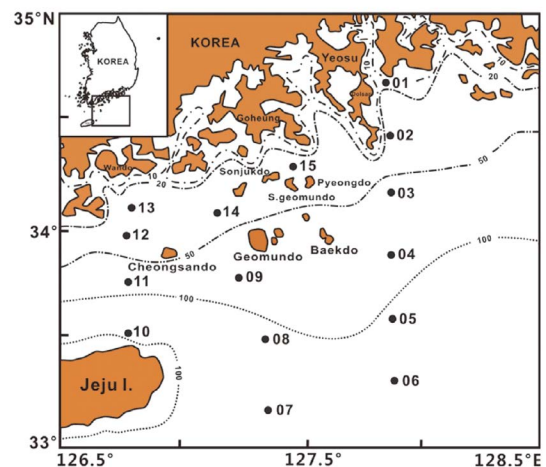


Fig. 1. A map showing sampling stations in the western South Sea, Korea.

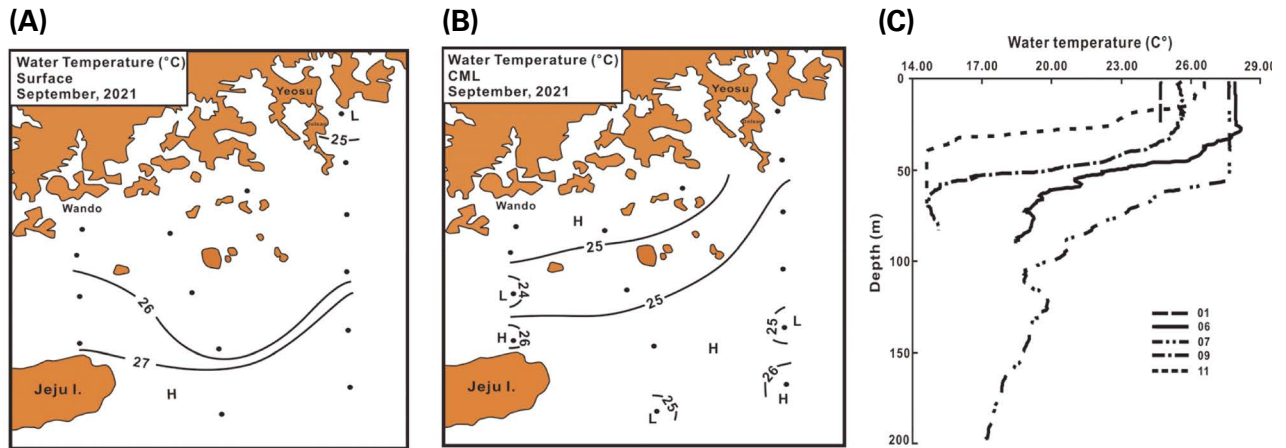


Fig. 2. Spatial distributions of water temperature at surface (A) and chlorophyll maximum layer (CML) (B), and its vertical profile at several sampling stations (C).

플러(SBE 32; Sea-bird Electronic, USA)를 이용하여 표층과 CML의 해수 1L를 채수하였다. 채수된 시료는 현장에서 루골 용액을 이용하여 최종농도 2.0%가 되도록 고정하고, 광분해 방지를 위해 차광하였다. 고정한 시료는 실험실의 차광조건에서 플라스틱 메스실린더를 이용, 48시간 이상 정치하여 상등액을 제거하는 과정을 반복하여, 최종농도가 10 mL가 되도록 100배 농축하였다. 검경은 1.0 mm 간격의 가로와 세로 선이 들어 있는 계수판(No. 5608-C; Rigosha, Japan)에 농축 시료 0.1 mL를 취하여, 커버글라스로 덮고, 미분 간섭장치(DIC)가 부착된 광학현미경(Eclipse 80i; Nikon, Japan)을 이용하여, 100~400× 배율에서 종의 동정과 계수를 실시하였다. 종 동정은 식물플랑크톤 도감(Cupp 1943; Omura *et al.* 2012 etc) 및 기타 분류 논문들을 이용하였고, 학명은 World Register of Marine Species (WoRMS, www.marinespecies.org)에 따라 정리하였다.

식물플랑크톤 출현 종 및 현존량 자료를 이용하여, 군집 특성을 표현하는 생태지수에서 다양도 지수(H') 및 우점도 지수(D)를 Primer program (Plymouth Routines in Multivariate Ecological Research)의 다음 식에 의해 정점별로 계산하였다.

$$\textcircled{1} \text{ 종 다양성 지수: } H' = -\sum P_i \times \ln(P_i) \text{ (Shannon and Weaver 1963)}$$

P_i : i 번째 종의 점유율

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

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

또한, 측정된 해양환경 인자와 전체 식물플랑크톤 및 분류군별, 그리고 우점종의 세포 밀도 등은 SPSS (IBM 20.0)를 이용하여 피어슨 상관계수 및 주성분 분석을 하여, 식물플랑크톤의 출현 특성 및 특점 분포에 따른 해역을 구분하였다. 주성분은 누적 기여율 70%를 기준으로 계산하였다(Kim *et al.* 2020; Park *et al.* 2021).

결과 및 고찰

1. 환경인자

1) 수온, 염분 및 수괴 분석

2021년 이른 가을(이하 가을) 남해 서부 해역의 표층 수온은 24.7~27.9°C 범위에서 $26.0 \pm 1.0^\circ\text{C}$ 변동 폭으로(평균±표준편차로 이하 표현 방식이 같음), 여수 연안에서 25.0°C 이하의 수온이 개방해역으로 진행할수록 상승하여, 중앙부까지는 25.0~26.0°C의 비교적 균일하였고, 제주 동부 먼바다에서 25.0°C 이상의 수온을 보였다(Fig. 2A). CML은 23.1~26.9°C의 범위에서 $25.0 \pm 0.9^\circ\text{C}$ 의 변동 폭으로 연안의 낮은 수온이 중앙부까지 확장되어, 소리도에서 제주를 연결하는 띠 모양의 해역에서 25.0°C 이하의 낮은 수온이 관찰되었다. 또한, 표층에서 높은 수온을 보였던 제주 동부 먼바다는 26.0°C 이상의 수온이 북쪽으로 확

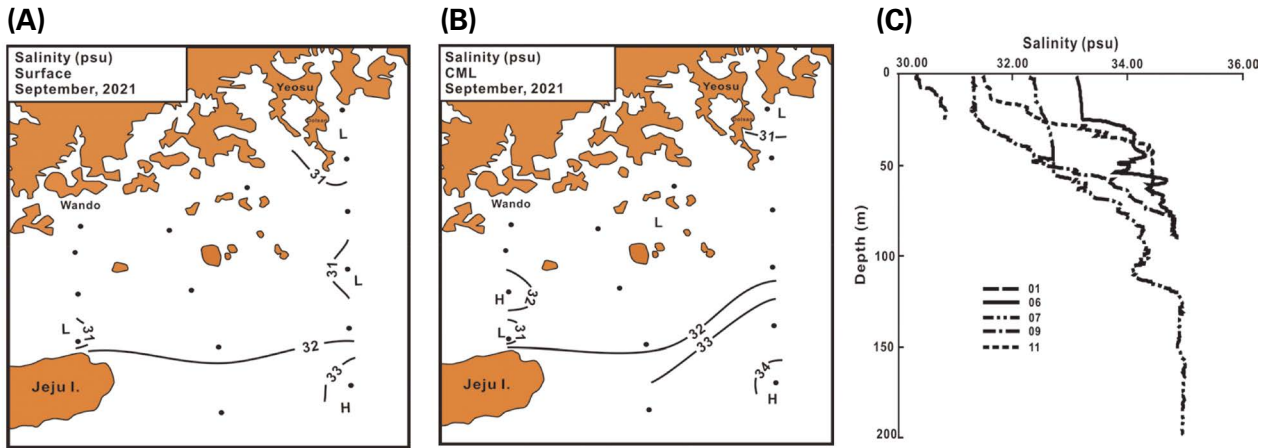


Fig. 3. Spatial distributions of salinity at surface (A) and CML (B) and its vertical profile at several sampling stations (C).

장되지만, 전체적으로는 표층보다 1.0°C 정도 낮았다(Fig. 2B). 수온의 수직분포는 수심의 낮은 정점에서 혼합된 양상(Stn. 1) 및 약 20m 수심에서 강한 수온약층이 관찰되었으나, 개방해역은 수심 60~80m에 수온약층이 관찰되었으며, 일부 정점의 수온약층 상부(Stn. 6) 및 하부(Stn. 7 & Stn. 9)에서 수온 역전 현상이 관찰되었다(Fig. 2C).

