

북극 다산기지 주변 Kongsfjorden
MIZ(marginal ice zone)에서의
해빙생태계 탄소흡수율 평가

Carbon assimilation rate of sea ice ecosystem
in the Kongsfjorden MIZ, Arctic



2020. 02.

한국해양과학기술원
부설 극지연구소

제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “북극 다산기지 주변 Kongsfjorden MIZ(marginal ice zone)에서의 해빙생태계 탄소흡수율 평가”과제의 최종보고서로 제출합니다.



연구책임자	: 하 선 용
참여연구원	: 박 지 수, 김 주 홍
“	: 박 기 홍, 박 태 욱
“	: 김 태 완, 조 경 호
“	: 정 진 영, 주 형 민
“	: 갈 종 구, 김 보 경
“	: 심 초 림, 이 보 연
“	: 최 정 욱, 이 지 란
“	: 고 은 호, 김 지 훈
“	: 전 미 해
위탁연구기관명	: 한양대학교
위탁연구책임자	: 신경훈
위탁연구기관명	: (주)마린액트
위탁연구책임자	: 이강현

보고서 초록

과제관리번호		해당단계 연구기간	2017. 03. 20. ~ 2019. 12. 31.	단계 구분	1단계 / 1단계
연구사업명	중 사업명	기본연구사업(고유사업)			
	세부사업명				
연구과제명	중 과제명				
	세부(단위)과제명	북극 다산기지 주변 Kongsfjorden MIZ(marginal ice zone)에서의 해빙생태계 탄소흡수율 평가			
연구책임자	하선용	해당단계 참여연구원수	총 : 31 명 내부 : 21 명 외부 : 10 명	해당단계 연구비	정부: 361,000 천원 기업: 천원 계: 361,000 천원
연구기관명 및 소속부서명	극지해양과학연구부		참여기업명		
국제공동연구	상대국명 :	상대국연구기관명 :			
위탁연구	연구기관명 :	한양대학교		연구책임자 : 신경훈	
	연구기관명 :	(주)마린액트		연구책임자 : 이강현	
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)				보고서 면수	111
<p>○ 연구개발의 목적</p> <ul style="list-style-type: none"> - 목적 : 북극 다산기지 주변 Kongsfjorden marginal ice zone에서의 환경변화에 따른 해빙생태계의 탄소흡수율 평가 및 성장단계에 따른 탄소 거동 이해 <p>○ 연구개발의 내용 및 범위</p> <ul style="list-style-type: none"> - 해빙생태계의 종다양성 및 해빙 미세조류의 탄소 흡수율 평가 및 물질 교환 규명 - 해빙의 성장단계에 따른 해빙 생태계 내 탄소 거동 확인 <p>○ 연구개발결과</p> <ul style="list-style-type: none"> - 안정동위원소 활용 Kongsfjorden 해역에서 탄소 흡수율 중 Pico사이즈 (<2μm) 식물플랑크톤은 총 탄소생산량의 평균 40% 이상 기여 - 해빙생태계 탄소흡수율은 해빙 표면을 덮고 있는 눈 두께와 유의한 음의 상관관계를 보임 - 해빙생태계의 동물플랑크톤 <i>Calanus</i> spp. 및 <i>Euphausia</i> sp.는 잡식-육식성으로 조사 시기에서 영양 단계의 분포가 다양하게 나타남 - <i>O. similis</i>는 영양 단계의 변화가 가장 크게 나타났으며 계절별 먹이원의 변동이 반영된 것으로 추정 - 해색인공위성 자료를 활용한 북극해 스발바드 주변 일차생산력 지도 작성 - 스발바드 주변 해역에서 일차생산 시계열 변화는 주변 해역에 비해 높은 증가율 - 해빙감소로 개방해역이 넓어지며 표층에 투과된 광량 증가는 식물플랑크톤 생물량 증가에 영향 					
색인어 (각 5개 이상)	한글	탄소흡수율, 해빙생태계, 북극다산과학기지, Kongsfjorden, Marginal ice zone, 생지화학순환			
	영어	carbon uptake, sea ice ecosystem, Arctic Dasan station, Kongsfjorden, Marginal ice zone, biogeochemical cycle			

요 약 문

I. 제 목

북극다산기지 주변 Kongsfjorden MIZ(marginal ice zone)에서의 해빙생태계 탄소흡수율 평가

II. 연구개발의 목적 및 필요성

○ 연구 목적

- 북극 다산기지 주변 Kongsfjorden marginal ice zone에서의 환경변화에 따른 해빙 생태계의 탄소흡수율 평가 및 성장단계에 따른 탄소 거동 이해

○ 필요성

- 최근 북극해 해빙 생태계가 탄소흡수율이 매우 높은 것으로 밝혀졌으며, 극지권 국가들을 위주로 해빙생태계 연구가 집중되고 있음
- 북극 다산기지 해역은 상대적으로 높은 수온 (>3℃)으로 인한 해빙의 형성과 소멸의 변동 폭이 매우 큼. 이에 기후변화(수온 상승)에 따른 해빙생태계의 변화를 예측할 수 있는 최적의 장소임
- 최근 다양한 연구 결과로서 해빙미세조류 중요성 및 해빙생태계 내 역할에 관한 연구가 부각되고 있음
- 급격한 기후 변화를 겪는 북극해 일차생산력 중 해빙생태계의 역할 파악을 통하여 환경변화와 해빙생태계 간의 상호 관계 규명에 관한 연구 필요

III. 연구개발의 내용 및 범위

- 북극 스발바드 Kongsfjorden marginal ice zone의 해빙생태계의 종다양성 및 해빙 미세조류의 탄소 흡수율 평가를 위한 현장 해빙미세조류의 탄소흡수율 측정
- 북극 스발바드 Kongsfjorden marginal ice zone의 해빙생태계 탄소 순환과 유기물 물질교환 규명을 위한 해빙생태계 구성인자 유기물 조성 및 에너지 흐름 파악
- 북극 스발바드 Kongsfjorden marginal ice zone의 해빙의 성장단계에 따른 해빙 생태계내 탄소 거동 확인을 위해 해빙-해양 pCO₂ 연속관측 시스템 제작 및 해빙 성장단계별 탄소흡수율 평가 수행

IV. 연구개발결과

- 북극 다산과학기지 주변 Kongsfjorden 해역에서 영양염 및 이화학 특성
 - 동·식물 플랑크톤의 서식 밀도와 생물량은 정점 및 계절에 따라 큰 지역적 차이를 나타냄. 특히 미동정 미소-극미소 식물플랑크톤이 우점
 - Kongsfjorden 해역은 수평적으로 내만와 외만으로 구분지어지는 특성을 보임
 - 수층 내 자생기원 유기물을 비롯한 외부기원 유기물 기원 유입이 확인됨
- 안정동위원소 활용 Kongsfjorden 해역에서 탄소 흡수율 현장 측정
 - Pico사이즈 (<math> <2\mu\text{m}</math>) 식물플랑크톤은 총 탄소생산량의 평균 40% 이상 기여 하는 것으로 나타남
 - 전체의 생산 중 신생산이 차지하는 비율(f-ratio)을 파악
 - Kongsfjorden 해역에서 연간/계절별 탄소 흡수율 변화 양상 확인
 - 탄소섭취율은 피요르드 안쪽으로 갈수록 감소하며, 유광층 수심과 관련된 것으로 보임
- 해빙생태계 탄소흡수율 현장관측
 - 해빙 미세조류 내 거대분자 중 탄수화물과 지질이 가장 높은 비율을 차지
 - 탄소 흡수율은 해빙 표면을 덮고 있는 눈 두께와 유의한 음의 상관관계를 보임
- 해빙생태계의 성장단계에 따른 동물플랑크톤 먹이원 및 영양단계 변화 파악
 - Kongsfjorden 내만으로 유입되는 다양한 질소원이 동물플랑크톤에 반영
 - *Calanus* spp. 및 *Euphausia* sp.는 잡식-육식성으로 조사 시기에서 영양 단계의 분포가 다양하게 나타남
 - *O. similis*는 영양 단계의 변화가 가장 크게 나타났으며 계절별 먹이원의 변동이 반영된 것으로 추정됨
- 해색인공위성 자료를 활용한 북극해 스발바드 주변 일차생산력 지도 작성
 - 스발바드 주변 해역에서 일차생산 시계열 변화는 주변 해역에 비해 높은 증가율을 보임
 - 북극해 전체 평균 일차생산력은 $634 \pm 325 \text{ mgC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 으로 나타남
 - 바렌츠 해와 그린란드 해의 일차생산력이 점진적으로 증가하는 경향을 보임
 - 해빙감소로 개방해역이 넓어지며 표층에 투과된 광량 증가는 식물플랑크톤 생물량 증가에 영향

V. 연구개발결과의 활용계획

- 극지역에서 기후변화 연구에 기초자료로 제공
- 기후변화 모델의 현장관측 자료로 활용
- 해빙미세조류의 일차생산 기여도를 재산정 할 수 있는 자료로 활용
- 북극 연안국 중심의 배타적 독점 체제를 유지하고 있는 북극권에서 협력관계를 구축하기 위한 수단으로 해빙생태계 연구 활용

S U M M A R Y

I. Title

Carbon assimilation rate of sea ice ecosystem in the Kongsfjorden MIZ, Arctic

II. Purpose and Necessity of R&D

- Evaluation of carbon uptake and fate of carbon according to ice stages by the environmental changes in the Kongsfjorden marginal ice zone

III. Contents and Extent of R&D

- Evaluation of the species diversity and determination of carbon assimilation rate of sea ice algae in the Kongsfjorden marginal ice zone
- Study on the composition of organic compounds and energy flow for understanding of the carbon cycle and dynamics of organic matter in the sea ice ecosystem
- Constructing of the long-term $p\text{CO}_2$ observation system and the investigation of carbon assimilation rate with the sea ice growth to confirm carbon behavior in the sea ice ecosystem

IV. R&D Results

- Nutrient and biogeochemical characteristics in the Kongsfjorden
 - Density and biomass of the zoo- and phytoplanktons varied within each station in the Kongsfjorden.
 - Distribution of the planktons were horizontally divided into inner and outer bay.
 - Organic matters in the water column consisted with autochthonous and allochthonous matters.
- Investigation of the in-situ carbon assimilation rate using stable isotope technique
 - Pico-plankton(<2 μm) contributed more than 40% of the total carbon production
 - We confirmed the seasonal/annual variation of the carbon assimilation rate in the Kongsfjorden.
 - Carbon uptake rate decreased at the inner bay which seemed to be related with the light penetration depth
- Investigation of the in-situ carbon assimilation rate using stable isotope technique
 - Carbohydrate and protein were major macro molecules in the sea ice algae
 - Carbon assimilation rate of sea ice algae showed a negative correlation with snow depth

- Food source and trophic position of zooplankton according to the sea ice growth
 - Nitrogen isotope values indicates that various nitrogen sources into the Kongsfjorden
 - Nitroge isotope values of *Calanus* spp. and *Euphausia* sp. suggested that their trophic position was between omnivore and carnivore, and varied in season
 - Trophic position of *O. similis* varied with season which related with variation of seasonal food availability
- Mapping of the primary production around the Svalbard using satellite ocean color data
 - Primary production around the Svalbard showed the highest increase than other region
 - Average primary production was $634 \pm 325 \text{ mgC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$
 - Primary production in the Barents Sea and Greenland Sea tend to gradually increase
 - Phytoplankton biomass was affected by light penetration by reducing of ice covered area

V. Application Plans of R&D Results

- Providing a basic data for research of climate change in the Polar region
- Supporting of the field observation data for the climate model
- Re-estimation of the contribution of sea ice algal primary production
- Establishing cooperation with Near Arctic States based on scientific relationships through research in sea ice ecosystems

C O N T E N T S

Chapter 1 Introduction	12
1. Necessity of R&D	12
2. Research Objectives	13
Chapter 2 Current R&D Status in Korea and Other Nations	14
1. Current R&D Status in other Nations	14
2. Current R&D Status in Korea	14
Chapter 3 R&D Implementation Contents and Results	16
Section 1. Theoretical and experimental access method	16
1. Kongsfjorden field work and sample collection	16
2. Assessment of the carbon assimilation rate in the sea ice ecosystems	18
3. Investigation of in-situ carbon assimilation rate of the sea ice algae in the Cambridge Bay	19
4. Composition of organic compounds of sea ice algae and distribution of biochemical indicators	20
5. Species diversity of phyto- and zooplanktons in the Kongsfjorden	22
6. Mapping of the primary production around the Svalbard using satellite ocean color data	23
7. Measurement of $p\text{CO}_2$ under the sea ice	24
Section 2. Assessment of the carbon assimilation rate in the sea ice ecosystems	26
1. Nutrient and biogeochemical characteristics in the Kongsfjorden	26
2. Variation of the carbon and nitrogen uptake in the marine and sea ice ecosystems ..	35
3. Mapping of the primary production in the Arctic Ocean using satellite ocean color data	51
4. Measurement of $p\text{CO}_2$ under the sea ice and long-term monitoring of environmental factors by bio-optic buoy with sea ice growth	68
Section 3. Understanding of the fate of organic matters and carbon cycle in the sea ice environments	74
1. Investigating of phyto- and zooplankton in 2017, Kongsfjorden	74
2. Investigating of phyto- and zooplankton in 2018, Kongsfjorden	77
3. Investigating of phyto- and zooplankton in 2019, Kongsfjorden	85
4. Seasonal variation of the food source and trophic position of zooplanktons	89

5. Understanding of the fate of organic matters based on the chemical compounds distribution	94
--	----

Chapter 4 Degree of R&D Goal Achievement and Degree of Contribution to Outside Research Institute **107**

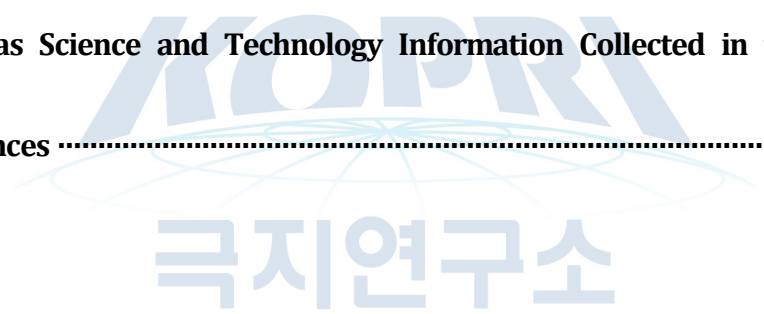
1. Obtaining the long-term monitoring dataset based on the KOPRI infrastructure (Arctic Dasan Station)	107
2. Successful international joint research	107

Chapter 5 Application Plans of R&D Results **108**

1. Providing a basic data for research of climate change in the Polar region	108
2. Supporting of the field observation data for the climate model	108
3. Re-estimation of the contribution of sea ice algal primary production	108
4. Establishing cooperation with Near Arctic States based on scientific relationships through research in sea ice ecosystems	108

Chapter 6 Overseas Science and Technology Information Collected in the R & D .. **109**

Chapter 7 References **110**



목 차

제 1 장 서론	12
1. 연구 개발의 필요성	12
2. 연구 목표	13
제 2 장 국내외 기술개발 현황	14
1. 국외 기술개발 현황	14
가. 극지 연안국 중심으로 해빙 미세조류에 대한 연구	14
나. 해빙 및 해양 생태계를 이해하기 위한 다양한 연구 진행	14
2. 국내 기술개발 현황	14
제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과	16
1절. 연구수행 방법	16
1. Kongsfjorden 현장 조사 및 시료 채집	16
2. 안정동위원소 추적자를 활용한 해양 미세조류의 탄소 흡수율 현장 측정	18
3. 태평양권역 북극연안 (케임브리지베이) 해빙생태계 탄소흡수율 현장관측	19
4. 해양 미세조류 유기물 조성 및 생화학 지표 특성 확인	20
5. Svalbard Kongsfjorden 내 해빙 서식 미세조류 및 동물플랑크톤의 종다양성 현장조사	22
6. 해색인공위성 자료를 활용한 북극해 스발바드 주변 일차생산력 지도 작성	23
7. 해양-해빙 pCO ₂ 관측	24
2절. 해빙 생태계의 탄소흡수율 평가	26
1. 북극 다산기지 주변 Kongsfjorden 해역에서 영양염 및 이화학 특성	26
가. 1차년도 (2017년) 현장 조사 기간 동안 Kongsfjorden 해역에서의 영양염, 용존 및 유기탄소, 유기질소화합물 분포 특성	26
(1) Kongsfjorden 해역에서 영양염, 유기탄소 및 질소화합물의 공간 분포 특성	26
(2) Kongsfjorden 해역(정점 1, 5, 7, 10)에서의 영양염, 용존 및 유기탄소, 유기질소화합물 연직 분포 특성파악	29
나. 2차년도 (2018년) 현장 조사 기간동안 Kongsfjorden 해역의 영양염, 용존 및 유기탄소, 유기질소화합물 분포	29
(1) 2018년 Kongsfjorden 해역에서의 영양염, 용존 및 유기탄소, 유기질소화합물 공간 분포 ..	29
(2) 2018년 Kongsfjorden 해역(정점 1, 5, 7, 10)에서의 영양염, 용존 및 유기탄소, 유기질소화합물 연직분포 특성	29
(3) Kongsfjorden 해역 표층에서의 질산염, 엽록소, 용존 및 입자상 유기탄소, 유기질소화합물의 계절적 분포 특성	32
다. 3차년도 (2019년) Kongsfjorden 해역 표층에서의 영양염, 용존 및 유기탄소, 유기질소화합물 분포	32
(1) 영양염, 용존 및 유기탄소, 유기질소화합물의 공간 분포	32
(2) Kongsfjorden 해역 표층에서의 질산염, 엽록소, 용존 및 입자상 유기탄소, 유기질소화합물의 계절적 분포 특성	34

2. 해빙 생태계에서 해양 및 해빙 미세조류의 탄소 및 질소 흡수율 변화	35
가. 북극 다산기지 주변 Kongsfjorden 해역에서 탄소 및 질소 흡수율 변화	35
나. 1차년도 (2017년) 태평양권역 북극 연안(케임브리지 베이) 해빙생태계 탄소흡수율 측정	37
다. 2차년도 (2018년) 캐나다 케임브리지 베이 해빙 미세조류의 탄소 흡수율 측정	40
(1) 해빙미세조류의 탄소 흡수율 측정을 위한 배양 실험	41
(2) 눈 및 해빙 두께 측정 결과	42
(3) 염분 측정 결과	43
(4) 해빙 미세조류의 엽록소 a 농도 분석 결과	44
(5) 해빙미세조류의 거대분자 조성 분석 결과	45
(6) 해빙 미세조류의 탄소 흡수율 측정 실험 결과	46
라. 3차년도 (2019년) 캐나다 Hudson bay 해빙 미세조류의 탄소 흡수율 측정	47
3. 위성자료를 활용한 북극해 일차생산력 지도 작성	51
가. 위성자료를 활용한 스발바드 주변 일차생산 지도 매핑	51
(1) 스발바드 주변해역의 평균 일차생산력 공간 분포 (2016년 분석 자료)	51
(2) 스발바드 주변해역의 지역별 일차생산력 계절 특성	51
(3) 스발바드 주변해역의 월별 평균 일차생산력 공간 분포	52
(4) 2016년 월별 해빙농도와 일차생산력 공간 분포	52
나. 위성자료를 이용한 스발바드 해역 일차생산력의 시계열 자료	55
(1) 과거 20년(1998 - 2017년)간의 해역 일차생산력의 시계열 자료 생성	55
(2) 시·공간 분석기법을 활용한 스발바드 주변 해역 일차생산의 계절변동 및 경년변동성 분석	57
(3) 해빙을 포함한 물리적 환경요인이 연구해역 일차생산 변화에 미친 매커니즘	59
다. 해색인공위성 자료를 활용한 북극해 전체 일차생산력 지도 작성	62
(1) 북극해의 장기 일차생산력 자료	62
(2) 지역별 북극해 평균 일차생산력 공간분포 (1998.01~2019.08)	63
(3) 지역별 북극해 월별 및 연도별 일차생산력 시계열 분포	63
라. 북극해 지역별 환경요인과 일차생산력 간의 상관관계	66
4. 해빙에서 pCO ₂ 연속 모니터링 및 해빙 부이를 활용한 해빙 성장단계별 환경인자 연속 모니터링	68
가. pCO ₂ 센서를 활용한 북극해 항해 중 해빙에서 pCO ₂ 연속 모니터링	68
(1) 결빙 해역 및 아이스 캠프 정점의 pCO ₂ 연속 모니터링	68
(2) 해빙 부이를 이용한 생물량 연속 관측 및 환경 자료 확보	68
(3) 생태계 모델을 이용한 해빙 미세조류의 연간 변화량 비교 연구	73
3절. 해빙생태계 내 유기물 순환 및 탄소 순환 이해	74
1. 1차년도(2017년) 북극 다산기지 주변 Kongsfjorden 내 식물/동물플랑크톤 분석	74
가. 북극 다산기지 주변 Kongsfjorden 내 식물플랑크톤 군집 분석	74
2. 2차년도(2018년) 북극 다산기지 주변 Kongsfjorden 내 식물/동물플랑크톤	77
가. 북극 다산기지 주변 Kongsfjorden 내 식물플랑크톤 분석	77
나. 북극 다산기지 주변 Kongsfjorden 내 식물플랑크톤 분석	83
(1) 동물플랑크톤 대표 우점종 확인 및 군집 구조 분석	83
(2) 동물플랑크톤의 계절별 군집종조성 변화양상	84
3. 3차년도(2019년) 북극 다산기지 주변 Kongsfjorden 내 식물/동물플랑크톤	85

가. Kongsfjorden 해역에서 식물플랑크톤 군집의 시계열 변화양상 추적	85
나. 시기별 동물플랑크톤 군집 구조 및 우점종 변화 파악	87
4. 해빙생태계의 성장단계에 따른 동물플랑크톤 먹이원 및 영양단계 변화 파악	89
가. 시료 채집 및 아미노산 질소 안정동위원소비의 분석	89
나. 동물플랑크톤의 영양단계 파악 및 미소 먹이망구조 내 역할 파악	90
(1) 아미노산 질소 안정동위원소를 이용한 동물 플랑크톤의 영양 단계 해석	90
(2) 동물 플랑크톤의 영양 단계의 계절 변동	92
5. 유기물 조성 파악을 통한 유기물 순환 이해	94
가. Kongsfjorden 해역 식물플랑크톤 생물량, 색소분석 및 자외선흡수물질 파악	94
(1) 식물플랑크톤 생물량, 색소의 공간 분포 특성	94
(2) 식물플랑크톤 자외선 흡수물질의 공간 분포 특성	95
(3) 투과 광량에 따른 해빙 미세조류의 광보호 물질의 분포 변화	96
나. Kongsfjorden 해역 수층 부유입자에서 장족형 탄화수소(n-alkane)의 분포 특성	96
다. Kongsfjorden 해역 수층 부유입자에서 스테롤의 분포 특성	100
(1) Kongsfjorden 해역 수층 부유입자에서 스테롤의 분포 특성	100
(2) Kongsfjorden 해역 수층 부유입자에서 유기화합물의 분포 및 환경인자의 주성분 분석	100
(3) Kongsfjorden 해역의 유기화합물의 기원 및 거동	101
(4) Kongsfjorden 해역 표층 퇴적물 및 유빙에서 스테롤의 분포 특성	104
라. 해빙 미세조류 기원 지질생체지표(IP25)를 활용한 Kongsfjorden 해역 내 해빙 조류 기여도 산정	106
제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도	107
1. 극지 연구소의 인프라 (북극 다산과학기지) 기반의 장기 연구 자료 획득	107
2. 성공적인 국제 공동연구 수행	107
제 5 장 연구개발결과의 활용계획	108
1. 극지역을 활용한 기후변화 연구에 기초자료로 제공	108
2. 기후변화 모델의 현장관측 자료로 활용	108
3. 해빙미세조류의 일차생산 기여도를 재산정 할 수 있는 자료로 활용	108
4. 북극 연안국 중심의 배타적 독점 체제를 유지하고 있는 북극권에서 협력관계를 구축하기 위한 수단으로 해빙생태계 연구 활용	108
제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보	109
1. 해양 생태계 모델	109
2. Compound specific isotope analysis	109
제 7 장 참고문헌	110

제 1 장 서론

1. 연구 개발의 필요성

북극해는 극한환경의 특성으로 인하여 일차생산성이 낮은 곳으로 평가되어 왔으나 최근 연구결과를 통하여 북극해 해빙 생태계가 다른 해역과 마찬가지로 탄소흡수율이 매우 높은 것으로 밝혀졌으며, 극지권 국가들을 위주로 해빙생태계 연구가 집중되고 있다. 더욱이 북극해 해빙은 매년 최저치 기록을 갱신하고 있으며, 여름철 단년생 해빙으로 덮여있던 해역이 북극의 온난화로 인하여 초년생 해빙의 상대적 비중이 높아지고 있다. 해빙의 두께가 감소함으로써 투과된 광량은 해빙 생태계를 자극함으로써 이전에 비해 높은 해빙 생태계의 활성을 보일 것으로 예상된다. 2008년 보고에 의하면, 북극해 전체 일차생산력의 약 15 ~ 20%를 해빙 미세조류의 일차생산력이 차지하고 있는 것으로 보고되었다. 따라서, 해빙 미세조류의 생산력 변화는 초년생 해빙의 증가와 더불어 증가될 것으로 예상되며, 재평가될 필요성이 강조되고 있는 실정이다.

지구 온난화에 의한 해빙의 급격한 변화는 북극 탄소 흡수의 변화를 초래하며 특히 기존 해빙 생태계에 대한 탄소 흡수에 대한 기여도가 상대적으로 저평가 되었던 부분을 재평가할 필요성이 있다. 더욱이, 해빙이 후퇴 될 뿐만 아니라 초년생 해빙의 증가는 해빙에 서식하는 미세조류의 활성을 높일 가능성이 높으며 이에 대한 탄소 흡수율 기여도를 파악하는 것이 우선적으로 선행되어야 한다. 또한, 북극해 초년생 해빙의 증가는 해빙내부 단파복사량의 투과도를 높여 해빙 내부 및 기저의 생태계 변화에 영향을 미치고 있으며 이에 따른 해빙의 열적 특성과 내부 단파복사량 투과도의 변화를 추정하고 생태계 변화와의 관계 파악이 필요하다.

북극 다산기지 해역은 대서양 기원 해류의 영향을 받는 지역으로 상대적으로 높은 수온 (> 3°C)으로 인한 해빙의 형성과 소멸의 변동 폭이 큰 것으로 알려져 있다. 이에 기후변화(수온 상승)에 따른 해빙생태계의 변화를 예측할 수 있는 최적의 장소이다. 특히, 북극 다산과학기지 주변 해역은 대서양과 극지방 환경 변화를 추적할 수 있는 곳에 위치하고 있으며, 북극 모니터링 거점들 중 가장 고위도에 위치하는 중요한 거점으로 여겨진다. 또한, 북반구 환경변화에 민감한 곳이며 해양 생태계를 연구하기 위한 국제적인 인프라가 구축되어 있다는 장점을 가지고 있으며, 세계 20여개국의 과학기지촌이 조성되어 있어 국제공동연구가 용이하며, 과거 자료 축적으로 인하여 환경변화에 따른 변동성을 이해하기 위한 최적의 장소로 판단된다.

북극 Kongsfjorden의 해빙에 대한 모니터링은 Norwegian Polar Institute에서 매일 관찰하고 있으며, Kongsfjorden 내만은 일반적으로 해빙의 두께 <1m의 초년생 고착 해빙으로 덮여있다. International Polar Year (IPY) 2007-08에 의해, Kongsfjorden의 fast ice 모니터링은 남북극 비교거점으로 중요성을 언급하고 있다.

최근 해빙미세조류의 기초생산력이 북극해 일차생산력에 대한 기여도가 매우 높은 것으로 보고되어진 바 있으며 최근 다양한 연구 결과로서 해빙미세조류 중요성 및 해빙생태계 내 역할에 관한 연구가 부각되고 있다. 기후변화에 의한 해빙의 후퇴 및 단년생 해빙의 증가는 해빙

저서 미세조류의 활성을 높일 가능성이 크기 때문에 해빙 미세조류의 탄소 흡수율에 대한 기여도 파악은 향후 기후변화에 의한 북극해 해빙 생태계 변화 연구에 우선적으로 수행되어야 할 연구 분야라는 인식이 지배적이다. 또한, 해빙 미세조류는 수층 생태계 뿐만 아니라 저서 생태계에서도 먹이원으로서의 기여도가 매우 큰 것으로 알려져 있기때문에 해빙 미세조류 기원 유기탄소의 거동을 확인하는 것은 해빙-해양 생태계를 이해하기 위해 필수적인 연구 테마이다. 따라서 현재의 해빙-해양의 반응 상태를 파악하여 북극 기후 피드백 순환고리를 구성하여 향후 전 지구적 기후 변화의 연관성을 고찰할 필요성 제기 되고 있는 실정이다.

급격한 기후 변화를 겪는 북극해 일차생산력 중 해빙생태계의 역할 파악을 통하여 환경변화와 해빙생태계 간의 상호 관계 규명에 관한 연구 필요하다. 본 연구의 수행은 우리나라 최초로 국내 과학기지 (북극 다산기지) 및 국제 공동연구 (북극 연안국 과학기지) 인프라를 활용한 해빙생태계의 다학제적 조사를 통해 북극 해빙의 급격한 환경변화 현상 이해와 미래 활용 기반 확립의 의의를 가진다. 더욱이 겨울-여름에 이르는 시기에 해빙-해양 생태계 내에서의 탄소의 순환을 이해하기 위해서 pCO_2 의 변동 및 해빙 아래의 물리적/화학적 해양환경 변화를 장기간 모니터링 함으로써 해빙 생태계의 탄소 흡수율 기여에만 국한된 것이 아니라 해빙 생태계의 발생과 성장, 소멸시기에 기후 변화 인자의 생성 기작을 병행함으로써 전지구적인 기후 변화에 대한 이해도를 높이는데 기여 할 수 있을 것으로 기대된다.

2. 연구 목표

본 연구는 북극 다산기지 주변 Kongsfjorden marginal ice zone에서의 환경변화에 따른 해빙생태계의 탄소흡수율 평가 및 성장단계에 따른 탄소 거동 이해를 목적으로 하고 있다. 세부적으로는 북극해 전체 일차생산력 대비 Kongsfjorden marginal ice zone 해빙생태계의 탄소 흡수율 평가, 해빙생태계 생성유기물 조성의 변화 기록을 기반으로 해빙생태계 성장단계에 따른 탄소 거동을 이해 하고자 한다. 또한 북극 다산기지 주변 Kongsfjorden marginal ice zone에서의 해양-해빙생태계 간 탄소흡수율 상호 보완 관계 파악하고 북극 해빙 변동성에 따른 대양-연안 해빙생태계의 탄소흡수율 비교하고자 한다.

위와 같은 연구 목적 달성을 위해 총 3차년도에 걸쳐 체계적인 연구를 수행 하였으며, 1차년도(2017년) 현장 조사를 통해 북극 다산기지 주변 Kongsfjorden marginal ice zone의 해빙생태계의 종다양성 및 해빙 미세조류의 탄소 흡수율을 평가하였다. 또한, 위성자료 활용한 북극해 전역 일차생산 지도 매핑 및 현장 해빙미세조류의 탄소흡수율 측정하였으며, 해빙 내 빛 투과도 측정 및 해빙생태계 군집 종조성 파악하였다. 다음으로 Kongsfjorden marginal ice zone의 해빙생태계 탄소 순환 유기물 물질교환 규명을 위해 해빙미세조류의 생리 기작 및 광적응 기작을 파악하고 이를 통한 생존 전략 파악하고자 하였다. 그리고 해빙생태계 구성인자 유기물 조성 및 해빙-해수 내 화학적 인자분포 특성 파악하였다. 마지막으로 해빙의 성장단계에 따른 해빙 생태계 내 탄소 거동 및 성장요인 파악을 위해 해빙-해양 pCO_2 연속관측 시스템 제작 및 해빙 성장단계별 탄소흡수율 평가를 병행 하였으며 통합관측을 통한 해빙 성장단계별 탄소 거동 이해를 연구 목표로 설정하였다.

제 2 장 국내외 기술개발 현황

1. 국외 기술개발 현황

가. 극지 연안국 중심으로 해빙 미세조류에 대한 연구

캐나다에서는 최근 Polar Continental Shelf Program (PCSP) 프로그램 Arctic-ICE camp를 통해서 다양한 분야에서 연구가 진행되고 있다. 미국의 경우 NASA에서 Impacts of Climate on the Eco-Systems and Chemistry of the Arctic Pacific Environment (ICESCAPE) 프로그램을 2010년부터 실시하고 있으며, 또한 1979년 Coastal Zone Color Scanner (CZCS) 해상센서를 시작으로 1997년 Sea-Viewing Wide Field-of-View Sensor (SeaWiFS) 센서를 활용해 본격적으로 해양 표층 식물플랑크톤 관측에 위성자료가 광범위하게 쓰여지고 있다. 또한 University of Alaska Fairbanks (UAF)에서는 북극해 해빙변동성 관측을 위해 2005년부터 현재까지 Barrow Sea(71° 22' 25.36" N, 156° 32' 30.91" W)에서 해빙두께변동 및 온도와 기상자료를 관측하고 있다. 하지만 정확도가 상대적으로 낮아서 해빙 열적특성 연구에는 제한적인 단점을 가지고 있다. 북극권 국가 중 하나로 활발한 연구를 수행하고 있는 노르웨이는 Norwegian young sea ICE (N-ICE2015) expedition 프로그램을 통해 북극 sea ice regime 에 대한 연구를 지속적으로 수행하고 있다.

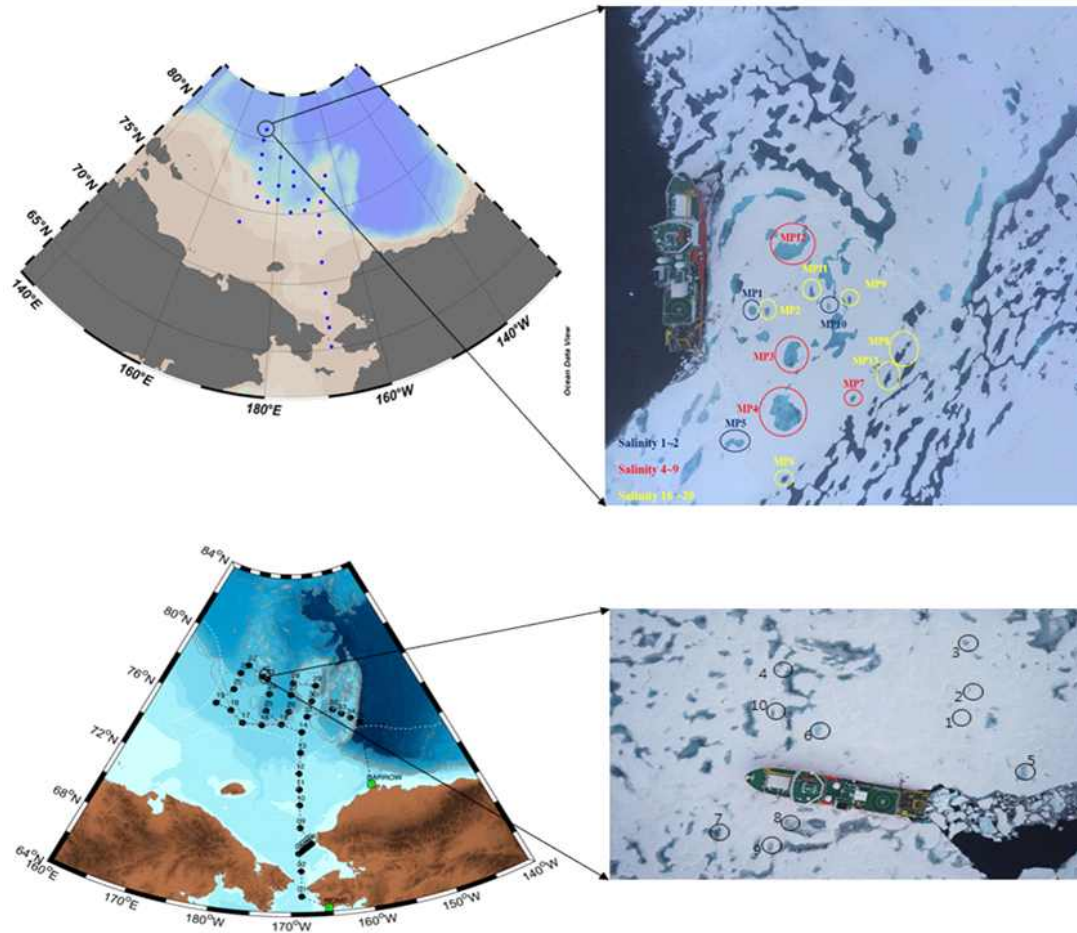
나. 해빙 및 해양 생태계를 이해하기 위한 다양한 연구 진행

국제적으로도 해빙 미세조류의 생산력 정보는 중요하게 인식되고 있으며 특히 탄소 안정동위원소비를 활용한 해빙 미세조류의 생산력 측정연구가 우리나라에서는 매우 제한적으로 진행되고 있는 반면 극지 선진국에서는 매우 활발하게 연구가 수행되고 있다. 특히 안정동위원소 및 지방산 조성을 활용하여 동물플랑크톤에 대한 해빙 미세조류의 먹이 기여도 및 저서 생태계에 대한 해빙 미세조류의 기여도에 대한 보고가 되었으며, 최근에는 분자단위 생체지표(아미노산)의 질소 안정동위원소비를 활용한 해양생물의 영양단계 규명 연구에 대한 장점에 대하여 보고된 바 있다.

2. 국내 기술개발 현황

극지 해양 생태계에 대한 연구는 기존 극지해양연구관련 사업('양극해 환경변화 이해 및 활용연구' 2011~2016, 해양수산부)에서 일부 수행된 바 있으나 해빙 생태계만을 위한 국내 연구는 현재까지 전무한 실정이다. 현재까지 극지연구소에서 수행된 연구를 살펴보면 남극 및 북극 해양 종합관측연구가 다수 수행되었고, 일부 과제에서는 해빙캠프 프로그램을 통하여 melt pond에 대한 연구가 수행되었음을 확인할 수 있다. 그러나 연구기간 및 연구지역의 특수성으

로 인하여 해빙미세조류 대상의 심도 있는 연구는 이루어지지 않고 있는 실정이다. 반면, 인공 위성을 활용한 해빙연구의 경우 한국과학기술원의 원격탐사센터에서 한반도 주변 및 동아시아 지역 관측을 수행할 수 있는 정지궤도 위성 활용 등의 연구가 이루어져 왔으나, 원격탐사 기반 극지연구는 국내에서 체계적으로 수행된 사례가 거의 없으며 최근에 들어서야 극지연구소 주요사업의 일환으로 남극해에 대한 연구가 진행된 사례가 있다. 하지만 북극해는 아직 본격적인 연구의 수행 결과는 보고되지 않았다.



‘양극해 환경변화 이해 및 활용연구’과제에서 수행된 Sea Ice Camp 조사 지역 및 Melting Ponds 연구지역 (위: 2015년, 아래: 2016년)

○

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

1절. 연구수행 방법

1. Kongsfjorden 현장 조사 및 시료 채집

북극 다산과학기지가 위치 하고 있는 Svalbard의 Kongsfjorden 내의 해양 미세조류의 탄소 흡수율 측정 및 해양의 기초 환경조사를 목적으로 Kinngsbay 사의 Teisten 및 MS Farm 을 활용하여(그림 1) 2017년 5월(NICE17A)과 10월(NICE17B)(그림 2), 2018년 4월(NICE18A, 그림 3)과 6월(NICE18B, 그림 4), 그리고 2019년 7월(NICE19, 그림 5)에 걸쳐 현장 조사를 실시하였다. 계획된 10개의 현장 조사 정점과 담수 유입의 영향 파악을 위해 북극 다산과학기지 주변 담수호 및 유입수(수로)에서 시료 채집을 추가로 수행하였다. 채집된 시료는 미세조류의 탄소 흡수율 측정을 위한 현장 배양과 영양염 및 화학인자 분석을 위한 시료로 분리하고 Marine Lab 및 다산과학기지 내 실험실로 운반하여 시료의 전처리를 실시하였다.



그림 1. 다산기지 앞 Kongsfjorden 현장 조사 연구선, Teisten(좌)와 MS Farm(우)

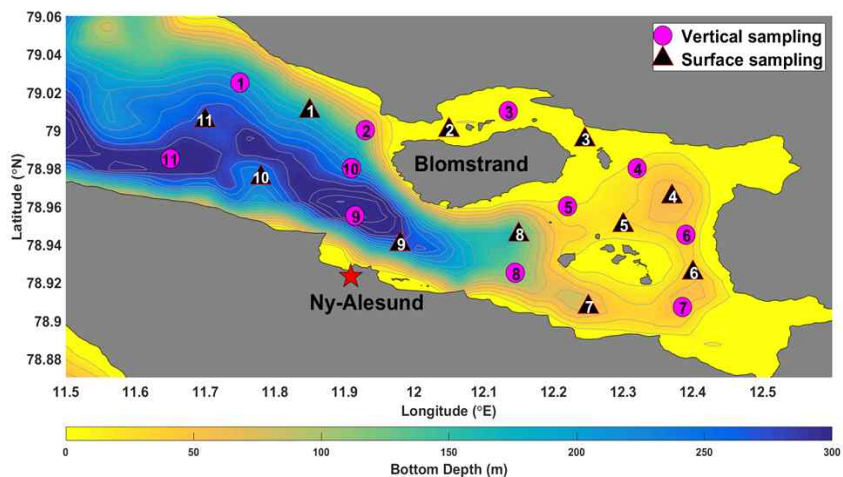


그림 2. 2017년 북극 다산과학기지 현장 조사 정점도

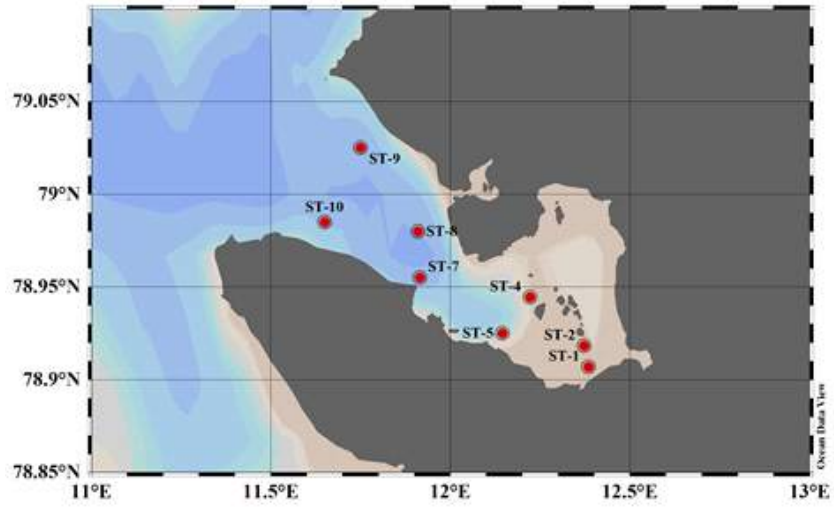


그림 3. 2018년 1차(NICE18A) 북극 다산기지 해양조사 연구지역 정점도

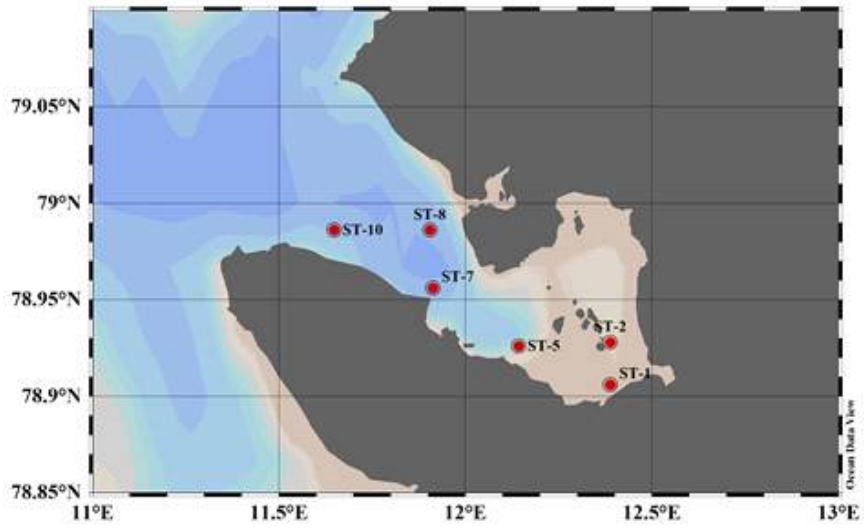


그림 4. 2018년 2차(NICE18B) 북극 다산기지 해양조사 연구지역 정점도

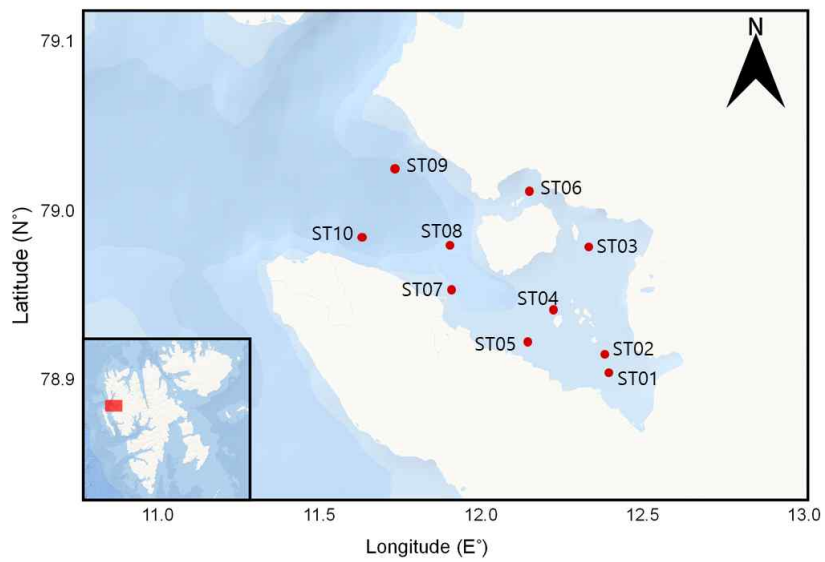


그림 5. NICE19 Kongsfjorden 연구 정점



그림 6. Teisten을 활용한 Kongsfjorden 현장 해수 채취(좌) 및 표층 퇴적물 채집(우) 모습

2. 안정동위원소 추적자를 활용한 해양 미세조류의 탄소 흡수율 현장 측정

현장에서 채집된 해수를 PC 병에 담아 기지 주변 실험실로 운반하였다. 현장 해수에 탄소 추적자를 일정량 첨가 한 후 약 4 시간 동안 배양을 실시하였다(그림 7, 8). 배양이 완료된 시료는 즉시 여과 후 실험실로 운반하였다. 여과된 시료는 EA-IRMS를 이용하여 탄소 안정동위원소비 분석을 실시 하였다(그림 9). 분석된 결과는 아래의 식을 통해 탄소 흡수율을 계산하였다.

$$\text{Production rate} = \Delta\text{POC}(t) / t = (\text{ais} - \text{ans}) / (\text{aic} - \text{ans}) * (\text{POC}(t) / t)$$

ais : 배양이 끝난 후 유기물의 ^{13}C atom %

ans : 자연상태의 ^{13}C atom %

aic : PC병내 DIC의 ^{13}C atom %

t : 배양시간

POC(t) : 배양이 끝난 후 POC의 농도



그림 7. 식물플랑크톤의 탄소 및 질소 흡수율 현장배양 사진.

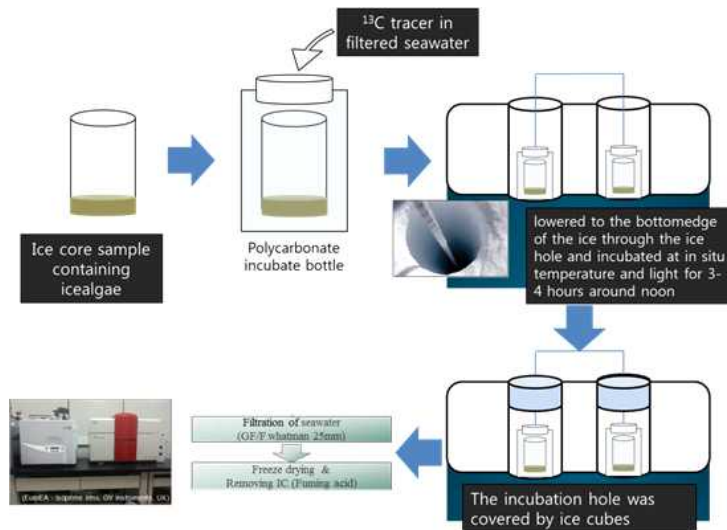


그림 8. 해빙 미세조류 기초생산력 현장 배양 측정 실험 방법 모식도

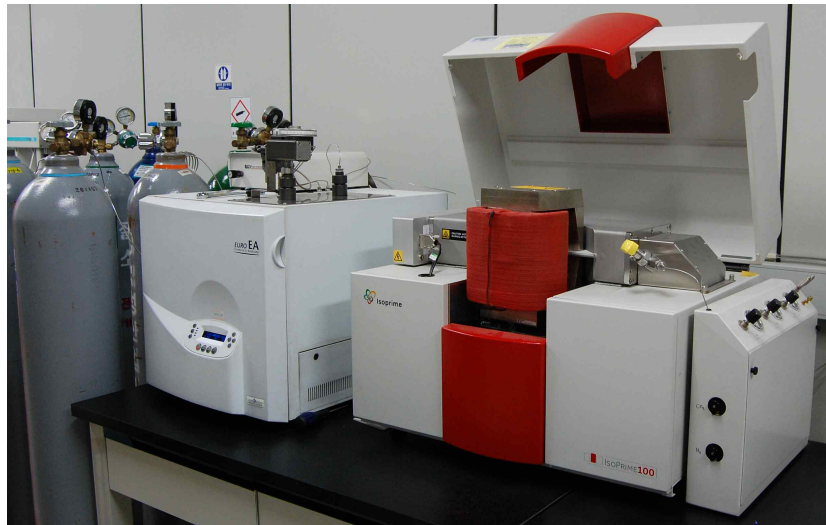


그림 9. 안정 동위원소 분석에 사용된 EA-IRMS

3. 태평양권역 북극연안 (케임브리지베이) 해빙생태계 탄소흡수율 현장관측

대서양권역에 속하는 Kongsfjorden 에서의 탄소흡수율과 비교 검증을 위하여 태평양권역의 북극연안(케임브리지베이, 코털하버)의 해빙 생태계에서 탄소 흡수율 측정을 위한 현장 관측 및 현장 배양을 실시하였다(그림 10, 11).

