

## 독도 연안 식물플랑크톤의 계절적 분포 특성과 환경요인: 2018년과 2019년 비교

이민지, 김윤배<sup>1</sup>, 강정훈, 박찬홍<sup>2</sup>, 백승호\*

한국해양과학기술원 위해성분석연구센터, <sup>1</sup>한국해양과학기술원 울릉도·독도해양연구기지,

<sup>2</sup>한국해양과학기술원 동해연구소

## Seasonal distribution of phytoplankton and environmental factors in the offshore waters of Dokdo: Comparison between 2018 and 2019

Minji Lee, Yun-Bae Kim<sup>1</sup>, Jung Hoon Kang, Chan Hong Park<sup>2</sup> and Seung Ho Baek\*

Ecological Risk Research Divisions, KIOST, Geoje 53201, Republic of Korea

<sup>1</sup>Ulleungdo·Dokdo Ocean Science Station, KIOST, Ulleungdo 40205, Republic of Korea

<sup>2</sup>East Sea Research Institute, KIOST, Uljin 36315, Republic of Korea

### \*Corresponding author

Seung Ho Baek  
Tel. 055-639-8513  
E-mail. baeksh@kiost.ac.kr

Received: 7 January 2020

Revised: 7 February 2020

Revision accepted: 10 February 2020

**Abstract:** To assess the characteristics of phytoplankton community structures related to environmental factors, seasonal surveys were conducted in the vicinity of Dokdo. In 2019, phytoplankton of four phyla and 69 species were observed. During winter, unidentified nanoflagellates dominated, with an average of  $3.19 \times 10^4$  cells  $L^{-1}$ . In spring, unidentified nanoflagellates occupied about 50% of the composition and a variety of dinoflagellates appeared. The summer phytoplankton population showed very low abundance. In autumn, various species of *Chaetoceros* appeared, along with diatoms, such as *Bacteriastrum* spp., *Guinardia striata*, and *Pseudo-nitzschia* spp. In addition, tropical species *Amphisolenia* sp. and *Ornithocercus* sp. were observed in both 2018 and 2019. The diversity was high in the summer of 2018 and the winter of 2019 and the characteristics of each index varied. Cluster analysis was divided into four groups according to species and population characteristics regardless of the season. The stratification of spring was particularly weak. In the autumn of 2018, the water mass was stabilized in the same way as in the summer, which is considered a suitable condition for phytoplankton growth. However, in 2019, the water masses were mixed, resulting in a low population. In a phytoplankton comparison, the dominant group showed seasonal differences, except for summer when the population was low, and the difference was most pronounced in autumn. Therefore, the waters surrounding Dokdo have different environmental and ecological characteristics from the East Sea, but the seasonal characteristics of each year are considered to be different depending on the topography, various currents, the island effect, and other factors.

**Keywords:** East Sea, Dokdo, seasonal phytoplankton composition, environmental factors

## 서론

식물플랑크톤은 해양의 일차생산자로 먹이피라미드의 기반을 구성한다. 이러한 식물플랑크톤은 수온, 염분, 영양염, 광량, 광주기, 해류 등 무생물학적 환경요인과 함께 종간 경쟁, 박테리아, 상위영양단계 생물의 포식 등과 같은 생물학적 요인에 의하여 크게 영향을 받는다(Thompson *et al.* 2008; Guinder *et al.* 2013). 특히, 식물플랑크톤의 생물량과 군집조성은 계절 및 공간에 따라 다양하게 변화하며, 환경인자를 추적함으로써 그 지역의 식물플랑크톤 증식 양상을 가늠할 수 있다. 또한 식물플랑크톤의 생물량, 군집구조, 종수, 다양성을 조사하는 것은 해양생태계를 이해하고, 먹이 연쇄 및 구조와 기능을 파악하는 데 중요한 지표가 될 수 있다. 결과적으로 해역의 해양생태계 고유 가치와 기능을 효과적으로 평가하기 위해서는 하위 단계 생태계의 중요한 구성요소인 식물플랑크톤의 군집조성 및 계절적인 분포특성을 잘 반영하는 연구가 필요하다.

본 연구해역인 독도가 위치한 동해 울릉분지는 북쪽에서 내려오는 북한한류수와 남쪽에서 올라오는 동한난류수, 울릉도 독도 섬주변 연안용승, 울릉난수성 소용돌이 등이 복잡하게 영향을 미치므로, 각 해류 거동은 상대적인 세력에 따라 부유생물의 거동이 시시각각으로 변화할 수 있다(Na *et al.* 1991; Rho *et al.* 2010). 또한, 동한난류 본류인 쿠로시오와 대마난류는 동중국해 및 우리나라 남해안의 열에너지와 영양염류를 동해역으로 운송하는 중요한 역할을 한다(Lie and Cho 1994). 이러한 복잡한 해류의 영향으로 중장기적인 기후변화의 양상을 거시적으로 평가할 수 있는 최적의 해역조건을 갖추고 있을 뿐만 아니라 단기적으로도 다양한 해양환경 및 수산생물의 변화 양상을 효과적으로 파악할 수 있는 중요한 지리적 위치를 지니고 있다.

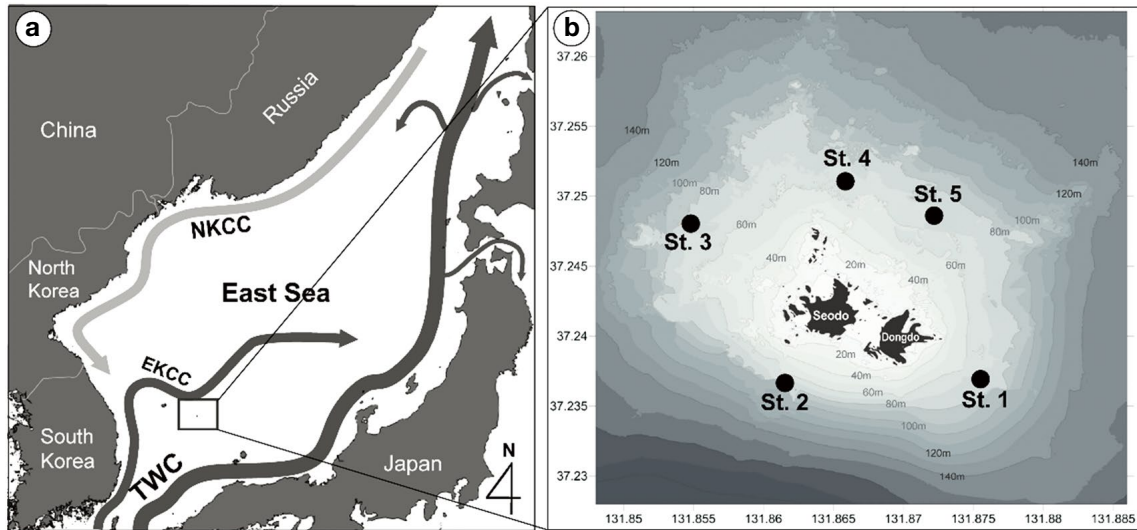
독도 연안 해역은 울릉분지에 위치하며, 비교적 외양성 해양환경의 특징을 지녔고, 지형학적으로 동해와는 다른 특징을 가진 연구해역이다. 특히 지리적, 해양학적 특성상 기후 및 해황의 영향을 시시각각으로 받아 접근이 용이하지 않으며, 입도 허가가 필요한 지역이기 때문에 중장기적인 모니터링 연구에 한계를 가진다. 독도를 중심으로 한 해양 연구는 주로 사회학적인 중요성과 지질학적 관심으로 대부분 독도의 형성과 관련한 암석학 및 지질학적 특성에 초점이 맞춰져 있었다(Kim and Lee 1983; Won and Lee 1984). 울릉도, 독도를 포함하는 울릉분지는 한국해양과학기술원을 주축으로 해양 물리, 화학, 생물 연구가 체계적

으로 수행되어 왔다(KORDI 2000; KIOST 2017). 구체적으로는 울릉분지의 물리특성 및 식물플랑크톤 조사(Noh *et al.* 2006; Rho *et al.* 2010), 울릉도 독도의 식물플랑크톤 및 광합성 색소 조사(Jung *et al.* 2000; Jung *et al.* 2001; Kim and Shin 2007; Baek and Kim 2018) 등이 수행되었지만 대부분 단편 조사에 그쳐, 독도를 중심으로 한 주기적인 연구는 제한적이다.

따라서, 본 연구는 독도 연안 해역의 계절 및 수층별 식물플랑크톤 군집구조 특성을 파악하고 환경인자와의 관계를 파악하였다. 특히, 2019년 조사결과를 중심으로, Lee *et al.* (2019)의 2018년 연구결과와 비교하여, 해양학적 관점에서 식물플랑크톤의 계절별 분포 특성을 파악하였다. 본 결과는 독도 연안 해역의 해양 부유생물 생태학적 자료 축적 및 독도의 지속 가능한 이용계획 수립에 기여하고자 한다.