가을 남해 서부의 수온 분포는 초가을까지 여름의 높은 수온이 유지되고 있음을 나타내었으며, 봄에 관찰되었던 연안수와 개방해역(쓰시마난류) 사이의 연안전선(Lim 1976; Yang 1994)은 관찰되지 않았다(Park et al. 2021). 선행 연구(Kim and Yug 1983; Kim 2020)에서 남해의 수온 역전 현상은 표면냉각과 쓰시마난류의 영향으로 형성되며, 계절적으로는 겨울이 여름에 비해 약 6배 많은 빈도로 관찰되지만, 겨울은 다양한 수심에 관찰되고, 여름은 주로 수온약층 아래에 형성되는 것을 보고하고 있어, 남해의 수온역전은 보편적으로 관찰되는 현상이라 할 수 있다.

염분은 표층이 30.14~33.12 psu 범위에서 31.41 ± 0.73 psu 변동 폭으로, 연안에서 31.0 psu 이하로 낮은 것을 제외하면, 전체 해역에서 31.0~32.0 psu의 범위의 비교적 균일한 분포를 보였으나, 제주 동부 먼바다에서 32.0 psu 이상의 염분이 관찰되었다(Fig. 3A). CML은 30.36~34.20 psu 범위에서 31.85 ± 1.04 psu 변동 폭으로 표층보다 다소 높지만, 공간분포는 표층과 유사하였다. 다만 제주 동부의 표층에서 협소한 해역에 관찰되었던 33.0 psu 이상의 염분이 확장되어 나타났으며, 34.0 psu 이상의 높은 염분도 관찰되었다(Fig. 3B). 염분 수직분포에서 대부분 정점이 수심 증가와 함께 염분은 상승하였지만, 수심이 깊은 개방해역은

표층에서 수심 20~50 m까지 혼합특성을 보였고, Stn. 6의 수심 50 m 전후에서는 염분 역전 등 복잡한 염분 변화 양상을 나타내었다(Fig. 3C).

가을 염분 분포는 봄에 비해 표층과 CML에서 각각 평균 약 2.8 psu와 2.4 psu 낮은 값을 보였으며(Park et al. 2021), 이는 봄에 비해 가을이 중국대륙 연안수 등 연안의 저염수 영향이 남해까지 간하게 확장되고 있기 때문이라 할 수 있다(Kim and Rho 1994; Yoon et al. 2020).

가을 각 정점의 표층에서 저층까지 1 m 간격으로 측정된 수온과 염분 자료를 이용하여 작성된 T-S diagram에서 섬진강 영향을 받는 Stn. 1이 고온, 저염수가 관찰되었고, 상대적 고염을 보이는 제주 북동부에서 동부의 먼바다에 위치하는 Stn. 5~Stn. 7의 3개 정점을 제외한 대부분 남해는 이들 두 개 수괴의 혼합된 혼합수 특성을 나타내었다(Fig. 4). 가을 수괴 분포를 선행연구(Lim 1976; Gong et al. 1996; Hur et al. 1999)에 대입하면, 수온 23°C 이상, 염분 31.0 psu 이하의 고온, 저염으로 중국대륙 연안수와 동일한 특성을 보이는 수괴는 한국 연안고유수(CW), 상대적 고온에 31.0~33.0 psu 범위의 상대적 저염을 나타내는 수괴는 쓰시마난류 표층수(혼합수, MW), 그리고 33.0 psu 이상의 상대적 고염 특성을 보이는 제주 북동부 및 동부의 3개 정점은 쓰시마난류 저층수(쓰시마난류수, TWC)로 구분되었다. 즉, 가을 남해 서부 해역은 이들 3개 수괴에 의해 지배되어, 동일 해역을 대상으로 하였던 봄 수괴에서 연안수 출현이 없었던 결과와는 차이를 보였다(Park et al. 2021). 다만 가을 남해 서부에 광범위하게 출현하는 혼합수는 탁도의 공간분포를 고려하면, 남해 중앙부는 한국 연

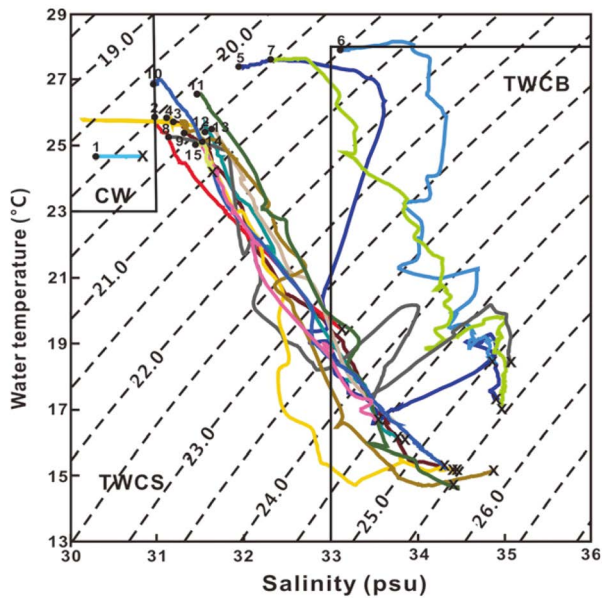


Fig. 4. Temperature-salinity diagram in the western South Sea in September 2021. CW: coastal waters; TWCS: Tsushima warm current surface; MW: mixing waters; TWCB: Tsushima warm current bottom.

안 고유수, 서부 및 제주 북동부는 중국대륙 연안수와 쓰시마난류수가 혼합되는 것으로 판단되었다(Kim and Rho 1994; Gong *et al.* 1996; Lie and Cho 2016; Lee *et al.* 2017).

2) 용존산소 포화도

용존산소 포화도는 표층에서 83.3~99.9% 범위에서 96.4 ± 4.0% 변동 폭으로 연안에서 90% 이하의 상대적 낮은 값을 제외하면, 연안수 및 혼합수에서 99% 이상의 포화도가 개방해역으로 진행함에 따라 다소 감소하여 쓰시마난류

는 96% 이하의 값을 보였지만, 전체적으로 포화상태의 양호한 수질을 나타내었다(Fig. 5A). CML은 표층과 다르게 55.9~99.9% 범위에서 90.4 ± 12.0% 변동 폭으로 표층과 같이 연안에서 90% 이하의 값을, 연안부의 혼합수에서 95% 이상, 개방해역의 혼합수에서 90~90% 포화도를, 그리고 쓰시마난류에서 90% 이하의 상대적 낮은 값을 나타내었다. 특히 서부의 Stn. 11에서 56%로 매우 낮았다(Fig. 5B). 용존산소 포화도의 수직분포에서 표층의 포화상태를 보이지만, 일부 정점의 아표층 및 중층에서 매우 낮은 포화도를 나타내었다(Fig. 5C).

가을 남해 서부 해역의 아표층 및 중층에서 낮은 용존산소 포화도는 다음에 설명하는 탁도의 높은 농도에 따른 것으로, 유입된 부유물이 수온약층에 집적되어 산소가 소모되면서 발생한 것으로 해석되었다. 또한 2021년 가을 남해의 엽록소 *a* 농도 및 용존산소 분포 등을 고려하면, 식물플랑크톤 광합성 활성은 표층 및 CML 모두에서 매우 약했을 것으로 추정되었다.

