

# 하계 마리안 소만 빙하후퇴에 따른 식물플랑크톤 변동성 분석

심초롬\* · 민준오\*\* · 이보연\*\*\* · 홍서연\*\*\*\* · 하선용\*\*\*\*\*

\*, \*\*\* 극지연구소 해양연구본부 기술원, \*\* 극지연구소 해양연구본부 연수연구원,  
\*\*\*\* 국립환경과학원 환경측정센터 전문연구원, \*\*\*\*\* 극지연구소 해양연구본부 책임연구원

## Phytoplankton Variability in Response to Glacier Retreat in Marian Cove, King George Island, Antarctica in 2021 - 2022 Summer

Chorom Shim\* · Jun-Oh Min\*\* · Boyeon Lee\*\*\* · Seo-Yeon Hong\*\*\*\* · Sun-Yong Ha\*\*\*\*\*

\*, \*\*\* Technician, Division of Ocean Sciences, Korea Polar Research Institute, Incheon 21990, Korea

\*\* Postdoc, Division of Ocean Sciences, Korea Polar Research Institute, Incheon 21990, Korea

\*\*\*\* Researcher, Environmental Measurement & Analysis Center, National Institute of Environmental Research, Incheon 22689, Korea

\*\*\*\*\* Principal Research Scientist, Division of Ocean Sciences, Korea Polar Research Institute, Incheon 21990, Korea

**요약** : 세종기지가 위치한 마리안 소만은 기후 변화로 인한 빙하후퇴로 다량의 용빙수가 유입되고 있다. 이러한 빙하후퇴에 따른 생태계 반응을 예측하기 위해, 해양 환경 변화의 지시자인 식물플랑크톤 생체량 및 크기 구조와 물리, 화학적 매개변수에 대한 현장 조사를 2021년 12월, 2022년 1월 두 차례 수행하였다. 2022년 1월의 수온과 염분은 평균  $1.41 \pm 0.13$  °C,  $33.9 \pm 0.10$  psu로 2021년 1월의 수온과 염분인  $0.87 \pm 0.17$  °C,  $34.1 \pm 0.12$  psu보다 상대적으로 고온, 저염의 양상을 보였다. 조사시기 동안 영양염류는 대체로 높은 농도를 보여 식물플랑크톤의 제한요소로 작용하지 않은 것으로 판단된다. 식물플랑크톤 생체량의 지표인 엽록소는 2021년 12월, 2022년 1월에 각각  $1.03 \pm 0.64$   $\mu\text{g L}^{-1}$ ,  $0.66 \pm 0.15$   $\mu\text{g L}^{-1}$ 로 나타났으며 부유물질은 전체 조사기간 평균  $24.9 \pm 3.54$   $\text{mg L}^{-1}$ 로 나타났다. 부유물질의 농도가 높은 소만 내측에서 엽록소는 낮은 농도를 보였는데 이는 용빙수로부터 유입되는 고농도의 부유물질로 인해 수층 내 빛이 강하게 제한되어 식물플랑크톤의 성장이 저해된 것으로 판단된다. 또한, 빙벽 주변 정점에서 크기가 작은 미소 식물플랑크톤이 전체 식물플랑크톤 생체량에서 70% 이상 차지하는 것으로 나타났으며 이는 용빙수 유입으로 유발된 저조도 환경에서 미소 식물플랑크톤의 기여도가 증가할 수 있음을 시사한다. 따라서 본 연구는 빙하후퇴 지역에서 유입되는 담수와 부유물질이 식물플랑크톤의 생체량 및 군집구조 조절 요인이 될 수 있음을 시사하며, 결과 자료는 추후 마리안 소만의 탄소순환 변동을 파악하는 기초자료로 활용될 수 있다.

**핵심용어** : 식물플랑크톤, 부유물질, 마리안 소만, 빙하후퇴, 남극

**Abstract** : Rapid climate change has resulted in glacial retreat and increased meltwater inputs in the Antarctic Peninsula, including King George Island where Marian Cove is located. Consequently, these phenomena are expected to induce changes in the water column light properties, which in turn will affect phytoplankton communities. To comprehend the effects of glacial retreat on the marine ecosystem in Marian Cove, we investigated on phytoplankton biomass (chlorophyll-*a*, chl-*a*) and various environment parameters in this area in December 2021 and January 2022. The average temperature at the euphotic depth in January 2022 ( $1.41 \pm 0.13$  °C) was higher than that in December 2021 ( $0.87 \pm 0.17$  °C). Contrastingly, the average salinity was lower in January 2022 ( $33.9 \pm 0.10$  psu) than in December 2021 ( $34.1 \pm 0.12$  psu). Major nutrients, including dissolved inorganic nitrogen, phosphate, and silicate, were sufficiently high, and thus, did not act as limiting factors for phytoplankton biomass. In December 2021 and January 2022, the mean chl-*a* concentrations were  $1.03 \pm 0.64$  and  $0.66 \pm 0.15$   $\mu\text{g L}^{-1}$ , respectively. The mean concentration of suspended particulate matter (SPM) was  $24.9 \pm 3.54$   $\text{mg L}^{-1}$  during the study period, with elevated values observed in the vicinity of the inner glacier. However, relative lower chl-*a* concentrations were observed near the inner glacier, possibly due to high SPM load from the glacier, resulting in reduced light attenuation by SPM shading. Furthermore, the proportion of nanophytoplankton exceeded 70% in the inner cove, contributing to elevated mean fractions of nanophytoplankton in the glacier retreat marine ecosystem. Overall, our study indicated that freshwater and SPM inputs from glacial meltwater may possibly act as main factors controlling the dynamics of phytoplankton communities in glacier retreat areas. The findings may also serve as fundamental data for better understanding the carbon cycle in Marian Cove.

**Key Words** : Phytoplankton, Suspended particulate matter, Marian Cove, Glacier retreat, Antarctica

\* First Author : chorom@kopri.re.kr, 032-760-5444

† Corresponding Author : syha@kopri.re.kr, 032-760-5341

## 1. 서론

남극 반도는 지난 50년 동안 연평균 기온이 1.5 °C 이상 상승하여 가장 급격한 기후 변화가 일어나고 있는 지역 중 하나이다(Clark et al., 2007). 남극반도의 온난화는 수온 상승, 빙하후퇴에 따른 용빙수의 유입 등을 유발해 육상 환경을 비롯하여 해양 환경에도 연쇄적인 영향을 끼친다(Kejna et al., 2013). 남극 반도에서 빙하후퇴 속도는 1945년 이후 계속 가속화되고 있으며, 마리안 소만이 위치한 킹조지섬의 용빙수 유입량은 2002년 1,815 hm<sup>3</sup>에서 2006년 3,116 hm<sup>3</sup>로 약 두 배 증가하였다(Cook et al., 2005; Dominguez and Eraso, 2007). 빙하로부터 유입되는 용빙수는 담수 플럭스를 증가시켜 빙하후퇴 지역 수층의 성층화를 강화시키는 것은 물론 고농도의 입자성 물질들도 함께 유입되어 수괴의 광 특성을 변화시킨다(Dierssen et al., 2002; Vaughan, 2006). 특히, 빛을 에너지원으로 하고, 온도에 큰 영향을 받는 식물플랑크톤은 용빙수 유입으로 유발된 환경 변화에 가장 민감하게 반응한다(Kang et al., 2000).