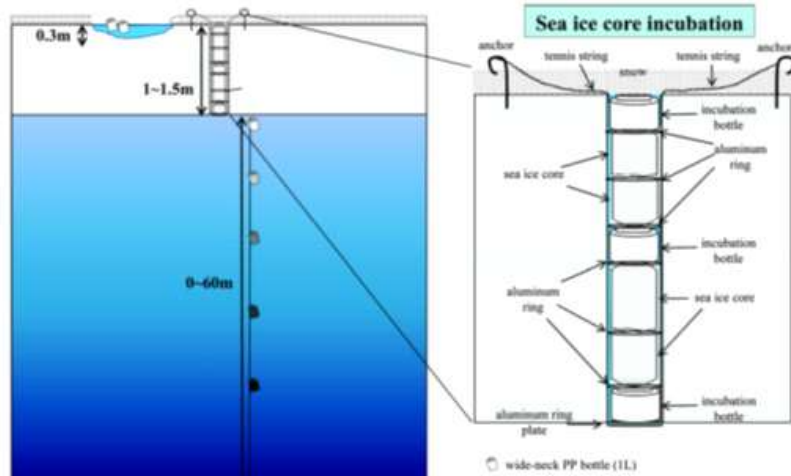


그림 10 해빙생태계 탄소 흡수율 측정 방법 모식도

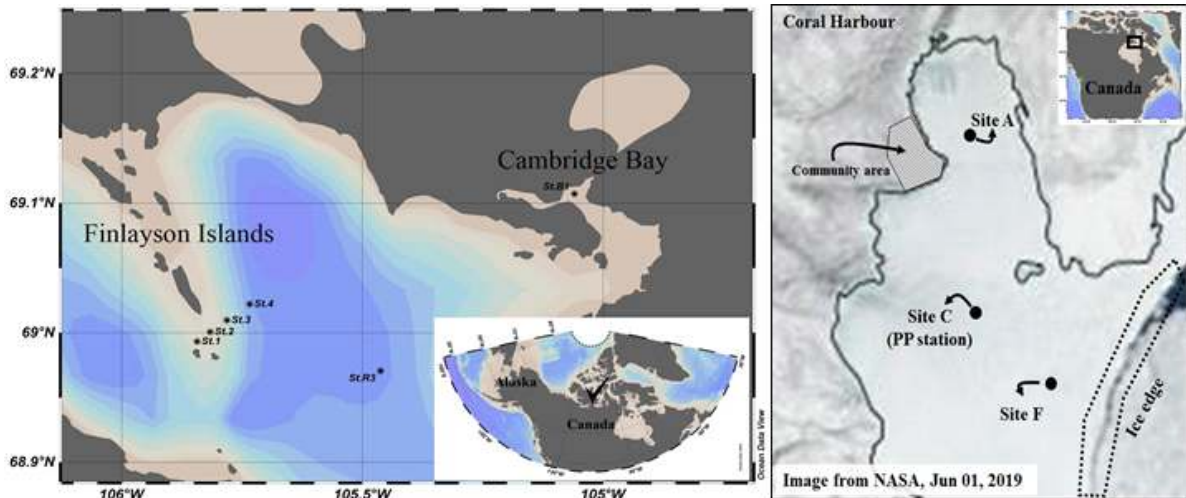


그림 11. 캐나다 Cambridge Bay(좌) 및 Coral Harbor(우) 연구 정점

4. 해양 미세조류 유기물 조성 및 생화학 지표 특성 확인

해양 미세조류 내의 유기물 조성 변화 확인 및 생화학 지표의 특성을 확인 하기 위하여 현장에서 채집된 해수 시료를 일정량 여과하고 동결건조 하여 실험실로 운반하였다. 탄소 및 질소 안정동위원소 비 분석을 위한 시료(GF/F, 25mm)는 12M HCl을 이용한 acid fuming 방법으로 무기탄소를 제거 한 후 EA-IRMS를 이용하여 분석을 실시하였다. 총 유기탄소 분석을 위해 채집된 현장 해수를 40ml 시료 병에 분취하였고, 용존 유기탄소의 분석은 여과된 해수를 40ml 시료 병에 분취하였다. 채집된 시료는 HgCl로 고정된 후 냉장 보관하여 실험실로 운반하였다. 시료의 분석에는 총 유기탄소 분석기(TOC analyzer-Shimadzu)를 사용 하였다(그림 12). 입자성 유기탄소의 분석을 위해 현장 해수를 GF/F로 여과한 후 동결건조하여 실험실로 운반하였다. HCl을 이용한 acid fuming으로 무기탄소를 제거한 시료를 EA를 이용하여 분석을 실시 하였다(그림 13). 또한 해수 내 무기영양염의 분석을 위해 채집된 시료는 실험실로 운반하여 영양염자동분석기(그림 14)을 이용하여 정량하였다.



그림 12. 총 유기탄소 분석기



그림 13. 원소분석기(Elemental Analyzer)

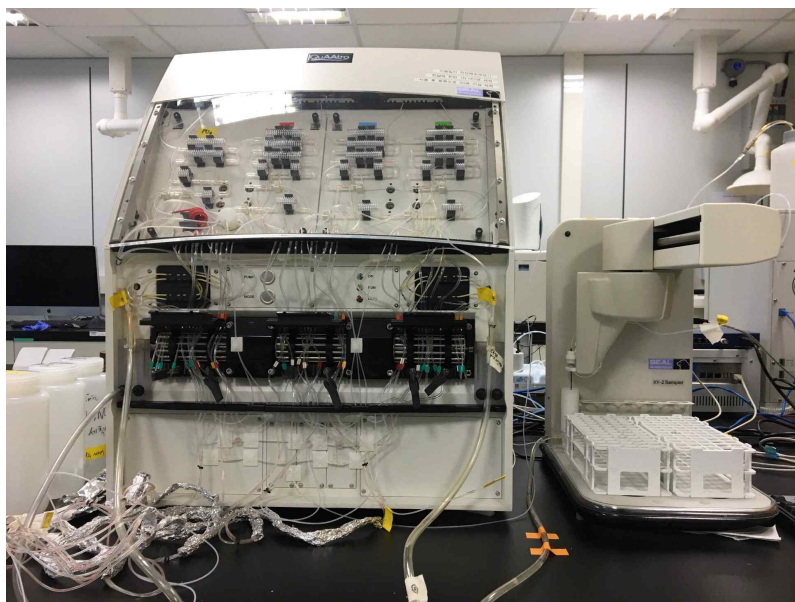


그림 14. 영양염자동분석기

5. Svalbard Kongsfjorden 내 해빙 서식 미세조류 및 동물플랑크톤의 종다양성 현장조사

Kongsfjorden의 식물 및 동물 플랑크톤 군집을 분석하여 시기별 플랑크톤의 종다양성 및 현존량의 변동을 확인하였다. 사전에 선정된 정점을 대상으로 네트를 이용하여 수직 또는 수평 예망을 진행하였다. 동물플랑크톤의 시료의 경우 망구 40 cm, 망목 200 μm 의 동물플랑크톤 네트를 사용 하였고, 네트 입구의 2/3 높이에 유량계(flowmeter)를 부착하여 채집이 끝난 후 유량계의 회전수를 기록하여 여과한 해수의 양을 측정하였다(그림 15). 시료의 채집시간은 주간 야간 및 조석 주기에 대한 구분없이 실시하며 이 때, 채집시간을 현장에서 기록하여 추후 자료 해석 시 시료채집의 주, 야간에 따른 차이를 고려하였다. 채집된 시료를 실험실로 운반하여 미세조류 및 동물플랑크톤의 종다양성, 주요 우점종, 현존량, 크기별 엽록소 a 농도를 측정하였다.

동물플랑크톤은 크기에 따라 대형 동물플랑크톤, 중형 동물플랑크톤으로 구분하여 실험실에서 동정 및 계수를 진행하였다. 시료에 대한 분류 및 동정 수준은 최대한 종 수준까지 진행하며 동정이 어려운 분류군이나 국내 전문가가 없는 분류군의 경우에는 보다 상위 분류단계까지 표시하였다. 동물플랑크톤의 생물량 측정은 채집 후 분할된 시료를 활용하여 습중량, 건중량 등의 항목을 측정하여 최종 유기물 중량으로 활용이 가능하도록 진행하였다.

분석이 끝난 시료는 시료의 크기에 따른 적합한 용기 (vial 등)에 시료에 관한 정확한 정보를 포함한 라벨과 함께 넣은 뒤, 표본용기 내부는 70% 에틸알콜을 채우고 파라필름 등으로 밀봉하여 시료를 보관하고 있다.



그림 15 Kongsfjorden 내 해양 동물플랑크톤 시료 채집 모습

6. 해색인공위성 자료를 활용한 북극해 스발바드 주변 일차생산력 지도 작성

Svalbard 주변 일차생산력 지도 작성을 위하여 스발바드 주변 MODIS Aqua 해색위성자료 (엽록소 농도, 수온, 광량) 확보하였다. 고해상도 해색위성자료를 활용한 스발바드 주변 엽록소 분포를 파악하였다(그림 16). 확보된 자료를 기반으로 스발바드 주변해역 일차생산력 추정하였으며, 아래의 계산식과 같이 Vertically Generalized Production Model (VGPM) 알고리즘 활용하였다.

$$PP_{eu} = P_{opt}^B \times D \times \int_{z=0}^{z_{eu}} C_z \frac{[1 - \exp(-E_z / E_{max})] \exp(\beta_d \times E_z)}{[1 - \exp(-E_{opt} / E_{max})] \exp(\beta_d \times E_{opt})} dz$$

its DIM version is

$$PP_{eu} = 0.66125 \times P_{opt}^B \times [E_0 / (E_0 + 4.1)] \times Z_{eu} \times C_{opt} \times D$$

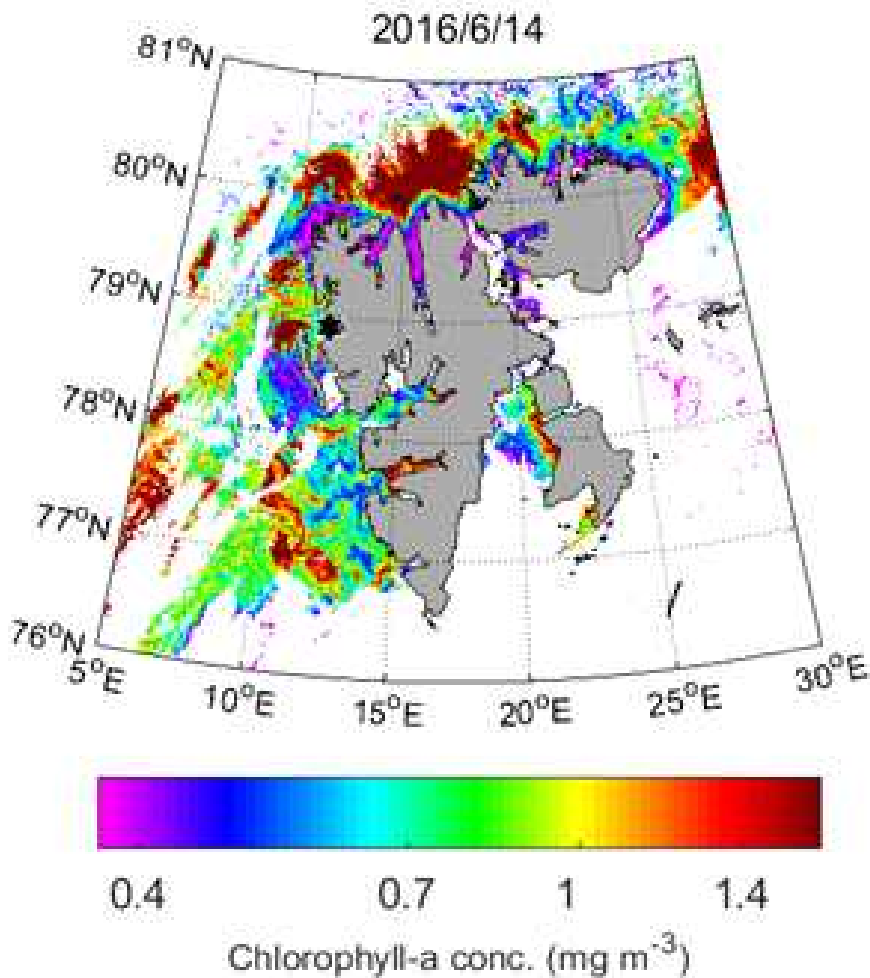


그림 16. 해색위성자료를 활용한 엽록소 분포도 예시

7. 해양-해빙 pCO₂ 관측

해빙에서의 pCO₂ 연속 모니터링을 위한 pCO₂ 센서를 도입하였다(그림 17, 18). 기존의 해빙 저 pCO₂ 관측에 관한 문헌 및 자료 조사를 통한 실험 방법을 디자인하였으며, 아라온의 서북극해 운항 중 도입한 pCO₂ 센서의 테스트를 진행하였다(그림 19, 20). 센서의 정확도는 관측 농도의 2% 전후 이며, 관측 가능한 농도 범위는 200 - 1000uatm 이며, 또한 배터리 연결을 통해 장기 무어링이 가능하다.



그림 17. Contros 사의 CO₂ 센서의 모습. 해빙에서 센서를 계류하여 이산화탄소를 측정

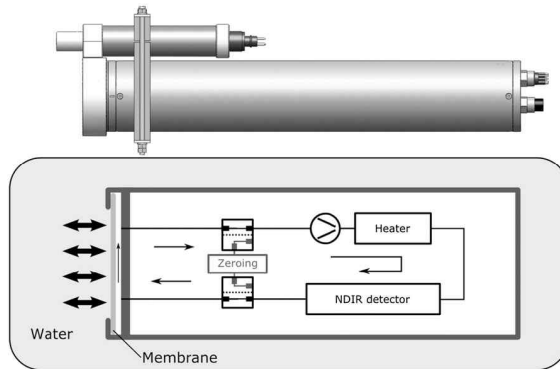


그림 18. pCO₂ 센서의 내부 구조.

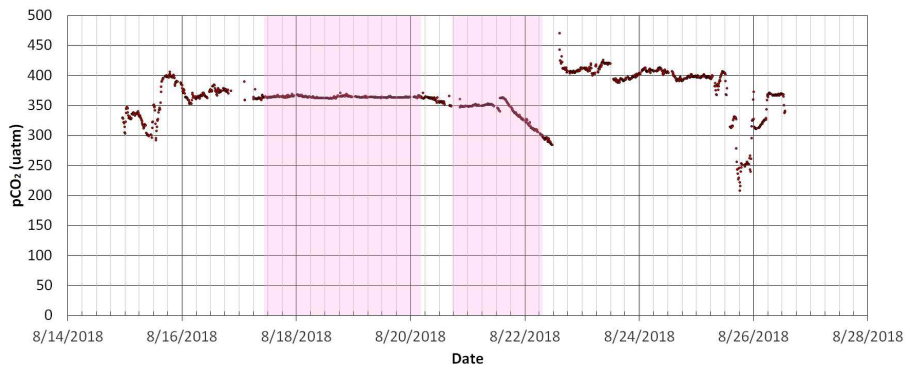


그림 19. 2018년 아라온 북극 항해 간 pCO₂ 연속 모니터링 결과

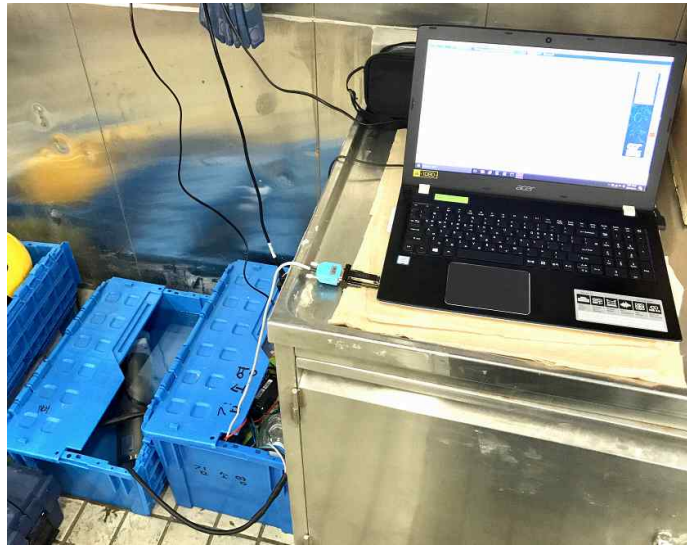


그림 20. 센서의 테스트 모습.

해빙 하단의 개요도(그림 21)와 같이 먼저 해빙에 코어링을 한 다음, 삼각프레임의 슈브를 통해 로프에 pCO₂센서와 BGC-CTD를 설치한 후 해빙의 아래에 위치시켰다. 관측 수심은 1일 단위로 수심별로 변화시키면서 관측하였다. 센서로부터 관측된 자료는 컨트롤 박스의 로거 또는 컴퓨터로 전송된다. 또한 센서에 전원을 공급하기 위한 배터리 팩을 컨트롤 박스에 장착하였다.

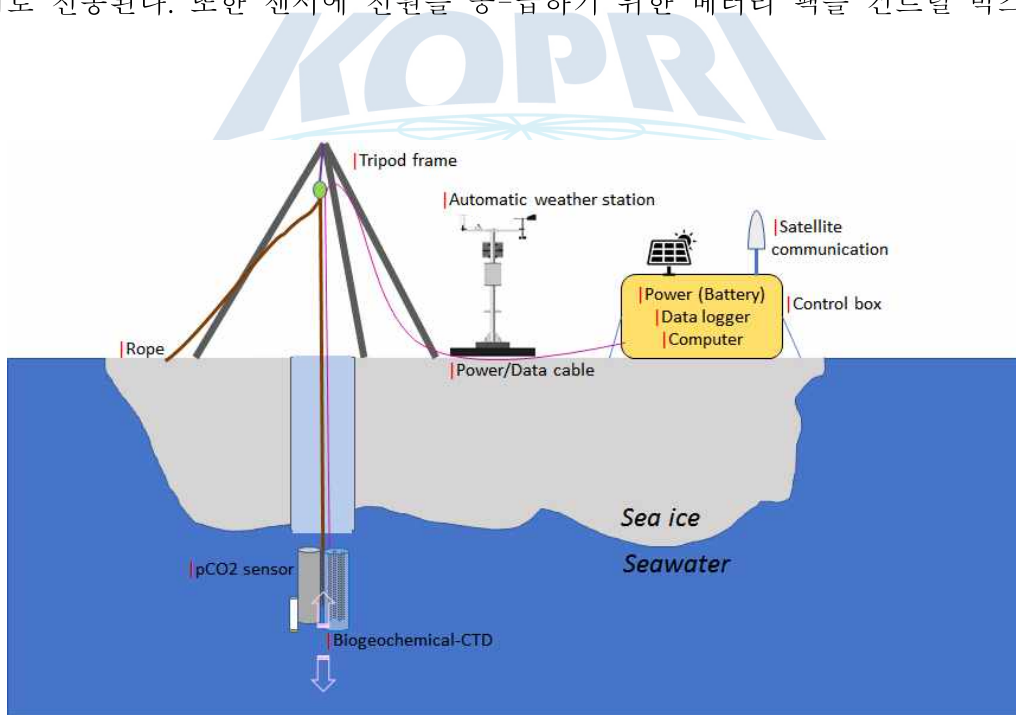


그림 21. 해빙저 pCO₂ 및 생지화학 변수 모니터링 플랫폼의 개요도

2절. 해빙 생태계의 탄소흡수율 평가

1. 북극 다산기지 주변 Kongsfjorden 해역에서 영양염 및 이화학 특성

가. 1차년도 (2017년) 현장 조사 기간 동안 Kongsfjorden 해역에서의 영양염, 용존 및 유기탄소, 유기질소화합물 분포 특성

(1) Kongsfjorden 해역에서 영양염, 유기탄소 및 질소화합물의 공간 분포 특성

Kongsfjorden 해역 내의 관측지점 중 정점 1번, 3번, 6번에서는 상대적으로 낮은 염분과 낮은 수온이 관측되어 해빙 또는 육상빙하의 용빙수의 영향을 받은 것으로 나타났다(그림 22). 특히, 정점 4번에서의 표층 염분은 다른 정점보다 다소 높은 값을 보인 것으로 보아 해저 지형에 의한 심층해수의 용승에 의한 것으로 판단할 수 있다. 같은 정점에서 탁도가 가장 높은 것으로 미루어 보아 용승에 의한 퇴적물이 유입된 것으로 추정된다. 형광(fluorescence) 자료로 미루어 보았을 때 Kongsfjorden 해역 내의 식물플랑크톤 분포는 크게 남북으로 구분이 가능하며, 남쪽 정점(정점 2, 5, 7, 10)에서의 값이 북쪽 정점(정점 3, 4, 6, 8, 9)에서의 값보다 높아 남쪽해역에서 식물플랑크톤의 활동이 활발한 것으로 나타났다.

입자상 유기탄소화합물의 분포는 형광(fluorescence) 자료의 분포와 유사한 경향을 보여 입자상 유기탄소화합물의 대부분이 식물플랑크톤의 활동에 의해 기인한 것으로 추정된다. 이에 반해 입자상 유기질소화합물의 분포는 입자상 유기탄소화합물과 다소 다른 분포 경향을 보여 입자상 유기질소화합물은 식물플랑크톤 뿐만 아니라 다른 기원의 영향을 동시에 받은 것으로 사료된다. 용존 유기탄소화합물과 용존 유기질소화합물은 식물플랑크톤의 활동이 높은 정점들에서 상대적으로 높은 값을 보여 이들 화합물의 농도가 해양생물활동에 의해 영향을 받은 것으로 추정된다.

질산염, 인산염, 규산염은 서로 유사한 분포를 보였으며, 식물플랑크톤 활동이 많은 정점들에서 농도가 높았고, 식물플랑크톤의 활동이 적은 정점들에서 낮은 농도 분포를 보였다. 뿐만 아니라 식물플랑크톤의 활동이 낮은 정점들에서는 탁도도 상대적으로 높아 식물플랑크톤의 활동이 적은 정점들에서는 영양염과 빛이 동시에 식물플랑크톤의 생산에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

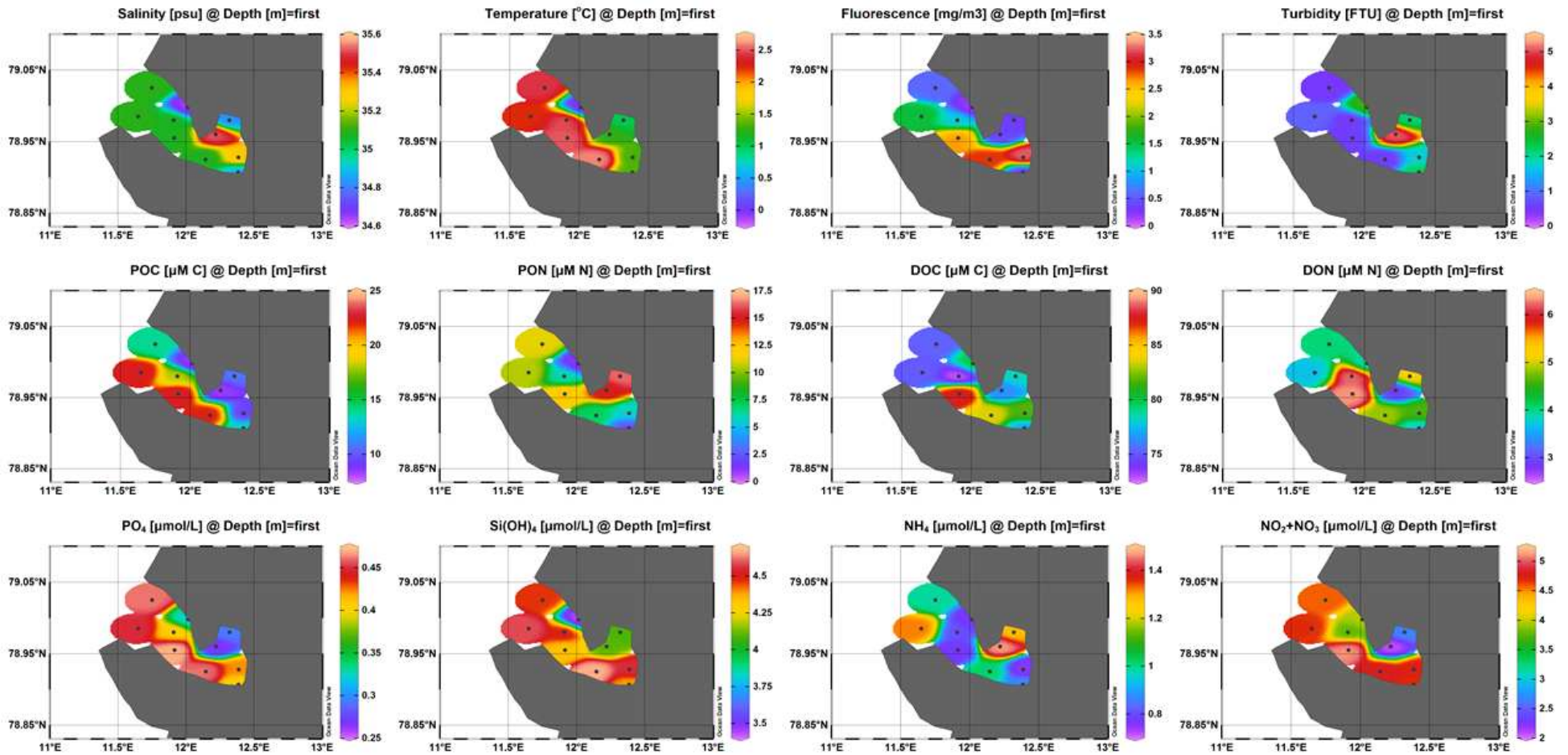


그림 22. 2017년 Kongsfjorden 해역 표층에서의 염분, 수온, 질산염, 인산염, 규산염, 암모늄, 형광, 입자상 유기탄소화합물, 입자상 유기질소화합물, 용존 유기탄소화합물, 용존 유기질소화합물의 분포 특성

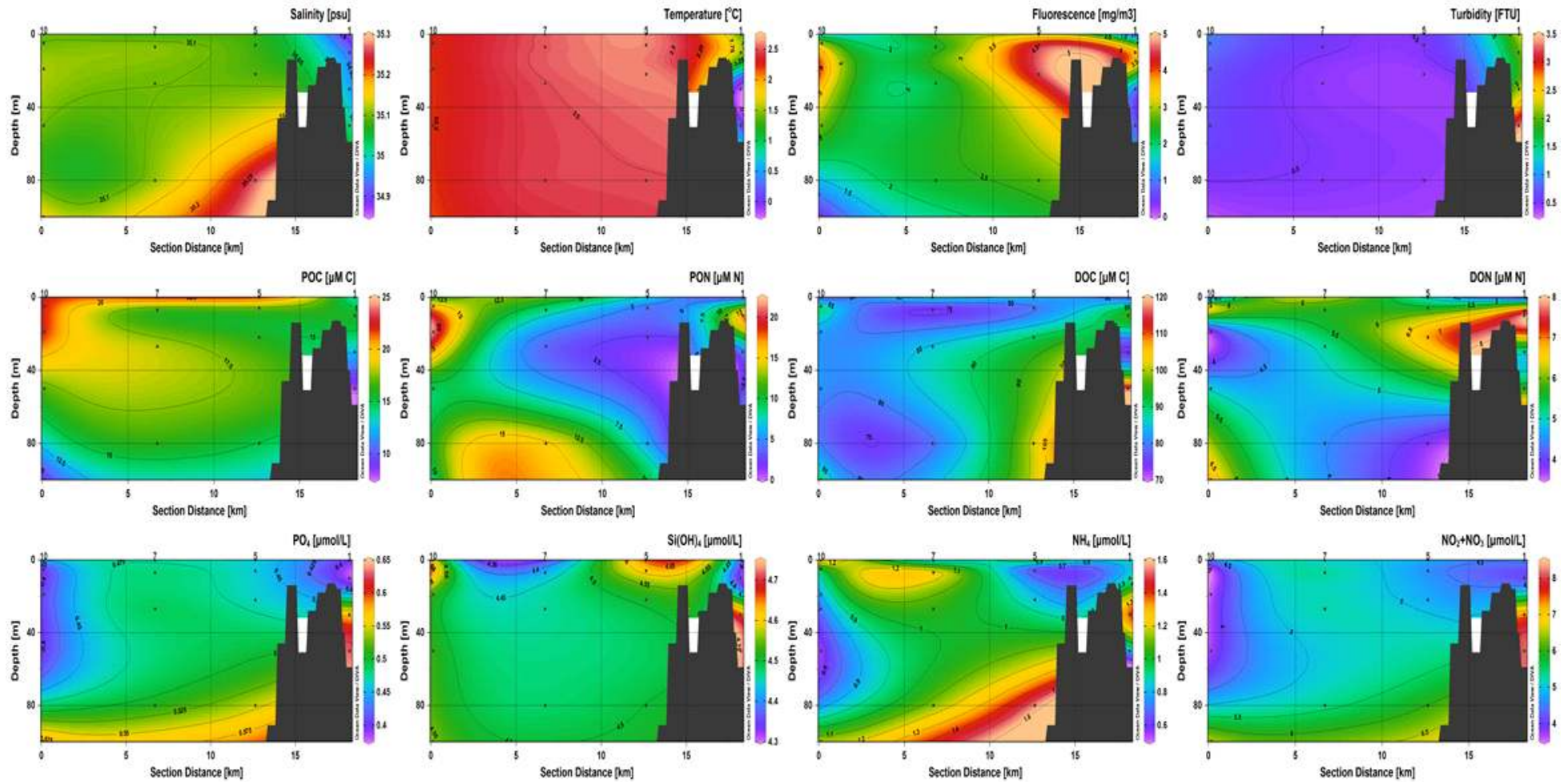


그림 23 2017년 Kongsfjorden 해역(정점 1, 5, 7, 10)에서의 염분, 수온, 질산염, 인산염, 규산염, 암모늄, 형광, 탁도, 용존 유기탄소화합물, 용존 유기질소화합물, 입자상 유기탄소화합물, 입자상 유기질소화합물의 연직분포 특성.

(2) Kongsfjorden 해역(정점 1, 5, 7, 10)에서의 영양염, 용존 및 유기탄소, 유기질소화합물 연직분포 특성 파악

Kongsfjorden 해역 내에서는 고염, 고온의 전형적인 대서양 기원 해수의 특성을 보였으나, 정점 1에서는 상대적으로 저염, 저온의 해수 특성을 보여 해빙 또는 빙하의 용빙수 영향을 받은 것으로 확인되었다(그림 23). 질산염과 인산염의 분포는 형광 자료와 상반되는 분포 특성을 보여 질산염과 인산염이 식물플랑크톤에 의해 이용되었음을 보여주었다. 이에 반해 규산염은 정점 1과 7에서 낮은 농도 분포를 보여, 이들 정점에서 규조류가 번성하고 있음을 시사하였다. 또한, 용존 유기탄소화합물과 용존 유기질소화합물은 입자상 유기탄소화합물과 입자상 유기질소화합물과 서로 반대되는 경향을 보여, 용존 유기탄소화합물과 용존 유기질소화합물은 입자상 유기탄소 및 입자상 유기질소화합물의 분해에 의해 기인한 것으로 보인다.

나. 2차년도 (2018년) 현장 조사 기간동안 Kongsfjorden 해역의 영양염, 용존 및 유기탄소, 유기질소화합물 분포

(1) 2018년 Kongsfjorden 해역에서의 영양염, 용존 및 유기탄소, 유기질소화합물 공간 분포

Kongsfjorden 해역내의 관측지점 중 정점 1번, 2번, 10번에서는 상대적으로 낮은 염분과 낮은 수온이 관측되어 해빙 또는 육상빙하의 용빙수의 영향을 받은 것으로 나타났다(그림 24). 특히, 정점 8번에서의 표층 염분은 다른 정점보다 다소 높은 값을 보인 것으로 보아 해저 지형에 의한 심층해수의 용승에 의한 것으로 판단된다. 높은 영양염 농도와 낮은 엽록소 농도로 미루어 보아 관측이 수행된 시기는 식물플랑크톤의 번성이 진행되기 전 또는 번성이 시작되기 전의 환경을 시사하는 것으로 보인다. 입자상 유기탄소 및 질소화합물의 분포는 엽록소 자료의 분포와 유사한 경향을 보여 입자상 유기탄소 및 질소화합물의 대부분이 식물플랑크톤의 활동에 의해 기인한 것으로 추정된다. 질산염, 인산염, 규산염은 서로 유사한 분포를 보였으며, 엽록소 농도가 상대적으로 높은 정점들에서 농도가 낮았고, 엽록소 농도가 상대적으로 낮은 정점들에서 높은 농도 분포를 보였다.

(2) 2018년 Kongsfjorden 해역(정점 1, 5, 7, 10)에서의 영양염, 용존 및 유기탄소, 유기질소화합물 연직분포 특성

Kongsfjorden 해역 내에서는 고염, 고온의 전형적인 대서양 기원 해수의 특성을 보였으나, 정점 1과 10에서는 상대적으로 저염, 저온의 해수 특성을 보여 해빙 또는 빙하의 용빙수 영향을 받은 것으로 확인되었다(그림 25). 질산염과 인산염의 분포는 형광자료와 상반되는 분포 특성을 보여 질산염과 인산염이 식물플랑크톤에 의해 이용되었음을 보여준다. 하지만 식물플랑크톤의 생산은 극히 낮은 값을 보여 시료채취 상황이 식물플랑크톤 번성 전이라는 것을 시사한다. 용존 유기탄소화합물은 Kongsfjorden 해역 안쪽인 1번 정점에서 가장 높은 농도값이 관

측된 반면, 외양 쪽인 10번 정점에서는 가장 낮은 농도값이 관측되어 식물플랑크톤의 번성이 시작되기 전 시기의 용존 유기탄소화합물의 주요 기원은 육상기원인 것을 시사하였다. 용존 유기질소화합물은 용존 유기탄소화합물과는 반대되는 경향을 보였으며 입자상 유기질소화합물이 분포하는 수심대에 분포하는 것으로 보아, 용존 유기질소화합물은 입자상 유기질소화합물의 분해에 의해 기인한 것으로 해석 가능하다.

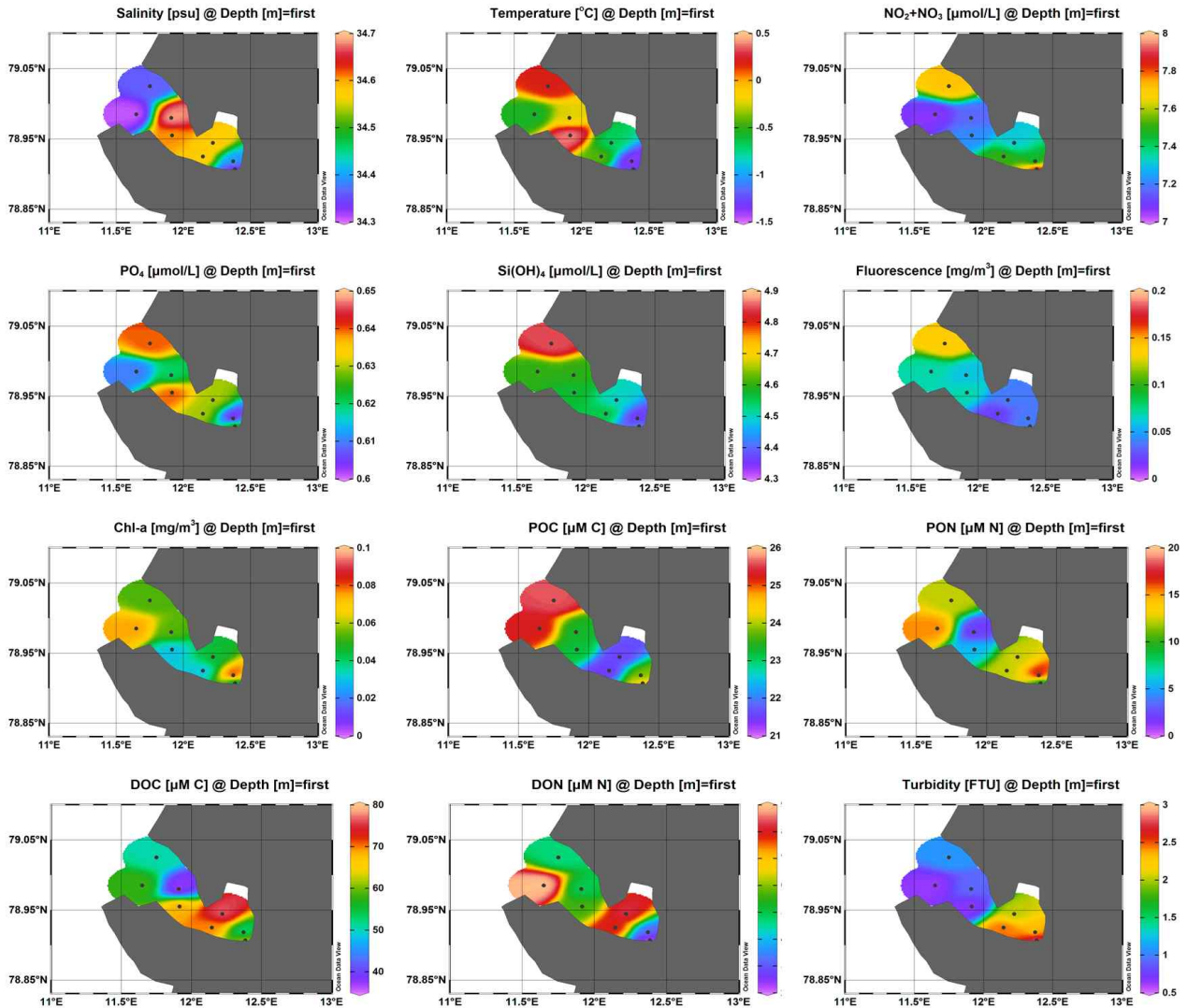


그림 24. 2018년 Kongsfjorden 해역 표층에서의 염분, 수온, 질산염, 인산염, 규산염, 형광, 엽록소, 입자상 유기탄소화합물, 입자상 유기질소화합물, 용존 유기탄소화합물, 용존 유기질소화합물의 분포 특성.

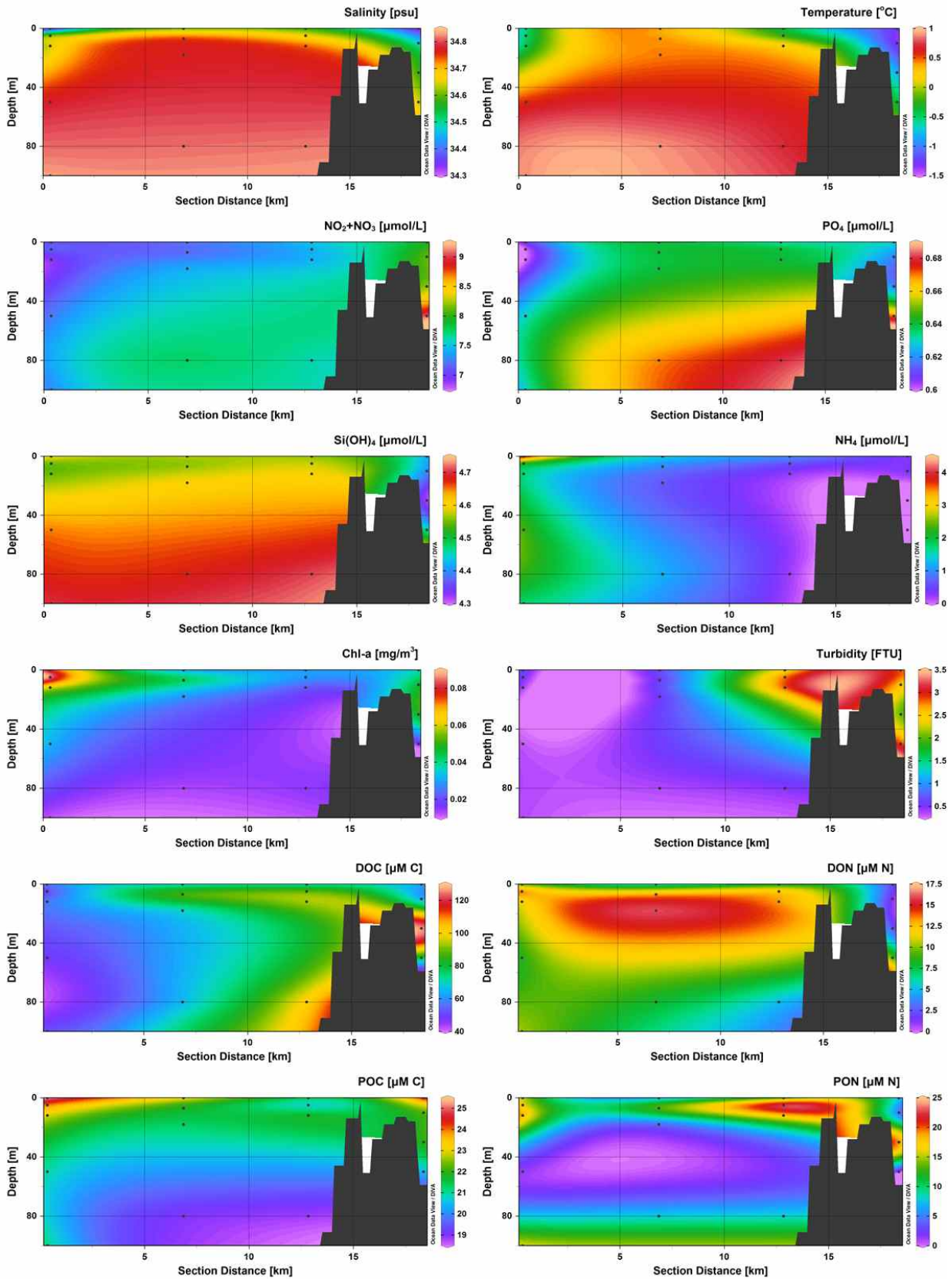


그림 25. 2018년 Kongsfjorden 해역(정점 1, 5, 7, 10)에서의 염분, 수온, 질산염, 인산염, 규산염, 암모늄, 엽록소, 탁도, 용존 유기탄소화합물, 용존 유기질소화합물, 입자상 유기탄소화합물, 입자상 유기질소화합물의 연직분포 특성.

(3) Kongsfjorden 해역 표층에서의 질산염, 엽록소, 용존 및 입자상 유기탄소, 유기질소화합물의 계절적 분포 특성

2018년 봄철 (4월, 식물플랑크톤 번성 전), 2017년 봄철 (5월, 식물플랑크톤 번성기간), 2017년 가을 (10월, 식물플랑크톤 번성 후)의 질산염, 엽록소, 용존 및 입자상 유기탄소, 유기질소화합물의 변화를 관측하였다(그림 26). 질산염의 농도는 식물플랑크톤 번성 전인 2018년 봄철에 가장 높은 농도를 보였으며, 식물플랑크톤의 번성이 진행됨에 따라 농도가 감소하는 경향을 보여 영양염이 봄-가을 시기에 식물플랑크톤에 의해 사용되었음이 확인되었다.

엽록소 농도는 2018년 봄철 (4월)에 가장 낮은 값을 보여 식물플랑크톤의 번성 전이라는 것이 확인되었으며 2017년 봄철 (5월)에 농도가 급격히 증가해서 2017년 가을 (10월)에 급격히 감소하였다. 이는 식물플랑크톤이 2017년 봄철에 급격히 성장하여 가을철로 접어들어 태양광의 감소로 인해 사멸기에 접어들었음을 시사한다.

용존 유기탄소는 2018년 봄철 (4월)에 가장 낮은 값을 보였고 식물플랑크톤의 번성 후인 2017년 가을 (10월)에 가장 높은 농도가 관측되었다. 이는 식물플랑크톤의 번성이 시작되고 입자상 유기탄소화합물이 박테리아에 의해 분해됨에 따라 용존 유기탄소화합물이 증가한 것으로 사료된다. 반면, 용존 유기질소화합물은 용존 유기탄소화합물과 다소 유사한 경향을 보여 입자상 질소화합물의 분해에서 기인한 것을 시사하였으나, 몇몇 정점에서는 식물플랑크톤 번성시기에 가장 낮은 농도가 관측되었다. 입자상 유기탄소화합물과 유기질소화합물은 엽록소 농도와 비슷한 경향을 보여 대부분이 식물플랑크톤에서 기인한 것임이 확인되었으나 Kongsfjorden 해역 가장 안쪽 정점인 1번 정점에서는 식물플랑크톤 번성 후에 가장 높은 농도가 관측되어 육상기원의 입자상 유기화합물의 유입이 있음을 시사하였다.

다. 3차년도 (2019년) Kongsfjorden 해역 표층에서의 영양염, 용존 및 유기탄소, 유기질소화합물 분포

(1) 영양염, 용존 및 유기탄소, 유기질소화합물의 공간 분포

Kongsfjorden 해역 내의 관측지점 중 정점 1-5번에서는 상대적으로 낮은 염분과 낮은 수온이 관측되어 해빙 또는 육상빙하의 용빙수의 영향을 받은 것으로 나타났다(그림 27). 특히, 정점 7번, 8번, 10번에서의 표층 염분과 표층수온은 다른 정점보다 다소 높은 값을 보인 것으로 보아 대서양 기원의 해수가 유입된 것으로 판단된다. 또한, Kongsfjorden 입구쪽에는 상대적으로 높은 엽록소가 관측되어 식물플랑크톤 번성이 일어났음을 보여주며 특히 규산염의 농도가 낮아 대부분 규조류에 의한 번성이 있었음을 시사하였다. 용존 유기탄소 및 질소화합물의 분포는 일정한 패턴을 보이지 않았으며, 이는 해양기원과 육상기원 용존 유기탄소 및 질소화합물이 동시에 분포하고 있기 때문이라고 판단된다.

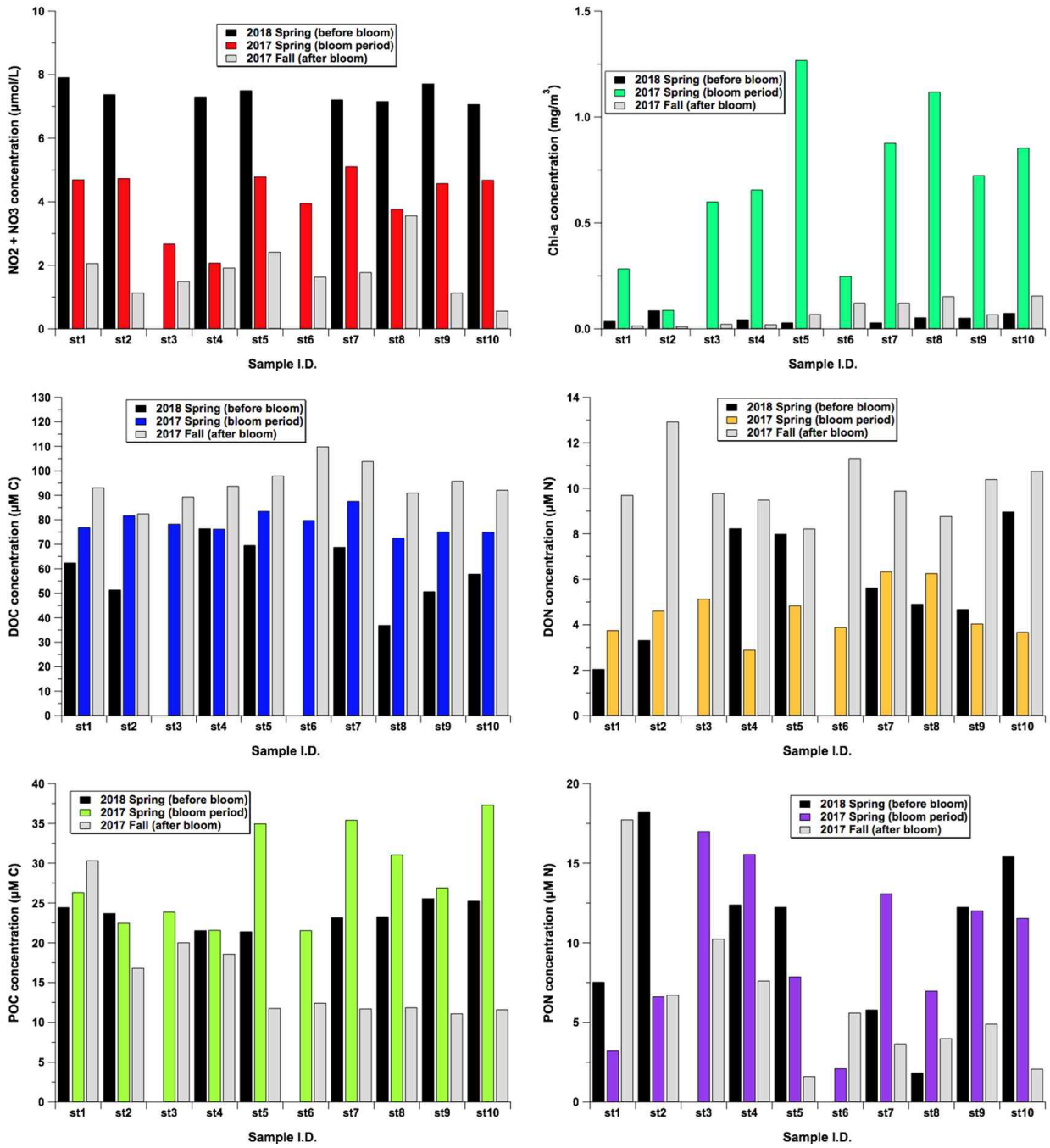


그림 26. Kongsfjorden 해역에서의 질산염, 엽록소, 용존 유기탄소화합물, 용존 유기질소화합물, 입자상 유기탄소화합물, 입자상 유기질소화합물의 계절적 농도 변화(식물플랑크톤 번성 전, 번성기간, 번성 후) 특성.

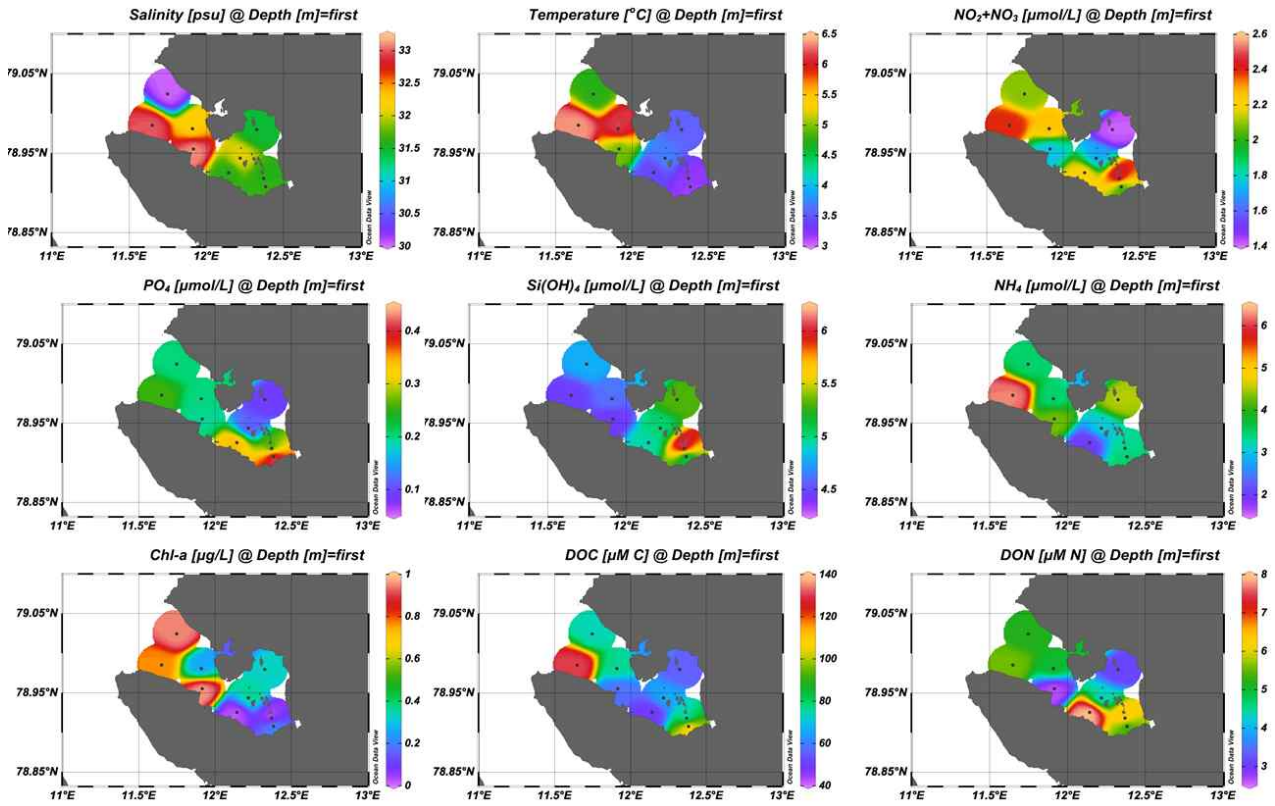


그림 27. Kongsfjorden 해역 표층에서의 염분, 수온, 질산염, 인산염, 규산염, 암모늄, 엽록소, 용존 유기탄소화합물, 용존 유기질소화합물의 분포 특성

(2) Kongsfjorden 해역 표층에서의 질산염, 엽록소, 용존 및 입자상 유기탄소, 유기질소화합물의 계절적 분포 특성

2018년 봄철 (4월, 식물플랑크톤 번성 전), 2017년 봄철 (5월, 식물플랑크톤 번성기간), 2017년 가을 (10월, 식물플랑크톤 번성 후), 2019년 여름철 (7월, 식물플랑크톤 번성기간)의 질산염, 엽록소, 용존 유기탄소, 유기질소화합물의 변화를 관측하였다(그림 28). 질산염의 농도는 식물플랑크톤 번성 전인 봄철에 가장 높은 농도를 보였으며, 식물플랑크톤의 번성이 진행됨에 따라 농도가 감소하는 경향을 보여 영양염이 봄-가을 시기에 식물플랑크톤에 의해 사용되었음이 확인되었다. 엽록소 농도는 봄철 (4월)에 가장 낮은 값을 보여 식물플랑크톤의 번성 전이라는 것이 확인되었으며 봄철 (5월)과 여름철 (7월)에 농도가 급격히 증가해서 가을 (10월)에 급격히 감소하였다. 이는 식물플랑크톤이 봄철과 여름철에 급격히 성장하여 가을철로 접어들어 태양광의 감소로 인해 사멸기에 접어들었음을 시사한다.

