

해빙생태계 탄소 흡수율 및 유기물 순환 규명 연구

Carbon assimilation rate and organic carbon cycle in sea
ice-algal ecosystem



한양대학교 에리카산학협력단

제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “북극 다산기지 Kongsfjorden miz(marginal ice zone)에서의 해빙생태계 탄소흡수율 평가” 과제의 위탁연구 “해빙생태계 탄소 흡수율 및 유기물 순환 규명 연구” 과제의 최종보고서로 제출합니다.



(본과제) 총괄연구책임자 : 하 선 용
위탁연구기관명 : 한양대학교
에리카산학협력단
위탁연구책임자 : 신 경 훈
위탁참여연구원 : 최 현 태
“ : 조 유 상
“ : 김 도 균
“ : 김 관 우

보고서 초록

위탁연구과제명	해빙생태계 탄소 흡수율 및 유기물 순환 규명 연구				
위탁연구책임자	신 경 훈	해당단계 참여연구원수		해당단계 연구비	210 백만원
연구기관명 및 소속부서명	한양대학교 에리카산학협력단		참여기업명		
국제공동연구	상대국명 :		상대국연구기관명 :		
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)				보고서 면수	99 면
<p>본 연구에서는 해빙생태계 해빙미세조류의 탄소흡수율과 동물플랑크톤의 영양단계 산정을 통해 북극의 해빙생태계에 일어나고 있는 최근의 급격한 환경 변화를 이해하고자 하였음.</p> <p>1. 북극 다산기지 Kongsfjorden 해역의 동물플랑크톤의 영양 단계 변동 파악 및 미소 먹이망의 역할 해석</p> <ul style="list-style-type: none"> - Kongsfjorden 현장 조사를 통해 대표적인 동물플랑크톤을 동정 및 분류하고, 아미노산 질소 안정동위 원소비 분석을 통해 영양 단계를 산출하였음. - 동물플랑크톤의 극야 기간 전후의 영양 단계의 변동 경향은 동물플랑크톤의 종에 따라 상이하였으며, 잡식성 요각류에 속하는 <i>O.similis</i>의 영양 단계가 크게 변동한 것으로 확인되었음. - 이는 다른 동물플랑크톤이 먹이활동을 줄이거나 휴면기에 들어가는 것과는 반대로, 극야 기간 동안 <i>O.similis</i>가 원생동물 등의 먹이를 꾸준히 섭취하며 생존하는 기존의 연구결과들과 일치하였음. <p>2. Cambridge Bay와 Coral Harbor에서 해빙생태계 탄소흡수율 측정</p> <ul style="list-style-type: none"> - Cambridge Bay와 Coral Harbor 현장 조사에서 해빙 미세조류의 탄소흡수율 현장 측정을 통해 ladvast sea ice zone의 환경적인 특성을 이해하고자 하였음. - 해빙 미세조류의 탄소흡수율과 chlorophyll a의 농도는 과거 같은 해역에서 수행되었던 연구결과에 비해 낮은 것으로 나타났으며, 영양염의 부족이 주된 원인으로 추정됨. - 또한 해빙 미세조류를 구성하는 거대 분자 조성 중, 지질이 우점하는 것을 고려하였을 때 연구 기간 동안 해빙 미세조류가 영양염이 결핍되어 있던 것으로 사료됨. <p>3. 연구결과의 활용계획</p> <ul style="list-style-type: none"> - 해빙미세조류의 탄소흡수율에 대한 기여도를 재산정할 수 있는 자료로 활용 - 북극해 분야 연구에서 국제협력관계를 구축하기 위한 수단으로 해빙생태계 연구 활용 					
색 인 어 (각 5개 이상)	한 글	탄소흡수율, 해빙생태계, Kongsfjorden, Cambridge Bay, Coral Harbor			
	영 어	Carbon assimilation rate, Sea ice ecosystem, Kongsfjorden, Cambridge Bay, Coral Harbor			

요 약 문

I. 제 목

해빙생태계 탄소 흡수율 및 유기물 순환 규명 연구

II. 연구개발의 목적 및 필요성

- 지구온난화에 의한 단년도 해빙의 증가에 의해 북극해 해빙생태계의 탄소흡수율이 증가 추세
- 북극 Svalbard의 Kongsfjorden 해역은 대서양 해류의 영향으로 해빙농도의 계절변동이 급격하여 해빙생태계 탄소흡수율의 조사에 적합
- 해빙생태계 탄소흡수율 조사를 통해 해빙생태계 구성 인자의 에너지 흐름을 파악

III. 연구개발의 내용 및 범위

- 북극 다산기지 주변 Kongsfjorden marginal ice zone에서의 환경변화에 따른 해빙생태계의 동물플랑크톤 영양단계 파악 및 미소 먹이망구조의 역할 파악
- 캐나다 Cambridge Bay 및 Coral Harbor에서의 해빙생태계 탄소흡수율 측정

IV. 연구개발결과

- Kongsfjorden에서의 동물플랑크톤 영양 단계는 동물플랑크톤의 종에 따라 영양단계의 계절적인 변화의 경향이 다르게 나타났고, 이는 각 종의 극야 및 bloom 시기에 대한 생존 전략이 상이함을 시사
- Cambridge Bay 및 Coral Harbor에서의 현장조사 결과, 해빙미세조류의 현장 탄소흡수율 및 평균 chl-a 농도는 기존의 연구들에 비해 낮게 나타났으며, 영양염의 부족에 의해 이들의 생장이 제한적인 것으로 해석

V. 연구개발결과의 활용계획

- 해빙미세조류의 일차생산 기여도를 재산정 할 수 있는 자료로 활용
- 북극해 분야의 연구에서 국제협력관계를 구축하기 위한 수단으로 해빙생태계 연구 활용

S U M M A R Y

(영 문 요 약 문)

I. Title

Carbon assimilation rate and organic carbon cycle in sea ice–algal ecosystem

II. Purpose and Necessity of R&D

- Increasing carbon assimilation rate of the Arctic sea ice ecosystem due to the increase of single-year sea ice caused by global warming
- Kongsfjorden (Svalbard, Spitzbergen) is suitable for survey of carbon assimilation of the sea ice ecosystem due to the rapid seasonal fluctuation in sea ice concentration driven by Atlantic current inflow
- Understanding the energy flow of sea ice ecosystem components through the measurement of carbon assimilation of the sea ice ecosystem

III. Contents and Extent of R&D

- Determination of trophic position of zooplankton and the role of the microbial network in the Kongsfjorden marginal ice zone, Dasan Station
- Assessment of carbon assimilation rate by sea ice growth stage in Cambridge Bay and Coral Harbor, Canada

IV. R&D Results

- The trophic position of zooplankton in Kongsfjorden showed different trends in seasonal changes depending on the species of zooplankton, suggesting the survival strategies in polar night and bloom season were species-specific
- In Cambridge Bay and Coral Harbor, in-situ carbon uptake and chl-a concentration of sea ice microalgae were lower than previous studies, suggesting their growth was restricted by the inorganic nutrients

V. Application Plans of R&D Results

- Use as a data to reconstruct the contribution of primary production of sea ice algae
- Use of sea ice ecosystem research to build international cooperation in research in the Arctic Ocean

목 차

제 1 장 서론

- * 연구개발의 목적,필요성 및 범위 등을 기술

제 2 장 국내외 기술개발 현황

- * 국·내외 관련분야에 대한 기술개발현황과 연구결과가 국·내외 기술개발현황에서 차지하는 위치 등을 기술

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

- * 이론적, 실험적 접근방법, 연구내용, 연구결과를 기술

제 4장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

- * 연도별 연구목표 및 평가착안점에 입각한 연구개발목표의 달성도 및 관련분야의 기술발전예의 기여도 등을 기술

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

- * 추가연구의 필요성, 타연구에의 응용, 기업화 추진방안을 기술
- * 연구기획사업 등 사업별 특성에 따라 목차는 변경 가능함.

제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

제 7 장 참고문헌

- * 보고서 작성시 인용된 모든 참고 문헌을 열거한다.

본 문

제 1장 서론

1절 연구개발의 필요성

- 해빙에 존재하는 해빙 조류는 작은 동물플랑크톤부터 해양포유류에 이르는 상위 포식자에 이르기까지 북극 해양 먹이사슬에 중요한 먹이원으로 알려져 있음
 - 해빙 조류의 탄소흡수율 (일차생산)은 이들의 bloom 패턴과 고농도의 생물량이 집중되어 있는 점에서 북극 해양생태계에서 생태학적으로 중요함
 - 해빙 조류의 bloom은 초여름 식물플랑크톤의 bloom에 앞서 발생하며, 동물플랑크톤의 성장과 번식을 위해 필수적인 high-quality polyunsaturated fatty acids (PUFAs)를 함유하고 있어 먹이원의 기능적인 면에서도 중요한 역할을 하고 있음
- 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 있음
 - 북극해 해빙은 매년 최저치 기록을 갱신하고 있으며, 여름철 다년생 해빙으로 덮여있던 해역이 북극의 온난화로 인하여 초년생 해빙의 상대적 비중이 높아짐
 - 해빙의 두께가 감소함으로서 투과된 광량은 해빙 생태계를 자극함으로서 이전에 비해 높은 해빙 생태계의 활성을 보이며, 해빙 미세조류의 생산력 변화는 초년생 해빙의 증가와 더불어 증가될 것으로 예상되며, 재평가될 필요성이 강조되고 있음
 - 지구 온난화에 의한 해빙의 급격한 변화는 북극 탄소 흡수의 변화를 초래하며 특히 기존 해빙 생태계에 대한 탄소 흡수에 대한 기여도가 상대적으로 저평가되었던 부분을 재평가할 필요성이 있음
 - 해빙의 후퇴 될 뿐만 아니라 초년생 해빙의 증가는 해빙에 서식하는 미세조류의 활성을 높일 가능성이 높으며 이에 대한 탄소 흡수율 기여도를 파악하는 것이 우선적으로 선행되어야 함
- 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 있음
 - 북극에서 강수의 증가와 눈이 녹는 시기가 앞당겨지는 추세이며 이에 따른 해빙 미세조류의 봄철 bloom 시기와 기간이 달라질 것으로 예측되고 있음
 - 또한 해빙과 눈 조건의 변화에 따른 해빙 미세조류의 반응은 위도에 따라 다를 수 있기

때문에 지속적이고, 넓은 공간에 걸친 연구가 필요됨

- 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 함
- 그럼에도 불구하고, 해빙 미세조류의 생산력에 대한 현장 관측자료의 부족으로 인해 위와 같은 현상을 이해함에 있어 어려움을 겪고 있는 실정임

○ 북극 다산기지 해역은 대서양 기원 해류의 영향을 받는 지역으로 상대적으로 높은 수온 (>3°C)으로 인한 해빙의 형성과 소멸의 변동 폭이 큼. 이에 기후변화(수온 상승)에 따른 해빙생태계의 변화를 예측할 수 있는 최적의 장소임

- 북극 다산기지 해역은 대서양과 극지방 환경 변화를 추적할 수 있는 곳에 위치하며, 북극 모니터링 거점들 중 가장 고위도에 위치하는 중요한 거점임
- 북반구 환경변화에 민감한 곳이며 해양 생태계를 연구하기 위한 국제적인 인프라가 구축되어있음
- 세계 20여개국의 과학기지촌이 구성되어 있어 국제공동연구가 용이하며, 과거 자료 축적으로 인하여 환경변화에 따른 변동성을 이해하기 위한 최적의 장소

○ Cambridge Bay는 landfast sea ice zone에 위치하고 있는 캐나다의 연안 해역으로, 최근의 북극 해빙의 느린 형성과 빠른 용해 현상이 잘 나타나는 곳으로 알려져 있음

- Cambridge Bay는 다른 landfast sea ice zone에 비해 지리적 접근성이 좋기 때문에 2014년부터 해빙과 관련된 물리·화학·생물 등의 연구가 수행되고 있음
- Cambridge bay 주변의 Dease Strait은 수 년 전부터 N-limitation이 관측되고 있어 환경변화에 대한 해빙 미세조류의 일차생산 특징을 연구하기에 적절한 지역임
- 또한, 해빙 연구의 가장 중요한 요소 중의 하나인 안전의 측면에서는 Cambridge bay community가 있기 때문에 polar bear watcher를 확보 할 수 있음
- Canada 연구진과 공동 연구를 수행할 여지가 있기 때문에 기존 인프라를 사용할 수 있는 가능성이 있고 효율적인 연구를 수행할 수 있음
- Cambridge bay 주변에서 Oxygen probe를 이용한 photosynthetic parameter를 연구한 사례는 있지만 안정동위원소를 이용한 해빙 미세조류의 탄소흡수율을 측정된 사례는 없음

○ Coral Harbor는 Hudson 만에 위치한 캐나다의 연안 해역으로, 내만부터 해빙 가장자리까지 해빙의 발달 단계에 대한 연구를 수행할 수 있는 장점이 있음

○ 급격한 기후 변화를 겪는 북극해 일차생산력 중 해빙생태계의 역할 파악을 통하여 환경변화와 해빙생태계 간의 상호 관계 규명에 관한 연구 필요

- 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 확립

- 겨울~여름에 이르는 시기 해빙 - 해양 생태계 내에서의 탄소의 순환을 이해하기 위해서 pCO_2 의 변동을 관측하는 것은 필수적
- 북극 해빙 생태계 연구는 해빙 생태계의 탄소 흡수율 기여에만 국한된 것이 아니라 해빙 생태계의 발생과 성장, 소멸시기에 기후 변화 인자의 생성 기작을 병행함으로써 전지구적인 기후 변화에 대한 이해도를 높임



2절 연구의 목적

- 북극 다산기지 주변 Kongsfjorden marginal ice zone에서의 환경변화에 따른 해빙생태계의 동물플랑크톤 영양단계 파악 및 미소 먹이망구조의 역할 파악
 - 동물플랑크톤의 체내 아미노산의 질소 안정동위원소비를 분석하여 동물플랑크톤의 생태적 지위를 파악
 - 여러 동물플랑크톤이 계절에 따라 나타나는 생태적 지위의 차이에 대해 이해하고, 이를 통해 해빙생태계 구성 인자 (미세조류/동물플랑크톤) 간 에너지 전달 과정 해석

- Cambridge Bay 및 Coral Harbor에서 해빙생태계 탄소 흡수율 현장 측정
 - 안정동위원소 tracer를 이용한 해빙미세조류의 탄소 흡수율 현장 측정 및 해빙미세조류의 거대분자 조성을 파악
 - 해빙미세조류의 탄소 흡수율의 시,공간적인 변화를 이해하고 이를 통해 기후변화로 인한 해빙미세조류의 현 상태에 대한 과학적인 근거 제시



3절 연구의 범위

1. 북극 다산기지 주변 Kongsfjorden marginal ice zone에서의 환경변화에 따른 해빙생태계의 동물플랑크톤 영양단계 파악 및 미소 먹이망구조의 역할 파악

- 현장에서 채집, 분류된 동물플랑크톤 시료로부터 대표 우점종을 선별하여 아미노산 질소 안정동위원소비 분석을 위한 시료로 확보
- 아미노산 질소 안정동위원소비 분석을 통한 동물플랑크톤의 생태적 지위 파악
- 동물플랑크톤의 생태적 지위의 계절에 따른 변동 확인
- 연도별 연구수행 내용

연차	연구내용
1차년도	10월 다산기지 현장조사 및 Kongsfjorden 해역 동물플랑크톤 시료 채집 생화학 지표 분석 및 결과 해석
2차년도	4월 다산기지 현장조사 및 Kongsfjorden 해역 동물플랑크톤 시료 채집 동물플랑크톤의 아미노산 질소 안정동위원소비 분석 및 결과 해석
3차년도	7월 다산기지 현장조사 및 Kongsfjorden 해역 동물플랑크톤 시료 채집 동물플랑크톤의 아미노산 질소 안정동위원소비 분석 및 결과 해석

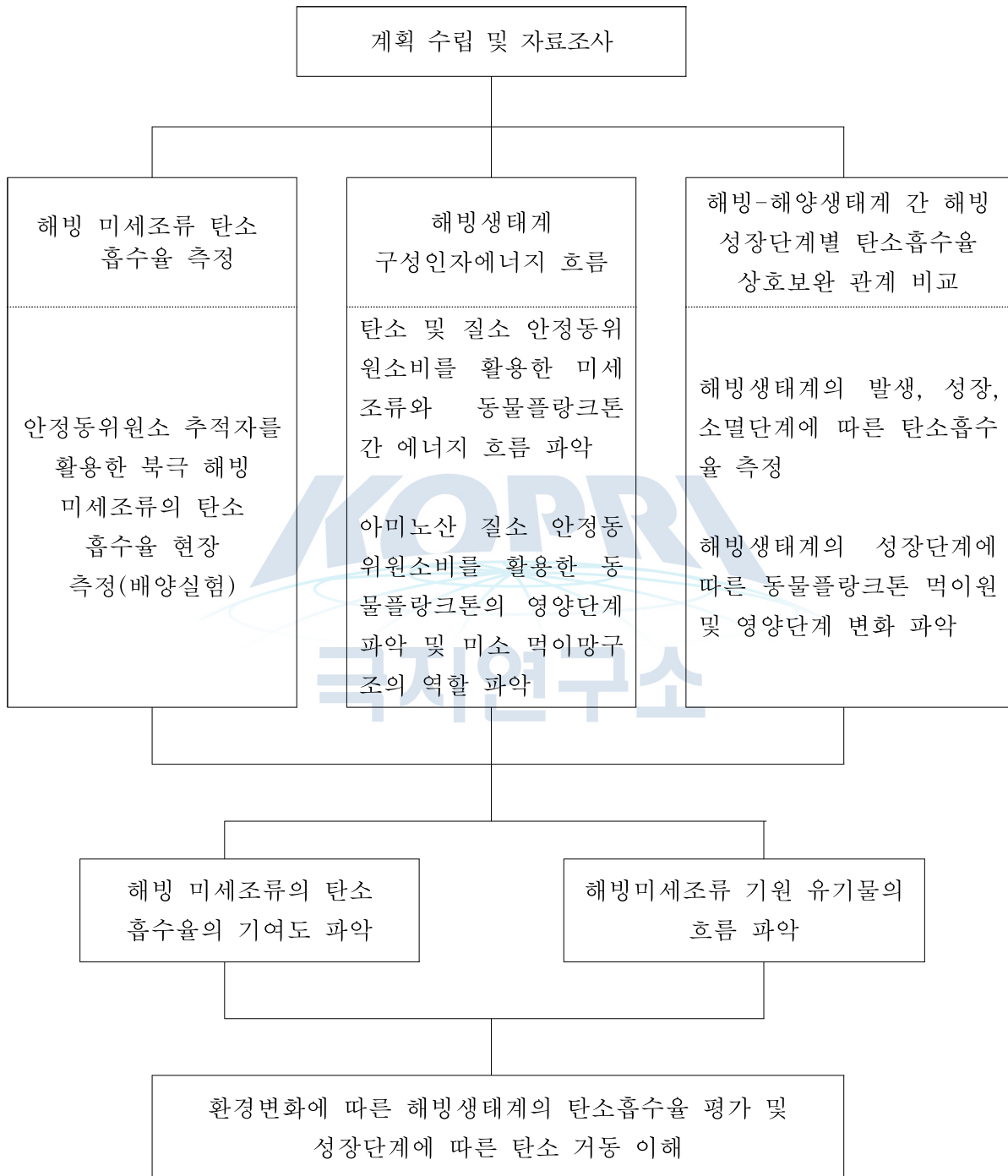
2. Cambridge Bay 및 Coral Harbor에서의 해빙생태계 탄소흡수율 측정

