

2018년 독도 주변 빈영양 수괴에서 계절별 식물플랑크톤 동태

이민지, 김윤배¹, 강정훈, 박찬홍², 백승호*

한국해양과학기술원 위해성분석연구센터

¹한국해양과학기술원 울릉도·독도해양연구기지

²한국해양과학기술원 동해연구소

Seasonal phytoplankton dynamics in oligotrophic offshore water of Dokdo, 2018

Minji Lee, Yun-Bae Kim¹, Jung Hoon Kang, Chan Hong Park² and Seung Ho Baek*

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

¹Ulleungdo/Dokdo Ocean Science Station, KIOST, Ulleungdo 40205, Republic of Korea

²East 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: 31 December 2018

Revised: 11 January 2019

Revision accepted: 15 February 2019

Abstract: To investigate the characteristics of seasonal environment and phytoplankton community structure in the coastal area of Dokdo, a survey of Dokdo around waters was conducted during the four seasons. Phytoplankton of 4 phylum 72 species in four seasons were collected in Dokdo around water. The seasonal mean abundance of phytoplankton were 3.32×10^4 cells L^{-1} in winter, 1.04×10^4 cells L^{-1} in spring, 0.28×10^4 cells L^{-1} in summer, and 4.86×10^4 cells L^{-1} in autumn in Dokdo around water. During winter, the diatoms *Chaetoceros* spp. had dominated. During spring, when the nutrients in the euphotic layer were depleted, the nano-flagellates and *Cryptomonas* appeared at surface layer. In summer, the abundance of phytoplankton was relatively low, which lead to occurrence of diatoms such as genus of *Chaetoceros*, *Rhizosolenia*, and *Skeletonema*. In autumn, *Pseudo-nitzschia* spp. was the most dominant species and tropical species such as *Amphisolenia* sp. and *Ornithocercus magnificus* were observed, implying that they may have introduced within warm water current such as Kurosiwo Current. Therefore, although natural phytoplankton communities in the vicinity water of Dokdo are mainly influenced by Tsushima Warm Current branched Kurosiwo Current, their population dynamics was affected on the spatio-temporal change of physicochemical factors by short-term wind events, namely "island effect". Long-term survey research is needed to facilitate food-web response in marine ecosystem associated with phytoplankton biomass and physicochemical factors including the warm water current in oligotrophic offshore water of Dokdo, which may have significant role for sustainable use of Dokdo.

Keywords: East Sea, Dokdo, phytoplankton, ecosystem, tropical species

서 론

동해는 “북서태평양의 소규모 지중해”이며, 역동적으로 변화하는 “작은 대양”이라고 불리며, 난류와 한류 전선 형성, 와류, 열염순환, 심층수 형성, 용승 등 대양이 가지는 해양 특성을 지닌다(Kim *et al.* 2001; Rho *et al.* 2010). 이러한 해양학적 특성으로 동해는 엘리뇨, 라니냐, 산성화 등 전 지구적 규모로 일어나는 대기변화에 민감하게 반응한다(Kim and Kang 2000; Chiba *et al.* 2005). 독도 주변 해역은 동한난류와 북한한류에 의해 형성되는 극전선에 위치하며, 대마난류의 난수성수괴와 북한해류의 냉수성수괴가 혼합되어 복잡한 물리구조를 가진다. 이러한 복잡한 수괴는 일차생산자의 계절적 특성뿐만 아니라, 해양생물 생태계 구조와 기능에도 큰 영향을 미칠 수 있다.

식물플랑크톤은 해양 생태계에서 일차생산자로서 중요한 역할을 하고, 식물플랑크톤의 성장은 수온, 염분, 광량, 광주기 및 영양염 등과 같은 환경요인에 큰 영향을 받는다(Thompson *et al.* 2008; Guinder *et al.* 2013). 영양염의 공급과 제한은 식물플랑크톤 생체량과 종조성에 큰 영향을 미치며, 수계 내 영양염 분포 양상에 따라 식물플랑크톤의 천이양상을 일부 설명할 수 있다(Anderson *et al.* 2002).

독도의 지리적 특성상 울릉도-독도로 연결되는 해역이 육지로부터 멀리 떨어져 있으며, 기후 및 해황이 시시각각으로 변화하여 조사선을 쉽게 운용할 수 없다. 또한, 오래전부터 한일 영토 분쟁으로 인하여 민간인 출입의 제약이 많은 곳이므로 반복적이고 지속적으로 조사할 수 없는 어려움이 있었다. 따라서, 독도 주변 해역은 중요도에 반해 해양환경 특성 및 생물군집 구조를 파악하는 데는 지리적 한계점을 지니고 있는 해역이다. 독도 주변 수문학적 환경과 생태계에 대한 선행 연구는 1980년대 초반부터 간헐적으로 수행되었으며, 대부분 국가연구소의 기초보고서로만 활용되었다(KORDI 2000). 울릉도와 독도의 수환경과 식물플랑크톤 군집구조(Jung *et al.* 2001; Kim and Shin 2007; Kim and Park 2009; Baek and Kim 2018), 울릉도와 독도의 광합성 색소분석(Jung *et al.* 2000), 동해와 울릉도-독도의 연속적 조사(Baek *et al.* 2018) 등이 보고되었지만, 모두 단일 계절 혹은 한시적 조사이며 독도 주변 해역의 4계절 조사를 수행한 연구는 극히 부족한 실정이다. 따라서, 본 연구는 독도 연안 해역에서 계절적 식물플랑크톤 군집구조 특성을 파악하고 환경인자와의 관계를 분석하였다. 본 연

구결과는 독도 연안의 생태계 변화 추이를 파악하고, 지속 가능한 독도 이용을 위한 기초자료 및 독도 영유권주장을 위한 과학적 자료로 활용될 것으로 판단된다.

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 조사선인 온누리호(동계: 2018년 3월 2일), 장목호(춘계: 2018년 6월 6일), 이어도호(하계: 2018년 8월 21일; 추계: 2018년 11월 2일)를 이용하여, 독도 연안 해역에서 총 4회에 걸친 계절조사를 수행하였다. 동계와 춘계에는 수층별 식물플랑크톤 군집조사와 함께 수환경조사를 수행하였다. CTD (SBE911plus, Sea-Bird Electronics, Inc., Washington, USA)를 이용하여 수온, 염분, 수심을 조사하였으며, 엽록소-*a* (Chlorophyll *a*), 영양염류 분석이 함께 수행되었다. 하계와 추계에는 수층별 식물플랑크톤 군집조사와 CTD를 이용한 수직조사가 수행되었다. 표층수는 버킷으로 채수하였고, 중층과 저층수(해저면 기준 5 m 상부에서 채수)는 10 L PVC Niskin sampler (General Oceanics, Miami, FL, USA)이 장착된 로켓채수기를 이용해 채수하였다. 동계와 춘계에는 수질측정기(YSI 6500, YSI incorporated, USA)를 이용하여, 선상에서 즉시 채수한 현장 표층수와 저층수의 수온, 염분, 용존산소, pH를 측정하였다. 엽록소-*a* 농도와 각 영양염류의 농도를 측정하기 위하여 표층수와 저층수 500 mL를 선상에서 GF/F glass fiber filters (47 mm diameter; pore size 0.7 μ m, Whatman, Middlesex, UK)로 500 mL를 여과하였다. 여과지를 통과한 해수는 영양염류를 측정하기 위해서 50 mL PE병에 넣고 HgCl₂를 첨가하여 -20°C에서 냉동 보관하였다. 엽록소-*a* 농도 측정을 위해서 GF/F 여과지는 15 mL 튜브에 넣어 분석전까지 -20°C에서 냉동 보관하였다. 엽록소-*a* 농도는 실험실에서 냉동 보관한 여과지를 90% acetone에 넣어, 냉암소에서 24시간 동안 색소를 추출한 후 형광측정기(10-AU; Turner BioSystems, Sunnyvale, CA, USA)를 이용하여 분석하였다. 아울러, 실험실에서 각 시기별 냉동 보관된 시료를 암조건