## 재료 및 방법

독도는 울릉도에서는 87.4 km, 포항을 기점으로 약 220 km 거리의 우리나라 최동단에 위치하여 있으며, 본 연구는 동도와 서도를 포함한 북위 37°14.1'~37°15.1', 동경 131°51.2'~131°52.5' 범위의 독도 연안 해역 5개의 정점에서 수행되었다(Fig. 1). 한국해양과학기술원 R/V(장목호, 이어도호)을 이용하여 2019년 총 4회에 걸쳐 계절 조사를 수행하였고(2019년 2월 27일, 2019년 6월 3일, 2019년 8월 31일, 2019년 10월 23일), 특히 Lee *et al.* (2019)에 보고된 2018년 독도 4계절 자료를 이용하여 비교분석을 수행하였다. 조사 기간 동안 표층, 중층, 저층의 수온과 염분 측정은 연구선에 장착된 CTD (SBE911plus, Sea-Bird Electronics, Inc., Washington, USA)를 이용하였다. 표층수는 버킷으로 채수하였고, 중층과 저층수(해저면으로부터 3~5 m 상부층)는 Rosette Multi-sampler에 장착된 10 L PVC Niskin sampler (General Oceanics, Miami, FL, USA)로 채수하였다. Phytoplankton net (Hand type; Mouth area 30 cm×L90 cm; Mesh size 20 µm)을 이용하여 표층 3 m를 수직으로 예인하여 표층 주변의 식물플랑크톤 정성분석용 샘플을 채집하였다. 식물플랑크톤 현존량 분석을 위해 각 수층 별 해수 500 mL을 Lugol's solution으로 최종농도 5%가 되게 고정 후, 실험실에서 50 mL로 농축시켰다. 농축된 시료는 Sedgewick-Rafter counting chamber를 이용하여 광학현



**Fig. 1.** Map of the study area schematically showing the main ocean currents (a); the northward flowing East Korea Warm Current (EKWC), the southward flowing North Korea Cold Current (NKCC), and the Tsushima Warm Current (TWC). Locations of the sampling stations in the coastal area of Dokdo (b).

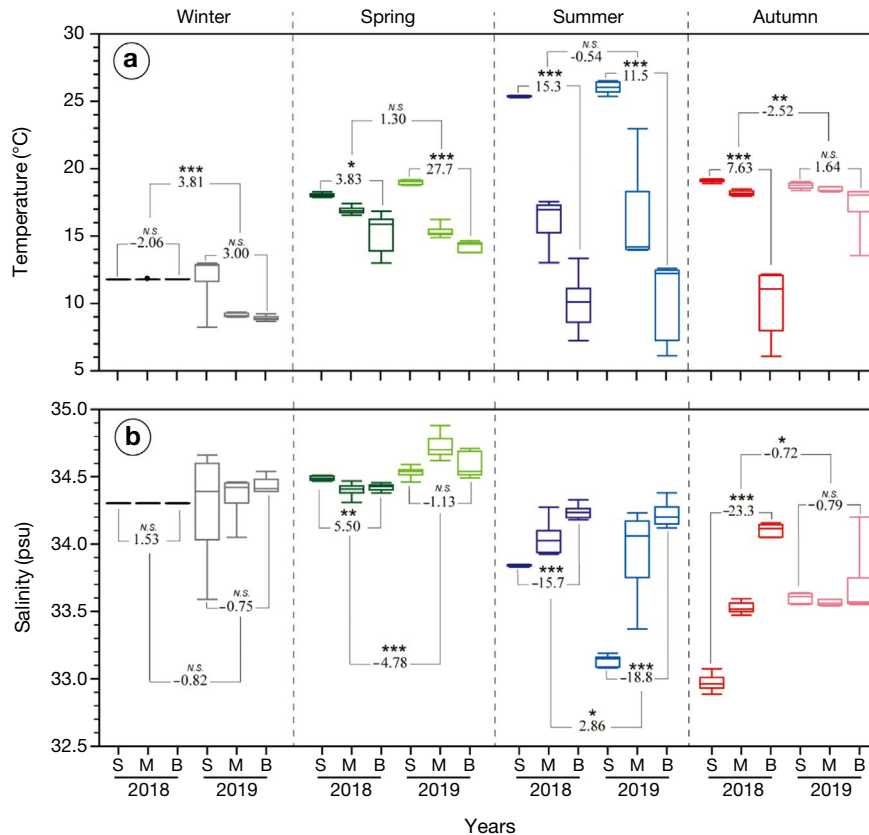
미경 (Zeiss Axioplan 2; Carl Zeiss, Jena, Germany) 하에서 200~400배 배율로 동정 및 개수하였다. 광학현미경상으로 동정이 어려운 종은 속 수준에서 동정하였으며, 10 $\mu$ m 이하의 nano-flagellate는 미동정 그룹으로 분류하였다. PRIMER version 5를 이용하여 종수 (Species number; S), 풍부도 (Richness; d), 균등도 (Evenness; J'), 다양도 지수 (Diversity index, H')를 분석하였다 (Shannon and Weaver 1949). 동일 프로그램을 이용하여 Bray-Curtis 유사도 지수 (Similarity index)를 산출하였으며, 이 결과를 기반으로 집괴 (Cluster) 분석과 다차원 척도분석 (MDS; Multi Dimensional Scaling)을 실시하였다. SPSS version 17.0 (SPSS, Inc., Chicago, IL, USA)의 *t*-검정 (Two independent samples *t*-test)을 이용하여 수온과 염분을 계절별로 표-저층 비교, 연도별 비교를 수행하였고, 식물플랑크톤 조성은 2018년과 2019년의 계절적 차이를 비교하였다.

## 결과 및 토의

### 1. 독도 연안 해역의 수온, 염분 특성

본 조사에서는 2018년과 2019년 동계는 표층과 저층의 수온 차이가 없었고 (Fig. 2;  $p > 0.05$ ), 이는 염분 결과에서도 동일하게 나타났다. 결과적으로 동계 독도 연안 해역은

강한 바람과 얇은 수심의 영향으로 수괴 혼합이 활발하며, 특히 2018년 동계는 명확하게 전수층이 혼합된 것을 확인하였다. 하지만, 동계를 제외한 수온은 2018년과 2019년이 유의한 차이를 보인 것으로 보아 ( $t = 3.81, p < 0.001$ ), 연도별로 해류의 세기에 따라 차이가 발생할 수 있다는 것을 간접적으로 시사한다. 춘계 수온은 뚜렷한 성층이 형성되지 않았으며, 염분은 전수층이 사계절 중 가장 높고 안정적이었다. 독도는 특별한 담수의 유입을 받지 않는 외양 지역이지만, 독도의 지형 특성상 연안 수심이 50~80m 내외로 연안과 유사한 수환경 특성을 보였다 (Baek *et al.* 2018). 일반적으로 동계 온대해역에서는 수괴의 혼합이 활발히 일어나, 유광층 상부에 영양염이 공급되고, 춘계에 일사량이 증가하여 춘계 대증식이 일어난다 (Cushing 1989; Smetacek and Cloern 2008; González-Gil *et al.* 2018). 하지만 본 연구에서는 2018년과 2019년 모두 춘계임에도 불구하고 성층이 크게 발달되지 않았고, 저층수가 비교적 고온-고염인 특징이 관찰되었다 (Fig. 2). 얇은 수심의 영향으로 뚜렷한 냉수대가 관찰되지 않아, 동해에서 일반적으로 일어나는 춘계 대증식의 특징을 보이지 않은 것으로 사료된다. Lee *et al.* (2010)의 연구에서는 독도 연안 해역에서 춘계에 성층이 형성되고 차가운 심층수의 영향을 받아 춘계의 저층 수온이 가장 낮았다. 이는 독도의 지리 및 지형학적 특징으로 인하여, 명확한 계절특성을 가지지 않기 때문으로 판단된



**Fig. 2.** Box plot of temperature (a) and salinity (b) in the coastal area of Dokdo in 2018 and 2019. The median is represented by solid lines. S: surface; M: middle; B: bottom. T-tests were conducted between the surface and bottom, and between 2018 and 2019. The number is the *t*-value, significant at \* $p < 0.05$ , \*\* $p < 0.01$ , \*\*\* $p < 0.005$ , N.S.: not significant.