- 탄소 안정동위원소비 tracer를 이용한 현장 해빙생태계 탄소흡수율 현장 관측
- 해빙미세조류의 유기물질 (지질, 단백질, 탄수화물) 조성 비교
- 1개월간 현장 조사를 통한 해빙생태계 탄소흡수율의 시간적 변동 관측
- 연도별 연구수행 내용

연차	연구내용
1차년도	4~5월 캐나다 Cambridge Bay 현장 조사를 통해 시료 채집 각 정점에서 채집된 Ice-algae의 Chlorophyll, Macro-composition 분석 해빙 미세조류의 현장 배양실험을 통한 탄소 흡수율 측정
2차년도	4~5월 캐나다 Cambridge Bay 현장 조사를 통해 시료 채집 각 정점에서 채집된 Ice-algae의 Chlorophyll, Macro-composition 분석 해빙 미세조류 및 동물플랑크톤 탄소 및 질소 안정동위원소비 분석
3차년도	5~6월 캐나다 Coral Harbor 현장 조사를 통해 시료 채집 1개월간 채집된 Ice-algae의 Chlorophyll, Macro-composition 분석 해빙 미세조류 및 동물플랑크톤 탄소 및 질소 안정동위원소비 분석

4절 추진전략 및 방법

1. 추진전략 및 체계



2. 목표달성 방법

- 안정동위원소 추적자를 활용한 북극 해빙 미세조류의 탄소 흡수율 현장 측정
해빙 미세조류의 탄소 흡수율을 탄소 안정동위원소 추적자를 활용한 현장배양 실험을 통하여 측정한다.
- 해빙 미세조류 유기물 조성 및 생화학 지표 특성 확인
해빙 미세조류의 유기물 조성(탄소 및 질소 함량) 및 생화학 지표(탄소 및 질소 안정동위원소비 특성)를 확인한다.
- 해빙생태계 구성인자 유기물 조성 및 에너지 흐름
해빙 생태계 구성인자의 탄소 및 질소 안정동위원소비를 통하여 구성인자간 에너지 흐름을 파악한다.
- 동물플랑크톤의 영양단계 파악 및 미소 먹이망구조의 역할 파악
아미노산 질소 안정동위원소 분석기법을 활용하여 해빙 생태계 서식 동물플랑크톤의 영양단계를 파악하고, 이를 통해 해빙 생태계 내 미소먹이망의 역할을 확인한다.
- 해빙의 성장 단계별 탄소 흡수율 및 먹이망구조 변화 파악
해빙의 성장 단계별 해빙 미세조류의 탄소 흡수율을 측정하고 각 단계별 서식 생물의 영양단계를 확인하여 해빙이 주변생태계에 미치는 영향을 파악한다.

극지연구소

제 2장 국내외 기술개발 현황

1절 국외

- 극지 연안국 중심으로 해빙 미세조류에 대한 연구가 활발히 진행
 - (캐나다) Polar Continental Shelf Program (PCSP) 프로그램 Arctic-ICE camp를 통해서 다양한 분야에서 연구가 진행
 - (미국) NASA에서는 Impacts of Climate on the Eco-Systems and Chemistry of the Arctic Pacific Environment (ICESCAPE) 프로그램을 2010부터 실시. 또한 1979년 Coastal Zone Color Scanner (CZCS) 해색센서를 시작으로 1997년 Sea-Viewing Wide Field-of-View Sensor (SeaWiFS) 센서를 활용해 본격적으로 해양 표층 식물플랑크톤 관측에 위성자료가 광범위하게 쓰여짐
 - (미국) 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 있으나 정확도가 상대적으로 낮아서 해빙 열적특성 연구에는 제한적임
 - (노르웨이) Norwegian young sea ICE (N-ICE2015) expedition 프로그램을 통해 북극 sea ice regime 에 대한 연구 진행
- 해빙 및 해양 생태계를 이해하기 위한 다양한 연구 진행
 - 탄소 안정동위원소비를 활용한 해빙 미세조류의 생산력 측정연구가 우리나라에서는 매우 제한적으로 진행되고 있는 반면 극지 선진국에서는 매우 다양하게 보고되고 있음
 - 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 있음
- 질소 안정동위원소 연구를 통한 먹이망 구조의 규명
 - 질소 안정동위원소비는 해양의 다양한 질소 기원을 추적하기 위한 연구 방법으로 활용되고 있으며, 생물의 질소 안정동위원소비를 사용하는 연구 방법은 무기 질소와 입자성 유기물의 질소 안정동위원소비에 비하여 장기간 축적된 질소 기원에 대한 정보를 제공할 수 있음
 - 이는 체세포 내의 탄소 및 질소 안정동위원소비 등을 이용하기 때문에 장기적으로 섭식한 먹이원의 파악이 가능하고, 위 내용물 분석법에 비하여 상대적으로 적은 노력을 통해 결과를 얻을 수 있으며, 해양 생태계에서 각 섭식자에 대한 먹이원의 기여도를 파악하는

데 용이하게 사용될 수 있음.

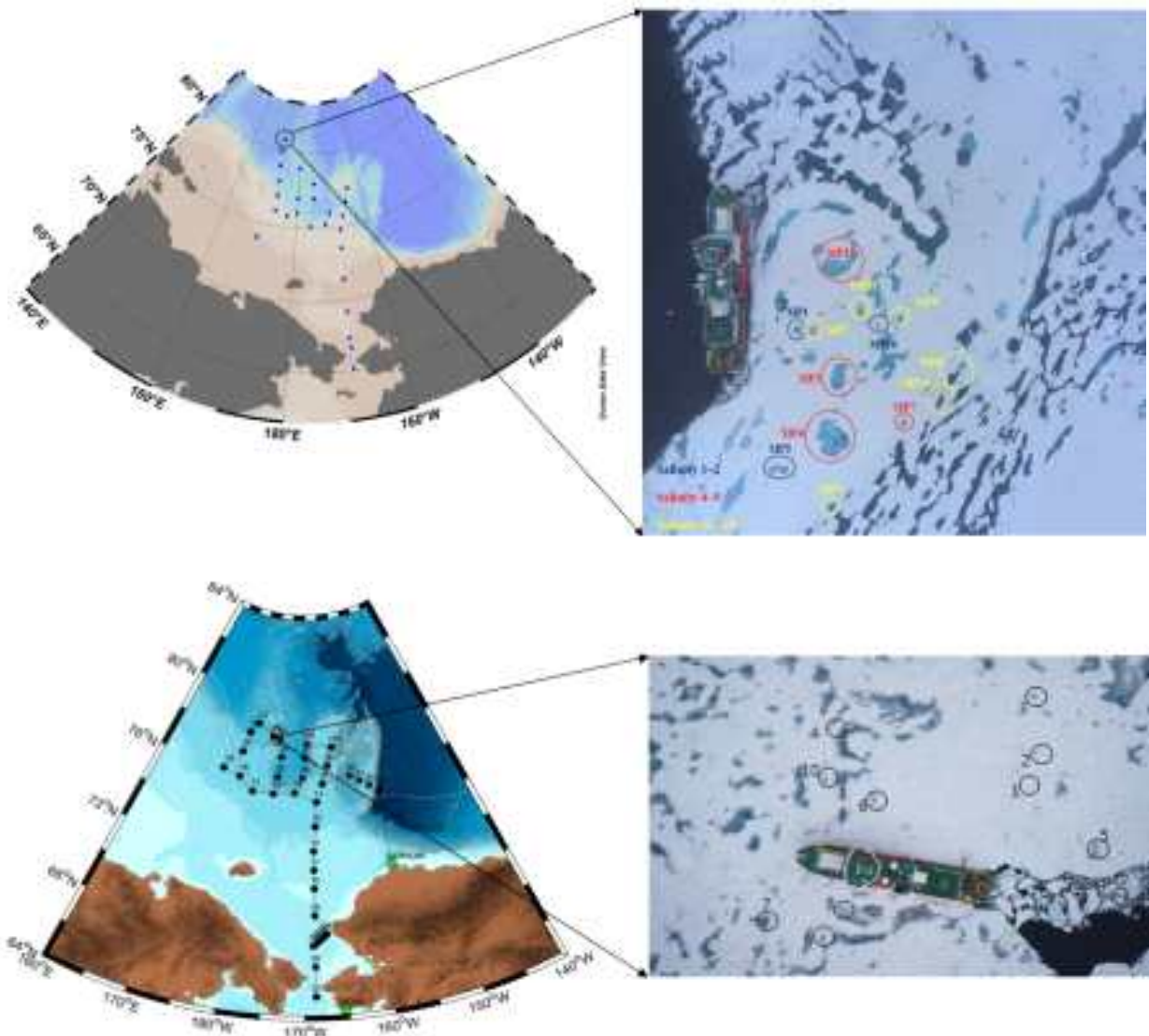
- 최근에는 아미노산의 질소 안정동위원소비를 사용한 질소의 기원 추적 연구가 개발되어 지고 있음. Source amino acid의 질소 안정동위원소비는 생물의 아미노산 중 먹이원과 섭식자 간의 질소 안정동위원소비의 차이가 작은 아미노산을 칭하며, 이를 이용하여 해양의 질소원을 추적하고자 하는 연구가 시도된 바 있음.
- 특히 아미노산의 질소 안정동위원소비를 통한 생물의 영양단계 산출은 생물체 내의 아미노산의 질소 안정동위원소비를 사용함으로, 먹이와 섭식자 간 동위원소비의 차이를 고려할 필요가 없는 것으로 알려져 있음. 그리고 bulk tissue의 질소 안정동위원소비를 이용하여 계산된 영양단계에 비하여 아미노산의 질소 안정동위원소비를 이용하여 계산한 생물의 영양단계가 더 정확한 것으로 보고됨.



2절 국내

- 극지 해양 생태계에 대한 연구는 기존 극지해양연구관련 사업(‘양극해 환경변화 이해 및 활용연구’ 2011~2016, 해양수산부)에서 일부 수행되었으나 해빙 생태계만을 위한 국내 연구는 현재까지 전무함
 - 지금까지 극지연구소에서는 남극 및 북극 해양 종합관측연구가 다수 수행되었으며, 일부 과제에서는 해빙캠프 프로그램을 통하여 melt pond에 대한 연구가 수행되고 있음.
 - 그러나 연구기간 및 연구지역의 특수성으로 인하여 해빙미세조류 대상의 심도 있는 연구는 이루어지지 않았음
 - 인공위성을 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 있으며, 북극해는 아직 본격적인 연구가 수행된 바 없음





[그림 2-1.] '양극해 환경변화 이해 및 활용연구'과제에서 수행된 Sea Ice Camp 조사 지역 및 Melting Ponds 연구지역 (위: 2015년, 아래: 2016년)

제 3장 연구개발수행 내용 및 결과

1절 북극 다산기지 주변 Kongsfjorden marginal ice zone에서의 환경 변화에 따른 해빙생태계의 동물플랑크톤 영양단계 파악 및 미소 먹이 망구조의 역할 파악

1. 연구배경 및 이론

북극해는 일조량의 급격한 계절적 변동으로 인해 상당히 extreme한 환경으로 알려져 왔다. 이러한 계절적 특성은 늦가을에서 겨울 동안 일조량이 급격하게 감소하는 극야 현상을 일으킨다. 이 극야 기간 동안 낮아진 수온으로 인해 해빙이 형성되고, 식물플랑크톤의 일차 생산력은 크게 감소하게 된다. 이 때문에, 북극 해역에서 동물플랑크톤의 over-wintering 전략에 대한 연구가 꾸준히 이루어져 왔다 (Søreide et al., 2008; Kraft et al., 2013). 동물플랑크톤은 종에 따른 특수한 over-wintering 전략을 가지고 있는 것으로 보고된다. Calanoid 요각류와 같은 초식성 동물플랑크톤은 체내에 지질을 축적하여 겨울 동안의 에너지원으로 사용한다 (Conover, 1988). 반면 화살벌레와 같은 육식성 동물플랑크톤은 주로 요각류를 포식하는 것으로 알려져 있는데, 겨울 동안에 이들의 요각류 포식 활동이 감소하지만 꾸준히 유지되는 것으로 보고된다 (Grigor et al., 2014). 잡식성 동물플랑크톤은 계절에 따라 이용하는 먹이원을 바꿀 수 있으며, 이는 곧 이들의 영양 단계가 계절에 따라 달라질 수 있음을 암시한다. 그러나 겨울철 북극해의 sampling이 어려운 문제로 인해, 이와 같은 연구는 대형 동물플랑크톤에서만 연구된 실정이다. 동물플랑크톤의 먹이 전략은 주로 실내 배양 실험, 위 분석법, bulk tissue의 안정동위원소 분석법이 있다. 본 연구에서는 보다 진보한 분석 방법인 아미노산의 질소 안정동위원소 분석 기법을 통해 동물플랑크톤의 영양 단계의 변동을 규명하고자 한다. 이 방법은 생물 시료로부터 추출된 아미노산이 체내에서 각기 다른 대사 과정을 통해 질소 안정동위원소비가 유지되거나, enrich되는 원리에 착안하여 영양 단계를 계산할 수 있다. 영양 단계는 trophic amino acid에 해당하는 glutamic acid와 source amino acid에 해당하는 phenylalanine의 질소 안정동위원소비에 의해 계산될 수 있으며, 기존의 bulk tissue의 질소 안정동위원소비 분석법으로 계산되는 영양 단계에 비해 비교적 정확하다. 또한 먹이원의 별도 채집이 없이, 그리고 생태계 내에 존재하는 질소원이 가진 질소 안정동위원소비의 변동에 상관없이 영양 단계가 계산될 수 있는 이점이 있다.

영양 단계는 생태계 구조의 이해에 대한 도움을 줄 수 있다. 영양 단계의 시,공간적 변화는 생물이 이용하는 먹이원이 달라졌음을 암시한다. 극야 현상에 의해 변화할 수 있는 식물플랑크톤의 abundance의 변화는 이들로 하여금 다른 먹이원을 소비하게 하여, 영양 단계를 변화시킬 수 있는 요인이 될 것이다. 이러한 현상은 주로 잡식성 동물플랑크톤에서 발견되기 쉬울 것으로 생각되며, 식물플랑크톤이 없는 극야 시기에는 원생동물이 주된 먹이원이 되는 것으로 보고

된 바 있다 (Seuthe et al., 2011). 이에 따라, 본 연구에서는 잡식성 동물플랑크톤이 극야 기간에 접어들면서 영양 단계가 증가하고, 수중에 algal diet가 증가하게 되면 영양 단계가 감소할 것으로 가정하였다.

2. 현장 조사

가. 연구해역

북극 Svalbard Kongsfjorden 내만에서 시료 채집을 수행하였으며, 그림 3.1과 표 3.1에 정점도와 위,경도 자료를 제시함. 그림 3.2에는 Ny-Ålesund에서 측정된 일조시간과 태양 고도 자료를 나타내었다.

나. 시료의 채집

가을(2017.10.11.~2017.10.25.)과 봄(2018.04.03.~2018.04.19.), 여름(2019.07.10.~2019.07.12.)에 각 정점에서 현장 조사를 수행하였다. 매 조사마다, 6~10개 정점에서 입자성 유기물 및 동물플랑크톤 시료를 채집하였다. 입자성 유기물은 현장수 500ml~2L를 미리 태워진 GF/F (지름 25mm, 공경 0.7 μ m, Whatman)를 이용하여 여과하였다. 동물플랑크톤은 bongo net(200 μ m mesh size, 50cm diameter, 2.5m length)를 이용하여 50~100m 수심까지 60m/분의 속도로 수직 채집하였다. 동물플랑크톤은 실험실로 옮겨온 후 현미경(LEICA DFC495)을 이용하여 대표종을 동정, 분류하였다. 동정 및 분류 후 요각류(*Calanus spp.*), 화살벌레(*Parasagitta elegans*), 난바다곤쟁이류(*Euphausia*)와 같은 대형 동물 플랑크톤을 확보하여 분석에 사용하였다. 또한, 소형 동물플랑크톤의 영양단계 변동을 확인하기 위해 기존 2017년 10월(1차년도)과 2018년 4월(2차년도)에 채집된 동물플랑크톤 군집 중 *Oithona similis*를 분류하여 분석에 사용하였다.