남극 식물플랑크톤은 해양 생태계의 일차생산자로서 그들을 먹이원으로 삼는 상위 영양단계에 에너지를 전달하는 매우 중요한 역할을 수행하고 있다(Deppler and Davidson, 2017). Montes-Hugo et al.(2009)은 서남극반도 크릴과 펭귄 개체수의 변화를 유발한 원인이 식물플랑크톤 생체량의 지역적 차이라 보고했으며, 이는 식물플랑크톤의 변화가 수층 생태계 전체의 물질순환과 에너지 흐름을 변경시킬 수 있음을 시사한다.

마리안 소만(Marian Cove)은 최근 서남극에서 가장 빠르게 빙하가 후퇴하고 있는 해역으로, 이로 인해 수층 생태계 변화도 빠르게 일어나 해양 생물학적 “hot spot”인 피요르드로 알려져 있다(Gutt et al., 2021). 마리안 소만에서 조수빙하(tidewater glacier)는 1956년부터 2012년까지 약 1.7 km 후퇴했으며(Lee et al., 2008), 빙하후퇴에 따른 수온과 염분의 변화 및 혼탁한 담수 플럭스의 증가는 마리안 소만 식물플랑크톤과 저서생물의 생체량 및 군집구조의 변화를 야기했다(Ahn et al., 2016; Jeon et al., 2021; Kim et al., 2021; Moon et al., 2015).

Lee et al.(2015)에 의해 크기가 작은 초미소 및 미소 식물플랑크톤의 기여도가 증가하는 장기 모니터링 결과가 보고되었고, Kim et al.(2021)은 용빙수 유입에 수반된 고농도 부유물질의 영향으로 향후 미소 식물플랑크톤이 증가될 수 있음을 밝혔다. 또한, Bae et al.(2021)은 마리안 소만 빙하후퇴 지역에서 우점하는 *Fragilaria striatula* 등의 규조류가 급격한 환경 변화에 민감하게 반응하는 지시종이라 보고하였으며, 더 나아가 마리안 소만이 기후 변화의 영향을 평가하고 모

니터링할 수 있는 생태계 모델 지역으로서의 가능성이 있음을 시사하였다.

이러한 선행연구 결과들에 비춰볼 때 기후 변화에 대한 생태계 반응을 예측하기 위해서는 해양 환경 변화의 지시자인 식물플랑크톤의 생체량 및 구조 파악은 매우 중요하다. 따라서 본 연구는 마리안 소만의 물리적, 화학적 매개변수와 식물플랑크톤 생체량 및 크기 구조 변화 사이의 상관관계를 파악하고 향후 빙하후퇴 등 기후 변화에 의한 마리안 소만 수층 생태계 변화를 이해하는 데 필수적인 자료를 제시하고자 수행되었다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1 연구 해역

세종기지가 위치한 킹조지섬의 마리안 소만은 길이 4.5 km, 폭 1.5 km의 만으로 최대 수심은 약 120 m이다(Yoo et al., 2015). 소만 외측은 맥스웰만과 접하고 있어 맥스웰만 해수가 소만 안으로 유입되고 소만 내측은 조수빙하에 둘러싸여 하계 동안 연안을 따라 용빙수역이 발달하는 특징이 있다(Mullins and Priddle, 1987; Yoo et al., 1999). 마리안 소만의 연간 식물플랑크톤 생체량 분포 패턴은 매년 다르게 나타나지만 주로 11월 말부터 1월 사이에 식물플랑크톤 생체량 최대 농도가 나타난다(Kang et al., 2009; Lee et al., 2015). 식물플랑크톤 군집 구조의 계절적 변동은 크기가 큰(> 20 μm) 규조류가 여름에 우세하고 초미소 식물플랑크톤과 미소 식물플랑크톤(< 20 μm)이 겨울에 우세한 특징이 관찰된다(Jeon et al., 2021; Kang et al., 1997; 2002).

하계 마리안 소만의 용빙수 증가에 따른 물리, 화학적 매개변수들이 식물플랑크톤 크기와 생체량에 미치는 영향을 파악하기 위해 총 5개 정점(St-19, 03, 07, 10, 16)을 선정하여 2021년 12월 30일, 2022년 1월 25일 두 차례 현장 관측을 실시하였다. 2022년 1월 25일 조사에서는 내측 정점인 St-16에 접근이 불가하여 St-13에서 현장 관측을 수행하였다(Fig. 1).

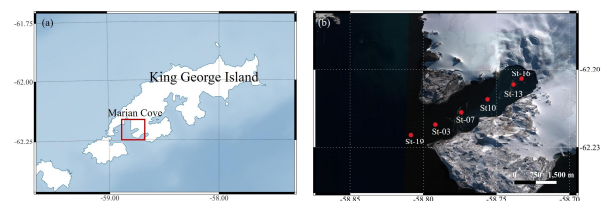


Fig. 1. A map of the Study area and sampling sites in Marian Cove, King George Island during 2021 - 2022 summer. (a) King George Island; (b) Sampling sites in Marian Cove.

## 2.2 환경요인 및 식물플랑크톤 분석 방법

연구 해역 해수의 물리적 성분인 수온과 염분은 현장에서 CTD (AML-3 CTD, AML Oceanographic, Canada)를 사용하였으며 각 정점마다 투명도판(Secchi disk)을 이용하여 표층 대비 100%, 30%, 1%의 광수심을 선정하였고 해수 펌프(PU-S600M, Wilo, Korea)로 해당 수심의 해수 샘플을 채취하였다.

해수 중 무기 영양염 샘플은 10% 염산(HCl 35%)으로 세척된 polyethylene 병에 유리섬유 여과지(GF/F, 0.7 μm)로 여과된 해수 10 mL를 채우고 분석 시까지 냉동고(-20 °C)에 보관하였다. 무기 영양염 농도(DIN (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>+NO<sub>3</sub><sup>-</sup>+NH<sub>4</sub><sup>+</sup>), PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>, SiO<sub>2</sub>)는 제조사 매뉴얼에 따라 영양염 자동분석기(QuAatro, SEAL Analytical, USA)를 이용하여 측정하였다(Parsons et al., 1984).

부유물질(suspended particulate matter, SPM)의 농도는 0.5-1 L의 해수 시료를 450 °C에 6시간 태워 미리 무게를 정량한 유리섬유 여과지(GF/F, 0.7 μm)에 여과한 후, 여과지를 건조기(60 °C)에서 24시간 건조한 후 전자저울을 이용하여 다시 정량하였다.