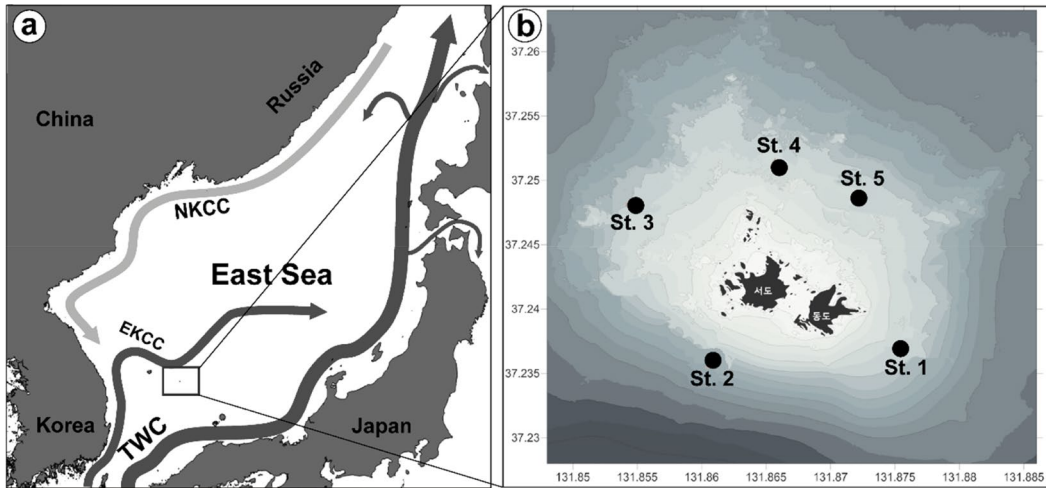


Fig. 1. Map of the study area showing schematically the main ocean currents (a); Locations of sampling stations in coastal area of Dokdo (b).

에서 해동하여 영양염류를 분석하였다. 아질산과 질산성 질소($\text{NO}_2 + \text{NO}_3\text{-N}$), 인산염($\text{PO}_4\text{-P}$), 규산염($\text{SiO}_2\text{-Si}$), 암모니아성 질소($\text{NH}_4\text{-N}$)를 Parsons *et al.* (2013)의 분석법에 따라서 영양염 자동분석기(Quattro 39; Seal Analytical, Fareham, Hampshire, UK)를 이용하여 분석하였고, 각각의 영양염 농도는 표준해수(RMNS, KANSO Technos Co., Ltd., Japanchemical Industries, Osaka, Japan)를 이용하여 보정하였다. 전 계절 식물플랑크톤의 정성 분석을 위하여 망구 30 cm, 망목 20 μm 인 식물플랑크톤 네트를 사용하여 표층 3 m를 수직채집하였다. 정성/정량 분석을 위하여 현장 선상에서 500 mL의 표층수를 채수하여, Lugol's solution을 이용하여 최종 농도 0.5%로 고정하였고, 실험실에서 500 mL 시료를 50 mL로 농축시켰다. 식물플랑크톤 종 동정 및 계수는 농축된 시료를 Sedgewick-Rafter counting chamber에 100~300 mL 분주하여 광학현미경(Zeiss Axioplan 2; Carl Zeiss, Jena, Germany) 100~400배 배율에서 분석하였다. 특히 광학현미경에서 동정이 극히 어려운 종은 속 수준에서 동정하였으며, 10 μm 이하의 매우 작은 편모조류는 미동정 편모그룹으로 분류하였으며, 은편모조류(Cryptophyceae) 또한 하나의 은편모그룹으로 묶어 동정 및 계수하였다. 정점별 식물플랑크톤의 군집구조의 특성을 알아보기 위해서 각 정점에 출현한 식물플랑크톤을 바탕으로 PRIMER version 5를 이용하여 Bray-Curtis 유의도(Similarity index)를 산출하였으며, 이를 기반으로 Cluster 분석과 다차원 척도분석(MDS; Multi Dimensional

Scaling)을 실시하였다. 또한 각 정점별 종수와 종 다양성 지수(Diversity Index)를 파악하였다(Shannon and Weaver 1949). 계절적 식물플랑크톤 군집조성과 환경인자 사이의 연관성을 조사하기 위해 CANOCO 4.5 software를 이용하여 CCA(Canonical Correspondence Analysis) 분석을 수행하였다.

결과 및 고찰

1. 독도 환경 특성

독도 주변은 쓰시마 난류지류인 동한난류와 북한한류가 교차하는 지역으로 독도 주변의 해양 환경 및 생태계는 일반적인 외양의 특징을 지닌 동해와 명확하게 다른 특성을 보인다. 또한 독도 지역의 기후는 해풍이 심한 해양성 기후로 연평균 기온이 연중 영상으로 유지되며, 강수량 또한 일정하게 유지되는 특성을 보인다(Kim 2011). 본 조사에서 동계 표층의 평균 수온은 11.9°C이며, 저층 평균 수온은 8.91°C로 관찰되었다. 춘계의 평균 표층과 저층 수온은 각각 19.0°C와 14.2°C로 나타났다(Table 1). 하계 평균 표층 수온은 26.0°C로, 저층 10.2°C로 나타났으며, 표층과 저층의 수온차이로 강한 성층이 형성된 것을 확인하였다. 추계는 표층 18.7°C로, 저층 17.2°C로 수층별 수온차이가 가장 적었고, 수층이 비교적 잘 혼합되었다. 독도 인근 해역

Table 1. Characters of water environments in winter and spring (temperature, salinity, pH, chlorophyll-*a*, nitrate+nitrite, phosphate, ammonium, silicate) and summer and autumn (temperature, salinity)