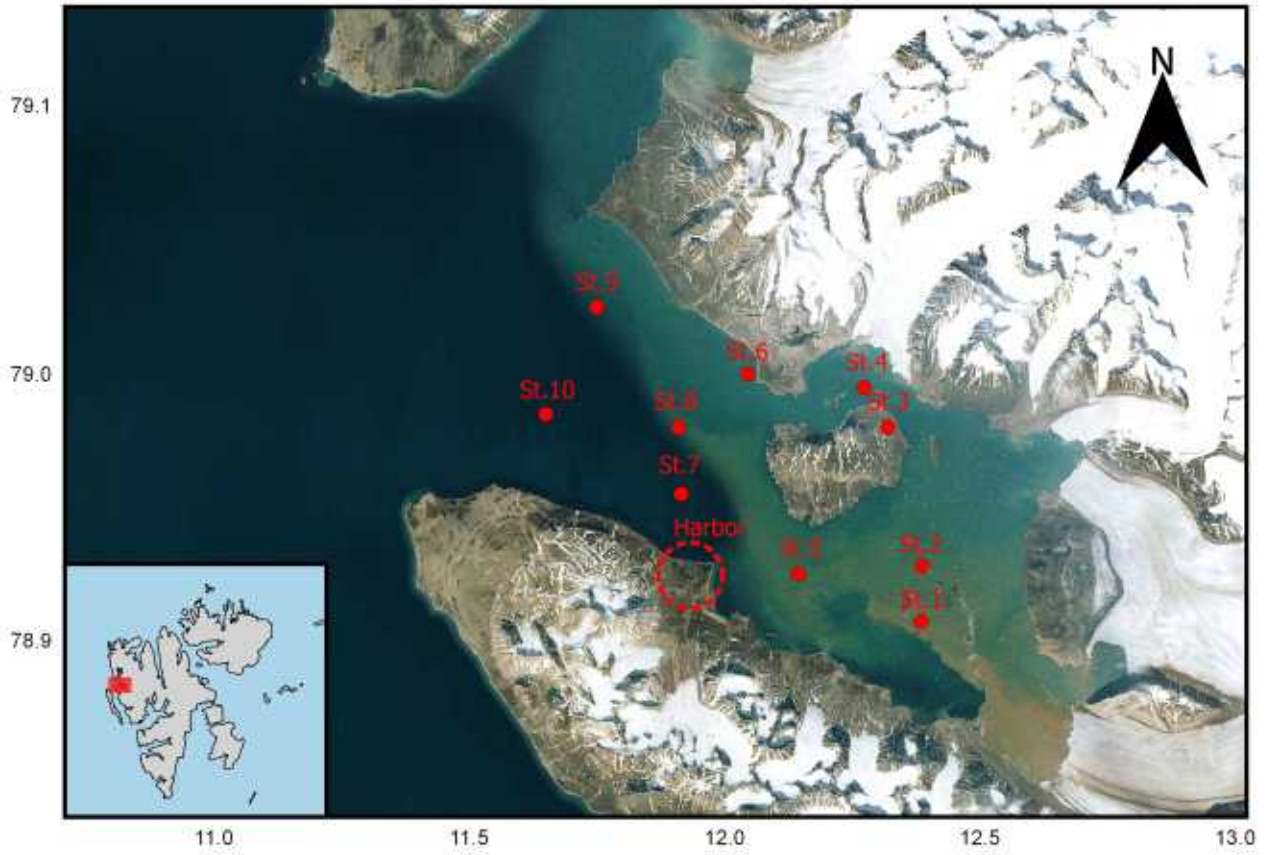


그림 3.1. 북극 Svalbard Kongsfjorden의 연구 정점

표 3.1. 연구 정점의 위도, 경도

Station	Latitude(°N)	Longitude(°E)
st.1	78°54'42.00"	12°23'10.00"
st.2	78°55'68.00"	12°23'22.00"
st.3	78°58'80.00"	12°19'20.00"
st.4	78°57'26.30"	12°14'14.10"
st.5	78°55'50.00"	12°08'70.00"
st.6	77°00'08.40"	11°53'58.70"
st.7	78°57'30.00"	11°54'90.00"
st.8	78°58'80.00"	11°54'60.00"
st.9	79°01'50.00"	11°45'00.00"
st.10	78°59'10.00"	11°39'00.00"
Harbor	78°55'72.70"	11°56'13.70"



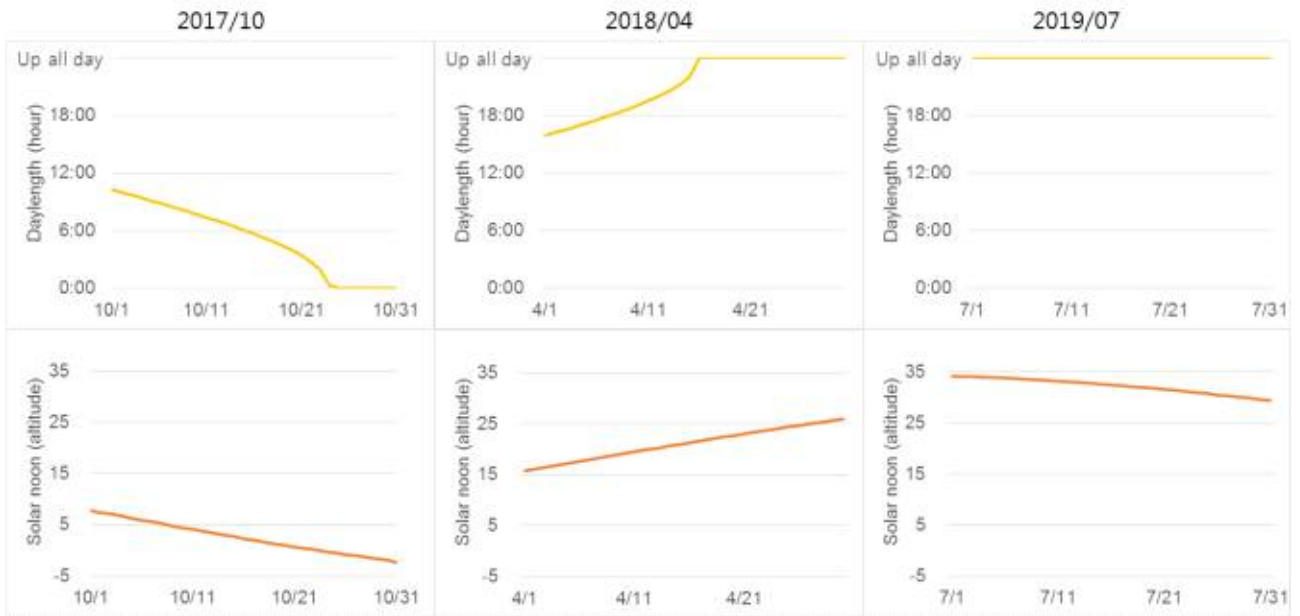


그림 3.2. 2017년 10월(1차년도), 2018년 04월(2차년도), 2019년 07월(3차년도) Ny-Ålesund에서 측정된 일조시간(상단)과 태양 고도(하단) 자료.

(출처: <https://www.timeanddate.com/sun/norway/ny-alesund>)



3. 실험 및 분석

가. 입자성 유기물의 탄소 및 질소 안정동위원소비 분석

입자성 유기물 시료는 12M HCl 증기를 이용하여 24시간 동안 무기탄소 제거를 진행하였다. 이후 각 시료는 tin cap에 넣어 EA/IRMS (vario EL cube, elementar/Isoprime 100, GV instruments)를 이용하여 탄소 안정동위원소를 분석하였다. 단, 질소 안정동위원소 분석의 경우 무기탄소 제거 과정을 거치지 않은 시료를 사용하였다. 분석값의 정확성을 확인하기 위해 탄소 및 질소 안정동위원소가 알려진 표준 물질 (CH-3, IAEA / N-1, IAEA)을 약 10개 시료 분석 시마다 분석하였다. 분석 기간 중 표준 물질의 안정동위원소 분석값의 오차는 0.3‰ 미만으로 나타났으며, 입자성 유기물 시료는 각 3회 반복 측정하였다.

나. 아미노산 질소 안정동위원소비 분석

채집된 동물플랑크톤 시료는 총 10개 정점 중 Kongsfjorden의 내측(st.1), 중간(st.7), 외측(st.10)에 해당하는 3개 정점을 선정하여 전처리 및 분석을 진행하였다.

포르말린에 보관된 동물플랑크톤 시료는 증류수로 세척하여 사용하였고, 냉동 보관된 동물플랑크톤 시료는 동결건조 후 실험에 사용하였다. 습중량 기준 4~10mg, 건중량 기준 2~6mg에 해당하는 동물플랑크톤 시료를 5ml V-vial에 넣어 6M HCl 1ml를 첨가한 후, 110°C에서 12~24시간 동안 가수분해를 실시하였다. 가수분해가 끝난 시료는 냉각시킨 후 PTFE membrane filter (공경 0.2 μ m)를 이용하여 입자 물질을 제거하여 새로운 V-vial로 이동시킨 후, 6:5 n-hexane/dichloromethane(v/v)를 이용하여 시료 내의 지질 및 소수성 성분을 제거하였다.

아미노산을 기체 크로마토그래피에서 분석하기 위해, 아미노산의 휘발성을 높이는 유도체화 반응을 거치게 된다. 시료를 건조시킨 후, 1:4 thionyl chloride/2-propanol(v/v) 1ml를 첨가한 후 110°C에서 2시간 동안 esterification을 진행하였다. 반응이 끝난 시료는 냉각시킨 후, reagent를 제거한 다음 1:4 pivaloyl chloride/dichloromethane(v/v) 1ml를 첨가한 후 110°C에서 2시간 동안 pivaloylation을 진행하였다. 시료를 냉각시킨 후, reagent를 제거한 다음 1ml 증류수와 1~2ml 6:5 n-hexane/dichloromethane(v/v)를 이용하여 층분리하여 상등액을 옮겨 건조시켰다. 아미노산 유도체는 50~100 μ l의 dichloromethane에 용해시킨 후 분석 전까지 -20°C에서 보관하였다.

아미노산의 질소 안정동위원소비는 GC/IRMS (Agilent 6890N / Isoprime 100, Isoprime, UK)를 이용하여 분석하였다. 산화관은 산화구리, 산화니켈, 백금 와이어가 충전된 석영관을 950°C에서, 환원관은 구리 와이어가 충전된 세라믹관을 500°C에서 사용하였다.

분석값의 정확성을 확인하기 위해 질소 안정동위원소비가 알려진 8종류의 아미노산 표준 물질 (alanine, glycine, valine, leucine, norleucine, aspartic acid, methionine, glutamic acid, phenylalanine, SHOKO-Science 및 Indiana University에서 구매)을 4~5개 시료 분석 시마다 분석하였다. 분석 기간 중 표준 물질의 평균 오차는 1‰ 미만으로 나타났다.

다. 동물플랑크톤의 영양 단계 산출

영양 단계(Trophic Position, TP)는 Chikaraishi et al (2009)에 의해 고안된 식으로 계산하였다.

$$TP = [(\delta^{15}N_{Glu} - \delta^{15}N_{Phe} - 3.4) / 7.6] + 1$$

$\delta^{15}N_{Glu}$ 와 $\delta^{15}N_{Phe}$ 는 각각 glutamic acid와 phenylalanine의 질소 안정동위원소비를 나타내며, 3.4‰(β value)은 1차 생산자의 $\delta^{15}N_{Glu}$ 와 $\delta^{15}N_{Phe}$ 의 차이를 나타내는 경험값이 사용되었다. 또한 7.6‰(Trophic Enrichment Factor, TEF)은 영양 단계의 상승 시 $\delta^{15}N_{Glu}$ 와 $\delta^{15}N_{Phe}$ 의 enrichment의 차이를 나타내는 경험값이 사용되었다.



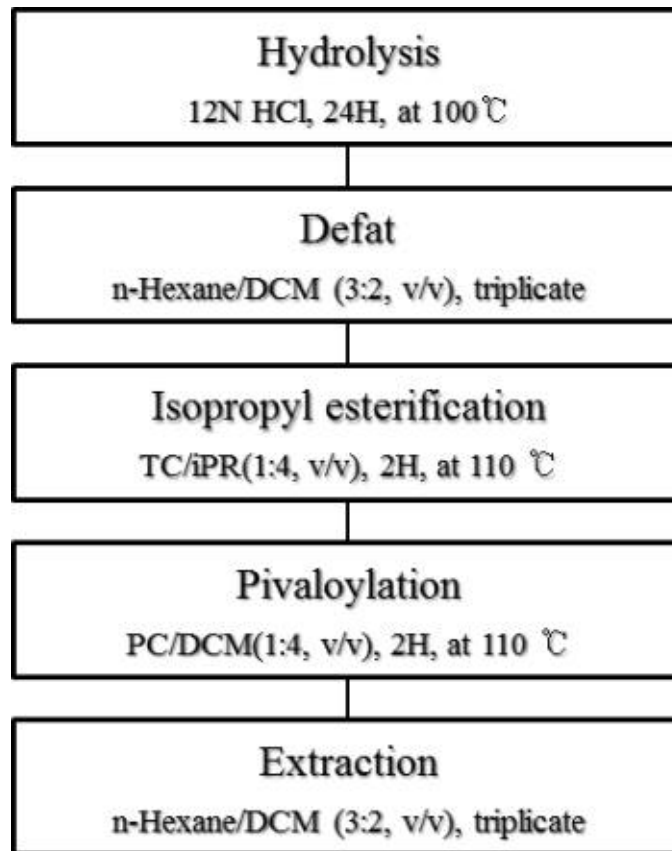


그림 3.3. 아미노산 질소 안정동위원소 분석을 위한 시료의 전처리에 대한 flow chart

극지연구소

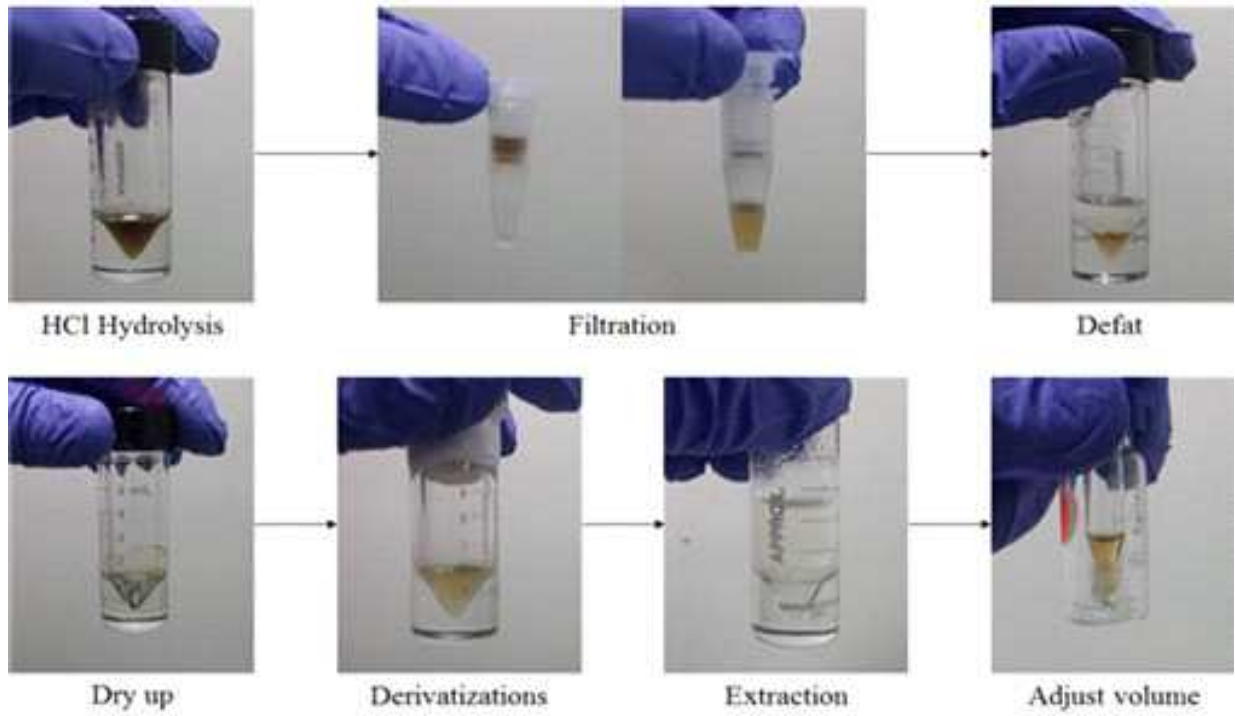


그림 3.4. 아미노산 질소 안정동위원소비 분석 전처리



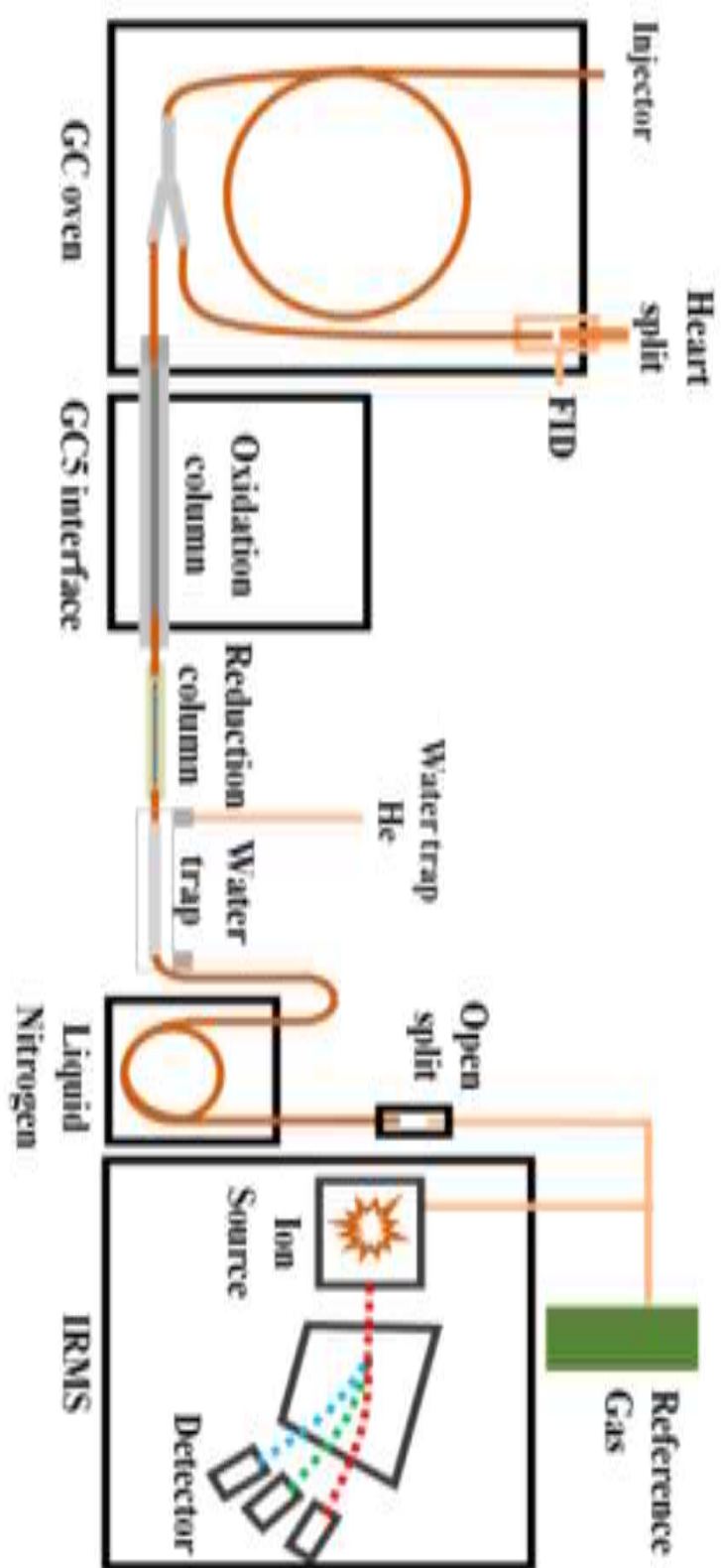


그림 3.5. 아미노산 질소 안정동위원소 분석에 사용되는 GC/IRMS의 모식도

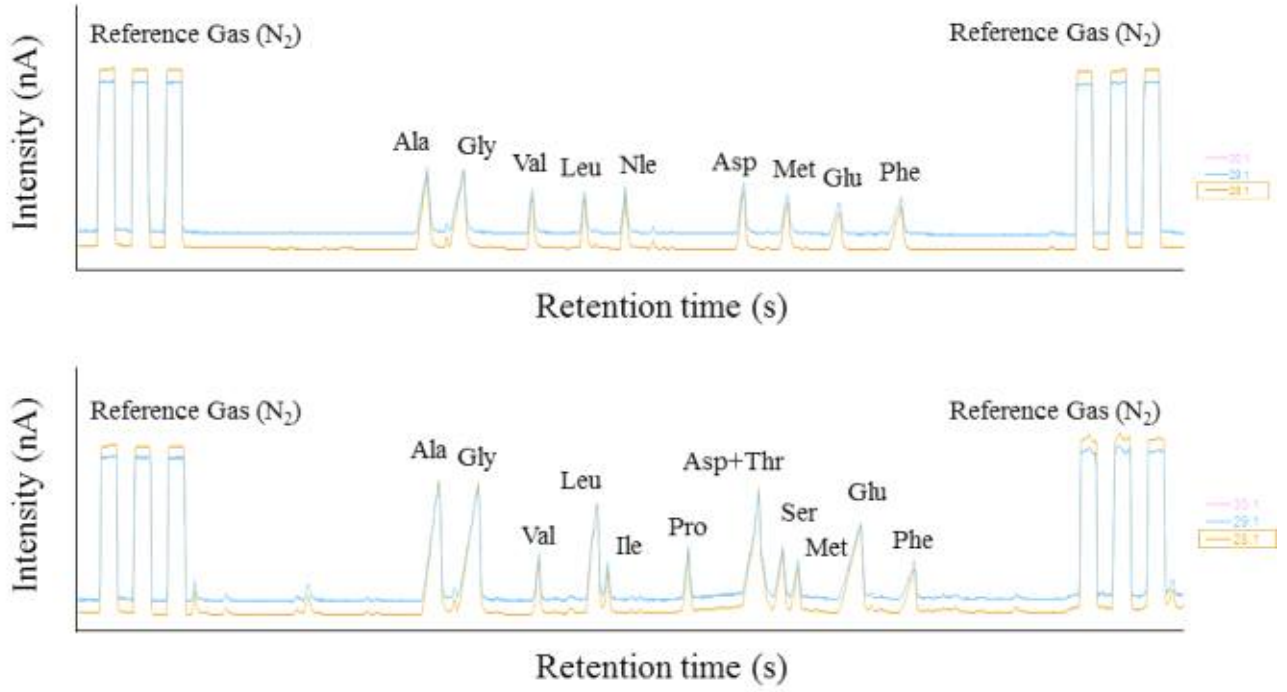
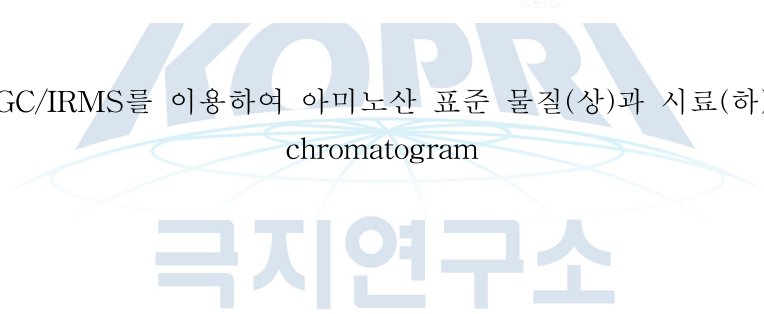