용존 유기탄소는 봄철 (4월)에 가장 낮은 값을 보였고 식물플랑크톤의 번성 후인 가을 (10월)에 가장 높은 농도가 관측되었다. 이는 식물플랑크톤의 번성이 시작되고 입자상 유기탄소화합물이 박테리아에 의해 분해됨에 따라 용존 유기탄소화합물이 증가한 것으로 사료된다. 용존 유기질소화합물은 용존 유기탄소화합물과 다소 유사한 경향을 보여 이들의 기원이 유사할 수 있음을 시사하였으나, 몇몇 정점에서는 식물플랑크톤 번성시기에 가장 낮은 농도가 관측되어 식물플랑크톤이 아닌 다른 유기물 기원이 있을 수 있음을 시사하였다.

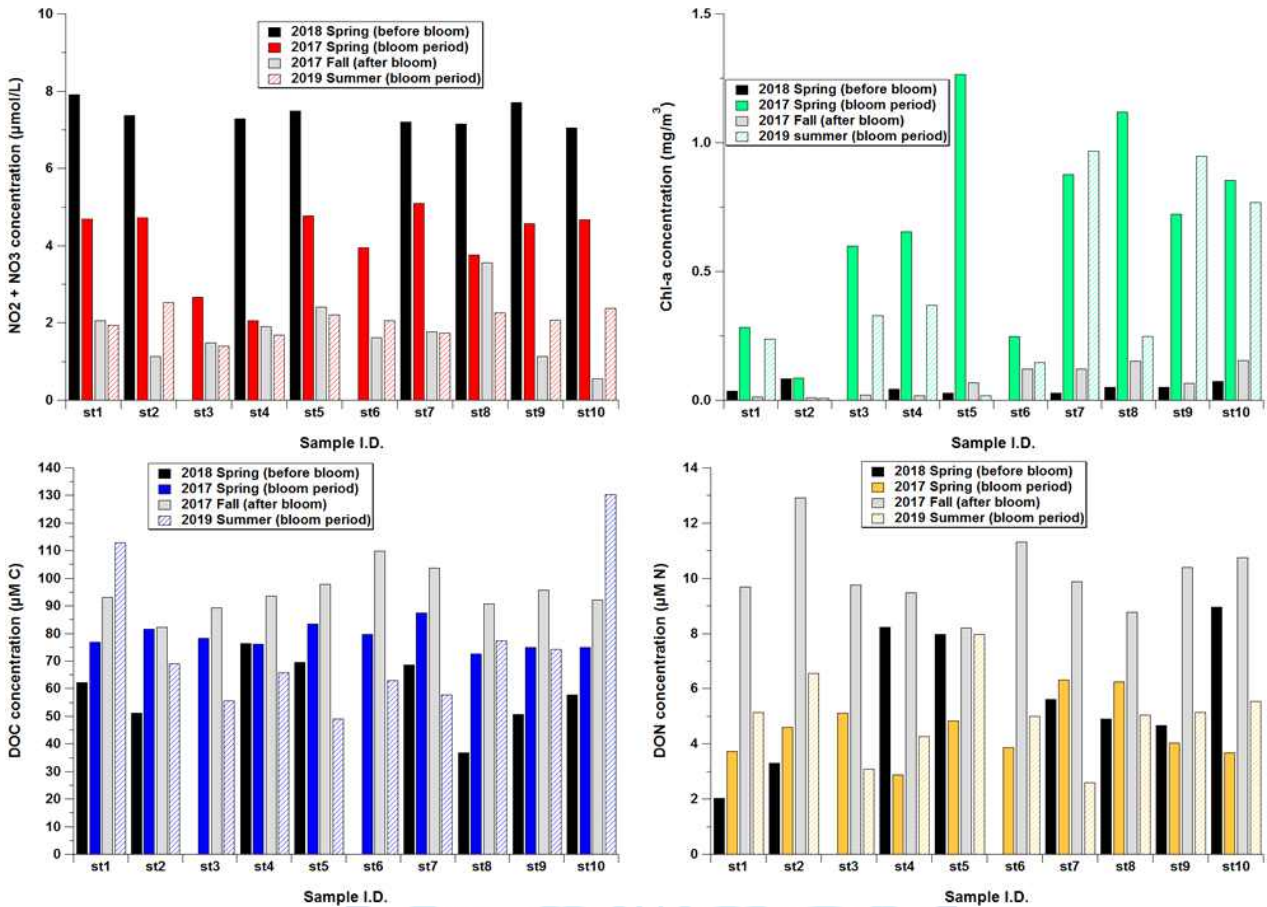


그림 28. Kongsfjorden 해역에서의 질산염, 엽록소, 용존 유기탄소화합물, 용존 유기질소화합물의 계절적 농도 변화 (식물플랑크톤 번성 전, 번성기간, 번성 후) 특성

2. 해빙 생태계에서 해양 및 해빙 미세조류의 탄소 및 질소 흡수율 변화

가. 북극 다산기지 주변 Kongsfjorden 해역에서 탄소 및 질소 흡수율 변화

Kongsfjorden 해역에서 2017년 5월(그림 2), 2018년 4월 총 4개의 정점(2, 5, 7, 10)(그림 3), 6월 총 4개 정점 (2, 5, 7, 10)(그림 4) 그리고 2019년 7월 총 4개의 정점(2, 5, 7, 10)(그림 5)에서 각각 Secchi disk로 측정된 광량별 수심에서 탄소 및 질소 흡수율 측정을 위한 해수 시료를 채집하였다. 탄소(¹³C) 및 질소(¹⁵NO₃, ¹⁵NH₄) 안정동위원소 추적자를 주입 후 배양(그림 7) 후 탄소 및 질소 안정동위원소 분석을 수행하였다. 조사해역에서의 사이즈별 식물플랑크톤의 탄소 흡수율 측정함에 따라 작은 사이즈의 총 일차생산성에 기여하는 정도 파악 하고 질소 안정동위원소 추적자를 이용하여 신생산 및 재생산성을 측정하여 연구 해역의 해양 생태계의 생산구조와 물질 순환 파악, 또한 전체의 생산 중 신생산이 차지하는 비율(f-ratio)을 파악함에 따라 이 지역의 해양 생태계의 생산구조와 물질 순환 파악하고자 하였다.또한, 세부적으로는 지속적인 과제 수행을 통해 Kongsfjorden 해역의 탄소 및 질소 흡수율에 대한 시공간적 자료 획득을

목표로 하였다.

조사해역에서의 사이즈별 식물플랑크톤의 탄소 흡수율 측정함에 따라 작은 사이즈 (<2 μm)의 총 일차생산성에 기여하는 정도 파악하였다(그림 29). 연구 해역의 해양 생태계의 생산구조와 물질 순환 파악을 위해 질소 안정동위원소 추적자를 이용하여 신생산 및 재생산성을 측정하였으며 전체의 생산 중 신생산이 차지하는 비율(f-ratio)을 파악하였다(그림 30). 3년 동안 획득한 시료를 통해 (2017년 5월, 2018년 4월과 6월, 2019년 7월) Kongsfjorden 해역의 탄소 및 질소 흡수율에 대한 시공간적 자료 획득하였다.

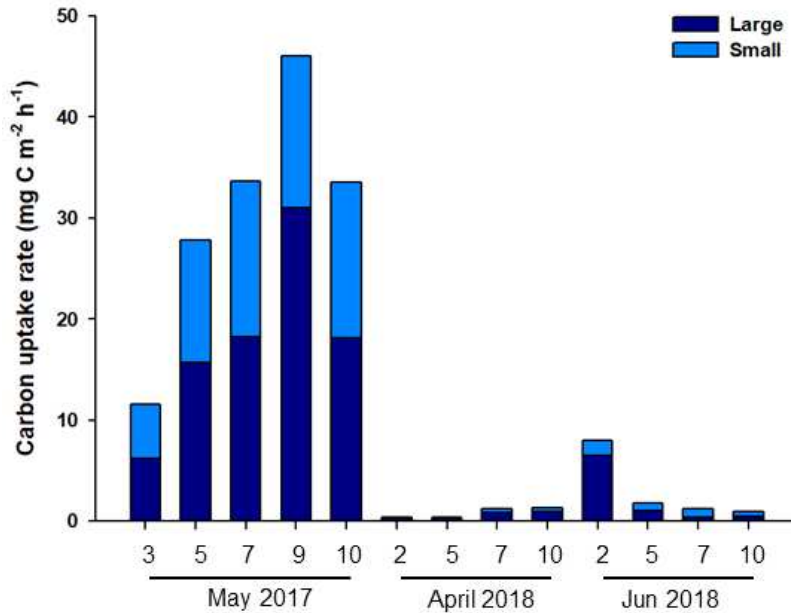


그림 29. 식물플랑크톤 사이즈별 탄소 섭취율

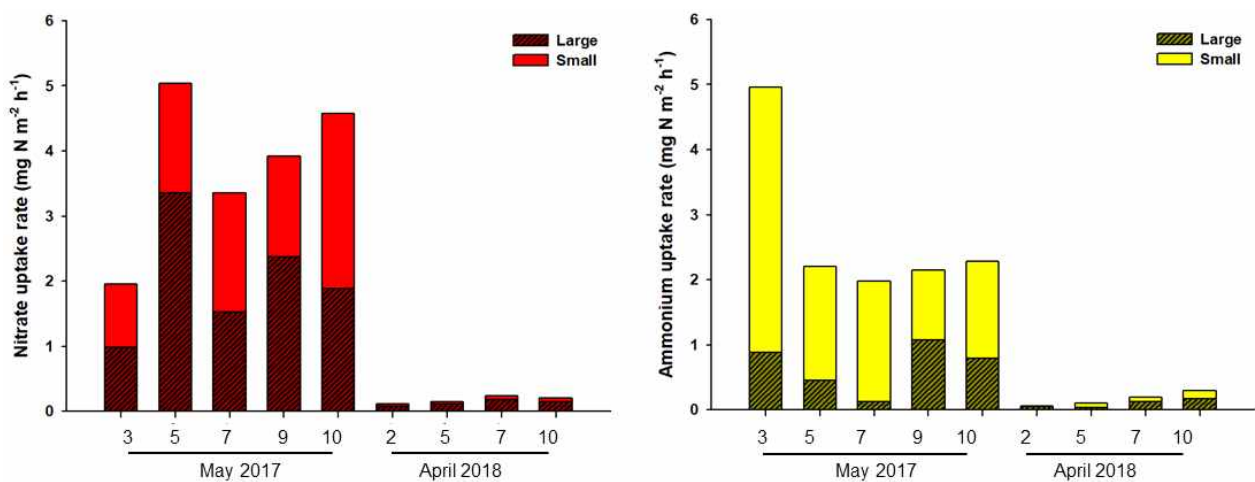


그림 30. 사이즈별 식물플랑크톤의 질산염 및 암모늄 섭취율

나. 1차년도 (2017년) 태평양권역 북극 연안(케임브리지 베이) 해빙생태계 탄소흡수율 측정

캐나다 북부지방에 위치한 Cambridge Bay의 seasonal ice zone에서 탄소 흡수율 측정을 위한 현장 조사를 실시하였다(1차년도, 2017년 수행; 그림 31). 평균 눈 두께는 st.1, st.2, st.3, st.4, 추가 조사 정점(A-I)에서 각각 4.9 cm, 4.1 cm, 4.3 cm, 4.9 cm, 10.9 cm 로 나타났다(표 1). 평균 해빙 두께는 st.1, st.2, st.3, st.4, 추가 조사 정점(A-I)에서 각각 133.6 cm, 137.4 cm, 155.7 cm, 173.4 cm로 측정되었다.

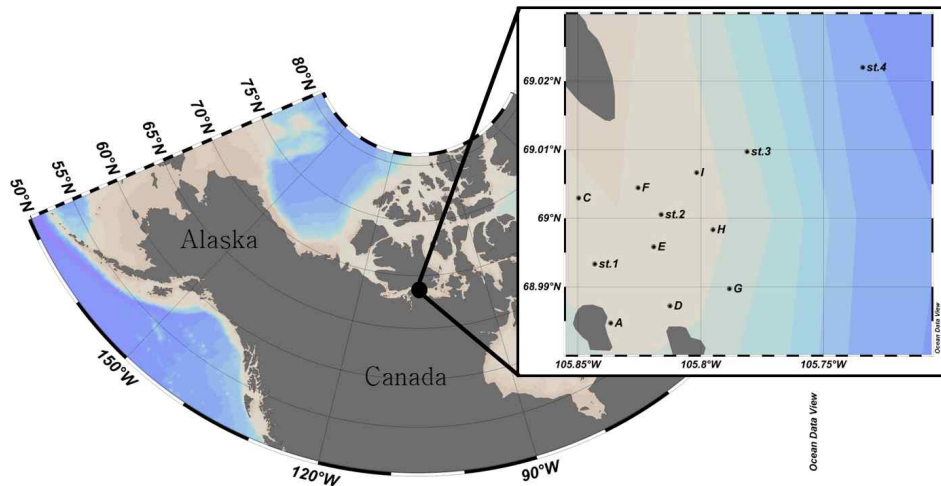


그림 31 케임브리지 베이 탄소흡수율 측정 연구 지역 (2017년)

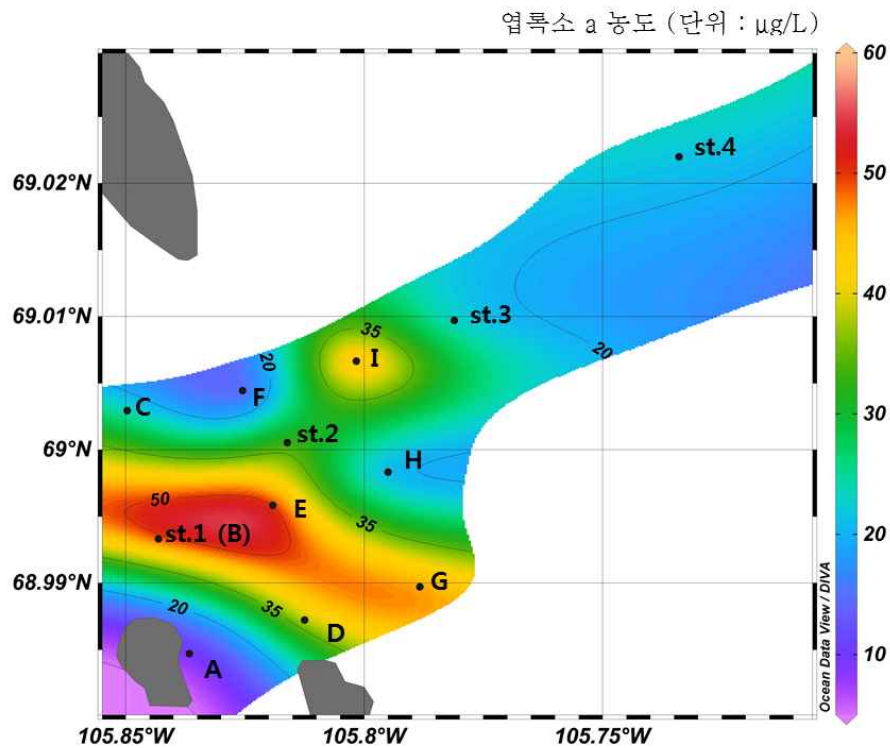


그림 32. 해빙 bottom 10cm에서 엽록소 a의 공간적 분포

표 1. 케임브리지 조사 정점에서 의 눈 두께, 해빙 두께

날짜	정점	눈 두께				평균	해빙 두께				평균
20170428	1	4	-	-	-	132	-	-	-		
20170501	1	4	4	4.5	5	130	140	-	-		
20170503	1	6	5	4.5	7	4.9	130	-	-	133.6	
20170506	1	7	6	5	4	131	133	134	135		
20170509	1	4	5	4.5	4	133	138	-	-		
20170428	2	5	-	-	-	137	-	-	-		
20170501	2	4	4	4	4	137	135	-	-		
20170503	2	4	-	-	-	4.1	143	-	-	137.4	
20170506	2	4	4	4	4	135.5	-	-	-		
20170509	2	4	-	-	-	137	-	-	-		
20170428	3	3.5	-	-	-	155	-	-	-		
20170503	3	5	-	-	-	4.3	155	-	-	155.7	
20170509	3	4.5	-	-	-	157	-	-	-		
20170426	4	2	5	-	-	190	-	-	-		
20170428	4	10	10	14	14	200	-	-	-		
20170501	4	2	-	-	-	167	-	-	-		
20170503	4	3	2.5	3	3	4.9	170	165	-	173.4	
20170506	4	4	3.5	2.8	3	164	164	-	-		
20170509	4	3	3	3	3	170	171	-	-		
20170513	A	15	-	-	-	133	-	-	-		
20170513	B'(high)	9	-	-	-	125	-	-	-		
20170513	B(low)	3.5	-	-	-	136	-	-	-		
20170513	C	12	-	-	-	118	-	-	-		
20170513	D	13	-	-	-	124	-	-	-		
20170513	E	15	-	-	-	10.9	122	-	-	128	
20170513	F	9.5	-	-	-	115	-	-	-		
20170513	G	12	-	-	-	132	-	-	-		
20170513	H'(high)	13	-	-	-	141	-	-	-		
20170513	H(low)	5	-	-	-	130	-	-	-		
20170513	I	13	-	-	-	132	-	-	-		

해빙 미세조류의 총 엽록소 a 농도 측정 결과 해빙의 bottom 10 cm에서 측정된 엽록소 a 농도는 st.1에서 65.33 $\mu\text{g/L}$ 로 가장 높은 값을 보였고 st.3에서 8.95 $\mu\text{g/L}$ 로 가장 낮은 값을 보였다(그림 32). 엽록소 a의 평균값은 st.1에서 41.25 $\mu\text{g/L}$ (S.D. = $\pm 19.61 \mu\text{g/L}$), st.2에서 33.74 (S.D. = $\pm 12.71 \mu\text{g/L}$), st.3에서 22.71 $\mu\text{g/L}$ (S.D. = $\pm 15.07 \mu\text{g/L}$), 추가정점에서 35.12 $\mu\text{g/L}$ (S.D. = $\pm 17.94 \mu\text{g/L}$)로 나타났다.

해빙 미세조류의 크기에 따른 엽록소 a 농도 측정(>20 μm , 2-20 μm , 0.7-2 μm) 결과 20 μm 이상의 크기가 큰 조류의 기여도는 st.4에서 81.36 %로 가장 높았고 st.2에서 60.02 %로 가장 낮은 값을 보였다. 2-20 μm 크기의 중형 조류의 기여도는 st.2에서 37.61 %로 가장 높았고, st.4에서 17.43 %로 가장 낮은 비율을 보였다. 반면, 0.7-2 μm 크기의 가장 작은 조류의 기여도는 st.4에서 4.97 %, st.1에서 0.61%의 최대 최소값을 보였다. 모든 정점에서 크기가 큰 해빙 미세조류가 총 엽록소 a의 60 % 이상을 차지하는 것으로 나타났다(그림 33).

해빙 미세조류의 유기물 조성 측정을 위한 샘플링 수행(탄수화물, 단백질, 지방) 결과 조사 기간 동안 측정된 탄수화물, 단백질, 지질의 농도의 범위는 각각 382.45-3498.26 $\mu\text{g/L}$, 584.49-3199.05 $\mu\text{g/L}$, 559.13-7540.79 $\mu\text{g/L}$ 로 나타났다(그림 34). 탄수화물, 단백질, 지질의 평균 농도는 1695.33 $\mu\text{g/L}$ (S.D.= $\pm 643.79 \mu\text{g/L}$), 1676.42 $\mu\text{g/L}$ (S.D.= $\pm 630.07 \mu\text{g/L}$), 3606.33 $\mu\text{g/L}$ (S.D.= $\pm 1521.38 \mu\text{g/L}$)으로 계산되었다. 각 정점에서 평균한 유기물의 구성비는 지질이 50.45% (S.D.= $\pm 7.91\%$)로 가장 높았고 탄수화물이 24.84% (S.D.= $\pm 5.29\%$), 단백질이 24.71% (S.D.= $\pm 5.95\%$)로 나타났다.

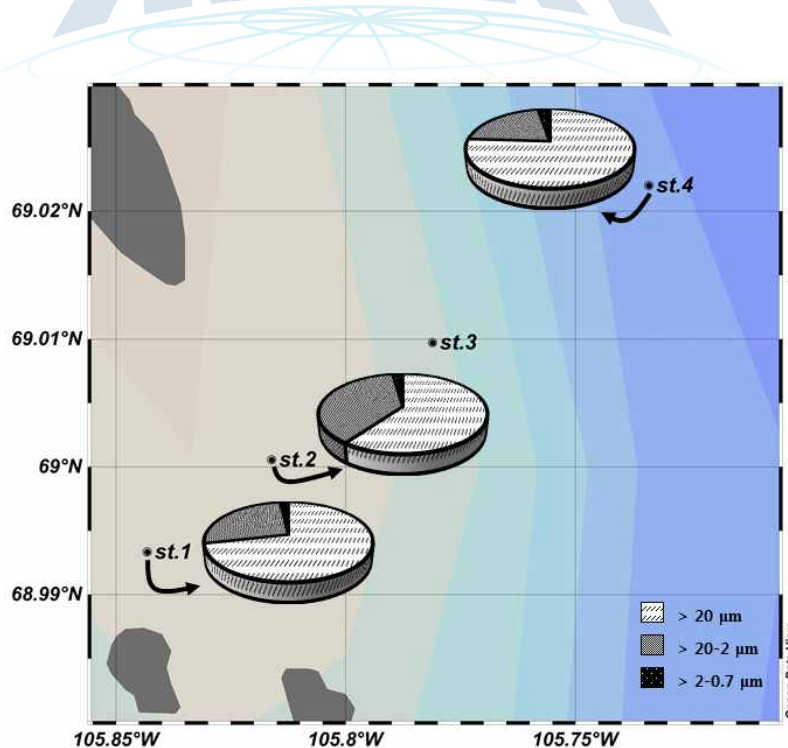


그림 33. St.1, st.2, st.4에서 총 엽록소 a에 대한 해빙 미세조류의 크기별 기여도

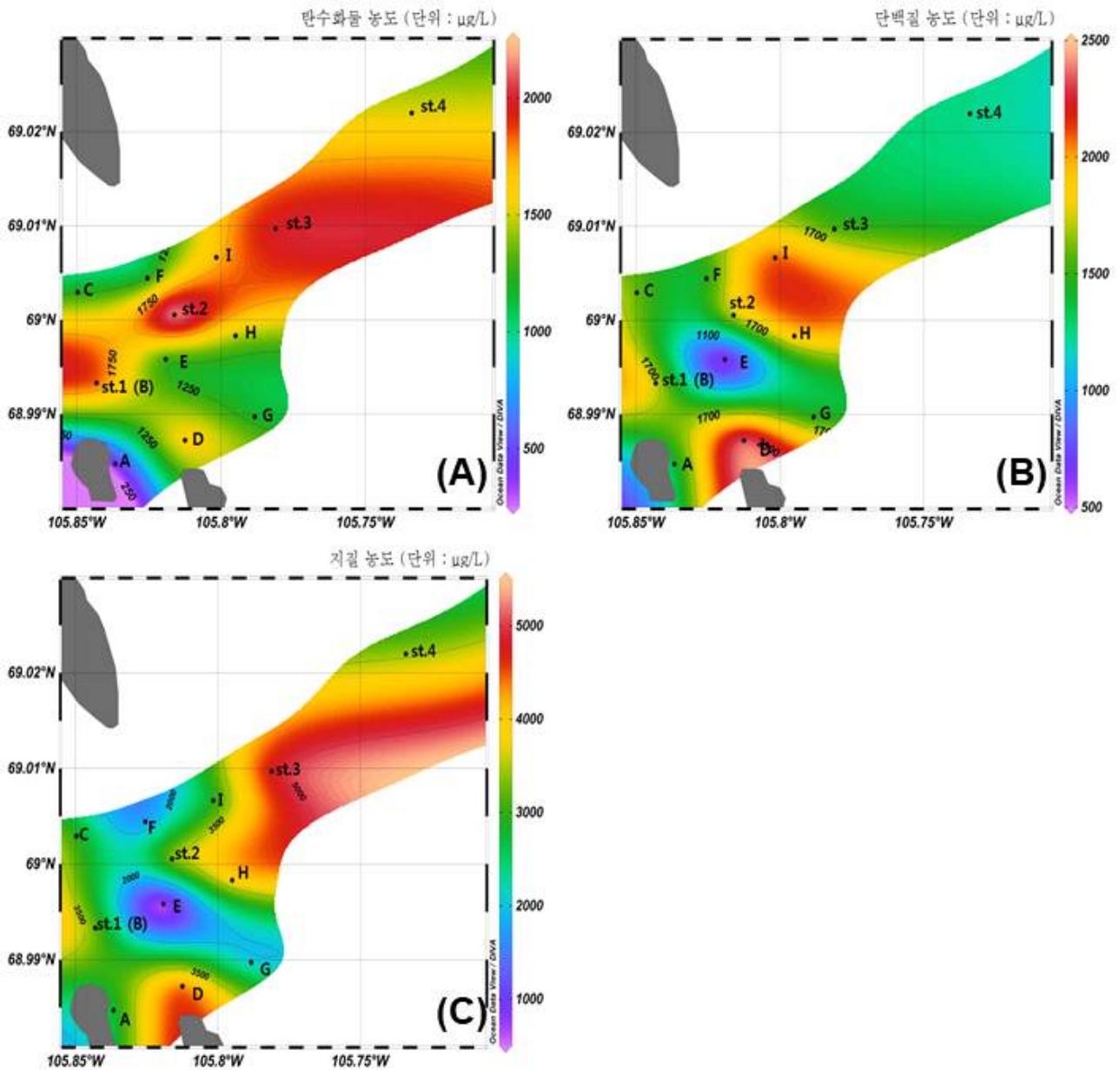


그림 34. 해빙의 bottom 10cm에서 탄수화물(A), 단백질(B) 그리고 지질(C)의 공간적 분포

다. 2차년도 (2018년) 캐나다 케임브리지 베이 해빙 미세조류의 탄소 흡수율 측정

캐나다 북부의 북극권에 위치한 first year sea ice zone으로 알려진 Cambridge Bay에서 2018년 4월 7일부터 2018년 4월 26일 까지 해빙 미세조류와 관련된 샘플링(해수, 동물플랑크톤 및 해빙 미세조류 시료)을 수행 하였다(그림 35, 표 1-1). 해빙 코어를 추출하기 전 눈 두께 측정을 최소 2회 수행 하였다. 또한, 해빙 코어를 추출한 hole에서 해빙 두께를 측정하였다. 연구 기간 동안 해빙 내부에 존재하는 대부분의 생물량이 해빙 아랫부분의 10cm (이후 bottom 10) 구간에 존재하는 것으로 확인됨에 따라 bottom 10에 대한 샘플링을 수행하였다(Full 코어에 대한 bottom 10의 생물량 기여도의 평균 = 96.4 ± 0.05 %). 현장에서 획득한 bottom 10은 즉시 빛을 차단할 수 있는 용기에 넣은 후 아이스박스에 담아 빛에 대한 스트레스를 최소화시켰다.

이후 샘플들을 실험실로 옮긴 후 완전히 녹을 때까지 빛을 차단한 상태로 상온에서 보관하였다. 해빙이 완전히 녹은 후 YSI model 30 (YSI, Yellow Springs, Ohio)을 이용해 염분을 측정하였다. 이후 해빙 미세조류의 엽록소 a, 거대분자 조성 분석, 배양 전 유기 탄소 분석을 위해 GF/F (pore size = 0.7 μm , Whatman) 필터를 이용해 여과를 수행하였다.

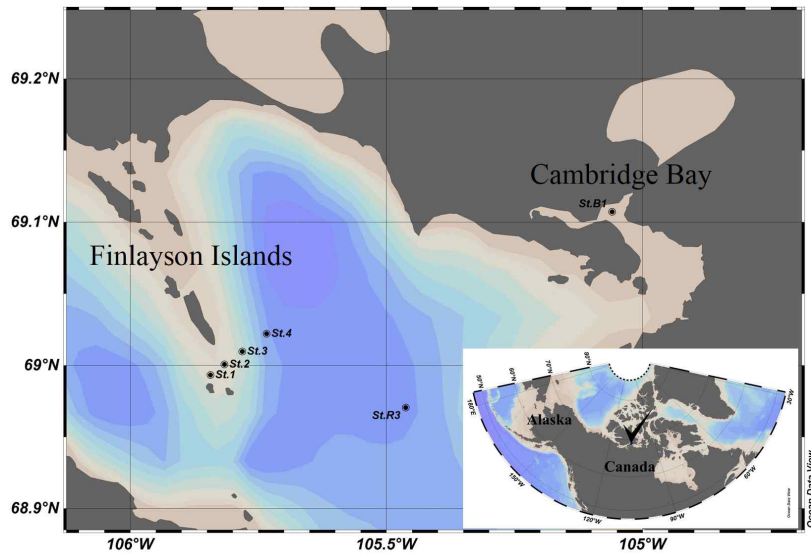


그림 35. 연구 지역 (Cambridge Bay, Nunavut, Canada, Arctic)

표 2. 연구 정점의 위도 및 경도

정점	위도($^{\circ}\text{N}$)	경도($^{\circ}\text{W}$)
St.B1	69.107180 $^{\circ}$	-105.059510 $^{\circ}$
St.R3	68.970550 $^{\circ}$	-105.462220 $^{\circ}$
St.1	68.993333 $^{\circ}$	-105.843167 $^{\circ}$
St.2	69.000550 $^{\circ}$	-105.816117 $^{\circ}$
St.3	69.009717 $^{\circ}$	-105.781117 $^{\circ}$
St.4	69.022000 $^{\circ}$	-105.734000 $^{\circ}$

(1) 해빙미세조류의 탄소 흡수율 측정을 위한 배양 실험

탄소 안정 동위원소 추적자(^{13}C)를 이용한 배양실험을 수행하기 위해 조사 정점에서 bottom 10에 대한 샘플링을 먼저 수행 하였다. 이후 bottom 10을 적절한 크기로 절단 후 배양 병에 옮겨 담고 GF/F(pore size = 0.7 μm , Whatman) 필터로 여과한 해수 400ml을 추가 하였다. 이어서 ^{13}C 를 주입 후 배양 프레임에 배양 병을 고정시켜 오거 홀을 이용해 해빙 아래에 배양 병을 위치시켰다. 3-4시간의 배양을 마친 후 배양 병을 아이스박스에 담아 실험실로 옮겨 완전히 녹을 때까지 빛을 차단한 조건 하에 상온에서 보관하였다. 해빙이 완전히 녹은 후 배양 후

유기탄소 분석을 위해 GF/F(pore size = 0.7 μ m, Whatman) 필터를 이용해 여과를 수행하였다.

(2) 눈 및 해빙 두께 측정 결과

조사 기간 동안 선정된 정점에서의 눈의 두께는 4.1cm-23.4cm (9.7 \pm 4.9cm)로 나타났다. 각각의 정점에서 보인 평균 눈 두께는 B1에서 19.4cm(5.7), R3에서 14.0cm (\pm 6.4cm), st.1에서 6.5cm(\pm 2.2cm), st.3에서 6.9cm (\pm 1.0cm), st.4에서 10.8cm (\pm 1.6cm)으로 나타났다(그림 37, 표 3). 해빙 두께의 경우 119.0cm-168.0cm (143.8 \pm 17.1cm)로 나타났다(표 4). 각각의 정점에서 보인 평균 해빙 두께는 B1에서 138.4cm (12.2cm), st.1에서 125.5cm (\pm 4.6cm), st.3에서 157.2cm (\pm 2.0cm), st.4에서 164.5cm (\pm 5.7cm)으로 나타났다. 연구지역에서의 눈의 분포는 바람에 따라 달라지는 것으로 보인다. 해빙 두께는 st.1에서 st.4로 갈수록 두꺼워지는 모습을 보이며 이는 st.1의 수심이 30m 이하로 매우 낮은 것과 동에서 서로 흐르는 본 연구지역에서의 해류와 연관이 있는 것으로 사료된다.

표 3. 연구 지역에서 측정한 눈 두께

Station	Date	Thickness of sea ice (cm)				Average
B1	20180407	16	15	15.5	15	15.4
	20180419	25	24	22	22.5	23.4
R3	20180414	17	20	—	—	18.5
	20180422	10	9	—	—	9.5
St.1	20180411	3	4	4.5	5	4.1
	20180414	5	6	8	12	7.8
	20180417	6.5	6.5	5.5	6	6.1
	20180424	4	5	5.5	5.5	5.0
St.2	20180426	10	10.5	10	8	9.6
	20180417	8	8	7	8	7.8
	20180424	7	5	8	9	7.3
St.3	20180426	6	5	7	6	6.0
	20180417	6	5	6	6	5.8
	20180424	8	8	7	8	7.8
St.4	20180426	9.5	7	6.8	5	7.1
	20180411	12	13	13.5	13	12.9
	20180417	7	9	10	11	9.3
	20180424	11	12	11	11	11.3
	20180426	11	10	9	9	9.8

표 4. 연구 지역에서 측정된 해빙 두께

Station	Date	Thickness of sea ice (cm)				Average
B1	20180407	147	—	—	—	147.0
	20180419	130	133	130	126	129.8
R3	20180414	157	160	—	—	158.5
	20180422	—	—	—	—	—
St.1	20180411	130	—	—	—	130.0
	20180414	122.5	—	—	—	122.5
	20180417	129	128	127	127	127.8
	20180424	119	119			119.0
	20180426	128	129	129	127	128.3
St.2	20180417	135	134	135	138	135.5
	20180424	132	132	133	—	132.3
	20180426	128	127	130	129	128.5
St.3	20180417	157	157	156	156	156.5
	20180424	156	156	155	—	155.7
	20180426	159	159	160	160	159.5
St.4	20180411	156	—	—	—	156.0
	20180417	165	166	169	170	167.5
	20180424	168	168	169	167	168.0
	20180426	165	167	167		166.3

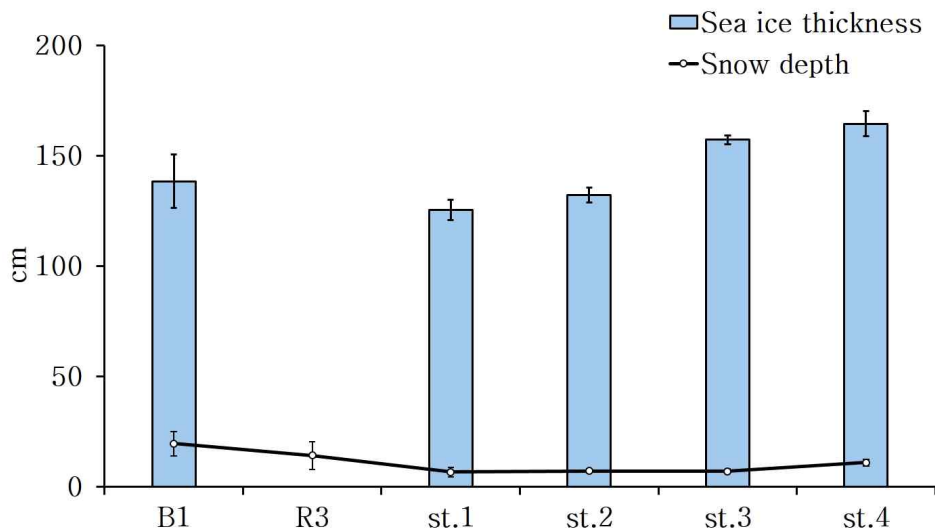


그림 36. 케임브리지 베이 정점별 눈 두께와 해빙 두께의 평균

(3) 염분 측정 결과

Bttom 10을 녹인 후 측정된 염분의 범위는 5.2-7.1 psu(평균 ±표준편차 = 6.3 ±0.4 psu)로 나타났으며 2017년 값과 비슷한 양상을 보였다. 해빙 아래 1m (이후 underwater)에서 보인 염분의 범위는 27.1-31.5 psu(28.1 ±1.1 psu)이며, 본 연구 해역에서의 보편적인 염분의 범위를 보였다(그림 37).

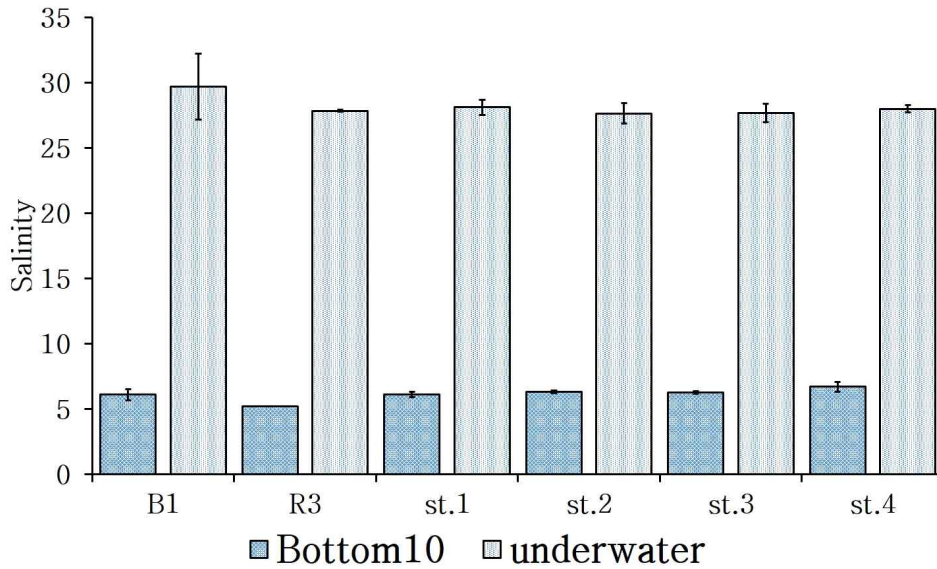


그림 37. 케임브리지 베이 정점별 bottom 10과 underwater에서 염분의 평균

(4) 해빙 미세조류의 엽록소 a 농도 분석 결과

조사 기간 동안 bottom 10에 존재하는 해빙미세조류의 엽록소 a 농도는 $4.22 \mu\text{g L}^{-1}$ – $92.46 \mu\text{g L}^{-1}$ ($49.58 \pm 26.18 \mu\text{g L}^{-1}$)로 나타났다. 조사기간 동안 각각의 정점에서 보인 평균 엽록소 a 농도는 st.B1에서 $11.54 \pm 10.35 \mu\text{g L}^{-1}$, st.R3에서 $64.66 \pm 38.82 \mu\text{g L}^{-1}$, st.1에서 $58.11 \pm 16.45 \mu\text{g L}^{-1}$, st.2에서 $67.15 \pm 21.99 \mu\text{g L}^{-1}$, st.3에서 $60.19 \pm 23.35 \mu\text{g L}^{-1}$ 그리고 st.4에서 $29.25 \pm 17.79 \mu\text{g L}^{-1}$ 으로 나타났다(그림 38). 해빙미세조류의 크기에 따른 기여도는 $20 \mu\text{m}$ 이상이 $66\% \pm 10\%$ 으로 가장 높게 나타났다. $2\text{--}20 \mu\text{m}$ 크기의 미세조류의 기여도는 $29\% \pm 6\%$, $0.7\text{--}2 \mu\text{m}$ 크기의 미세조류의 기여도는 $5 \pm 6\%$ 로 나타났다(그림 39). 조사 기간 동안 총 엽록소 a 농도와 눈 두께 사이에 유의한 음의 상관관계 ($p < 0.01$)를 보였으며 이는 이른 봄철 bottom 10으로 투과되는 빛에 대하여 눈이 제한 요인으로 작용한 것으로 보인다.

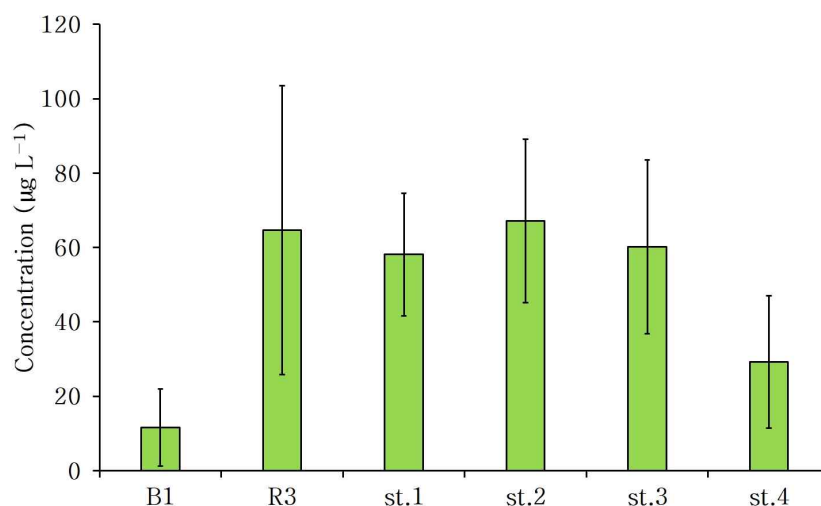


그림 38. 케임브리지 베이 정점별 bottom 10에서의 평균 엽록소 a 농도

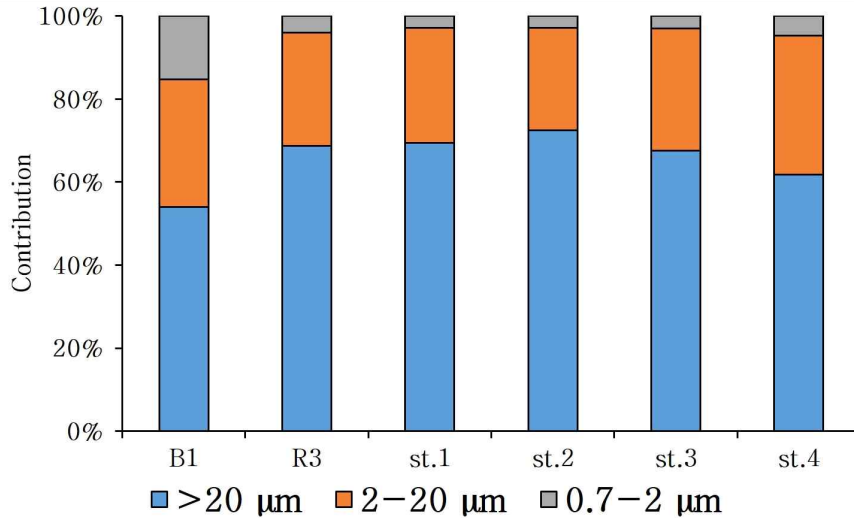


그림 39. 케임브리지 베이 정점별 bottom 10에서 총 엽록소 a에 대한 크기별 기여도

(5) 해빙미세조류의 거대분자 조성 분석 결과

조사 기간 동안 bottom 10에 존재하는 해빙 미세조류를 구성하는 거대분자 중 탄수화물(CHO)의 범위는 $899.2\text{--}6746.2 \mu\text{gL}^{-1}$ ($2520.9 \pm 1194.2 \mu\text{gL}^{-1}$)로 나타났다. 단백질(PRT)과 지질(LIP)의 범위는 각각 $0\text{--}1389.0 \mu\text{gL}^{-1}$ ($609.6 \pm 447.7 \mu\text{gL}^{-1}$) 과 $621.7\text{--}3366.0 \mu\text{gL}^{-1}$ ($5127.2 \pm 1911.0 \mu\text{gL}^{-1}$)로 나타났다. 탄수화물과 단백질 그리고 지질이 합으로 정의되는 FM의 범위는 $1879.9\text{--}10571.6 \mu\text{gL}^{-1}$ ($5127.2 \pm 1911.0 \mu\text{gL}^{-1}$)로 나타났다(그림 40). 2017년과 달리 2018년 조사 기간 동안 탄수화물의 비율이 $49 \pm 10\%$ 로 가장 높게 나타났다(그림 41). 본 연구 기간 동안 눈 두께와 지질 농도는 유의한 음의 상관관계 ($p < 0.01$)를 보였으며 이는 빛의 강도에 대한 해빙 미세 조류의 반응으로 판단된다.

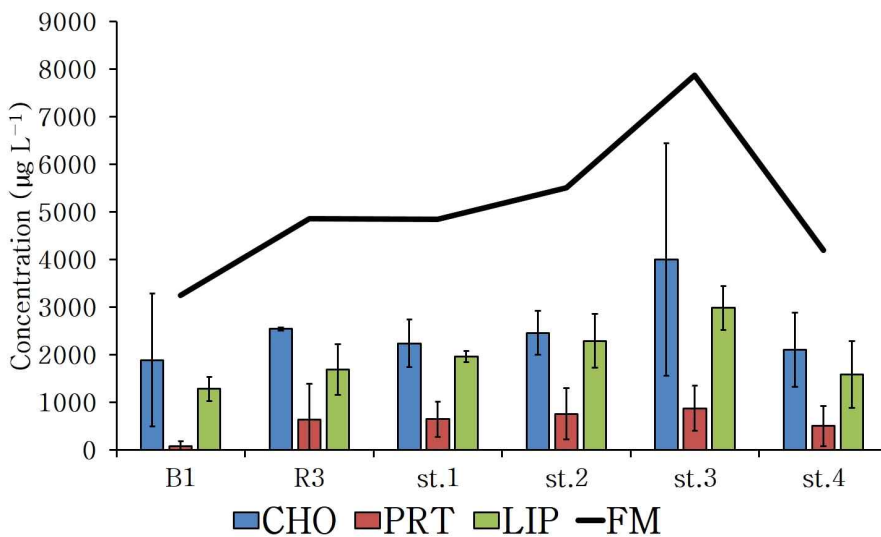


그림 40. 케임브리지 베이 정점별 bottom 10에서의 탄수화물, 단백질, 지질 농도

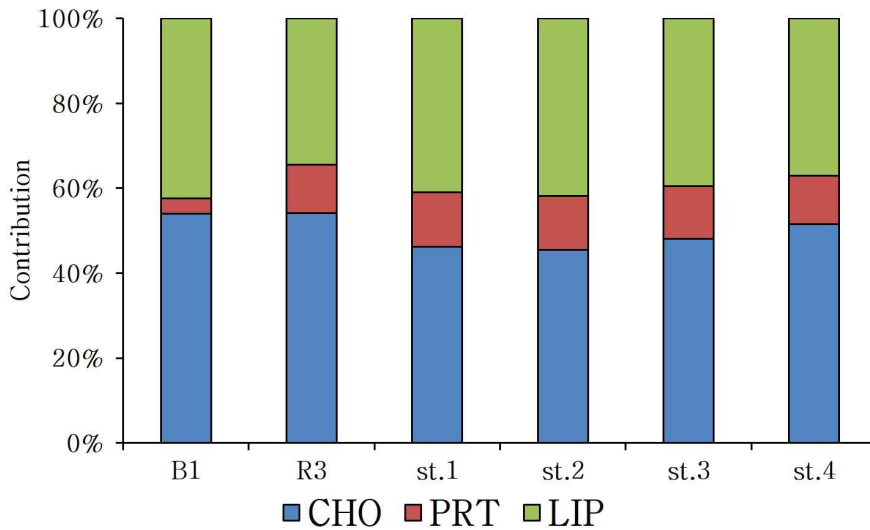


그림 41. 케임브리지 베이 정점별 bottom 10에서 해빙 미세조류의 FM에 대한 탄수화물, 단백질, 지질의 기여도

(6) 해빙 미세조류의 탄소 흡수율 측정 실험 결과

조사 기간 동안 bottom 10에 존재하는 해빙 미세조류 (total)의 탄소 흡수율의 범위는 0.054-2.642 $\text{mgCm}^{-3}\text{h}^{-1}$ ($1.009 \pm 0.869 \text{ mgCm}^{-3}\text{h}^{-1}$)으로 나타났다. 0.7-2 μm 크기의 작은 조류 (small)의 탄소 흡수율의 범위는 0.016-0.872 $\text{mgCm}^{-3}\text{h}^{-1}$ ($0.285 \pm 0.291 \text{ mgCm}^{-3}\text{h}^{-1}$)으로 나타났다(그림 42). Total은 눈 두께와 유의한 음의 상관관계 ($p < 0.05$)와 지질 농도와 유의한 양의 상관관계 (< 0.01)를 보였다.

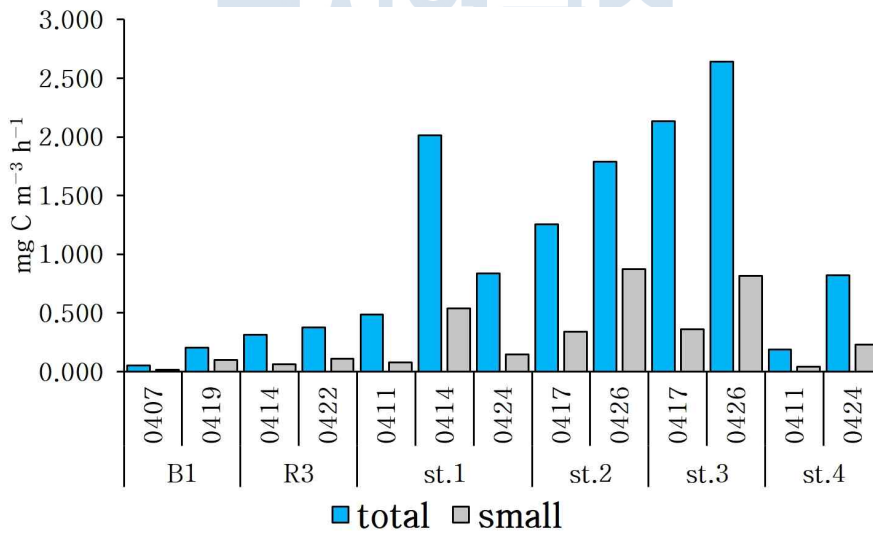


그림 42. 연구 기간 동안 bottom 10에서의 탄소 흡수율 측정 결과

라. 3차년도 (2019년) 캐나다 Hudson bay 해빙 미세조류의 탄소 흡수율 측정

해빙생태계의 발생, 성장, 소멸단계에 따른 해빙 미세조류의 탄소흡수율을 측정하기 위한연구 지역으로 캐나다 Hudson Bay의 북부 해역에 위치한 Coral Harbour 주변의 Seasonal sea ice zone을 선정하였다(그림 11(우)). 해빙의 발달 단계에 따른 시계열 자료를 확보하기 위해 총 3 개의 정점을 선정하였으며 해빙미세조류의 1차 생산 측정을 위한 배양 실험을 site C에서 수행 하였다(Site A : 내만, Site C : 일차생산 정점, Site F : 해빙 가장자리)(표 5). 해빙미세조류의 생물량이 집중되어 있는 해빙 바닥으로 부터 10 cm 구간 (이후 bot.10)에 대한 샘플링을 수행 하였다.

조사 기간 동안 bot.10에서 측정된 총 Chl-a ($> 0.7 \mu\text{m}$) 농도는 $1.94\text{--}466.35 \mu\text{gL}^{-1}$ ($178.89 \pm 131.37 \mu\text{gL}^{-1}$)의 분포를 보였다(그림 43). 또한, 조사 기간 동안 bot.10에서 측정된 총 Chl-a농도에 대한 $20 \mu\text{m}$ 이상의 조류는 25-89%, $2\text{--}20 \mu\text{m}$ 의 조류는 9-57% 그리고 $0.7\text{--}2 \mu\text{m}$ 의 조류는 2-21%의 기여도를 보였다(그림 44).