3) 탁도

탁도는 표층에서 2.5~102.5 NTU 범위에서 24.2 ± 25.0 NTU 변동 폭으로 여수 연안 및 청산도를 포함하는 완도 연안을 제외한 제주 북동부에서 고히반도까지 해역에서 10 NTU 이하로 낮고, 제주 동부 해역에서 100 NTU 이상의 매우 높았다(Fig. 6A). CML 역시 2.5~367.4 NTU 범위에서 61.9 ± 92.5 NTU 변동 폭으로 표층보다 평균 약 3 배 높았으며, 10 NTU 이하의 낮은 탁도를 나타내는 해역은 표층보다 축소되었고, 100 NTU 이상 높은 탁도 해역은 제주 북동부까지 확장되었다(Fig. 6B). 탁도의 수직분포도

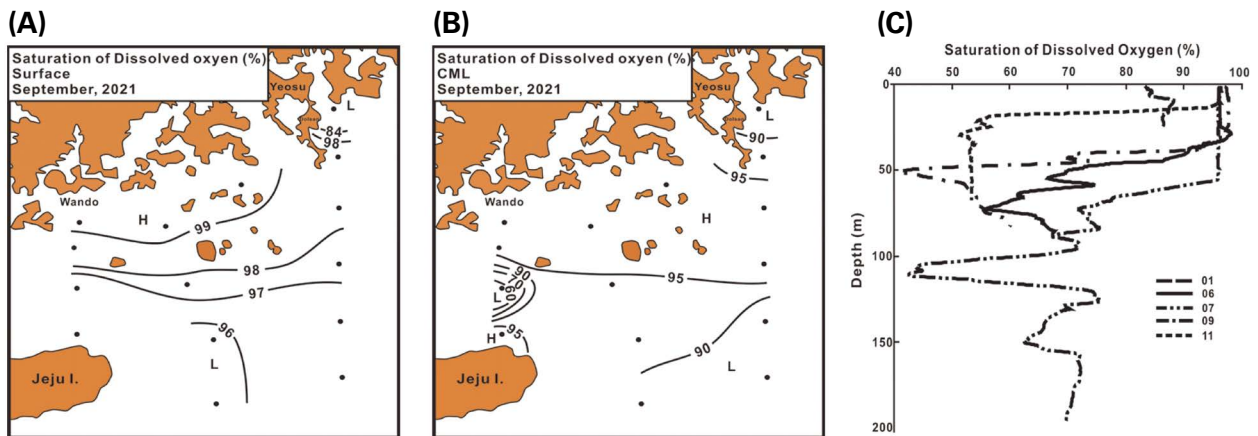


Fig. 5. Spatial distribution of saturation of dissolved oxygen at surface (A) and CML (B) and its vertical profile at several sampling stations (C).

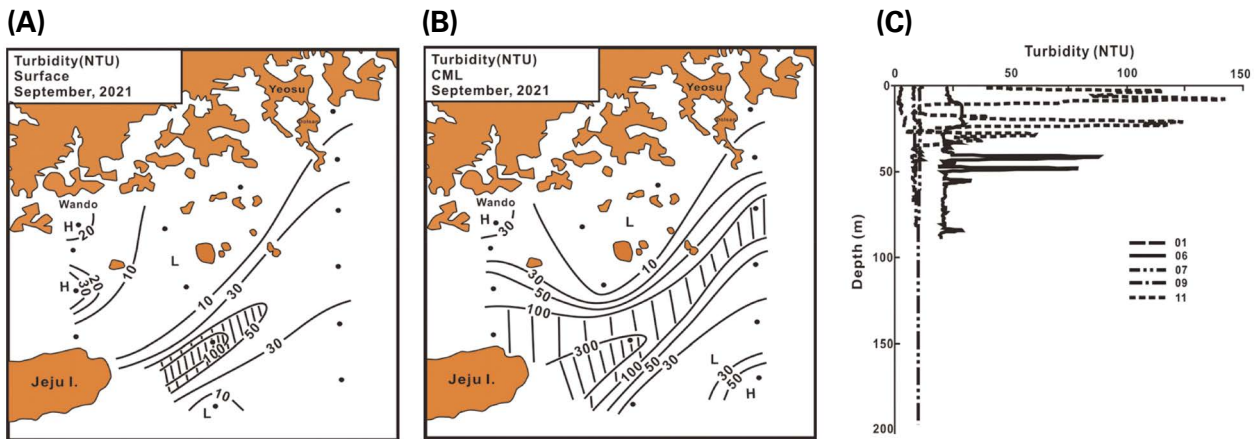


Fig. 6. Spatial distribution of turbidity at surface (A) and CML (B) and its vertical profile at several sampling stations (C).

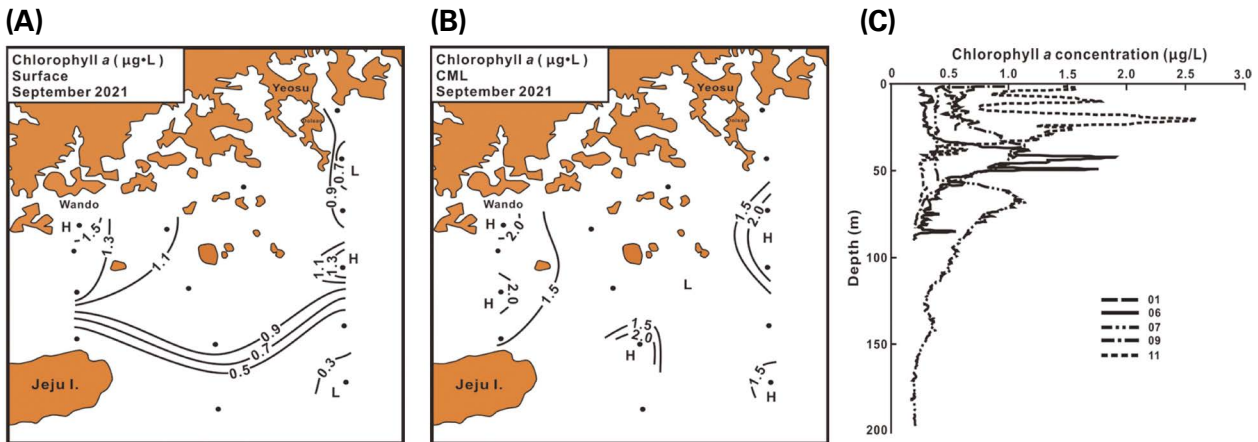


Fig. 7. Spatial distribution of chlorophyll a concentration at surface (A) and CML (B) and its vertical profile at several sampling stations (C).

대부분 정점에서 표층보다 아표층 또는 중층에서 극단적으로 높은 농도를 나타내었다(Fig. 6C).

연안해역의 탁도는 수질 환경 파악과 동시에 연안생태계의 물리, 지화학 및 생물학적 과정을 이해하는 중요한 단서를 제공한다(Shi and Wang 2010). 또한 해양에서 식물플랑크톤 생물량 증가로 인한 탁도 증가는 계절적으로 표층 수온 변화에도 크게 영향을 미치는 것이 보고된다(Price *et al.* 1986). 그러나 가을 한국 남해 서부 해역의 탁도는 식물플랑크톤 생물량 등 생물의 활성보다는 외부에서 유입된 부유물질에 크게 지배되는 것으로 추정되었다. 즉 여름 제주 북부 및 남부를 통해 동해로 유출되는 쓰시마난류 경로(Cho and Yoon 1990; Lie and Cho 2016)에 중국대륙 연안수가 혼합되어 제주 주변 및 남해로 유입된 것으로 판단되었다(Yoon *et al.* unpublished data) 이러한 결과

는 동중국해에서 양자강 배출수의 확산 실험 등에서도 확인된다(Lee *et al.* 2017).

2. 엽록소 a 농도

엽록소 a 농도는 표층에서 $0.25\sim 1.56\ \mu\text{g}\ \text{L}^{-1}$ 범위에서 $0.90\pm 0.43\ \mu\text{g}\ \text{L}^{-1}$ 의 변동 폭으로 변화하여, 연안 혼합수에서 $1.1\ \mu\text{g}\ \text{L}^{-1}$ 이상의 농도를 보이나, 중앙부 혼합수에서 $0.9\sim 1.0\ \mu\text{g}\ \text{L}^{-1}$, 쓰시마난류에서 $0.5\ \mu\text{g}\ \text{L}^{-1}$ 이하로 낮았다(Fig. 7A). CML은 $0.81\sim 2.59\ \mu\text{g}\ \text{L}^{-1}$ 범위에서 $1.64\pm 0.54\ \mu\text{g}\ \text{L}^{-1}$ 변동 폭으로 표층보다 1.5배 정도 높았지만, 표층과 다르게 청산도를 포함하는 서부 해역에서 $1.5\ \mu\text{g}\ \text{L}^{-1}$ 이상, 일부 정점은 $2.0\ \mu\text{g}\ \text{L}^{-1}$ 이상의 농도 및 쓰시마난류 영향을 받는 개방해역에서 $1.5\ \mu\text{g}\ \text{L}^{-1}$ 이상의 패치 분포가 관찰되었

다. 그러나 중앙부는 $1.5 \mu\text{g L}^{-1}$ 이하의 농도를 나타내었다 (Fig. 7B). 엽록소 *a* 농도의 수직분포에서 CML은 서부 해역의 Stn. 11에서 수심 15 m 전후에 형성되었고, 쓰시마난류 영향이 강한 제주 인근 해역은 수심 50 m 이심에 표층과 농도 차이가 크게 형성되지만, 전남 동부 연안에서는 관찰되지 않았다 (Fig. 7C).