		Temp. (°C)	Sal.	Chl. <i>a</i> (µg L ⁻¹)	NO _x (µM)	NH ₄ (µM)	PO ₄ (µM)	SiO ₂ (µM)			Temp. (°C)	Sal.		
Winter	St. 1	S	8.24	33.59	0.73	6.26	0.51	0.45	8.03	Summer	St. 1	S	25.80	33.15
		M	9.35	34.39	0.67	6.05	0.57	0.44	7.80			M	14.02	34.06
		B	9.23	34.54	0.60	6.01	0.47	0.36	6.56			B	12.40	34.20
	St. 2	S	12.82	34.66	0.79	6.40	0.56	0.44	8.11		St. 2	S	26.50	33.08
		M	9.05	34.45	0.60	6.20	0.33	0.44	7.93			M	13.96	34.23
		B	8.94	34.46	0.61	6.52	0.51	0.44	7.98			B	7.65	34.16
	St. 3	S	12.99	34.58	0.80	6.70	0.56	0.44	7.86		St. 3	S	26.41	33.09
		M	9.07	34.46	0.76	6.36	1.01	0.43	7.93			M	22.96	33.37
		B	8.84	34.41	0.73	6.21	0.70	0.43	7.87			B	12.59	34.38
	St. 4	S	12.84	34.39	0.85	6.32	0.59	0.45	8.11		St. 4	S	25.36	33.19
		M	8.98	34.42	0.70	6.03	0.83	0.43	7.76			M	14.18	34.15
		B	8.68	34.39	0.63	6.08	0.48	0.43	7.72			B	6.11	34.12
	St. 5	S	12.76	34.18	0.80	6.31	0.40	0.44	7.97		St. 5	S	26.03	33.15
		M	9.25	34.05	0.67	6.31	2.62	0.43	7.74			M	16.76	33.88
		B	8.88	34.39	0.60	5.43	0.39	0.43	7.83			B	12.21	34.24
Avg.	S	11.93	34.28	0.79	6.40	0.52	0.44	8.02	Avg.	S	26.02	33.13		
	M	9.14	34.35	0.68	6.19	1.07	0.43	7.83		M	16.38	33.94		
	B	8.91	34.44	0.63	6.05	0.51	0.42	7.59		B	10.19	34.22		
Spring	St. 1	S	18.75	34.54	0.05	0.38	0.05	0.21	3.45	Autumn	St. 1	S	18.38	33.55
		M	14.87	34.68	0.32	0.39	0.23	0.26	3.92			M	18.38	33.55
		B	13.78	34.68	0.17	4.98	0.40	0.54	5.82			B	18.03	33.57
	St. 2	S	19.11	34.54	0.14	2.19	0.19	0.18	3.24		St. 2	S	18.76	33.61
		M	16.22	34.62	0.28	1.46	0.18	0.26	4.57			M	18.64	33.59
		B	14.63	34.71	0.33	3.74	0.37	0.53	5.71			B	13.55	34.20
	St. 3	S	18.85	34.46	0.06	1.64	1.01	0.20	4.68		St. 3	S	18.61	33.56
		M	15.26	34.88	0.31	0.82	0.46	0.24	3.52			M	18.36	33.56
		B	14.44	34.54	0.35	4.57	0.09	0.53	5.29			B	18.30	33.56
	St. 4	S	19.04	34.53	0.18	0.50	0.26	0.36	3.37		St. 4	S	19.03	33.64
		M	15.20	34.70	0.30	1.15	0.21	0.25	3.52			M	18.67	33.59
		B	14.4	34.52	0.65	3.63	0.46	0.37	4.55			B	18.28	33.55
	St. 5	S	19.17	34.59	0.05	1.69	0.49	0.21	3.21		St. 5	S	18.90	33.63
		M	15.20	34.75	0.26	0.63	0.14	0.28	3.96			M	18.27	33.54
		B	13.75	34.49	0.16	5.34	0.09	0.64	6.25			B	17.88	33.60
Avg.	S	18.98	34.53	0.10	1.28	0.40	0.23	3.59	Avg.	S	18.74	33.60		
	M	15.35	34.73	0.29	0.89	0.24	0.26	3.90		M	18.46	33.57		
	B	14.20	34.59	0.33	4.45	0.28	0.52	5.52		B	17.21	33.70		

S: surface; M: Middle; B: bottom

의 생물-화학적 특징은 외양수의 특성과 유사하게 안정적이었지만, 본 해역의 수온 변동은 50~80m 범위의 낮은 수심으로 인하여, 대기 온도의 영향을 많이 받는 것으로 사료된다. 염분농도는 전 계절, 전 수층에서 33.2~34.7 psu 범위로 특별한 경우나 담수의 유입을 받지 않는 외양의 특성과 동일하게 나타났다. 울릉도와 독도 사이에는 수심 2,000m 이상의 한국해저간극(Korea Gap)이 위치한다. 이 지역은 대마난류, 북한한류, 중층수, 고유심층수 등 다양한 수괴의 특성을 모두 볼 수 있는 지역이다. 하지만, 독도 연안 해역은 독도의 지형적 특징상 100m 이내의 낮은 수심 분포를 보여, 연안과 같이 기후에 따라 수온이 명확하게

변화하는 특성을 지녔다. 또한, 해양의 일차생산력을 대변하는 자료인 엽록소-*a*의 농도는 전 수층 평균 0.94 µg L⁻¹로 매우 낮은 농도를 보였다. 평균 엽록소-*a*의 농도는 동계 0.70 µg L⁻¹, 춘계 0.24 µg L⁻¹로 나타났으며, 표-중-저 수층 간의 차이가 크지 않았다(Fig. 2). 일반적인 온대해역에서는 춘계 대증식으로 매우 높은 엽록소-*a*의 농도를 보이며(Harvey 1955), Beak *et al.* (2018)의 연구에서도 본 해역의 춘계대증식이 보고되었으나, 본 조사에서는 특이적으로 춘계 식물플랑크톤의 대발생은 관찰되지 않았다. Jung *et al.* (2001)의 독도 주변 해역 조사 결과에서도 다른 계절(추계, 약 0.9 µg L⁻¹)에 비해 춘계와 하계에는 약 0.5 µg L⁻¹

로 본 결과와 유사하게 비교적 낮은 엽록소-*a*의 농도를 보였다. 독도 연안 해역은 100 m 이내의 낮은 수심을 보이는 지역으로 동계에는 해류의 혼합이 활발하게 일어나기 때문에 전 정점의 표층과 저층이 거의 동일한 수온, 염분 분포특성을 보였으며, 영양염 역시 표층과 저층에서 동일하게 높은 값을 보였다(Table 1). 또한 일반적으로 본 지역의 춘계에는 태풍이나 wind event와 같은 기상 현상으로 표층과 저층이 활발하게 혼합되어 저층에서 표층으로 높은 영양염이 공급되어 식물플랑크톤이 번무하게 되는데(Baek and Kim 2018; Baek *et al.* 2018), 본 조사에서는 표층 영양염이 매우 낮았으며, 비교적 저층에서 높은 영양염 농도를 보였다(Table 1). 이는 이미 영양염이 고갈되었거나 성층이 형성되어 영양염이 공급되지 않아서 춘계에 낮은 엽록소-*a*가 나타났을 것이라 판단된다. 결과적으로 독도 주변 해역에서 동계 높은 영양염과 엽록소-*a* 농도를 보였고, 춘계에는 영양염과 엽록소-*a*가 일정하게 낮게 유지되는 특성을 보였다.