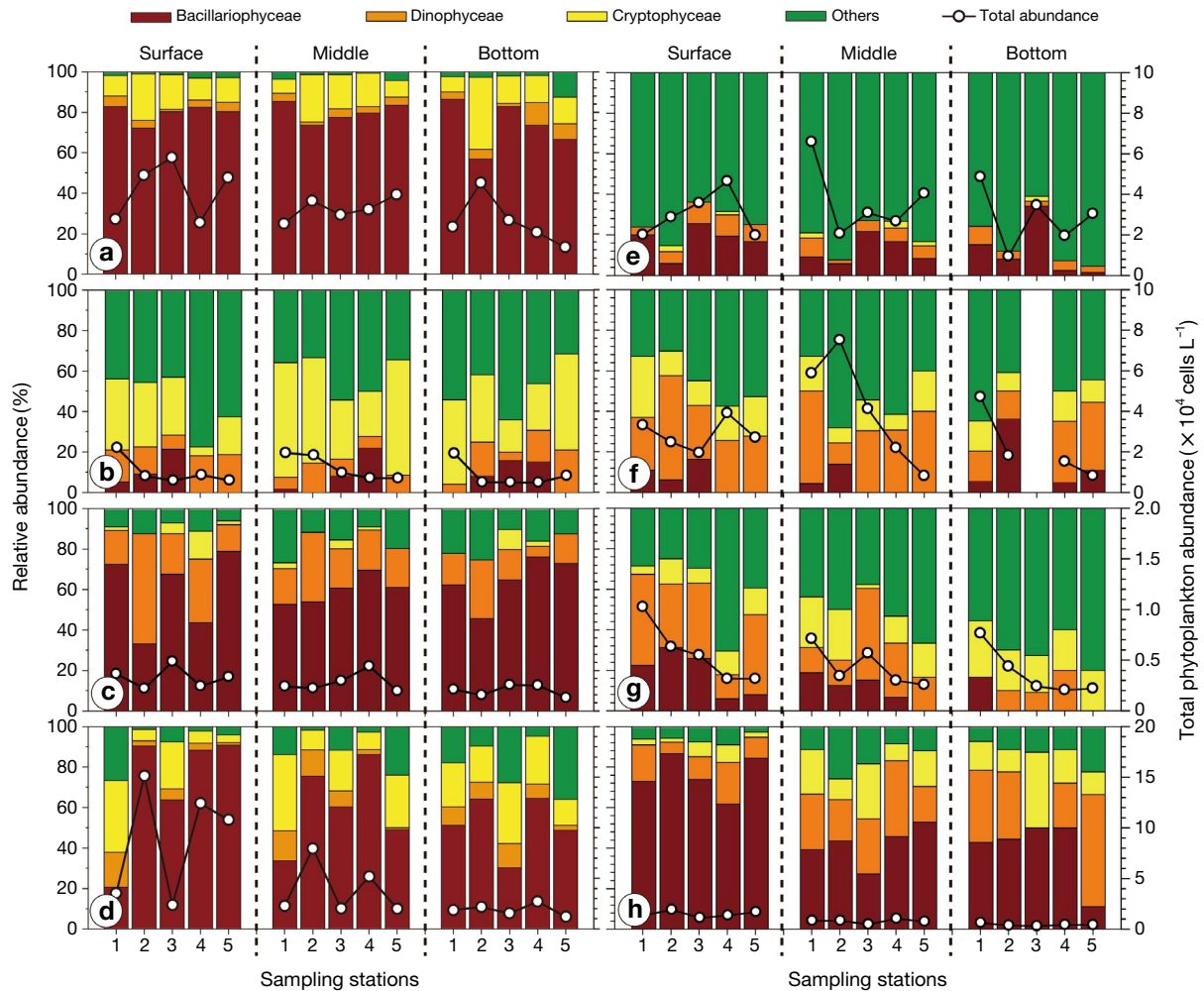
다. 하계의 표층은 두 조사 모두 난류수의 영향을 받아 수온이 높았고, 저층은 하계에 발생하는 냉수대의 간접영향을 받아 가장 낮은 수온을 보인 것으로 추정된다(Suh *et al.* 2001; Kim *et al.* 2010). 염분 수직 분포는 2018년과 2019년 모두 표층의 염분이 다소 낮게 나타났고, 수심이 증가할수록 높아졌다( $p < 0.001$ ). 2018년 추계에도 하계와 유사한 염분 분포 특성을 보였다. 이는 독도 연안 해역이 특별한 담수의 공급이 없는 해역임에도 하계 및 추계에 동중국해 및 남해 연안으로부터 유래한 저염수가 대마난류수에 편승하여 대한해협을 거쳐 독도 인근까지 확산된 이유로 사료된다(Nof *et al.* 2001; Chang *et al.* 2004). 추계에는 2018년과 2019년의 환경 특성이 명확히 다르게 나타났다( $t = -2.52$ ,  $p < 0.01$ ). 표층 수온은 춘계와 유사했고, 2018년 수온과 염분은 하계와 같이 표저층의 유의한 차이를 보였다( $t = 7.63$ ,  $p < 0.005$ ;  $t = -23.3$ ,  $p < 0.001$ ). 그에 반해, 2019년은 유의한 차이를 보이지 않았으며( $p > 0.05$ ), 평균 염분

이 비교적 낮았다. 2018년에 추계에 비해 2019년 추계에는 동계의 특성과 같이 수층이 잘 혼합되었다. 동해의 평균 수온은 지난 30년간 지속적으로 증가하고 있다고 보고되고 있으나(Chae *et al.* 2005), 독도 연안 해역은 수환경 변동이 심한 지역으로 2년의 단기적인 계절자료로는 수온증가 양상은 명확하게 파악할 수 없었다. 결과적으로, 독도 연안 해역은 2018년 추계에는 강한 성층을 형성하는 하계와 유사한 수환경을 갖는 특이점이 있었고, 연도에 따른 증감이나 차이는 명확하지 않았다. 독도 연안의 수환경은 얇은 지형과 다양한 해류로 인한 물리적인 외부영향을 많이 받기 때문에 조사를 수행한 계절에 기인한 차이를 보이는 해역으로 판단된다.

## 2. 2019년 식물플랑크톤 군집특성

동해는 높은 일차생산력에 기반하여 수산자원이 풍부한 해역이며, 그중에서도 주로 춘계에 높은 생산력을 보





**Fig. 3.** Horizontal and vertical changes in total phytoplankton abundance and relative dominant phytoplankton at the class level. a: winter, b: spring, c: summer, d: autumn in 2018 (published by Lee *et al.* 2019), e: winter, f: spring, g: summer, and h: autumn in 2019.

이는 것으로 다수 보고되었다 (Joo *et al.* 2016; Yoo *et al.* 2019). 하지만 독도 연안 해역의 전 계절 전수층 평균 식물플랑크톤 개체수는 2019년 총 4문 69종의 식물플랑크톤이 출현하였으며, 개체수 평균  $1.90 \times 10^4 \text{ cells L}^{-1}$ 로 매우 낮게 나타났다 (Table 1, Fig. 3). 독도 연안 해역은 동해의 전반적인 특징과 달리 얕은 수심과 점효과 등 다양한 영향을 받기 때문에 동해의 일반적인 특징과 다른 식물플랑크톤 발생 특성을 보이는 것으로 사료된다 (Baek *et al.* 2018). 2018년 독도 연안 해역의 식물플랑크톤 종조성에 관한 토의는 Lee *et al.* (2019)에 이루어졌으며, 본 연구에서는 해당 자료를 2019년 자료와 함께 비교하여 제시하였다 (Fig. 3). 2019년 독도 연안 해역 식물플랑크톤 조사 결과 동계 전체 평균 식물플랑크톤 개체수는  $3.19 \times 10^4 \text{ cells L}^{-1}$ 였으며,

표층 식물플랑크톤 개체수는  $3.02 \times 10^4 \text{ cells L}^{-1}$ , 중층 평균  $3.69 \times 10^4 \text{ cells L}^{-1}$ , 저층 평균  $2.85 \times 10^4 \text{ cells L}^{-1}$ 로 나타났다. 2018년 결과와 비교하였을 때 총 개체수는 유사하나 두 연도의 종조성 차이는 동계에 명확하게 나타났다. 2018년에 특이적으로 동계에 규조류가 강하게 나타난 것과 달리, 2019년에는 다양한 미동정 미소편모류 (nano-flagellate)가 78.8%의 비율로 출현하였다. 특히, 미동정 미소편모류 현미경 검정으로 분류 및 동정이 극히 어렵다. Choi *et al.* (2009)과 Huang *et al.* (2012)의 보고에 의하면, 동해와 같은 빈영양수괴에서는 *Prochlorococcus*와 *Synechococcus* 같은 극미소플랑크톤이 일차생산에 높게 기여한다. 또한, Shim *et al.* (2008)에 따르면 *Prochlorococcus*는 하계를 제외한 저수온기에 높은 개체수를 보였으며, *Synechococcus*는 이와