그림 3.6. GC/IRMS를 이용하여 아미노산 표준 물질(상)과 시료(하)를 분석한 chromatogram



4. 연구 결과 및 해석

가. 입자성 유기물의 탄소 및 질소 안정동위원소비 해석

표 3.2. 각 정점의 입자성 유기물 시료의 탄소 및 질소 안정동위원소비

	Fall (2017.10)		Spring (2018.04)	
	$\delta^{13}\text{C}(\text{‰})$	$\delta^{15}\text{N}(\text{‰})$	$\delta^{13}\text{C}(\text{‰})$	$\delta^{15}\text{N}(\text{‰})$
st.1	-33.86±1.17	2.72±0.37	-33.66±0.44	6.12±1.20
st.2	-34.17±0.56	4.23±0.45	-33.81±0.68	6.13±1.32
st.4	-32.99±0.48	2.95±0.73	-33.04±0.87	6.23±1.07
st.5	-29.94±0.77	2.64±0.80	-33.43±0.17	6.19±1.47
st.7	-27.98±0.83	1.80±0.57	-30.75±1.00	5.22±1.16
st.8	-28.27±0.74	2.05±0.23	-32.05±0.80	6.03±1.15
st.9	-31.24±0.38	2.45±0.91	-29.72±0.36	5.61±1.20
st.10	-28.87±0.48	1.48±0.22	-31.44±0.65	5.20±0.58

표 3.3. 각 정점의 C/N ratio

	Fall (2017.10)	Spring (2018.04)
st.1	15.97	19.02
st.2	13.54	17.11
st.4	8.23	13.55
st.5	8.81	15.63
st.7	7.58	12.78
st.8	9.10	16.87
st.9	11.38	13.28
st.10	9.95	12.07

표 3.2에 각 정점의 입자성 유기물의 탄소 및 질소 안정동위원소비, 표 3.3에 각 정점의 C/N ratio를 정리하였다. 가을과 봄에 채집된 입자성 유기물의 탄소 안정동위원소비는 전반적으로 가벼운 분석값을 나타내었으며, 탄소 안정동위원소비와 C/N ratio를 통해 눈, 얼음, 바람 등을 매개로 한 육상 기원의 유기물이 크게 기여하였을 것으로 추측할 수 있다. 입자성 유기물의 질소 안정동위원소비는 가을에 비해 봄에 전반적으로 무거운 것으로 확인되었다. 이를 통해 가을과 봄에 Kongsfjorden으로 유입되는 질소원들의 조성이 다른 것으로 생각할 수 있다.

나. 동물플랑크톤의 영양 단계 해석

표 3.4. 2017년 10월(가을)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>	Copepoda	st.1	20.63	4.12	2.72
		st.7	20.51	6.01	2.46
		st.10	19.67	3.79	2.64
<i>Oithona similis</i>	Copepoda	st.1	25.25	7.57	2.88
		st.7	26.01	8.90	2.80
		st.10	22.08	4.40	2.88
<i>Parasagitta elegans</i> (>20mm)	Chaetognaths	st.1	22.39	3.07	3.09
		st.7	23.76	2.98	3.29
		st.10	23.55	4.62	3.04
<i>Parasagitta elegans</i> (<20mm)		st.1	22.82	4.31	2.99
		st.7	23.24	3.29	3.18
		st.10	24.51	5.04	3.12
<i>Meganycitiphanes norvegica</i>	Euphausia	st.3	23.40	3.34	3.19
<i>Themisto abyssorum</i>	Amphipoda	Harbor	26.70	3.98	3.54

표 3.5. 2018년 4월(봄)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>	Copepoda	st.1	21.58	3.38	2.95
		st.7	20.93	3.74	2.81
		st.10	19.07	2.94	2.67
<i>Oithona similis</i> (2018.04)	Copepoda	st.1	15.35	1.75	2.34
		st.7	15.82	2.99	2.24
<i>Parasagitta elegans</i> (>20mm)	Chaetognaths	st.1	23.60	3.47	3.18
		st.7	24.02	5.90	2.94
		st.10	25.11	5.98	3.07
<i>Parasagitta elegans</i> (<20mm)		st.1	23.96	3.27	3.27
		st.7	23.30	3.39	3.17
		st.10	24.42	5.29	3.07
<i>Thysanoessa sp.</i>	Euphausia	st.4	25.08	3.77	3.36
		st.7	23.66	5.25	3.02
		st.10	25.18	4.13	3.32

표 3.6. 2019년 7월(여름)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>	Copepoda	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>	Chaetognaths	st.1	25.93	7.46	2.98
		st.7	25.32	4.74	3.26
		st.10	24.23	5.10	3.07
Euphausia sp.	Euphausia	st.1	21.35	2.65	3.01
		st.7	21.26	4.98	2.70
		st.10	18.67	0.79	2.91



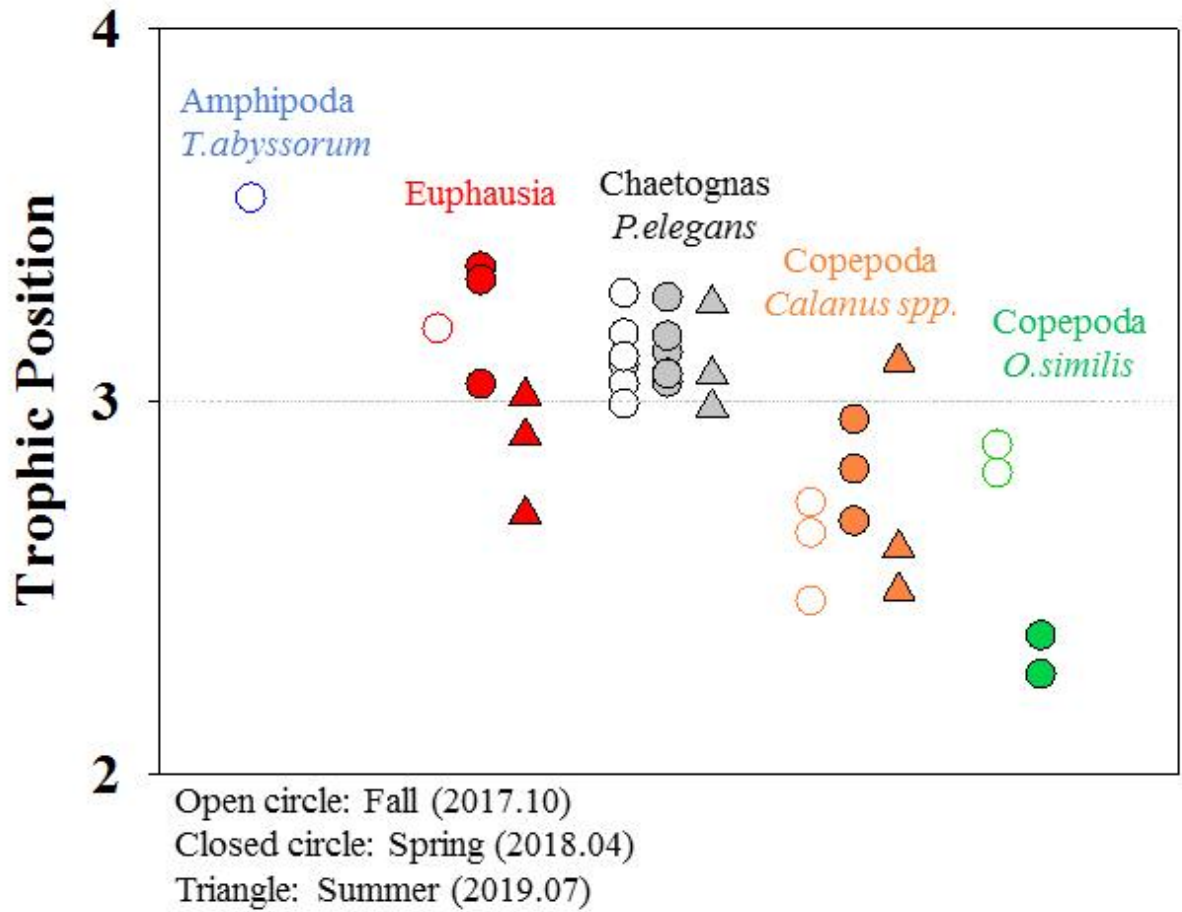


그림 3.7. 2017년 10월(1차년도), 2018년 04월(2차년도), 2019년 07월(3차년도)에 채집된 동물플랑크톤의 영양 단계. 단, 난바다곤쟁이류(*Euphausia*)의 경우 각 조사 시기마다 다른 종이 출현하였다.

표 3.4와 3.5, 3.6에 각각 가을과 봄, 여름에 채집된 동물플랑크톤의 아미노산 질소 안정동위원소비 분석 결과 및 영양 단계를 나타내었고, 그림 3.7에는 각 동물플랑크톤들의 영양 단계를 나타내었다.

채집된 동물 플랑크톤들에서 초식성 동물플랑크톤은 발견되지 않았으며, 잡식~육식성의 영양 단계를 확인할 수 있었다.

2019년 7월에 분석된 *Calanus spp.*는 3개 정점에서의 평균 영양 단계가 2.73 ± 0.33 으로 해당 시점에서 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 단계가 나타났다. 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 시사한다. *P.elegans*는 3개 정점에서의 평균 영양 단계가 3.10 ± 0.14 로 *Calanus spp.*에 비해 비교적 낮은 표준 편차를 나타내었다. *Euphausia*는 3개 정점에서의 평균 영양 단계가 2.87 ± 0.16 으로 잡식~육식 사이의 영양 단계로 확인되었다.

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 유입되는 것으로 알려져 있다 (Hop et al., 2002., Kwasniewski et al., 2003). 이들은 수괴에 따라 대서양에서 *C. finmarchicus*가, 북극해에서 *C. glacialis*, *C. hyperboreus*가 유입되는 경향이 있나타난다 (Walkusz et al., 2009).

본 연구에서 분석된 *Calanus spp.*의 경우 가을보다 봄에 영양 단계가 높은 것이 확인되었으며, st.7에서 가장 큰 상승폭을 보였다. *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 나타내었다. 이는 bloom 이전에 식물성 먹이원이 제한적으로 존재했기 때문에 상대적으로 동물성 먹이원을 많이 섭식한 결과로 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). *Calanus spp.*는 여과 섭식을 하는 요각류로 알려져 있어서, 현장의 이용 가능한 크기의 먹이원 혹은 입자의 조성에 따라 영양 단계가 달라지는 것으로 사료된다. 조사 시기 사이에 겨울이 존재하는 2017년 10월과 2018년 04월 사이에서도 *Calanus spp.*의 영양 단계는 통계적으로 유의한 차이를 보이지 않았다(t-test,

p=0.14, 유의수준 0.05). *Calanus spp.*는 over-wintering 동안 체내에 저장된 wax ester를 소모하며 생존하는 것으로 알려져 있으며 먹이 활동은 하지 않는 것으로 보고된다 (Falk-Petersen et al., 2007, Scott et al., 2000). 따라서 이들의 2017년 10월과 2018년 04월 사이의 영양 단계 변화는 크게 나타나지 않는 것으로 보이지만, 먹이원의 종류나 양이 다양해질 수 있는 여름철에는 영양 단계 또한 다양하게 나타날 수 있는 것으로 생각할 수 있다.

*P.elegans*는 체장에 따른 영양 단계의 차이는 확인되지 않았으며, 두 조사 시기에서 모두 일정한 영양 단계 분포를 나타내었다. 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. *P.elegans*의 영양 단계는 2017~2018년과 2019년 사이에서 유의미한 차이가 발견되지 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. 이들은 over-wintering 중에 먹이 활동이 감소하지만 요각류를 꾸준히 섭식하는 것으로 보고되며(Grigor et al., 2014), 2017년 10월과 2018년 4월 사이에 영양 단계의 변화는 확인되지 않았다. 또한 동물플랑크톤의 abundance가 높고 유생 등의 종 다양성이 증가하는 여름철에도 영양 단계가 변하지 않은 것을 고려하면, *P.elegans*의 먹이 선택성이 높은 것으로 추측된다.

*Euphausia*는 가을과 봄에 서로 다른 종이 발견되었으나, 이들의 영양 단계는 유사하게 나타났다. 또한 *Tabyssorum*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).

단각류(Amphipoda)의 경우 2017년 10월에만 채집되었고, 난바다곤쟁이류(*Euphausia*)는 공통적으로 육식성의 영양 단계를 보였으나, 매 조사 시기마다 다른 종이 출현하였기 때문에 시기에 따른 영양 단계를 비교할 수 없었다. 이들의 유사종이 가진 영양 단계가 Wold et al (2011)에서 잡식성으로 보고되었으나, 해당 연구에서 사용된 동물플랑크톤은 여름철에 채집된 개체들이었기 때문에 본 연구결과와 직접적인 비교가 불가능하였다.

각 동물플랑크톤의 $\delta^{15}\text{N}_{\text{Phe}}$ 는 정점에 따라 유의한 차이를 보이지 않았으며, 각 분류군에 따른 차이 또한 발견되지 않았다.

두 조사 시기의 *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 생각된다(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 시기에

서의 먹이원 구성이 상이한 것으로 생각할 수 있다. 일조 시간이 5시간 가량으로 상대적으로 짧았던 2017년 10월 조사 시기에 비해 2018년 04월 조사 시기는 약 20시간의 일조 시간을 보이기 때문에 (그림 3.2), algal diet의 기여도가 높아짐에 따라 영양 단계는 감소한 것으로 추측할 수 있다. *O.similis*의 주된 먹이원은 ciliate 혹은 heterotrophic dinoflagellate, 그리고 diatom으로 보고되어 왔으며 (Atkinson, 1996, Atienza et al., 2006, Pond and Ward, 2011, Zamora-Terol et al., 2013), algal diet가 적을 것으로 생각되는 2017년 10월에는 위와 같은 먹이원을 섭식함에 따라 영양 단계가 증가했을 가능성이 있다. 이들은 다른 동물플랑크톤과는 달리 정해진 산란기가 없고, 해가 뜨지 않는 겨울철에도 번식 활동을 계속하는 것으로 보고되기 때문에 (Berge et al., 2015). 연중 이용 가능한 먹이원을 꾸준히 섭식한 것이 영양 단계에 반영된 것으로 생각된다.



2절 Cambridge Bay 및 Coral Harbor에서 해빙생태계 탄소흡수율 측정

1. 연구배경 및 이론

해빙에 존재하는 해빙 조류는 작은 동물플랑크톤부터 해양 포유류 그리고 조류들까지 북극 해양 먹이사슬에 중요한 먹이원을 제공 한다 (Søreide and others, 2010; Daase and others, 2013; Van Leeuwe and others, 2018; others therein). 북극해의 총 1차 생산에 대한 해빙 미세 조류의 기여도는 지역적으로 1%부터 60%까지 변하는 것으로 보이지만 (Gosselin and others, 1997; Lee and others, 2015; Song and others, 2016) 해빙 조류의 일차생산은 그들의 bloom 패턴과 생물량이 주로 해빙 바닥에 고 농도로 집중되어 있다는 관점에서 북극 해양 생태계에서 생태학적으로 중요할 수 있다 (Lee and others, 2011; Lue and others, 2015). 해빙 조류의 bloom은 일반적으로 초여름 식물플랑크톤의 bloom에 앞서 발생 한다 (Apollonio, 1965; Legendre and others, 1992; Michel and others, 1996; Lee and others, 2008; Leu and others, 2015; Tedesco and others, 2019). 해빙 조류의 봄·가을 bloom은 북극해에서 겨울을 보내는 부유성 섭식생물들의 생산 시기를 연장 시킨다 (Michel and others, 1996; Lee and others, 2008; Lee and others, 2011; Fernández-Méndez and others, 2014). 또한 대부분 구조류로 구성된 해빙 조류 군집이 sumpagic 초식 동물들의 알의 부화와 유충의 발달과 같은 성공적인 알 생산을 위해 필수적인 high-quality polyunsaturated fatty acids (PUFAs)를 함유하고 있다 (Leu and others, 2010).