식물플랑크톤 생체량의 지표색소인 엽록소(chlorophyll-a, chl-a) 분석을 위한 시료는 현장해수 0.5 - 1 L를 채수한 후 450 °C에 6시간 태운 유리섬유 여과지(GF/F, 0.7 μm)에 여과하였다. 여과지는 광분해를 방지하기 위해 알루미늄 호일로 감싼 후 분석 전까지 냉동 보관(-20 °C) 후 측정하였다. 입자성 유기물 내 색소추출은 100% 아세톤 3 mL를 첨가하여 ultra sonicator (30 sec, 50 W)로 세포를 분쇄하였으며, 분쇄 시 손실을 보정하기 위해 Cantaxanthin (internal standard)을 20 μL 첨가하였다. 분쇄된 샘플은 냉암소(4 °C)에서 추출 용매로 12시간 이상 추출하였다. 추출된 색소는 syringe filter (PTFE, 0.20 μm, hydrophobic)를 이용하여 여과 후 1 mL를 분취하여 water packing (200 μL 3차 증류수 혼합)하여 분석하였다. 고성능 액체 크로마토그래피(HPLC, 1260 Infinity II LC system, Agilent, USA)의 분석조건은 Table 1에 나타내었으며(Mendes et al., 2007; Van Heukelem et al., 1994), 엽록소의 피크 동정은 표준 물질과 머무름 시간(retention time)을 비교하여 결정하였다. 색소의 정량은 Park and Park(1997)에 의해 보고된 계산식을 이용하였다.

Table 1. Column and mobile phase composition of high performance liquid chromatography (HPLC)

Column	ZORBAX Eclipse XDB-C18 (4.6 × 150 mm, 5 μm)
Solvent A	Methanol:0.5 M Ammonium acetate (85:15)
Solvent B	Methanol:Acetone (80:20)
Solvent C	Ethyl acetate
Flow rate	0.6 mL/min
Injection volume	100 μL

식물플랑크톤은 크기 별로 초미소 식물플랑크톤(0.7 - 2 μm), 미소 식물플랑크톤(2 - 20 μm) 및 미세 식물플랑크톤(20 - 200 μm)으로 분류하였으며, 각 공경 크기가 다른 필터지를 이용하여 해수 시료를 여과 후 90% 아세톤으로 냉암소에서 12시간 이상 추출 후 형광분석기로 분석하였다(Trilogy, Turner Design, USA). 식물플랑크톤 크기별 엽록소 산출은 총 엽록소 정량값에서 상대적 비율로 계산하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 하계 마리안 소만 수온 및 염분의 시공간적 분포

조사기간 동안 유광층 내에서 관측된 수온 및 염분을 Table 2와 Fig. 2에 나타내었다. 2022년 1월의 유광층 내 평균 수온은 1.41 ± 0.13 °C (1.24 - 1.68 °C)로 2021년 12월의 평균 수온인 0.87 ± 0.17 °C (0.50 - 1.07 °C)보다 약 0.5 °C 높은 결과를 보인다. 유광층 내 평균 염분은 2022년 1월이 33.9 ± 0.10 psu (33.7 - 34.1 psu)로 나타나 2021년 12월의 34.1 ± 0.12 psu (33.8 - 34.2 psu)보다 소폭 낮았다(Table 2). 2022년 1월과 2021년 12월의 유광층 내 결과를 비교했을 때 수온(t-test; t = -9.335, p < 0.01)과 염분(t-test; t = 5.098, p < 0.01) 모두 통계적으로 유의미한 차이를 보였다. 본 연구에서는 수온에 직접적으로 영향을 끼치는 기온 자료를 제시하지 않았지만, Chung et al.(2004)에 의해 보고된 14년간 장기 모니터링 결과에서 마리안 소만 1월의 월평균 기온이 12월보다 약 1 °C 높은 것으로 나타났다. 따라서 본 연구 시기 동안 남극 여름이 진행되면서 강해진 태양 복사열이 표층으로 전달되어(Kang et al., 1997) 2022년 1월의 표층 수온이 증가한 것으로 보인다. 또한, 여름철 마리안 소만은 내측 빙벽으로부터 용빙수의 유입이 증가하여 소만 내 전체적으로 저염 표층수가 발달하는 특징이 있다(Yoo et al., 2015). 본 연구에서도 2022년 1월 소만 내 모든 정점에서 34 psu 이하의 표층수가 발달하는 것을 확인하였다(Fig. 2, 3(d)). 수직적 분포에서도 소만 내 전체적으로 더딘 용빙수의 영향으로 2022년 1월이 2021년 12월보다 고온, 저염의 경향을 보여 염분에 의한 성층화가 강하게 이루어진 것을 확인하였으며(Fig. 3) 이는 이전에 수행되었던 연구와 유사하다(Llanillo et al., 2019).

공간적으로 2021년 12월과 2022년 1월 모두 소만 외측에서 내측보다 상대적으로 고온, 고염의 표층수가 관찰되었으며(Fig. 2), 이는 인접해 있는 맥스웰만에서 유입되는 modified-upper circumpolar deep water (m-UCDW)의 영향을 받은 것으로 보인다(Kim et al., 2021; Llanillo et al., 2019).

Table 2. Information of sampling locations, temperature (T), salinity (S), nutrients (DIN, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>, SiO<sub>2</sub>), suspended particulate matter (SPM) and chlorophyll-a (Chl-a) in Marian Cove during 2021 – 2022 summer. DIN: NO<sub>2</sub><sup>-</sup>+NO<sub>3</sub><sup>-</sup>+NH<sub>4</sub><sup>+</sup>

Date	Station (Latitude, Longitude)	Depth (m)	Light (%)	T (°C)	S (psu)	DIN (μM)	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> (μM)	SiO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (μM)	SPM (mg L <sup>-1</sup> )	Chl-a (μg L <sup>-1</sup> )	
2021.12.30	St-19 (-62.221, -58.808)	0	100	1.02	34.1	25.2	1.89	68.7	22.2	1.32	
		4	30	1.00	34.1	24.8	1.87	67.0	22.5	1.17	
		16	1	1.00	34.2	25.4	1.79	70.6	22.0	2.24	
	St-03 (-62.218, -58.792)	0	100	0.98	34.1	25.3	1.87	70.3	23.7	0.96	
		6	30	0.93	34.1	25.1	1.90	69.9	21.9	1.71	
		22	1	1.07	34.2	25.3	1.87	70.2	22.8	1.30	
	St-07 (-62.214, -58.774)	0	100	0.91	34.1	25.0	1.94	65.3	25.9	0.52	
		5	30	0.95	34.1	25.2	1.92	69.3	25.8	0.68	
		19	1	0.99	34.2	25.8	1.90	72.3	23.8	2.24	
	St-10 (-62.210, -58.756)	0	100	0.81	34.0	25.8	1.76	71.1	23.5	0.37	
		4	30	0.87	34.1	25.6	1.77	71.1	21.9	0.46	
		16	1	0.92	34.2	25.0	1.92	68.5	23.7	1.33	
	St-16 (-62.203, -58.733)	0	100	0.50	33.8	25.5	1.97	69.0	34.3	0.26	
		1	30	0.54	33.8	25.5	1.81	71.9	33.7	0.36	
		3	1	0.63	34.0	25.6	1.92	71.3	27.2	0.47	
	Average (± SD)				0.87 (± 0.17)	34.1 (± 0.12)	25.3 (± 0.30)	1.87 (± 0.06)	69.8 (± 1.82)	25.0 (± 3.85)	1.03 (± 0.64)
	2022.01.25	St-19 (-62.221, -58.808)	0	100	1.65	33.9	25.4	1.50	53.8	22.8	0.93
			2	30	1.60	33.9	24.2	1.77	62.1	22.1	0.70
8			1	1.68	34.1	25.5	1.87	64.2	20.5	0.99	
St-03 (-62.218, -58.792)		0	100	1.44	33.7	24.6	1.66	64.9	23.9	0.58	
		1	30	1.44	33.7	24.6	1.82	66.2	26.0	0.59	
		3	1	1.44	33.9	24.4	1.79	67.3	23.8	0.81	
St-07 (-62.214, -58.774)		0	100	1.27	33.8	25.3	1.84	65.4	23.9	0.55	
		1	30	1.24	33.8	25.7	1.87	67.6	25.3	0.51	
		3	1	1.24	33.9	25.5	1.87	68.2	24.1	0.67	
St-10 (-62.210, -58.756)		0	100	1.38	33.8	25.3	1.84	66.0	22.3	0.45	
		1	30	1.39	33.8	25.1	1.84	66.4	24.0	0.55	
		5	1	1.32	34.0	25.4	1.79	64.8	25.4	0.56	
St-13 (-62.205, -58.738)		0	100	1.38	33.8	25.2	1.84	65.4	32.6	0.61	
		1	30	1.37	33.9	25.4	1.76	66.6	31.1	0.68	
		5	1	1.38	34.0	24.8	1.84	61.5	-	0.67	
Average (± SD)				1.41 (± 0.13)	33.9 (± 0.10)	25.1 (± 0.44)	1.79 (± 0.09)	64.7 (± 3.42)	24.8 (± 3.19)	0.66 (± 0.15)	