상반되게 하계에 높은 개체수를 보였다. 하지만 이러한 picocyanobacterial diversity는 각 종의 Clade에 따라 생리 특성이 크게 다르다는 연구가 보고되고 있어(Shimada *et al.* 1999; Li and Harrison 2001; Choi *et al.* 2013), 추후 분자 생물학적인 분석이 병행되면 보다 효과적으로 독도 주변 부유생물 생태계를 이해하는 데 도움이 될 것이다. 2019년 춘계 전 수층 평균 식물플랑크톤 개체수는  $3.12 \times 10^4$  cells L<sup>-1</sup>이며, 표층 식물플랑크톤 개체수는  $2.87 \times 10^4$  cells L<sup>-1</sup>, 중층 평균  $4.10 \times 10^4$  cells L<sup>-1</sup>, 저층 평균  $2.22 \times 10^4$  cells L<sup>-1</sup>로 나타나, 춘계 대증식을 보이지 않았다. 미동정 편모류가 전체 평균 48.2%의 비율을 차지했으며, 와편모조류가 29.1%를 차지하였다. 특이적으로 *Prorocentrum obtusidens*가 다수 출현하였으며, *Gyrodinium spirale*, *P. triestinum*, *Katodinium* spp. 등의 다양한 와편모조류가 출현하였다(Table 1). 동해에서 이전 보고되었던 *P. dentatum*은 분류정보가 축적된 후 *P. donghaiense*로 명명되어 왔다. *P. donghaiense*는 광온, 광염 종으로 동중국해를 포함한 우리나라해역에서 다수 적조를 일으키며(Xu *et al.* 2010; Lim *et al.* 2018), 동해에서도 본 종의 대증식을 보고하였다(Zang *et al.* 2016). Jeong *et al.* (2017)은 본 종의 빠른 질산염 흡수 능력을 보고하였으며, Yang *et al.* (2016)의 연구에서도 동해 연안부터 질소원이 극히 부족한 외양까지 높은 개체수를 유지하며 이동하는 특성을 보고하였다. 하지만 본 종은 rDNA 서열뿐만 아니라 형태학적으로도 유사한 문제가 있어 일본에서 *P. shikokuense*, 중국에서는 *P. donghaiense*, 한국에서는 *P. dentatum* 등으로 혼재되어 동정되어 왔다. 하지만 최근 Shin *et al.* (2019)의 연구 결과에 따라 이번 동해에서 관찰된 종은 *P. obtusidens*으로 판단하였다. 2019년 하계 전 수층 평균 식물플랑크톤 개체수는  $0.46 \times 10^4$  cells L<sup>-1</sup>로 매우 낮게 관찰되었고, 표층에서  $0.57 \times 10^4$  cells L<sup>-1</sup>, 중층에서  $0.44 \times 10^4$  cells L<sup>-1</sup>, 저층에서  $0.37 \times 10^4$  cells L<sup>-1</sup>로 관찰되었다. 와편모조류와 규조류 비율을 저층으로 갈수록 감소하였고, 미동정 편모류는 저층으로 갈수록 증가하였다. 이는 상기 언급된 바와 같이 *Synechococcus*가 하계에 출현하였을 가능성이 있으나 현미경 검정으로는 파악하기 어려우므로 추가적인 분석이 필요하다. 또한, 2018년 하계는 규조류의 비율이 다소 높아 2019년과 종조성이 크게 달랐고, 개체수는 동일하게 매우 낮았다. 이전의 다른 연구에서도 동해 독도 연안 해역은 하계에 영양염류가 극히 낮게 유지되어 식물플랑크톤의 1차 생산이 낮게 관찰

되는 특이점을 보고하였다(Kim and Shin 2007; Kim and Park 2009). 추계에는 전 수층의 평균 식물플랑크톤 개체수는  $0.89 \times 10^4$  cells L<sup>-1</sup>로 나타났으며, 표층  $1.48 \times 10^4$  cells L<sup>-1</sup>, 중층  $0.78 \times 10^4$  cells L<sup>-1</sup>, 저층  $0.41 \times 10^4$  cells L<sup>-1</sup> 순서로 나타났다. 표층에서 비교적 높은 개체수를 보이며, 수층 간의 차이를 보였다. 식물플랑크톤 종조성의 경우 규조류가 전체 평균 52.5%의 비율을 차지했으며, 다음으로 와편모조류가 22.9%의 비율을 차지하였다. 종조성은 규조류 중에서도 다양한 *Chaetoceros* 종(*Chaetoceros danicus*, *C. lorenzianus*, *C. perpusillus* 등)과 *Bacteriastrum* spp., *Guinardia striata*, *Pseudo-nitzschia* spp. 등이 우점하였다(Table 1). 상기 규조류는 온대해역부터 열대해역까지 빈번히 출현하는 연안성 종으로 남해 연안에서 동계에도 다수 보고되는 종이다(Lee *et al.* 2016; Lee and Baek 2017). 앞서 언급한 바와 같이, 동해 식물플랑크톤은 연안으로부터 동한 난류에 편승하여 울릉도 독도해역으로 유입되는 것으로 알려져 있다(Hyun *et al.* 2009; Yoo and Park 2009; Baek and Kim 2018). 또한 추계 독도 조사의 특이점은 2018년의 추계와 동일하게 열대 지표종인 *Ornithocercus* sp.와 *Amphisolenia* sp.가 관찰된 것이다(Table 1). Lee *et al.* (2019)에서 토의된 바와 같이, 이는 제주도 서부해역에서 관찰되었으며 동해에는 보고가 없는 종으로, 추계 확장된 쓰시마 난류의 영향으로 사료된다. 결과적으로, 2019년 독도 연안 해역은 추계에 높은 생산력을 보인 2018년과 달리, 계절에 따른 차이를 보였지만 전반적으로 생산력이 낮게 나타났다.

### 3. 식물플랑크톤 다양성과 군집특성

동해의 식물플랑크톤 종수는 조사해역, 조사 횟수 등에 따라 차이를 보이며, 계절에 따라 전선의 위치가 크게 변화하고 있고, 한국 남부 및 양자강 회석수의 영향에 따라서 많은 차이를 보인다(Nishimura 1983; Choi *et al.* 2011; Yoon 2016). 본 연구에서도 2018년 독도 연안 해역에서 출현한 식물플랑크톤의 평균 종수는 22.75종, 2019년 평균 23.15종으로 유사하게 나타났다(Table 2). 또한, 평균 식물플랑크톤 출현 종수는 추계에 가장 높았으며, 하계, 동계, 춘계 순으로 나타났다. 동계와 하계 출현 종의 수는 비슷하였고, 개체수가 가장 높았던 2018년 추계에 32종으로 높은 종수를 보였다. 특이적으로 추계임에도 개체수가 매우 낮았던 2019년 추계 또한 35.4종으로 가장 높게 나타나, 추계에 식물플랑크톤 종수가 증가하는 양상을 보

**Table 1.** List of seasonal phytoplankton species and abundance observed in the coastal area of Dokdo in 2019

Species	Winter					Spring					Summer					Autumn				
	St. 1	St. 2	St. 3	St. 4	St. 5	St. 1	St. 2	St. 3	St. 4	St. 5	St. 1	St. 2	St. 3	St. 4	St. 5	St. 1	St. 2	St. 3	St. 4	St. 5
<b>BACILLARIOPHYCEAE</b>																				
<i>Achnanthes</i> spp.						+	+		+							+++	+++			+++
<i>Bacteriastrium</i> spp.						+	+			+						+	+	+		+
<i>Chaetoceros compressus</i>																				
<i>Chaetoceros affinis</i>																				
<i>Chaetoceros denticulatus</i>																				
<i>Chaetoceros danicus</i>						+	+	+	+	+	++					+	++	++	++	++
<i>Chaetoceros debilis</i>																+	+	+	+	++
<i>Chaetoceros decipiens</i>																+	+	+	+	+
<i>Chaetoceros didymus</i>																				+
<i>Chaetoceros gracile</i>																+		+	+	+
<i>Chaetoceros lorenzianus</i>																+++	+++	+++	+	+
<i>Chaetoceros messanensis</i>																+	+	+	+	+
<i>Chaetoceros perpusillus</i>																+		+	+	+++
<i>Chaetoceros socialis</i>																				
<i>Chaetoceros</i> spp.	+++	++	+++	+++	+++						++	++	++	++	+	+	++	++	++	++
<i>Cosinodiscus</i> spp.		++									+									
<i>Corethron</i> spp.																+	+			
<i>Cylindrotheca closterium</i>																++	++			
<i>Dactylosolen phuketensis</i>																++	++	++	+	++
<i>Ditylum brightwellii</i>											+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
<i>Eucampia zodiacus</i>											+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
<i>Guinardia delicatula</i>																++	++	++	++	++
<i>Guinardia striata</i>						+++	+++	+++								++	++	++	++	++
<i>Guinardia flaccida</i>																+	+	+	+	+
<i>Hemiaulus hauckii</i>											+					+	+	+	+	+
<i>Leptocylindrus danicus</i>																+	+	+	+	+
<i>Melosira</i> spp.																				
<i>Navicular</i> spp.			+++	+++							++	++	++	++	+	++	++	++	++	++
<i>Nitzschia</i> spp.											++	++	++	++	+	++	++	++	++	++
<i>Odontella longicirris</i>						+	+	+	+							++	++	++	++	++
<i>Pseudo-nitzschia</i> spp.																++	++	++	++	++
<i>Rhizosolenia setigera</i>											++	++	++	++	+	++	++	++	++	++
<i>Rhizosolenia</i> spp.			+++	+++							++	++	++	++	++	++	++	++	++	++
<i>Stephanodiscus</i> spp.											++	++	++	++	++	++	++	++	++	++
<i>Thalassionema</i>																				
<i>nitzschoides</i>																++				
<i>Thalassionema frauenfeldii</i>																				
<i>Thalassiosira</i> spp.																+	+	+	+	+
Unidentified diatom																++	++	++	++	+