해빙에서 관측되는 다양한 조류 군집들 중 해빙 바닥에 존재하는 조류 군집은 일반적으로 북극해의 landfast ice에서 가장 생산적이다 (e.g., Smith and others, 1987; Renaud and others, 2007; Lee and others, 2008; Campbell and others, 2016). 해빙 조류의 90% 이상의 chlorophyll-a (chl-a)가 landfast sea ice의 바닥 3~5 cm 구간에 집중되어 있다 (Smith and others, 1990; Lee and others, 2008; Lee and others, 2010; Campbell and others, 2016).

북극해에서 해빙 상태에 대한 최근의 변화들은 해빙과 관련된 생물들에게 긍정적이거나 부정적인 영향을 미칠 수 있다 (Barber and others, 2015; Tedesco and others, 2019). 북극에서 강수의 증가와 눈이 녹는 시기가 빨라진다고 예상됨에 따라 (Lynch and others, 2004) 해빙 조류의 봄철 bloom 시기와 길이를 변화시킬 수 있다 (Lavoie and others, 2005; Lee and others, 2008). 그러나 해빙과 눈 조건의 변화들에 대한 해빙 조류의 반응은 위도에 따라 다양할 수 있다 (Castellani and others, 2017; Tedesco and others, 2019). 북극해에서 해빙 조류의 생산에 대한 현장 관측 자료의 부족으로 과거부터 해빙으로 덮여있던 지역에 대한 환경변화가 해빙 미세조류에 어떠한 미치는 영향을 미치고 있는지 이해하는데 어려움을 겪고 있다 (Gradinger and others, 2009; Lee and others, 2010). 따라서 본 연구의 목적은 landfast sea ice zone에서 환경 특성을 알아보는 것과 해빙조류의 일차생산을 측정 하는 것이며 또한 해빙조류의 거대분자 조성의 특징을 분석하는 것이다.

2. 현장 조사

가. 연구해역

2017년 4월 26일부터 5월 12일 까지 그리고 2018년 4월 7일부터 4월 26일 까지 캐나다의 북극권에 위치한 Finlayson islands 근처의 first year sea ice zone에서 해빙 및 해수 샘플을 수집했다. 환경적 특징, 생물량 및 탄소 흡수율의 공간적 차이를 고려하여 4개의 샘플링 지점을 Dalman and others (2019)의 연구에 기반 하여 선택했다. 연구 지역은 Cambridge bay로부터 약 33km 거리에 있다 (그림 3.8, 그림 3.9). 그리고 2019년 5월 4일부터 6월 1일 까지 캐나다의 북극권에 위치한 Coral Harbour의 first year sea ice에서 해빙 및 해수 샘플을 수집했다 (그림 3.10).

나. 시료 채집

해빙 아래에서 transmitted spectral irradiance를 측정하기 위해 hyperspectral cosine sensor (Satlantic HyperOCR)를 사용했다. 센서는 지름이 25cm인 오거홀을 통과하여 남쪽으로 1.5m 거리에 위치시켰으며 빛의 간섭을 최소화 하기 위해 오거홀을 눈으로 덮었다. 광합성 유효 방사를 측정하기 위해 Spectral irradiance는 400-700 nm 파장 대의 값을 적분한 값을 사용했다. 빛 측정 결과는 2017년에만 제시되어 있다. 눈 두께는 해빙 코어를 추출한 주변에서 최대 10회 반복 측정하였다. 해빙 샘플들은 Mark II Kovacs core barrel (inner diameter = 9 cm)를 이용해 추출했다. 해빙 두께는 해빙 코어를 추출한 뒤 측정하였다. 해빙 바닥의 10 cm 구간을 잘라 지퍼백에 넣은 뒤 냉암소에 보관하여 실험실로 이동했다. 해빙 샘플들은 2개씩 함께 냉암소에서 천천히 녹였다. 해수샘플은 오거홀을 이용하여 확보했으며 해빙코어 샘플들과 마찬가지로 냉암소에 보관하여 실험실로 이동했다. 해빙이 녹은 뒤 YSI model 30 salinity meter (YSI, Yellow Springs, Ohio)를 이용하여 염분을 측정했으며 해수 샘플 또한 동일한 장비를 이용해서 염분 측정을 수행했다. 영양염 분석을 위해 GF/F filters (nominal pore size = 0.7 μm)로 여과한 각각의 샘플들을 용기에 담에 냉동보관하였다.\

3. 실험 및 분석

가. Chlorophyll a 분석

총 chl-a 농도는 Whatman glass fiber 여과지 (GF/F, 0.7 μm , 25 mm)를 이용해 해수와 해빙 시료를 여과하였다. 크기별 chl-a 농도를 위한 해수 시료는 Nucleopore 여과지 (20, 2 μm , 47 mm)로 순차적으로 여과한 후, GF/F 여과지 (0.7 μm , 47 mm)로 여과하였다. 연구기간 동안의 chl-a 샘플은 냉동실에 보관한 후, 실험실에서 아세톤을 통해 추출한 후 10-AU fluorometer를 이용하여 분석하였다. 위에 제시된 분석들과 계산은 Parsons et al. (1984)에 기초하여 수행하였다.

나. 해빙 미세조류와 식물플랑크톤의 탄소흡수율 측정

해빙 코어를 추출한 즉시 바닥의 10 cm 부분을 자른 뒤 배양병에 담은 후 400 ml의 여과 해수를 넣었다. 그리고 Lee and others (2008)에 따라 $\text{NaH}^{13}\text{CO}_3$ 을 주입했다. 최종 탄소 흡수율에 대해 주입한 여과해수의 부피에 대한 보정을 수행하였다. 여과해수와 동위원소의 주입을 마친 배양병은 오거홀을 이용하여 원래 해빙이 위치했던 곳에서 3-4 시간가량 배양 했다. 배양을 마친 후 배양병을 즉시 냉암소에 보관하였고 실험실에서 수 시간에 걸쳐 완전히 녹였다. 샘플이 완전히 녹은 후 해빙 조류의 탄소 흡수율을 알아보기 위해 GF/F 여과지 (25 mm)에 여과하였다. 여과지는 질량 분석 전까지 $-80\text{ }^\circ\text{C}$ 에 즉시 보관하였다. 샘플의 탄산염을 제거하기 위해 24 시간 동안 염산을 이용해 fume을 한 후, 미국 Alaska Stable Isotope Facility의 Finnigan Delta+XL mass spectrometer를 이용하여 입자성 유기탄소 (POC)와 $\delta^{13}\text{C}$ 의 값이 분석되었다. 식물플랑크톤의 경우 오거홀에서 수집한 해수 샘플을 배양병에 담아 해빙 코어 샘플과 마찬가지로 동위원소를 주입 후 로프에 부착시킨 뒤 해빙 아래 1 m에 위치 시켜 3-4 시간가량 배양을 수행했다. 이후 여과 및 샘플 처리 과정은 해빙코어 샘플과 동일하다. 해빙 조류와 식물플랑크톤의 탄소 흡수율은 Hama and others (1983)의 방법에 따라 계산되었다.

다. 식물플랑크톤의 거대 분자 조성 측정 방법

식물플랑크톤의 거대분자조성을 분석하기 위해 녹은 해빙과 해수 샘플의 각각의 생화학적 구성성분은 GF/F (47 mm) 필터지에 여과한 다음 즉시 냉동 보관하였고 실험실에서 분광계 분석 전까지 보관되었다. 해빙 조류와 식물플랑크톤을 함유하고 있는 필터지는 균질기를 이용하여 균질화 되었고 각각의 생화학적 구성성분의 농도가 측정되었다 (Kim et al., 2015). 총 단백질 함유량은 Lowry method (1951)에 의해 측정 되었고 총 지질의 추출을 위해서 1:2 (vol) chloroform-methanol 혼합액이 사용되었다. 총 지질 함유량은 sulfo-phospho-vanillin (SPV) reaction (Bligh and Dyer, 1959; Marsh and Weinstein, 1966)에 의해 측정되었다. 탄수화물 함유량은 Dubois et al. (1956)의 phenol-sulfuric method를 따라 측정되었다.

4. 연구 결과 및 해석

가. 환경조건

2017년의 연구 기간 동안 눈과 해빙의 두께의 평균은 각각 4 ± 1 cm 와 149 ± 17 cm로 나타났다. 일반적으로 st.1에서 해빙의 두께가 다른 조사 정점들에 비해 얇았다. 녹은 해빙과 해수 샘플의 평균 염분은 각각 7.4 ± 2.6 와 26.7 ± 2.5 로 측정되었으며 연구 기간 동안 변동의 폭이 작았다 (표 3.7). 2018년의 경우 연구기간 동안 눈의 두께는 4.1-23.4 cm (9.7 ± 4.9 cm)로 나타났다. 각각의 정점에서 보인 평균 눈 두께는 B1에서 19.4 cm (± 5.7), R3에서 14.0 cm (± 6.4 cm), st.1에서 6.5 cm (± 2.2 cm), st.3에서 6.9 cm (± 1.0 cm), st.4에서 10.8 cm (± 1.6 cm)로 나타났다. 연구 기간 동안 해빙의 두께는 119.0-168.0 cm (143.8 ± 17.1 cm)의 두께 범위를 보였다. 각각의 정점에서 보인 평균 해빙 두께는 B1에서 138.4 cm (± 12.2 cm), st.1에서 125.5 cm (± 4.6 cm), st.3에서 157.2 cm (± 2.0 cm), st.4에서 164.5 cm (± 5.7 cm)으로 계산되었다. 2017년도의 결과와 마찬가지로 해빙 두께는 st.1에서 st.4로 갈수록 두꺼워지는 모습을 보였다. 연구 기간 동안 해빙 바닥 10 cm 구간을 녹인 샘플과 표층 해수에서 측정한 염분의 범위는 각각 5.2-6.9 (6.23 ± 0.41)과 2.71-31.5 (28.13 ± 1.11)로 나타났으며 이는 2017년의 결과와 유사했다 (표 3.8). 2019년 Coral Harbour에서 연구기간 동안 site A, site C, site F에서 측정한 눈 두께는 각각 13-29 cm (21 ± 6 cm), 10-23 cm (17 ± 5 cm), 7-21 cm (16 ± 5 cm)로 나타났다. 또한 해빙 두께는 site A, site C, site F에서 각각 151-164 cm (159 ± 5 cm), 147-161 cm (155 ± 5 cm), 123-142 cm (135 ± 7 cm)로 나타났다. 해빙의 평균 두께는 내만에 위치한 site A에서 가장 두꺼웠으며 해빙 가장자리에 위치한 site F에서 가장 얇았다. 연구기간 동안 site A, site C, site F의 해빙 코어의 바닥 10 cm 구간을 녹여 측정한 염분은 각각 6-9 (8 ± 1), 4-8 (6 ± 2), 4-8 (6 ± 2)로 나타났다. 표층 해수의 염분은 site A, site C, site F에서 32-34 (33 ± 1)로 나타났다 (표 3.9).

2017년 해빙 아래에서 측정된 빛의 세기는 15.5 에서 $48.4 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ($29.3 \pm 8.1 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)의 범위를 보였다 (표 3.7). 녹은 해빙 샘플에서 측정된 ammonium, nitrate+nitrite, phosphate, silicate의 평균 농도는 각각 $1.13 \pm 0.33 \mu\text{M}$, $1.79 \pm 0.42 \mu\text{M}$, $1.14 \pm 0.36 \mu\text{M}$, $2.18 \pm 0.72 \mu\text{M}$ 이었다 (그림 3.11). 표층 해수에서 측정된 ammonium, nitrate+nitrite, phosphate and silicate의 평균 농도는 각각 $0.96 \pm 0.83 \mu\text{M}$, $2.96 \pm 0.50 \mu\text{M}$, $0.74 \pm 0.11 \mu\text{M}$, $7.31 \pm 1.38 \mu\text{M}$ 이었다 (그림 3.12). 전반적으로 높은 phosphate농도가 해빙 바닥에서 관측된 반면에 nitrate+nitrite와 silicate의 농도는 해수에서 높게 나타났다. 그러나 연구 기간 동안 정점들 간에 각각의 영양염 농도의 뚜렷한 차이는 나타나지 않았다. 2018년의 연구 기간 동안 해빙 바닥 10 cm 구간에서 측정된 ammonium, nitrate+nitrite, phosphate, silicate의 평균 농도는 각각 $2.58 \mu\text{M}$ ($\pm 1.02 \mu\text{M}$), $1.39 \mu\text{M}$ ($\pm 0.44 \mu\text{M}$), $0.34 \mu\text{M}$ ($\pm 0.18 \mu\text{M}$), $0.99 \mu\text{M}$ ($\pm 0.41 \mu\text{M}$)로 나타났다 (그림 3.13). 해수 샘플에서 측정된 ammonium, nitrate+nitrite, phosphate, silicate의 평균 농도는 각각 $2.24 \mu\text{M}$ ($\pm 1.24 \mu\text{M}$), $1.48 \mu\text{M}$ ($\pm 0.63 \mu\text{M}$), $0.41 \mu\text{M}$ ($\pm 0.08 \mu\text{M}$), $4.43 \mu\text{M}$ ($\pm 1.43 \mu\text{M}$)로 나타났다 (그림 3.14).

나. 해빙조류와 식물플랑크톤의 chl-a 농도

2017년 해빙 미세조류의 chl-a 농도는 $8.95\text{--}65.33 \mu\text{g L}^{-1}$ ($31.78 \pm 16.28 \mu\text{g L}^{-1}$)로 나타났다 (그림 3.15). 상대적으로 높은 chl-a 농도가 st.1에서 관측되었다. 해빙의 바닥 10 cm에서 적분한 해빙조류의 chl-a 농도는 $0.90\text{--}6.53 \text{mg m}^{-2}$ ($3.18 \pm 1.63 \text{mg m}^{-2}$)로 계산되었다. 이와 비교하여 식물플랑크톤의 chl-a 농도는 $0.29\text{--}6.72 \mu\text{g L}^{-1}$ ($1.27 \pm 1.55 \mu\text{g L}^{-1}$)로 나타났으며 해빙 미세조류보다 상당히 낮은 농도를 보였다 (그림 3.15). 2018년 조사 기간 동안 해빙 미세조류의 chl-a의 농도는 $4.22\text{--}92.11 \mu\text{g L}^{-1}$ ($43.74 \pm 22.84 \mu\text{g L}^{-1}$)로 나타났다. 각각의 정점에서 보인 평균 엽록소 a의 농도는 B1에서 $11.54 \mu\text{g L}^{-1}$ ($\pm 10.35 \mu\text{g L}^{-1}$), R3에서 $64.66 \mu\text{g L}^{-1}$ ($\pm 38.82 \mu\text{g L}^{-1}$), st.1에서 $50.35 \mu\text{g L}^{-1}$ ($\pm 7.00 \mu\text{g L}^{-1}$), st.2에서 $54.49 \mu\text{g L}^{-1}$ ($\pm 2.51 \mu\text{g L}^{-1}$), st.3에서 $47.04 \mu\text{g L}^{-1}$ ($\pm 7.31 \mu\text{g L}^{-1}$) 그리고 st.4에서 $31.02 \mu\text{g L}^{-1}$ ($\pm 28.82 \mu\text{g L}^{-1}$)으로 나타났다 (그림 3.16). 조사 기간 동안 식물플랑크톤의 chl-a 농도는 $0.06\text{--}0.41 \mu\text{g L}^{-1}$ ($0.12 \pm 0.10 \mu\text{g L}^{-1}$)의 범위를 보였으며 해빙 조류보다 chl-a 농도가 현저하게 낮은 모습을 보였다 (그림 3.16). 2019년 Coral Harbour에서 연구기간 동안 site A, site C, site F의 해빙 코어의 바닥 10 cm에 존재하는 해빙조류의 chl-a 농도는 각각 $77.56\text{--}245.75 \mu\text{g L}^{-1}$ ($157.11 \pm 55.16 \mu\text{g L}^{-1}$), $39.44\text{--}466.35 \mu\text{g L}^{-1}$ ($233.23 \pm 147.55 \mu\text{g L}^{-1}$), $1.94\text{--}391.33 \mu\text{g L}^{-1}$ ($132.73 \pm 153.00 \mu\text{g L}^{-1}$)으로 나타났다 (그림 3.17). 평균 chl-a 농도는 site C에서 가장 높았다. 모든 정점에서 5월에서 6월로 갈수록 chl-a 농도의 감소가 확인되었는데, 특히 해빙 가장자리에 위치한 site F에서 가장 큰 감소가 있었다.

2017년 해빙 미세조류의 크기 조성은 모든 정점에서 유사하게 나타났다. $20 \mu\text{m}$ 이상의 큰 크기의 조류가 해빙조류 군집의 $72 \pm 8\%$ 를 차지했고 $2\text{--}20 \mu\text{m}$ 크기의 조류가 $26 \pm 8\%$ 를 그리고 $0.7\text{--}2 \mu\text{m}$ 크기의 작은 조류가 $2 \pm 1\%$ 차지했다 (그림 3.18). 식물플랑크톤의 경우 $20 \mu\text{m}$ 이상의 크기를 갖는 식물플랑크톤이 $51 \pm 13\%$ 를 차지했고 $2\text{--}20 \mu\text{m}$ 크기의 식물플랑크톤이 $43 \pm 11\%$ 를 차지했으며 $0.7\text{--}2 \mu\text{m}$ 크기는 $6 \pm 6\%$ 를 차지했다(그림 3.18). 2018년 조사 기간 동안 해빙 미세조류의 총 chl-a 농도에 대한 $20 \mu\text{m}$ 이상의 큰 조류는 $66 \pm 9\%$ 로 가장 높은 비율을 차지했으며 다음으로 $2\text{--}20 \mu\text{m}$ 크기의 조류가 $29 \pm 3\%$ 를 $0.7\text{--}2 \mu\text{m}$ 크기의 조류가 $5 \pm 7\%$ 비율을 차지했다 (그림 3.19). 이와 비교하여 식물플랑크톤의 경우 $0.7\text{--}2 \mu\text{m}$ 크기가 $44 \pm 12\%$ 로 가장 높은 비율을 차지했으며 다음으로 $2\text{--}20 \mu\text{m}$ 크기의 조류가 $33 \pm 4\%$ 를 $20 \mu\text{m}$ 이상의 큰 조류는 $23 \pm 12\%$ 로 가장 낮은 비율을 차지했다 (그림 3.19). Coral Harbour에서 조사 기간 동안 site A에서 해빙 미세조류의 총 chl-a 농도에 대한 $20 \mu\text{m}$ 이상의 큰 조류는 $64 \pm 7\%$ 로 가장 높은 비율을 차지했으며 다음으로 $2\text{--}20 \mu\text{m}$ 크기의 조류가 $30 \pm 6\%$ 를 $0.7\text{--}2 \mu\text{m}$ 크기의 조류가 $7 \pm 4\%$ 비율을 차지했다 (그림 3.20). site C의 경우 해빙 미세조류의 총 chl-a 농도에 대한 $20 \mu\text{m}$ 이상의 큰 조류는 $79 \pm 5\%$ 로 가장 높은 비율을 차지했으며 다음으로 $2\text{--}20 \mu\text{m}$ 크기의 조류가 $16 \pm 4\%$ 를 $0.7\text{--}2 \mu\text{m}$ 크기의 조류가 $5 \pm 2\%$ 비율을 차지했다 (그림 3.20). site F에서 해빙 미세조류의 총 chl-a 농도에 대한 $20 \mu\text{m}$ 이상의 큰 조류는 $63 \pm 24\%$ 로 가장 높은 비율을 차지

했으며 다음으로 2-20 μm 크기의 조류가 $27 \pm 18\%$ 를 0.7-2 μm 크기의 조류가 $10 \pm 8\%$ 비율을 차지했다 (그림 3.20). 2017, 2018년에 Cambridge bay에서의 결과와 마찬가지로 Coral Harbour에서 해빙 미세조류의 chl-a농도에 대한 기여도는 20 μm 이상의 큰 조류가 가장 높았다. 식물플랑크톤의 경우 site C에서 chl-a 농도는 $0.10\text{--}5.10 \mu\text{g L}^{-1}$ ($2.23 \pm 1.79 \mu\text{g L}^{-1}$)의 범위를 보였고 5월에서 6월로 갈수록 chl-a농도의 증가가 확인되었다. 또한 이 정점에서 식물플랑크톤의 크기 조성은 20 μm 이상의 큰 식물플랑크톤이 $69 \pm 26\%$ 로 가장 높은 비율을 차지했으며 다음으로 2-20 μm 크기의 조류가 $22 \pm 24\%$ 를 0.7-2 μm 크기의 조류가 $9 \pm 6\%$ 비율을 차지했다 (그림 3.20). 식물플랑크톤의 경우 chl-a 농도가 2019년 05월 13일에 가장 큰 증가를 보였는데 이때 20 μm 이상의 큰 식물플랑크톤 또한 가장 크게 증가했다. 이것은 5월에서 6월로 접어들수록 해빙이 녹으면서 생물량이 수층으로 방출된 결과일 가능성이 있다.