2. 식물플랑크톤 다양성과 군집특성

독도 연안 해역에서 계절별, 수심별 식물플랑크톤 종조성을 분석한 결과, 총 4문 72종이 확인되었다(Table 2). 분류군별로 48종의 규조류, 25종의 와편모조류, 2종의 규질편모류, 1종의 은편모조류, 5종의 미동정 편모류가 관찰되었다. 각 계절별 표층 식물플랑크톤의 평균 출현종수는 22.75종으로 나타났으며, 동계, 춘계, 하계, 추계에 각각 22, 10, 27, 32로 나타났다(Table 3). 동계와 하계의 출현종수는 비슷하였으며, 식물플랑크톤 현존량이 가장 높았던 추계에 가장 높은 종수를 보였다. 춘계에는 엽록소-*a* 농도가 매우 낮았을 뿐만 아니라, 대부분 은편모조류와 함께 nano-flagellate가 일정 밀도로 유지되었고, 이는 현미경 하에서 검정이 불가하여 같은 그룹으로 묶였기 때문에 낮은 종수를 보인 것으로 판단된다. 독도 연안 해역에서 식물플랑크톤의 종다양성은 현존량이 극히 낮았던 춘계에 1.71로 가장 낮았고, 다양한 종이 일정하게 높게 출현한 동계와 하계에 2.37, 2.80으로 비교적 높게 기록되었다. 특히적으로 하계에는 낮은 엽록소-*a* 농도와 식물플랑크톤 현존량에도 불구하고, 특정종이 우점하지 않았기 때문에 가장 높은 종다양성을 보였다. 오히려 출현 종수 및 현존량이 가장 높았던 추계에는 *Pseudo-nitzschia* spp.와 같은 특정 종의 극우점으로 인하여, 종다양성은 1.98로 하계보다 낮은 값을 보

였다. Kim and Park (2009)의 하계 독도 조사에서 표층의 종수가 평균 17.3으로 가장 높았으며, 다양성지수도 2.79로 표층에서 가장 높았다. 이는 본 연구와 유사한 다양성 지수를 보였다. 독도 주변 해역에서 계절 및 정점별로 식물플랑크톤 군집 특성을 알기 위해 Cluster 분석과 MDS 분석을 수행한 결과, 40%의 유사도에서 4계절이 명확하게 구분되었다(Fig. 2). 하지만 추계 St. 1에서는 5개 정점 중 비교적 낮은 식물플랑크톤 현존량을 보여 춘계와 같은 그룹으로 분리된 것으로 사료된다. 동계와 추계는 35%의 유사도에서는 같은 그룹으로 분리되었다. 일반적으로 춘계와 추계가 유사한 환경으로 대증식을 일으키는 온대연안과 달리, 본 조사에서는 추계와 동계에서 비교적 높은 식물플랑크톤 생체량을 보이는 특성을 보였다. 두 계절의 우점종 또한 *Chaetoceros* 속 및 *Pseudo-nitzschia* 속과 같은 규조류가 우점하였기 때문에 비교적 높은 유사도를 보인 것으로 판단된다. 춘계에는 규조류가 거의 출현하지 않았고, 하계에는 종조성은 동계와 일부분 유사하였지만 현존량이 극히 낮아 각각 다른 그룹으로 묶인 것으로 판단된다. 추가적으로 생물 군집 구성의 주요 변수와 환경 변수와 관계를 평가하기 위하여 상관 분석(Correspondence analysis)의 한 종류인 Canonical correspondence analysis(CCA)를 수행하였다. 동계와 춘계를 함께 분석하여 환경요인과 식물플랑크톤, 정점 간의 관계를 Figure 3에 나타내었다. 환경요인의 경우 NO_x, SiO₂, DO와 엽록소-*a*는 양의 상관성을 보였고, 수온과 염분은 음의 상관성을 보였다. 이와 같이 높은 상관성을 가진 환경요인들과 동계 St. 1, 3, 4, 5가 함께 분포하였으며, 동계 St. 2의 경우 인산염과 더 가까운 분포를 보였다. 식물플랑크톤은 규조류가 이들과 인접해 위치한 것으로 보아 높은 상관성이 있는 것으로 파악된다. 춘계 조사 정점들은 환경요인에 편향되지 않게 위치하였다. 현존량이 낮았던 와편모조류나 은편모조류 같은 종들은 춘계 정점들과 함께 분포하였고, 특히 환경요인과 명확한 관계를 보이지 않았다.

3. 식물플랑크톤 군집조성

독도 연안 해역의 전계절 평균 식물플랑크톤 현존량은 2.38×10^4 cells L⁻¹로 일반적인 연안 해역에 비하면 크게 낮으며, 인접해있는 울릉도와 비교하였을 때도 매우 낮은 현존량을 보인다(Jung *et al.* 2000). 또한 거주지 및 생활권이 형성되지 않은 자연고유의 환경을 유지하고 있어 인류

Table 2. List of seasonal phytoplankton species and abundance observed in the coastal area of Dokdo

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	
<i>Asterionella glacialis</i>		++			++																
<i>Bacteriastrium</i> spp.																					
<i>Chaetoceros compressus</i>	+++	+++	++		+++																
<i>Chaetoceros affinis</i>	+++	++	++	+++	++																
<i>Chaetoceros danicus</i>	+++	++	++	+++	++																
<i>Chaetoceros decipiens</i>	+++	+++	+++	+++	+++																
<i>Chaetoceros didymus</i>	+++	+++	+++	+++	+++																
<i>Chaetoceros messanensis</i>																					
<i>Chaetoceros gracile</i>	++	+++	+++	+++	+++																
<i>Chaetoceros lorenzianus</i>	+++	+++	+++	+++	+++																
<i>Chaetoceros</i>	+++	+++	+++	+++	+++																
<i>pseudocurvisetus</i>																					
<i>Chaetoceros perpusillus</i>																					
<i>Chaetoceros subtilis</i>	+++	+++	+++	+++	+++																
<i>Chaetoceros socialis</i>	+++	+++	+++	+++	+++																
<i>Chaetoceros</i> sp.1	+++	+++	+++	+++	+++																
<i>Chaetoceros</i> spp.	+	+	+	+	+																
<i>Cosinodiscus</i> spp.																					
<i>Cylindrotheca closterium</i>																					
<i>Dactyliosolen phuketensis</i>																					
<i>Detonula pumila</i>																					
<i>Diploneis</i> spp.																					
<i>Ditylum brightwellii</i>																					
<i>Entomoneis</i> sp.																					
<i>Eucampia zodiacus</i>	++																				
<i>Guinardia delicatula</i>																					
<i>Guinardia striata</i>																					
<i>Guinardia flaccida</i>																					
<i>Helicotheca</i> sp.																					
<i>Hemiaulus haukii</i>																					
<i>Leptocylindrus danicus</i>																					
<i>Navicular</i> spp.	++	++	++	++	+																
<i>Nitzschia longissima</i>																					
<i>Nitzschia</i> spp.																					
<i>Odontella longicurvis</i>																					
<i>Pleurosigma</i> spp.	++	++	++	++	++																
<i>Pseudo-nitzschia</i> spp.	+++	+++	++	++	+++																
<i>Rhizosolenia setigera</i>	+++	+++	++	++	+++																
<i>Rhizosolenia</i> spp.																					
<i>Skeletonema costatum</i>																					
<i>Stephanodiscus</i> spp.																					
<i>Thalassionema frauenfeldii</i>																					
<i>Thalassionema</i> spp.																					