Table 1. Continued

Species	Winter					Spring					Summer					Autumn				
	St. 1	St. 2	St. 3	St. 4	St. 5	St. 1	St. 2	St. 3	St. 4	St. 5	St. 1	St. 2	St. 3	St. 4	St. 5	St. 1	St. 2	St. 3	St. 4	St. 5
<b>DINOPHYCEAE</b>																				
<i>Akashiwo sanguinea</i>							+	+	+									+		
<i>Amphisolenia</i> sp.																	+			
<i>Ceratium furca</i>						+	+	+	+								+			+
<i>Ceratium fusus</i>						+				+										
<i>Ceratium tripos</i>																				
<i>Dinophysis forty</i>																				
<i>Ceratium</i> spp.							++		++	+++										
<i>Dinophysis</i> spp.																				
<i>Gyrodinium spirale</i>						+	++	+	++	++										
<i>Gyrodinium</i> spp.				+++		+	+++	+	+	+										
<i>Gymnodinium</i> spp.				++		++	++	++	++	+++										
<i>Gyrosigma</i> sp.																				
<i>Katodinium glaucum</i>						++	++	+++	+++	++										
<i>Ornithocercus</i> sp.																				
<i>Oxyphysis</i> sp.						+	+++	++	++	++			+							
<i>Prorocentrum obtusidens</i>						+++	++	++	++	++										
<i>Prorocentrum micans</i>						+	+	+	+	+										
<i>Prorocentrum triestinum</i>																				
<i>Prorocentrum pellucidum</i>																				
<i>Prorocentrum subinerme</i>						+	+++	++	++	++										
<i>Prorocentrum steinii</i>																				
<i>Prorocentrum</i> spp.																				
<i>Prorocentrum</i> sp.		++	+++			+++	+++	+++	+++	+++										
<i>Scripsiella trochoidea</i>						++														
Unidentified dinoflagellate	++	++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++										
<b>DICTYOCOPHYCEAE</b>																				
<i>Dictyocha speculum</i>	+++	+++	++	++	+++	+++	+++	+++	+++	+++										
<b>CRYPTOPHYCEAE</b>																				
<i>Cryptomonas</i> spp.		++		++		+++	++	++	+++	+++										
<b>UNIDENTIFIED</b>																				
Unidentified flagellate 1	++++	++++	++++	++++	++++	+++	+++	+++	+++	+++										
Unidentified flagellate 2	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++										
Unidentified flagellate 3	+++	+++	+++	+++	+++	+	+	+	+	+										
Unidentified flagellate 4				+++	+++	+	+	+	+	+										

+ : <100; ++ : <1000; +++ : <10000; ++++ : ≥10000(cells L<sup>-1</sup>)

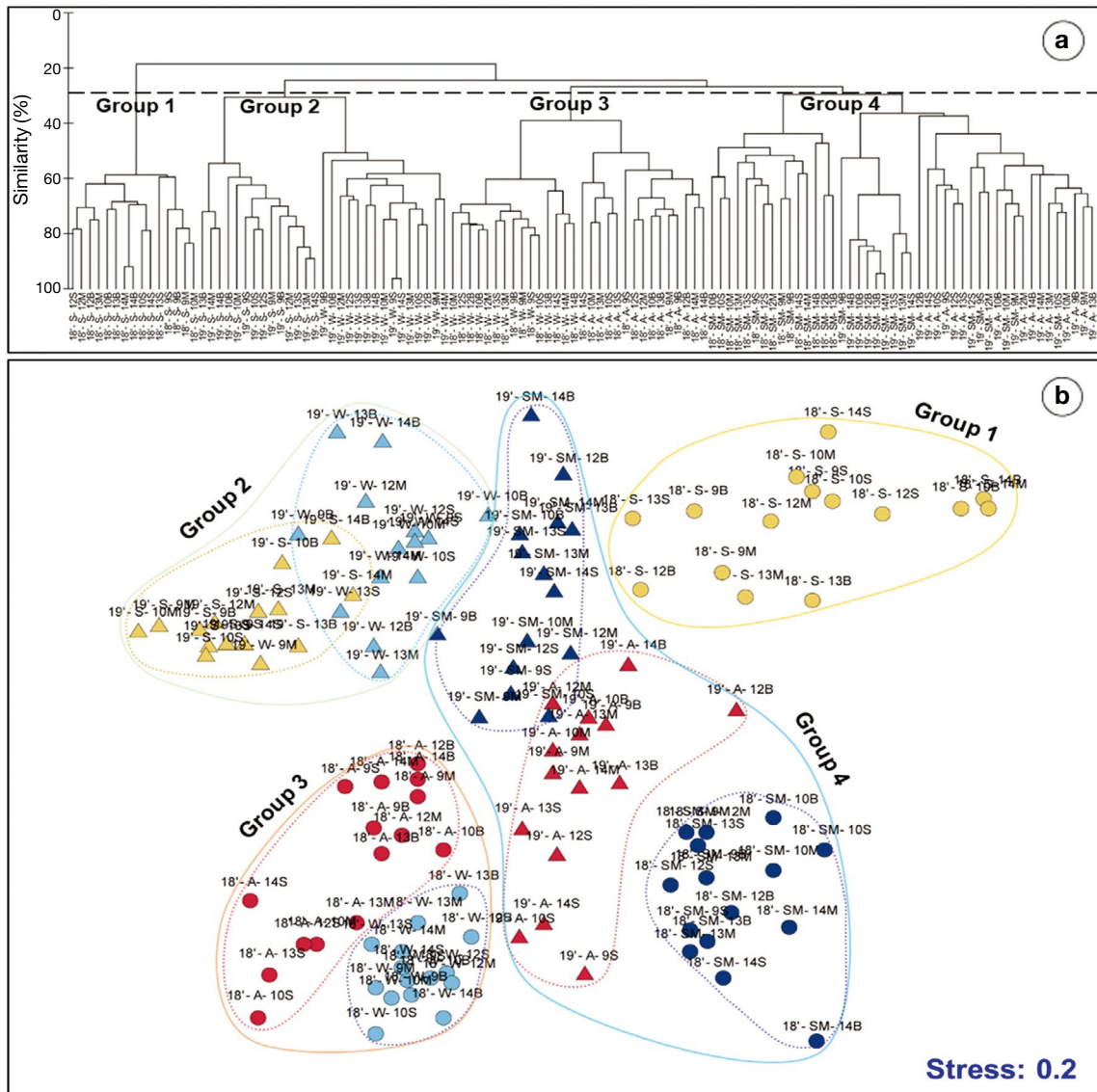


**Table 2.** Estimation of the number of species (S), richness (d), evenness (J'), and diversity (H') index in the coastal area of Dokdo in 2018 and 2019 (The number of species and diversity of 2018 was published by Lee *et al.* 2019)

2018	Stn.	S	d	J'	H'	2019	Stn.	S	d	J'	H'
Winter	St. 1	19	1.76	0.79	2.33	Winter	St. 1	18	1.72	0.40	1.17
	St. 2	23	2.04	0.74	2.32		St. 2	19	1.75	0.58	1.72
	St. 3	23	2.01	0.74	2.32		St. 3	18	1.62	0.52	1.51
	St. 4	23	2.17	0.83	2.61		St. 4	19	1.68	0.60	1.76
	St. 5	23	2.04	0.72	2.27		St. 5	14	1.31	0.47	1.24
	Avg.	22	2.00	0.77	2.37		Avg.	18	1.62	0.52	1.48
Spring	St. 1	10	0.69	0.77	1.78	Spring	St. 1	23	2.11	0.64	1.99
	St. 2	11	0.82	0.73	1.74		St. 2	22	2.08	0.78	2.40
	St. 3	9	0.67	0.81	1.78		St. 3	21	2.02	0.68	2.08
	St. 4	9	0.66	0.82	1.80		St. 4	18	1.61	0.61	1.76
	St. 5	9	0.68	0.67	1.47		St. 5	18	1.67	0.69	1.99
	Avg.	10	0.70	0.76	1.71		Avg.	20	1.90	0.68	2.05
Summer	St. 1	32	3.77	0.89	3.09	Summer	St. 1	22	2.27	0.81	2.52
	St. 2	25	3.11	0.85	2.73		St. 2	19	2.06	0.74	2.19
	St. 3	33	3.76	0.86	3.01		St. 3	19	2.09	0.69	2.04
	St. 4	23	2.81	0.85	2.66		St. 4	19	2.23	0.63	1.87
	St. 5	23	2.70	0.80	2.51		St. 5	17	1.99	0.68	1.93
	Avg.	27	3.23	0.85	2.80		Avg.	19	2.13	0.71	2.11
Autumn	St. 1	36	3.34	0.65	2.32	Autumn	St. 1	41	4.20	0.75	2.77
	St. 2	37	3.02	0.50	1.81		St. 2	34	3.35	0.71	2.52
	St. 3	28	2.68	0.78	2.61		St. 3	37	3.86	0.73	2.65
	St. 4	28	2.30	0.56	1.88		St. 4	35	3.58	0.69	2.46
	St. 5	29	2.42	0.38	1.26		St. 5	30	2.98	0.72	2.46
	Avg.	32	2.75	0.57	1.98		Avg.	35	3.59	0.72	2.57