## 하계 마리안 소만 빙하후퇴에 따른 식물플랑크톤 변동성 분석

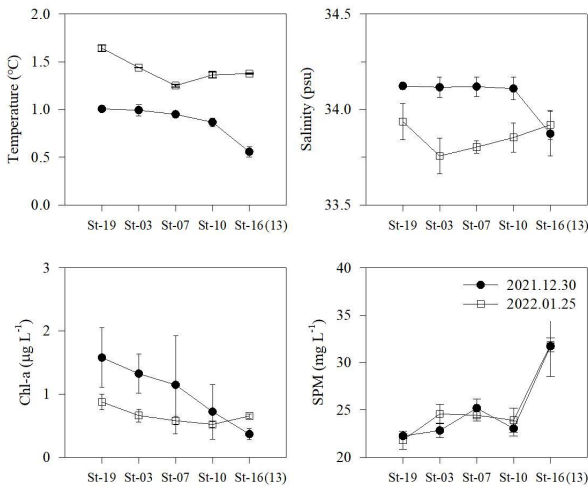


Fig 2. Spatio-temporal distributions of temperature, salinity, chlorophyll-a (Chl-a) and suspended particulate matter (SPM) in euphotic depth in Marian Cove, King George Island during 2021 - 2022 summer.

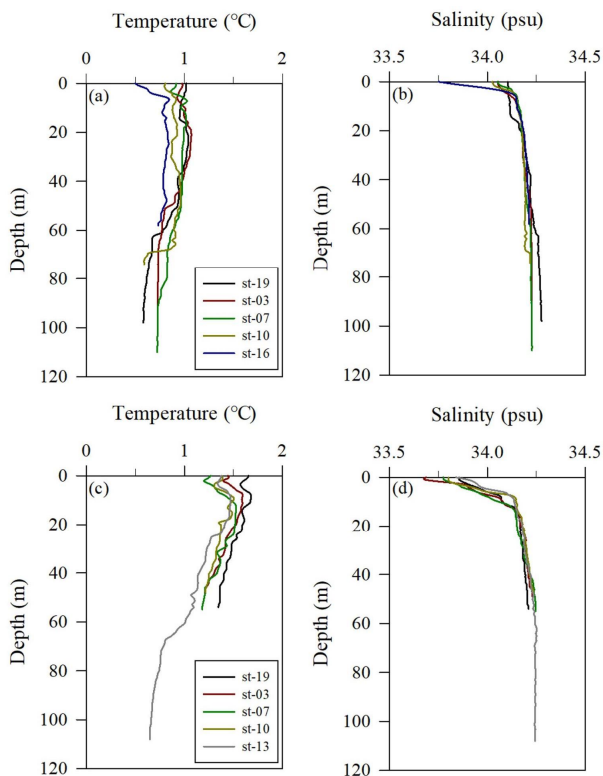


Fig 3. Physical parameters (temperature, salinity) measured in Marian Cove, King George Island during 2021 - 2022 summer. (a-b) 2021.12.30; (c-d) 2022.01.25.

### 3.2 하계 마리안 소만 영양염류 시간적 분포

전체 조사기간 동안 유광층 내 총 용존무기질소 농도는 24.2 - 25.8  $\mu\text{M}$  (평균  $25.2 \pm 0.40 \mu\text{M}$ )의 분포를 보였으며 2021년 12월 평균 농도( $25.4 \pm 0.30 \mu\text{M}$ )와 2022년 1월의 평균 농도( $25.1 \pm 0.44 \mu\text{M}$ )가 비슷한 농도를 보였다(Table 2, Fig. 4). 용존 무기인은 2021년 12월에는 평균  $1.87 \pm 0.06 \mu\text{M}$ 으로, 2022년 1월에는 평균  $1.79 \pm 0.09 \mu\text{M}$ 으로 나타났으며 전체 조사기간의 농도 범위는 1.50 - 1.97  $\mu\text{M}$  (평균  $1.83 \pm 0.09 \mu\text{M}$ )으로 작은 농도 범위를 보였다(Table 2, Fig. 4). 조사 기간의 용존규산염 범위는 53.8 - 72.3  $\mu\text{M}$  (평균  $67.2 \pm 3.73 \mu\text{M}$ )로 2021년 12월의 평균 규산염 농도( $69.8 \pm 1.82 \mu\text{M}$ )가 2022년 1월( $64.7 \pm 3.42 \mu\text{M}$ )보다 소폭 높게 나타났다(Table 2, Fig. 4).

하계 마리안 소만은 영양염류가 표층해수 중에 풍부하여 식물플랑크톤의 생물량을 제한하는 요소로 작용하지 않으며(Kim et al., 2021; Lee et al., 2015; Yang, 1990) 본 연구에서도 이전 연구와 유사한 높은 영양염 농도가 나타났다(Table 2, Fig. 4). 총 용존무기질소와 용존무기인 농도는 2021년 12월과 2022년 1월의 차이가 크지 않았으나 용존규산염 농도는 통계적으로 2022년 1월 농도가 소폭 낮게 나타났다(Mann-Whitney Rank Sum Test,  $p < 0.001$ , Fig. 4). 남극 연안 지역에서 영양염류의 농도는 플랑크톤 군집구조에 의해서 달라질 수 있는데 특히 크기가 큰 규조류에 의해 여름철 대번성이 이루어지는 마리안 소만의 경우 규조류의 성장에 필요한 규산염이 크게 감소한다(Kim et al., 2021; Lee et al., 2015; Weber and Deutsch, 2010). 본 연구에서도 1월 평균 규산염 농도가 약 65  $\mu\text{M}$ 까지 감소하는 것으로 나타났으며 이는 Lee et al.(2015)에 의해 수행된 2001 - 2003년 마리안 소만 모니터링 연구의 1월 평균 규산염 농도(약 63  $\mu\text{M}$ )와 유사하다.