한국 남해를 포함하는 동중국해 북부 해역의 엽록소 *a* 농도는 한국 연안 고유수 및 중국대륙 연안수, 그리고 쓰시마난류의 확장에 깊게 관련되어 (Gong *et al.* 1996), 연안수 및 혼합수에서 높고, 쓰시마난류에서 낮은 것이 보고된다 (Furuya *et al.* 2003; Guo *et al.* 2014; Liu *et al.* 2016; Yoon *et al.* 2020). 한국 남해 서부 해역의 엽록소 *a* 농도도 이러한 수괴의 시·공간적 변동 양상에 지배되어 (Ichikawa and Beardsley 2002), 큰 변동 폭을 나타낸다. 또한, CML이 수온약층 부근에 형성되는 것은 표층에서 침강한 규조류 등 식물플랑크톤이 물리적 경계면에 집적되거나, 종의 광적응 특성 등에 따른 것으로 알려진다 (Gerla *et al.* 2011; Yoon 2013; Baldry *et al.* 2020). 다만 가을 엽록소 *a* 농도는 봄과 유사하지만, 식물플랑크톤 현존량은 봄보다 1/10 수준으로 낮았으며 (Park *et al.* 2021), 이러한 내용은 식물플랑크톤 출현 및 분포 특성에서 고찰한다.

3. 식물플랑크톤 군집

1) 종 조성

2021년 가을 한국 남해 서부 해역에 출현한 식물플랑크톤 종은 31속 57종으로, 규조류가 18속 33종으로 57.8%, 와편모조류가 10속 20종으로 35.1%, 규질편모조류가 2속 3종으로 5.3%, 그리고 은편모조류가 1속 1종으로 1.8%의 종 점유율을 나타내었다. 수층별로는 표층이 27속 46종에서 규조류가 16속 27종, 와편모조류가 9속 16종, 규질편모조류가 1속 2종, 그리고 은편모조류가 1속 1종이었고, CML이 26속 47종으로 규조류가 14속 29종, 와편모조류가 7속 14종, 규질편모조류가 2속 3종, 그리고 은편모조류가 1속 1종으로 차이가 없었다. 공간분포는 표층에서 4~22종의 범위에서 10.8 ± 5.6 종의 변동 폭으로 서부의 혼합수에서 20종 이상을 나타내지만, 개방해역으로 갈수록 종수가 감소하여, 중앙부에서 10~15종, 쓰시마난류에서 10종 이하로 낮아졌다 (Fig. 8A). CML도 5~29종의 범위에서 12.6 ± 6.8 종의 변동 폭으로 표층보다 다소 많은 종이 출현하였지만, 공간분포는 표층과 유사하였다 (Fig. 8B).

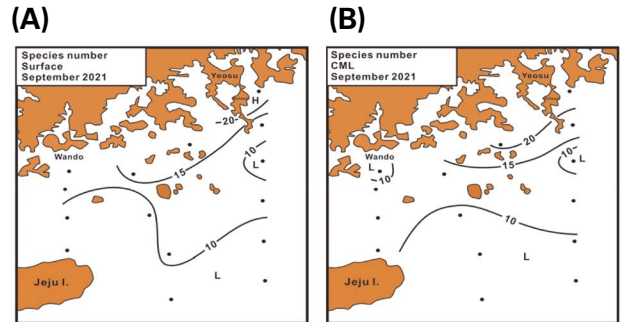


Fig. 8. Spatial distribution of phytoplankton species number at surface (A) and CML (B).

또한 출현종에서 와편모조류 *Torodinium teredo* (Omura *et al.* 2012; Ismael and Rocio 2013)와 규질편모조류 *Dictyocha antarctica* (Deniz *et al.* 2006)는 아직 한국 연안해역에 출현 (MOF and MABIK 2021)이 보고되지 않은 미기록종이다.

남해를 포함하는 동중국해 북부 해역의 식물플랑크톤 군집 종 조성은 상대적으로 단순 (Yoon *et al.* 2007, 2020) 하며, 수괴 분포에 따라 시·공간적 변동 폭이 큰 것이 알려진다 (Yoon *et al.* 2019; Park *et al.* 2021). 그리고 이 해역의 식물플랑크톤 군집은 일반적으로 규조류가 지배하지만 (Guo *et al.* 2014; Yoon *et al.* 2019), 계절에 따라서는 와편모조류 등 식물성 편모조류 출현 종수에 지배되기도 한다 (Yoon *et al.* 2020). 즉, Yoon *et al.* (2020)은 여름 동중국해 북부 해역의 식물플랑크톤 군집은 규조류 32.0%, 와편모조류 63.0%, 그리고 기타 편모조류 5.0%로 규조류보다 식물성 편모조류 조성이 2배 높은 것을 보고하였다. 그러나 해역에서 식물플랑크톤 군집의 종 조성은 연구해역의 범위, 수괴의 다양성, 정점 수, 연구자의 숙련도 및 동정 기준 등에 따라 많은 차이가 있게 된다 (Kim *et al.* 2020). 다만 가을 남해 서부 해역의 식물플랑크톤 출현 종은 74종이 출현한 봄의 73% 수준으로 봄과 비교하면 높은 수온으로 규조류 점유율이 10.6% 감소였고, 와편모조류는 7.1% 증가하였다 (Parsons *et al.* 1984; Yoon 2011).

2) 현존량

식물플랑크톤 현존량은 표층이 $4.0 \sim 31.1 \text{ cells mL}^{-1}$ 범위에서 $4.6 \pm 7.6 \text{ cells mL}^{-1}$ 변동 폭으로 규조류가 $3.9 \pm 7.6 \text{ cells mL}^{-1}$, 식물성 편모조류가 $0.7 \pm 0.3 \text{ cells mL}^{-1}$ 로 출현하였다. CML은 $5.6 \sim 28.4 \text{ cells mL}^{-1}$ 범위에서 $5.7 \pm 8.4 \text{ cells mL}^{-1}$ 의 변동 폭으로 규조류가 $5.0 \pm 8.1 \text{ cells mL}^{-1}$, 식물성 편모조류가 $0.7 \pm 1.6 \text{ cells mL}^{-1}$ 로 표층보다 다소 많았지만,

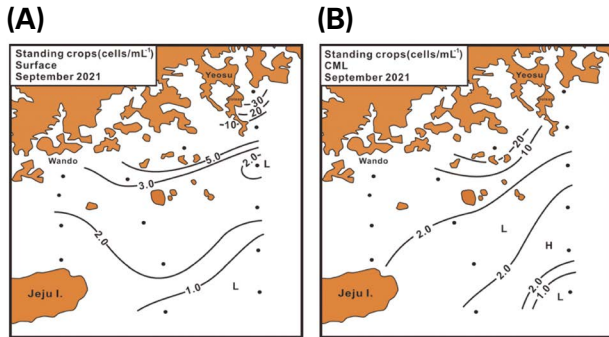


Fig. 9. Spatial distribution of phytoplankton standing crops at surface (A) and CML (B).

전체적인 현존량은 낮았으며, 해역별 차이도 큰 특징을 보였다. 표층의 공간분포는 출현 종수와 유사하여, 연안에서 30 cells mL⁻¹ 이상 높았지만, 개방해역으로 남하할수록 감소하여, 동부 연안에서 5.0 cells mL⁻¹ 이상, 중앙부 혼합수에서 2.0~3.0 cells mL⁻¹를 보였고, 제주 주변에서 2.0 cells mL⁻¹ 이하, 그리고 쓰시마난류에서 1.0 cells mL⁻¹ 이하로 낮았다(Fig. 9A). CML은 표층의 높은 현존량을 보였던 연안은 낮았지만, 기타 해역은 표층과 유사하여 연안 혼합수에서 20.0 cells mL⁻¹ 이상, 서부 해역은 2.0~10.0 cells mL⁻¹, 제주 주변에서 2.0 cells mL⁻¹ 이하, 그리고 쓰시마난류의 1.0 cells mL⁻¹ 이하 낮은 현존량은 표층보다 축소되었다(Fig. 9B).