였다. 은편모조류와 미동정 *nano-flagellate*는 현미경 검경이 불가능한 작은 그룹으로 분류되는 것에 반해, 규조류 *Chaetoceros*속이 다양하게 출현하여 높은 종수를 기록하였다 (Table 1). 풍부도 지수는 종수와 개체수로 군집의 상태를 표시하는 중요한 지수이며, 값이 커질수록 식물플랑크톤 서식환경이 양호하다는 것을 의미한다 (Margalef 1958). 본 결과에서 풍부도 지수는 규조류가 다수 출현한 하계와 추계에 다소 높았으며, 춘계와 동계에 낮게 기록되었다. 군등도는 군집 내 종구성의 균일한 정도를 나타내는 지수로 (Pielou 1975), 본 조사에서는 0.52~0.85의 범위를 보였다. 규조류가 대발생했던 2018년 추계 0.57로 낮았지만, 2019년의 경우 추계가 0.72로 가장 높은 값을 보여 계절 특성보다 대발생의 유무가 큰 영향을 주는 것으로 사료된다. 다양도 지수는 군집의 종 풍부도 정도와 개체수의 상대적인 균형을 보여주는 지수로 군집의 복잡성을 나타낸다

(Margalef 1958). 이러한 종 다양도 지수는 2018년 하계와 2019년 추계에 가장 높았다. 특정 종이 크게 우점하지 않고 다양하게 나타났기 때문에 가장 높은 종 다양성을 보인 것으로 판단된다. 일반적으로 식물플랑크톤의 종다양성 지수는 0.45~2.45의 범위로 보고되었으며, 각 연구마다 계절적 경향의 차이를 보인다. 또한 본 연구에서는 식물플랑크톤의 연간, 계절 간, 정점과 수심 간의 군집 비교를 위하여, 전체 자료를 이용해 Cluster 분석과 MDS 분석을 수행하였다 (Fig. 4). 그 결과 세부적으로는 정점과 수심에 상관없이 각 계절별 8개의 그룹으로 구분되었으며, 30%의 유사도 수준에서는 크게 4가지 그룹으로 구분되었다. 2018년 춘계의 결과로만 분류된 Group 1은 비교적 은편모조류가 가장 많이 출현하였으며, 편모조류가 주를 이루는 그룹이다 (Fig. 3). Group 2는 2019년 동계와 춘계로 개체수는 비교적 높은 편에 속하며, 특별한 우점종 없이 대부분 기



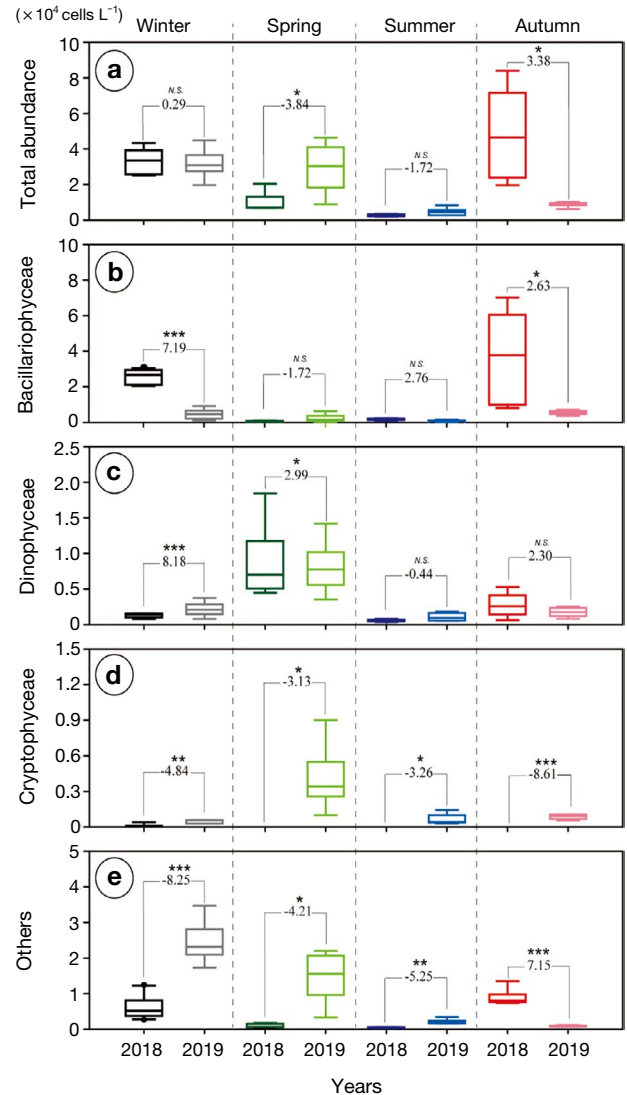
**Fig. 4.** Cluster (a) and MDS (b) analysis of phytoplankton communities at all depths and all stations. The dotted lines indicate a 30% similarity. W: winter, S: spring, Sm: summer, and A: autumn.

타 편모류로 이루어졌다. 2018년 동계와 추계 식물플랑크톤 결과로 분류된 Group 3은 가장 높은 개체수를 보였고, 대부분 규조류(그중에서도 *Chaetoceros* spp.)로 이루어진 그룹이다. 마지막으로 Group 4는 2018년 하계와 2019년 하계, 추계 결과로 구성되었다. 세 계절의 우점 속은 2018년 하계(*Chaetoceros*, *Pseudo-nitzschia*, *Gyrodinium*), 2019년 하계(unidentified flagellate), 추계(*Chaetoceros*, *Guinardia*, *Cryptomonas*)가 차이를 보였지만, 3계절 모두 매우 낮은 개체수를 보였다. 일반적으로 온대해역의 해양환경 및 식물플랑크톤은 계절적 영향을 강하게 받지만(Harvey

1955), 본 연구에서는 식물플랑크톤은 계절적 분포특성이 명확하지 않았다. 하지만 2018년과 2019년 각 4회 조사에서 각 계절별 출현종의 그룹화되었으나, 각 연도별 식물플랑크톤 개체수 및 우점종의 차이를 보여 동일 계절이 동일 그룹을 이루지 않는 특성을 보였다. 결과적으로, 독도 연안 해역의 수환경 특성은 계절의 영향을 강하게 받으나, 식물플랑크톤의 생태지표 및 군집은 각 시기별 생물량과 우점종에 크게 의존되었다. 이와 같은 현상과 유사한 연구는 독도 연안 해역의 식물플랑크톤 변동 특성을 이해하고 기초 자료 축적에 기여할 수 있다.

#### 4. 2018년과 2019년 식물플랑크톤 군집 비교

울릉분지를 포함한 동해에서 다양한 시기에 SCM (Subsurface chlorophyll maximum) 층의 존재가 보고되었다 (Hyun *et al.* 2009; Kim *et al.* 2011; Rho *et al.* 2012). SCM 층은 빈영양해역이나 중위도 지역에서 주로 관찰된다. 수직적 공간에서 SCM 층에 식물플랑크톤이 집적 및 응집되므로 상위단계로의 에너지 전달효율을 높이는 데 중요한 역할을 한다 (Saiz *et al.* 1993; Ignoffo *et al.* 2005). 그러나, 독도 연안 해역에서는 얇은 수심과 해류의 영향으로 SCM 층이 크게 발달하지 않았다. 따라서 수층별 식물플랑크톤 분포특성이 대부분 유사하였으며, 또한 각 정점 간의 차이는 크지 않았다 (Fig. 3). 따라서, 본 연구에서는 계절 및 연간 식물플랑크톤 비교를 위하여 각 정점과 수층을 평균화하여 나타냈다 (Fig. 5). 동계는 2018년과 2019년의 식물플랑크톤 총 개체수가 유사하게 나타났으나 ( $p > 0.05$ ), 식물플랑크톤 조성은 2018년에는 규조류 ( $t = 7.19, p < 0.005$ ), 2019년 편모조류 ( $t = -8.25, p < 0.005$ )가 명확히 높은 값을 보였다. 2018년 동계 규조류가 높은 개체수를 보인 것은 일반적이지 않다. 동해의 규조류 대증식은 대부분 연안으로부터 유입된 생물로 기원되며, 최근 춘계 대증식이 점차 앞당겨지고 있는 영향이 본 연구 결과에서도 일정부분 반영되었을 것으로 사료된다 (Yoo and Park 2009; Baek and Kim 2018). 2019년 동계 관찰된 편모류는 앞서 토의된 바와 같이 동해 저수온기에 다수 출현하는 *Prochlorococcus* 일 가능성이 있으나, 이러한 차이를 명확히 하기 위해서는 추후 연구가 필요하다. 춘계에는 2019년에 유의하게 높은 식물플랑크톤 개체수를 보였다 ( $t = -3.84, p < 0.05$ ). 이 시기 규조류의 비율은 낮았으며, 비교적 와편모조류가 두 계절 모두 유사하게 출현한 특징을 보였다 ( $p > 0.05$ ). 은편모조류와 미동정 편모조류는 2019년 조사에서만 높게 나타났기 때문에 유의한 차이를 유발한 것으로 보인다. 수환경 특징은 동계와 춘계 모두 2계절 동안 유사하였으나, 식물플랑크톤의 종조성이 유의하게 다르게 나타났다. 하지만 물리적 요인만으로는 차이를 밝히기 어렵다. 하계에는 두 계절 모두 차이 없이 극히 낮은 개체수를 보였다 ( $p > 0.05$ ). 와편모조류, 은편모조류, 편모류 등이 2019년 다소 차이를 나타냈으나, 그 개체수가 매우 낮았다. 하계는 현미경분석에서 낮은 개체수를 보였지만, 앞서 언급한 바와 같이 *Prochlorococcus*의 개체수가 빈영양 수층에서 급증하는 경향이 최근 밝혀지고 있기 때문에 (Partensky