### 3.3 하계 마리안 소만 부유물질 및 식물플랑크톤 생체량의 시공간적 분포

2021 - 2022년 하계 부유물질(SPM)의 농도 범위는 20.5 - 34.3  $\text{mg L}^{-1}$  (평균  $24.9 \pm 3.54 \text{mg L}^{-1}$ )로 나타났으며 2021년 12월의 평균 농도는  $25.0 \pm 3.85 \text{mg L}^{-1}$ 로 2022년 1월의 평균 농도인  $24.8 \pm 3.19 \text{mg L}^{-1}$ 과 비슷하게 나타났다(Table 2). 2021년 12월과 2022년 1월 모두 소만 내측 빙벽 주변 정점(St-16, 13)에서 소만 외측 정점(St-19)보다 확연히 높은 농도를 보였다(Fig. 2).

유광층 내 식물플랑크톤 엽록소 농도는 전체 조사시기 동안 0.26 - 2.24  $\mu\text{g L}^{-1}$  (평균  $0.84 \pm 0.50 \mu\text{g L}^{-1}$ )로 대체로 낮은 농도를 보였다(Table 2, Fig. 2). 이는 1996년부터 2011년까지 마리안 소만의 장기 모니터링 평균 엽록소 농도인 1.55  $\mu\text{g L}^{-1}$  (Jeon et al., 2021)보다 소폭 낮은 농도이다. 2021년 12월의

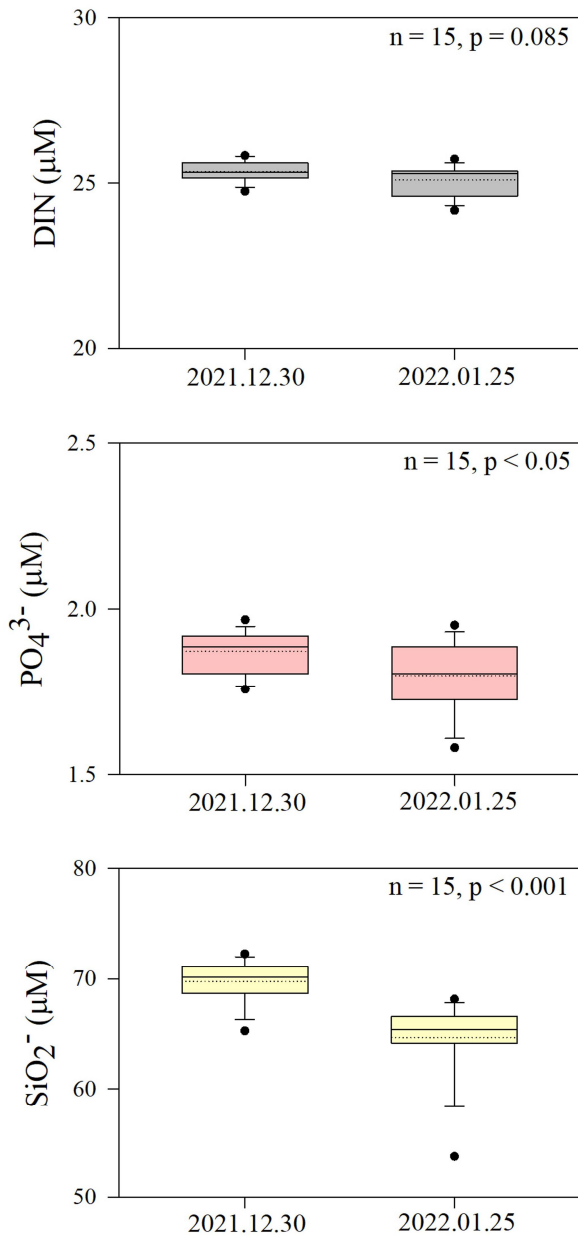


Fig 4. Boxplots of the data for dissolved inorganic nitrogen ( $\text{NO}_2^- + \text{NO}_3^- + \text{NH}_4^+$ ), phosphate ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) and silicate ( $\text{SiO}_2^{2-}$ ) concentration with in euphotic zone. Solid and dashed lines represent median and mean values, respectively.

식물플랑크톤 엽록소 농도는 평균  $1.03 \pm 0.64 \mu\text{g L}^{-1}$ 로 2022년 1월의 평균 엽록소 농도인  $0.66 \pm 0.15 \mu\text{g L}^{-1}$  보다 높았다 (Table 2, Fig. 2). 조사시기 동안 식물플랑크톤 크기 별 생체량 비율을 Fig. 5에 도시하였다. 2021년 12월 결과에서 빙벽과 가까운 정점(St-16)을 제외한 모든 정점에서 미세 식물플

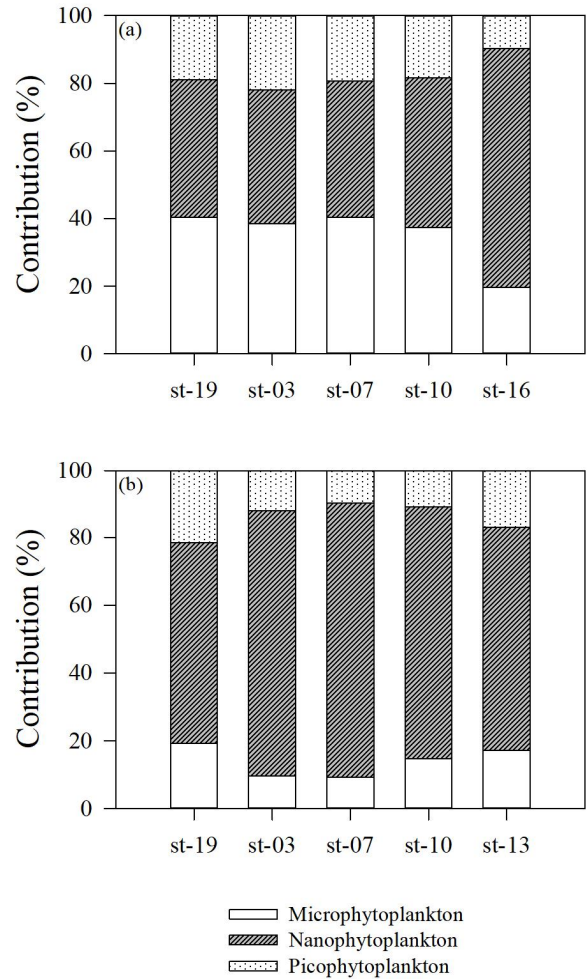


Fig 5. Percentage of size-fractionated chlorophyll-a among the sampling stations in Marian Cove, King George Island during 2021 - 2022 summer. (a) 2021.12.30; (b) 2022.01.25.