식물플랑크톤 현존량은 하천수 유입, 심층수 용승 및 물질순환 과정에서 무기화 과정 등 다양한 영양염류 공급에 의존한다(Parsons *et al.* 1984). 남해의 영양염류는 한국 연안 고유수와 중국대륙 연안수에 의해 공급되는 부분이 크며(Kim *et al.* 2005; Lie and Cho 2006; Park *et al.* 2021), 특히 남해 서부 해역은 한국 연안보다 외해에서 공급되는 부분이 큰 것이 알려진다(Yang *et al.* 1995; Yoon 2011). 이런 이유로 남해 서부 해역의 식물플랑크톤 현존량은 연안수 및 혼합수에서 높고, 빈영양인 쓰시마난류에서 낮게 되는데(Guo *et al.* 2014; Liu *et al.* 2016), 가을도 이러한 분포와 일치하였다. 또한, CML이 표층보다 높은 식물플랑크톤 현존량을 나타내는 이유는 엽록소 *a* 농도의 고찰과 같다. 다만 동일 해역에서 봄 연안전선 및 일부 해역의 표층과 CML에서 넓게 관찰되었던 유기물 집괴(Mackenzie *et al.* 2002; Danovaro *et al.* 2009)는 가을에 관찰되지 않았고, 식물플랑크톤 현존량도 봄의 약 1/10 수준이었다(Park *et al.* 2021).

Table 1. Dominant species and dominance of phytoplankton community at the surface and chlorophyll *a* maximum layers (CML) in early autumn of 2021

Taxon	Dominance (%)	
	Surface	CML
DIATOMS	84.1	87.8
<i>Nitzschia</i> sp./small size	5.2	4.5
<i>Rhizosolenia flagilissima</i> f. <i>flagilissima</i>	8.4	12.0
<i>Skeletonema costatum</i> -ls	6.1	
PHYTOFLAGELLATES	15.9	12.2
<i>Gymnodinium</i> sp./small size	4.7	

3) 우점종

가을 식물플랑크톤 군집이 매우 낮은 현존량을 나타내고 있으며, 특정 정점에 높은 밀도로 출현한 종에 의해 우점종이 변화되었다. 때문에 전체 정점 평균 10% 이하의 낮은 우점률에 의한 우점종에 큰 의미가 없다. 그러나 전체 평균 4.0% 이상의 우점률을 나타내는 종(Yoon *et al.* 2020)은 표층에서 규조류 *Rhizosolenia flagilissima* f. *flagilissima* (= *Dactyliosolen fragilissimus*), *Skeletonema costatum*-ls, *Nitzschia* sp./small size 및 와편모조류 *Gymnodinium* sp./small size가 각각 8.4%, 6.1%, 5.2%, 4.7%의 우점률 순으로 우점하였다. CML은 표층 우점종에서 *Rh. flagilissima* f. *flagilissima*, *Nitzschia* sp./small size만이 각 12.0%와 4.5%의 우점률로 우점하였다(Table 1).

식물플랑크톤 군집에서 규조류가 전체 현존량에서 차지하는 상대 비는 표층에서 84.1%, CML에서 87.8%로 높았다(Yoon 2011; Park *et al.* 2021). 표층 공간분포는 출현 종수 및 현존량과 유사하여, 연안에서 90% 이하의 높은 비율 보이거나, 개방해역으로 갈수록 감소하여, 중앙부 혼합수에서 80% 이상, 제주 주변 해역에서 50% 이하, 그리고 제주 북동부 혼합수 및 쓰시마난류에서 20% 이하로 감소하였다(Fig. 10A). CML은 표층보다 다소 복잡하여, 연안수 및 서부 혼합수에서 90% 이하의 비율 나타내지만, 개방해역으로 갈수록 감소하여, 중앙부 혼합수에서 70% 이상, 제주 주변 및 쓰시마난류에서 60~70%로 표층보다 높은 상대 비를 보였다(Fig. 10B).

최근 50년 남해를 포함한 동중국해의 식물플랑크톤 군집에서 우점종은 대형 종에서 소형 종으로, 그리고 온대-아열대의 광온성 종에서 아열대-열대의 광온성 종으로 변

화하였고, 대표적인 연안해역의 광염성 종인 *S. costatum*-ls 출현이 감소하는 등 많은 변화가 보고된다 (Jiang *et al.* 2014). 남해 서부 해역의 식물플랑크톤 군집에서 우점종 변화 역시 시·공간적 차이가 매우 큰 특징을 보이며, 2021년 가을 우점종에서 *S. costatum*-ls를 제외하면, 남해 연안 및 내만 해역에서 우점종으로 출현한 기록이 없는 종이며 (Yoon 2011), 동일 해역에서 상대적으로 다양한 종에 의해 높은 우점률로 우점종이 출현한 봄과도 다른 결과이다 (Park *et al.* 2021). 가을 표층과 CML에서 최우점한 *Rh. flagilissima f. flagilissima*는 지구 규모에서 연중 일반적으로 출현하며 (Cupp 1943), 가을에서 겨울의 발틱해 (Łotocka 2006) 및 봄과 가을 플로리다 연안 (Philips *et al.* 2010)에서 대발생을 형성하기도 한다. 또한, 이 종은 대발생 이후 퇴적층에 침강하여 저서성 패류의 아가미를 막히게 하여, 성장을 저해 (Lorrain *et al.* 2000)하기도 하지만, 남해에서 대발생은 물론 유해성이 보고된 기록은 없다 (Yoon 2011). *S. costatum*-ls는 극해역을 제외한 연안해역에서 일

반적으로 출현하는 종으로, 온대해역의 봄 대발생 주역을 담당함은 물론 (Homer 2002), 연안의 부영양화 지표종으로 알려진 적조생물이다 (Abdalla *et al.* 1995; Jaanus *et al.* 2010). 이 종은 다양한 물질을 세포 외로 분비하여 포식자 (Miralto *et al.* 1999) 및 다른 생물의 성장을 저해하기도 하며 (Howard *et al.* 1995), 종간 경쟁에서 유리한 위치를 점유하며 (Yamasaki *et al.* 2011), 적조 발생으로 연안 양식장의 수산생물에 피해를 발생시키지만 (Kent *et al.* 1995), 한국 연안해역에서 보편적으로 우점한다 (Yoon 2011). 기타로 *Gymnodinium sp./small size* 및 *Nitzschia sp./small size*은 공동정이 되지 않은 극소형 종이였다.

4) 생태지수

다양도 지수는 표층에서 1.20~2.73 범위에서 2.73 ± 0.50 변동 폭으로, 연안수에서 2.5 이상의 값을 보였고, 중앙부 혼합수에서 2.0~2.5 범위, 쓰시마난류에서 2.0 이하의 낮은 지수를 보여, 식물플랑크톤 출현 종수 및 현존량 분포와 유사하였다 (Fig. 11A). CML은 1.56~2.94 범위에서 2.24 ± 0.37 의 변동 폭으로, 표층보다 다소 높고 해역별 차이도 큰 특징으로 연안의 2.5 이상 값이 표층보다 범위가 축소된 것 외에는 표층과 유사하여, 중앙부 혼합수에서 2.0~2.5 범위, 쓰시마난류에서 2.0 이하의 지수를 나타내었다 (Fig. 11B). 우점도 지수는 표층에서 0.28~0.75 범위에서 0.50 ± 0.15 의 변동 폭으로 다양도 지수와 달리 연안수, 제주 동부 및 쓰시마난류에서 0.5 이하의 값을 보였고, 중앙부 혼합수에서 0.5 이상의 값을 나타내었다 (Fig. 11C). CML은 0.36~0.58 범위에서 0.44 ± 0.07 의 변동 폭으로 연안수 및 쓰시마난류에서 0.5 이상을 나타내었고, 중앙부 혼합수에서 0.5 이하를 나타내었다 (Fig. 11D).

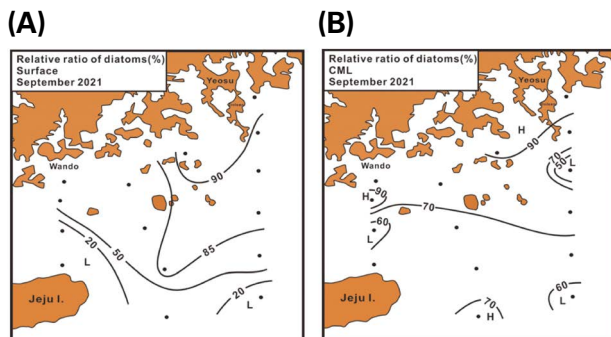


Fig. 10. Spatial distributions of the relative ratio of diatoms on phytoplankton communities at surface (A) and CML (B).