표 5. Coral Harbor 연구 정점 위치

	Latitude	Longitude
Site A	64° 06' 51.96"N	83° 04' 46.62"W
Site C	63° 59' 37.14"N	83° 20' 15.18"W
Site F	63° 54' 37.38"N	83° 18' 25.98"W

해빙미세조류의 탄소흡수율 측정을 위한 배양실험은 2019년 05월 04일부터 2-4일 간격으로 2019년 06월 01일 까지 site C에서 총 10회 수행되었다. 조사 기간 동안 bot.10에서 현장배양을 통해 측정된 탄소흡수율의 범위는 $0.094\text{--}11.27 \text{mgCm}^{-3}\text{h}^{-1}$ ($3.77 \pm 3.51 \text{mgCm}^{-3}\text{h}^{-1}$)로 나타났다(그림 45). 조사 기간 동안 bot.10에서 측정된 Chl-a 농도와 탄소흡수율 간에 높은 양의 상관관계($R^2=0.6775$, $p<0.01$)가 확인되었고, 단백질 농도와 탄소흡수율 간에 높은 양의 상관관계($R^2=0.5909$, $p<0.01$)가 확인되었다(그림 46, 47).

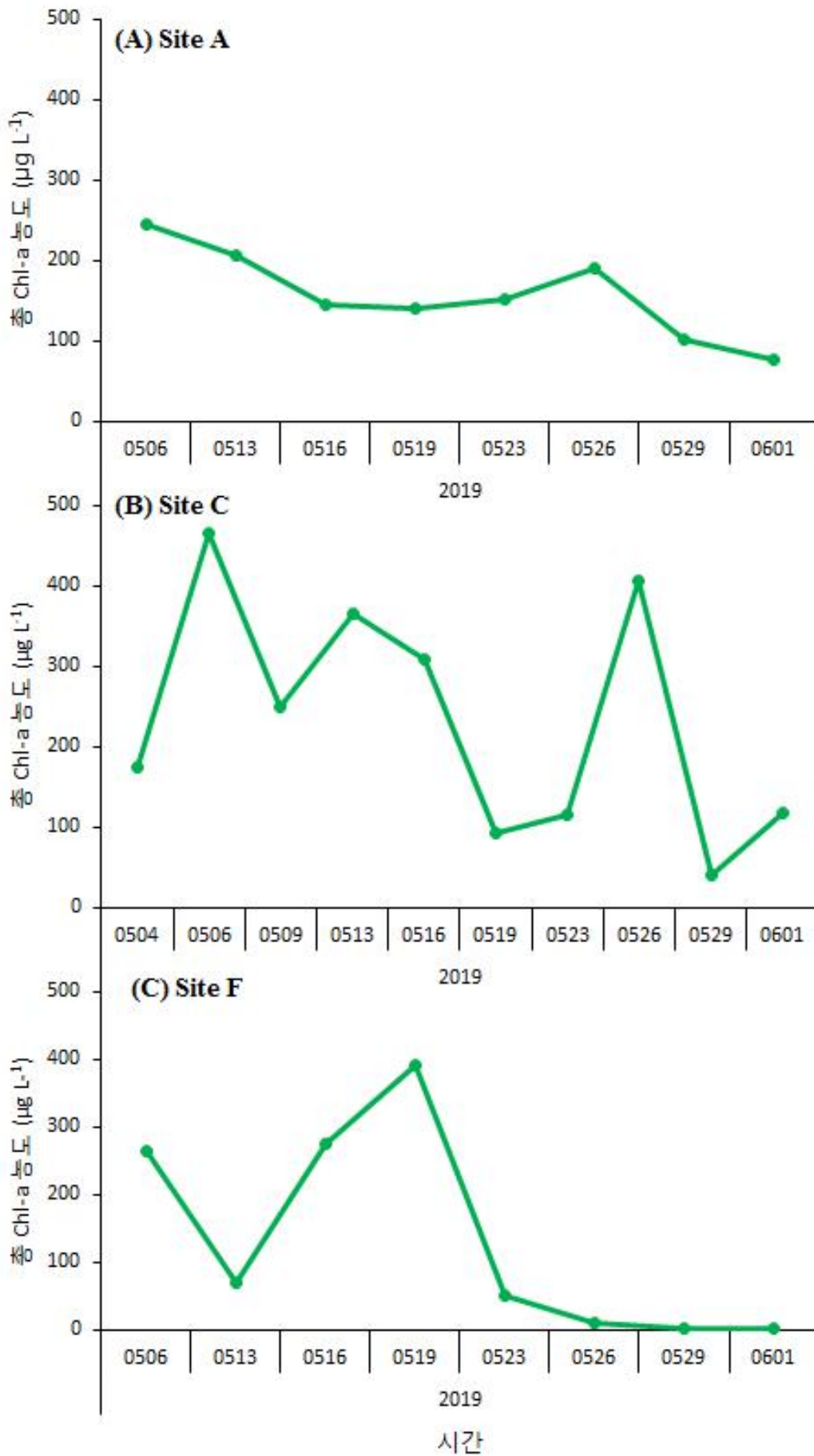


그림 43. 각 정점에서 측정된 해빙미세조류의 총 Chl-a 농도.

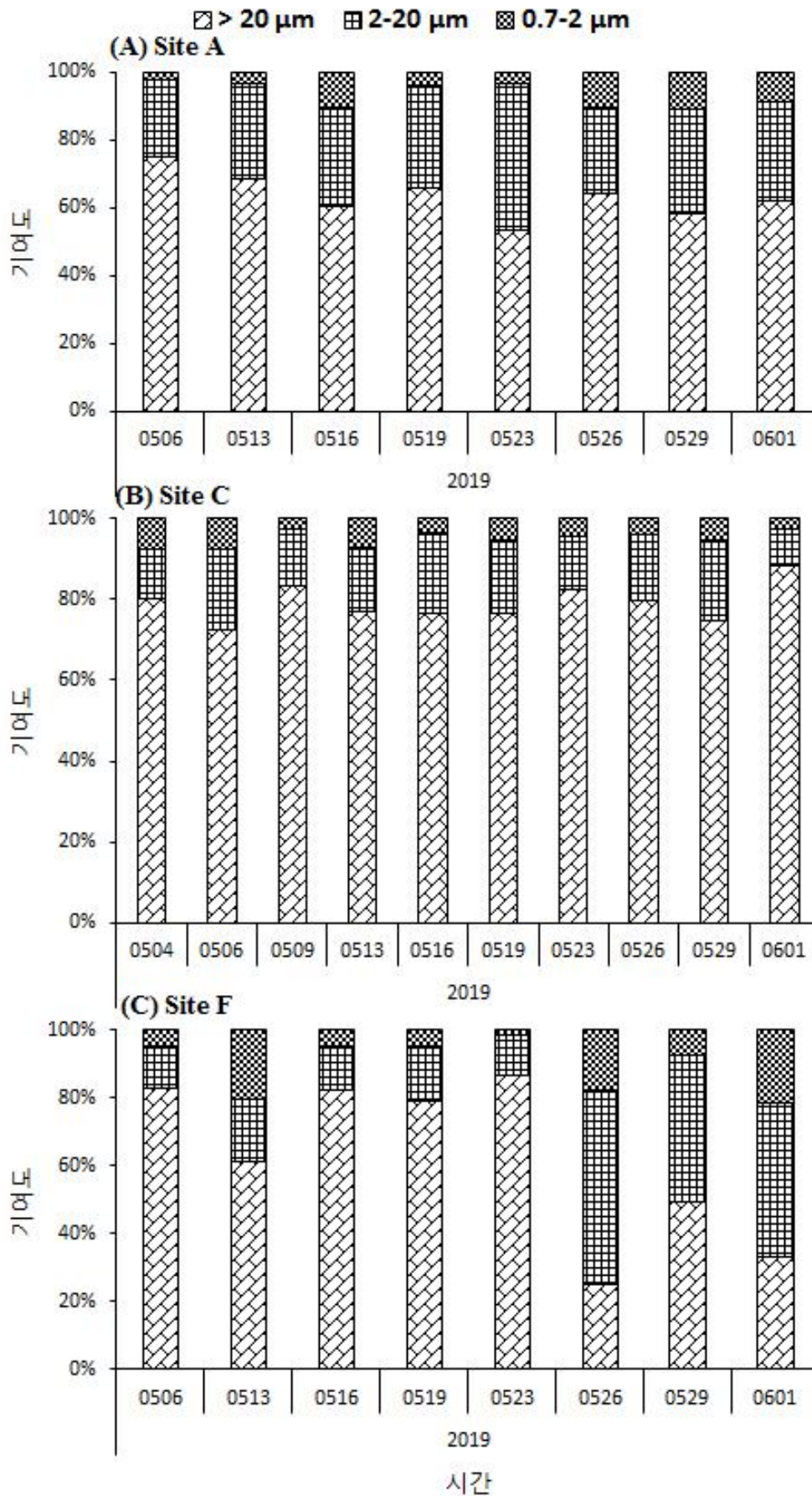


그림 44. 각 정점에서 측정된 해빙 미세조류의 총 Chl-a 농도에 대한 크기별 기여도.

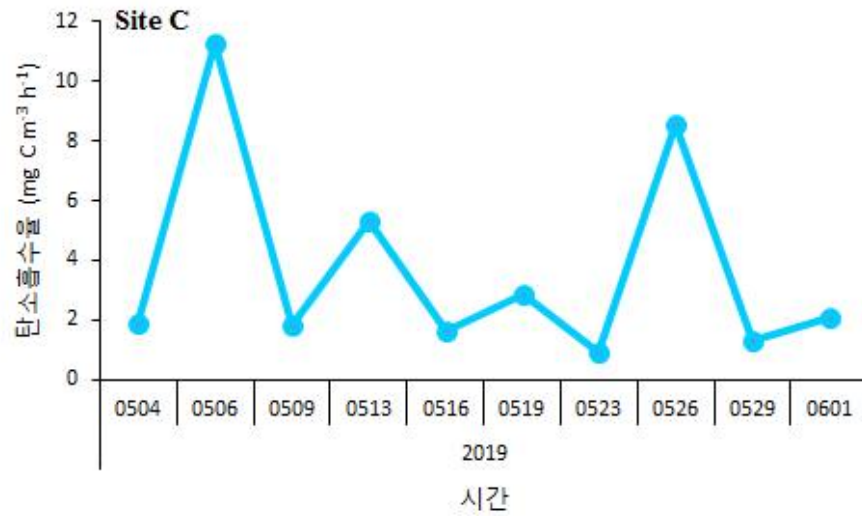


그림 45. 조사 기간 동안 bot.10 배양실험을 통해 측정된 해빙미세조류의 탄소흡수율.

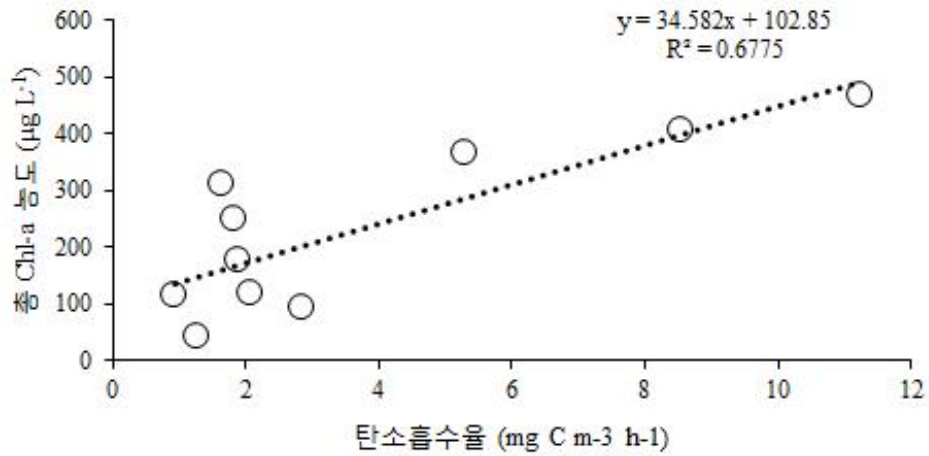


그림 46. Site C에서 나타난 총 Chl-a 농도와 탄소흡수율 간의 상관관계

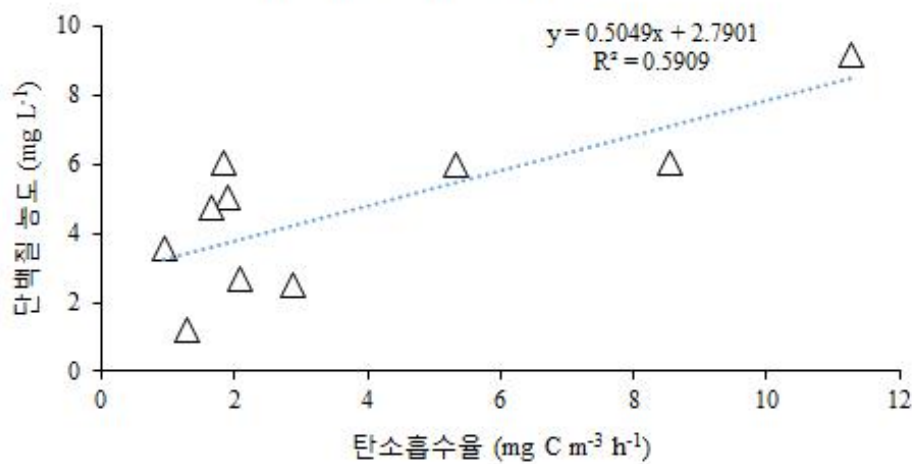


그림 47. Site C에서 나타난 단백질 농도와 탄소흡수율 간의 상관관계.

3. 위성자료를 활용한 북극해 일차생산력 지도 작성

가. 위성자료를 활용한 스발바드 주변 일차생산 지도 매핑

(1) 스발바드 주변해역의 평균 일차생산력 공간 분포 (2016년 분석 자료)

Frame Strait을 중심으로 스발바드 주변으로 높은 일차생산력을 보이며 반대로 그린란드 해 부근으로 굉장히 낮은 일차생산력 분포를 나타내었다(그림 48). 스발바드 서쪽으로는 평균 $1,000 \text{ mgCm}^{-2}\text{d}^{-1}$ 이상으로 일차생산력 값이 크게 나타나며, 그린란드 해 주변은 평균 $300 \text{ mgCm}^{-2}\text{d}^{-1}$ 으로 현저히 낮았다. 그린란드 주변은 연중 해빙이 존재함과 동시에 차갑고 저염인 East Greenland Current (EGC)의 영향을 받으며, 스발바드 주변해역은 해빙이 적게 분포하고 고온, 고염인 West Spitsbergen Current (WSC)의 영향을 받는다(EGC: equatorward / WSC: poleward 방향). 정규화 표준편차 값은 스발바드 연안 보다 그린란드 연안 및 WSC 이동방향에서 높은 값을 보여, 해빙 분포 및 WSC가 식물플랑크톤 일차생산력과의 연관성에 대한 분석을 진행하였다. 스발바드 주변해역을 EGC가 흐르는 그린란드 해역 (R1), WSC의 영향을 받는 스발바드 해역 (R2), 콩스피요르드 (R3), 스발바드 북부 해역 (R4)으로 나눠 일차생산력의 계절 분포를 파악하였다(그림 48).

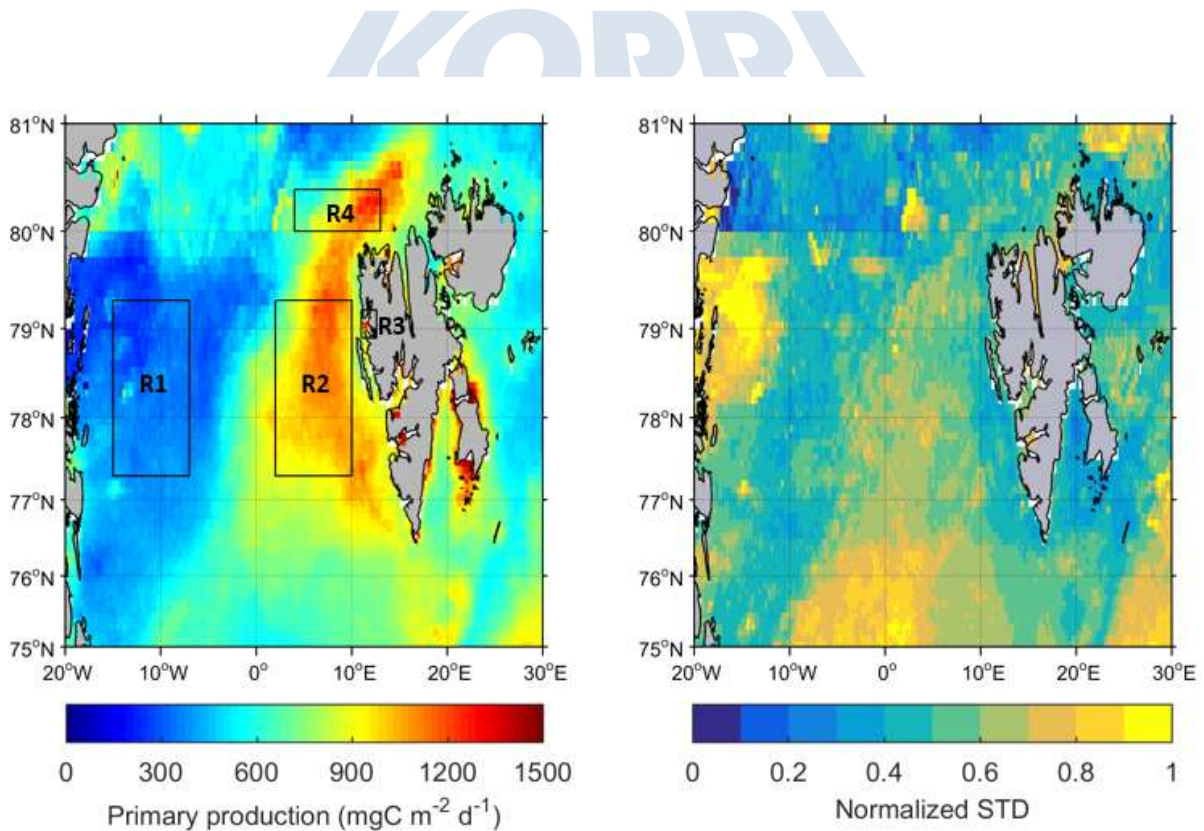


그림 48. 스발바드 주변해역의 일차생산력 평균 및 정규화한 표준편차의 공간 분포.

(2) 스발바드 주변해역의 지역별 일차생산력 계절 특성

R1 - R3 지역은 7월경에 최대 일차생산력을 나타내고 있으며 스발바드 북부 해역인 R4 지역은 다른 지역보다 조금 이른 시기인 6월경에 최대 일차생산력 값을 보였다(그림 49). 지역별

평균 일차생산력 값은 300, 1000, 910, 920 $\text{mgCm}^{-2}\text{d}^{-1}$ 으로 그린란드 주변해가 가장 낮으며 스발바드 서쪽 해역이 가장 높았다. 지역별 최대 일차생산력은 530, 1530, 1550, 1140 $\text{mgCm}^{-2}\text{d}^{-1}$ 으로 스발바드 서쪽해역과 Kongsfjorden가 가장 큰 값을 보였다. 전반적으로 지역별 일차생산력의 계절 분포가 비슷하나 Kongsfjorden는 8월까지도 높은 일차생산력 값을 유지하는 것으로 나타났다

(3) 스발바드 주변해역의 월별 평균 일차생산력 공간 분포

스발바드 주변해역은 4월부터 9월까지의 기간에 한해 일차생산력 공간 분포를 위성자료를 통해 관측 할 수 있었다(그림 50). 4, 5월경에 스발바드 주변해역에서 식물플랑크톤 번성이 시작하며, 6, 7월경에 최대 일차생산력 값을 나타내었다. 특히, 스발바드 서쪽 해역에서 평균 1,200 $\text{mgCm}^{-2}\text{d}^{-1}$ 이상의 높은 일차생산력을 나타냈다. 스발바드 주변해역의 일차생산력 분포는 기존에 알려진 WSC의 이동방향을 따라 높은 값을 나타내고 있었다.

(4) 2016년 월별 해빙농도와 일차생산력 공간 분포

그린란드 동쪽 연안으로 연중 해빙이 넓게 분포하고 있으며 WSC의 이동 방향으로 해빙이 스발바드 북쪽으로 후퇴하고 있는 것으로 나타났다(그림 51). 앞서 보여준 과거 15년 평균 월별 일차생산력의 공간 분포와 마찬가지로 2016년 7월경 스발바드 주변해역에서 최대 일차생산력을 보이고 있었다. 반면, 월별 평균과 다른 점은 5, 6월경 스발바드 북쪽해역을 중심으로 해빙 가장자리 주변부에서 뚜렷이 높은 일차생산력을 보인다는 점이며, 해빙후퇴 경계역의 일차생산력을 증가시키는 환경요인에 대한 분석을 진행하였다. 2016년 8, 9월경 그린란드 동쪽 해역에 해빙이 후퇴한 시기에도 여전히 일차생산력은 스발바드 주변해역에 비해 낮았고 이는 두 해역에 영향을 주는 해류의 성격이 다르기 때문으로 판단된다.

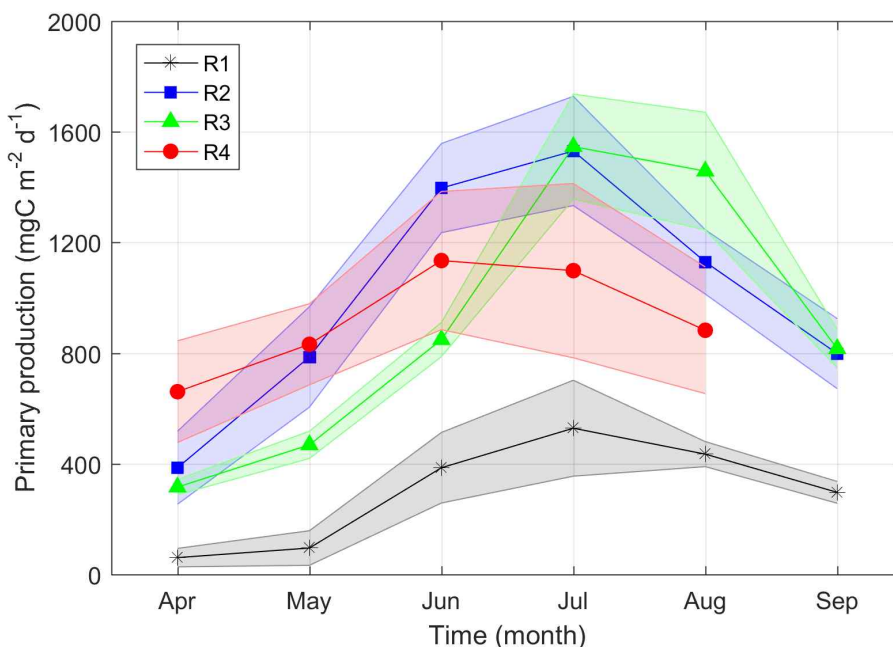


그림 49. 지역별 평균 일차생산력의 계절 분포.

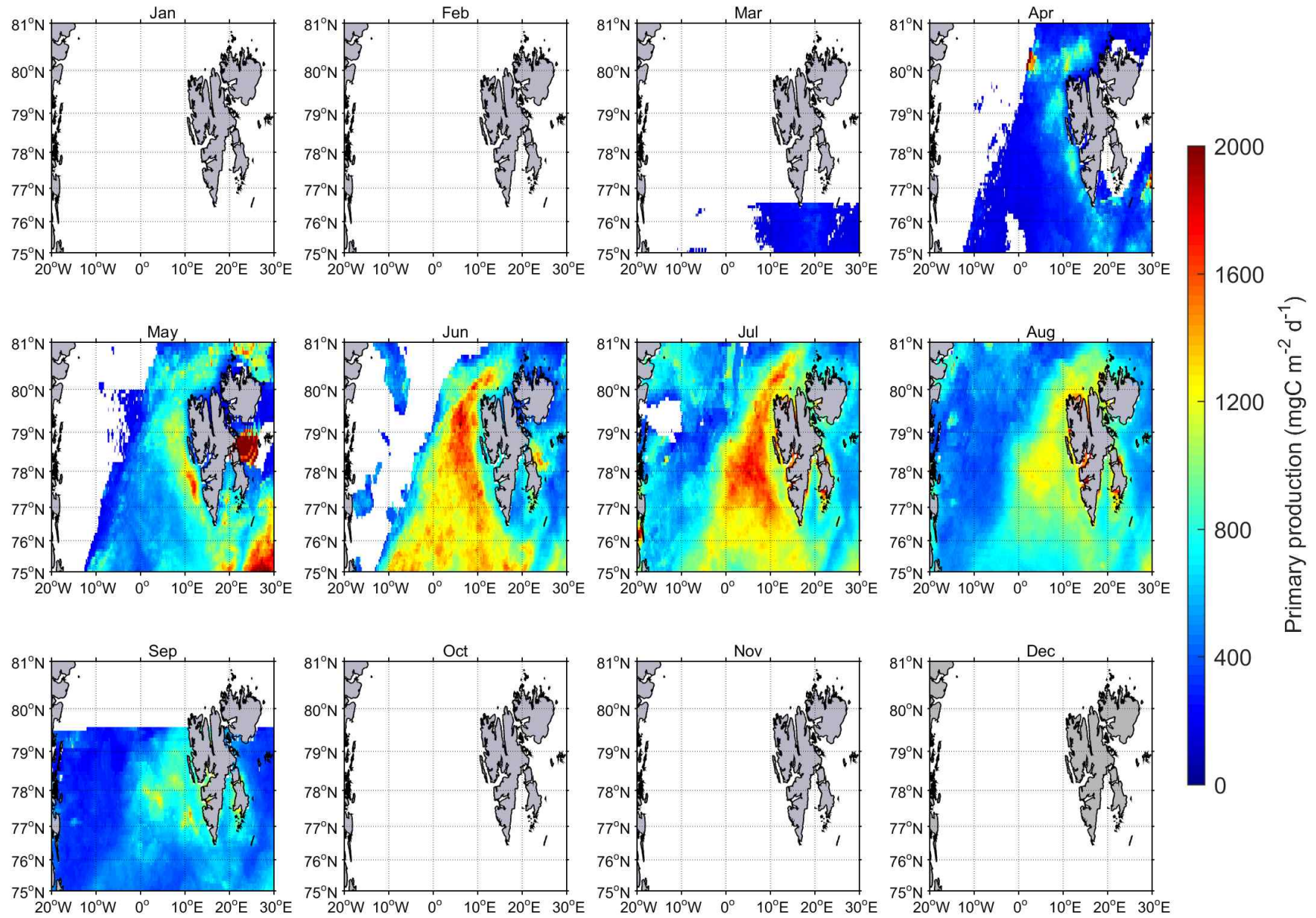


그림 50. 스발바드 주변해역의 월별 평균 일차생산력 공간 분포.

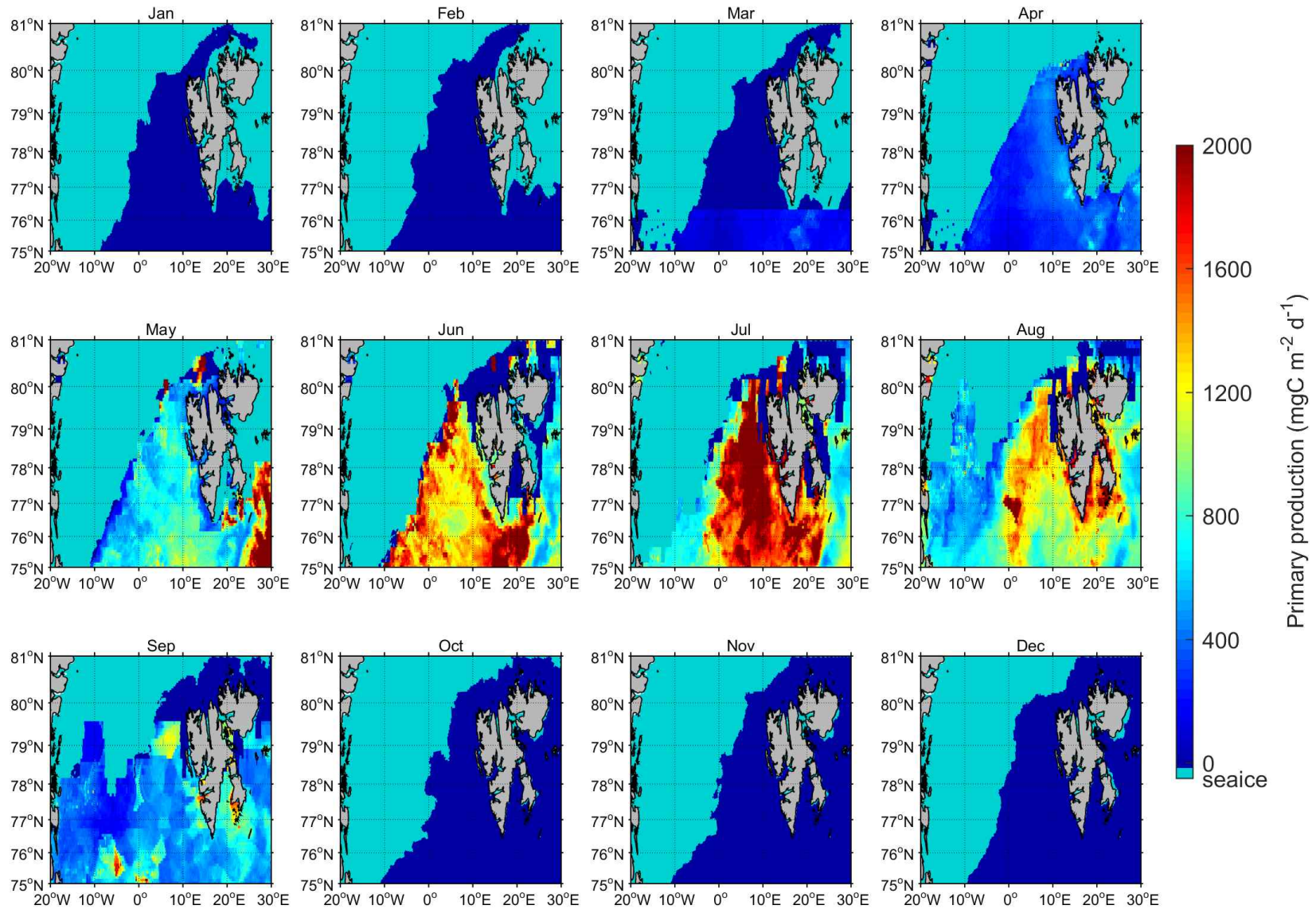


그림 51. 2016년 월별 해빙농도 (15% 이상)와 평균 일차생산력 공간 분포. 그림에서 서북쪽의 청녹색이 해빙분포를 나타냄 (오른쪽 color bar 참조)

나. 위성자료를 이용한 스발바드 해역 일차생산력의 시계열 자료

(1) 과거 20년(1998 - 2017년)간의 해역 일차생산력의 시계열 자료 생성

장기 일차생산 시계열 자료(1998-2017)를 확보하기 위하여 GlobeColour project (www.hermes.acri.fr)에서 제공하는 Garver-Siegel-Maritorena (GSM) 알고리즘으로 생성된 월별 다중위성엽록소 농도와 광량자료를 사용하였다. Optimun Interpolation Sea Surface Temperature Version 2 (OISST v2)의 표층수온 자료를 Vertical Generalized Production Model (VGPM) 알고리즘에 적용하여 스발바드 주변해역의 일차생산 자료를 생성하였다(그림 52). 스발바드 중심으로 서쪽 해역의 지난 20년간 평균 일차생산은 1,000-1,400 $\text{mgCm}^{-2}\text{d}^{-1}$ 를 나타내며 Kongsfjorden을 포함한 스발바드 연안은 상대적으로 낮은 800-1,000 $\text{mgCm}^{-2}\text{d}^{-1}$ 의 범위를 보였다. 스발바드 주변의 R1-R4 해역은 4월부터 일차생산이 300-600 $\text{mgCm}^{-2}\text{d}^{-1}$ 정도 수준이었고, 이후 증가하기 시작하여 6-7월 경 최대 1,200-1,800 $\text{mgCm}^{-2}\text{d}^{-1}$ 수준의 일차생산을 값을 보였다(그림 53). R1과 R2 해역은 R3와 R4 해역에 비해 4월경 상대적으로 높은 일차생산을 보이지만 최대 일차생산을 나타내는 6-7월경에는 오히려 상대적으로 낮은 일차생산 값을 나타냈다. R1, R2해역과 R3, R4해역의 식물플랑크톤의 계절 변화의 폭에 차이가 있음을 나타냈다. 지역별 일차생산의 장기 선형 경향을 살펴보면 R2 해역을 제외하고 나머지 모든 해역에선 통계적으로 유의하게 일차생산이 증가하는 경향 ($p < 0.05$)을 보였으며 R1 해역은 연평균 일차생산이 대략 25 $\text{mgCm}^{-2}\text{d}^{-1}$ 정도로 가장 높은 증가율을 나타냈다(그림 54).

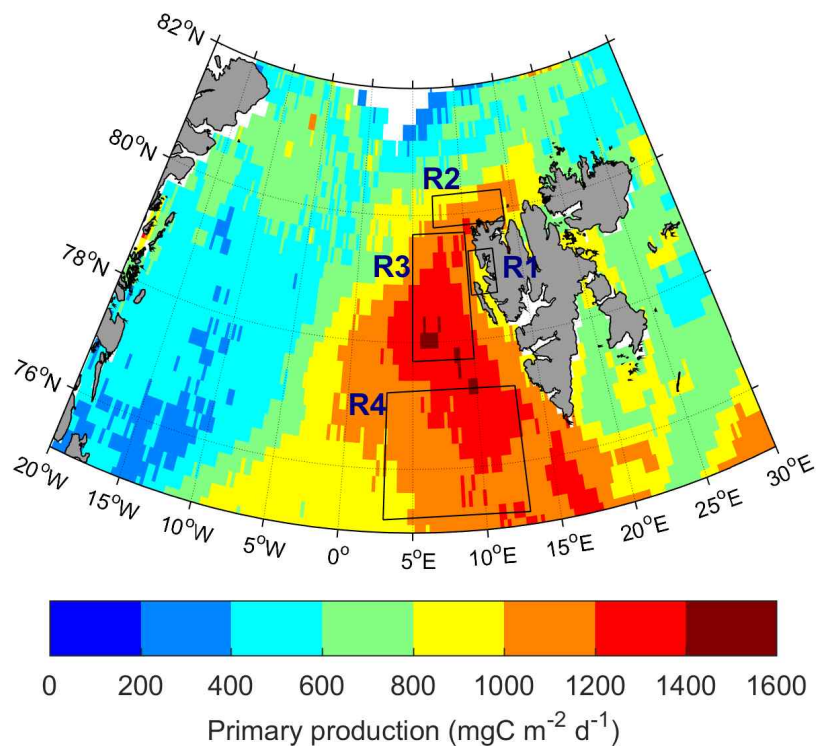


그림 52. 스발바드 주변해역의 지난 20년간 평균 일차생산 (1998-2017)과 연구해역 (R1-R4).

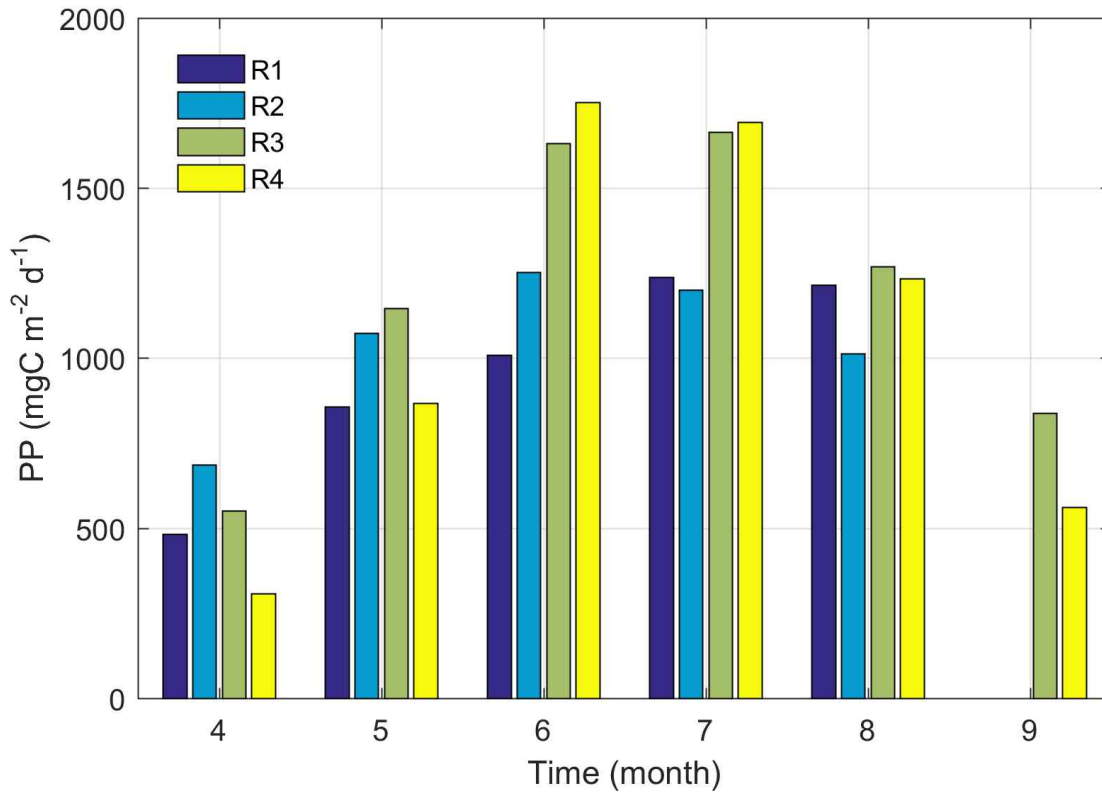


그림 53. 지난 20년간 지역별 월별 평균 일차생산 분포.

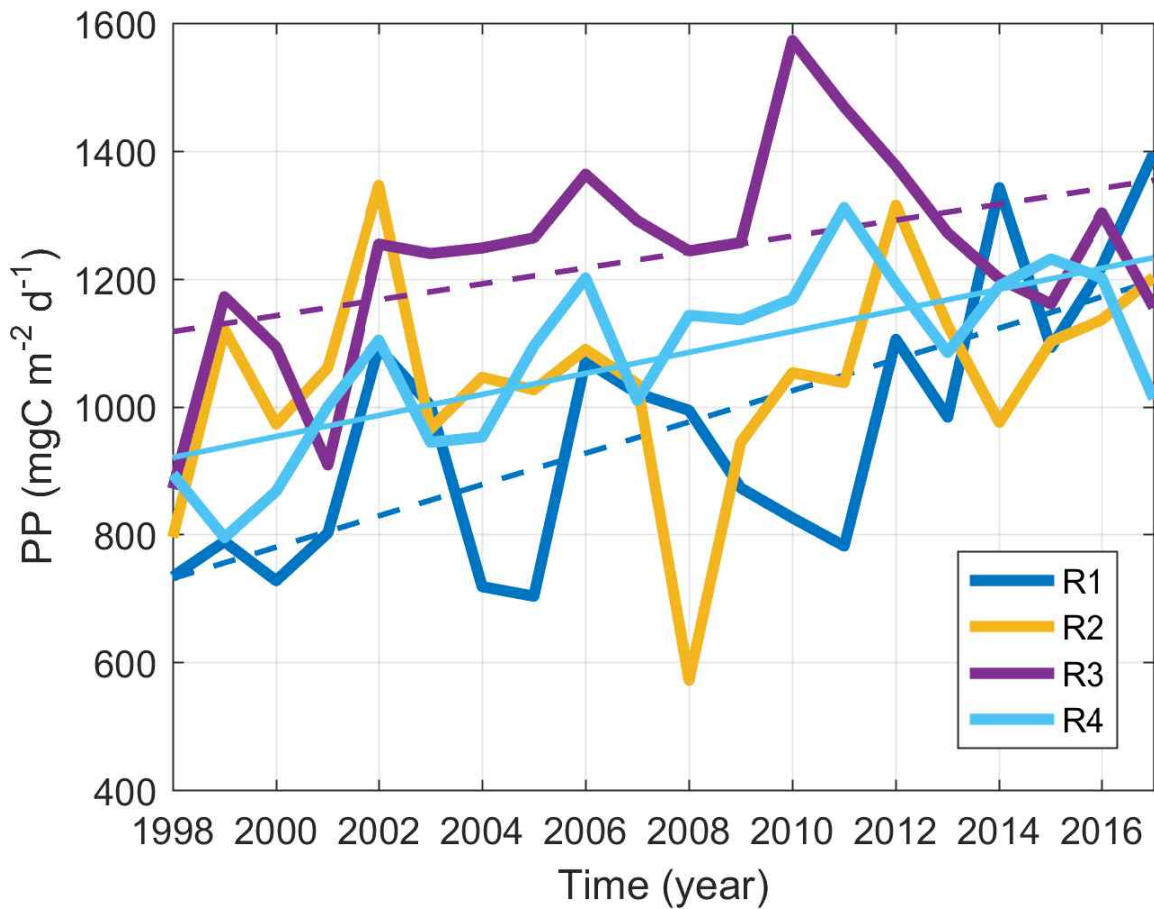


그림 54. 지역별 연 평균 일차생산 시계열 분포 및 선형 경향 ($p < 0.05$).

(2) 시·공간 분석기법을 활용한 스발바드 주변 해역 일차생산의 계절변동 및 경년변동성 분석

스발바드 주변의 일차생산 계절 및 경년 변동을 알아보기 위하여 Empirical Orthogonal Function (EOF) 분석을 적용하였다. 제 1 주성분 (PC1)은 일차생산의 계절변동을 약 61.8% 설명하고 있으며, 공간적으로 스발바드 주변 연안보다 외해역에서 이러한 특성이 뚜렷함을 알 수 있다 (그림 56). 제 2, 3 주성분 (PC2, 3)은 일차생산의 최대값을 갖는 6-7월경 보다 이른 시기와 최대 번성 이후의 변동을 나타내고 있으며 주성분 값은 약 5.5와 3.8% 정도로 설명하고 있다. 공간적으로 이른 시기의 일차생산은 스발바드 연안 해역에서 먼저 증가하기 시작하고 최대 번성 이후에는 반대로 외해역에서 높은 일차생산을 유지하는 것으로 확인된다.

지난 20년간 제 1-3 주성분의 시계열 값을 살펴보면 계절변동을 설명하는 제 1 주성분이 점진적으로 증가하는 경향을 나타내고 있는 반면, 제 2, 3 주성분은 특별한 경향이나 주기성 없이 경년변동이 강함을 알 수 있다(그림 55). 즉, 스발바드 주변 식물플랑크톤은 4월부터 번성을 시작하여 6-7월경 최대 일차생산을 보이는 계절분포를 보이며 스발바드 연안해역에서 일차생산이 증가하기 시작하여 외해역에 높은 일차생산 값을 나타내는 공간분포를 보이고, 장기적으로 최대 일차생산 값이 지난 20년간 점진적으로 증가하는 선형 경향이 확인되었다($p < 0.05$).

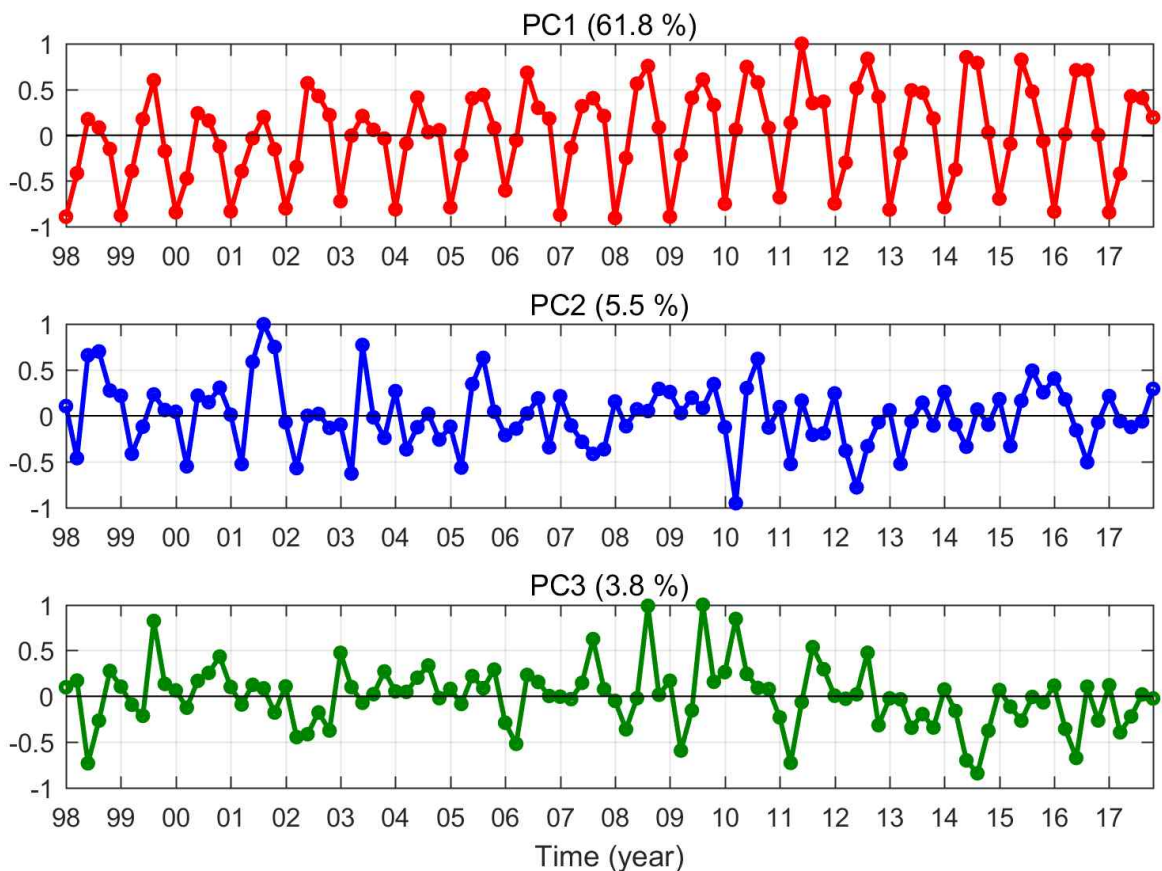


그림 55. 일차생산 EOF 분석의 제 1-3 주성분 시계열 분포.

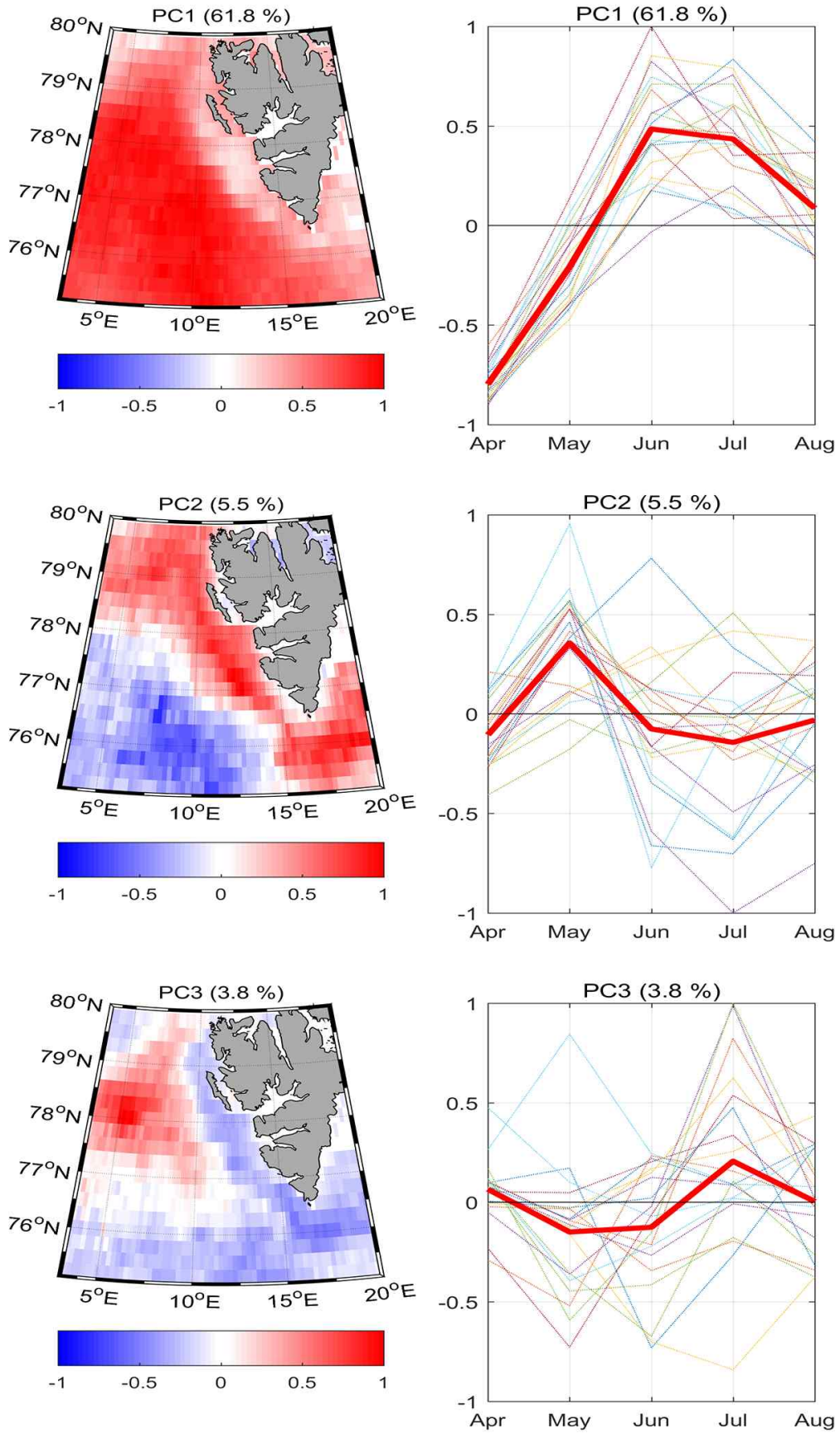


그림 56. 스발바드 주변해역의 일차생산에 대한 EOF 분석의 제 1-3 주성분 분석 공간 및 시계열 분포.

(3) 해빙을 포함한 물리적 환경요인이 연구해역 일차생산 변화에 미친 매커니즘

스발바드 주변해역의 일차생산 증가 경향과 경년변동에 미치는 환경요인을 확인하고자 분석된 일차생산 자료와 같은 시기인 지난 20년간의 표층수온, 광량, 해빙농도 그리고 엽록소 농도와의 상관관계 분석과 장기 경향 분포를 분석하였다(그림 57). 각 환경요인들의 장기 경향을 제거한 후 (Detrend), 일차생산과 환경요인간의 상관관계 분석을 실시하였다. 각 지역별 일차생산과 환경요인 간 경년변동에 대한 관계가 다르게 나타났다(표 6).

R1 해역은 일차생산과 표층수온의 상관관계가 유의하게 나타났지만 표층수온만으로 일차생산과의 관계를 설명하기에 한계가 있었으며, 선행연구를 참고하면 대서양 기원의 고온·고염 해류의 영향으로 저층의 영양염 공급이 표층으로 원활히 이루어지거나 또는 표층의 성층화로 인한 수층의 안정도가 광량 제한을 완화시킴을 짐작할 수 있다(Cherkasheva et al. 2014; Randelhoff et al. 2018)

R2 해역은 스발바드 북쪽 해역으로 최근 해빙의 뚜렷한 감소 경향이 나타나는 지역으로 네 가지 모든 요인간의 유의한 관계성을 나타냈으며, 해빙의 감소는 표층에서 투과되는 광량의 세기, 그리고 표층으로의 저염분수 공급으로 인한 성층화에 영향을 주었을 것이며 표층 수온은 R1 해역과 같은 관계를 짐작할 수 있으며, 이로 인해 영양염 또는 광량의 증가가 식물플랑크톤 생물량 증가에 영향을 주었을 것으로 고려된다.