랑크톤(20 - 200 μm)과 미소 식물플랑크톤(2 - 20 μm)의 비율이 약 40%로 비슷하게 나타났으나 2022년 1월 결과에서는 모든 정점에서 미소 식물플랑크톤의 비율이 크게 증가하여 최대 80% 이상(St-07)을 차지하는 것으로 나타났다(Fig. 5). Lee et al.(2015)는 1996 - 2008년 마리안 소만 장기 모니터링 결과를 통해 연간 식물플랑크톤 생체량에서 미소 식물플랑크톤이 차지하는 비율이 약 60% 이상이라 보고하였으며, Kang et al.(1997)은 1996년 수행된 월간 모니터링 결과에서 12월 식물플랑크톤 대변성 이후 미소 식물플랑크톤 비율이 증가하는 것을 보고하였다. 이는 본 연구 결과와 유사하며 식물플랑크톤 대변성 시기의 엽록소 농도가  $7.5 - 8.25 \mu\text{g L}^{-1}$ 이며 주로 크기가 큰 미세플랑크톤이 우점한 결과가 보고된 바(Kim et al., 2021; Jeon et al., 2021), 본 연구 시기는 식물플랑크톤 대변성 시기 이후(post-bloom)라고 판단된다.

### 3.4 하계 마리안 소만 식물플랑크톤 생체량과 환경 매개 변수와의 상관성 분석

식물플랑크톤 생체량은 2021년 12월과 2022년 1월 모두 소만 외측 정점(St-19)에서 최고 농도가 나타나고 내측 정점(St-16, 13)에서 대체로 낮은 농도를 보여 부유물질의 농도 분포와는 반대의 양상이 관찰되었다(Fig. 2). 마리안 소만 내측에서의 용빙수 유입은 담수와 함께 빙벽으로부터 기인하는 부유물질을 수반하는데 본 연구에서도 내측 정점(St-16, 13)에서 저염의 고탁도(<34 psu, >30 mg L<sup>-1</sup>) 표층수가 발달하는 것을 확인하였다(Yoo et al., 1999; 2015). 또한, Yoo et al.(2015)는 소만 내측 빙벽의 용빙으로 인해 담수와 부유물질이 유입되어 고탁도 표층수가 발달하며 외측으로 갈수록 용빙수의 영향이 감소한다고 보고하였으며 본 연구에서도 소만 내측에서 외측으로 갈수록 염분은 높아지고 부유물질의 농도는 낮아지는 경향이 나타났다. 수층으로 유입된 입자성 부유물질은 수층의 탁도를 증가시켜 수층 내로 투과되는 빛을 강하게 제한하는 것으로 보고되었다(Garcia et al., 2019; Meredith et al., 2018; Schloss et al., 2002). 또한, 담수 유입에 의해 성층화가 강해지면서 식물플랑크톤이 빛 저해(light inhibition) 환경에 지속적으로 노출되어 식물플랑크톤의 성장에 부정적인 영향을 끼칠 수 있다(Kim et al., 2021). 빛이 제한된 환경에서는 식물플랑크톤의 빛 가용성(light availability)이 저하되므로 식물플랑크톤의 생산력이 감소하게 되는데(Schloss et al., 2012) 본 연구에서도 부유물질과 식물플랑크톤 생체량이 유의한 상관관계( $r = -0.442$ ,  $p < 0.05$ )를 가지는 것을 확인하였다(Fig. 6).

마리안 소만과 같이 용빙수 유입이 활발한 피요르드인 Andvord 만에서 크기가 큰 규조류가 대부분 외측에서 발견되고 크기가 작은 편모조류가 내측에서 우점하는 결과가 보고되었다(Pan et al., 2020). 또한, Pan et al.(2020)은 덤러닝 모델을 통한 분석 결과 작은 크기의 편모조류가 염분 변화에 민감하게 반응한다고 예상하였고, 저염 환경에서 편모조류가 규조류에 비해 우세할 것(dominant)이라는 예측 결과를 보여주었다. 본 연구에서도 2021년 12월 빙하후퇴 지역인 내측 정점(St-16)에서 미소 식물플랑크톤의 비율이 70%로 높았으며(Fig. 5) 염분이 낮아질수록 식물플랑크톤 생체량이 감소하는 양상( $r = 0.628$ ,  $p < 0.001$ )이 나타났다(Fig. 6). 또한, 작은 크기의 식물플랑크톤은 저조도 환경에서 빛을 더 효율적으로 이용한다는 연구가 보고된 바(Finkel, 2001), 본 연구 결과는 추후 마리안 소만의 빙하후퇴 지역에서 작은 미소 식물플랑크톤의 기여도가 증가할 수 있다는 가능성을 시사한다.

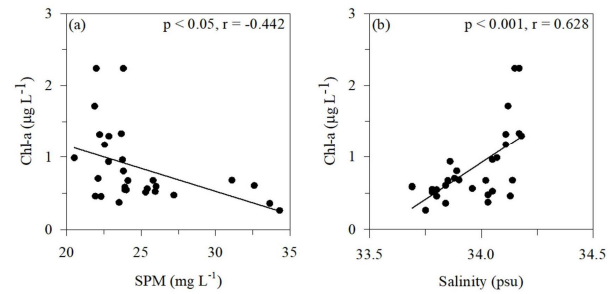


Fig 6. Relationships between (a) chlorophyll-a (Chl-a) and suspended particulate matter (SPM), and (b) between Chl-a and salinity in Marian Cove, King George Island during 2021 - 2022 summer.

서남극 반도 연안지역은 기후 변화에 의한 빙하후퇴와 생태계의 반응을 예측할 수 있는 모델 지역으로 간주되며 특히, 마리안 소만은 최근 빙하후퇴 속도가 27.2 m yr<sup>-1</sup>로 매년 빠르게 빙하가 후퇴하고 있다(Kim et al., 2022; Smith et al., 2008). 본 연구 결과는 마리안 소만 빙하후퇴 지역에서 용빙수로부터 유입된 담수와 부유물질이 식물플랑크톤 생체량 및 군집구조 조절 요인으로 작용할 수 있다는 가능성을 제시한다. 또한, 크기가 작은 미소 식물플랑크톤의 증가함에 따라 크기가 큰 규조류에 의해 흡수되었던 이산화탄소의 양이 감소될 수 있고(Rozema et al., 2017) 더 나아가 미소 식물플랑크톤의 증가는 상위 영양단계인 크릴과 펭귄의 개체수에 영향을 끼치는 결과가 보고되었으므로(Montes-Hugo et al., 2009; Schofield et al., 2010) 식물플랑크톤의 변동은 남극 먹이망에서 매우 중요하다. 따라서 본 연구 결과는 마리안 소만을 비롯한 서남극 반도의 빙하후퇴에 의한 탄소순환 및 먹이망 변동 예측을 위한 모델에 적용할 수 있는 기초자료로 활용될 수 있다.