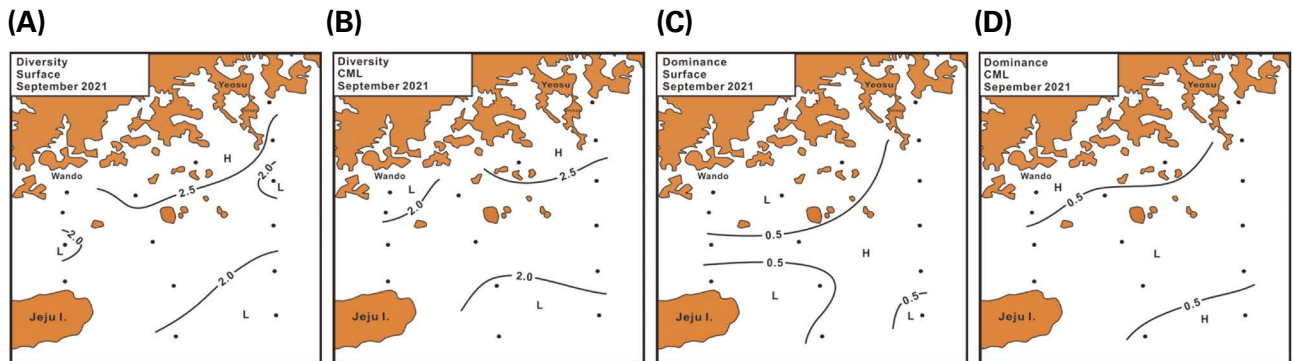


Fig. 11. Spatial distributions of diversity (A: surface, B: CML) and dominance (C: surface, D: CML).

생태지수는 군집 전체에 대한 정확한 종 동정 등을 기본으로 하기에 연구자에 따라 차이를 보일 수 있어(Kim *et al.* 2020), 직접적인 비교는 어렵다. 그러나 가을 남해 서부의 식물플랑크톤 군집의 다양도 지수는 여름 동중국해 북부 해역보다는 낮았지만(Yoon *et al.* 2020), 남해보다 부영양화가 진행됨 연안 하구역인 서해 금강 하구보다는 높았다(Kim *et al.* 2020). 그러나 우점도 지수는 다양도 지수와 상반되는 결과를 나타내었다(Kim *et al.* 2020; Yoon *et al.* 2020). 특히 동일 해역에서 다양한 생물 종수 및 10배 이상 높은 현존량으로 많은 차이를 보였던 2021년 봄의 생태지수 경향과는 유사하였다(Park *et al.* 2021).

4. 식물플랑크톤 출현 및 분포 특성

식물플랑크톤 관련 인자 및 환경 인자 사이의 상관행렬 및 주성분 분석의 인자부하량에서 표층의 엽록소 *a* 농도는 수온과 유의적인 음의 상관(-0.632)을, 다양도 지수에 양의 상관(0.525)을 나타내는 것에서 상대적 낮은 수온의 연안부 및 식물성 편모조류에 의해 지배되는 부분으로 나타났다. 식물플랑크톤 현존량은 수온과 용존산소에 유의적인 강한 음의 상관을 보이지만, 규조류 및 우점 규조류에 강한 양의 상관을 보여, 규조류에 의해 지배되지만, 서식 환경은 연안수 및 혼합수를 선호하며, 광합성 활성은 매우 쇠퇴한 것으로 추정되었다. 즉 용존산소 포화도가 식물플랑크톤 현존량 이외에 규조류 및 우점 규조류와 강한 음의 유의적 상관을 보이는 것에서도 규조류의 활성이 낮은 것을 확인할 수 있었다. 식물성 편모조류는 수온 및 우점도 지수와 유의적 음의 상관을 보이거나, 출현 종수 및 다양도 지수에 유의적 양의 상관을 보여, 가을 남해 식물플랑크톤 군집의 건전성에 일정 부분 기여하는 것으로 판단되었다(Table 2. upper, Fig. 12A). CML의 엽록소 *a* 농도는 표층과 다르게 탁도와 유의적 양의 관계를 보였고, 식물플랑크톤 현존량과 관련한 인자에 유의적 음의 관계를 보여, 탁도에 기여되는 부분이 큰 것으로 판단되었다. 즉 봄에 비해 1/10의 현존량에도 불구하고, 엽록소 *a* 농도에 차이가 없는 것은 CML에 현미경 관찰이 어려운 피코플랑크톤 등의 영향도 추정되지만, 가을은 봄과는 달리 매우 높은 탁도에 현장측정용 형광광도계가 부유물질에 반응한 결과에서 발생하여 부분이 큰 것으로 판단되었다. 그리고 식물플랑크톤 현존량은 출현 종수, 분류군 및 우점종

Table 2. Correlation matrix between environmental factors and phytoplankton parameters at surface (upper) and CML (lower)

	WT	SAL	SAL	WT	WT	ST	ST	DOs	DOs	TBD	Chl- <i>a</i>	DV	DV	DM	DM	SN	SN	TCN	TCN	DT	DT	PF	PF	Df	Df	Ns	Ns	Sc	Sc	Gs	Gs
WT	-	0.677*	0.128	0.154	-0.182	-0.632+	-0.836*	0.434	-0.535+	-0.515+	-0.521+	-0.496	-0.415	-0.372	-0.157																
SAL	-0.192	-	0.725*	0.284	-0.232	-0.402	-0.491	0.040	-0.472	-0.467	-0.185	-0.396	-0.415	-0.394	0.166																
ST	-0.483	0.855*	-	0.386	-0.100	0.116	0.001	-0.328	-0.333	-0.337	0.032	-0.264	-0.333	-0.358	0.240																
DOs	0.742*	-0.400	-0.562+	-	-0.357	0.224	-0.124	-0.175	-0.827*	-0.838*	0.130	-0.807*	-0.892*	-0.908*	0.222																
TBD	0.222	-0.108	0.200	0.047	-	0.170	0.105	0.098	0.062	0.077	-0.343	0.041	0.090	0.081	0.015																
Chl- <i>a</i>	0.106	-0.062	0.130	-0.161	0.571+	-	0.525+	-0.373	0.010	-0.011	0.463	-0.003	-0.015	-0.059	0.385																
DV	-0.285	-0.620+	-0.485	-0.026	-0.327	-0.552+	-	-0.768*	0.480	0.454	0.678*	0.437	0.363	0.306	0.194																
DM	0.193	0.504	0.355	0.097	-0.094	0.009	0.401	-	-0.545+	-0.041	-0.586+	-0.085	-0.021	0.028	-0.284																
SN	-0.204	-0.522+	-0.414	-0.008	-0.318	-0.595+	0.947*	-0.153	0.726*	0.707*	0.548+	0.687*	0.606+	0.556+	0.054																
TCN	-0.115	-0.435	-0.339	0.017	-0.248	-0.564+	0.820*	0.030	-	0.999*	0.181	0.981*	0.962*	0.961*	-0.265																
DT	-0.103	-0.426	-0.336	0.036	-0.251	-0.571+	0.812*	0.051	0.999*	-	0.137	0.983*	0.964*	0.965*	-0.292																
PF	-0.321	-0.444	-0.286	-0.372	-0.088	-0.205	0.672*	-0.428	0.630*	0.600+	-	0.098*	0.112	0.059	0.548+																
Df	-0.109	-0.428	-0.311	-0.043	-0.188	-0.538+	0.725*	-0.066	0.946*	0.941*	0.687*	-	0.945*	0.952*	-0.263																
Ns	0.044	-0.350	-0.314	0.141	-0.253	-0.369	0.311	0.162	0.421	0.496	0.316	0.582+	-	0.994*	-0.296																
Sc	only surface																														

*: P < significant at 0.01 level, +: P < significant at 0.05 level, WT: water temperature, SAL: salinity, ST: sigma t, DOs: saturation of dissolved oxygen, TBD: turbidity, Chl-*a*: chlorophyll *a*, SN: species number, DV: Diversity, DM: Dominance, TCN: phytoplankton standing crops, DT: diatoms cell density, PF: phytoflagellates cell density, Df: Rhizosolenia flagillissima f. flagillissima, Ns: Nitzschia sp./small size, Sc: Skeletonema costatum-Is, Gs: Gymnodium sp./small size

모두와 강한 양의 관계를 나타내었다 (Table 2. lower, Fig. 12B).

주성분 분석 결과는 표층이 $Z = 7.320Z_1 + 3.784Z_2 + 1.626Z_3$ (AP = 79.6%), CML은 $Z = 6.421Z_1 + 2.568Z_2 + 1.891Z_3$ (AP = 77.7%)로 모두 제3 주성분까지 누적 기여율이 약 80% 수준의 좋은 종합적 특성이 도출되었다 (Table 3, Yoon et al. 2020).