다. 해빙조류와 식물플랑크톤의 탄소흡수율

2017년 4월 28일부터 5월 12일 까지 해빙 미세조류의 탄소 흡수율은 $0.21\text{--}2.17 \text{ mg C m}^{-3} \text{ h}^{-1}$ ($0.97 \pm 0.60 \text{ mg C m}^{-3} \text{ h}^{-1}$)의 범위를 보였다(그림 3.21). 탄소 흡수율의 최댓값은 5월 6일에 st.4에서 최댓값을 보였지만 outlier로 보인다. 이 값을 제외하면 tidal strait의 안과 밖인 st.1과 st.4에서 뚜렷한 공간적인 차이를 보인다.

해빙 조류의 일일 탄소 흡수율의 범위는 $0.38\text{--}4.22 \text{ mg C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ($1.87 \pm 1.16 \text{ mg C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)로 나타났다. 전반적으로 높은 일일 탄소 흡수율이 st.1에서 나타났지만, 최대 탄소 흡수율은 st.4에서 나타났다. 이와 비교하여 식물플랑크톤의 탄소 흡수율의 범위는 $0.02\text{--}1.19 \text{ mg C m}^{-3} \text{ h}^{-1}$ ($0.22 \pm 0.37 \text{ mg C m}^{-3} \text{ h}^{-1}$)로 나타났다 (그림 3.21). 본 연구에서 해빙 조류의 탄소 흡수율은 식물플랑크톤 보다 상당히 높게 나타났다. 2018년 조사 기간 동안 현장 배양 실험을 통해 측정된 해빙 미세조류의 탄소흡수율은 $0.02\text{--}2.38 \text{ mg C m}^{-3} \text{ h}^{-1}$ ($0.76 \pm 0.75 \text{ mg C m}^{-3} \text{ h}^{-1}$)의 범위를 보였다 (그림 3.22). Tidal strait의 중심인 st.1 근처에서 높은 탄소 흡수율이 나타났으며 내 만인 B1에서 가장 낮은 값이 나타났다. 해빙 조류 배양 실험과 함께 현장 배양을 통해 측정된 식물플랑크톤의 탄소흡수율은 $0.00\text{--}0.02 \text{ mg C m}^{-3} \text{ h}^{-1}$ ($0.01 \pm 0.00 \text{ mg C m}^{-3} \text{ h}^{-1}$)의 범위를 가졌다 (그림 3.22). 해빙 조류와 마찬가지로 식물플랑크톤의 탄소 흡수율은 B1과 R3에 비해 tidal strait에서 높았지만 값의 차이는 해빙 조류에 비해 낮았다. 또한 2017년의 결과와 비슷하게 식물플랑크톤의 탄소 흡수율은 해빙 조류에 비해서 현저하게 낮았다. 2019년 코랄하버에서 해빙 미세조류와 식물플랑크톤의 탄소 흡수율 현장 배양 실험은 site C에서 총 10회 수행하였다. 연구기간동안 해빙 미세조류의 탄소흡수율은 $0.94\text{--}11.27 \text{ mg C m}^{-3} \text{ h}^{-1}$ ($3.77 \pm 5.31 \text{ mg C m}^{-3} \text{ h}^{-1}$)의 범위를 보였다 (그림 3.23). 탄소흡수율의 최댓값은 5월 6일에 관측되었으며 최솟값은 5월 23일에 관측되었다. 해빙 미세조류의 chl-a 농도, 거대분자 조성과 마찬가지로 5월 초에 탄소흡수율의 최댓값이 나타났으며 조사 시기 후반으로 갈수록 낮은 값이 나타났다. 추가적인 환경 요인을 고려해야겠지만 해빙에서의 생물량 감소가 탄소흡수율을 감소시킨 원인 중의 하나라고 사료된다. 식물플랑크톤의 경우 $0.00\text{--}0.41 \text{ mg C m}^{-3} \text{ h}^{-1}$ ($0.09 \pm 0.15 \text{ m}^{-3} \text{ h}^{-1}$)의 범위를 보였다 (그림 3.23). 식물플랑크톤의 탄소흡수율은 해빙조류에 비해 매우 낮았다. 하

지만 연구 기간 후반으로 갈수록 탄소흡수율의 증가가 확인되었다.

라. 해빙조류와 식물플랑크톤의 거대분자조성

2017년 해빙조류의 총 탄수화물, 단백질, 지질의 농도는 각각 $1.90 \pm 0.66 \text{ mg L}^{-1}$, $1.72 \pm 0.70 \text{ mg L}^{-1}$, $4.14 \pm 1.40 \text{ mg L}^{-1}$ 로 나타났다 (그림 3.24). chl-a와 탄소 흡수율과 마찬가지로 단백질과 지질의 농도는 st.1에서 높게 나타났다. 그러나 해빙 조류를 구성하는 탄수화물, 단백질, 지질의 기여도는 연구지역에서 큰 차이를 보이지 않았다. 이와 비교하여 식물플랑크톤을 구성하는 총 탄수화물, 단백질, 지질의 농도는 각각 $0.34 \pm 0.18 \text{ mg L}^{-1}$, $0.08 \pm 0.04 \text{ mg L}^{-1}$, $0.16 \pm 0.08 \text{ mg L}^{-1}$ 로 나타났다 (그림 3.25). 식물플랑크톤에 비해 상대적으로 높은 거대분자 농도가 해빙조류에게서 나타났다. 해빙 미세조류는 주로 지질이 $53 \pm 7\%$ 로 가장 높은 비율을 구성하고 있었으며 다음으로 탄수화물과 단백질이 각각 $25 \pm 6\%$ 와 $22 \pm 4\%$ 를 차지했다 (그림 3.24). 식물플랑크톤은 주로 탄수화물로 구성되어 있었고 ($59 \pm 6\%$) 지질과 단백질이 각각 $27 \pm 5\%$ 와 $14 \pm 5\%$ 를 차지했다 (그림 3.25). 2018년 조사 기간 동안 해빙 미세조류를 구성하는 탄수화물, 단백질, 지질의 농도는 $2.46 \text{ mg L}^{-1} (\pm 1.41 \text{ mg L}^{-1})$, $0.45 \text{ mg L}^{-1} (\pm 0.37 \text{ mg L}^{-1})$, $1.82 \text{ mg L}^{-1} (\pm 0.67 \text{ mg L}^{-1})$ 로 나타났다 (그림 3.26). 또한 해빙 조류의 거대분자 조성에 대한 탄수화물, 단백질, 지질의 기여도는 $51\% (\pm 9\%)$, $10\% (\pm 7\%)$, $39\% (\pm 6\%)$ 로 나타났으며 지질이 우세했던 2017년의 결과와는 다른 경향이 나타났다. 식물플랑크톤을 구성하는 탄수화물, 단백질, 지질의 농도는 $0.15 \text{ mg L}^{-1} (\pm 0.07 \text{ mg L}^{-1})$, $0.00 \text{ mg L}^{-1} (\pm 0.01 \text{ mg L}^{-1})$, $0.07 \text{ mg L}^{-1} (\pm 0.02 \text{ mg L}^{-1})$ 로 나타났다 (그림 3.27). 또한 식물플랑크톤의 거대분자 조성에 대한 탄수화물, 단백질, 지질의 기여도는 $66\% (\pm 5\%)$, $1\% (\pm 1\%)$, $34\% (\pm 5\%)$ 로 나타났다. 2019년 Coral Harbour에서 연구기간 동안 site A에서 해빙 코어의 바닥 10 cm에 존재하는 해빙조류의 탄수화물, 단백질, 지질의 농도는 각각 $3.44\text{--}5.17 \text{ mg L}^{-1}$ ($4.02 \pm 0.57 \text{ mg L}^{-1}$), $1.84\text{--}5.05 \text{ mg L}^{-1}$ ($3.57 \pm 1.16 \text{ mg L}^{-1}$), $3.41\text{--}21.33 \text{ mg L}^{-1}$ ($6.16 \pm 6.15 \text{ mg/L}$)으로 나타났다 (그림 3.28). 5월 23일에 지질이 평균의 3배 이상을 웃도는 높은 값을 보인 것을 제외하면 연구 기간 동안 site A에서 해빙 미세조류의 거대분자 농도는 큰 변화를 보이지 않았다. site C에서 해빙 코어의 바닥 10 cm에 존재하는 해빙조류의 탄수화물, 단백질, 지질의 농도는 각각 $2.80\text{--}17.57 \text{ mg L}^{-1}$ ($10.47 \pm 5.16 \text{ mg L}^{-1}$), $1.22\text{--}9.18 \text{ mg L}^{-1}$ ($4.69 \pm 2.31 \text{ mg L}^{-1}$), $3.23\text{--}28.19 \text{ mg L}^{-1}$ ($9.94 \pm 7.41 \text{ mg L}^{-1}$)으로 나타났다 (그림 3.29). 5월 6일에 모든 거대 분자의 최댓값이 나타났고 5월 말로 갈수록 전반적인 농도가 감소하는 경향을 보였다. site F에서 해빙 코어의 바닥 10 cm에 존재하는 해빙조류의 탄수화물, 단백질, 지질의 농도는 각각 $1.84\text{--}15.85 \text{ mg L}^{-1}$ ($5.28 \pm 4.76 \text{ mg L}^{-1}$), $0.24\text{--}6.64 \text{ mg L}^{-1}$ ($2.57 \pm 2.66 \text{ mg L}^{-1}$), $1.09\text{--}15.95 \text{ mg L}^{-1}$ ($4.89 \pm 4.95 \text{ mg L}^{-1}$)으로 나타났다 (그림 3.30). site F에서는 site C와 마찬가지로 5월 6일에 모든 거대분자의 최댓값이 나타났다. 그리고 연구 기간 막바지로 접어들수록 농도의 급격한 감소가 있었으며 5월 26일 이후로는 농도가 비교적 일정한 모습을 보였다. site C에서 식물플랑크톤의 경우 탄수화물, 단백질, 지질의 농도는 각각 $0.06\text{--}0.34 \text{ mg L}^{-1}$ ($0.18 \pm 0.08 \text{ mg L}^{-1}$), $0.01\text{--}0.17 \text{ mg L}^{-1}$ ($0.11 \pm 0.07 \text{ mg L}^{-1}$), $0.04\text{--}0.13 \text{ mg L}^{-1}$ ($0.09 \pm 0.03 \text{ mg L}^{-1}$)으로 나타났다 (그림 3.21). 해빙

조류의 농도 패턴과는 달리 5월 초에서 6월 초로 갈수록 각각의 거대분자의 농도가 증가하는 모습을 보였다. 연구기간 동안 site A에서 해빙조류를 구성하는 탄수화물, 단백질, 지질의 비율은 각각 15-42 ($33 \pm 8\%$), 13-39% ($28 \pm 9\%$), 32-72% ($40 \pm 13\%$)으로 나타났다 (그림 3.28). site C에서 해빙조류를 구성하는 탄수화물, 단백질, 지질의 비율은 각각 29-51 ($43 \pm 8\%$), 13-31% ($19 \pm 5\%$), 30-58% ($38 \pm 10\%$)으로 나타났으며 site F에서는 각각 33-58 ($45 \pm 9\%$), 6-30% ($17 \pm 9\%$), 31-44% ($38 \pm 4\%$)으로 나타났다 (그림 3.29, 그림 3.30). site C에서 식물플랑크톤의 경우 탄수화물, 단백질, 지질의 비율은 각각 39-72% ($49 \pm 10\%$), 4-37% ($26 \pm 13\%$), 18-40% ($26 \pm 7\%$)으로 나타났다 (그림 3.31). 연구기간 동안 탄수화물과 지질은 해빙조류를 구성하는 주요 거대분자 조성이었으며 식물플랑크톤의 경우 탄수화물이 가장 높은 비율을 차지했다.



표 3.7. 2017년 Cambridge bay에서 연구 기간 동안 조사 정점에서의 환경 조건

Station	Date	Sea ice thickness (cm)	Snow depth (cm)	Bluk salinity in bottom ice (10 cm)	Salinity in surface sea water	Light intensity under the ice ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)
st.1	26 Apr	-	-	-	-	-
	28 Apr	132	4	7.3	-	15.46
	01 May	135	4	7.2	27	19.37
	03 May	130	6	6.8	27.5	19.74
	06 May	133	6	6.3	28.7	22.1
	09 May	136	4	6.8	28.1	31.77
	12 May	136	4	6.7	-	35.59
st.2	26 Apr	-	-	-	-	-
	28 Apr	137	5	7.3	-	31.01
	01 May	136	4	7.8	25.6	21.57
	03 May	143	4	6.5	28	32.81
	06 May	136	4	7.1	28.2	28.85
	09 May	137	4	6.9	28.3	38.8
	12 May	-	-	-	-	-
st.3	26 Apr	-	-	-	-	-
	28 Apr	155	4	7.7	-	20.57
	01 May	-	-	-	-	-
	03 May	155	5	6.7	28.1	30.44
	06 May	-	-	-	-	-
	09 May	157	5	6	20.8	23.72
	12 May	-	-	-	-	-
st.4	26 Apr	190	4	18	-	28.43
	28 Apr	164	3	8	25.6	31.15
	01 May	167	2	4.8	21.2	48.42
	03 May	168	3	6.4	27.1	35.77
	06 May	164	3	6.8	28.5	31.72
	09 May	171	3	6.9	28.2	38.82
	12 May	-	-	-	-	-

표 3.8. 2018년 Cambridge bay에서 연구 기간 동안 조사 정점에서의 환경 조건

Station	Date	Sea ice thickness (cm)	Snow depth (cm)	Bulk salinity in bottom ice (10cm)	Salinity in surface sea water
st.1	11 Apr	130.0	4.1	6.1	27.7
	14 Apr	122.5	7.8	6.3	28.8
	24 Apr	119.0	5.0	6.2	27.9
st.2	17 Apr	135.5	7.8	6.4	28.2
	26 Apr	128.5	6.0	6.3	27.1
st.3	17 Apr	156.5	5.8	6.4	28.2
	26 Apr	159.5	7.1	6.2	27.2
st.4	11 Apr	156.0	12.9	6.5	27.8
	24 Apr	168.0	11.3	6.9	28.2
R3	14 Apr	158.5	18.5	5.2	27.8
	22 Apr	N.D	9.5	N.D	27.4
B1	07 Apr	147.0	15.4	5.8	31.5
	19 Apr	129.8	23.4	6.4	27.9



표 3.9. 2019년 Coral Harbour에서 연구 기간 동안 조사 정점에서의 환경 조건

Station	Date	Sea ice thickness (cm)	Snow depth (cm)	Bulk salinity in bottom ice (10cm)	Salinity in surface sea water
site A	06 May	164	24	9	N.D
	13 May	152	29	9.2	N.D
	16 May	164	18	9.1	N.D
	19 May	158	18	8.8	N.D
	23 May	151	29	8.2	N.D
	26 May	161	17	8.2	N.D
	29 May	164	18	7.6	N.D
	01 June	157	13	6.3	N.D
site C	04 May	156	11	8	33.9
	06 May	159	10	7.6	33.9
	09 May	154	16	8.3	33.8
	13 May	161	16	7.6	33.9
	16 May	156	23	5.9	33.3
	19 May	153	16	5.4	33.1
	23 May	149	23	4.8	33.6
	26 May	151	19	4.3	32.3
	29 May	159	20	4.3	33.1
	01 June	147	13	3.7	31.6
site F	06 May	142	7	6.5	N.D
	13 May	137	19	4.3	N.D
	16 May	138	20	4.3	N.D
	19 May	142	16	4.2	N.D
	23 May	139	21	3.4	N.D
	26 May	131	16	3.8	N.D
	29 May	128	16	4.2	N.D
	01 June	123	10	3.6	N.D

표 3.10. 다양한 북극 지역에서 보고된 해빙 미세조류의 chl-a농도 및 탄소흡수율 자료

Year	Season	Region	Bottom section (m)	Incubation method and time	Chl- <i>a</i> concentration (mg m ⁻³)	Carbon uptake rate (mg C m ⁻³ d ⁻¹)	References
1985-1986	March-June	Canadian Arctic Archipelago (Resolute)	0.04	¹⁴ C, 1-24 h	1.5-46 *	21-463	Smith and others (1988)
1987-1988	May-June	Canadian Arctic Archipelago (Resolute)	0.05-0.06	¹⁴ C, 1 h	< 350 *	20-157	Smith and Herman (1991)
1998	April-May	Canadian Arctic Archipelago (Baffin Bay)	0.02-0.04	¹⁴ C, 2-4 h	0.1-55.6	26-317	Nozais and others (2001)
1998	April-June	Canadian Arctic Archipelago (Baffin Bay, north water 6)	0.02-0.04	¹⁴ C, 2-4 h	0.2-25.4	2-153	Michel and others (2002)
2003	February-June	Barrow, Alaska	0.03	¹³ C, 3-4 h	< 27 *	0.72-84	Lee and others (2008)
2014	April-June	Canadian Arctic Archipelago (Dease Strait)	0.05	-	4.0-11.7	-	Campbell and others (2016)
2016	May	Canadian Arctic Archipelago (Dease Strait)	0.05	-	1.41-9.31	-	Dalman and others (2019)
2017	April-May	Canadian Arctic Archipelago (Dease Strait)	0.10	¹³ C, 3-4 h	0.90-6.53 *	0.38-4.22	This study