R3와 R4 해역은 스발바드 외해역에 포함되는 지역으로 일차생산과 엽록소 농도의 양의 관계성만 유의하게 나타났다. 즉, 두 해역에서는 식물플랑크톤의 생물량만이 일차생산에 직접적인 영향을 미치고 있는 것으로 보인다.

다음으로, R2 해역을 제외한 나머지 해역의 일차생산 장기 경향에 영향을 미치는 요인을 확인하고자 하였다(그림 58). R1, R3, R4 해역은 일차생산이 장기적으로 증가하는 경향을 나타내는 해역으로, 특히, Kongsfjorden 해역을 포함하는 R1 해역의 일차생산 증가율이 뚜렷하게 나타나고 있으며, 대체적으로 모든 해역에서 표층수온 또한 R1, R3, R4 해역 순으로, 다시말해 0.08, 0.11, 0.06 °Cyear⁻¹으로, 점차 증가하는 경향을 보였다.

최근 선행 연구들을 통해서 스발바드 주변해역의 대서양 기원 해류의 영향으로 수온이 증가하고 있으며 이러한 현상을 Atlanticfication이란 가설을 통해서 스발바드 연안해역의 영양염 공급 및 광 제한의 완화로 일차생산이 증가한다고 설명하고 있지만, 외해역에 대한 일차생산 증가에 대한 매커니즘을 설명하기엔 아직 자료가 부족하다. 위성자료를 이용하여 스발바드 주변해역에서 발생하는 일차생산의 경년 및 장기경향 분포는 확인 가능하지만 일차생산과 환경요인 간 매커니즘을 분석하는데 다소 한계가 있으며 현장자료를 통한 검증 및 보완을 통해 물리적, 환경적 요인의 변동과 이들 요인이 생태계에 미치는 영향에 대해 이해할 수 있을 것으로 판단된다.

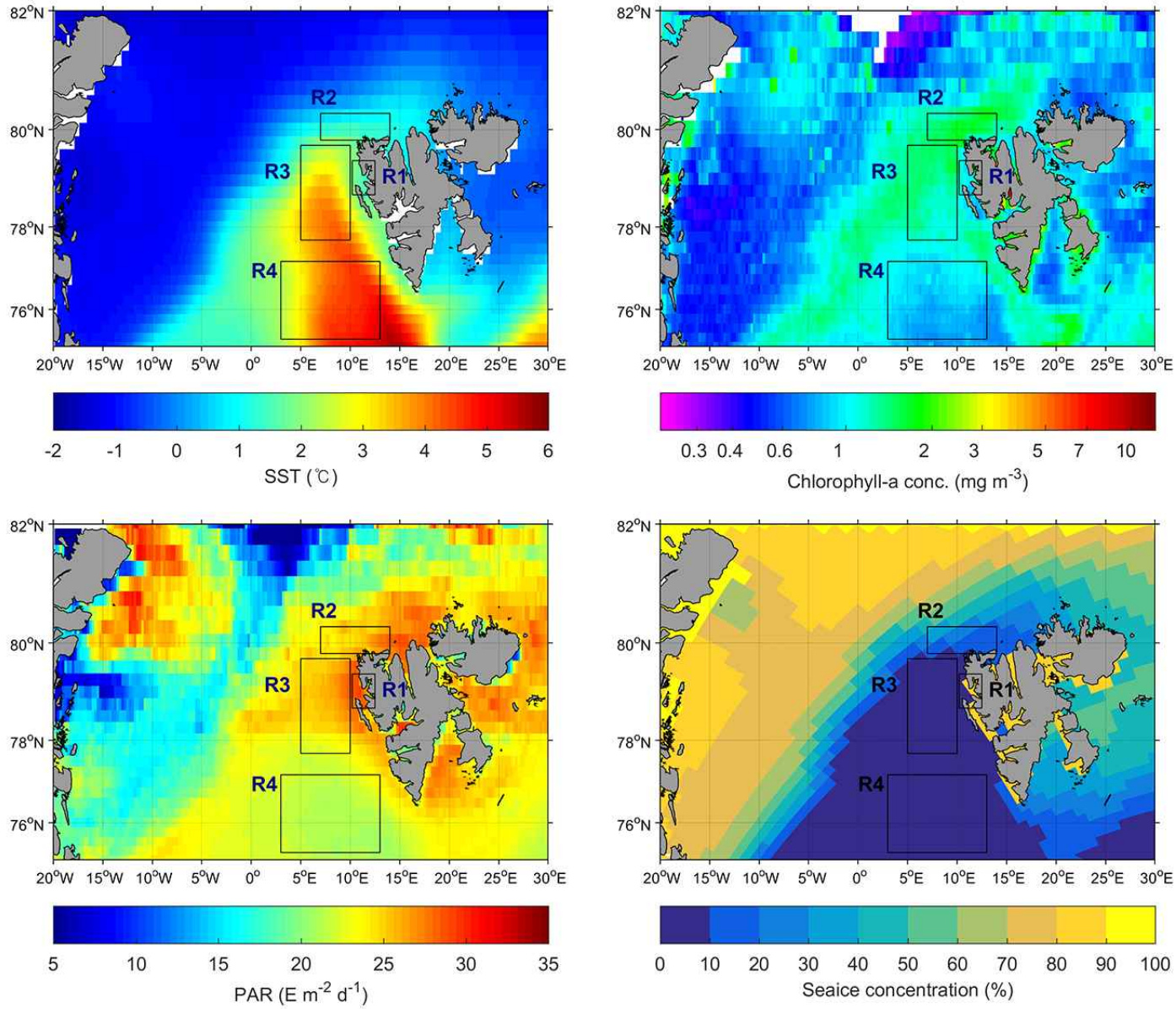


그림 57. 지난 20년간(1998 - 2017년) 평균 표층수온(Sea Surface Temperature, SST), 엽록소 농도(Chlorophyll-a concentration), 광량(Photosynthetically Available Radiance, PAR) 그리고 해빙농도(Seice concentration)의 공간분포.

표 6. 지역별 일차생산과 환경요인 간 상관관계 분석 (*는 $p < 0.05$)

Region		PP	CHL	SST	PAR	Seaice
R1	PP	1	0.35	0.74*	0.11	-0.22
	CHL		1	-0.22	0.14	-0.17
	SST			1	-0.06	-0.05
	PAR				1	-0.29
	Seaice					1
R2	PP	1	0.62*	0.66*	0.62*	-0.57*
	CHL		1	0.52	0.37	-0.63
	SST			1	0.24	-0.49
	PAR				1	-0.44
	Seaice					1
R3	PP	1	0.59*	-0.35	-0.33	-0.20
	CHL		1	-0.55	-0.25	-0.27
	SST			1	0.16	-0.33
	PAR				1	0.00
	Seaice					1
R4	PP	1	0.82*	-0.20	0.22	-0.09
	CHL		1	-0.37	0.22	-0.09
	SST			1	0.18	-0.16
	PAR				1	-0.14
	Seaice					1

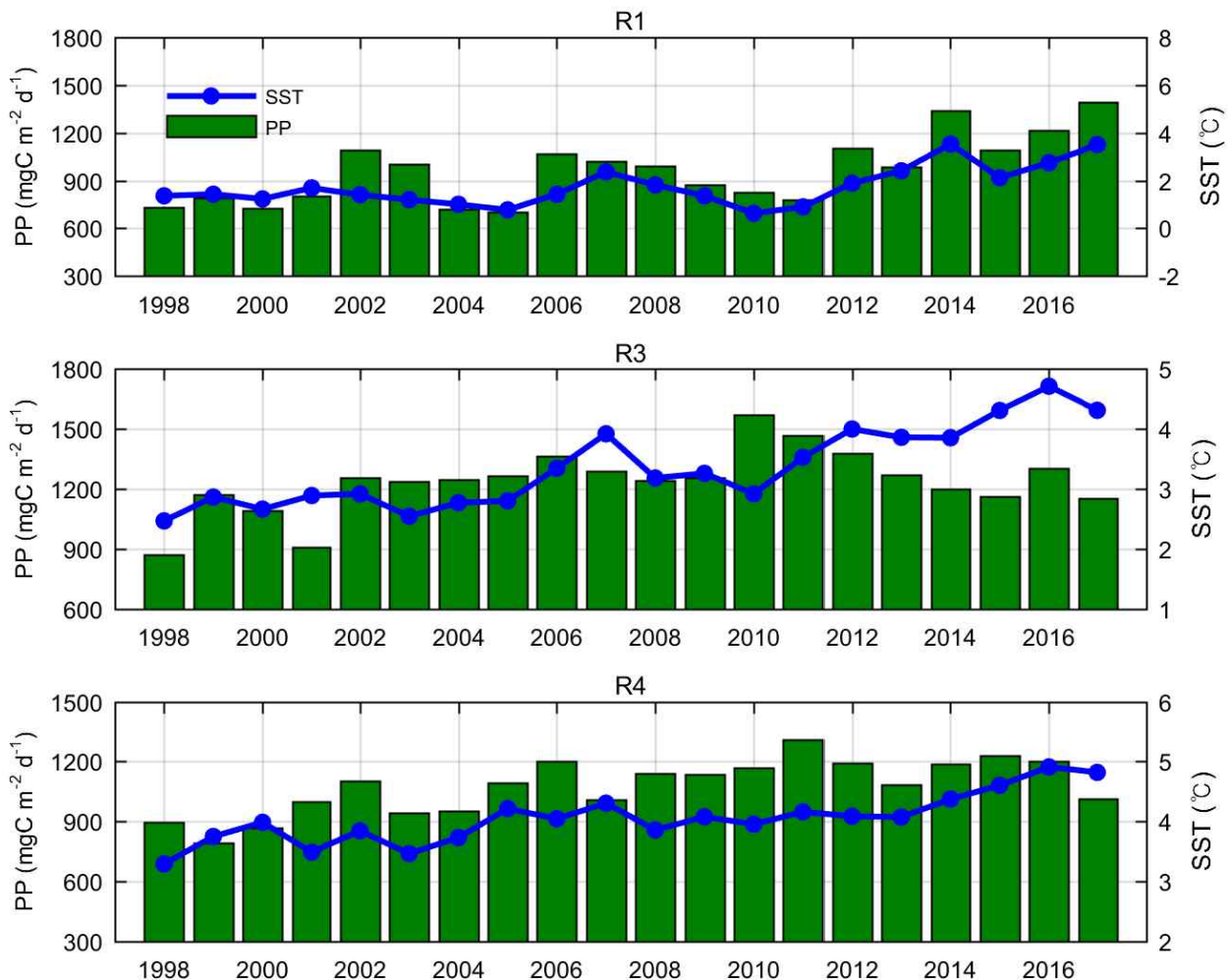


그림 58. R1, 3, 4 해역의 연평균 일차생산과 표층수온의 장기 시계열 분포

다. 해색인공위성 자료를 활용한 북극해 전체 일차생산력 지도 작성

(1) 북극해의 장기 일차생산력 자료

장기 일차생산력 자료(1998.01~2019.08)를 확보하기 위해 GlobeColour project (www.hermes.acri.fr)에서 제공하는 다중위성자료를 이용하였다. 월별 다중위성 엽록소 농도, 광량, 소광계수 (vertical attenuation coefficient) 자료를 사용하였고, Optimum Interpolation Sea Surface Temperature Version 2 (OISST v2)의 표층수온 자료를 Vertical Generalized Production Model (VGPS) 알고리즘에 적용하여 북극해 전체 일차생산력 자료를 생성하였다. 총 일차생산력 자료는 1998.01~2019.08까지 생성하였으며 시계열 자료 분석에는 2018.12까지 사용하였다. 북극해 전체 일차생산력 시계열 분석을 위해 선행연구 (Pabi et al. 2008)를 참고하여 북극해 지역을 총 8개 지역으로 나눠 분석하였다(그림 59).

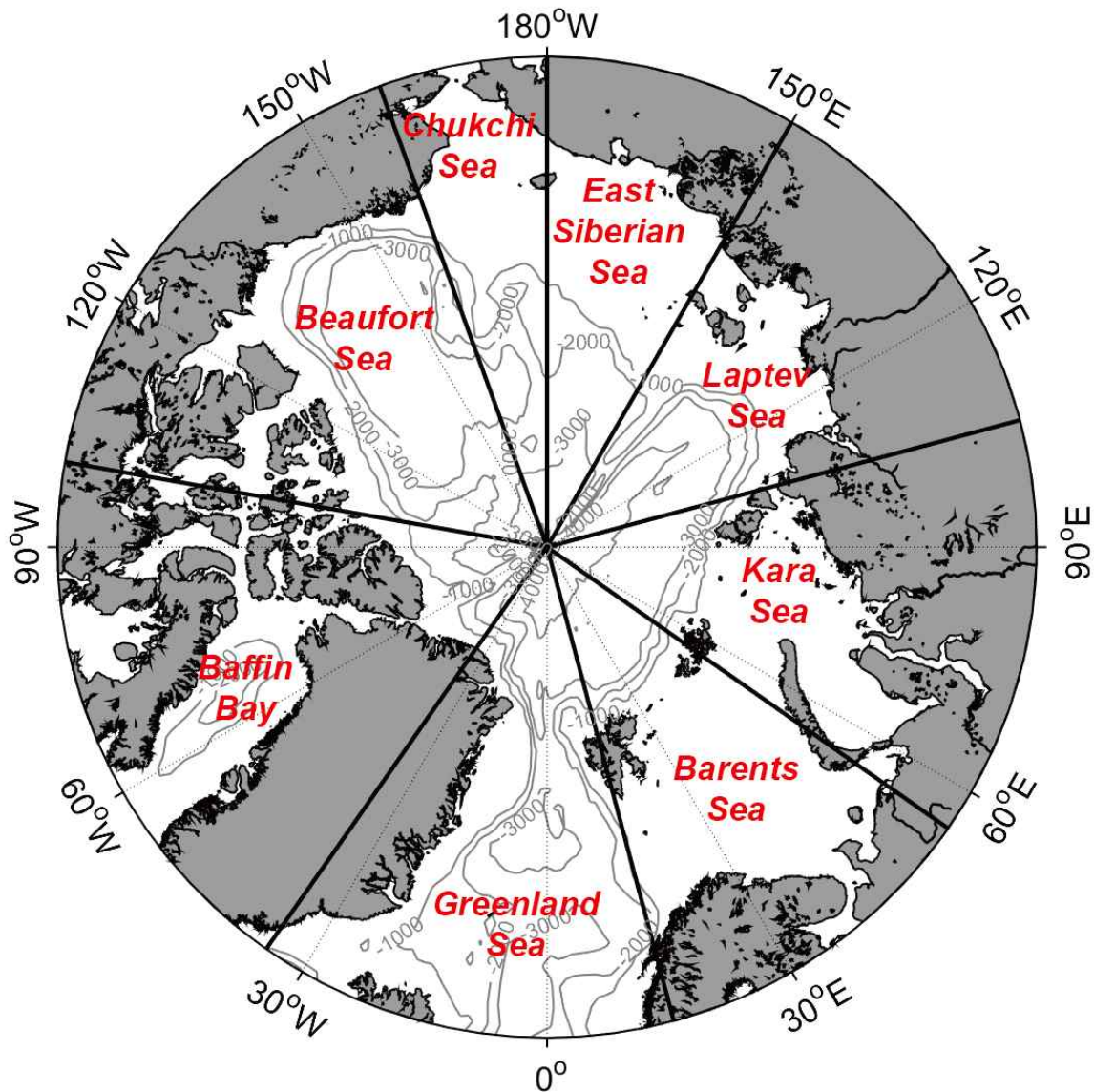


그림 59. 일차생산력 분석을 위한 지역별 북극해 지도(Pabi et al. 2008 참고).

(2) 지역별 북극해 평균 일차생산력 공간분포 (1998.01~2019.08)

지난 22년간 북극해 전체 평균 일차생산력은 $634 \pm 325 \text{ mgCm}^{-2}\text{d}^{-1}$ 를 나타내었다(그림 60). 지역별 평균 일차생산력은 그린란드 해가 가장 큰 $783 \pm 65 \text{ mgCm}^{-2}\text{d}^{-1}$ 를 나타냈으며 반대로 가장 낮은 일차생산력은 $446 \pm 52 \text{ mgCm}^{-2}\text{d}^{-1}$ 로 보퍼트 해로 나타났다. 공간적으로 노르웨이와 스발바드 주변 해역이 가장 높은 일차생산력을 나타냈으며 반대로 보퍼트 바깥 해역이 가장 낮은 일차생산력 분포를 보였다. 대표적 서 북극해 (보퍼트 해, 척치 해, 동시베리아 해)의 평균 일차생산력은 $564 \pm 92 \text{ mgCm}^{-2}\text{d}^{-1}$ 이며 동 북극해 (그린란드 해, 바렌츠 해)의 평균 일차생산력은 $811 \pm 79 \text{ mgCm}^{-2}\text{d}^{-1}$ 로 지역적 차이가 크게 나타났으며 특히, 스발바드 주변 해역이 북극해에서 가장 높은 일차생산력을 나타냈다. 일차생산력의 표준편차는 연안해역 위주로 높았으며 연안으로부터 고위도로 갈수록 상대적으로 낮은 편차를 나타냈다. 특히, 가장 큰 일차생산력의 표준편차는 그린란드 주변 해역에서 확인되었다.

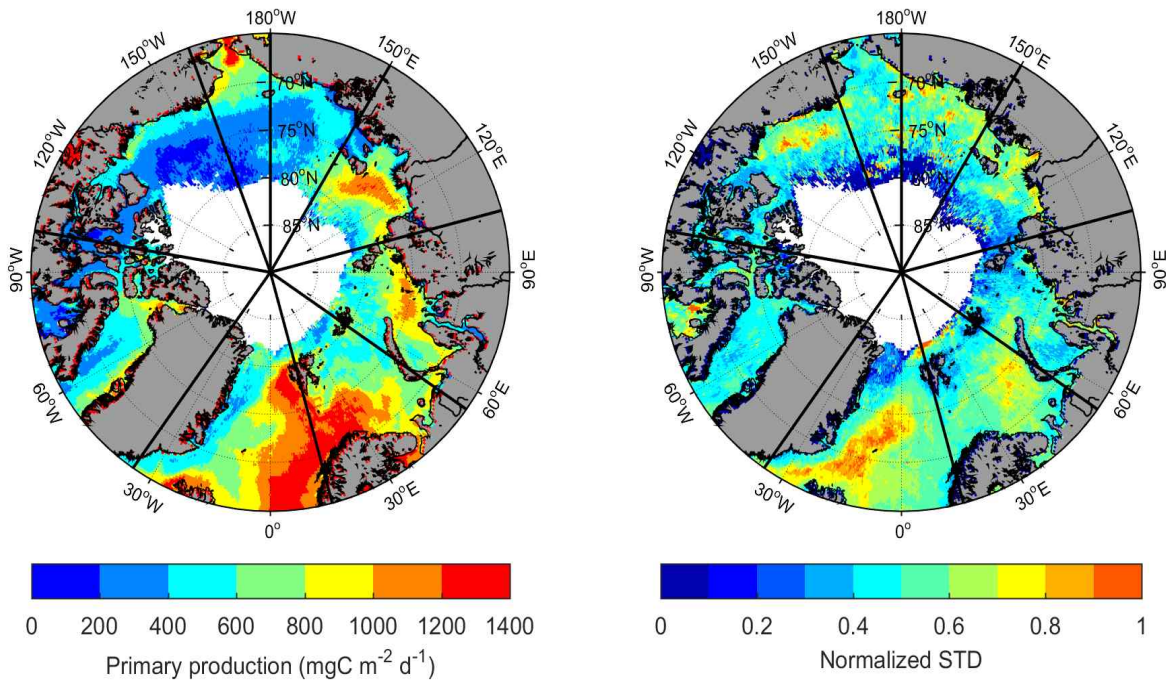


그림 60. 지역별 북극해의 지난 22년간 평균 일차생산력과 표준편차 공간분포 (1998.01~ 2019.08).

(3) 지역별 북극해 월별 및 연도별 일차생산력 시계열 분포

월별 일차생산력 분포는 지역에 따라 다소 차이가 있긴 하지만, 주로 3-4월에 식물플랑크톤 번성을 시작으로 5-6월경 최고 일차생산력을 나타내는 계절성을 나타내었다(그림 61). 북극해 지역 중, 그린란드해의 6월 일차생산력과 바렌츠해의 5월 일차생산력이 1655 ± 157 , $1232 \pm 218 \text{ mgCm}^{-2}\text{d}^{-1}$ 로 가장 높았으며, 카라 해와 보퍼트 해의 일차생산력이 725 ± 168 , $601 \pm 119 \text{ mgCm}^{-2}\text{d}^{-1}$ 로 가장 낮은 수준이었다. 이러한 일차생산력 차이는 앞선 평균 일차생산력 공간분

포와 비슷한 경향을 나타내었다. 대부분 지역에서 5-6월경 최대 일차생산력을 띄는 계절성을 나타내지만, 카라 해의 일차생산력 분포는 3월부터 증가하기 시작하여 5-8월경 $722 \pm 11 \text{ mgCm}^{-2}\text{d}^{-1}$ 정도로 꾸준히 유지하는 것으로 나타났다.

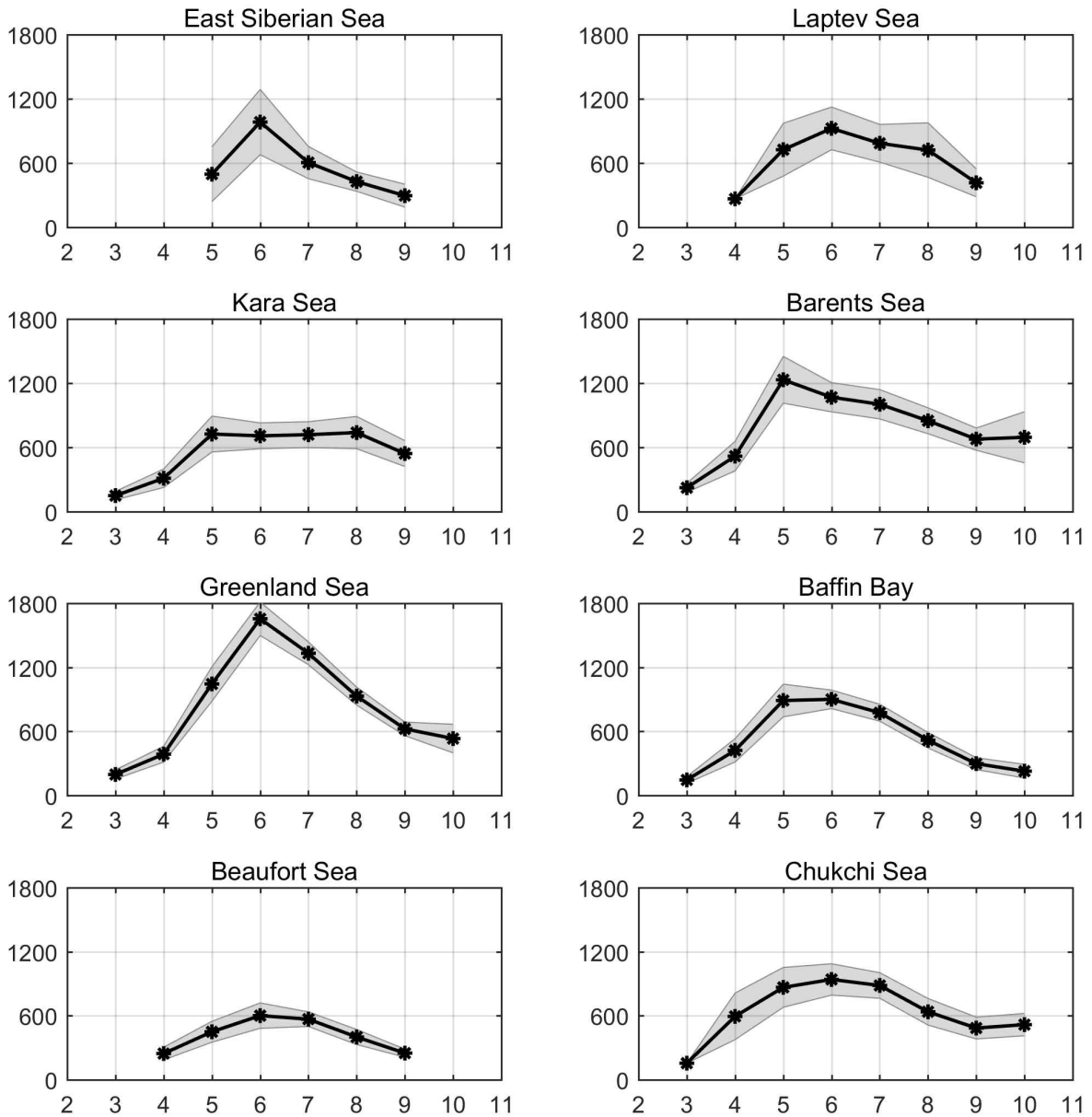


그림 61. 월별 평균 일차생산력 분포 및 표준편차 (1998.01~2018.12).

지난 21년간 연도별 평균 일차생산력 시계열 분포를 그림 62에 나타냈었다. 북극해 지역 중, 바렌츠해와 그린란드해의 일차생산력이 점진적으로 증가하는 경향을 보였으며 통계적으로 유의했다($p < 0.1$). 지난 21년간 바렌츠해와 그린란드해의 일차생산력 증가율은 각각 8.6 , $3.6 \text{ mgCm}^{-2}\text{year}^{-1}$ 로 바렌츠해의 증가율이 약 두 배 더 높게 나타났다. 바렌츠해와 그린란드해를 제외한 나머지 지역의 일차생산력 시계열 분포는 뚜렷한 장기 경향을 보이지 않았다. 반면, 랍테브해의 경우, 1998년부터 2011년까지 일차생산력이 증가하는 경향을 보였지만 그 이후로 2016년까지 일차생산력이 급격히 감소하는 것으로 나타났다.

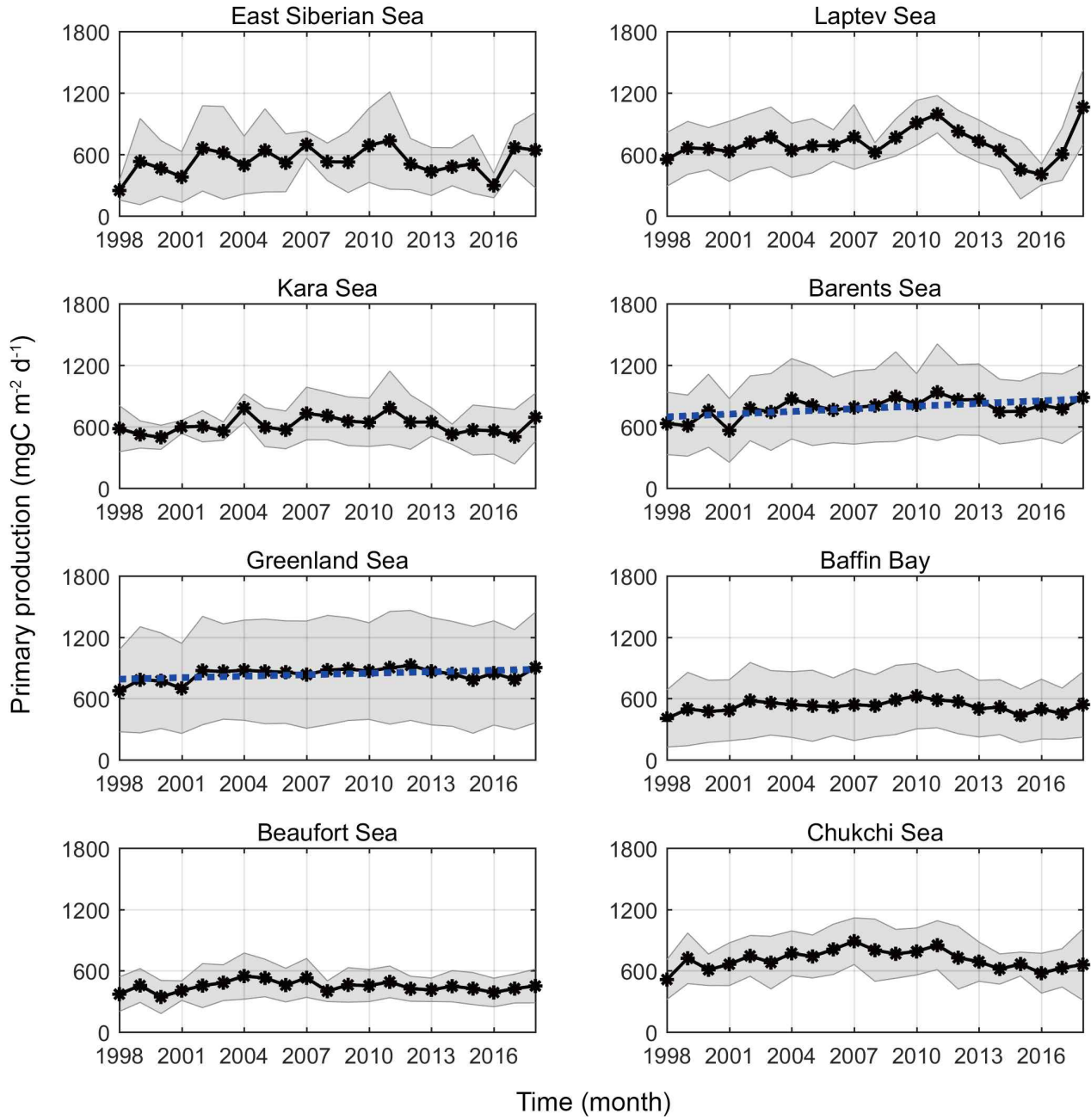


그림 62. 연도별 장기 일차생산력 시계열 분포 (1998~2018).

라. 북극해 지역별 환경요인과 일차생산력 간의 상관관계

북극해 지역별 일차생산력 변동에 미치는 환경요인을 확인하고자 분석된 일차생산력 자료와 같은 시기인 지난 21년간의 표층수온, 광량, 해빙농도 그리고 엽록소 농도와 상관관계를 분석하였다(표 7). 상관관계 분석 시, 각 환경요인의 장기 경향을 제거한 후(Detrend), 일차생산력과 환경요인 간의 상관관계 분석을 시행하였다. 분석 결과 모든 지역에서 표층수온과 해빙농도가 음의 상관관계를 보였으며 ($p < 0.05$), 이는 북극해 전 지역에서 온난화 영향으로 표층수온 상승과 해빙이 감소하는 경향을 나타낸다고 볼 수 있다.

동시베리아 해에서 일차생산력은 유일하게 해빙과 음의 상관관계 ($p < 0.1$)를 보였으며, 이는 해빙이 감소하며 개방해역 (Open water) 면적의 증가로 일차생산력 증가에 영향을 미칠 수 있다는 보고된 것과 일치한다(Arrigo and van Dijken, 2011). 또한, 엽록소 농도와 광량 간의 양의 상관관계($p < 0.1$)로 해빙의 감소로 표층에 투과된 광량 증가로 식물플랑크톤 생물량에 영향을 미칠 수 있는 것으로 보인다.

동시베리아 해를 제외하고 나머지 모든 지역에서 일차생산력은 엽록소 농도와 높은 상관관계를 나타냈다($p < 0.05$). 물론 일차생산력 알고리즘에 엽록소 농도가 변수로 사용되긴 하지만 다른 환경요인들(해빙, 수온 등)에 비해서 엽록소 농도가 직접 일차생산력 변동에 더 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다.

총 8개 지역 중 5개 지역에서 엽록소 농도는 광량과 양의 상관관계를 보여 북극해에서 광량이 식물플랑크톤 생물량 변동에 영향을 주는 요인 중 하나로 판단된다(동시베리아, 랍테브, 바렌츠, 척치해와 바핀만). 특히, 봄철 북극해에서 해빙 및 해빙에 쌓인 눈의 영향으로 식물플랑크톤이 광량 제한을 겪는 것으로 알려져 있다. 따라서 표층에 투과되는 광량의 증가는 엽록소 농도에 증가에 영향을 미칠 수 있을 것으로 사료된다. 반면, 그린란드해와 보퍼트해에서 엽록소 농도는 표층수온과 음의 상관관계를 보였다. 이는 표층수온 증가로 강화된 성층화로 인해 표층으로 영양염 유입이 감소하여 나타난 결과로 유추할 수 있다.

결과적으로 북극해 지역별 일차생산력의 경년 변동은 엽록소 농도에 큰 영향을 받으며 엽록소 농도는 광량의 세기 또는 영양염 공급에 좌우될 수 있는 것으로 보인다. 예를 들어, 그린란드 해와 바렌츠 해는 대서양 기원의 고온 고염 해류의 영향으로 저층의 영양염 공급이 표층으로 원활히 이루어지거나 또는 표층의 성층화로 인한 수층의 안정도가 광량 제한을 완화하는 것으로 짐작된다(Cherkasheva et al. 2014).

표 7. 지역별 일차생산력과 환경요인 간 상관관계 분석 (**는 $p < 0.05$, *는 $p < 0.1$)

Region		PP	CHL	SST	PAR	Seaice
East Siberian Sea	PP	1	0.22	0.20	0.20	-0.39*
	CHL		1	-0.34	0.43*	0.10
	SST			1	-0.21	-0.87**
	PAR				1	-0.08
	Seaice					1
Laptev Sea	PP	1	0.60**	0.35	0.49**	-0.53**
	CHL		1	-0.05	0.47**	-0.01
	SST			1	0.22	-0.88**
	PAR				1	-0.43*
	Seaice					1
Kara Sea	PP	1	0.68**	0.09	0.39*	-0.23
	CHL		1	-0.16	0.27	0.01
	SST			1	0.19	-0.88**
	PAR				1	-0.12
	Seaice					1
Barents Sea	PP	1	0.76**	-0.06	0.35	-0.07
	CHL		1	-0.15	0.43*	-0.08
	SST			1	0.28	-0.80**
	PAR				1	-0.09
	Seaice					1
Greenland Sea	PP	1	0.72**	-0.17	0.31	-0.12
	CHL		1	-0.44**	0.14	0.10
	SST			1	-0.22	-0.79**
	PAR				1	0.05
	Seaice					1
Baffin Bay	PP	1	0.86**	0.04	0.70**	-0.41*
	CHL		1	0.11	0.64**	-0.42*
	SST			1	0.23	-0.74**
	PAR				1	-0.44**
	Seaice					1
Beaufort Sea	PP	1	0.68**	-0.27	0.11	0.28
	CHL		1	-0.47**	0.15	0.39*
	SST			1	0.05	-0.84**
	PAR				1	-0.29
	Seaice					1
Chukchi Sea	PP	1	0.62**	0.27	0.77**	-0.36
	CHL		1	-0.16	0.58**	0.17
	SST			1	0.13	-0.83**
	PAR				1	-0.05
	Seaice					1

4. 해빙에서 pCO₂ 연속 모니터링 및 해빙 부이를 활용한 해빙 성장단계별 환경인자 연속 모니터링

가. pCO₂ 센서를 활용한 북극해 항해 중 해빙에서 pCO₂ 연속 모니터링

(1) 결빙 해역 및 아이스 캠프 정점의 pCO₂ 연속 모니터링

2018 아라온 북극 연구항해 중, 아라온 장착 pCO₂ 관측 시스템을 통해 결빙해역 및 아이스 캠프 사이트에서 표층 (~7m)의 용존이산화탄소 농도를 관측하였다(그림 63). 아이스 캠프 정점 및 결빙 해역에서의 용존 이산화탄소의 농도는 8월 22일 12:00 UTC 이후 결빙해역을 빠져나간 해역보다 확연하게 낮게 나타났다(그림 64). 해빙농도와 각 해역의 생산성 등의 자료와 함께 비교 분석하기 위하여 북극해에서 해빙의 물리 및 생지화학적 역할과 이산화탄소의 농도 변동 및 흡수력 변화 자료를 획득하였다.

(2) 해빙 부이를 이용한 생물량 연속 관측 및 환경 자료 확보

2019년 5~6월, 총 30일간 캐나다 코털 하버에서 북극 해빙 부이를 성치하여 해빙의 성장 단계별 생물량 및 환경요인에 대한 데이터를 획득하였다(그림 65, 66, 67). 해빙의 성장 단계별 환경 요인들의 변동 특성을 파악하여 해빙미세조류의 탄소 흡수율을 조절하는 환경 요인을 파악하는데 활용 계획이다.

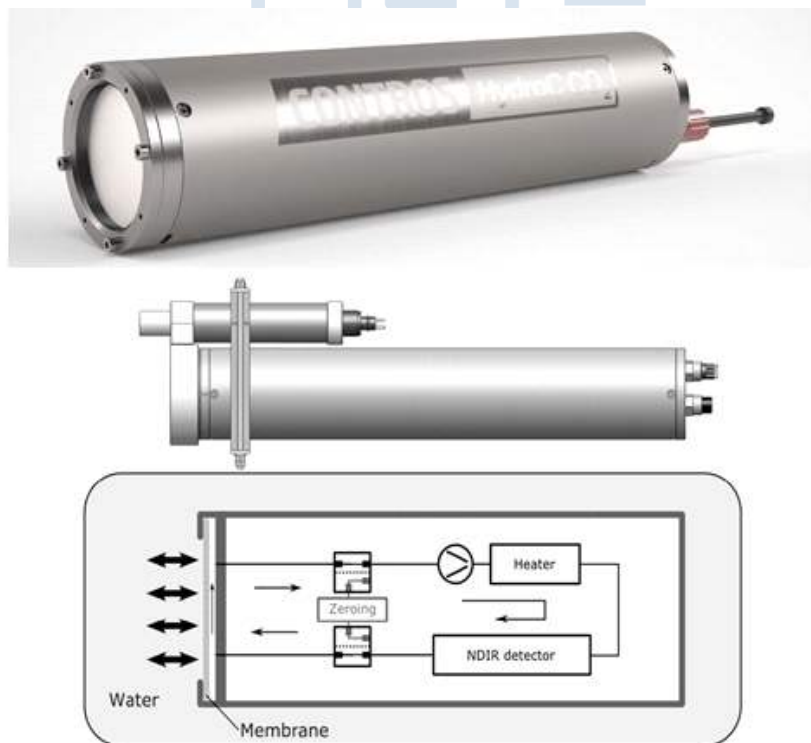


그림 63. Contros 사의 CO₂ 센서 사진 (위) 및 pCO₂ 센서의 내부 구조 (아래).

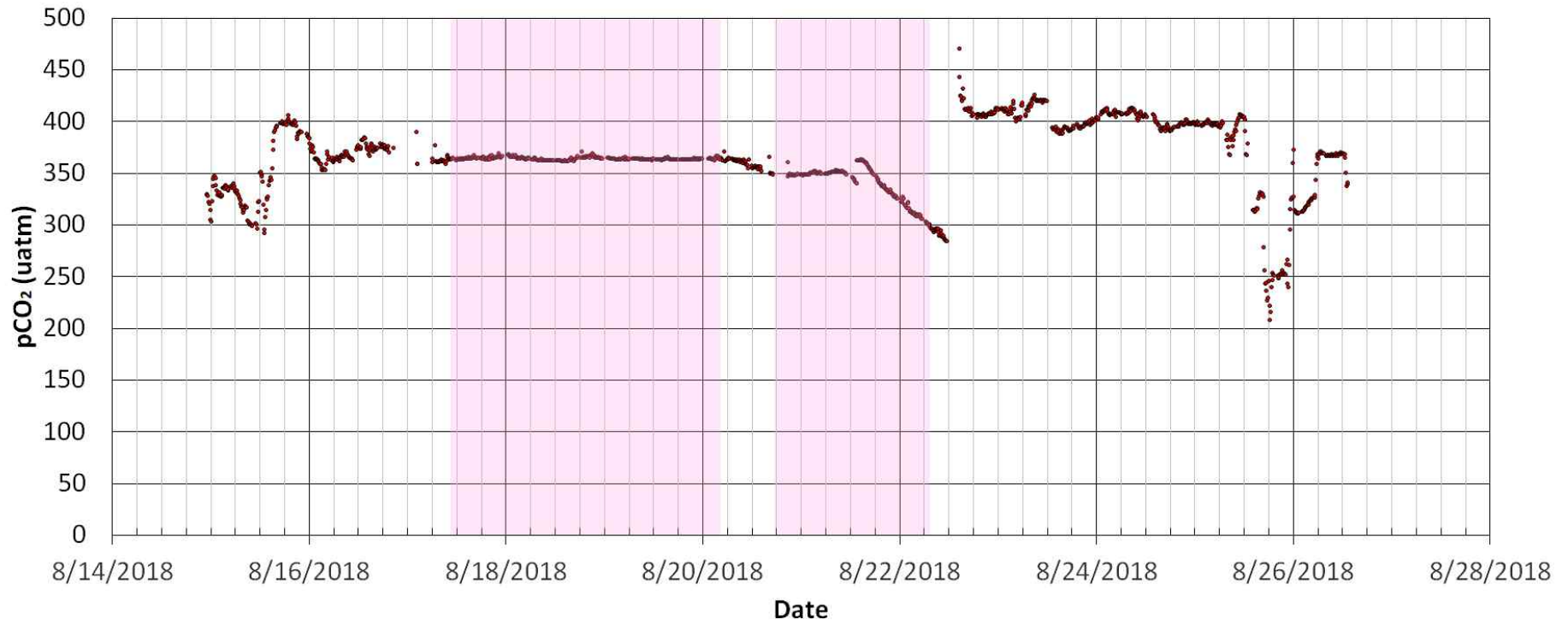


그림 64. 2018년 아라온 북극 항해 간 pCO₂ 연속 모니터링 결과

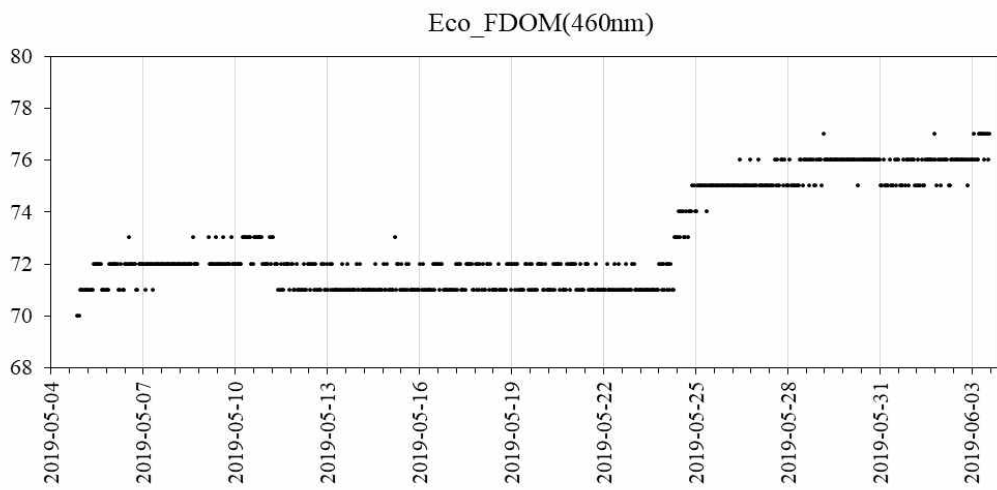
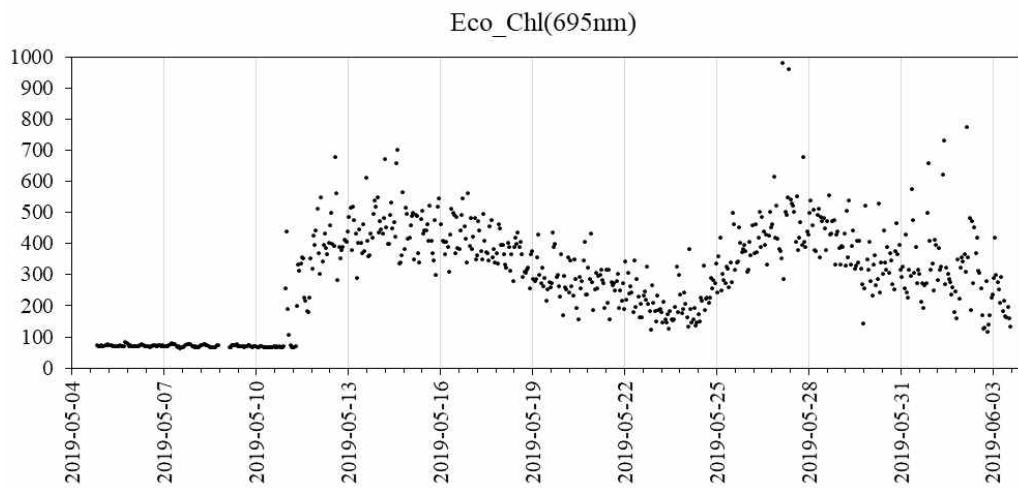
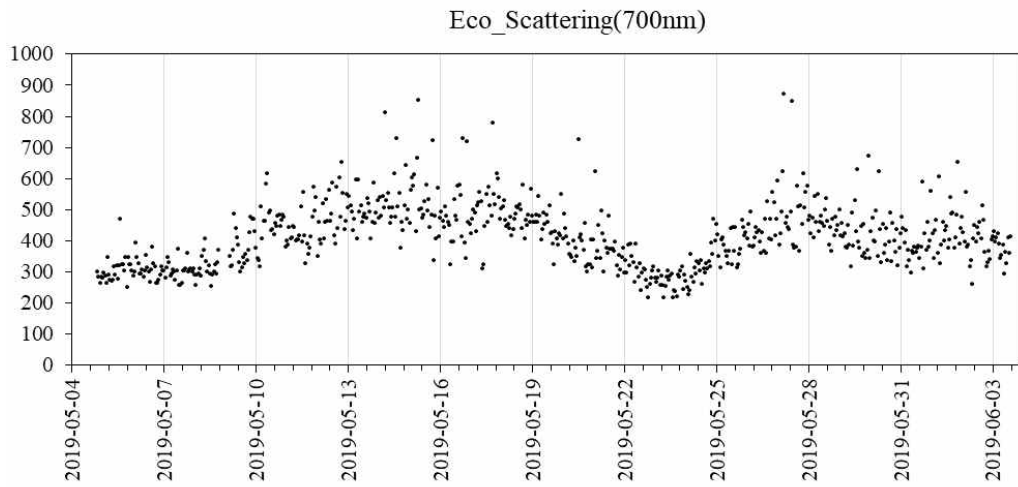


그림 65. 해빙 부이를 통한 생물학적 요인 관측

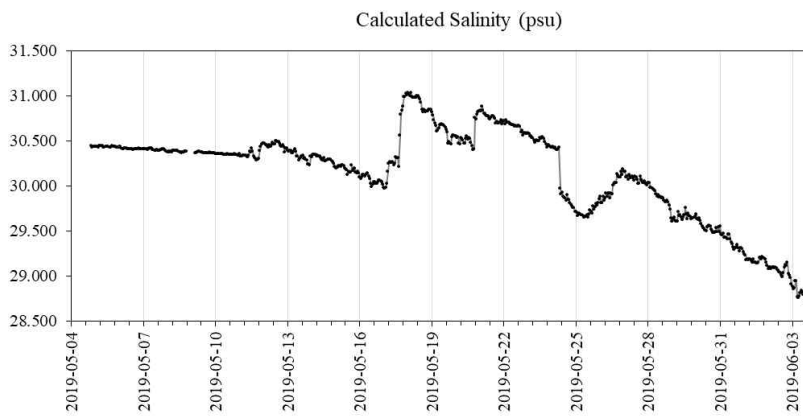
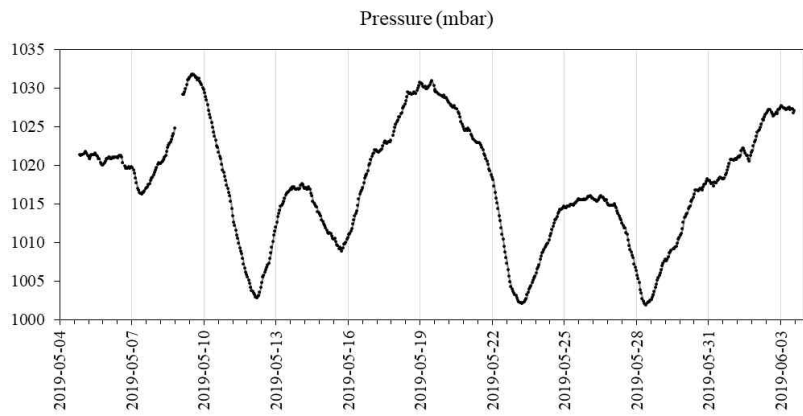
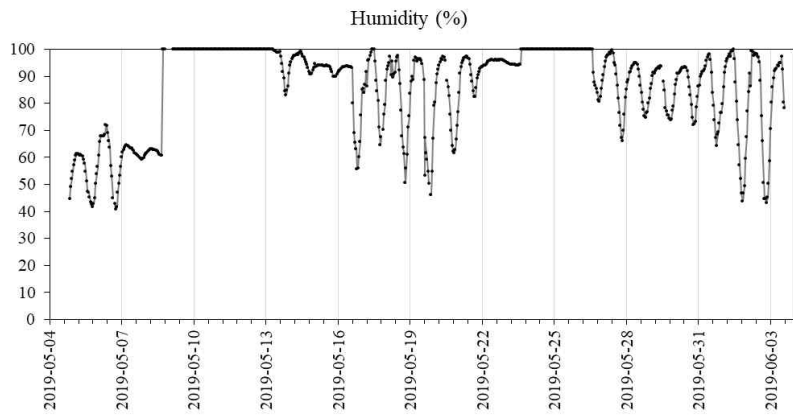
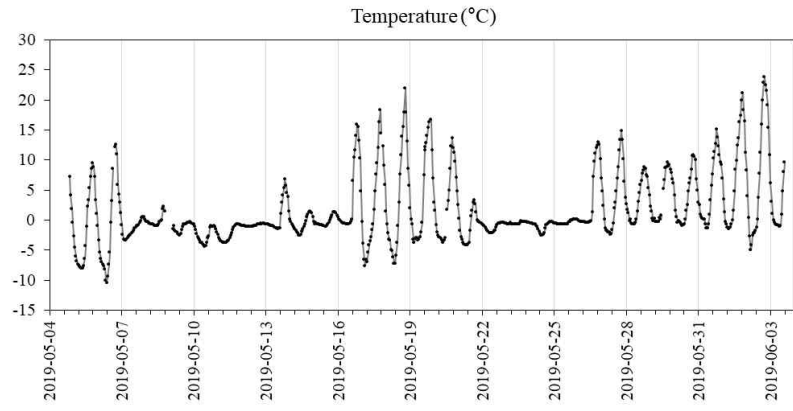


그림 66. 해빙 부이를 통하여 획득한 수온, 습도, 압력 및 염분 자료

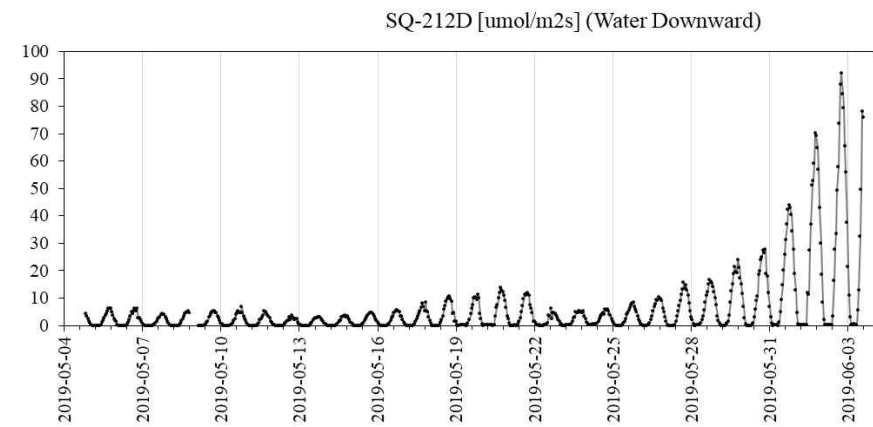
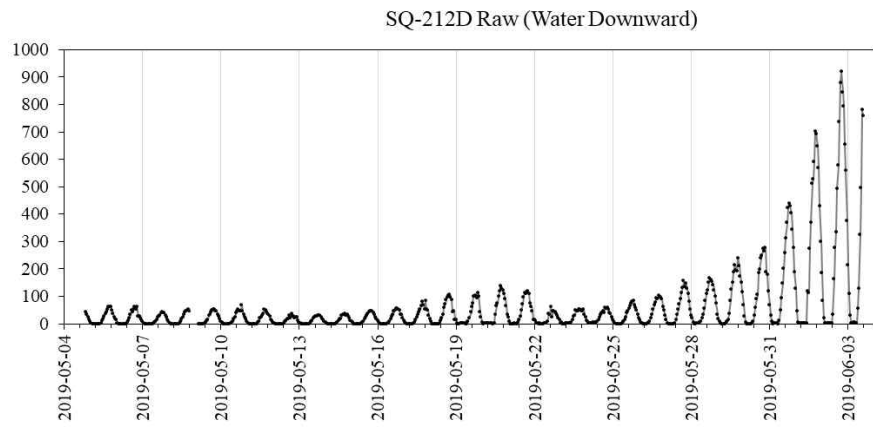
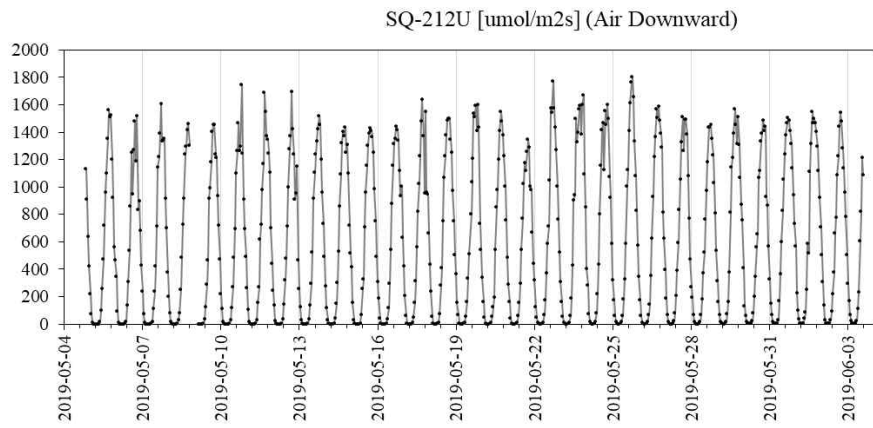
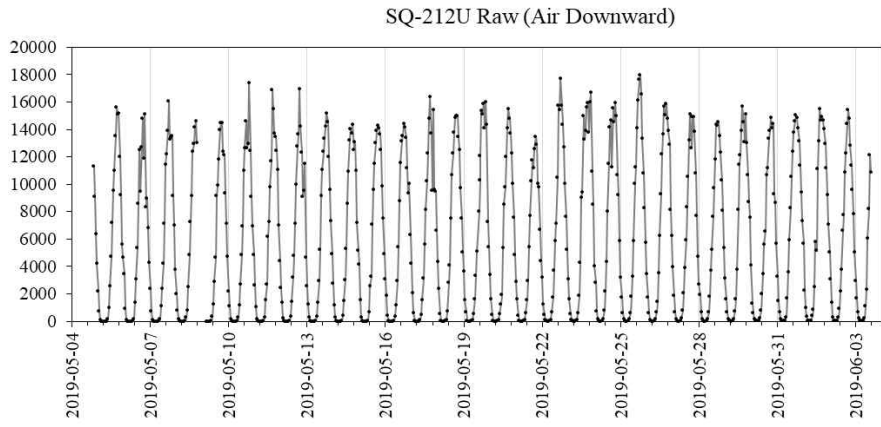


그림 67. 해빙 부이를 통한 관측 자료

(3) 생태계 모델을 이용한 해빙 미세조류의 연간 변화량 비교 연구

해빙 미세조류 현장 배양을 통한 탄소 흡수율 자료 및 현장 자료들을 이용하여 1-D 생태계 모델에 적용하였다(그림 68). 또한 해빙의 두께 및 눈의 영향을 고려한 모델을 적용하여 관측 결과와 비교하였다(그림 69). 모델을 통한 해빙의 성장에 따른 해빙 미세조류의 연간 생산력 변동 특성 파악하였다(그림 70). 모델 분석 결과와 해빙 optic 부이를 통해 획득한 장기 모니터링 자료와의 비교 검증에 활용 계획이다.