인자 부하량에서 표층 제1 주성분은 식물플랑크톤 현존량, 규조류와 우점 규조, *Rh. flagilissima* f. *flagilissima* (Df), *S. costatum*-ls (Sc), *Nitzschia* sp./small size (Ns)의 세포 밀도 및 출현 종수에 강한 양의 관계를 보였고, 약하지만 용존산소 포화도와 음의 관계를 보이는 것에서 광합성 활성의 약한 식물플랑크톤 출현 특성을 나타내는 지표로 해석되었다. 제2 주성분은 다양도 지수, 엽록소 *a* 농도, 식물성 편모조류 및 우점 와편모조 *Gymnodinium* sp./small size 세포 밀도에 강한 양의 관계를 보였고, 우점도 지수와 수온에 강한 음의 관계를, 그리고 염분과 약한 음의 관계를 보이는 것에서 연안 및 혼합수의 특성을 나타내는 지표로 해

석되었다 (Fig. 12A). CML의 제1 주성분은 표층과 같이 식물플랑크톤 현존량, 규조류와 우점 규조, *Rh. flagilissima* f. *flagilissima* (Df), *Nitzschia* sp./small size (Ns)의 밀도에 더해 출현 종수, 식물성 편모조류 밀도, 다양도 지수에 강한 양의 관계를 보이며, 약하지만 엽록소 *a* 농도, 염분, 시그마 t 에 음의 관계를 보이는 것에서 식물플랑크톤 군집의 출현 특성을 나타내는 지표로 해석되었다. 제2 주성분은 용존산소 포화도 및 수온에 강한 양의 관계를 보였고, 시그마 t 및 염분에 강한 음의 관계를 보이는 것에서, 상대적으로 고온이면서 광합성 활성을 나타내는 지표로 해석되었다 (Fig. 12B). 즉, 가을 남해 서부 해역의 표층 및 CML의 해양환경 특성은 규조류를 포함한 식물플랑크톤 현존량 및 수괴 확산에 따라 결정되고 있음을 나타내어, 이들 수괴 변화에 따라 생물생산의 시·공간적 분포가 매우 다르게 나타날 수 있음을 암시하였다. 그리고 표층과 CML의 이러한 환경 특성은 각 측정 인자 사이의 기하학적 관계에서도 상관행렬에서 해석한 내용을 재차 확인할 수 있었다.

주성분 분석의 득점에 의한 해역 구분은 표층이 제1 주성분을 기준으로 규조류 현존량은 높지만, 광합성 활성도가 낮은 연안수 및 쓰시마난류의 Stn. 6을 포함하는 I해역과 규조류 현존량은 낮았지만, 용존산소 포화도에 의해 상대적으로 광합성 활성이 높은 기타의 II해역으로 구분되었고, II해역은 제2 주성분을 기준으로 재차 식물성 편모조류 및 엽록소 농도가 높은 혼합수역인 남해 중앙부의 II-1해역과 상대적 고온, 고염의 특성을 보이는 소리도 남부 및 제주 연안해역인 II-2해역으로 구분되었다 (Fig. 11C). CML은 제1 주성분을 기준으로 식물플랑크톤 현존량이 높은 연안수의 I해역과 이에 상반되는 특성인 II해역으로 구분된다. II해역은 제2 주성분을 기준으로 상대적으로 고온이면서

Table 3. Eigen value, proportion, and accumulative proportions by principal component analysis (PCA) for surface (left) and CML (right)

Principal component	Surface			Chlorophyll maximum layers (CML)		
	EV	P (%)	AP (%)	EV	P (%)	AP (%)
1 st PC	7.320	45.8	45.8	6.421	45.9	45.9
2 nd PC	3.784	23.6	69.4	2.568	18.3	64.2
3 rd PC	1.626	10.2	79.6	1.891	13.5	77.7

PC: principal component, EV: eigen value, P: proportion, AP: accumulative proportion

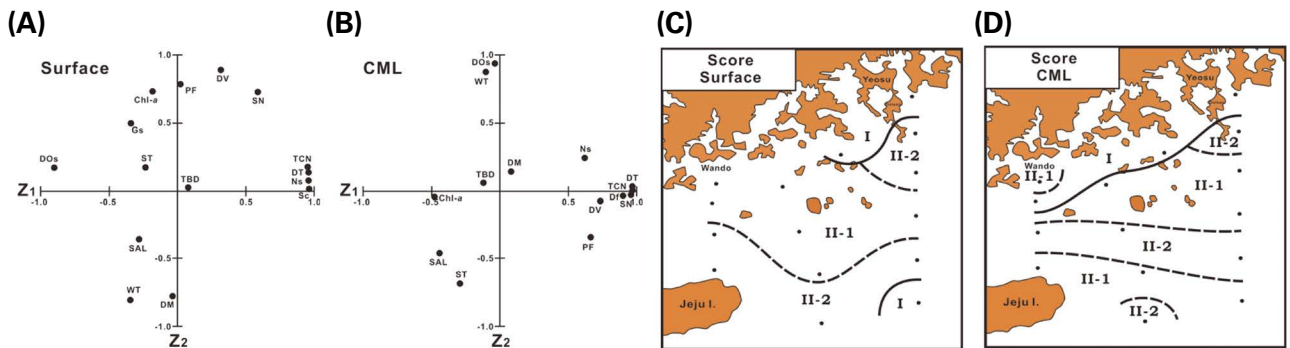


Fig. 12. Distribution of loading factors (A, B) and divisions of the sea area with scores (C, D) by principal component analysis (PCA) at the surface (A, C) and CML (B, D) (See Table 2 for abbreviations in figures).

광합성 활성이 높은 남해 연안에 인접한 해역 및 제주 동부의 II-1과 남해 중앙부 아래 부분을 동서로 횡단하는 띠 모양의 해역 및 상대적 깊은 수심을 나타내는 Stn. 7의 II-2 해역으로 구분되었다(Fig. 11C, D). 이러한 결과는 단순한 T-S diagram에 의한 수괴 분석 결과보다(Fig. 4) 다양한 해양환경 정보를 제공할 수 있다.

이러한 결과로부터 가을 한국 남해 서부는 봄과는 달리 저염의 연안수 영향이 크게 확장되었으며(Yang 1994), 연안수에 포함된 높은 부유물이 쓰시마난류에 의해 혼합을 받으면서 남해의 광범위한 해역의 해양환경에 크게 영향을 미치고 있었다. 그리고 여러 수괴 출현으로 식물플랑크톤 현존량은 연안수 및 혼합수에서 높고, 높은 탁도를 보인 일부 혼합수 및 쓰시마난류에서 낮았지만, 높은 부유물 영향으로 식물플랑크톤 군집의 활성 등은 매우 낮은 것으로 추정되었다.

적 요

가을 한국 남해 서부 해역의 수괴분석 및 식물플랑크톤 군집의 공간분포 특성을 이해하기 위해 2021년 9월 15개 정점의 표층과 엽록소 *a* 최댓층(CML)을 대상으로 조사하였다. 결과, 수괴는 고온, 저염의 연안수(CW), 고온, 고염의 쓰시마난류(TWC) 및 이 두 수괴의 혼합특성을 보이는 혼합수(MW)로 구분되었다. 용존산소 포화도는 표층에서는 95% 이상을 보이지만, CML 일부 해역은 낮은 불포화 상태를 보였고, 탁도는 표층과 저층 모두에서 농도가 높았다. 엽록소 *a* 농도는 표층이 $0.90 \pm 0.43 \mu\text{g L}^{-1}$ 변동 폭으로 연안수에서 $1.1 \mu\text{g L}^{-1}$ 이상, 혼합수에서 $1.0 \mu\text{g L}^{-1}$ 전후, 그리고 쓰시마난류에서 $0.5 \mu\text{g L}^{-1}$ 이하를 나타내었다. CML은 $1.64 \pm 0.54 \mu\text{g L}^{-1}$ 변동 폭으로 표층보다 약 2배 높았다. 식물플랑크톤 종 조성은 31속 57종으로 규조류가 57.8%, 와편모조류가 35.1%, 규질편모조류 5.3%, 그리고 은편모조류가 1.8%로 단조로웠다. 현존량은 표층이 $4.6 \pm 7.6 \text{ cells mL}^{-1}$ 변동 폭으로 연안에서 30 cells mL^{-1} 이상, 혼합수에서 $2 \sim 5 \text{ cells mL}^{-1}$, 그리고 쓰시마난류에서 2 cells mL^{-1} 이하를 나타내었다. CML은 $5.7 \pm 8.4 \text{ cells mL}^{-1}$ 변동 폭으로 표층보다 다소 높았다. 5% 이상 우점종을 보이는 우점종은 표층에서 *Rhizosolenia flagilissima* f. *flagilissima*, *Skeletonema costatum*-ls, *Nitzschia* sp./small size가 각 8.4%, 6.1%, 5.2% 순이었으며, CML은 *Rh. flagilissima* f. *flagilissima*가

12.0%의 우점율을 나타내었으나, 낮은 현존량으로 우점종에 대한 의미 부여가 어려웠다. 다양도 지수는 표층이 2.36 ± 0.40 변동 폭으로 쓰시마난류에서 높고, 혼합수에서 낮았고, CML은 2.29 ± 0.52 변동 폭으로 표층보다 다소 낮았다. 우점도 지수는 표층이 0.50 ± 0.15 변동 폭으로 혼합수에서 0.5 이상, 쓰시마난류에서 0.5 이하로 다양도와 다른 특성을 보였다. 상관분석 및 주성분 분석 결과는 식물플랑크톤 현존량은 연안수 및 혼합수에서 높고, 높은 탁도를 보인 일부 혼합수 및 쓰시마난류에서 낮은 것에서, 각 수괴의 확장 및 혼합 정도에 따라 식물플랑크톤 군집의 출현 및 분포에 커다란 영향을 미치는 것으로 판단되었다.