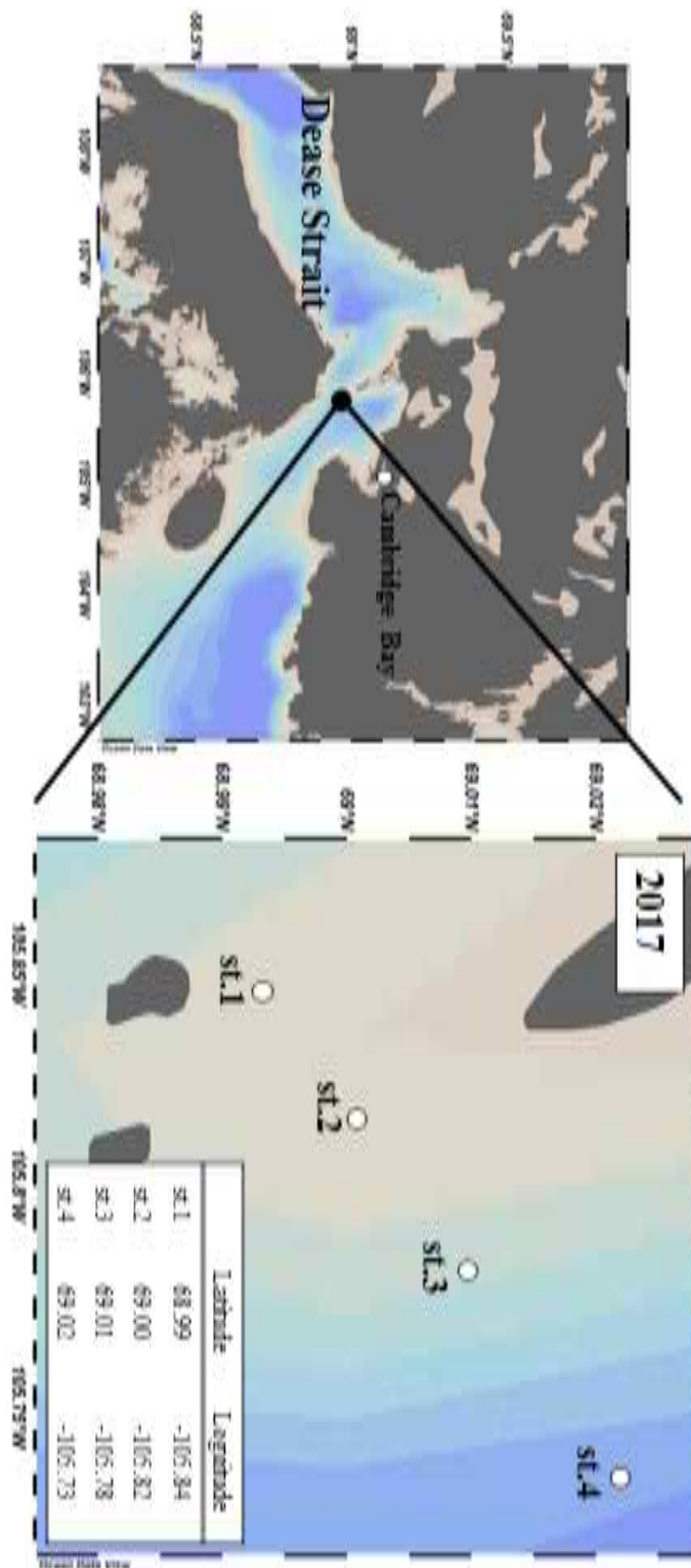


그림 3.8. 연구지역 (2017년)

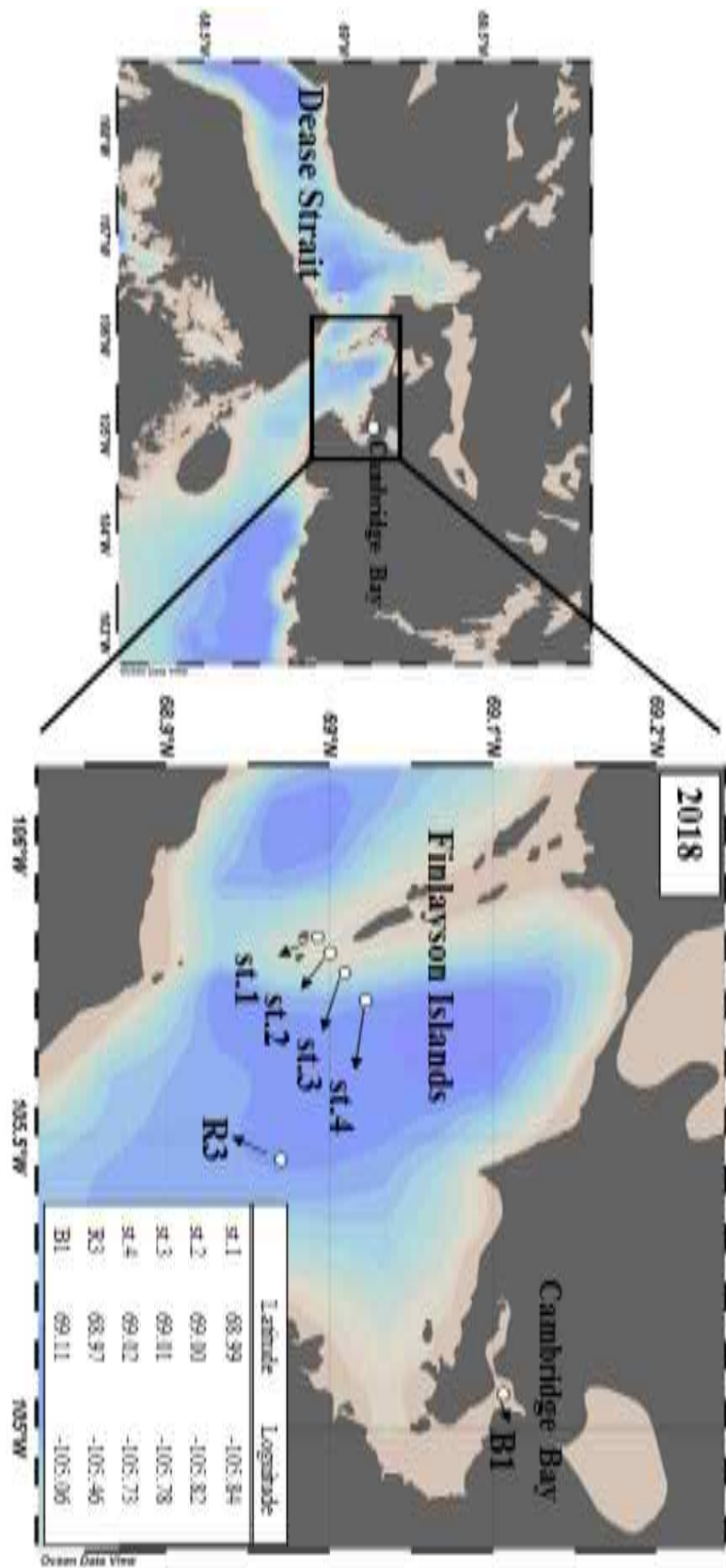


그림 3.9. 연구지역 (2018년)

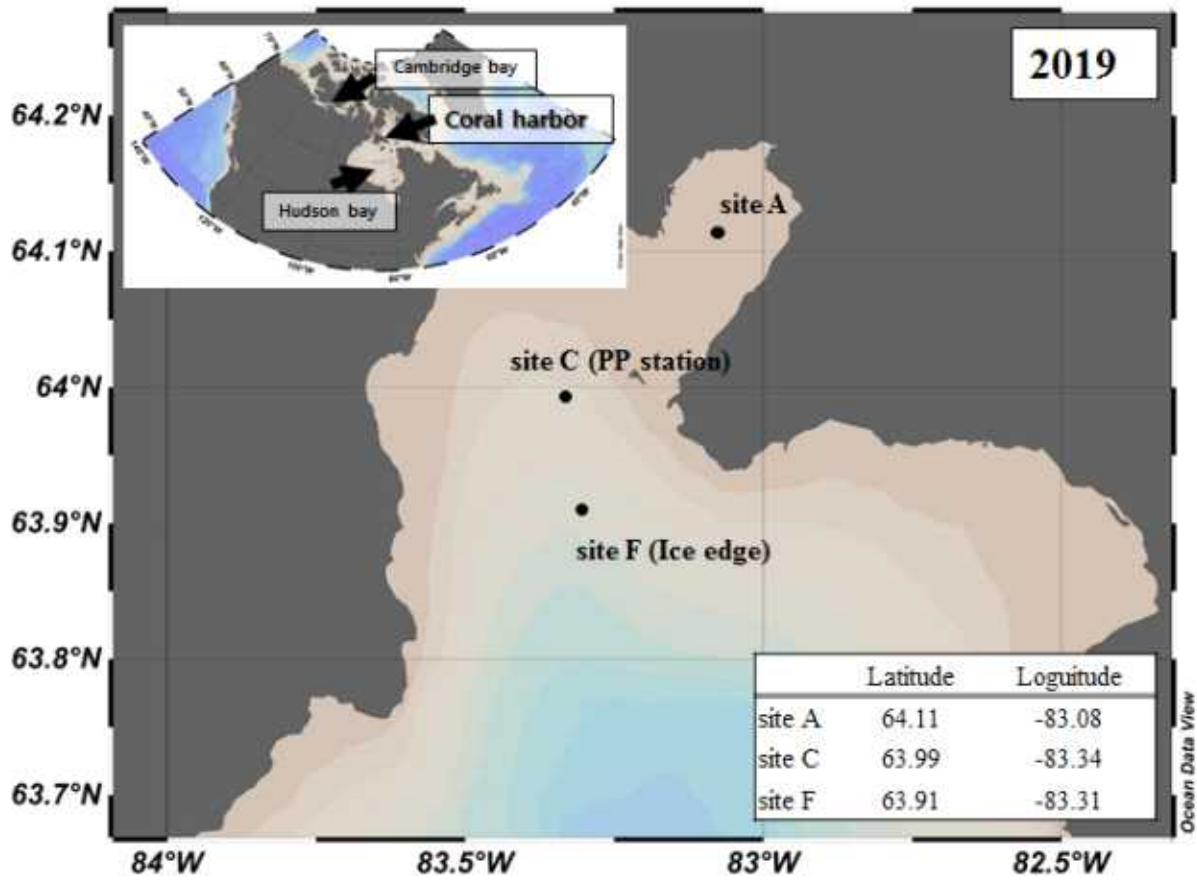
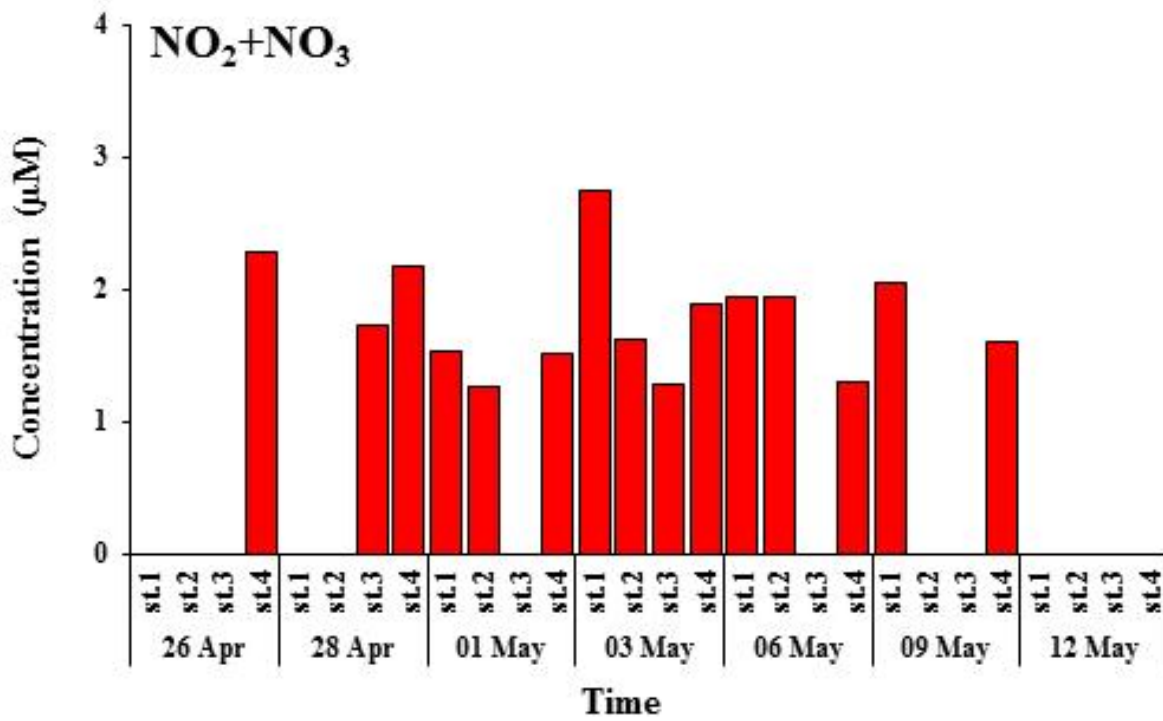
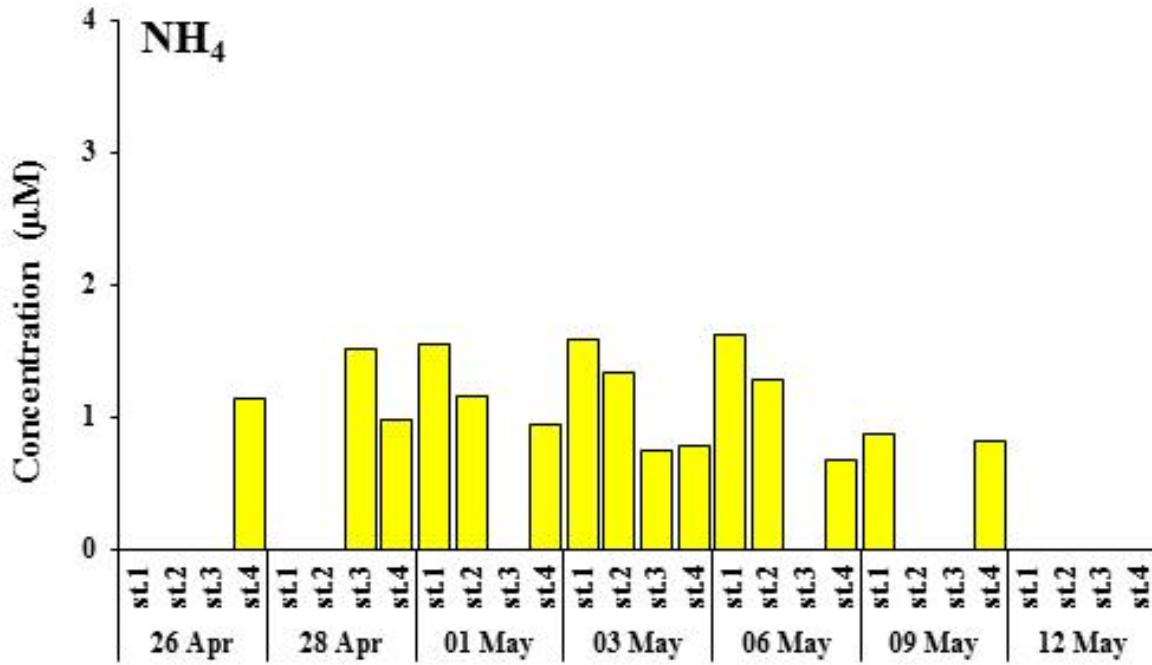


그림 3.10. 연구지역 (2019년)