Table 2. 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				
<i>Thalassiosira subtilis</i>																+	+				++	++		
<i>Thalassiosira</i> sp.1	++		++	+++	++																		++	
<i>Thalassiosira</i> spp.	++	++	+++	++	++						+		++	+	++	+	+++	++					++	
<i>Akashiwo sanguinea</i>											+	+											++	
<i>Amphisolenia</i> spp.											+	+	+	+		+	+	+				+	++	
<i>Ceratium furca</i>											+	+	+	+		+	+	+				+	++	
<i>Ceratium fusus</i>											+	+	+	+		+	+	+				+	++	
<i>Ceratium tripos</i>											+	+	+	+		+	+	+				+	++	
<i>Ceratium</i> spp.											+	+	+	+		+	+	+				+	++	
<i>Dinophysis</i> spp.																++								++
<i>Gymnodinium</i> spp.											+	+	+	+		+	+	+						++
<i>Gyrodinium spirale</i>											++					++	++	++						++
<i>Gyrodinium</i> spp.											+++					++	++	++						+++
<i>Gyrodinium</i> spp.																++	++	++						+++
<i>Gyrodinium</i> spp.																++	++	++						+++
<i>Gyrosigma</i> sp.	++			+	++																			++
<i>Heterocapsa</i> sp.																								
<i>Katodinium glaucum</i>																+	+							
<i>Ornithocercus</i> sp.																+	+							
<i>Oxyphysis</i> sp.																+	+							
<i>Prorocentrum gracil</i>																								
<i>Prorocentrum micans</i>																								
<i>Protoperidinium pellucidum</i>																								
<i>Protoperidinium subinermis</i>																								
<i>Protoperidinium</i> sp.1																								
<i>Protoperidinium</i> spp.	++	+	++	++	+																			++
<i>Pronoctiluca</i> sp.	+	++																						
<i>Scripsiella trochoidea</i>																								
<i>Scripsiella</i> spp.																								
<i>Unidentified dinoflagellate</i>	++	++	++	++	+++											++	++	++						++
<i>Dictyocha fibula</i>																								
<i>Dictyocha speculum</i>	+	++	++	++	++																			++
<i>Cryptomonas</i> spp.	+++	+++	+++	+++	+++																			+++
<i>Unidentified flagellate 1</i>	++	++	++	++	++																			+++
<i>Unidentified flagellate 2</i>																								+++
<i>Unidentified flagellate 3</i>																								+++
<i>Unidentified flagellate 4</i>																								+++
<i>Unidentified flagellate 5</i>																								+++

+ < 100; ++ < 1000; +++ < 10000; ++++ < 100000; > 1000 (cells L⁻¹)

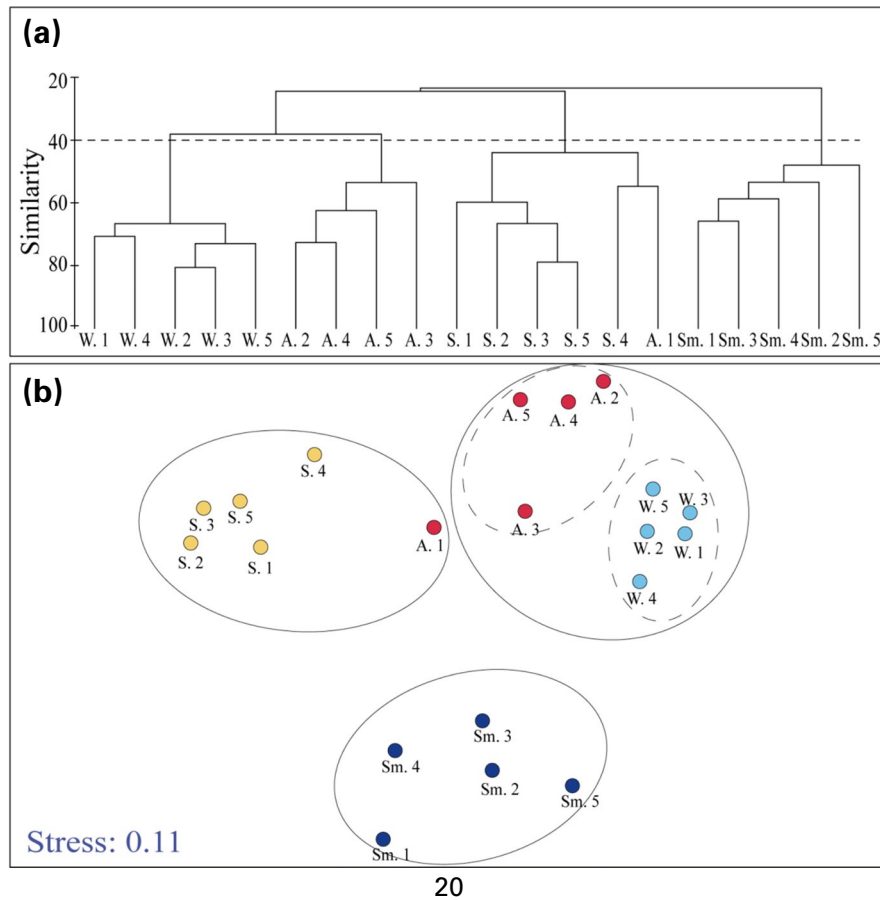


Fig. 2. Cluster(a) and MDS(b) analysis for spatial patterns of phytoplankton communities. The dotted lines indicate the 40% similarity. W: Winter; S: Spring; Sm: Summer; A: Autumn

Table 3. Phytoplankton species number (S) and diversity index (H') in the coastal area of Dokdo

	Winter		Spring		Summer		Autumn	
	S	H'	S	H'	S	H'	S	H'
St. 1	23	2.32	9	1.78	32	3.09	36	2.32
St. 2	23	2.32	9	1.80	25	2.73	37	1.81
St. 3	23	2.61	9	1.47	33	3.01	28	2.61
St. 4	23	2.27	10	1.78	23	2.66	28	1.88
St. 5	19	2.33	11	1.74	23	2.51	29	1.26
Avg.	22	2.37	10	1.71	27	2.80	32	1.98

기원의 오염원이 거의 전무하여, 섬 연안임에도 불구하고 외해의 특성과 같이 전반적으로 낮은 식물플랑크톤 현존량과 영양염 농도 (Jung *et al.* 2000, 2001; Beak *et al.* 2018) 를 보였다. 다만 2005년부터 입도신고제를 도입한 이후 인간기원의 오염으로 인한 환경변화의 가능성이 증가하였

고 쿠로시오같은 동해안에 중요한 역할을 하는 해류의 영향을 직접적으로 받는 지역이므로 이들의 변화특성을 확인하기 위해 지속적인 조사가 필요하다.