REFERENCES

- Abdalla RR, FA Zaghloul and NR Hussein. 1995. A statistical modelling of phytoplankton eutrophication in the Eastern Harbour, Alexandria, Egypt. Bull. Nat. Inst. Oceanogr. Fish. 21:125-146.
- Baldry K, PG Strutton, NA Hill and PW Boyd. 2020. Subsurface chlorophyll-*a* maxima in the Southern Ocean. Front. Mar. Sci. 7:671.
- Behrenfeld MJ, DA Siegel, RT O'Malley and S Maritorea. 2009. Global ocean phytoplankton. Am. Met. Soc. 90:S68-S73.
- Cho KD and JH Yoon. 1990. In summer, the origin of Tsushima Warm Current water in western channel of the Korea Strait 1. On the water in surface layer. Bull. Korean Fish. Tech. Soc. 26:184-191.
- Cupp EE. 1943. Marine plankton diatoms of the west coast of north America. Bull. Scripps Inst. Oceanogr. Univ. California 5:1-237.
- Danovaro R, SF Umani and A Pusceddu. 2009. Climate change and the potential spreading of marine mucilage and microbial pathogens in the Mediterranean Sea. PLoS One 4:e7006.
- Deniz N, S Taş and T Koray. 2006. New records of the *Dictyocha antarctica* Lohmann, *Dictyocha crux* Ehrenberg and *Nitzschia rectilonga* Takano species from the Sea of Marmara. Turk. J. Bot. 30:213-216.
- Fukudome KI, JH Yoon, A Ostrovskii, T Takikawa and JS 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 S, Y Feng, L Wang, L 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.
- Horner RA. 2002. *A Taxonomic Guide to Some Common Phytoplankton*. Biopress Limited, Dorset Press. Dorchester, UK.
- Howard AG, SDW Comber, D Kifle, EE Antai and DA Purdie. 1995. Arsenic speciation and seasonal changes in nutrient availability and micro-plankton abundance in Southampton Water, UK. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 40:435–450.
- 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.
- Ismael GL and EMM Rocío. 2013. New data on the distribution of *Torodinium robustum* and *T. teredo* (Dinophyceae: Gymnodiniales) in the Gulf of California. *Check List* 9:809–812.
- Jaanus A, K Töming, S Hällfors, K Kaljurand and I Lips. 2009. Potential phytoplankton indicator species for monitoring Baltic coastal waters in the summer period. pp. 157–168. In: *Eutrophication in Coastal Ecosystems*. Springer. Dordrecht, Netherlands.
- 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.
- Kent ML, JNC Whyte and C LaTrace. 1995. Gill lesion and mortality in seawater pen-reared Atlantic salmon *Salmo salar* associated with a dense bloom of *Skeletonema coastatum* and *Thalassiosira* species. *Dis. Aquat. Org.* 22:77–81.
- Kim HJ and SS Yug. 1983. Inversion phenomena of temperature in the southern sea of Korea. *Bull. Korean Fish. Soc.* 16:111–116.
- 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 Geumgang 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 JI, JY Kim, YK Choi, HJ Oh and EK Chu. 2005. Distribution of the anchovy eggs associated with coastal frontal structure in southern coastal waters of Korea. *Korean J. Ichthyol.* 17:205–216.
- Kim SH. 2020. Characteristics of water temperature inversion observed in a region west of Jeju Island in April 2015. *Ocean Polar Res.* 42:97–113.
- 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.
- 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.
- Lim DB. 1976. The movements of the waters off the south coast of Korea. *J. Oceanol. Soc. Korea* 11:77–88.
- 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.
- Lorrain A, YM Paulet, L Chauvaud, N Savoye, E Nezan and L Guerin. 2000. Growth anomalies in *Pecten maximus* from coastal waters (Bay of Brest, France): relationship with diatom blooms. *J. Mar. Biol. Assoc. UK* 80:667–673.
- Lotocka M. 2006. The first observed bloom of the diatom *Dactyliosolen fragilissimus* (Bergson) Hasle 1996 in the Gulf of Gdańsk. *Oceanologia* 48:447–452.
- MacKenzie L, I Sims, V Beuzenberg and P Gillespie. 2002. Mass accumulation of mucilage caused by dinoflagellate polysaccharide exudates in Tasman Bay, New Zealand. *Harmful Algae* 1:69–83.
- McNaughton SJ. 1968. Structure and function in California grassland. *Ecol.* 49:962–972.
- Miralto A, G Barone, G Romano, SA Poulet, A Ianora, GL Russo, I Buttino, G Mazzarella, M Laabir, M Cabrini and MG Giacobbe. 1999. The insidious effect of diatoms on copepod reproduction. *Nature* 402:173–176.
- MOF (Ministry of Oceans and Fisheries) and MABIK (Marine Biodiversity Institute of Korea). 2021. National List of Marine Species V. Marine Protists. MABIK. Seocheon, Korea.
- Omura T, M Iwataki, VM Borja, H Takayama and Y Fukuyo. 2012. *Marine Phytoplankton of the Western Pacific*. Kouseisha Kouseikaku. Tokyo.
- Park JH, HY Soh and YH Yoon. 2021. A characteristics of water masses and spatial distributions of phytoplankton commu-

- nity in the South Sea of Korea in spring 2021. J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy 24:149–160.
- Parsons TR, M Takahashi and B Hargrave. 1984. Biological Oceanographic Processes (3rd eds). Pergamon Press. Oxford.
- Philips EJ, S Badylak, MC Christman and MA Lasi. 2010. Climatic trends and temporal patterns of phytoplankton composition, abundance, and succession in the Indian River Lagoon, Florida, USA. Estuar. Coasts 33:498–512.
- Price JF, RA Weller and R Pinkel. 1986. Diurnal cycling: Observations and models of the upper ocean response to diurnal heating, cooling, and wind mixing. J. Geophys. Res. 91:8411–8427.
- Ryther JH. 1969. Photosynthesis and fish production in the sea. Science 166:72–76.
- Shannon CE and W Weaver. 1963. The Mathematical Theory of Communication. Univ. Illinois Press. Urbana, IL.
- Shi W and M Wang. 2010. Characterization of global ocean turbidity from Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer ocean color observations. J. Geophys. Res. 115:C11022.
- 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.
- Yamasaki Y, Y Ohmichi, T Shikata, M Hirose, Y Shimasaki, Y Oshima and T Honjo. 2011. Species-specific alleopathic effects of the diatom *Skeletonema costatum*. Thalassas 27:21–32.
- Yang HS, SS Kim and G Kim. 1995. Spatio-temporal distribution of nutrients in the surface waters of Deukryang Bay 1. Seasonal variation of nutrients and limiting factors for primary production. J. Korean Fish. Soc. 28:475–488.
- Yang SK. 1994. variations of the sea surface temperature distribution and the shelf fronts in the Cheju Strait and the Korea Strait. J. Korean Environ. Sci. Soc. 3:111–128.
- 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. 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, JH Park, HJ Lee and HY Soh. 2020. 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. Korean J. Environ. Biol. 38:355–370.
- Yoon YH, JS Park and BS Kim. 2019. Spatial distributions of phytoplankton community in the coastal waters of South Sea, Korea during the early summer of 2018. Korean J. Environ. Biol. 37:164–176.
- 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 10:155–166.