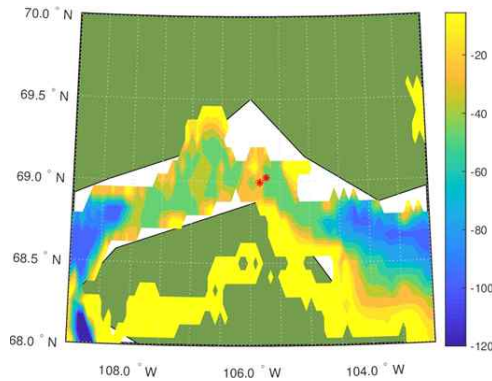


그림 68 1-D simulation

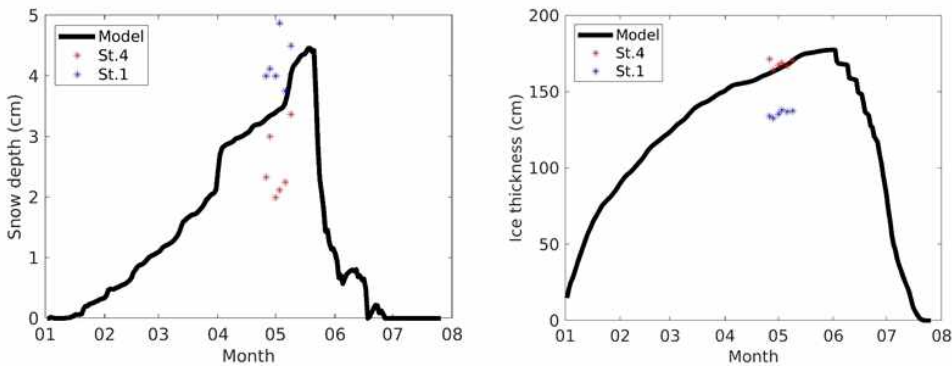


그림 69. 해빙의 두께 및 눈의 깊이를 고려한 모델 분석

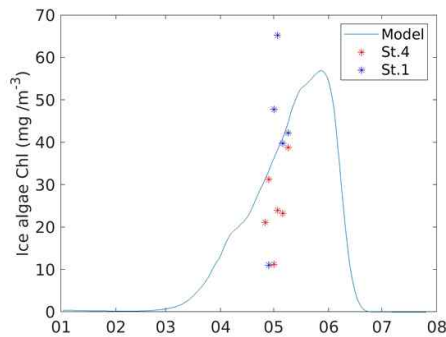


그림 70. 해빙 성장에 따른 해빙 미세조류의 성장 변화

3절. 해빙생태계 내 유기물 순환 및 탄소 순환 이해

1. 1차년도(2017년) 북극 다산기지 주변 Kongsfjorden 내 식물/동물플랑크톤 분석

가. 북극 다산기지 주변 Kongsfjorden 내 식물플랑크톤 군집 분석

다산기지 앞 Kongsfjorden 내에서의 해빙미세조류를 파악하기 위한 사전조사로 2017년 5월 10개 정점 표층에서 주요 우점종 및 종조성을 분석하였다. Kongsfjorden 내에서 식물플랑크톤의 공간적 분포는 얇은 해빙(약 20 cm)이 분포하고 있는 지역(정점 2, 3)에서는 규조류가 우점을 하고 있었으며 이외의 지역에서는 크기가 작은 편모조류인 *Phaeocystis* sp.가 우점하고 있음을 확인하였다(표 8, 그림 71)

전반적으로 봄철 Kongsfjorden에서의 식물플랑크톤 종다양성은 낮았으며 크기가 작은 편모조류인 *Phaeocystis* sp. (single cell form)가 해당 시기의 대표종으로 판단하였다. 향후 해당 종이 여름철 대발생의 주요 원인종이 될 것으로 예상된다. 또한 해당 지역에서의 해빙미세조류는 기존 참고문헌과의 비교를 통하여 규조류인 *Fragilariopsis* sp.가 대표종일 것으로 예상하였다. 그러나 정확한 결과를 도출하기 위해서는 겨울철 해빙시료 분석이 필요하다.

표 8. 2017년 봄철 Kongsfjorden 내에서의 정점별 대표 우점종 목록

정점	대표 우점종	비고
st-01	unidentified flagellates (<20um)	부유물질양이 높음. 생물량 매우 낮음
st-02	unidentified flagellates (<20um)	생물량 매우 낮음
st-03	<i>Fragilariopsis</i> sp. (chain form)	
st-04	<i>Ditylum brightwellii</i>	
st-05	<i>Phaeocystis</i> sp. (single cell form)	
st-06	<i>Phaeocystis</i> sp. (single cell form)	일부 규조류 출현
st-07	<i>Phaeocystis</i> sp. (single cell form)	
st-08	<i>Phaeocystis</i> sp. (single cell form)	
st-09	<i>Phaeocystis</i> sp. (single cell form)	
st-10	<i>Phaeocystis</i> sp. (single cell form)	

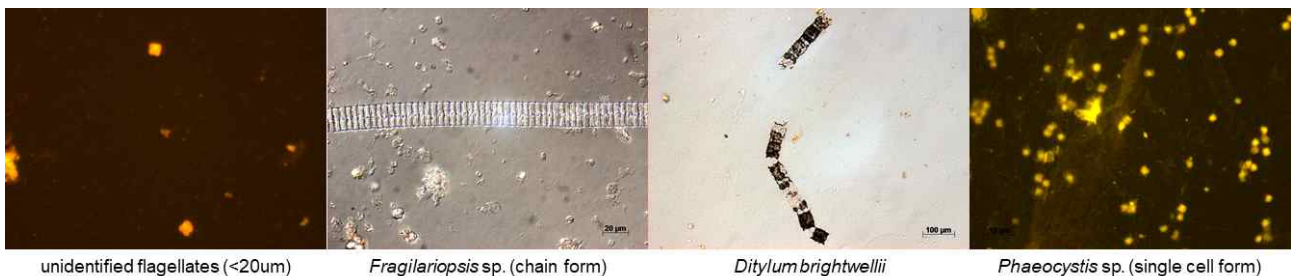


그림 71. 2017년 Kongsfjorden 내에서의 주요 출현종 현미경 이미지

나. 북극 다산기지 주변 Kongsfjorden 내 동물플랑크톤 군집분석

Kongsfjorden의 동물플랑크톤 군집을 분석하기 위해 총 10개의 정점을 선정하여 2017년 5월에 샘플링을 진행하였으며 채집은 망구 45 cm, 망목 200 μm 의 동물플랑크톤 네트를 사용하였다. 이 때, 네트에 유량계를 부착하여 단위개체수로 환산하였다.

분석결과 조사지역에서 동물플랑크톤의 평균 서식밀도는 652.9 indiv./m³로 정점 2에서 1235.7 indiv./m³로 가장 높았고, 정점 10에서 93.7 indiv./m³로 가장 낮았다. 또한 생물량(유기물중량)은 평균 10.74 mg/m³였으며 정점 8에서 19.93 mg/m³로 가장 높았고, 정점 6에서 3.42 mg/m³로 가장 낮게 나타났다(그림 72).

조사지역 내의 분포양상을 비교하면 서식밀도와 생물량이 반대되는 양상을 보였는데 이는 동물플랑크톤의 군집조성에서 차이가 있기 때문이라고 생각된다. 실제 대부분의 정점에서 *Cirriped larvae*가 우점하였는데 이러한 결과는 과거의 연구결과에 비하면 특이한 양상으로 보이며 이는 계절적 요인에 의한 것으로 판단된다. 또한 *Cirriped larvae*는 내만에 위치한 정점에서 최우점하였고 높은 개체수를 보였는데, 바깥지역으로 향할수록 개체수가 감소하는 것으로 나타났다(그림 73). 또한 Copepod 중에서는 *Calanus* spp.가 가장 우점하였으며 *C. finmarchicus*와 *C. glacialis*가 출현하였다. 이 중 *C. finmarchicus*가 상대적으로 높은 서식밀도를 보였는데 이는 조사지역이 상대적으로 온난한 대서양해류에 영향을 받고 있음을 뜻한다. 특히 상대적으로 생물량이 높았던 정점에서는 *C. finmarchicus*가 높은 비율로 출현한 것을 확인할 수 있었다(그림 74).

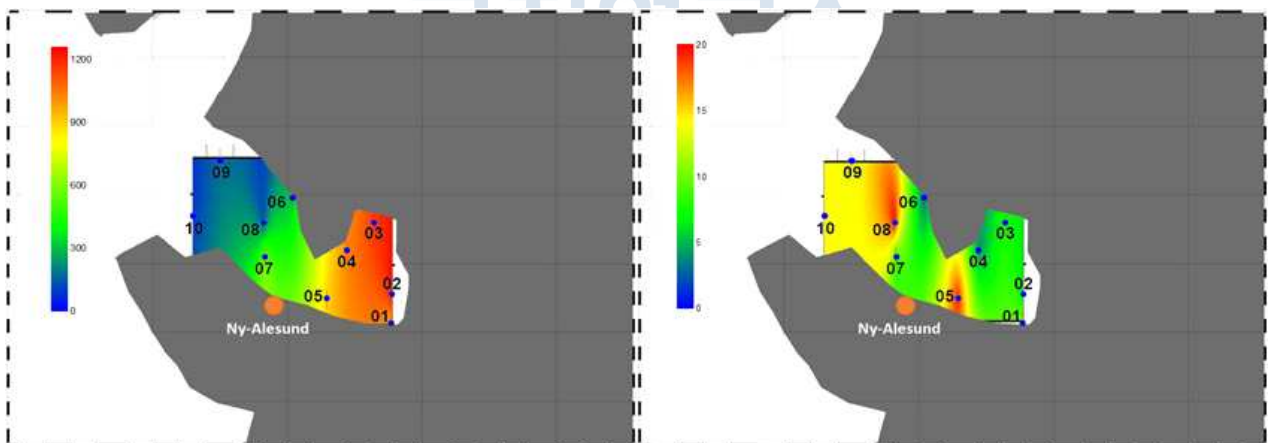


그림 72. 2017년 동물플랑크톤 개체수(좌) 및 생물량(우).

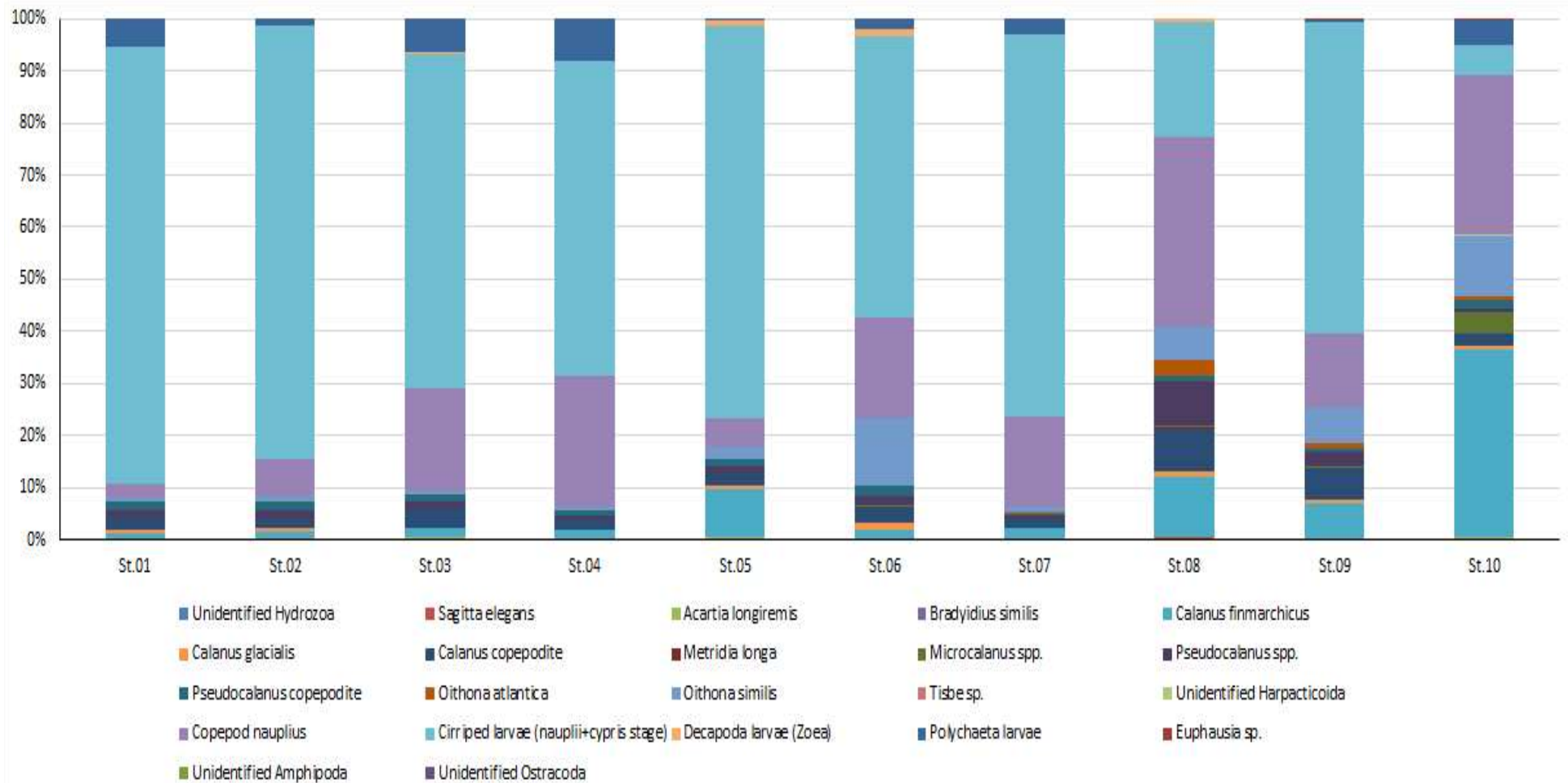


그림 73. 2017년 정점별 동물플랑크톤 분류군 별 서식밀도.

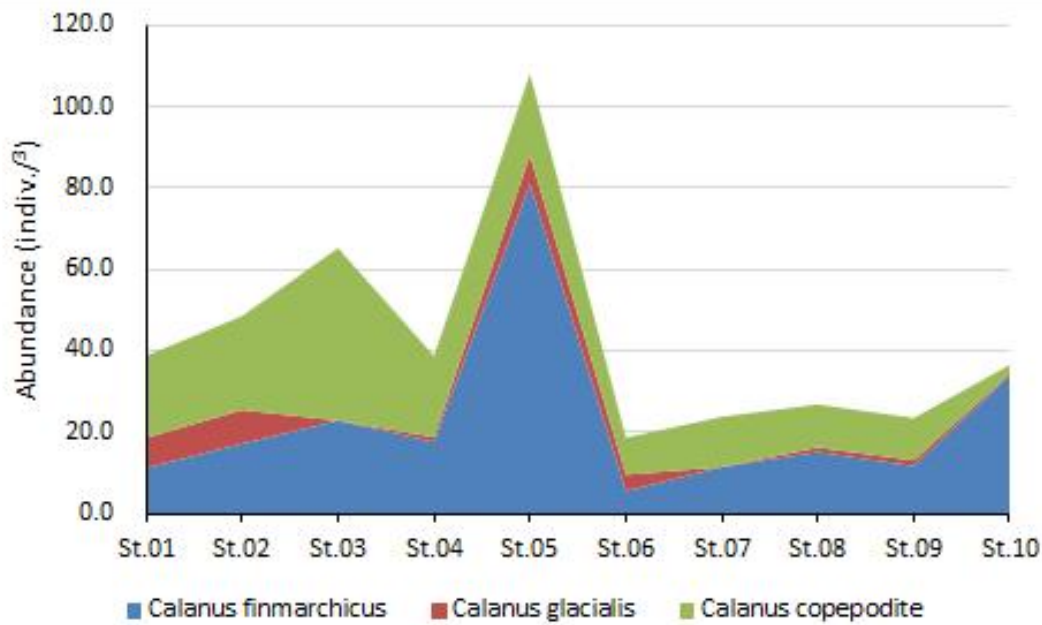


그림 74. 2017년 정점별 *Calanus* spp.의 개체수 및 조성비.

2. 2차년도(2018년) 북극 다산기지 주변 Kongsfjorden 내 식물/동물플랑크톤

가. 북극 다산기지 주변 Kongsfjorden 내 식물플랑크톤 분석

2018년 Kongsfjorden 내에서의 해빙미세조류의 다양성을 파악하기 위해 4월(8개 정점)과 6월(6개 정점) 2회에 걸쳐 현장조사를 실시하였다. Kongsfjorden 내에서 식물플랑크톤의 공간적 분포는 모든 정점에서 미동정 미소-극미소 식물플랑크톤이 우점하고 있었다. 미동정 미소-극미소 식물플랑크톤을 제외하고 해당 지역에서의 식물플랑크톤 군집의 지역별 분포를 보았을 때 4월에는 외만으로 갈수록 생물량과 종다양성이 높아진 반면 6월에는 반대양상을 보이는 것으로 확인되었다 (표 9, 그림 75, 76)

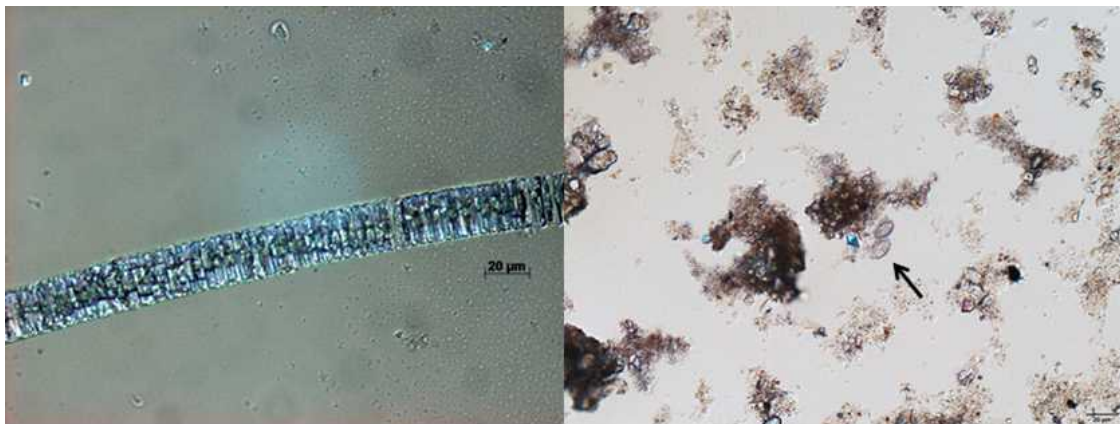
전반적으로 Kongsfjorden에서의 식물플랑크톤 현존량은 4월 대비 6월이 상대적으로 높게 나타났으며 이는 4월 이후 대발생이 원인으로 추측된다. 또한 해당 지역에서의 해빙미세조류는 기존 참고문헌과의 비교를 통하여 구조류인 *Fragilariopsis* sp.가 대표종일 것으로 예상된다. 그러나 정확한 결과를 도출하기 위해서는 겨울철 해빙시료 분석이 요구된다.

조사지역의 식물플랑크톤 분류군별 서식밀도를 보았을 때 계절별, 정점별 약간의 차이는 있으나 대부분 크기가 작은 미동정 미소-극미소 식물플랑크톤의 양이 상대적으로 매우 높게 나타났다(그림 78). 이러한 결과에 따라 Kongsfjorden 해역에서 식물플랑크톤 현존량과 총 엽록소 양은 높은 연관성을 보였다(그림 77).

조사지역에서의 온도, 염분, 총 엽록소, 식물플랑크톤 현존량의 수직분포를 확인하였으나 지역별, 수층별 특성을 파악할 수 없었다(그림 78, 79). 연구 지역에서의 해양환경과 식물플랑크톤과의 상관성을 파악하기 위해서는 더욱 자세한 데이터의 확보가 필요하다고 판단된다.

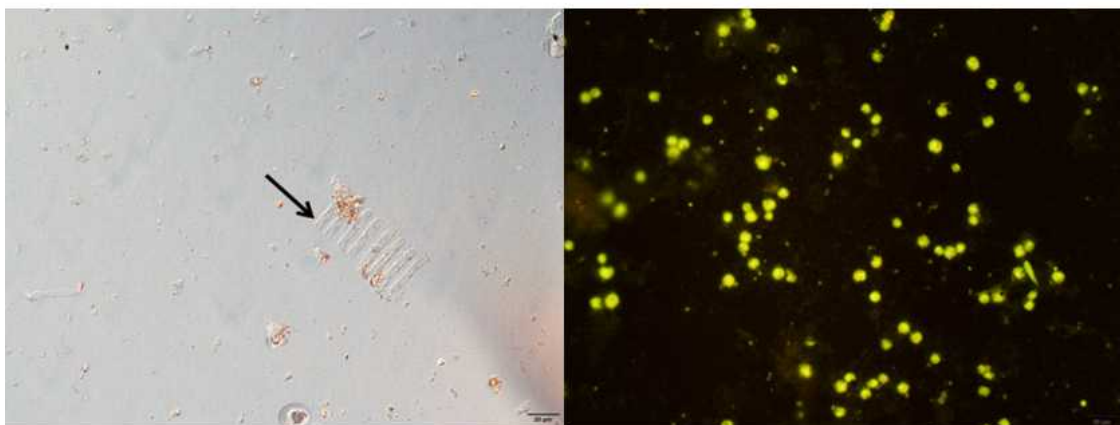
표 9. 2018년 Kongsfjorden 해역 표층에서의 정점별 대표 우점종(규조류) 목록

정점	대표 우점종	
	4월	6월
st-01	<i>Fragilaria</i> sp.	<i>Cocconeis</i> sp.
st-02	<i>Fragilariopsis oceanica</i>	<i>Licmophora</i> sp.
st-04	<i>Navicula vanhoeffeni</i>	-
st-05	<i>Fragilariopsis</i> sp. (> 20 μ m)	<i>Fragilaria</i> sp.
st-07	<i>Thalassiosira</i> sp. (<20 μ m)	<i>Licmophora</i> sp. <i>Cocconeis</i> sp.
st-08	<i>Fragilariopsis</i> sp. (> 20 μ m)	<i>Fragilariopsis</i> sp. (< 20 μ m)
st-09	<i>Fragilariopsis</i> sp. (< 20 μ m)	
st-10	<i>Navicula vanhoeffeni</i>	<i>Cocconeis</i> sp.



Fragilariopsis sp. (chain form)

Cocconeis sp.



Navicula vanhoeffeni (ribbon form)

Unidentified sp. (nano size)

그림 75. 2018년 Kongsfjorden 해역 표층에서의 주요 출현종 현미경 이미지

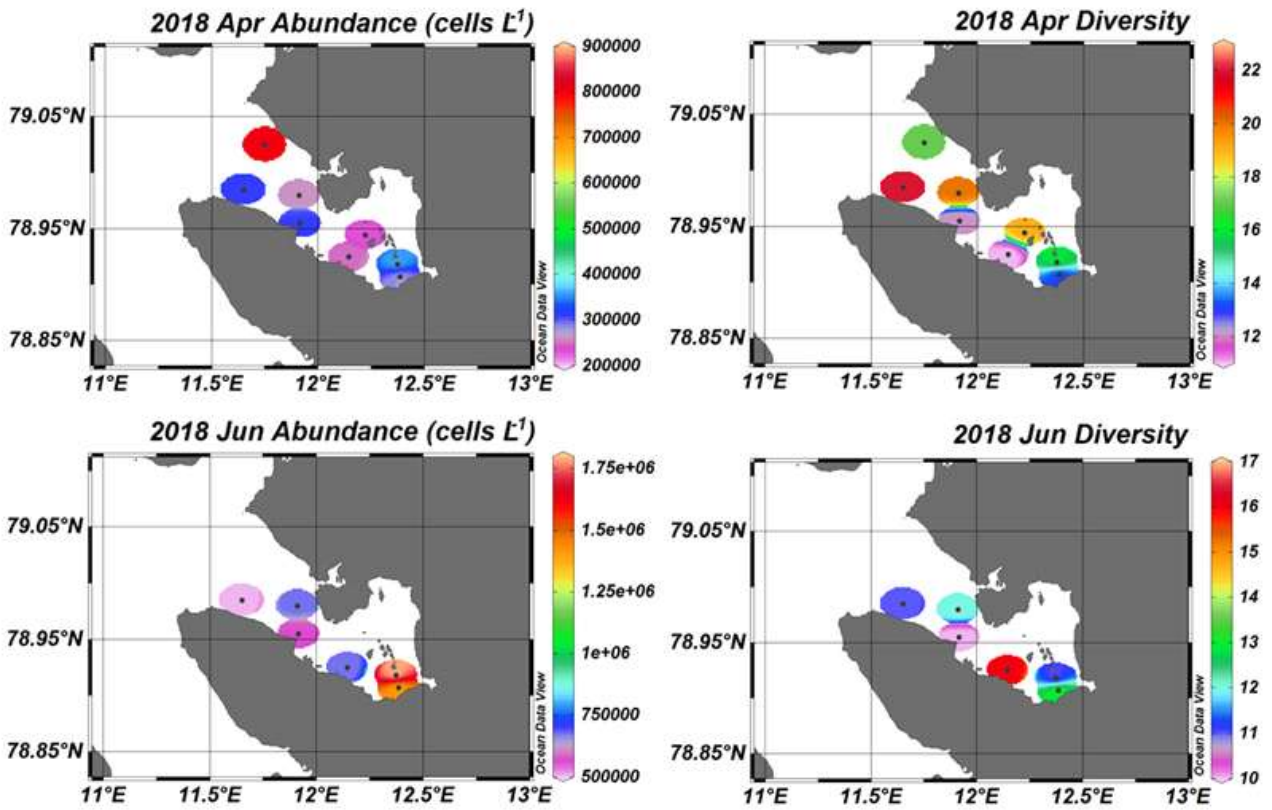


그림 76. 2018년 Kongsfjorden 해역 표층에서 식물플랑크톤 현존량(좌) 및 출현종수(우)

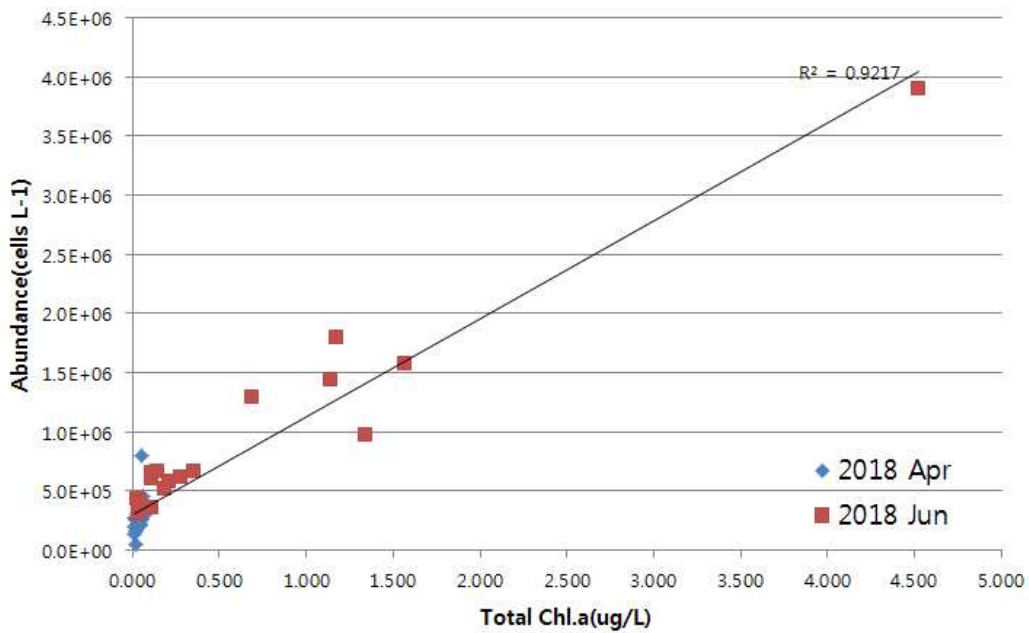


그림 77. 2018년 Kongsfjorden 해역에서의 식물플랑크톤 현존량과 총 엽록소 농도의 상관관계

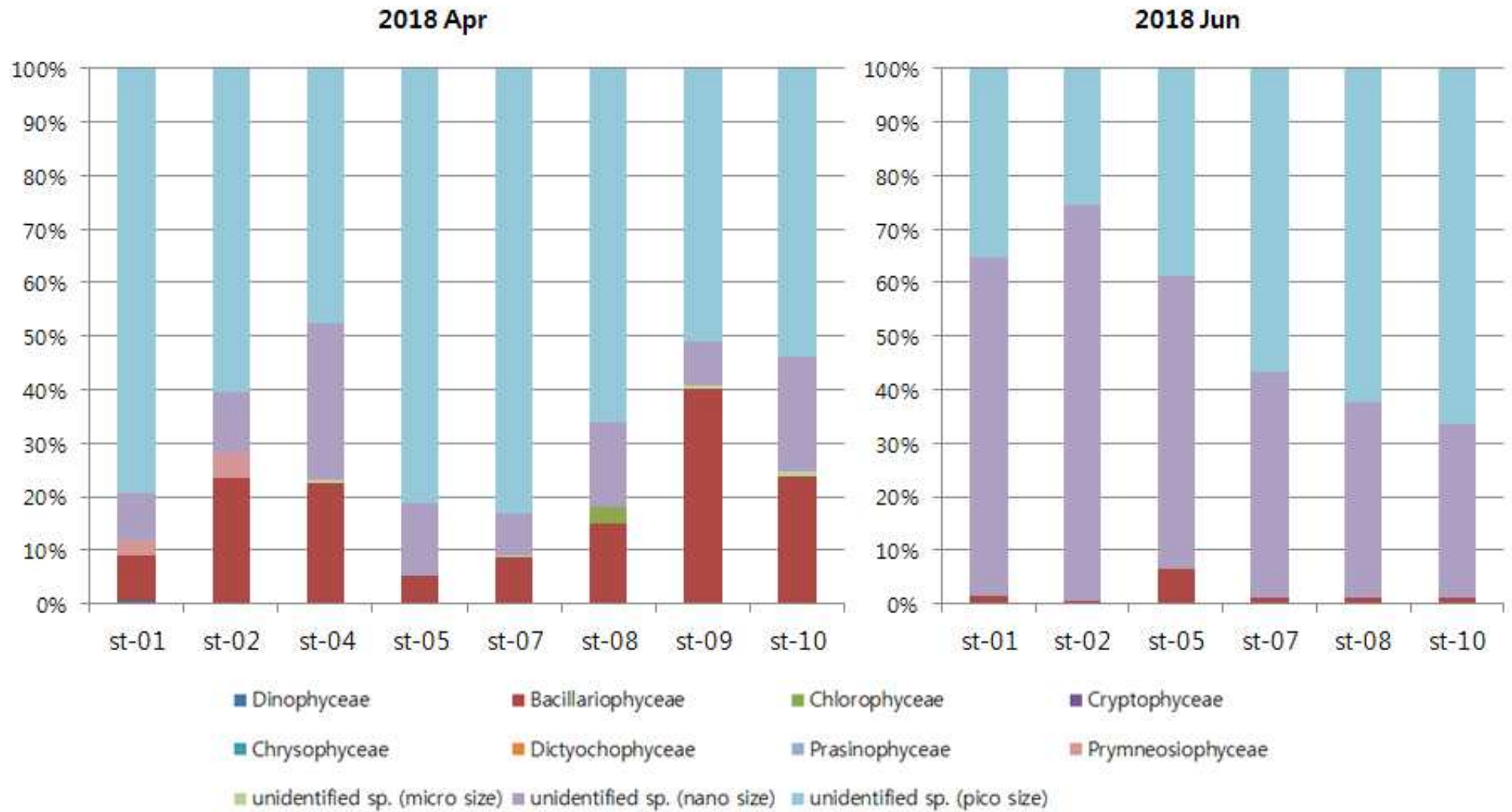


그림 78. 2018년 Kongsfjorden 해역 표층에서 식물플랑크톤 분류군 별 서식밀도

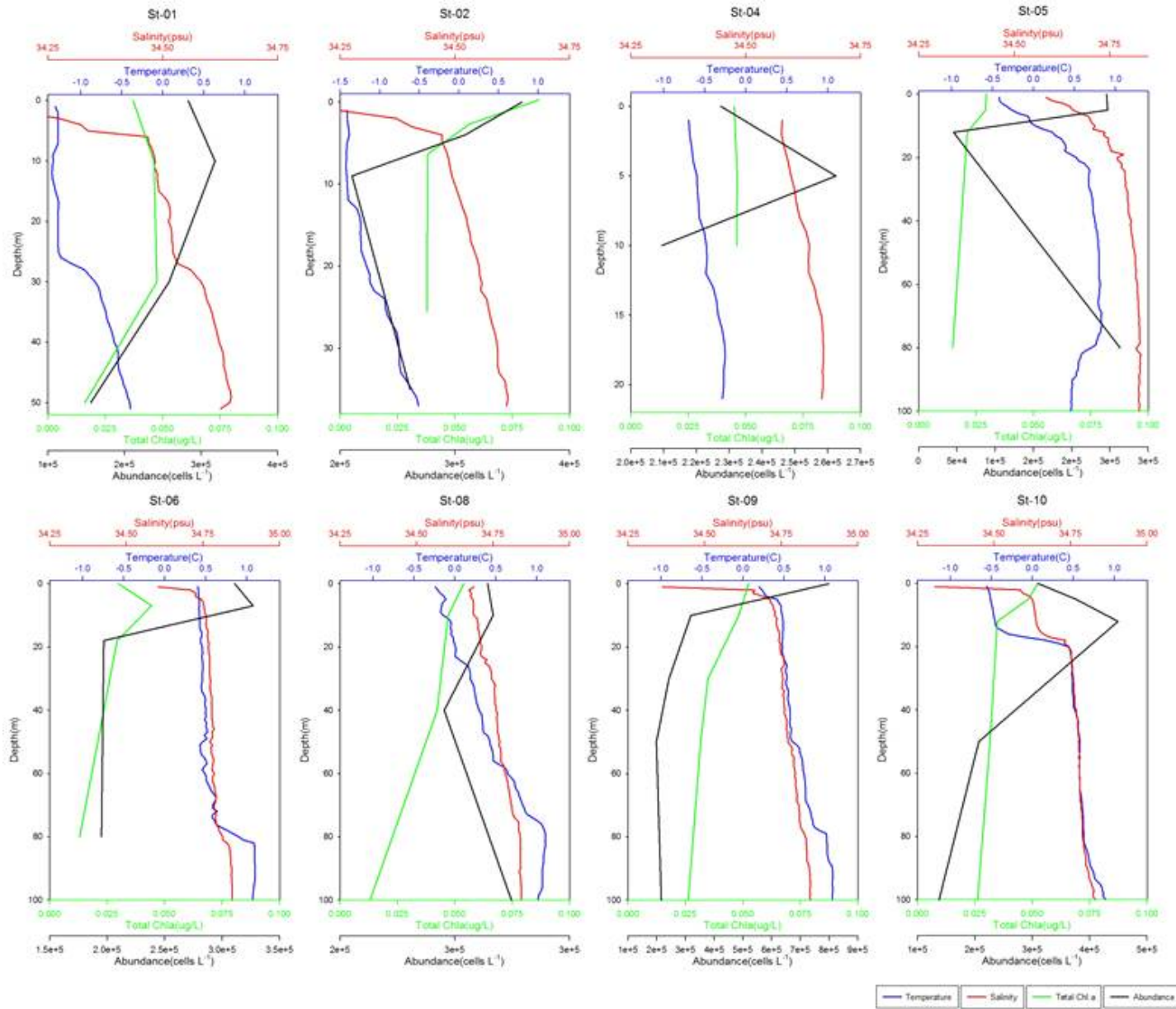


그림 79. 2018년 4월 Kongsfjorden 해역 표층에서 온도, 염분, 총 엽록소, 식물플랑크톤 현존량 수직분포

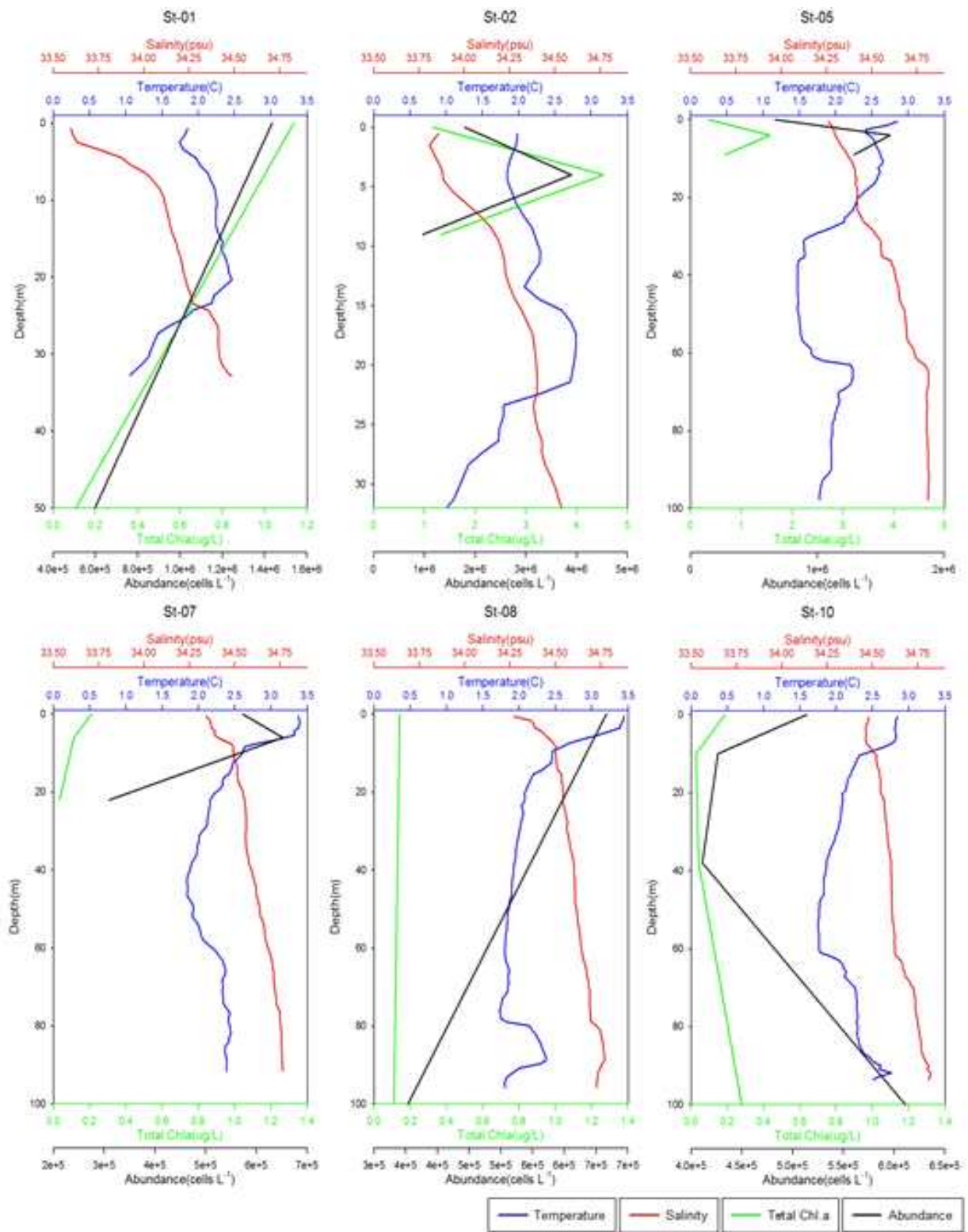


그림 80. 2018년 6월 Kongsfjorden 해역 표층에서 온도, 염분, 총 엽록소, 식물플랑크톤 현존량 수직분포

나. 북극 다산기지 주변 Kongsfjorden 내 식물플랑크톤 분석

(1) 동물플랑크톤 대표 우점종 확인 및 군집 구조 분석

Kongsfjorden의 동물플랑크톤 군집을 분석하기 위해 2018년 4월과 6월에 망구 40 cm, 망목 200 μm 의 동물플랑크톤 네트를 사용하여 시료 채집을 진행하였다. 4월에는 총 8개 정점, 6월에는 6개 정점에서 시료 채집을 진행하였다. 동물플랑크톤의 평균 서식밀도는 4월에 122.2 indiv./m³로 정점 1에서 250.6 indiv./m³로 가장 높았고, 정점 9에서 37.7 indiv./m³로 가장 낮았다. 그리고 6월에는 2561.7 indiv./m³로 정점 1에서 7974.3 indiv./m³로 가장 높았고, 정점 8에서 650.8 indiv./m³로 가장 낮았다(그림 81A, B). 조사지역에서 출현한 동물플랑크톤의 생물량(유기물중량) 분석결과 4월에는 평균 3.33 mg/m³였으며 정점 5에서 1.51 mg/m³로 가장 낮았고 정점 8에서 4.42 mg/m³로 가장 높았다. 그리고 6월에는 평균 37.17 mg/m³였으며 정점 8에서 14.33 mg/m³로 가장 낮았고 정점 1에서 87.23 mg/m³로 가장 높았음 (그림 81C, D).

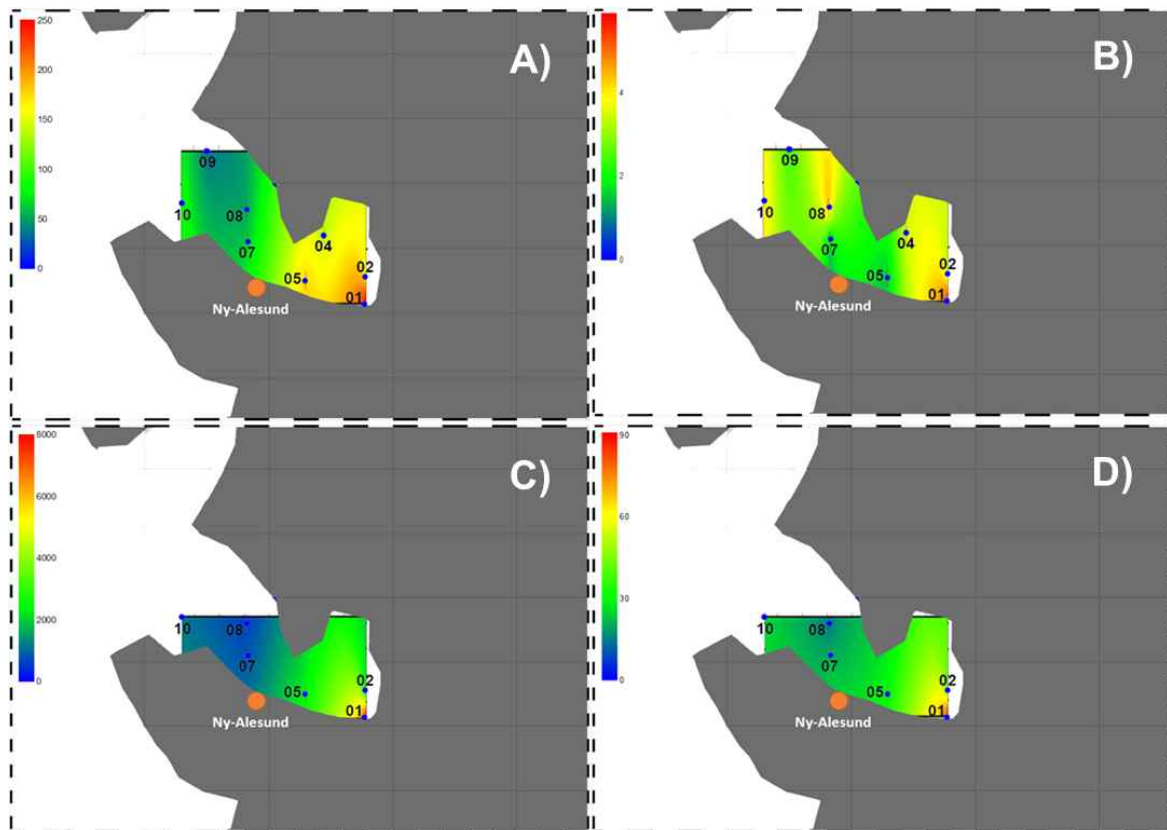


그림 81. 1차 조사기간 (NICE18A) 동안 동물플랑크톤 (A) abundance 및 (B) biomass와 2차 조사기간 (NICE18B) 동안 동물플랑크톤 (C) abundance 및 (D) biomass

(2) 동물플랑크톤의 계절별 군집종조성 변화양상

동물플랑크톤의 종조성은 조사시기에 따라 다소 차이가 있음이 확인되었다. 4월에는 모든 정점에서 요각류 (Copepoda)가 우점하였으며 *Oithona similis*, *Pseudocalanus* spp. 그리고 *Microcalanus* spp.가 우점하는 것으로 나타났다(그림 82). 그러나 6월에는 조사지역의 내만쪽에서 따개비유생 (*Cirriped larvae*)을 비롯한 플랑크톤유생이 우점하였지만 조사지역의 바깥쪽으로 향하면서 요각류 (Copepoda)가 우점하고 있음을 확인 되었다(그림 83). 또한 정점에 따라 다소 차이가 있지만 요각류 중 *Calanus copepodite*를 포함한 *Calanus finmarchicus*와 미동정 요각류 유생 (Unidentified copepodite)이 높은 비율로 출현하였다. 이러한 결과는 식물플랑크톤 대발생 (Phytoplankton blooming)이 4월과 6월 사이에 발생하였으며 그 결과 6월의 조사에서 유생단계의 동물플랑크톤 분류군들이 대량으로 출현한 것으로 생각되며 수심이 상대적으로 낮은 내만지역에서 서식밀도와 생물량 모두 높은 점은 이를 뒷받침 한다.