동계에는 33종의 식물플랑크톤이 출현하였고, 전체 평균 식물플랑크톤 현존량은 3.32×10^4 cells L⁻¹로, 표층 식물플랑크톤 현존량은 4.14×10^4 cells L⁻¹, 중층 평균 3.24×10^4 cells L⁻¹, 저층 평균 2.58×10^4 cells L⁻¹로 나타났다(Fig. 4). 정점과 수심간 종조성의 차이는 거의 보이지 않았다. 규조류가 전체 식물플랑크톤 비율 중 평균 79.6%의 비율로 가장 높은 비율을 차지하였으며, 다음으로 은편모조류가 14.6%의 비율을 차지하였다. 동계에는 규조류 중에서도 다양한 *Chaetoceros* 종 (*Chaetoceros lorenzianus*, *C. pseudocurvisetus*, *C. socialis*)이 우점하였으며, 그 외에도 *Pseudo-nitzschia* spp., *Skeletonema* spp., *Thalassiosira* spp. 등이 출현하였다(Table 2). 동계 현존량에 가장 크게 기여한 *Chaetoceros* 속은 수온

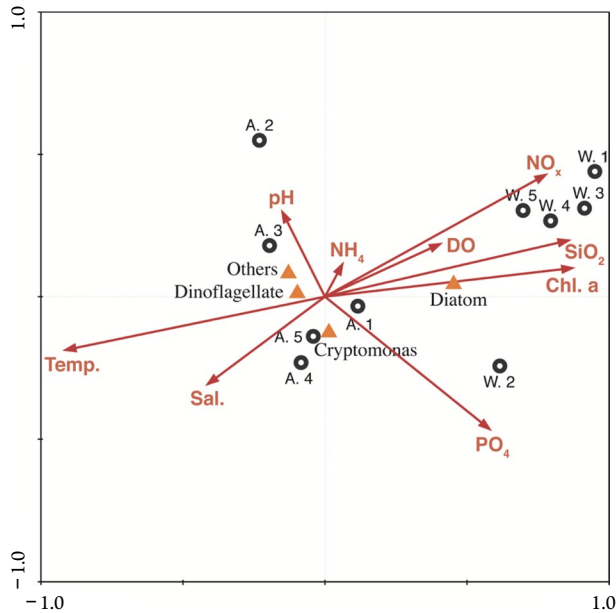


Fig. 3. Canonical Correspondence Analysis (CCA) ordination diagrams of dominant phytoplankton with environmental variables. Environmental variables (Red arrow), Phytoplankton (Triangle), Sampling station (White circle)

이 낮은 추계와 동계에 한국 연안에서 우점하는 종으로 동계 낮은 수온과 표층에서의 비교적 높은 영양염이 이들의 번무에 큰 영향을 미친 것으로 사료된다(Oh *et al.* 2009; Park *et al.* 2009; Lee *et al.* 2016; Lee and Baek 2017; Lim and Baek 2017). 독도의 지역적 특성상 겨울철 향해의 어려움으로 인해 동계 독도에 관한 연구가 부족하며, 특히 식물플랑크톤 종조성에 대해서는 보고된 바가 극히 없는 실정이다. 상대적으로 해양현장 실측 조사는 수행되지 않았지만, 위성을 통한 동해 주변의 계절적 엽록소 및 수온, 해류 특성에 관한 연구는 다수 수행되었다. 장기 위성자료에서는 대부분 춘계에 엽록소-*a* 농도가 $10 \mu\text{g L}^{-1}$ 전후로 높았고, 연중 동계에 가장 낮은 농도를 보였다. 동계 독도가 위치한 동해 중앙부에서 약 $0.1\sim 0.2 \mu\text{g L}^{-1}$ 가량의 낮은 값(Yamada *et al.* 2004; Liu and Chai 2009)을 보였다. 본 조사에서는 추계 다음으로 동계에 높은 생산력을 보였는데, 기존 $0.5\sim 0.7 \mu\text{g L}^{-1}$ 으로 알려진 동계 독도 연안의 엽록소-*a* 농도분포와 유사한 값을 보였다(KORDI 2017). 또한 동계 강풍에 의한 섬효과를 유도할 수 있고, 이로 인해 표층과 저층이 잘 혼합되어 전 수층에 영양염이 균일하고 높게 유지되었다(Table 1). 같은 이유로 전 수층에서 비교적 높은 엽록소-*a* 농도가 관찰되었고, 식물플랑크톤 현존량 또한 수층별로 일정하게 높게 나타

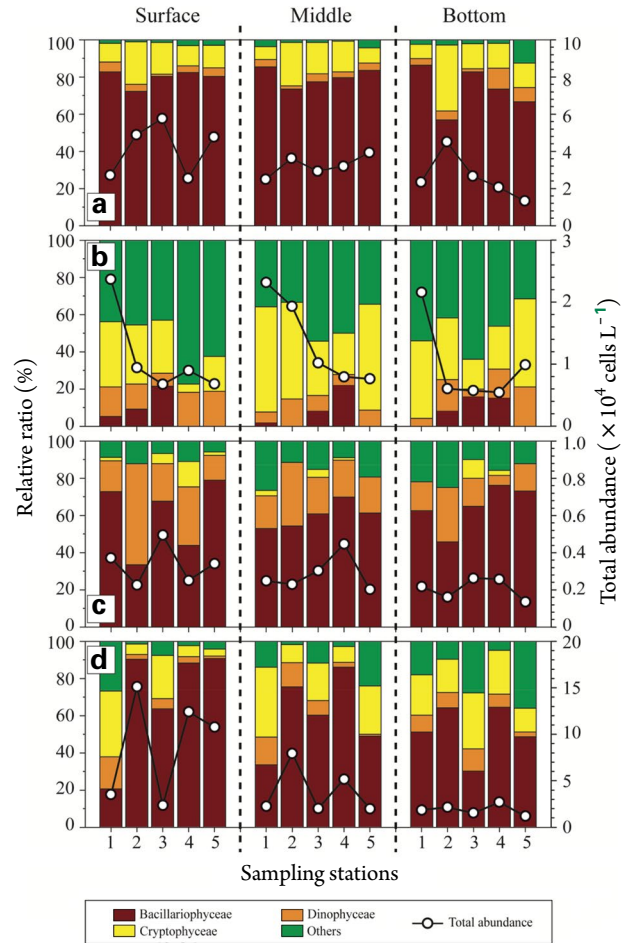


Fig. 4. Horizontal and vertical changes in total phytoplankton abundance and relative dominant phytoplankton at the class level. A: Winter; B: Spring; C: Summer; D: Autumn

난 것을 파악하였다.