**Fig. 5.** Box plot of the total abundance of phytoplankton (a), diatoms (b), dinoflagellates (c), Cryptophyceae (d), and others (e) in the coastal area of Dokdo in 2018 and 2019. The median is represented by solid lines. S: surface, M: middle, B: bottom. T-tests were conducted between 2018 and 2019. The number is the  $t$ -value, significant at  $*p < 0.05$ ,  $**p < 0.01$ ,  $***p < 0.005$ , N.S.: not significant.

*et al.* 1999; Noh *et al.* 2006), 독도 연안 해역의 식물플랑크톤 분포를 정확히 파악하기 위해서는 화학적, 분자생물학적 방법을 이용하여 Nano 이하 크기의 식물플랑크톤의 분포특성을 파악할 필요성이 있다. 추계에는 두 연도 간의 식물플랑크톤 총 개체수 차이가 가장 명확하게 나타났다 ( $t = -3.84, p < 0.05$ ). 그중에서도 규조류가 2018년에는 유의하게 높게 나타났다 ( $t = 2.63, p < 0.05$ ). 일반적으로 동

해는 한류와 난류가 만나 극전선이 형성되고, 이와 관련된 물리적 작용에 의하여 영양염류가 유광층 상부로 공급되어 일정한 값을 유지한다. 따라서 외해역임에도 불구하고 일정한 높은 식물플랑크톤 생물량이 보고되었고, 계절적으로도 춘계에 현저하게 높은 생산력을 보인다(Yoo *et al.* 2004; Hyun *et al.* 2009; Kim *et al.* 2011). 독도 연안 해역 또한 그 전선역에 인접한 지역이지만 본 연구에서 동해의 춘계 대발생 양상과 상이한 식물플랑크톤 분포 특성을 파악하였다.

## 적 요

본 독도 연안 해역에서 2019년 계절적 수환경 특성과 식물플랑크톤 군집구조 변화 특성을 파악하고, 2018년과 2019년 특성을 비교하고자 두 연도의 4계절 수층별 조사가 수행되었다. 2019년에는 총 4문 69종의 식물플랑크톤이 관찰되었고, 평균 식물플랑크톤 개체수는  $1.90 \times 10^4$  cells  $L^{-1}$ 로 매우 낮게 나타났다. 동계에는 평균  $3.19 \times 10^4$  cells  $L^{-1}$ 로 대부분 미동정 편모류가 우점하였고, 춘계에는  $3.12 \times 10^4$  cells  $L^{-1}$ 로 역시 편모류가 약 50%를 차지하였으며, *P. obtusidens*를 포함한 다양한 와편모조류가 출현한 특징이 있었다. 하계 개체수는  $0.46 \times 10^4$  cells  $L^{-1}$ 로 매우 낮은 개체수와 종이 나타났고, 추계에는 평균 개체수가  $0.89 \times 10^4$  cells  $L^{-1}$ 로 낮았으며, 여러 종의 *Chaetoceros*와 함께 *Bacteriastrum* spp., *Guinardia striata*, *Psuedonitzschia* spp. 과 같은 규조류가 다양하게 나타났다. 또한, 2018년 추계와 동일하게 열대 지표종인 *Ornithocercus* sp.와 *Amphisolenia* sp.가 관찰되었다. 2019년에는 대마난류와 남해 연안의 영향을 받은 종이 출현하였지만, 전반적으로 매우 낮은 개체수를 보이며 편모조류가 우점한 특징이 있었다. 식물플랑크톤 다양성은 2018년 하계와 2019년 동계에 높게 나타났고, 군집분석에서도 계절에 상관없이 크게 4개 그룹으로 구분되었다. 2018년과 2019년 수환경은 특이적으로 춘계에 성층이 약하게 형성되었고, 2018년 추계에는 하계와 동일하게 수괴가 안정되어 식물플랑크톤이 대증식한 것으로 사료된다. 식물플랑크톤 군집 및 개체수는 하계를 제외하고 계절별 우점 종의 차이를 보였으며, 이 차이는 추계에 가장 뚜렷하였다. 따라서 독도 연안 해역은 일반적인 동해의 특성과는 다르게, 외해역임에도 불구하고 얕은 지형과 다양한 해류, 섬효과 등과 같은 복합적인

영향으로 연도별 계절별 특성이 다르게 나타날 수 있다는 것을 시사한다.

## 사 사

본 논문은 “독도의 지속가능한 이용연구(PG51650)”로 수행되었습니다.

## REFERENCES

- Baek SH and YB Kim. 2018. Influences of coastal upwelling and time lag on primary production in offshore waters of Ulleungdo-Dokdo during spring 2016. Korean J. Environ. Biol. 36:156-164.
- Baek SH, M Lee and YB Kim. 2018. Spring phytoplankton community response to an episodic windstorm event in oligotrophic waters offshore from the Ulleungdo and Dokdo islands, Korea. J. Sea Res. 132:1-14.
- Chae YK, YH Seung and SK Kang. 2005. Mode change of deep water formation deduced from slow variation of thermal structure: One-dimensional model study. Ocean Polar Res. 27:115-123.
- Chang KI, WJ Teague, SJ Lyu, HT Perkins, DK Lee, DR Watts, YB Kim, DA Mitchell, CM Lee and K Kim. 2004. Circulation and currents in the southwestern East/Japan Sea : Overview and review. Prog. Oceanogr. 61:105-156.
- Choi DH and JH Noh. 2009. Phylogenetic diversity of *Synechococcus* strains isolated from the East China Sea and the East Sea. FEMS Microbiol. Ecol. 69:439-448.
- Choi DH, JH Noh and J Shim. 2013. Seasonal changes in picocyanobacterial diversity as revealed by pyrosequencing in temperate waters of the East China Sea and the East Sea. Aquat. Microb. Ecol. 71:75-90.
- Choi JK, YS Kang, JH Noh and JH Shim. 2011. The characteristics of phytoplankton distribution in the East Sea of Korea. pp. 48-67. In: The Plankton Ecology of Korean Coastal Waters. DonghwaTech. Pub. Seoul.
- Cushing DH. 1989. A difference in structure between ecosystems in strongly stratified waters and in those that are only weakly stratified. J. Plankton Res. 11:1-13.
- González-Gil R, F González, C Cáceres, JL Largier and R Anadón. 2018. Winter-mixing preconditioning of the spring phytoplankton bloom in the Bay of Biscay. Limnol. Oceanogr. 63:1264-1282.
- Guinder VA, CA Popovich, JC Molinero and J Marcovecchio.