## 4. 결론

본 연구에서는 2021 - 2022년 하계 마리안 소만에서의 물리 화학적 매개변수들의 분포를 파악하고 식물플랑크톤과의 상관관계를 살펴보았다. 2021년 12월과 2022년 1월 두 차례 현장 조사를 실시하였으며 소만 입구에서부터 내측 빙벽까지 총 5개의 정점을 선정하였다. 유광층 내 수온과 염분은 2022년 1월이 2021년 12월보다 고온, 저염의 경향을 보였으며 이는 남극 여름의 높아진 기온으로 용빙수의 유입이 증가된 것으로 보인다. 본 연구기간 동안 질산염과 인산염을 비롯한 영양염류는 대체로 높은 농도를 보여 식물플랑크톤의 제한요소로 작용하지 않은 것으로 판단된다. 식물플랑크

톤 생체량의 지표인 엽록소 농도는 소만 입구에서 내측으로 갈수록 감소하는 양상이 나타났으며 부유물질의 농도는 반대로 소만 내측에서 최고 농도를 보였다. 마리안 소만에서 용빙수의 유입은 담수와 함께 고농도의 부유물질 유입을 수반하는데 이는 수층 내로 투과되는 빛의 양을 제한하여 식물플랑크톤의 성장을 저해시킨다. 본 연구에서도 부유물질과 식물플랑크톤 엽록소 농도가 유의한 음의 상관관계( $r = -0.442$ ,  $p < 0.05$ )를 가지는 것으로 나타났다. 용빙수 유입이 활발한 지역에서 작은 크기의 플랑크톤이 우세하다는 선행 연구들과 본 연구에서 엽분과 식물플랑크톤 생체량이 양의 상관관계( $r = 0.628$ ,  $p < 0.001$ )를 가지는 것으로 보아 마리안 소만 내측 빙하후퇴 지역에서 미소 식물플랑크톤의 기여도가 증가할 수 있을 것이라 사료된다. 따라서 본 연구 결과는 빙하후퇴 지역에서 용빙수로부터 기인한 담수와 부유물질이 식물플랑크톤의 생체량 및 군집구조 조절 요인으로서 가능성을 제시하며 추후 기후 변화에 의한 탄소순환 변동을 파악하기 위한 기초자료로 활용될 수 있다.

## 후 기

본 연구는 한국해양과학기술원 부설 극지연구소 기관고유사업 “서남극해 온난화에 따른 탄소흡수력 변동 및 생태계 반응 연구(PE23110)”의 지원을 받아 수행되었습니다.

## References

- [1] Ahn, I. -Y., H. -Y. Moon, M. Jeon, and S. -H. Kang(2016), First Record of Massive Blooming of Benthic Diatoms and Their Association with Megabenthic Filter Feeders on the Shallow Seafloor of an Antarctic Fjord: Does Glacier Melting Fuel the Bloom?, *Ocean Science Journal*, Vol. 51, pp. 273-279.
- [2] Bae, H., I. -Y. Ahn, J. Park, S. J. Song, J. Noh, H. Kim, and J. S. Khim(2021), Shift in polar benthic community structure in a fast retreating glacial area of Marian Cove, West Antarctica, *Scientific Reports*, 11, 241.
- [3] Chung, H., B. Y. Lee, S. -K. Chang, J. H. Kim, J. H., and Y. Kim(2004), Ice cliff retreat and sea-ice formation observed around King Sejong Station in King George Island, West Antarctica, *Ocean and Polar Research*, Vol. 26, pp. 1-10.
- [4] Clarke, A., E. J. Murphy, M. P. Meredith, J. C. King, L. S. Peck, D. K. A. Barnes, and R. C. Smith(2007), Climate change and the marine ecosystem of the western Antarctic Peninsula, *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, Vol. 362, pp. 149-166.
- [5] Cook, A. J., A. J. Fox, D. G. Vaughan, and J. G. Ferrigno (2005), Retreating Glacier Fronts on the Antarctic Peninsula over the Past Half-Century, *Science*, 308(5721), pp. 541-544.
- [6] Deppeler, S. L. and A. T. Davidson(2017), Southern Ocean Phytoplankton in a Changing Climate, *Frontiers in Marine Science*, 4, 40.
- [7] Dierssen, H. M., R. C. Smith, and M. Vernet(2002), Glacial meltwater dynamics in coastal waters west of the Antarctic peninsula, *Proceedings of the National Academy of Science* 99, pp. 1790-1795.
- [8] Dominguez, C. and A. Eraso(2007), Substantial changes happened during the last years in the icecap of King George, Insular Antarctica, Karst and Criokarst, *Stud. of fac. of Earth Sciences.*, 45, pp. 87 - 110.
- [9] Finkel, Z. V.(2001) Light absorption and size scaling of light-limited metabolism in marine diatoms, *Limnology and Oceanography*, 46(1), pp. 86-94.
- [10] Garcia, M. D., M. D. F. Severini, C. Spetter, M. C. L. Abbate, M. N. Tartara, E. G. Nahuelhual, J. E. Marcovecchio, I. R. Schloss, and M. S. Hoffmeyer(2019), Effects of glacier melting on the planktonic communities of two Antarctic coastal areas (Potter Cove and Hope Bay) in summer, *Regional Studies in Marine Science*, 30, 100731.
- [11] Gutt, J., E. Isla, J. C. Xavier, B. J. Adams, I. -Y. Ahn, C. -H. C. Cheng, C. Colesie, V. J. Cummings, G. D. Prisco, H. Griffiths, I. Hawes, I. Hogg, T. McIntyre, L. M. Meiners, D. A. Pearce, L. Peck., D. Piepenburg, R. R. Reisinger, G. K. Saba, I. R. Schloss, C. N. Sigmori, C. R. Smith, M. Vacchi, C. Verde, and D. H. Wall(2021), Antarctic ecosystems in transition-life between stresses and opportunities, *Biological Reviews*, 96, pp. 798 - 821.
- [12] Jeon, M., J. L. Iriarte, E. J. Yang, S. -H. Kang, Y. Lee, H. M. Joo, I. -Y. Ahn, J. Park, G. -S. Min, and S. -J. Park(2021), Phytoplankton succession during a massive coastal diatom bloom at Marian Cove, King George Island, Antarctica, *Polar Biology*, 44, pp. 1993-2010.
- [13] Kang, D. -H., I. -Y. Ahn, and K. -S. Choi(2009), The annual reproductive pattern of the Antarctic clam, *Laternula elliptica* from Marian Cove, King George Island, *Polar Biology*, 32, pp. 517-528.
- [14] Kang, J. -S., S. -H. Kang, J. H. Lee, and S. Lee(2002), Seasonal variation of microalgal assemblages at a fixed station in King George Island, Antarctica, 1996, *Marine Ecology*