춘계에는 총 15종의 식물플랑크톤이 출현하였다. 전층 평균 식물플랑크톤 현존량은 $1.04 \times 10^4 \text{ cells L}^{-1}$ 이며, 표층 식물플랑크톤 현존량은 $1.02 \times 10^4 \text{ cells L}^{-1}$, 중층 평균 $1.24 \times 10^4 \text{ cells L}^{-1}$, 저층 평균 $0.86 \times 10^4 \text{ cells L}^{-1}$ 로 나타났다. 정점과 수심간의 종조성은 유사하였으며, 현존량은 St. 1에서 전 수층 평균 $2.04 \times 10^4 \text{ cells L}^{-1}$ 로 비교적 높았다. 식물플랑크톤 종조성의 경우 미동정 편모류가 전체 평균 54.4%의 비율을 차지했으며, 다음으로 은편모조류(*Cryptomonas* spp.)가 23.8%의 비율을 차지하였다. 다양한 종류의 편모류가 출현하였으나, 현미경 검정으로 분류 및 동정이 극히 어려워 추후 분자생물학적인 방법의 분석이 필요하다. 그 외 구조류는 *Chaetoceros* spp., *Guinardia delicatula*, *Leptocylindrus danicus*, 와편모조류 *Gyrodinium*

spp.와 같은 다양한 종이 출현하였으나, 현존량은 극히 낮게 관찰되었다(Table 2). 춘계에 특이적으로 규조류의 비율이 매우 낮았으며, 그 외 편모조류와 와편모조류의 비율이 높았다. 기존에 다수 알려진 바와 같이 동해의 식물플랑크톤은 대부분 연안으로부터 외양으로 흐르는 동안 난류의 영향을 강하게 받는다(Hyun *et al.* 2009; Yoo and Park 2009). 일반적으로 봄철 남해 연안 및 동남해 용승으로 인한 높은 생산력의 영향으로 동해 연안을 비롯하여 울릉도-독도 인근의 전선역에서 높은 일차생산력을 보고하였다(Kim *et al.* 2007; Liu and Chai 2009; Lee *et al.* 2018). 또한, Baek *et al.* (2018)의 연구에서는 2017년 춘계 독도 부근 조사에서 침편모조류인 *Heterosigma akshiwu*의 대증식이 관찰되었는데, 이는 해류를 통해 유입된 *H. akshiwu*가 울릉도와 독도의 지형적 특성으로 인해 섬 부근에 집적되어, 섬 효과에 의한 용승으로 저층의 높은 영양염이 표층으로 유입되어 식물플랑크톤이 폭발적으로 증식한 결과로 판단되었다. 본 춘계 조사에서 수층별 영양염 분포를 보았을 때(Table 1), 암모늄을 제외한 모든 영양염이 저층에만 높은 농도를 보이고 표층과 중층에는 비교적 낮은 값을 보여, 저층으로부터 표층으로 공급되지 않은 것으로 보인다. 독도 연안 해역은 외해의 생태적 특성을 가지기 때문에, 수층 혼합으로 인한 저층으로부터 영양염 공급이 본 지역의 주된 영양염 공급원이다(Hyun *et al.* 2009). 하지만 앞서 언급한 바와 같이 춘계 특이적인 강풍이 관찰되지 않아 용승이 발달되지 않았으며, 이 영향으로 저층의 높은 영양염이 유광층까지 공급되지 않은 것으로 사료된다. 본 지역은 대기나 해류의 영향을 민감하게 받는 지역이므로 같은 계절에 수행된 조사에도 불구하고 명확히 다른 생태 특성을 보였다.

하계조사에서는 46종의 식물플랑크톤이 출현하였으며, 전 수층 평균 식물플랑크톤 현존량은 0.28×10^4 cells L⁻¹로 매우 낮게 관찰되었고, 표층에서 0.34×10^4 cells L⁻¹, 중층에서 0.29×10^4 cells L⁻¹, 저층에서 0.21×10^4 cells L⁻¹로 관찰되었다. 정점과 수심에 따른 현존량과 종조성 차이는 동계, 추계와 동일하게 크지 않았다. 종조성은 규조류가 전체 식물플랑크톤 중 평균 59.4%의 비율을 차지하였고, 와편모조류가 27.3%를 차지하였다. 규조류의 경우 다양한 종(*Chaetoceros* spp., *Guinardia striata*, *Rhizosolenia* spp., *Skeletonema* spp.)이 출현하였고, 비교적 높은 비율을 보인 와편모조류는 대부분 *Gyrodinium spirale*, *Gyrodinium* spp., *Gymnodinium* spp.로 구성되어졌다(Table 2). 하계는 독도

연구 중에서 가장 조사가 활발히 수행된 계절임에도 불구하고, 매우 낮은 일차생산력을 보이는 계절이다. 따라서 *Chaetoceros* 속, *Rhizosolenia* 속, *Talassiosira* 속, *Guinardia* 속, *Bacillaria* 속 등이 다수 출현하였고, 식물플랑크톤 현존량이 높지 않아 명확한 우점종이 구분되지 않았다(Jung *et al.* 2001; Kim and Shin 2007; Kim and Park 2009).

추계에는 57종으로 가장 다양한 식물플랑크톤이 출현하였으며, 전 수층의 평균 식물플랑크톤 현존량은 4.86×10^4 cells L⁻¹로 나타났으며, 표층 8.83×10^4 cells L⁻¹, 중층 3.87×10^4 cells L⁻¹, 저층 1.88×10^4 cells L⁻¹ 순서로 나타났다. 다른 계절과 달리 전 수층과 정점의 종조성은 유사하였지만 표층 식물플랑크톤 현존량이 중층과 저층에 비해 확연히 높은 분포 특성을 가졌다. 종조성은 규조류가 평균 70.8%로 우점하였고(*Pseudo-nitzschia* spp., *Chaetoceros* spp.), 다음으로 은편모조류(*Cryptomonas* spp.)가 14.9%를 차지하였다. 규조류 중에서도 *Pseudo-nitzschia* spp.가 극우점하여, St. 2, 4, 5에서는 매우 높은 식물플랑크톤 현존량을 보였다. 특히, St. 2의 표층에서 최대 9.28×10^4 cells L⁻¹로 매우 높은 현존량을 보였다(Table 2). 종조성에서 특이적으로 열대 지표종인 와편모조류 *Amphisolenia* sp.와 *Ornithocercus magnificus*가 출현하였다. 이 두 종은 우리나라 제주도 서부해역에서 관찰된 보고가 있다(Kim *et al.* 2008; Jung and Kim 2013). Kim *et al.* (2008)의 보고에서 *O. magnificus*의 점유율이 2월과 4월 사이 급격하게 감소하였으며, 9월부터 다시 출현하여 11월부터 급격하게 증가하는 추세를 보였다. 기존 동해에서의 본 종의 출현보고는 없으며, 단편 조사에서의 열대지표종 출현으로 해역의 온난화를 단정지을 수는 없다. 하지만, 남방기원 쿠로시오의 지류인 쓰시마난류가 추계에 강하게 유입될 가능성을 시사할 수 있으며, 과거에 비해 확장되거나 해류의 흐름이 변화하고 있는 사실을 유추해 볼 수 있다. 따라서 장기간의 물리화학적 측면과 함께 생물학적 측면의 통합 연구를 반복적으로 실시하여 이러한 환경과 생물의 변화가 어떤 상호작용이 있는지, 향후 이러한 변화가 다른 생물의 서식에 어떤 영향을 미칠지를 파악하기 위한 지속적인 독도이동에 관한 연구가 필요하다.