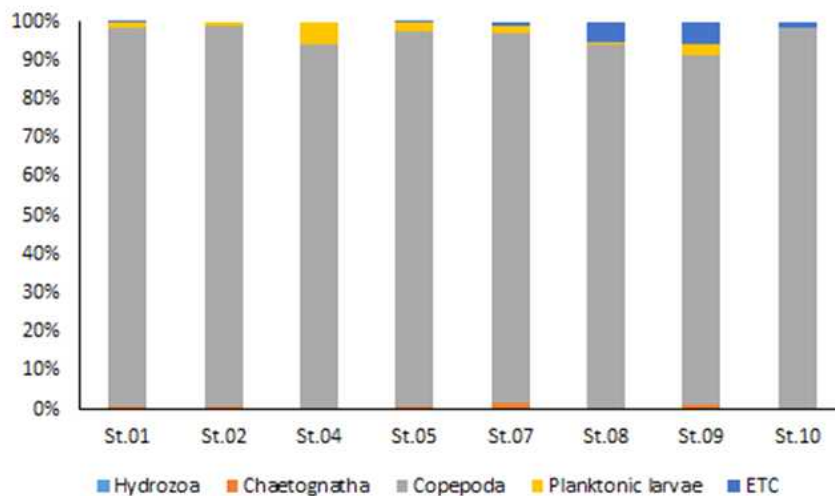


그림 82. 2018년 4월 Kongsfjorden 연구 해역에서 동물플랑크톤 우점종의 상대량

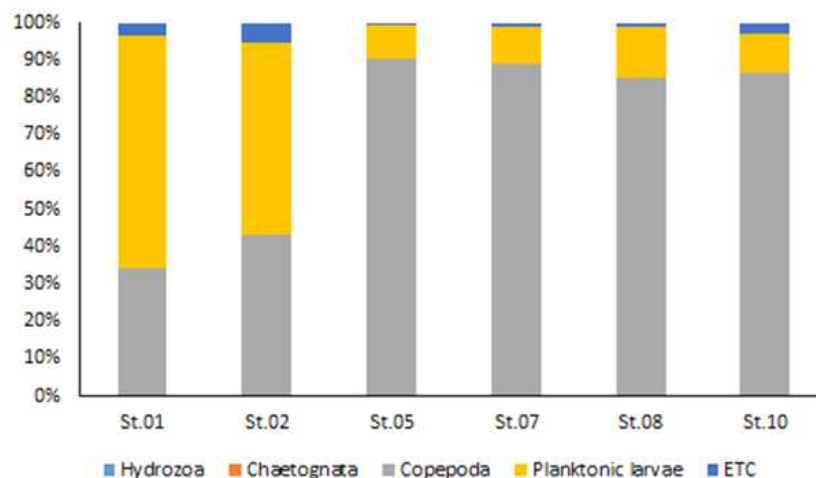


그림 83. 2018년 4월 Kongsfjorden 연구 해역에서 동물플랑크톤 우점종의 상대량

3. 3차년도(2019년) 북극 다산기지 주변 Kongsfjorden 내 식물/동물플랑크톤

가. Kongsfjorden 해역에서 식물플랑크톤 군집의 시계열 변화양상 추적

Kongfjorden 내 10개 정점에서 원추형 네트를 사용하여 수직 예망을 통해 시료를 채집하였다. 채집된 시료는 실험실로 이동하여 입자의 크기별로 여과 후 분석 용도에 따라 전처리 과정을 거친 후 냉장 및 냉동 보관, 엽록소 a의 경우 분해를 방지하기 위하여 다산기지 내에서 추출 및 분석하였다. 미세조류 종 다양성, 주요 우점종 파악 및 현존량 분석을 위해 시료를 연구소로 운반하여 현미경 분석 실시하여 봄-가을 식물플랑크톤 생물량 변화양상 파악 및 식물플랑크톤 현존량 및 연구해역의 해빙 미세조류의 대표 우점종 데이터를 확보 하였다(그림 84, 85, 표 10)

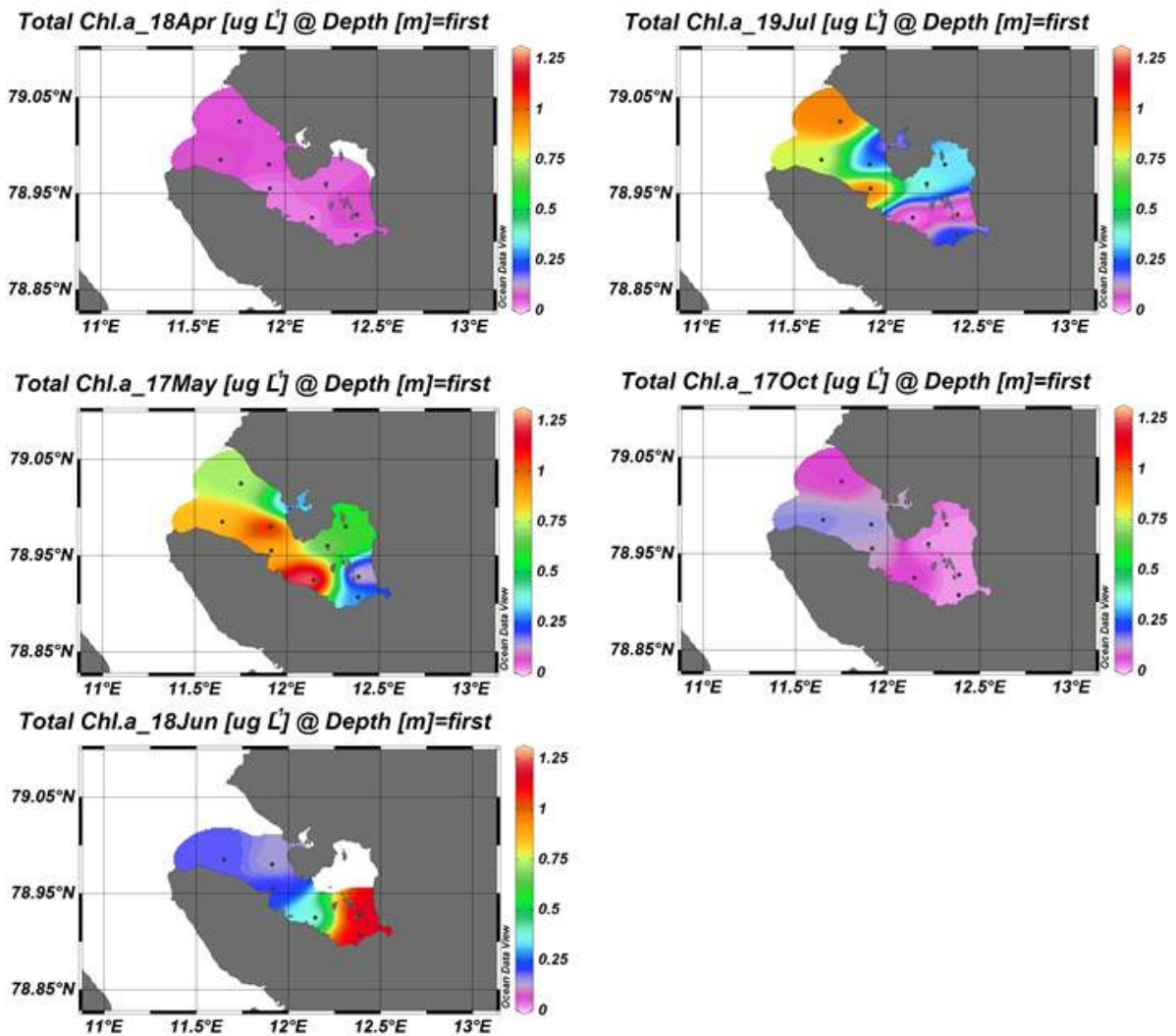


그림 84. Kongsfjorden 해역의 계절별 생물량(chlorophyll a) 변화

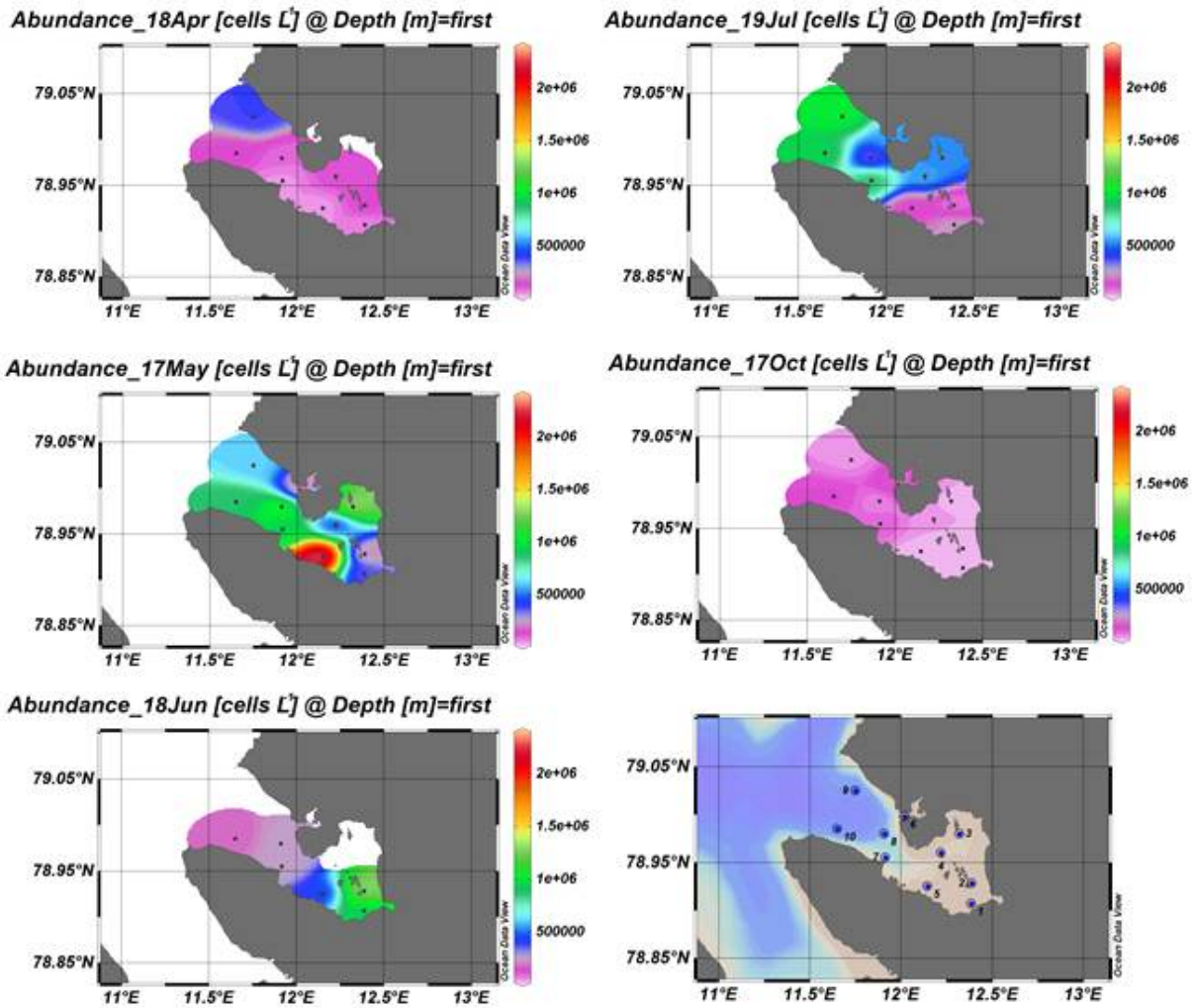


그림 85. Kongsfjorden 해역의 계절별 식물플랑크톤 현존량의 변화

표 10. Kongsfjorden 해역의 계절별 주요우점종 목록

Month	Pre-dominant species	
	Phytoplankton (Oceanic)	Ice Algae
Apr.	<i>Fragilariopsis oceanica</i> <i>Navicula vanhoëffëni</i>	<i>Fragilariopsis oceanica</i>
May	<i>Fragilariopsis cylindrus</i>	<i>Fragilariopsis</i> sp.
Jun.	<i>Licmophora</i> sp. <i>Coconeis</i> sp.	<i>Nitzschia frigida</i>
Jul.	<i>Cryptomonas</i> sp. <i>Pyramimonas</i> sp.	<i>Nitzschia frigida</i>
Oct.	<i>Fragilariopsis oceanica</i>	<i>Fragilariopsis</i> sp.

나. 시기별 동물플랑크톤 군집 구조 및 우점종 변화 파악

동물플랑크톤의 평균 서식밀도는 2,420.6 indiv./m³로 조사지역의 안에 위치한 정점 1에서 5,115.2 indiv./m³로 가장 높았고 정점 6에서 876.8 indiv./m³로 가장 낮았다(그림 86). 동물플랑크톤의 생물량(유기물 중량)은 정점에 따라 다소 차이가 있지만 서식밀도 분석 결과와 유사한 값을 보였는데 평균 111.49 mgC/m³로 정점 1에서 336.51 mgC/m³로 가장 높았고, 정점 6에서 19.92 mgC/m³로 가장 낮았다(그림 87).

조사지역 내 출현한 동물플랑크톤의 종조성은 정점에 따라 다소 차이가 있지만 모든 정점에서 요각류가 우점하였다. 주요 우점종으로는 *Calanus finmarchicus*, *Calanus glacialis*와 *Calanus copepodite* 유생을 포함한 *Calanus* spp.가 최우점종, 그리고 *Oithona similis*, *Pseudocalanus* spp., *Microcalanus* spp.가 우점한 것으로 분석되었다. 특이한 점으로 정점 4에서 저서성 요각류 (Unidentified *Harpacticoida*)가 우점하였는데 이는 해당 정점의 수심이 조사 정점 중 가장 낮고(20m), 조사당시의 조류가 강해 퇴적층이 부유하여 많은 개체수의 저서성 요각류가 채집된 것으로 판단된다.

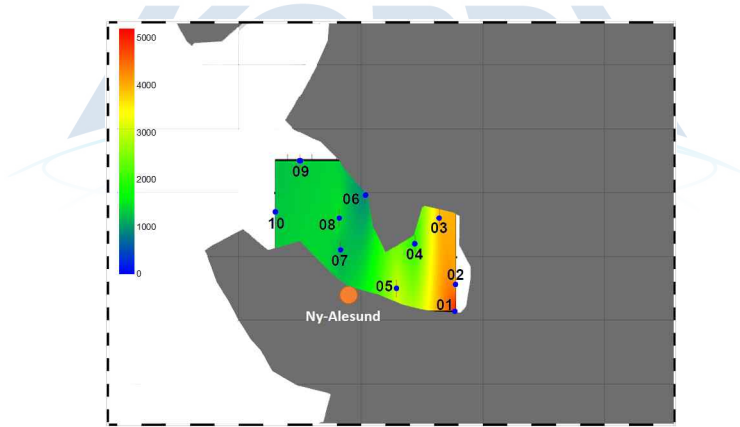


그림 86. 2019년 7월 조사지역의 동물플랑크톤 서식밀도 (indiv./m³)

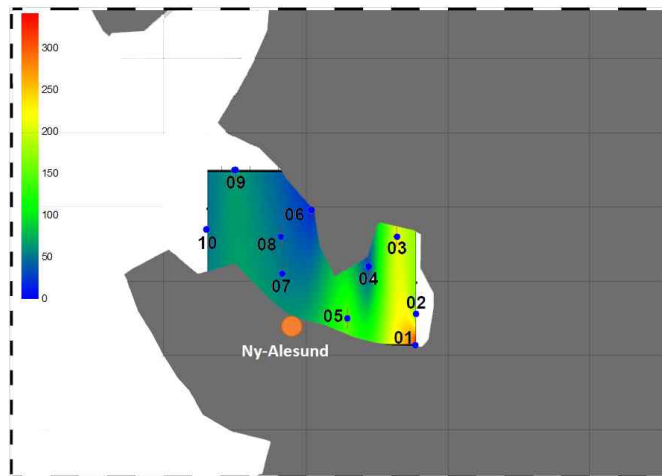


그림 87. 2019년 7월 조사지역의 동물플랑크톤 생물량 (mgC/m³)

계절에 따른 조사지역 내 동물플랑크톤의 장기간 변동양상을 확인하기 위해 과거 진행되었던 연구결과를 비교하였다. 그 결과, 조사지역의 동물플랑크톤 서식밀도와 생물량은 조사시기에 따라 크게 변화하는 것으로 확인되었으며 조사지역의 내만에 위치한 정점에서 상대적으로 서식밀도와 생물량이 높은 것으로 분석되었다(그림 88, 89).

이러한 결과를 각 조사시기별 서식밀도와 생물량의 평균값을 계절의 순서에 따라 나열하면 서식밀도의 경우 6월에 큰 폭으로 증가하여 7월과 10월로 가면서 점차 감소하였고, 생물량은 7월을 기준으로 감소하는 것으로 확인된다(그림 90, 91). 이러한 경향은 봄철에 조사지역의 식물플랑크톤 대발생이 진행된 이후 동물플랑크톤의 서식밀도와 생물량이 큰 폭으로 증가하고 다시 점차 감소하는 것으로 판단되는데 일반적으로 극지방에 서식하는 동물플랑크톤의 경우 제한된 환경요인으로 인해 식물플랑크톤의 대량증식에 크게 영향을 받는 것으로 알려져 있어 이를 뒷받침한다. 또한, 서식밀도가 6월에 가장 높은 것에 비하여 생물량은 7월에 가장 높은 것으로 확인되어 두 항목 간에 차이가 있는 것은 동물플랑크톤 군집을 구성하는 종들의 출현비율이 변화하였기 때문인 것으로 사료된다. 실제로 2018년 6월의 조사에서는 *Oithona similis*가 최우점 분류군이였지만 2019년 7월의 조사에선 *O. similis*보다 크기가 큰 *Calanus spp.*가 최우점하여 생물량이 높게 측정된 것을 확인할 수 있다.

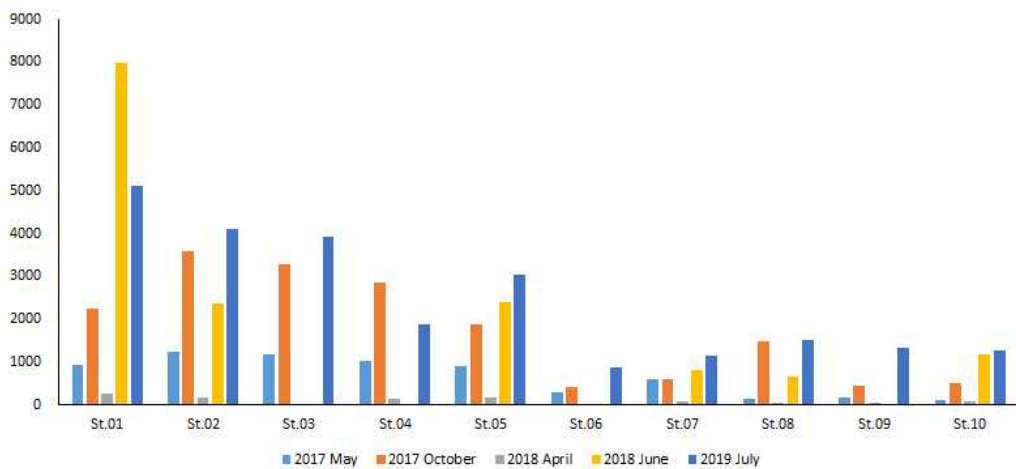


그림 88. 조사시기에 따른 정점별 동물플랑크톤 서식밀도 (indiv./m³)

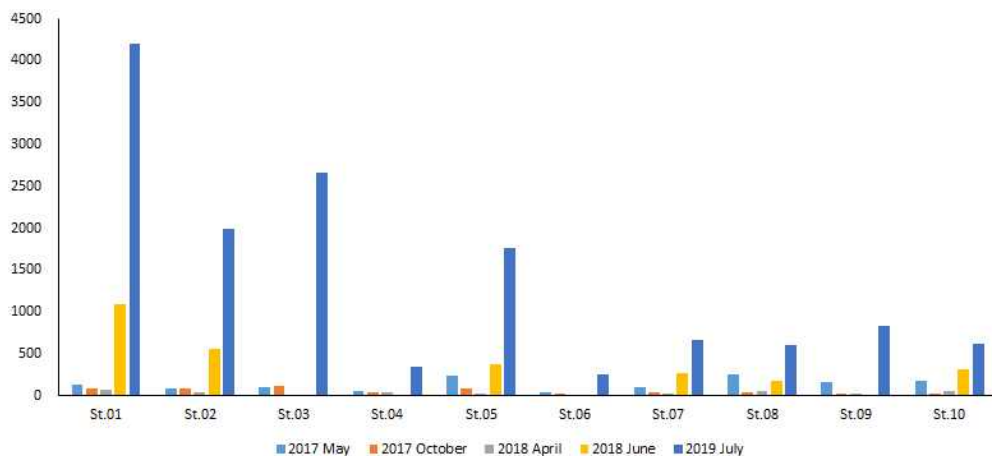


그림 89. 조사시기에 따른 정점별 동물플랑크톤 생물량 (mgC/m³)

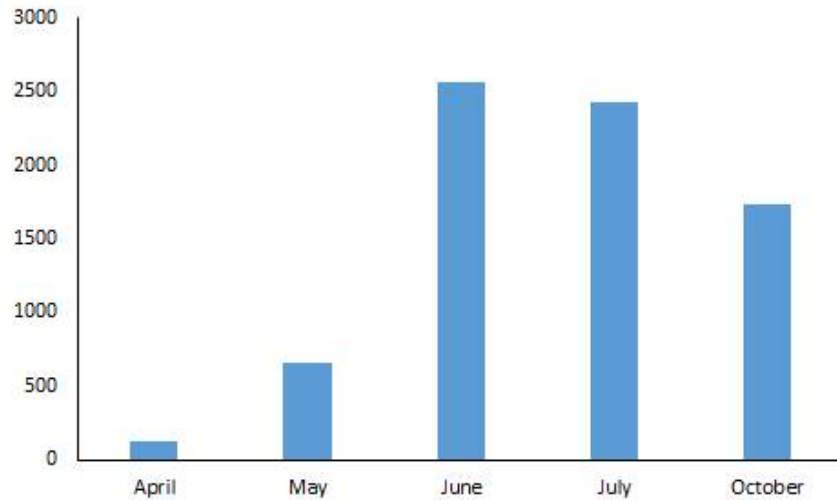


그림 90. 조사시기별 동물플랑크톤 평균 서식밀도 (indiv./m³)

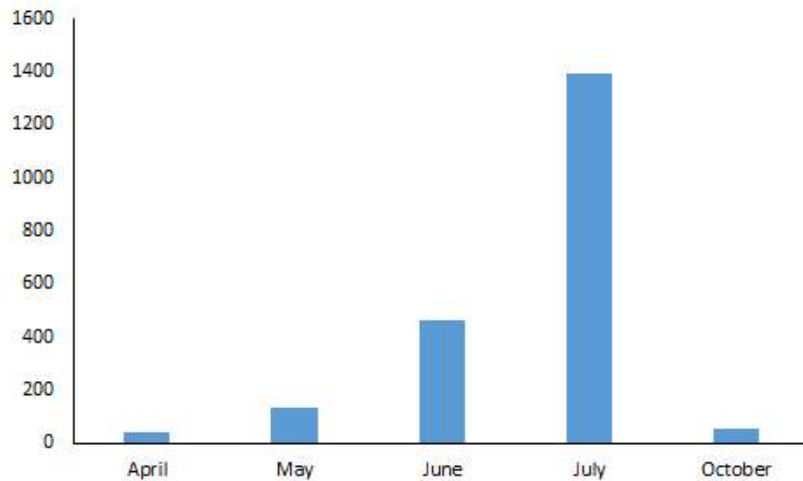


그림 91. 조사시기별 동물플랑크톤 평균 생물량 (mgC/m³)

4. 해빙생태계의 성장단계에 따른 동물플랑크톤 먹이원 및 영양단계 변화 파악

가. 시료 채집 및 아미노산 질소 안정동위원소비의 분석

Svalbard Kongsfjorden 내만에서 Bongo net(200 μ m mesh size, 50cm diameter, 2.5m length)을 이용하여 채집된 동물플랑크톤 시료를 현미경(LEICA DFC495)을 이용하여 대표종을 동정 및 분류하였다. 동정 및 분류 후 요각류(*Calanus* spp.), 화살벌레(*Parasagitta elegans*), 난바다 곤쟁이류(*Euphausia*)와 같은 대형 동물 플랑크톤을 확보하여 안정동위원소 분석을 실시하였다. 획득된 시료는 가수 분해 후 유도체화 과정을 거쳐 GC/IRMS (Agilent 6890N / Isoprime 100, GV instrument) 를 이용하여 분석을 실시하였으며, Chikaraishi et al (2009)에 의해 고안된 식을 통하여 영양단계 (Trophic Position: TP)를 계산하였다.

나. 동물플랑크톤의 영양단계 파악 및 미소 먹이망구조 내 역할 파악

(1) 아미노산 질소 안정동위원소를 이용한 동물 플랑크톤의 영양 단계 해석

표 11와 12에 각각 가을(2017년 10월)과 봄(2018년 4월)에 채집된 동물플랑크톤의 아미노산 질소 안정동위원소비 분석 결과 및 영양 단계를 나타내었다. 그림 92에는 각 동물플랑크톤들의 영양 단계의 평균값을 도시하였다. 분석결과 채집된 동물 플랑크톤들에서 초식성 동물플랑크톤은 발견되지 않았으며, 잡식~육식성의 영양 단계를 확인할 수 있었다.

기존에 Svalbard 및 인근 해역을 중심으로 bulk tissue의 안정동위원소를 이용하여 대형 동물플랑크톤 먹이망의 구조를 해석한 연구들이 보고된 바 있으며, 주로 계절에 따른 동물플랑크톤의 영양 단계의 분포를 해석하고자 하는 연구가 시도되었다(Soreide et al., 2008; Grigor et al., 2015). 최근에는 *Calanus glacialis*와 *Calanus finmarchicus*의 교잡종이 캐나다 인근 해역에서 출현한 것이 보고되어(Parent et al., 2012) 본 연구에서 채집된 *Calanus*속은 모두 *Calanus* spp.로 명명하여 자료를 해석하였으나, 실제로 Kongsfjorden에서 *Calanus*속은 계절에 따라 *C. glacialis*, *C. finmarchicus*, *C. hyperboreus*이 서로 다른 조성비를 가지며 유입된다(Hop et al., 2002., Kwasniewski et al., 2003). 이들은 수괴에 따라 대서양에서 *C. finmarchicus*가, 북극해에서 *C. glacialis*, *C. hyperboreus*가 유입되는 경향이 있다(Walkusz et al., 2009).

본 연구에서 분석된 *Calanus* spp.의 경우 가을보다 봄에 영양 단계가 높은 것이 확인되었으며, st.7에서 가장 큰 상승폭을 보임. *Calanus*속은 기존의 bulk tissue의 안정동위원소 분석 연구에서 초식성-잡식성 요각류로 보고된 바 있으나(Soreide et al., 2008; Grigor et al., 2015) 본 연구에서 분석된 *Calanus*속은 잡식성 혹은 육식성에 가까운 영양 단계를 나타냈다. 이는 bloom 이전에 식물성 먹이원이 제한적으로 존재했기 때문에 상대적으로 동물성 먹이원을 많이 섭식한 결과로 추측된다. *P. elegans*는 체장에 따른 영양 단계의 차이는 확인되지 않았으며, 두 조사 시기에서 모두 일정한 영양 단계 분포를 나타냄. 이들은 북극 해역 이외에도 대서양, 태평양 등의 여러 해역에 출현하는 종으로(Terazaki, 2004) 주로 *Calanus*속의 요각류를 섭식하는 것으로 보고되었으나(Grigor et al., 2015), 본 연구의 *Calanus* spp.로부터 산출된 영양 단계와 1단계 미만의 영양 단계 차이를 확인하였다. 이에 따라 본 연구에서 채집된 *P. elegans*는 *Calanus*속 이외의 다른 먹이원을 더 많이 활용했을 가능성이 있다.

*Euphausia*는 가을과 봄에 서로 다른 종이 발견되었으나, 이들의 영양 단계는 유사하게 나타났다. 또한, *T. abyssorum*은 모든 시료 중에서 가장 높은 영양 단계를 보였으며, 위 분석법 결과를 통해 해당 종이 *Calanus*속을 포식하는 육식성 동물플랑크톤임이 확인된 바 있다(Kraft et al., 2013). 이들 두 분류군은 공통적으로 육식성의 영양 단계를 보였으나, 두 조사 시기에서 모두 발견되지 않았기 때문에 조사 시기에 따른 영양 단계의 비교는 불가능하였다. 이들의 유사 종이 가진 영양 단계가 Wold et al (2011)에서 잡식성으로 보고되었으나, 해당 연구에서 사용된 동물플랑크톤은 여름철에 채집된 개체들이었기 때문에 직접적인 비교가 불가능해 보인다. 각 동물플랑크톤의 $\delta^{15}\text{N}_{\text{Phe}}$ 는 정점에 따라 유의한 차이를 보이지 않았으며, 각 분류군에 따른 차이 또한 발견되지 않았다.

표 11. 가을(2017년 10월)에 채집된 동물 플랑크톤의 아미노산 질소 안정동위원소비 및 영양 단계

Species	Class	Location	$\delta^{15}\text{N}_{\text{Glu}}$	$\delta^{15}\text{N}_{\text{Phe}}$	TP
<i>Calanus spp.</i>	<i>Copepoda</i>	st.1	20.63±0.52	4.12±0.77	2.72±0.08
		st.7	20.51±0.07	6.01±0.85	2.46±0.11
		st.10	19.67±0.31	3.79±0.68	2.64±0.12
<i>Parasagitta elegans</i> (>20mm)	<i>Chaetognaths</i>	st.1	22.39±0.73	3.07±0.25	3.09±0.10
		st.7	23.76±0.42	2.98±0.65	3.29±0.04
		st.10	23.55±0.46	4.62±0.65	3.04±0.10
<i>Parasagitta elegans</i> (<20mm)		st.1	22.82±0.55	4.31±0.45	2.99±0.04
		st.7	23.24±0.27	3.29±0.70	3.18±0.10
		st.10	24.51±0.37	5.04±0.48	3.12±0.11
<i>Meganycitiphanes norvegica</i>	<i>Euphausia</i>	st.3	23.40±0.73	3.34±0.62	3.19±0.12
<i>Themisto abyssorum</i>	<i>Amphipoda</i>	Harbor	26.70±0.29	3.98±0.40	3.54±0.08

표 12. 봄(2018년 4월)에 채집된 동물플랑크톤의 아미노산 질소 안정동위원소비 및 영양 단계

Species	Class	Location	$\delta^{15}\text{N}_{\text{Glu}}$	$\delta^{15}\text{N}_{\text{Phe}}$	TP
<i>Calanus spp.</i>	<i>Copepoda</i>	st.1	21.58±0.23	3.38±0.40	2.95±0.06
		st.7	20.93±0.32	3.74±0.37	2.81±0.09
		st.10	19.07±0.12	2.94±0.35	2.67±0.04
<i>Parasagitta elegans</i> (>20mm)	<i>Chaetognaths</i>	st.1	23.60±0.51	3.47±0.25	3.18±0.11
		st.7	24.02±0.40	5.90±0.53	2.94±0.12
		st.10	25.11±0.58	5.98±0.45	3.07±0.03
<i>Parasagitta elegans</i> (<20mm)		st.1	23.96±0.65	3.27±0.30	3.27±0.08
		st.7	23.30±0.86	3.39±0.60	3.17±0.13
		st.10	24.42±0.73	5.29±0.56	3.07±0.05
<i>Thysanoessa sp.</i>	<i>Euphausia</i>	st.4	25.08±0.57	3.77±0.71	3.36±0.14
		st.7	23.66±0.59	5.25±0.32	3.02±0.05
		st.10	25.18±0.15	4.13±0.39	3.32±0.07

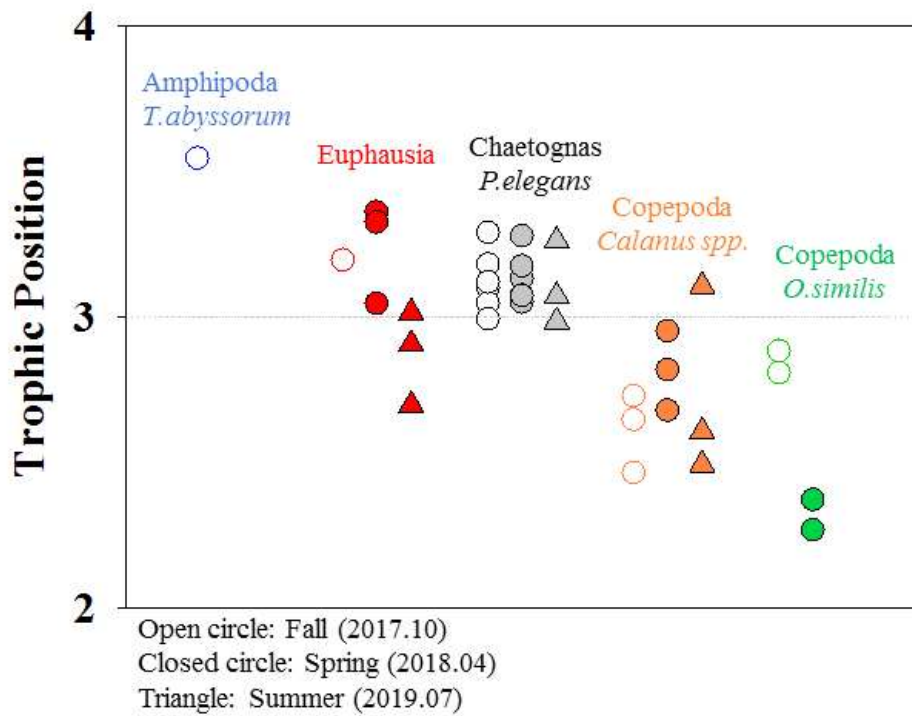


그림 92. 2017년 10월(1차년도), 2018년 04월(2차년도), 2019년 07월(3차년도)에 채집된 동물플랑크톤의 영양 단계

표 13. 동물 플랑크톤의 아미노산 질소 안정동위원소비 및 영양 단계

Species	Class	Location	$\delta^{15}\text{N}_{\text{Glu}}$	$\delta^{15}\text{N}_{\text{Phe}}$	TP
<i>Calanus</i> spp.	<i>Copepoda</i>	st.1	22.62	7.89	2.49
		st.7	22.86	7.27	2.60
		st.10	23.22	3.82	3.11
<i>Parasagitta elegans</i>	<i>Chaetognaths</i>	st.1	25.93	7.46	2.98
		st.7	25.32	4.74	3.26
		st.10	24.23	5.10	3.07
<i>Euphausia</i> sp.	<i>Euphausia</i>	st.1	21.35	2.65	3.01
		st.7	21.26	4.98	2.70
		st.10	18.67	0.79	2.91

(2) 동물 플랑크톤의 영양 단계의 계절 변동

본 연구에서 분석된 *Calanus* spp.는 3개 정점에서의 평균 영양 단계가 2.73 ± 0.33 으로 해당 시기에서 분석된 동물플랑크톤 중 영양 단계의 표준 편차가 가장 크게 나타났다. *Calanus* spp.의 영양 단계는 바깥 정점으로 갈수록 증가하는 양상을 보여, 가장 바깥 정점인 St.10에서는 3 이상의 영양 단계를 보였다. 이 때 St.10에서 *Calanus* spp.에서 분석된 $\delta^{15}\text{N}_{\text{Phe}}$ 값은 St.1과

St.7에 비해 낮았으며, *Calanus* spp.가 이용할 수 있는 먹이원이 공간적으로 차이가 존재할 수 있음을 시사하였다.

*P. elegans*는 3개 정점에서의 평균 영양 단계가 3.10 ± 0.14 로 *Calanus* spp.에 비해 비교적 낮은 표준 편차를 보임. *Euphausia*는 3개 정점에서의 평균 영양 단계가 2.87 ± 0.16 으로 잡식~육식 사이의 영양 단계로 확인되었다. 각 동물플랑크톤의 $\delta^{15}\text{N}_{\text{Phe}}$ 는 정점에 따라 유의한 차이를 보이지 않았으며, 각 분류군에 따른 차이 또한 발견되지 않았다.

그림 92는 모든 조사 시기에서 분석된 동물플랑크톤의 영양단계를 보여준다. 단각류(*Amphipoda*)의 경우 2017년 10월에만 채집되었고, 난바다곤쟁이류(*Euphausia*)는 매 조사 시기마다 다른 종이 출현하였기 때문에 시기에 따른 영양 단계를 비교할 수 없다.

화살벌레(*P. elegans*)의 영양 단계는 2017-2018년과 2019년 사이에서 유의미한 차이가 보이지 않았다(t-test, 2017년과의 비교에서 $p=0.88$, 2018년과의 비교에서 $p=0.77$, 유의수준 0.05). *P. elegans*는 주로 요각류를 섭식하는 것으로 알려진 육식 동물플랑크톤으로(Samemoto, 1987, Terazaki, 2004), 본 연구에서 분석된 영양 단계가 정확하게 계산되고 있음을 시사한다. 또한 이들은 over-wintering 중에 먹이 활동이 감소하지만 요각류를 꾸준히 섭식하는 것으로 보고되었다(e.g. Grigor et al., 2014). 2017년 10월과 2018년 4월 사이에 영양 단계의 변화는 확인되지 않았으며, 또한, 동물플랑크톤의 abundance가 높고 유생 등의 종 다양성이 증가하는 여름철에도 영양 단계가 변하지 않은 것을 고려하면, *P. elegans*의 먹이 선택성이 높은 것으로 추측된다.

Calanus spp.는 *P. elegans*에 비해 영양 단계의 분포 범위가 넓었으나, 2017-2018년과 2019년 사이에서 유의미한 차이가 발견되지 않았다(t-test, 2017년과의 비교에서 $p=0.57$, 2018년과의 비교에서 $p=0.58$, 유의수준 0.05). 현장의 이용 가능한 크기의 먹이원 혹은 입자의 조성에 따라 영양 단계가 달라지는 것으로 사료된다. *Calanus* spp.는 over-wintering 동안 체내에 저장된 wax ester를 소모하며 생존하는 것으로 알려져 있으며 먹이 활동은 하지 않는 것으로 보고되는 것과 일치 한다(Falk-Petersen et al., 2007, Scott et al., 2000).

2017년 10월과 2018년 04월의 *O. similis*의 영양 단계 평균은 2017년 10월에서 2.85 ± 0.04 , 2018년 04월에 2.29 ± 0.07 로, 두 시기에서의 *O. similis*의 영양 단계는 유의한 차이가 있는 것으로 보인다(t-test, $p < 0.05$, 유의수준 0.05). *O. similis*는 2017년 10월에는 육식성에 가까운 영양 단계를 가지며, 2018년 04월에는 잡식성에 해당하는 영양 단계를 가지는 것으로 확인되는데, 두 시기에서의 먹이원 구성이 상이한 것으로 생각됨. *O. similis*의 주된 먹이원은 ciliate 혹은 heterotrophic dinoflagellate, 그리고 diatom으로 알려져있다(Atkinson, 1996, Atienza et al., 2006, Pond and Ward, 2011, Zamora-Terol et al., 2013). 이들은 다른 동물플랑크톤과는 달리 정해진 산란기가 없고, 해가 뜨지 않는 겨울철에도 번식 활동을 계속 수행한다(Berge et al., 2015). 따라서 연중 이용 가능한 먹이원을 꾸준히 섭식해야 하므로, 일조량 변화에 따른 algal diet 기여도 변화가 영양 단계에 반영이 되는 것으로 추측된다.

5. 유기물 조성 파악을 통한 유기물 순환 이해

가. Kongsfjorden 해역 식물플랑크톤 생물량, 색소분석 및 자외선흡수물질 파악

(1) 식물플랑크톤 생물량, 색소의 공간 분포 특성

Kongsfjorden 해역에서 식물플랑크톤 생물량, 색소분석 및 자외선흡수물질 분석은 총 10개 정점에서 수행되었다(그림 93). 식물플랑크톤은 광합성을 실시하기 위해 다양한 색소를 포함하고 있고, 이들 색소의 조성은 식물플랑크톤 분류군에 따라 다르게 나타나지만 이들 색소의 조성을 통해 식물플랑크톤 분류군을 알 수 있다. 또한 Chlorophyll a (Chl-a)는 모든 광합성 식물에 광합성 주색소로 포함되고 있어 식물플랑크톤 생물량을 나타내는 항목으로 사용된다.

Kongsfjorden 해역에서 식물플랑크톤 생물량(Chl-a)은 0.03-1.21 $\mu\text{g/L}$ 의 범위를 보이며 평균 $0.33 \pm 0.26 \mu\text{g/L}$ 으로 나타났다. Fucoxanthin과 Chl-b가 측정됨에 따라 각각 규조류, 녹조류를 나타내는 지표색소임을 고려할 때 Kongsfjorden 해역에서 두 분류군이 우점 하는 것으로 사료된다. 식물플랑크톤 색소 분석 결과 Fucoxanthin과 Chlorophyll b (Chl-b)는 0-0.20 $\mu\text{g/L}$, 0-0.06 $\mu\text{g/L}$ 의 범위를 보이며 평균 $0.05 \pm 0.04 \mu\text{g/L}$, $0.02 \pm 0.02 \mu\text{g/L}$ 으로 나타났다. Chl-a와 Fucoxanthin이 높은 상관관계($r^2=0.8$)를 보임에 따라 식물플랑크톤의 분류군중 규조류가 우점하고 있다고 사료된다.

정점 4의 10m에서 가장 높은 식물플랑크톤 생물량($1.21 \mu\text{g/L}$)을 보이며 식물플랑크톤 색소 조성 결과 Fucoxanthin 역시 같은 정점에서 높은 농도($0.02 \mu\text{g/L}$)를 나타냈다. 색소분석을 통해 식물플랑크톤의 대략적인 군집구조를 알 수 있고 이런 결과는 향후 Kongsfjorden 해역의 생태 모니터링에 대한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

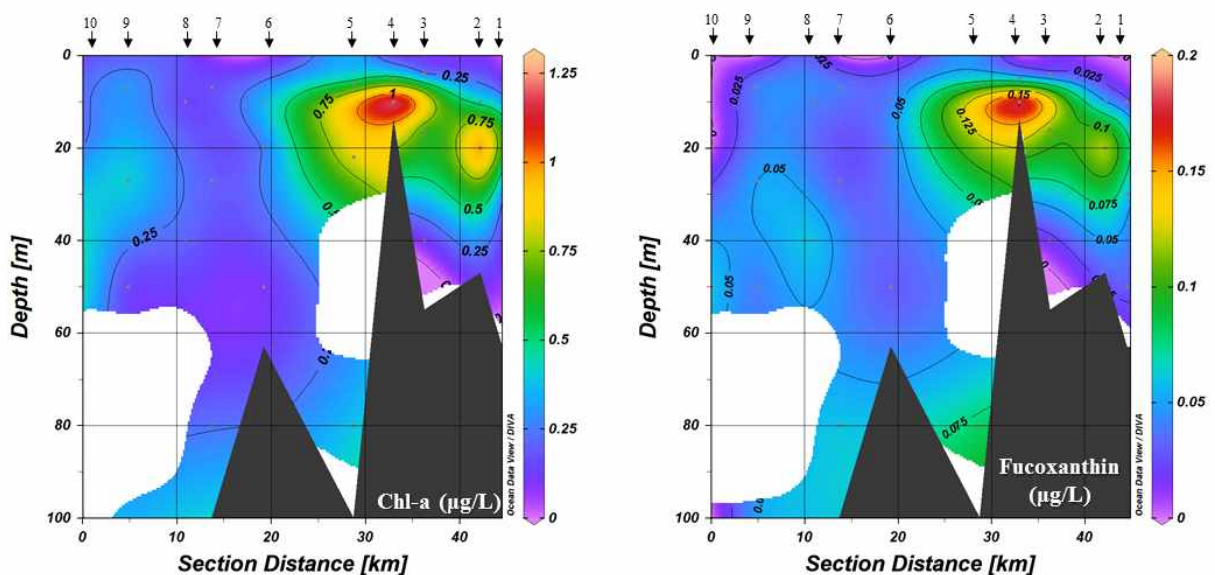


그림 93. Kongsfjorden 해역 내 식물플랑크톤 생체량 및 색소분석 결과

(2) 식물플랑크톤 자외선 흡수물질의 공간 분포 특성

Kongsfjorden 해역에서 식물플랑크톤 총 자외선흡수물질의 농도는 0-10.30 $\mu\text{g/L}$ 의 범위를 보이며 평균 $2.57 \pm 2.35 \mu\text{g/L}$ 으로 나타났다(그림 94, 95). 식물플랑크톤 생물량당 총 자외선 흡수물질의 농도는 0-143.7 $\mu\text{g}/\mu\text{g Chla}$ 의 범위를 보이며 평균 $13.6 \pm 23.1 \mu\text{g}/\mu\text{g Chla}$ 으로 나타났다. 정점 6의 10m에서 가장 높은 농도(10.30 $\mu\text{g/L}$)을 보인 반면 생물량당 총 자외선 흡수물질의 농도는 정점 6의 0 m에서 가장 높은 값을 보였다(143.7 $\mu\text{g}/\mu\text{g Chla}$). Kongsfjorden 해역에서 식물플랑크톤 총 자외선흡수물질을 0에서 100 m 수심까지 integrated 농도는 70.5-227.6 mg m^{-2} 의 범위를 보이며 평균 $135.7 \pm 49.1 \text{mg m}^{-2}$ 으로 나타났다.

북극해에 속하는 Svalbard지역 내에서 중요 일차 생산자인 해빙 미세조류의 생태학적, 생리학적 연구는 앞으로의 북극 기후변동에 따라 해양 foodweb에 미치는 영양학적인 평가를 위한 새로운 시도으로써, 앞으로의 활용 방안은 다양하다. 환경변화에 따른 극지방의 식물성플랑크톤의 physiological stress에 대한 환경 변화 지시자 개발 가능할 것으로 판단된다.

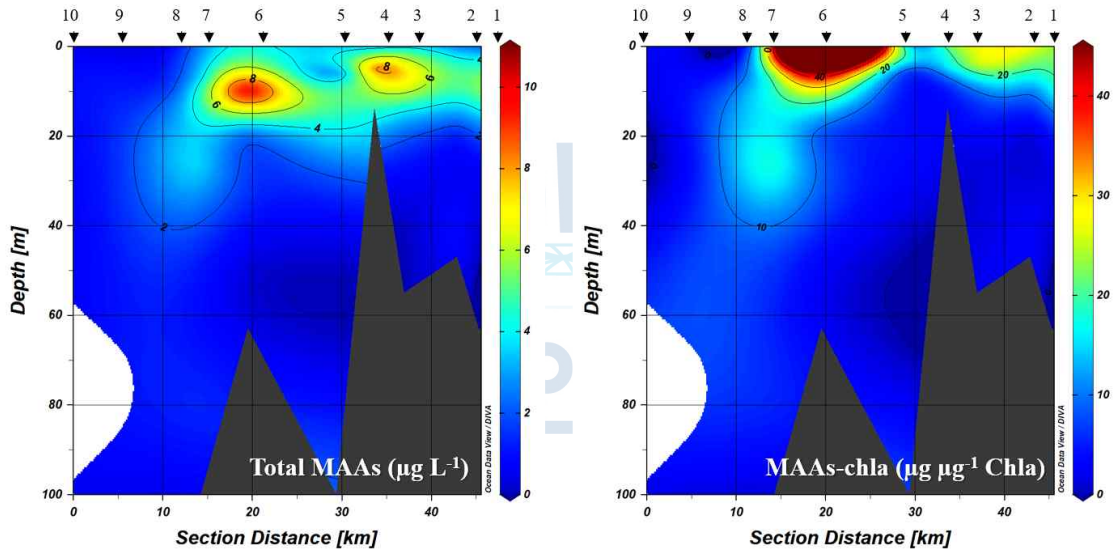


그림 94. 총 자외선흡수물질 농도와 식물플랑크톤 생물량당 자외선 흡수물질 농도.

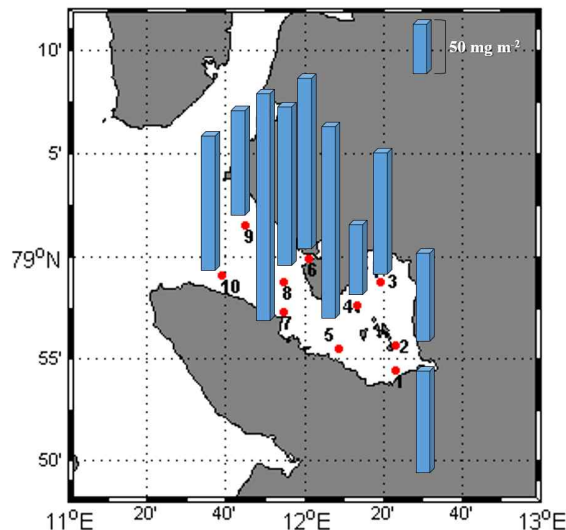


그림 95 Integrated 총 자외선물질 농도.

(3) 투과 광량에 따른 해빙 미세조류의 광보호 물질의 분포 변화

자외선 흡수물질은 최대흡광도 310-360 nm 사이에서 측정되는 mycosporine-like amino acids(MAAs)로 극한의 환경에서 생존을 위한 전략으로 다양한 생물들에서 사용되고 있다. 2017년 5월부터 2019년 7월까지 Kongsfjorden 해역 내 총 10개의 정점(1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10)(그림 2, 3, 4, 5)에서 자외선흡수물질 측정을 위한 시료 채집하였다. 3년 동안 획득한 시료를 통해 Kongsfjorden 해역의 자외선흡수물질에 대한 시공간적 자료를 확보 할 수 있었다.

2017년 5월에 가장 높은 흡광도 값을 보였고 2018년 10월에 가장 낮은 값을 보였다. 특히, 2017년 5월은 다른 샘플링 시기에 비교하여 흡광도 값의 범위가 상대적으로 넓게 나타남에 따라 정점간의 차이가 큼을 알 수 있었다. 보다 정확한 연구 수행을 위해서는 계절적인 시기에 따른 빛 세기 및 식물플랑크톤의 생물량, 종간 차이에 대한 고려가 필요할 것으로 판단된다.

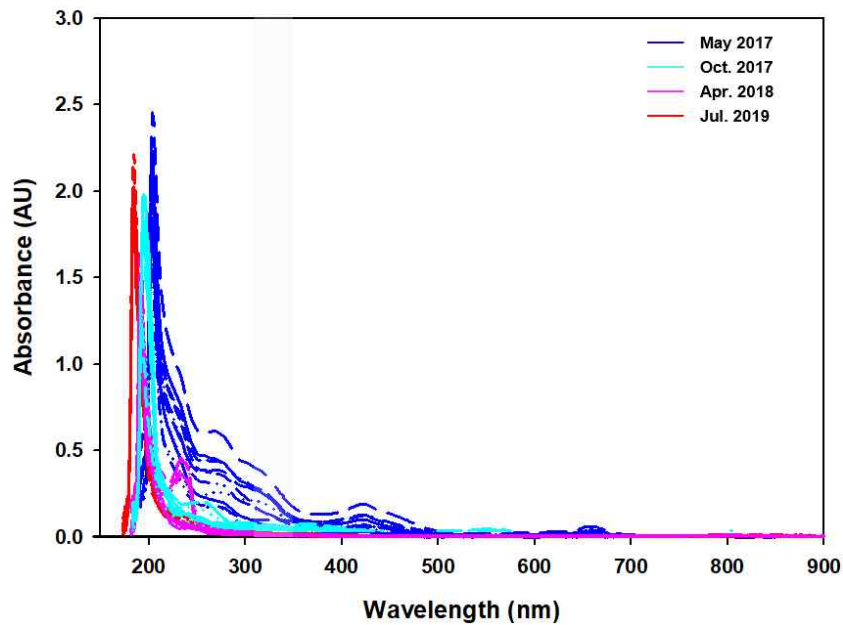


그림 96. 자외선 흡수물질의 관측 시기별 스펙트럼 분포

나. Kongsfjorden 해역 수층 부유입자에서 장족형 탄화수소(n-alkane)의 분포 특성

2018년 4월(NICE18A) Kongsfjorden 해역의 총 8정점에서 수심별로 채집된 부유성 입자로부터 추출된 지질을 비극성 및 극성 지질로 분리하였다. 비극성 시료는 gas chromatography-mass spectrometer(GC-MS)를 이용하여 C₁₇-C₃₇ 장족형 탄화수소와 스테롤(cholesterol, cholestanol, coprostanol, brassicasterol, campesterol, stigmasterol, and β -sitosterol)의 정성 및 정량 분석을 실시하였다. 장족형 탄화수소는 표층과 저층의 시료에서 뚜렷한 차이를 보였다. 특히, 표층에서 짧은 사슬(C₁₇-C₂₃)의 탄화수소가 상대적으로 높은 비(relative abundance)를 나타냈으며, 표층 시료를 제외한 저층의 시료에서는 긴 사슬의 탄화수소(C₂₉-C₃₇)가 높은 상대 비를 나타냈다(그림 97). 장족형 탄화수소의 화합물별 상대비를 통해 계산된 indices (Carbon preference index (CPI), average chain length (ACL), natural n-alkane ratio (NAR) and proxy ratio (Paq)) 또한 표층과 저층의 뚜렷한 차이를 나타냈다(그림 98).