- Progress Series, 229, pp. 19-32.
- [15] Kang, S. H., J. S. Kang, S. H. Lee, D. S. Kim, and D. Y. Kim(2000), Importance of Polar Phytoplankton for the Global Environmental Change, *Korean Journal of Environmental Biology*, 18(1), pp. 1-20.
- [16] Kang, S. -H., J. -S. Kang, K. -H. Chung, M. -Y. Lee, B. -Y. Lee, H. Chung, Y. Kim, and D. -Y. Kim(1997), Seasonal Variation of Nearshore Antarctic Microalgae and Environmental Factors in Marian Cove, King George Island, 1996, *Korean Journal of Polar Research*, 8, pp. 9-27.
- [17] Kejna, M., A. Arazy, and I. Sobota(2013), Climatic change on King George Island in the years 1948-2011, *Polish Polar Research*, 34(2), 213-235.
- [18] Kim, B. K., M. Jeon., H. M. Joo, T. -W. Kim, S. -J. Park, J. Park, and S. -Y. Ha(2021), Impact of Freshwater Discharge on the Carbon Uptake Rate of Phytoplankton During Summer (January-February 2019) in Marian Cove, King George Island, Antarctica, *Frontiers in Marine Science*, 8, 725173.
- [19] Kim, B. K., M. Jeon, S. -J. Park, H. -C. Kim, J. -O. Min, J. Park, and S. -Y. Ha(2022), Variability in the Carbon and Nitrogen Uptake Rates of Phytoplankton Associated With Wind Speed and Direction in the Marian Cove, Antarctica, *Frontiers in Marine Science*, 9, 887909.
- [20] Lee, J., Y. K. Jin, J. K. Hong, H. J. Yoo, and H. Shon(2008), Simulation of a tidewater glacier evolution in Marian Cove, King George Island, Antarctica, *Geoscience journal*, 12, pp. 33-39.
- [21] Lee, S. H., H. M. Joo, H. T. Joo, B. K. Kim, H. J. Song, M. Jeon, and S. -H. Kang(2015), Large contribution of small phytoplankton at Marian Cove, King George Island, Antarctica, based on long-term monitoring from 1996 to 2008, *Polar Biology*, 38, pp. 207-220.
- [22] Llanillo, P. J., C. M. Aiken, R. R. Cordero, A. Damiani, E. Sepulveda, and B. Fernandez-Gomez(2019), Oceanographic variability induced by tides, the intraseasonal cycle and warm subsurface water intrusions in Maxwell Bay, King George Island (West-Antarctica), *Scientific Report*, 9, 18571.
- [23] Mendes, C. R., P. Cartaxana, and V. Brotas(2007), HPLC determination of phytoplankton and microphytobenthos pigments: comparing resolution and sensitivity of a C18 and a C8 method, *Limnology and Oceanography: Methods*, 5, pp. 363-370.
- [24] Meredith, M. P., U. Falk, A. V. Bers, A. Mackensen, I. R. Schloss, E. R. Barlett, E. Jerosch, A. S. Busso, and D. Abele(2018), Anatomy of a glacial meltwater discharge event in an Antarctic cove, *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 376, 20170163.
- [25] Montes-Hugo, M., S. C. Doney, H. W. Ducklow, W. Fraser, D. Martinson, S. E. Stammerjohn, and O. Schofield(2009), Recent Changes in Phytoplankton Communities Associated with Rapid Regional Climate Change Along the Western Antarctic Peninsula, *Science*, 323(5920), 1470-1473.
- [26] Moon, H. -W., W. M. R. W. Hussin, H. -C. Kim, and I. -Y. Ahn(2015), The impacts of climate change on Antarctic nearshore mega-epifaunal benthic assemblages in a glacial fjord on King George Island: Responses and implications, *Ecological Indicators*, 57, pp. 280-292.
- [27] Mullins, B. W. and J. Priddle(1987), Relationships between bacteria and phytoplankton in the Bransfield Strait and southern Drake Passage, *British Antarctic Survey. Bulletin*, 76, 51-64.
- [28] Pan, B. J., M. Vernet, L. Manck, K. Forsch, L. Ekern, M. Mascioni, K. A. Barbeau, G. O. Almandoz, and A. J. Oronae(2020), Environmental drivers of phytoplankton taxonomic composition in an Antarctic fjord, *Progress in Oceanography*, 183, 102295.
- [29] Park, M. -O. and J. S. Park(1997), HPLC method for the analysis of chlorophylls and carotenoids from marine phytoplankton, *Journal of the Korean Society of Oceanography*, 32, 46-55.
- [30] Parsons, T. R., Y. Maita, and C. M. Lalli(1984), *A Manual of Chemical and Biological Methods for Seawater Analysis*, Oxford: Pergamon Press, 173.
- [31] Rozema, P. D., H. J. Venables, W. H. van de Poll, A. Clarke, M. P. Meredith, and A. G. J. Buma(2017), Interannual variability in phytoplankton biomass and species composition in northern Marguerite Bay (West Antarctic Peninsula) is governed by both winter sea ice cover and summer stratification, *Limnology and Oceanography*, 62, pp. 235-252.
- [32] Schloss, I. R., D. Abele, S. Moreau, S. Demers, A. V. Bers, O. Gonzalez, and G. A. Ferreyra(2012), Response of phytoplankton dynamics to 19-year (1991-2009) climate trends in Potter Cove (Antarctica), *Journal of Marine System*, 92, pp. 53-66.
- [33] Schloss, I. R., G. A. Ferreyra, and D. Ruiz-Pino(2002), Phytoplankton biomass in Antarctic shelf zones: a conceptual model based on Potter Cove, King George Island. *Journal of Marine System*, 36, pp. 129-143.

- [34] Schofield, O., H. W. Ducklow, D. G. Martinson, M. P. Meredith, M. A. Moline, and W. R. Fraser(2010), How Do Polar Marine Ecosystems Respond to Rapid Climate Change?, *Science*, 328(5985), pp. 1520-1523.
- [35] Smith, R. C., D. G. Martinson, S. E. Stammerjohn, R. A. Iannuzzi, and K. Ireson(2008), Bellingshausen and western Antarctic Peninsula region: Pigment biomass and sea-ice spatial/temporal distributions and interannual variability, *Deep-Sea Research Part2*, 55, pp. 1949-1963.
- [36] Van Heukelem, L., A. G. Lewitus, T. M. Kana, and N. E. Craft(1994), Improved separations of phytoplankton pigments using temperature-controlled high performance liquid chromatography, *Marine Ecology Progress Series*, 114, pp. 303-313.
- [37] Vaughan, D. G.(2006), Recent Trends in Melting Conditions on the Antarctic Peninsula and Their Implications for Ice-sheet Mass Balance and Sea Level, *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 38, pp. 147-152.
- [38] Weber, T. S. and C. Deutsch(2010), Ocean nutrient ratios governed by plankton biogeography, *Nature*, 467, pp. 550-554.
- [39] Yang, J. S.(1990), Nutrients, Chlorophyll-a and primary productivity in Maxwell Bay, King George Island, Antarctica, *Korean Journal of Polar Research*, 1, pp. 1-18.
- [40] Yoo, K. -C., H. I. Yoon, J. -K. Oh, Y. Kim, and C. Y. Kang(1999), Water column properties and dispersal pattern of suspended particulate matter (SPM) of Marian Cove during austral summer, King George Island, West Antarctica, *The Sea Journal of the Korean Society of Oceanography*, 4, 266-274.
- [41] Yoo, K. -C., M. K. Lee, H. I. Yoon, Y. I. Lee, and C. Y. Kang(2015), Hydrography of Marian Cove, King George Island, West Antarctica: implications for iceproximal sedimentation during summer, *Antarctic Science*, 27, pp. 185-196.

---

Received : 2023. 07. 03.

Revised : 2023. 07. 25.

Accepted : 2023. 08. 29.