적 요

본 연구는 지리적인 이유로 부유생물 생태연구가 상대

적으로 진행되지 않은 독도 주변 해역에서 계절적 환경 특성과 더불어 부유생물 식물플랑크톤 군집구조 변화 특성을 파악하고자 하였다. 본 해역에서 4계절 동안 총 4문 72종의 식물플랑크톤이 출현하였으며, 전 계절 평균 식물플랑크톤 현존량은 2.38×10^4 cells L⁻¹로 낮은 값을 보였다. 본 지역은 인류에 의한 오염이 전무한 곳이므로 섬연안임에도 외양과 같은 생태특성을 보였다. 동계에는 33종의 식물플랑크톤이 출현하였고, 전체 평균 식물플랑크톤 현존량은 3.32×10^4 cells L⁻¹으로 비교적 높은 현존량을 보였다. 종조성은 규조류 *Chaetoceros lorenzianus*, *C. pseudocurvisetus* 등이 우점하였다. 춘계는 15종의 식물플랑크톤이 출현하였으며, 평균 식물플랑크톤 현존량은 1.04×10^4 cells L⁻¹로 춘계임에도 매우 낮은 현존량을 보였다. 종조성은 다양한 종류의 nano-flagellate가 출현하였다. 하계 46종의 식물플랑크톤이 출현하였으며, 식물플랑크톤 현존량은 0.28×10^4 cells L⁻¹로 낮았으며, *Chaetoceros* spp., *Guinardia striata*, *Rhizosolenia* spp., *Skeletonema* spp.가 출현하였다. 추계는 57종으로 가장 다양한 식물플랑크톤이 출현하였으며, 전 수층의 평균 식물플랑크톤 현존량은 4.86×10^4 cells L⁻¹, 규조류 *Pseudo-nitzschia* spp.가 크게 번무하여 4계절 중 가장 높은 생산력을 보였다. 또한, 종조성에서 특이적으로 열대 지표종인 와편모조류 *Amphisolenia* sp.와 *Ornithocercus magnificus*가 출현하여, 쓰시마난류가 추계에 강하게 유입된 것을 시사할 뿐만 아니라, 이들의 출현으로 과거에 비해 해류와 기후가 변화한 사실을 유추해 볼 수 있다. 따라서 독도의 지속가능한 이용을 위해서 독도를 중심으로 지속적인 물리·화학적 연구와 함께 생물학적 연구를 실시하여 독도 연안 생태계 변화 추이를 장기간 관찰할 필요가 있다.

사 사

본 논문은 “독도의 지속가능한 이용연구(PG50400)”로 수행되었습니다.

REFERENCES

Anderson DM, PM Glibert and JM Burkholder. 2002. Harmful algal blooms and eutrophication: Nutrient sources, composi-

tion, and consequences. *Estuaries* 25:704-726.

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.

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.

Chiba S, Y Hirota, S Hasegawa and T Saino. 2005. North-south contrasts in decadal scale variations in lower trophic-level ecosystems in the Japan Sea. *Fish. Oceanogr.* 14:401-412.

Guinder VA, CA Popovich, JC Molinero and J Marcovecchio. 2013. Phytoplankton summer bloom dynamics in the Bahía 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.

Hyun JH, D Kim, CW Shin, JH Noh, EJ Yang, JS Mok, SH Kim, HC Kim 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.

Jung JA, EY Jo, JH Cha, MK Kim and KT Kim. 2000. Seasonal variations of physico-chemical characteristics and phytoplanktonic pigments in coastal sea water from Ulleungdo and Dokdo Islands. *Algae* 16:325-335.

Jung JA, EY Jo, JH Cha, MK Kim and KT Kim. 2001. Community structures of phytoplanktons according to environmental factors in the coastal waters of Ulleungdo and Tokdo Islands. *Algae* 16:325-325.

Jung MM and HS Kim. 2013. Morphology of four dinoflagellate species (*Amphisolenia* and *Triposolenia*) newly recorded from Korea. *J. Kor. Soc. Fish. Mar. Edu.* 25:1239-1244.

Kim DS, KH Kim, JH Shim and SJ Yoo. 2007. The effect of anticyclonic eddy on nutrients and chlorophyll during spring and summer in the Ulleung Basin, East Sea. *J. Korean Ocean. Soc.* 12:280-286.

Kim HS, MM Jung and JB Lee. 2008. The Korean Peninsula warming based on appearance trend of tropical dinoflagellate species, genus *Ornithocercus*. *The Sea* 13:303-307.

Kim K, KR Kim, DH Min, Y Volkov, JH Yoon and M Takematsu. 2001. Warming and structural changes in the East (Japan) Sea: a clue to future changes in global oceans? *Geophys. Res. Lett.* 28:3293-3296.

Kim MG. 2011. Ecosystem changes of environmental condition and ecosystem in coastal area of Dokdo under climate change in Korea. *Pro. Kor. Soc. Env. Eco. Con.* 2:6-13.

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 S and SK Kang. 2000. Ecological variations and El Nino effects off the southern coast of the Korean Peninsula during the last three decades. *Fish Oceanogr.* 9:239–247.
- 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 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.
- 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, BS Park and SH Baek. 2018. Tidal influences on biotic and abiotic factors in the Seomjin River estuary and Gwangyang Bay, Korea. *Estuaries Coasts* 41:1–17.
- Lim YK and SH Baek. 2017. Seasonal variation of primary producer phytoplankton community in the vicinity of the oyster farming area between Tongyeong-Saryang Island. *Korean J. Environ. Biol.* 35:492–500.
- Liu G and F Chai. 2009. Seasonal and interannual variation of physical and biological processes during 1994–2001 in the Sea of Japan/East Sea: a three-dimensional physical-biogeochemical modeling study. *J. Mar. Syst.* 78:265–277.
- Oh SJ, JS Park, YH Yoon and HS Yang. 2009. Variation analysis of phytoplankton communities in northern Gamak Bay, Korea. *J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy* 15:329–338.
- Park JS, YH Yoon and SJ Oh. 2009. Variation characteristics of phytoplankton community in the mouth parts of Gamak Bay, Southern Korea. *Korean J. Environ. Biol.* 27:205–215.
- Parsons TR. 2013. *A Manual of Chemical & Biological Methods for Seawater Analysis*. Elsevier.
- 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.
- Shannon CE and W Wiener. 1949. *The Mathematical Theory of Communication*. University of Illinois Press, Chicago. p. 125.
- 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.
- Yamada K, J Ishizaka, S Yoo, HC Kim and S Chiba. 2004. Seasonal and interannual variability of sea surface chlorophyll a concentration in the Japan/East Sea (JES). *Prog. Oceanogr.* 61:193–211.
- 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.