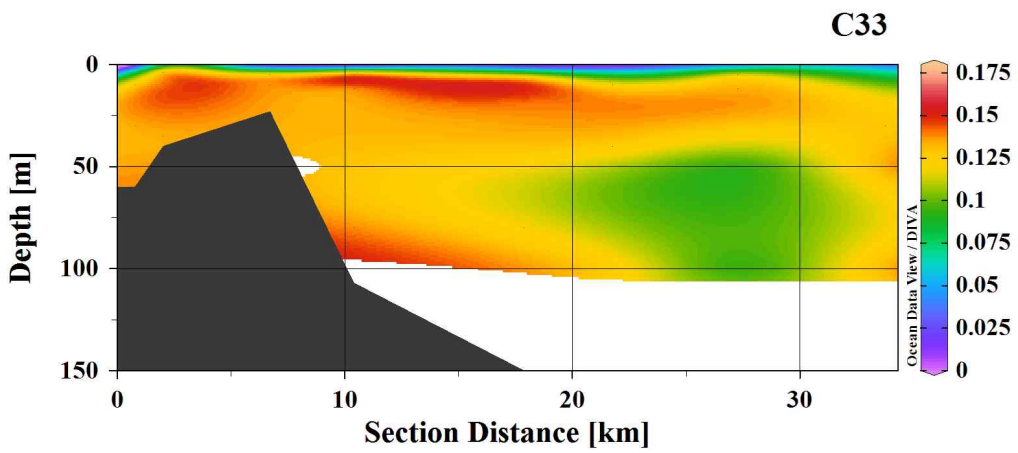
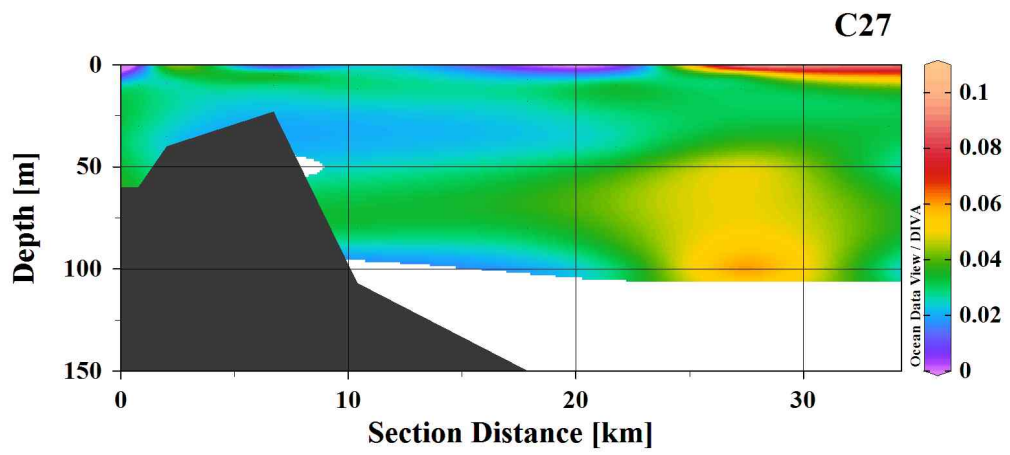
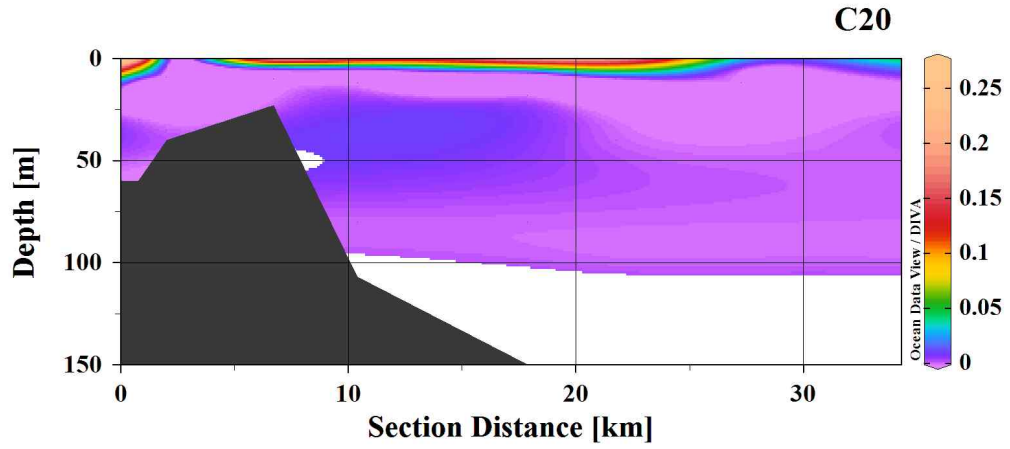


그림 97. Kongsfjoden 수층 입자에서 수심별 장족형 탄화수소(C₂₀, C₂₇, C₃₃)의 상대비 분포

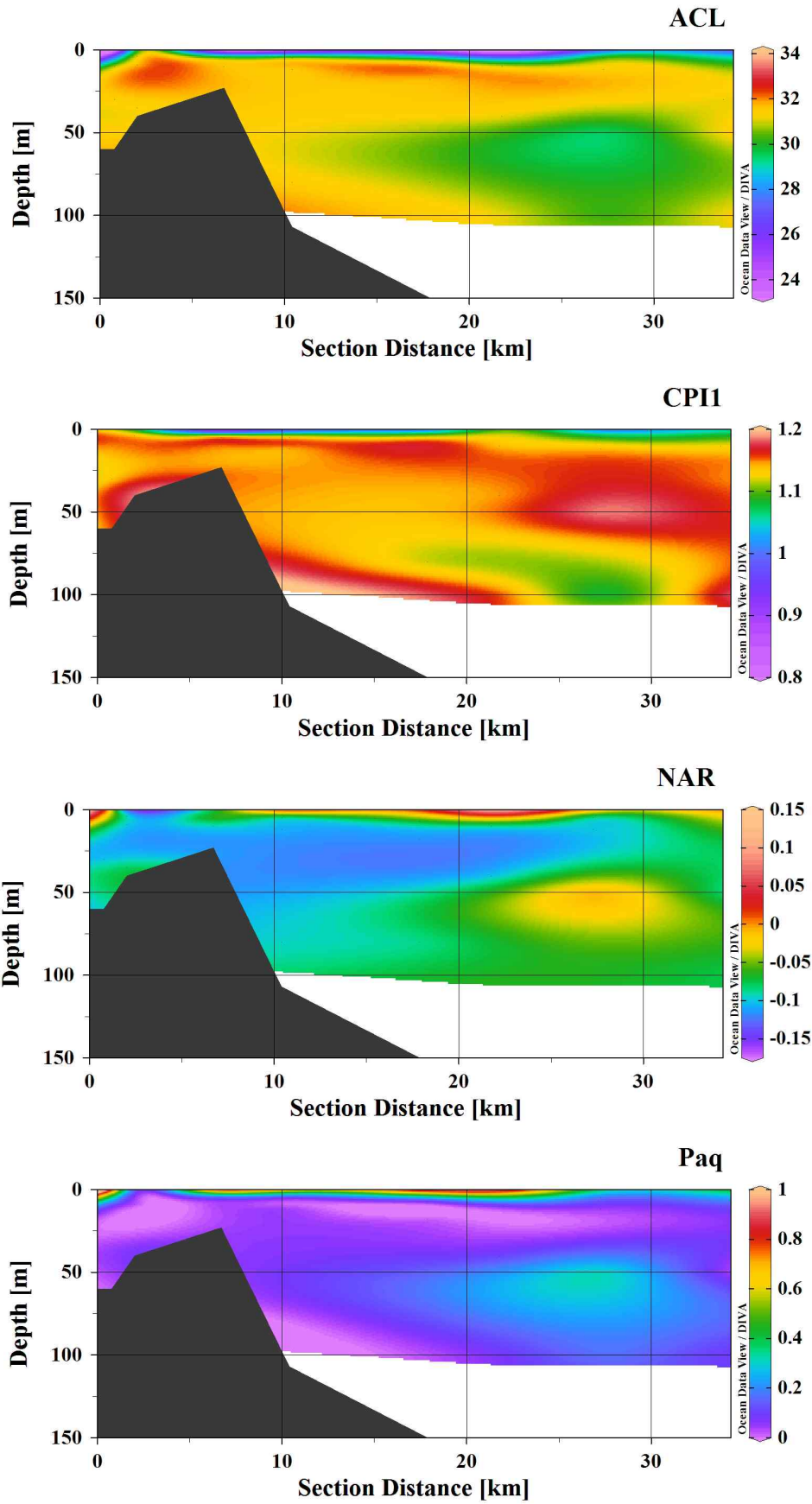


그림 98. Kongsfjoden 수층의 장족형 탄화수소를 통해 계산된 average chain length (ACL), Carbon preference index (CPI), natural n-alkane ratio (NAR) and proxy ratio (Paq)

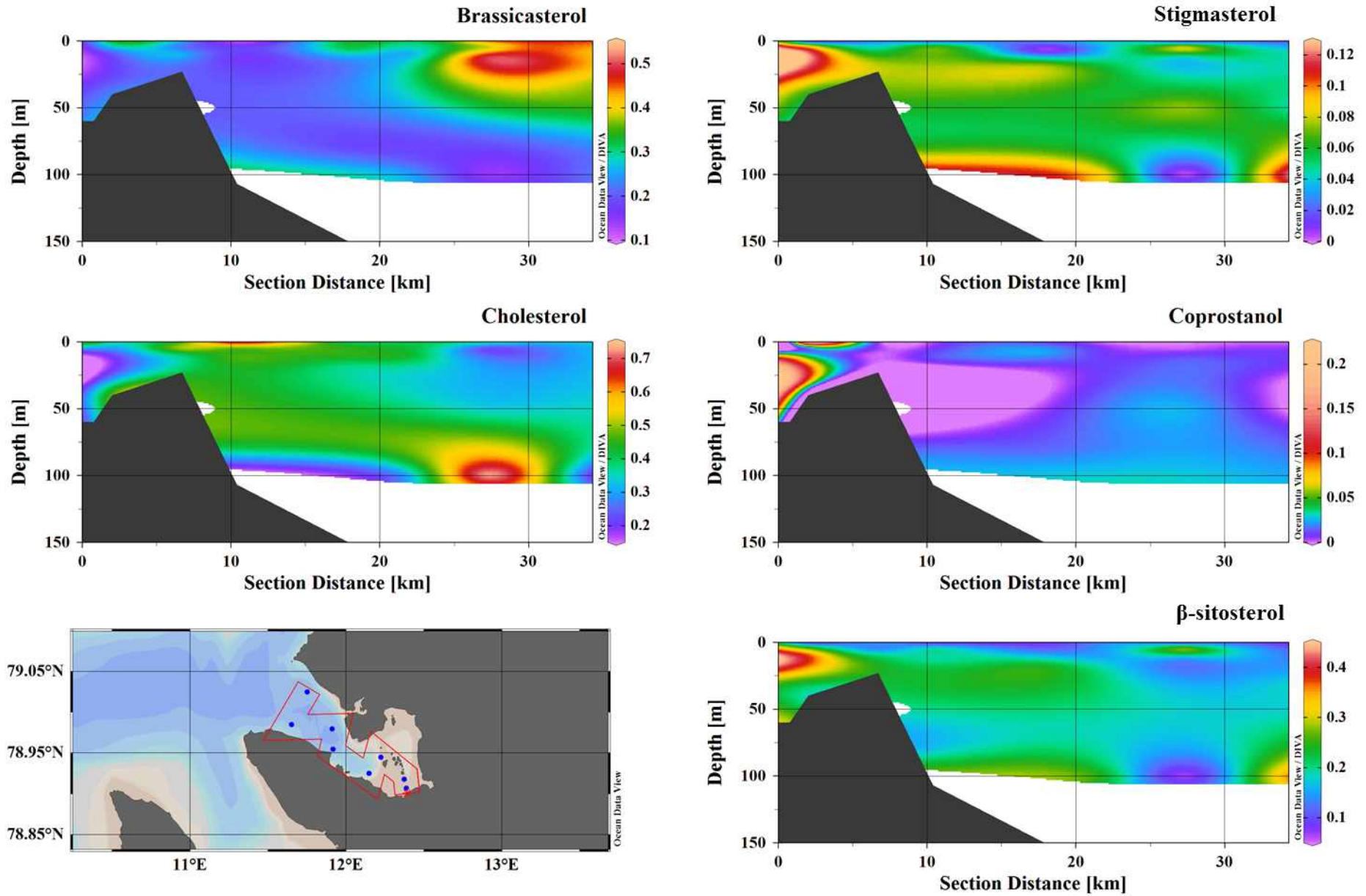


그림 99. Kongsfjoden 수층 입자에서 sterols 농도의 상대비

다. Kongsfjorden 해역 수층 부유입자에서 스테롤의 분포 특성

(1) Kongsfjorden 해역 수층 부유입자에서 스테롤의 분포 특성

스테롤의 경우 정점별 검출 되는 화합물의 분포가 다르게 나타났다. 식물플랑크톤에 의해 생성되는 brassicasterol은 특히 정점 9와 정점 10의 표층에서 높은 농도와 상대비를 나타냈으며, Cholesterol의 경우 동일 정점의 저층 약 100m 지점에서 높은 상대비를 보였다(그림 99). 육상 기원 유기물의 지시자로 사용되는 stigmatosterol은 Kongsfjorden 내 측 정점의 표층에서 높게 나타났으며, 반면 외측 정점에서는 수심이 깊어질수록 상대적으로 높은 농도를 보이는 특징을 나타냈다. 스테롤의 농도 및 상대비의 분포는 정점 및 수심별 유기물의 기원의 변화를 반영하는 것으로 사료된다.

(2) Kongsfjorden 해역 수층 부유입자에서 유기화합물의 분포 및 환경인자의 주성분 분석

분석된 장족형 탄화 수소 및 스테롤 그리고 CTD를 이용하여 획득한 수온 및 염분 등의 자료를 이용하여 주성분 분석을 실시하였다(그림 100(좌)). 짧은 사슬의 탄화수소(C₁₇-C₂₅)은 cholesterol, cholestanol 그리고 campesterol은 PC1 에서 낮은 값을 보였다. 중간 사슬의 탄화수소 (C₂₆-C₂₈)은 brassicasterol과 유사한 PC 값을 나타냈다. 반면 긴 사슬의 탄화 수소 (>C₂₉)는 stigmasterol, coprostanol 그리고 sitosterol 과 유사한 값을 보였다..

Hierarchical clustering of principal components (HCPC)를 통해 3개의 cluster로 구분되며, cluster 1은 정점 1에서부터 정점8의 표층 시료가 모두 속해있었다. n-alkane의 경우 cluster 1에서 상대적으로 짧은 사슬의 탄화수소가 주로 검출되었으며 cholesterol이 상대적으로 높은 농도로 검출되었다(그림 100(우)). Cluster 2에는 정점 9, 10의 표층 시료로 중간 사슬의 탄화수소와 상대적으로 높은 brassicasterol 농도를 보임. Cluster 3는 아표층의 모든 시료가 포함되며 긴사슬의 탄화수소와 stigmasterol과 β-sitosterol이 다른 cluster에 비해 상대적으로 높은 농도를 보였다(그림 103).

(3) Kongsfjorden 해역의 유기화합물의 기원 및 거동

Kongsfjorden 해역의 각 정점에서 분석된 화합물의 농도 및 상대비, 그리고 indices는 공통적으로 연구 해역의 표층과 저층의 차이, Kongsfjorden 내측과 외측 정점 간의 뚜렷한 차이를 보임. 이러한 차이는 PCA 및 HCPC 분석 결과에서도 동일하게 관측되었다. 유기화합물의 분석 결과를 종합해 보면 짧은 사슬의 장족형 탄화수소는 내측에서 외측 정점으로 이동하는 것으로 해석된다. 이때 빙하가 용해로 인해 표층의 낮은 염분으로 인한 성층화로 인해 표층에 머무는 것으로 볼수 있다. 흥미로운 점은 육상기원의 스테롤들과 긴사슬의 장족형 탄화수소들은 Kongsfjorden 내측에서부터 외측 정점으로 이동하는 경향이 뚜렷하게 관측된다는 것이다. 이는 Kongsfjorden 주변 육상으로부터 기원한 유기물이 유입되거나 혹은 저층 퇴적물의 부유입자에 의한 영향으로 해석될 수 있다. 수온과 염분의 분포를 살펴보면 외측 정점으로 부터 내측 정점 방향으로 대서양 기원의 해수가 저층을 통해 유입되는 것으로 보이는데 특이하게도 이들 수괴에서도 동일하게 긴사슬의 탄화수소가 높은 비율을 보였다. 하지만 이들 수괴에서는 내측의 아표층의 정점들과는 다르게 brassicasterol과 cholesterol 이 상대적으로 높은 농도로 검출되었다.

결론적으로 현장 관측시기의 Kongsfjorden 해역은 내측으로 유입된 육상기원의 유기물은 연구 해역의 외측으로 이동하는 경향을 보이며, 대서양 기원으로 추정되는 해류는 저층으로 유입되며 내측에 비해 상대적으로 높은 생물량을 보이는 것으로 판단된다. 또한 빙하로부터 유입된 유기물은 표층을 따라 외측으로 이동하며 염분 구배에 의한 성층화로 인해 저층과의 순환은 단절된 특징을 보였다.

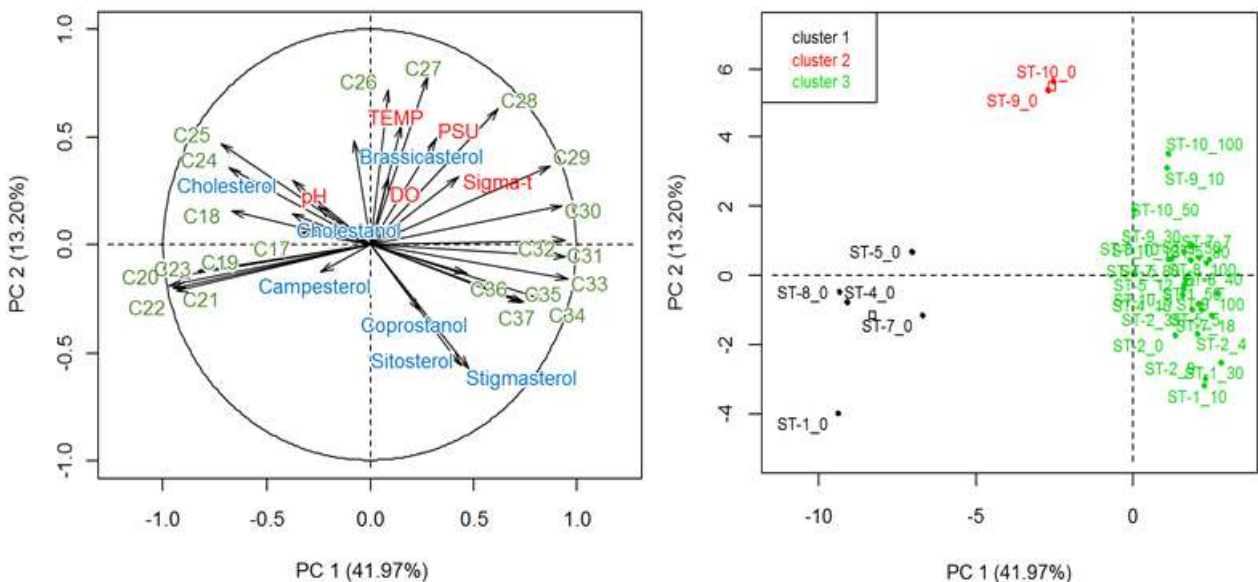


그림 100 수질자료 및 장족형 탄화수소, 스테롤 자료의 PCA 분석 결과(좌) 및 HCPC 분석을 통한 cluster 결과(우)

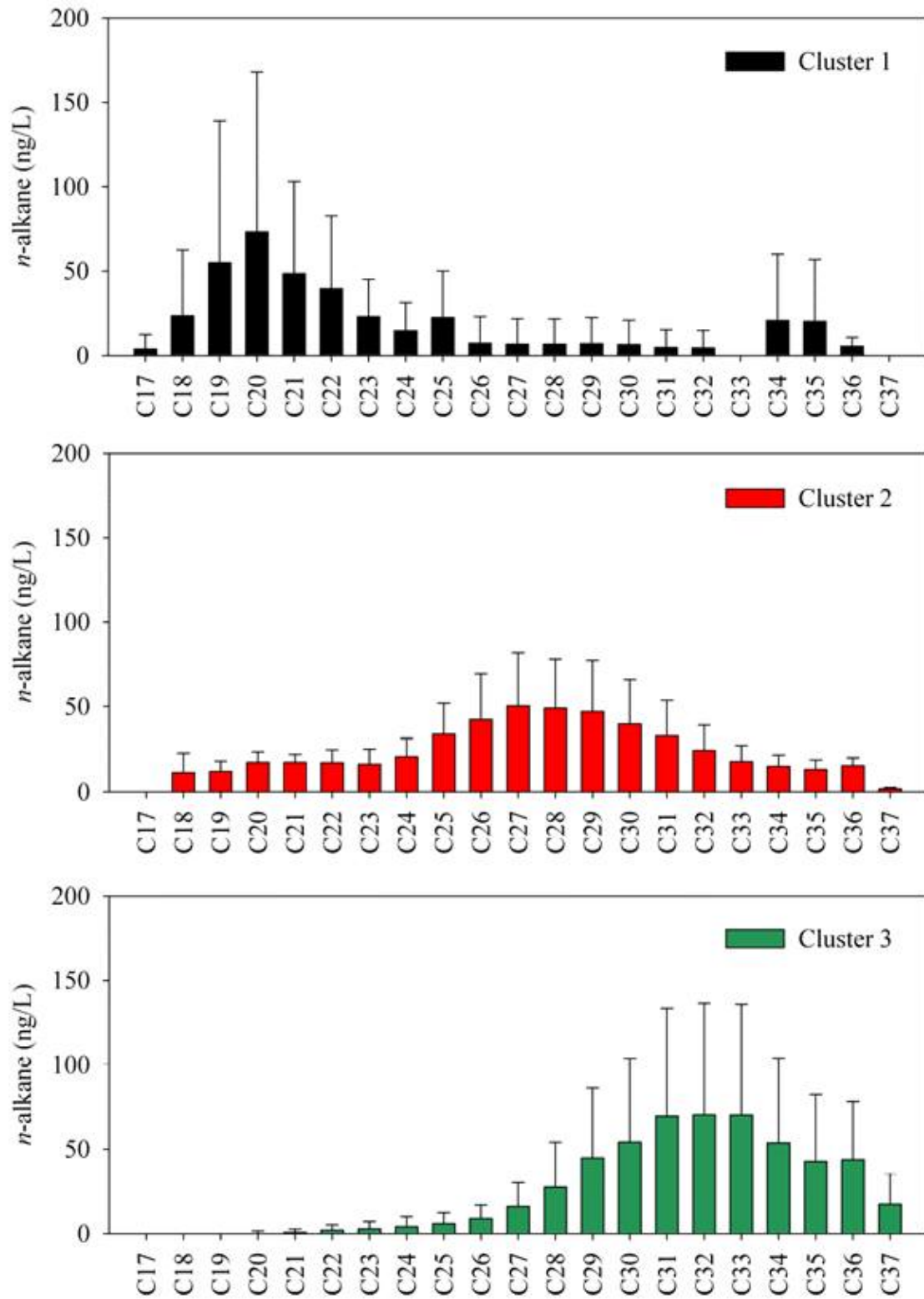


그림 101. Cluster 별 장족형 탄화수소의 분포 경향

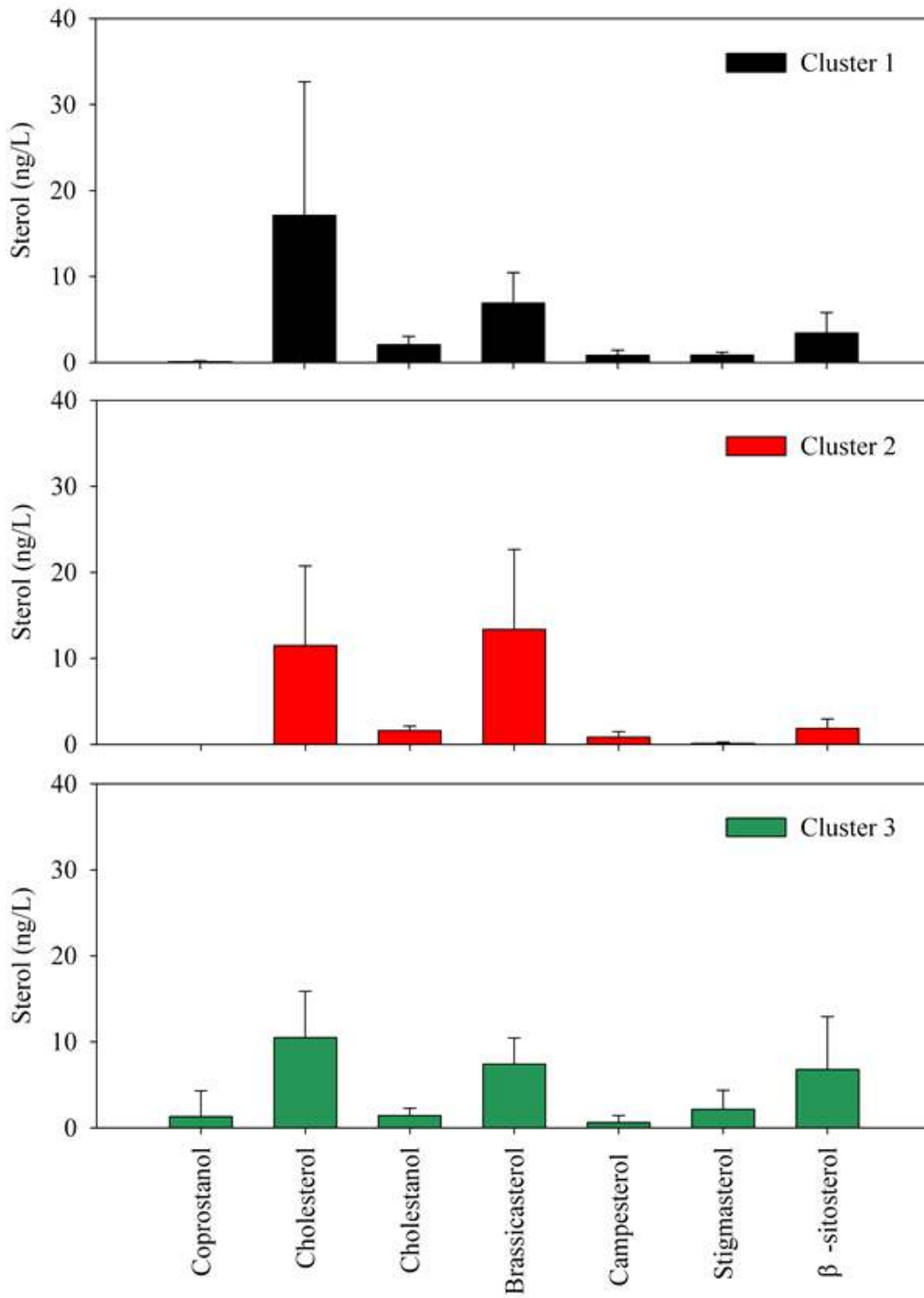


그림 102. Cluster 별 스테롤의 농도 분포 특성

(4) Kongsfjorden 해역 표층 퇴적물 및 유빙에서 스테롤의 분포 특성

2019년 7월(NICE19) Kongsfjorden 해역의 총 7정점에서 표층 퇴적물과 총 10 정점에서 수심별로 부유성 입자를 채집하였다. 채집된 시료는 gas chromatography-mass spectrometer(GC-MS)를 이용하여 스테롤(cholesterol, cholestanol, coprostanol, brassicasterol, campesterol, stigmasterol, and β -sitosterol)의 정성 및 정량 분석을 실시하였다. 연구 해역에서 추가로 채집한 유빙으로부터 스테롤을 분석한 결과 cholesterol과 campesterol, β -sitosterol만 검출 되었으며, coprostanol(+epicoprostanol), brassicasterol, stigmasterol은 검출 되지 않았음(그림 103). 표층 퇴적물에서 분석된 β -sitosterol과 cholesterol, campesterol이 Kongsfjorden 내만에서 상대적으로 높은 농도를 보이고 외측정점으로 이동할수록 낮은 분포를 보이는 것은 빙하를 통해 유입된 물질의 퇴적에 의한 결과임을 시사한다(그림 104). 반면 식물플랑크톤 기원의 brassicasterol은 외측 정점에서 상대적으로 높은 분포를 보이는 것은 이를 뒷받침한다.

Kongsfjorden 표층수에서 채집된 부유성 입자를 통해 획득한 스테롤 분석 결과는 그림 106에서 보여준다. 모든 정점의 표층 시료에서는 campesterol과 stigmasterol이 검출되지 않았다. 표층 퇴적물에서의 결과와 유사하게 내측 정점에서는 해빙 기원의 cholesterol과 β -sitosterol이 상대적으로 높은 기여도를 보였다. 반면, 식물플랑크톤 기원의 brassicasterol은 외측 정점에서 상대적으로 높은 기여도를 보였다.

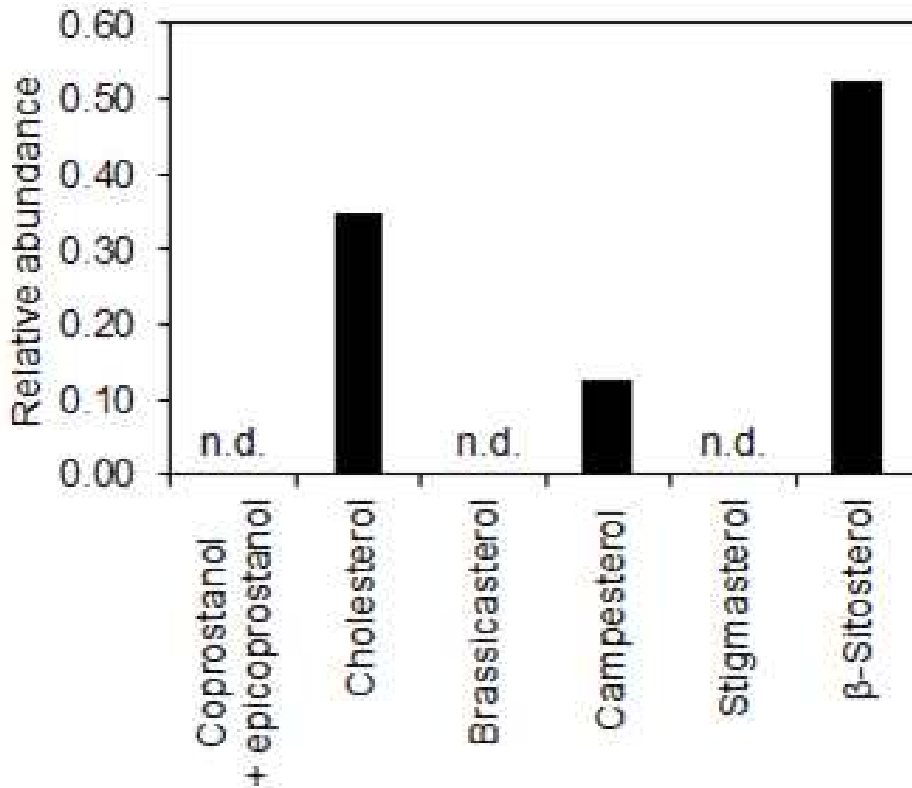


그림 103. 유빙에서 분석된 스테롤의 상대비

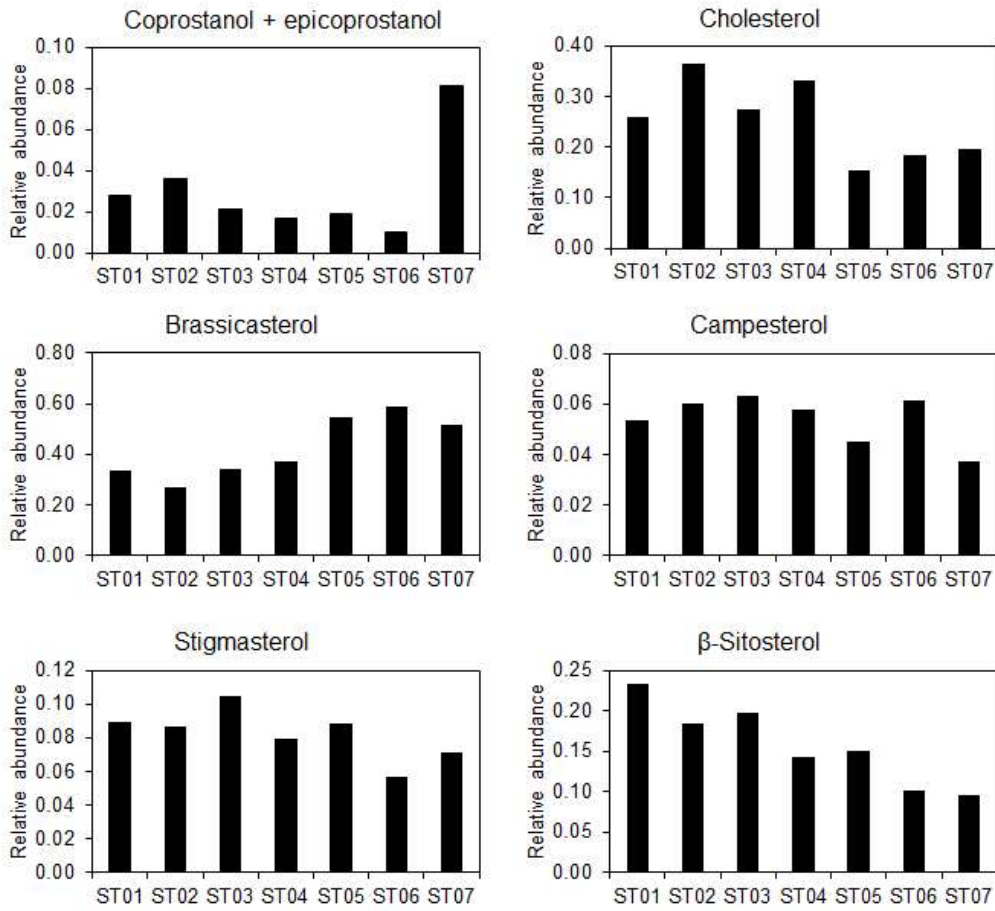


그림 104. 표층 퇴적물에서 분석된 스테롤의 상대비 분포

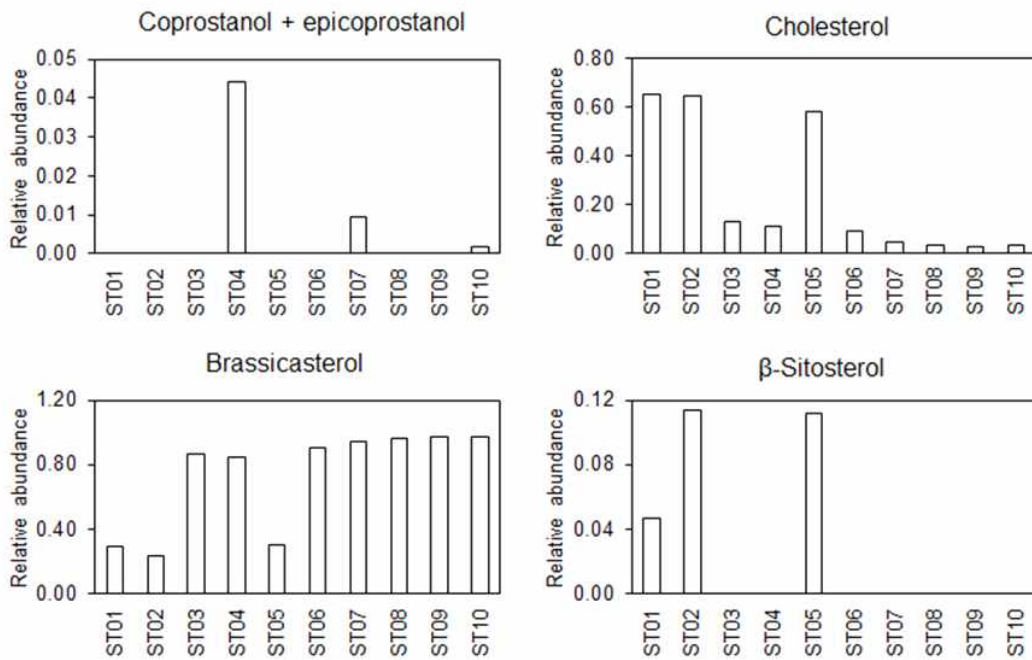


그림 105. Kongsfjorden 표층수의 부유입자에서 분석된 스테롤의 상대비 분포

라. 해빙 미세조류 기원 지질생체지표(IP25)를 활용한 Kongsfjorden 해역 내 해빙 조류 기여도 산정

Kongsfjorden 해역 1차 연구 조사 기간 중 여과를 통한 수층 입자 및 식물플랑크톤 네트를 이용한 입자시료를 채집하였다. 동일 현장 조사 기간 중 정점 4에서 표층 퇴적물(0-1cm) 및 아표층 퇴적물 획득하였다. 유기화학 분석 연구기법을 활용하여 추출 및 분리 정제한 지질 시료를 GC/MS를 이용하여 해빙 미세조류 기원 지질생체지표(IP25) 및 HBI의 분석하였다(그림 106). 수층 입자 시료에서는 HBI는 검출 한계 이하로 분석되어 해빙 조류 기원 유기물의 기여도 파악 불가하였다. 정점 4의 표층 퇴적물에서는 HBI가 분석 되었으며, sympagic HBI(IP25, Diene)와 pelagic HBI(trienes)의 상대비를 기반으로 계산된 퇴적물 내 해빙 조류 기원 유기탄소의 기여도는 약 48%로 계산되었다. 이처럼 해빙 조류기원 화합물이 퇴적물 내 유기물에 높은 기여도를 보임에도 불구하고 수층 입자에서 검출되지 않은 것으로 보아, 현장 조사만으로는 Kongsfjorden 해역에서의 해빙 조류에 의한 생산력이 저평가 될 수 있음을 시사한다. 이는 해빙 조류의 성장 시기에 해양 조사가 불가능한 현장의 여건에 의한 영향으로 사료된다. 하지만 본 연구를 통해 추후 해양 퇴적물을 통한 해빙 조류기원 유기물 기여도를 간접적으로 확인이 가능할 수 있음을 확인하였다.

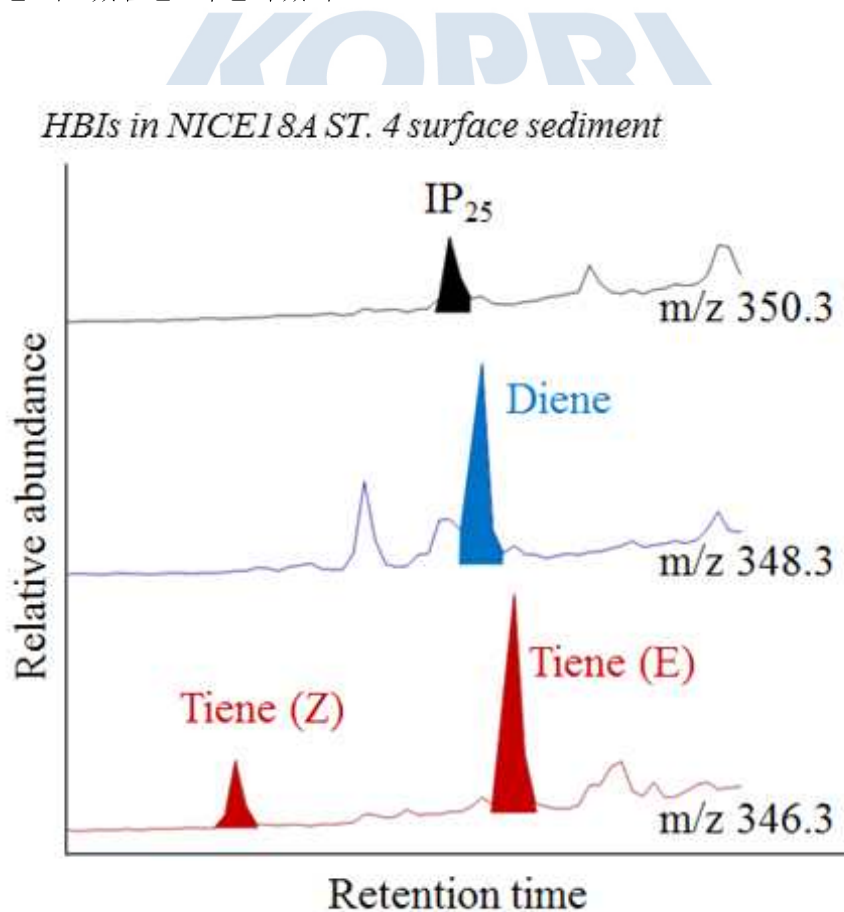


그림 106. Kongsfjorden 표층 퇴적물에서 분석된 sympagic HBI(IP₂₅, Diene)와 pelagic HBI(trienes)의 GC/MS chromatogram

제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

1. 극지 연구소의 인프라 (북극 다산과학기지) 기반의 장기 연구 자료 획득

본 과제 수행을 통하여 북극 다산과학기지를 활용한 장기적인 극지 해양환경 연구의 토대를 마련하였다. 또한 장기 관측 거점 확보 및 다양한 연구 기법을 도입함으로써 해빙 생태계 이해를 위한 가치적인 연구 결과들을 도출한 점에 의의가 있다. 연구 개발의 최종 목표로 선정되었던 북극 다산기지 주변 Kongsfjorden marginal ice zone에서의 환경변화에 따른 해빙생태계의 탄소흡수율 평가를 성공적으로 수행하였으며, 환경변화의 이해를 위해 식물 및 동물플랑크톤의 종조성 변동을 파악하였고, 무기 영양염과 유기탄소 및 질소의 거동이해를 위한 기초자료 획득을 완료 하였다. 특히 최신 연구기법인 아미노산 질소안전동위원소 분석 기법을 활용한 동물플랑크톤의 영양단계 산출 및 이를 통한 동물플랑크톤의 over-wintering 기간동안의 종별 먹이 적응 기작에 대한 증거를 확보한 것은 고무적이라 할 수 있다.

더욱이 세부 목표로 선정하였던 북극해 일차생산력 지도 작성을 수행하였으며, 북극 다산과학기지가 위치한 스발바드와 그 주변 해역에서의 일차생산력의 공간적 분포 확인 및 시계열 분석 결과를 도출 하였다. 나아가 인공위성 자료를 이용하여 최근 22년간 일차생산력의 시계열 분석 자료를 기반으로 북극해 전체에 걸쳐 일차생산력 지도를 작성함으로써 극지 해빙 및 해양 생태계에서 해빙의 분포 변동에 따른 해빙 미세조류의 일차생산력 변동 특성을 파악 할 수 있었다. 북극해를 구성하고 있는 각 해역별 환경 변화 특징을 규명 하였으며, 각 해역의 일차생산력을 조절하는 각각의 조절인자들에 대해 파악한 점은 주목할 만하다. 결론적으로 연차별 연구 결과를 종합하여 북극해 전체의 평균 일차생산력 지도를 작성하여 본 연구 과제에서 제시한 연구 목적을 달성하였다.

2. 성공적인 국제 공동연구 수행

본 과제의 연구 수행 기간 동안 태평양권역 북극 연안(케임브리지베이 및 코랄 하버) 해빙생태계 연구를 성공적으로 수행하였다. 또한, 해빙 캠프 기간 동안 해빙 bio-optic 부이를 이용해 해빙 아래의 해양 환경 변화를 관측하여 장기간의 모니터링 자료 확보하였다. 해빙미세조류의 유기물질(지질, 단백질, 탄수화물) 조성 비교 자료는 탄소 흡수기작 이해를 위한 중요한 증거를 제시하였다. 해빙 미세조류의 탄소흡수율의 장기 관측 자료 및 1-D 생태계 모델링 결과를 토대로 연간 해빙 미세조류의 생물량 변동을 예측하고, 향후 기후 변화로 인해 급변하는 해빙 생태계의 변동 시나리오를 예측할 수 있을 것으로 기대된다. 더욱이, 위 연구 수행을 통해 국제 공동 연구 기반을 확고히 한 점 또한 본 연구로 인해 획득한 중요한 성과로 판단된다.

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

1. 극지역을 활용한 기후변화 연구에 기초자료로 제공

본 연구의 수행 결과들은 추후 지구온난화에 따른 기후변화가 북극해 해양-해빙생태계와 해양-해빙 환경 변화에 미치는 영향을 파악하는데 귀중한 자료로 사용 가능하며, 향후 미래 예측을 위한 모델 입력 자료로도 활용 가능할 것으로 판단된다. 또한, 극지해역 해빙의 열적특성과 내부 단과복사 투과량을 정량적으로 산출함으로써, 최근 기후변화에 따라 변화되고 있는 해빙 두께변화에 따른 북극해 유입 태양복사량의 변화 이에 따른 해양환경 및 생태계 변화연구에 활용될 수 있을 것이다. 추가적으로 Desk-top 수준의 해빙 수조의 재현이 가능하다면 실내에서 인위적으로 조성한 해빙생태계의 탄소 흡수율 및 피드백에 관한 연구 등 다양한 각도의 연구 접근이 가능할 것으로 판단된다. 나아가 극지 해빙지역의 탐사, 연구영역 확대, 연구정보를 공유함으로써 연구성과 재고 및 연구 역량 강화에 기여되기를 바란다.

2. 기후변화 모델의 현장관측 자료로 활용

관측된 북극해 해빙의 열적특성 및 대기, 해빙, 해수의 열교환량은 추후 북극해 대기, 해빙, 해양 접합모델의 정확도 향상에 필요한 기초자료로 활용될 수 있다. 그리고 기후 변화 피드백 순환고리 구성은 향후 북극 기후 모델을 구성하는 시나리오가 될 수 있으며, 기후 변화 보고서(IPCC)에서 제공하는 미래 기후 변화 시나리오와 연동하여 보다 정확하고 사실적인 북극 기후 모델을 재현 할 수 있는 기초 자료로 제공이 되기를 기대한다.

3. 해빙미세조류의 일차생산 기여도를 재산정 할 수 있는 자료로 활용

해빙 미세조류의 탄소 흡수율 및 해빙 미세조류 기원 유기탄소의 거동은 지구 온난화에 의한 해빙의 후퇴 및 단년생 해빙의 증가 등 북극 환경의 변화에 의한 생태계 변화 모니터링을 위한 기초 자료로써 활용도가 높을 것으로 기대된다.

4. 북극 연안국 중심의 배타적 독점 체제를 유지하고 있는 북극권에서 협력관계를 구축하기 위한 수단으로 해빙생태계 연구 활용

북극이사회에서 입지를 다지고, 옵서버 역할 수행과 자격 유지를 위한 협력 전략으로 해빙생태계 연구 결과를 제공 할 수 있을 것이다. 그리고 북극권 활동 다변화를 위한 전략적 수단으로 해빙생태계 연구결과 활용 또한 검토 되어야 할 것으로 여겨진다.

제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

1. 해양 생태계 모델

본 연구에서 수행된 해빙/해양 생태계의 탄소 흡수율 결과를 해석하고, 수온, 염분 및 광도의 변화에 따른 해양의 환경 변화와의 관계를 이해하기 위해 1-D ice-ocean-ecosystem-model 을 도입하였다. 극지의 극한의 환경에서 현장 조사가 불가능 시기에는 현장 관측 자료의 획득에 어려움이 있으며 이러한 단점을 보완하기 위한 방법으로 모델링의 구현이 필요하다. 또한 본 연구에서 획득한 무기영양염 및 유기탄소, 질소 화합물의 거동과 더불어 식물/동물플랑크톤의 시기별 종조성의 변화와 이들의 체내에 유기화합물의 조성 변화등에 대한 종합적인 이해를 위해서 다양한 생태 모델의 적용이 필요하다. 그밖에도 Regional Arctic System Model (RASM, Maslowski et al. 2012) 등 해빙 변화 이해를 위한 모델의 적용에 대한 연구가 병행되어야 종합적인 연구 결과를 도출할 수 있을 것으로 보인다.

2. Compound specific isotope analysis

분자 수준의 안정동위원소 분석 기법(compound specific isotope analysis)은 본 연구 수행에서 동물플랑크톤 체내의 아미노산 질소안정동위원소 분석을 통한 영양단계 도출 연구에 시도되었다. 최근 분석 기법의 발전과 더불어 응용 분야의 확장으로 해양 뿐만 아니라 육상 및 담수 환경 내의 생태계 내에서 일어나는 에너지 순환의 메커니즘 해석을 위한 중요한 정보를 제공하고 있다. 또한 최근에는 환경 변화에 대한 해양 생물의 생리적인 반응 기작 연구 등을 위해 아미노산의 탄소 안정동위원소 분석 기법 또한 개발/시도되고 있다(Ohkouchi et al., 2015). 하지만 현재까지 국내에서는 공식화된 연구결과 도출 사례는 전무한 실정이다. 빠르게 발전하고 있는 질량분석 기술은 기존의 연구의 패러다임을 바꿀 수 있을 정도의 영향력이 있음을 국내외의 많은 연구자들은 인지하고 있다.

제 7 장 참고문헌

- Arrigo KR, van Dijken GL 2011. Secular trends in Arctic Ocean net primary production. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 116
- Atienza, D., Calbet, A., Saiz E., Alcaraz, M. & Trepast, I. J. M. B. 2006. Trophic impact, metabolism, and biogeochemical role of the marine cladoceran *Penilia avirostris* and the co-dominant copepod *Oithona nana* in NW Mediterranean coastal waters. 150, 221-235.
- Atkinson, A. J. M. E. P. S. 1996. Subantarctic copepods in an oceanic, low chlorophyll environment: ciliate predation, food selectivity and impact on prey populations. 130, 85-96.
- Berge, J., Renaud, P. E., Darnis, G., Cottier, F., Last, K., Gabrielsen, T. M., Johnsen, G., Seuthe, L., Weslawski, J. M. & Leu, E. 2015. In the dark: a review of ecosystem processes during the Arctic polar night. *Progress in Oceanography*, 139, 258-271.
- Cherkasheva A, Bracher A, Melsheimer C, Köberle C, Gerdes R, Nöthig EM, Bauerfeind E, Boetius A (2014) Influence of the physical environment on polar phytoplankton blooms: A case study in the Fram Strait. *Journal of Marine Systems* 132:196-207
- Chikaraishi, Y., Ogawa, N. O., Kashiyama, Y., Takano, Y., Suga, H., Tomitani, A., Miyashita, H., Kitazato, H. & Ohkouchi, N. 2009. Determination of aquatic food web structure based on compound specific nitrogen isotopic composition of amino acids. *Limnology and Oceanography: methods*, 7, 740-750.
- Falk-Petersen, S., Pavlov, V., Timofeev, S. & Sargent, J. R. 2007. Climate variability and possible effects on arctic food chains: the role of *Calanus*. *Arctic alpine ecosystems and people in a changing environment*. Springer.
- Grigor, J. J., S Reide, J. E. & Varpe, Ø. 2014. Seasonal ecology and life-history strategy of the high-latitude predatory zooplankter *Parasagitta elegans*. *Marine Ecology Progress Series*, 499, 77-88.
- Maslowski W., Clement Kinney J., Higgins M., Roberts A. 2012. The Future of Arctic Sea Ice. *The Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 40: 625-654
- Ohkouchi N., Ogawa, N., Chikaraishi Y., Tanaka H., Wada E. 2015. Biological and physiological bases for the use of carbon and nitrogen isotopes in environmental and ecological studies. *Progress in Earth and Planetary Science*, 2:1
- Pabi S, van Dijken GL, Arrigo KR 2008. Primary production in the Arctic Ocean, 1998 - 2006. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 113
- Pond, D. W. & Ward, P. J. J. O. P. R. 2010. Importance of diatoms for *Oithona* in Antarctic waters. 33, 105-118.

- Samemoto, D. J. P. B. 1987. Vertical distribution and ecological significance of chaetognaths in the Arctic environment of Baffin Bay. 7, 317-32
- Scott, C. L., Kwasinewski, S., Falk-Pertersen S. & Sargent, J. R. 2000. Lipids and life strategies of *Calanus finmarchicus*, *Calanus glacialis* and *Calanus hyperboreus* in late autumn, Kongsfjorden, Svalbard. *Polar Biology*, 23, 510-516.
- Terajaki, M. 2004. Life history strategy of the chaetognath *Sagitta elegans* in the World Oceans. *Coastal Marine Science*, 29(1), 1-12.
- Zamora-Terol, S., Nielsen, T. G. & Saiz, E. J. M. E. P. S. 2013. Plankton community structure and role of *Oithona similis* on the western coast of Greenland during the winter-spring transition. 483, 85-102.



(국내 과제용)

주 의

1. 이 보고서는 극지연구소에서 수행한 기본연구사업의 연구결과보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 극지연구소에서 수행한 기본연구사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.