2013. Phytoplankton summer bloom dynamics in the Bahia Blanca Estuary in relation to changing environmental conditions. *Cont. Shelf Res.* 52:150–158.
- Harvey HW. 1955. *The Chemistry and Fertility of Sea Waters*. Cambridge University Press. Cambridge.
- Huang S, SW Wilhelm, HR Harvey, K Taylor, N Jiao and F Chen. 2012. Novel lineages of *Prochlorococcus* and *Synechococcus* in the global oceans. *ISME J.* 6:285–297.
- Hyun JH, D Kim, CW Shin, JH Noh, EJ Yang, JS Mok and S Yoo. 2009. Enhanced phytoplankton and bacterioplankton production coupled to coastal upwelling and an anticyclonic eddy in the Ulleung Basin, East Sea. *Aquat. Microb. Ecol.* 54:45–54.
- Ignoffo TR, SM Bollens and AB Bochdansky. 2005. The effects of thin layers on the vertical distribution of the rotifer, *Brachionus plicatilis*. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 316:167–181.
- Jeong HJ, AS Lim, K Lee, MJ Lee, KA Seong, NS Kang and JH Kim. 2017. Ichthyotoxic *Cochlodinium polykrikoides* red tides offshore in the South Sea, Korea in 2014: I. Temporal variations in three-dimensional distributions of red-tide organisms and environmental factors. *Algae* 32:101–130.
- Joo H, S Son, JW Park, JJ Kang, JY Jeong, CI Lee and SH Lee. 2016. Long-term pattern of primary productivity in the East/Japan Sea based on ocean color data derived from MODIS-aqua. *Remote Sens.* 8:25.
- Jung JA, EY Cho, JH Cha, MK Kim and KT Kim. 2000. Seasonal variations of physico-chemical characteristics and phytoplanktonic pigments in coastal sea water from Ullungdo and Dokdo Islands. *Korean J. Environ. Biol.* 18:425–440.
- Jung JA, EY Jo, JH Cha, MK Kim and KT Kim. 2001. Community structures of phytoplankton according to environmental factors in the coastal waters of Ullungdo and Tokdo Islands. *Algae* 16:325–335.
- Kim D, EJ Yang, KH Kim, CW Shin, J Park, S Yoo and JH Hyun. 2011. Impact of an anticyclonic eddy on the summer nutrient and chlorophyll a distributions in the Ulleung Basin, East Sea (Japan Sea). *ICES J. Mar. Sci.* 69:23–29.
- Kim MK and JK Shin. 2007. Variations of water environments and species compositions of microalgae during summer in the coast of Dokdo, Korea. *Algae* 22:193–199.
- Kim MK and JW Park. 2009. Water environments and species compositions of phytoplankton at the depths during summer in the coast of Dokdo. *Korean J. Environ. Biol.* 27:48–57.
- Kim SW, WJ Go, SS Kim, HD Jeong and K Yamada. 2010. Characteristics of ocean environment before and after coastal upwelling in the southeastern part of Korean Peninsula using an in-situ and multi-satellite data. *Korean Soc. Mar. Environ. Saf.* 16:345–352.
- Kim YK and DS Lee. 1983. Petrology of alkali volcanic rocks in northern part of Ulrung Island. *Econ. Environ. Geol.* 16:19–36.
- KIOST. 2017. A Sustainable Research and Development of Dokdo. SCPG49880-11410-5. Korea Institute of Ocean Science and Technology, Ministry of Oceans and Fisheries, Seoul, Korea.
- KORDI. 2000. Baseline Studies of Dok Island Ecosystem. BSPM 99045-00-1282-6. Korea Ocean Research and Development Institute, Ministry of Oceans and Fisheries, Seoul, Korea.
- Lee HW, BK Hong, MH Sohn, YY Chun, DW Lee, YM Choi and KS Hwang. 2010. Seasonal variation in species composition of fish collected by trammel net around Dokdo, East Sea of Korea. *Korean J. Fish. Aquat. Sci.* 43:693–704.
- Lee M and SH Baek. 2017. Changes in marine environmental factors and phytoplankton community composition observed via short term investigation in a harbor in the eastern part of the south sea of Korea. *Korean Soc. Mar. Environ. Saf.* 25:669–676.
- Lee M, YB Kim, JH Kang, CH Park and SH Baek. 2019. Seasonal phytoplankton dynamics in oligotrophic offshore water of Dokdo, 2018. *Korean J. Environ. Biol.* 37:19–30.
- Lee MJ, D Kim, YO Kim, M Sohn, CH Moon and SH Baek. 2016. Seasonal phytoplankton growth and distribution pattern by environmental factor changes in inner and outer bay of Ulsan, Korea. *The Sea* 21:24–35.
- Li WKW and WG Harrison. 2001. Chlorophyll, bacteria and pico-phytoplankton in ecological provinces of the North Atlantic. *Deep-Sea Res. Part II-Top. Stud.* 48:2271–2293.
- Lie HJ and CH Cho. 1994. On the origin of the Tsushima Warm Current. *J. Geophys. Res. Oceans* 99:25081–25091.
- Lim YK and SH Baek. 2018. Seasonal distributional characteristics of phytoplankton adjacent to the oyster farming area of Hamsan-Geoje island. *Korean J. Environ. Biol.* 36:647–658.
- Margalef R. 1958. Information theory in ecology. *Gen. Syst.* 3:37–71.
- Na JY, SW Lee and KD Cho. 1991. A study on sea water and ocean current in the sea adjacent to Korea Peninsula. *Korean J. Fish. Aquat. Sci.* 24:215–228.
- Nishimura S. 1983. Okhotsk Sea, Japan Sea, East China Sea. pp. 305–401. In: *Ecosystem of the World, V. 26 Estuaries and Enclosed Seas*, Ketchum BH (ed.). Elsevier. New York.
- Nof D. 2001. China's Development Could Lead to Bottom Water Formation in the Japan/East Sea. *B. Amer. Meteor. Soc.* 82:609–618.
- Noh JH, SJ Yoo and SH Kang. 2006. The summer distribution of picophytoplankton in the Western Pacific. *Korean J. Environ. Biol.* 24:67–80.
- Partensky F, J Blanchot and D Vaultot. 1999. Differential distribution and ecology of *Prochlorococcus* and *Synechococcus*



- in oceanic waters: a review. Bull. Inst. Océanogr. (Monaco) 457-476.
- Pielou EC. 1975. Ecological Diversity. John-Wiley & Sons. New York. p. 165.
- Rho T, T Lee, G Kim, KI Chang, T Na and KR Kim. 2012. Prevailing subsurface chlorophyll maximum (SCM) layer in the East Sea and its relation to the physico-chemical properties of water masses. Ocean Polar Res. 34:413-430.
- Rho TK, YB Kim, JI Park, YW Lee, DH Im, DJ Kang and HJ Park. 2010. Plankton community response to physico-chemical forcing in the Ulleung Basin, East Sea during summer 2008. Ocean Polar Res. 32:269-289.
- Saiz E, PT Iselius, PR Jonsson, P Verity and GA Paffenhöfer. 1993. Experimental records of the effects of food patchiness and predation on egg production of *Acartia tonsa*. Limnol. Oceanogr. 38:280-289.
- Shim JM, SH Yun, JD Hwang, HG Jin, YH Lee, YS Kim and SC Yun. 2008. Seasonal variability of picoplankton around Ulleung Island. J. Environ. Sci. Int. 17:1243-1253.
- Shimada A, S Kawaguchi, T Maruyama and M Naganobu. 1999. Flow cytometric analysis of picophytoplankton in the South Pacific and Antarctic Oceans. Bull. Inst. Océanogr. (Monaco) 477-480.
- Shin HH, Z Li, KN Mertens, MH Seo, H Gu, WA Lim and K Matsuoka. 2019. *Prorocentrum shikokuense* Hada and *P. donghaiense* Lu are junior synonyms of *P. obtusidens* Schiller, but not of *P. dentatum* Stein (Prorocentrales, Dinophyceae). Harmful Algae 89:101686.
- Smetacek V and JE Cloern. 2008. On phytoplankton trends. Science 319:1346-1348.
- Suh YS, LH Jang and JD Hwang. 2001. Temporal and spatial variations of the cold waters occurring in the eastern coast of the Korean Peninsula in summer season. Korean J. Fish. Aquat. Sci. 34:435-444.
- Thompson PA, PI Bonham and KM Swadling. 2008. Phytoplankton blooms in the Huon Estuary, Tasmania: top-down or bottom-up control. J. Plankton Res. 30:735-753.
- Won JK and MW Lee. 1984. The volcanism and petrology of alkali volcanic rocks, Ulrung Island. J. Geol. Soc. Korea 20:296-305.
- Xu N, S Duan, A Li, C Zhang, Z Cai and Z Hu. 2010. Effects of temperature, salinity and irradiance on the growth of the harmful dinoflagellate *Prorocentrum donghaiense* Lu. Harmful Algae 9:13-17.
- Yang HS, SG Jeon and SJ Oh. 2016. Survival strategy of dominant diatom *Chaetoceros debilis* and *Leptocylindrus danicus* as southwestern parts of East sea-The availability of dissolved organic nitrogen under dissolved inorganic nitrogen-limited environments. J. Korean Soc. Mar. Environ. Saf. 22:212-219.
- Yoo S and HC Kim. 2004. Suppression and enhancement of the spring bloom in the southwestern East Sea/Japan Sea. Deep-Sea Res. Part II-Top. Stud. 51:1093-1111.
- Yoo S and J Park. 2009. Why is the southwest the most productive region of the East Sea/Sea of Japan? J. Mar. Syst. 78:301-315.
- Yoo S, CE Kong, YB Son and J Ishizaka. 2019. A critical re-assessment of the primary productivity of the Yellow Sea, East China Sea and Sea of Japan/East Sea Large Marine Ecosystems. Deep-Sea Res. Part II-Top. Stud. 163:6-15.
- Yoon YH. 2016. Bio-environmental characteristics of the Uljin Marine Ranching Area (UMRA), East Sea of Korea. 1. Spatio-temporal distributions of phytoplankton community. J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy 19:37-46.
- Zhang CY, GF Chen, J Zhou, YY Wang and DD Lu. 2016. Development of a quantitative PCR for detection and quantification of *Prorocentrum donghaiense*. J. Appl. Phycol. 28:1683-1693.