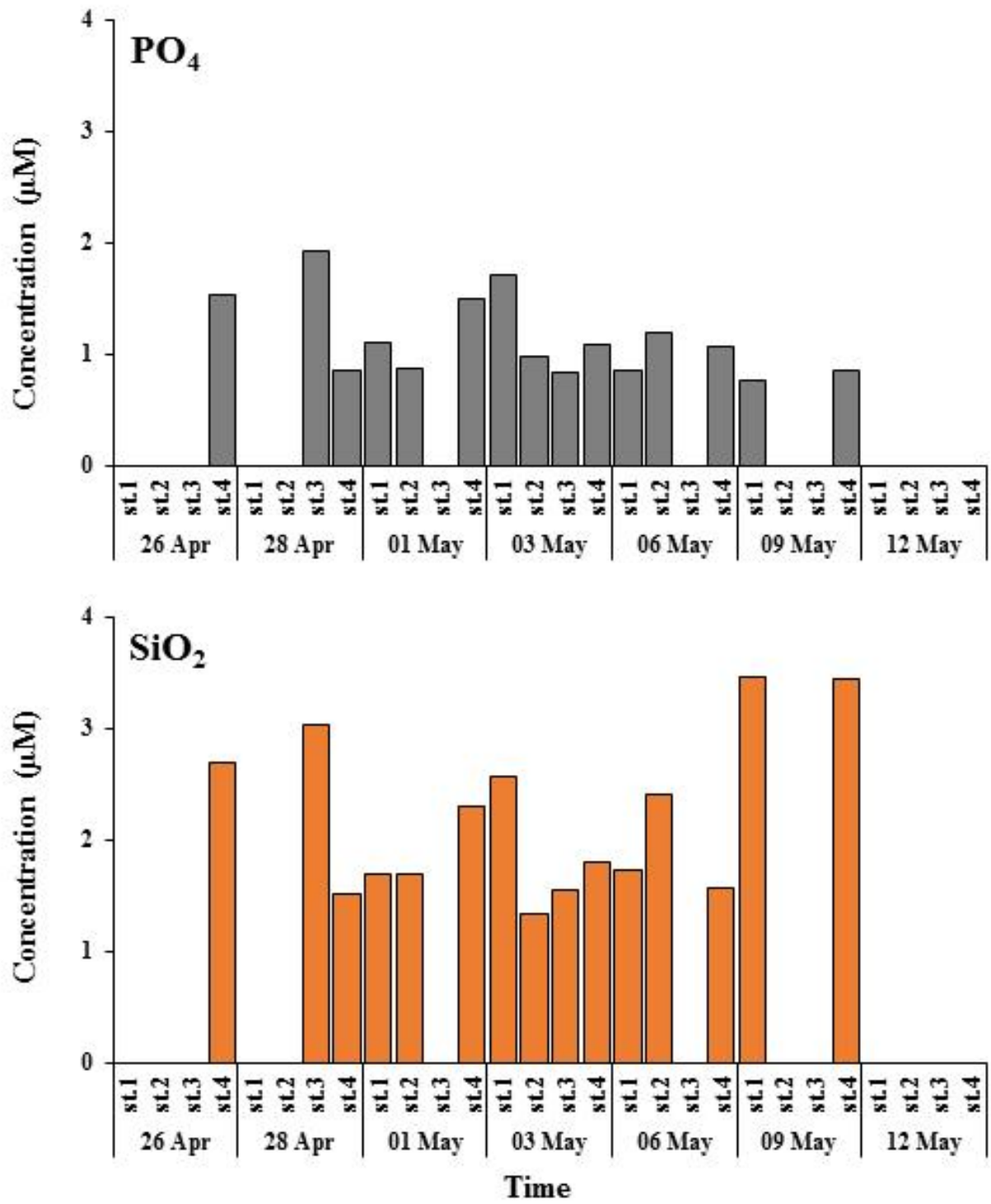
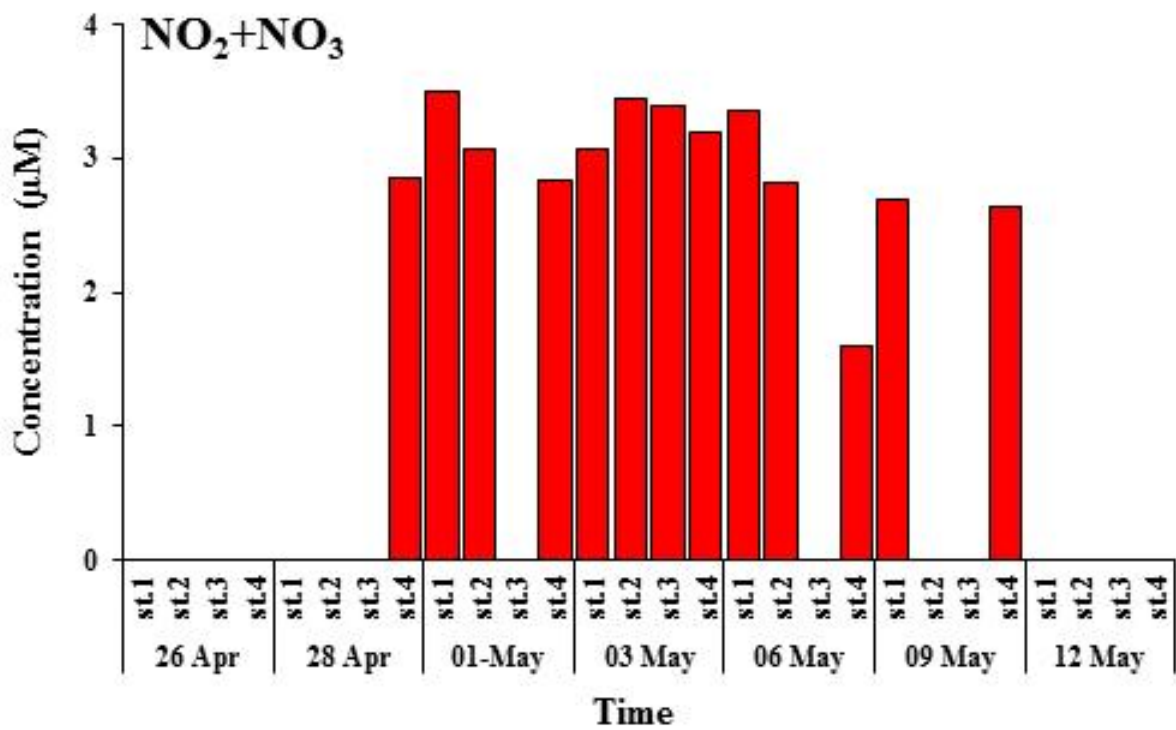
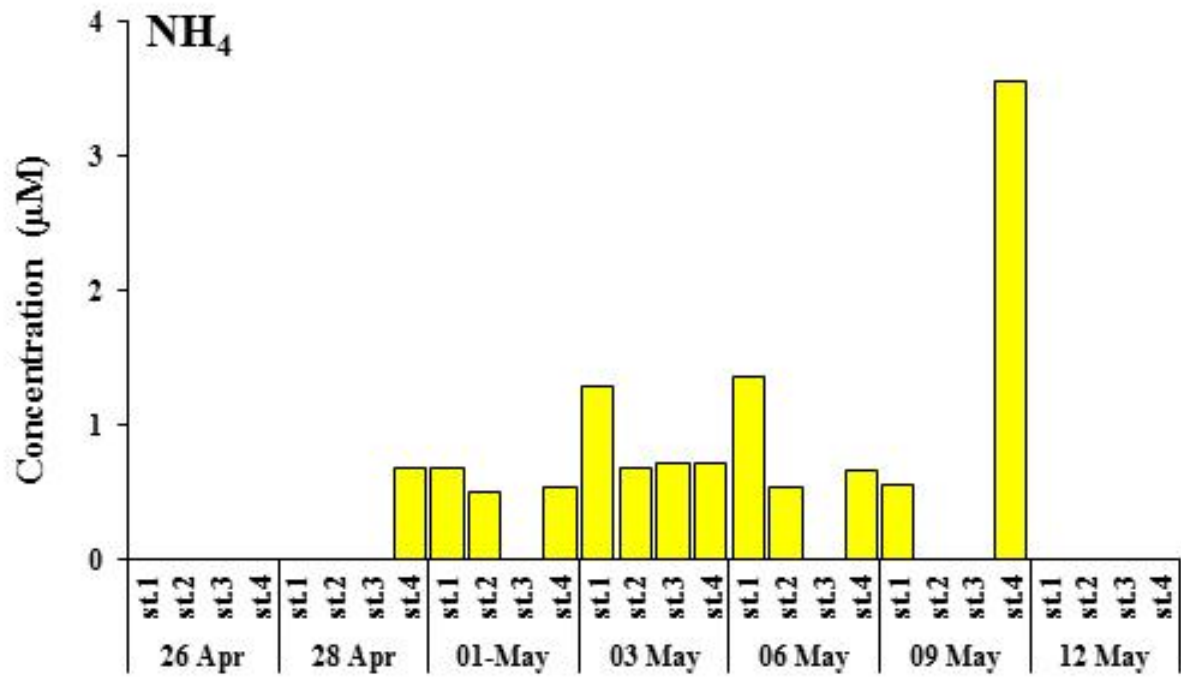


그림 3.11. 해빙에서 측정된 무기 영양염 농도 (2019년)



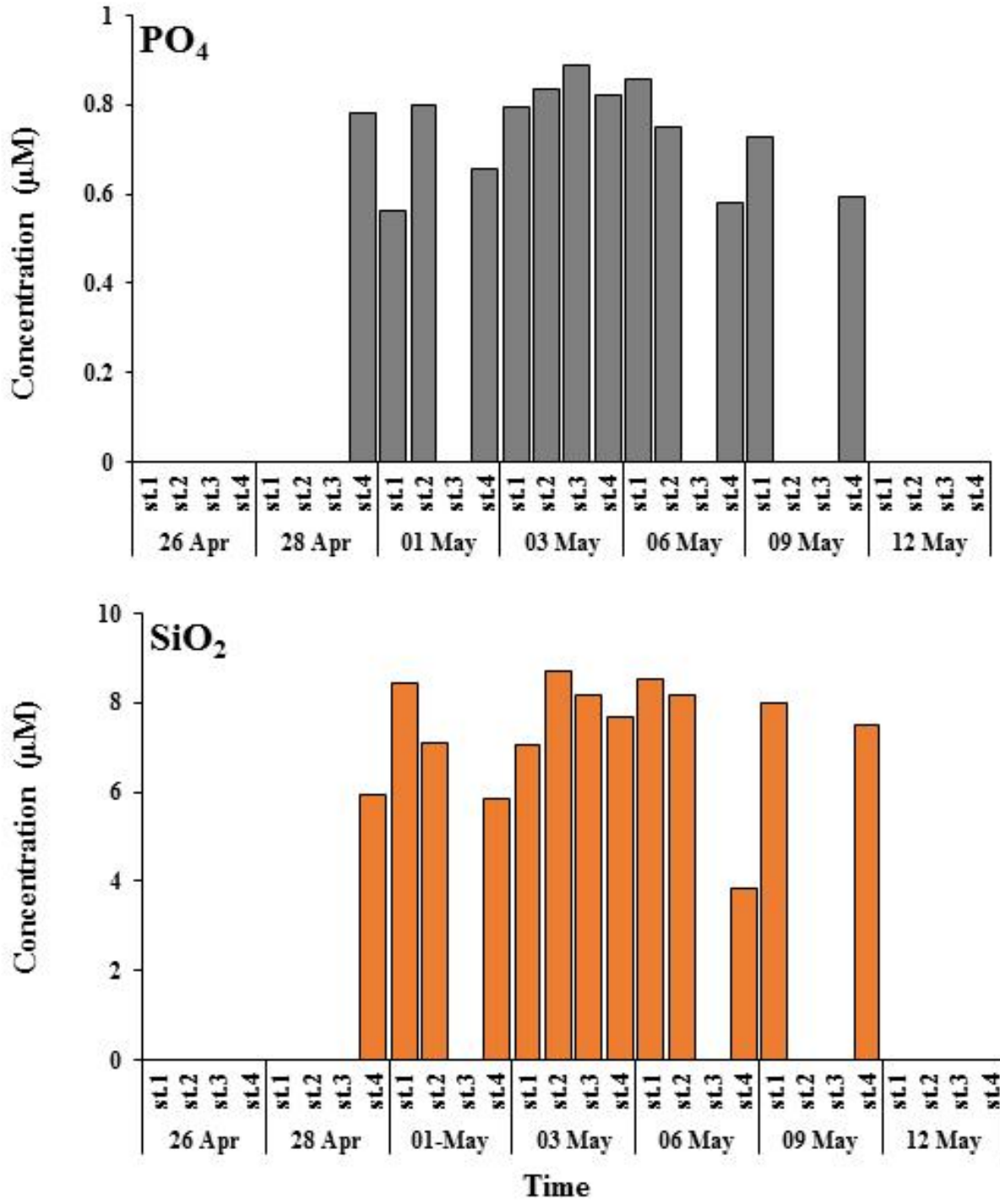
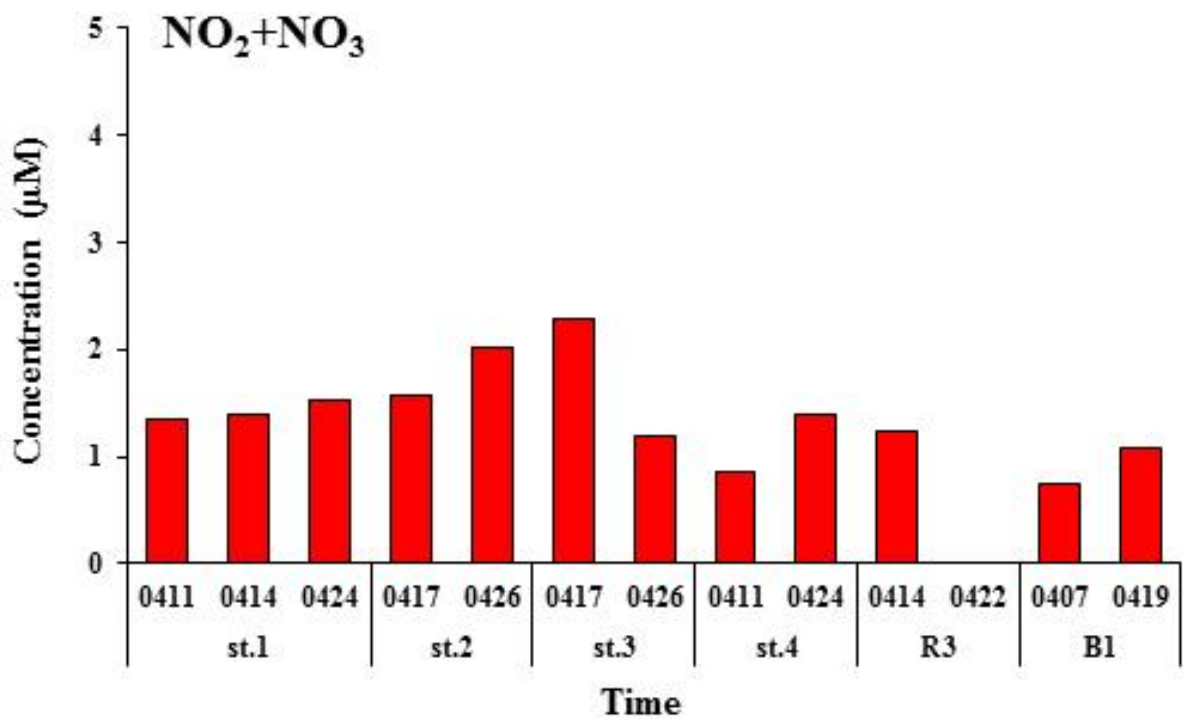
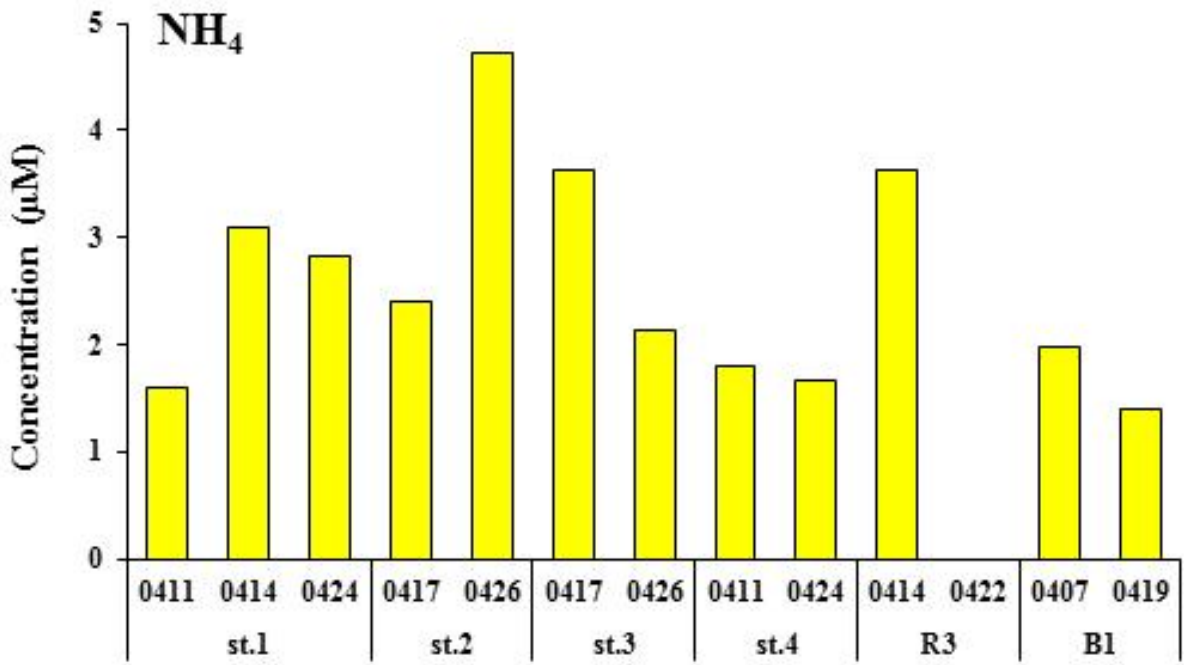


그림 3.12. 표충 해수에서 측정된 무기 영양염 농도 (2019년)



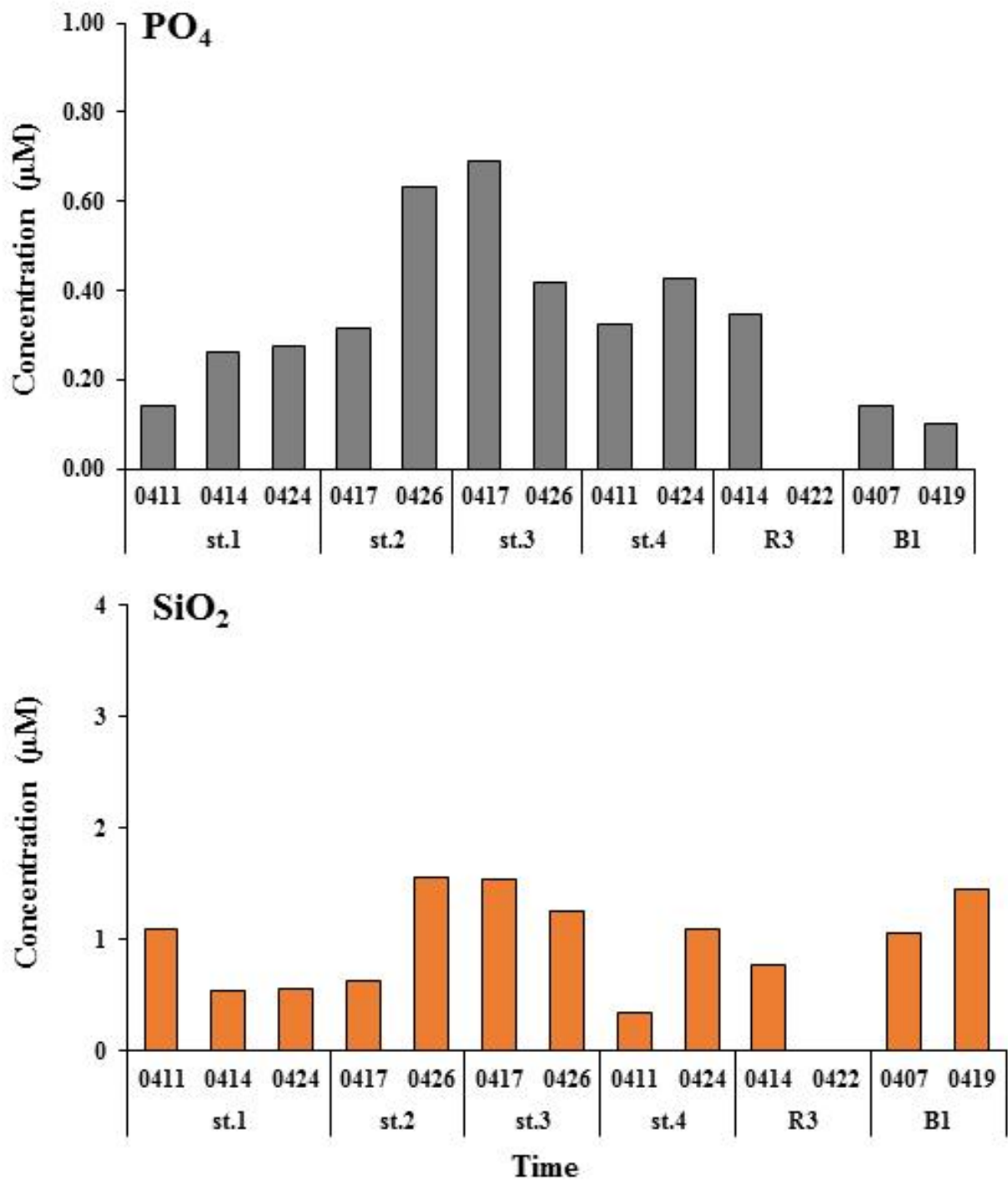
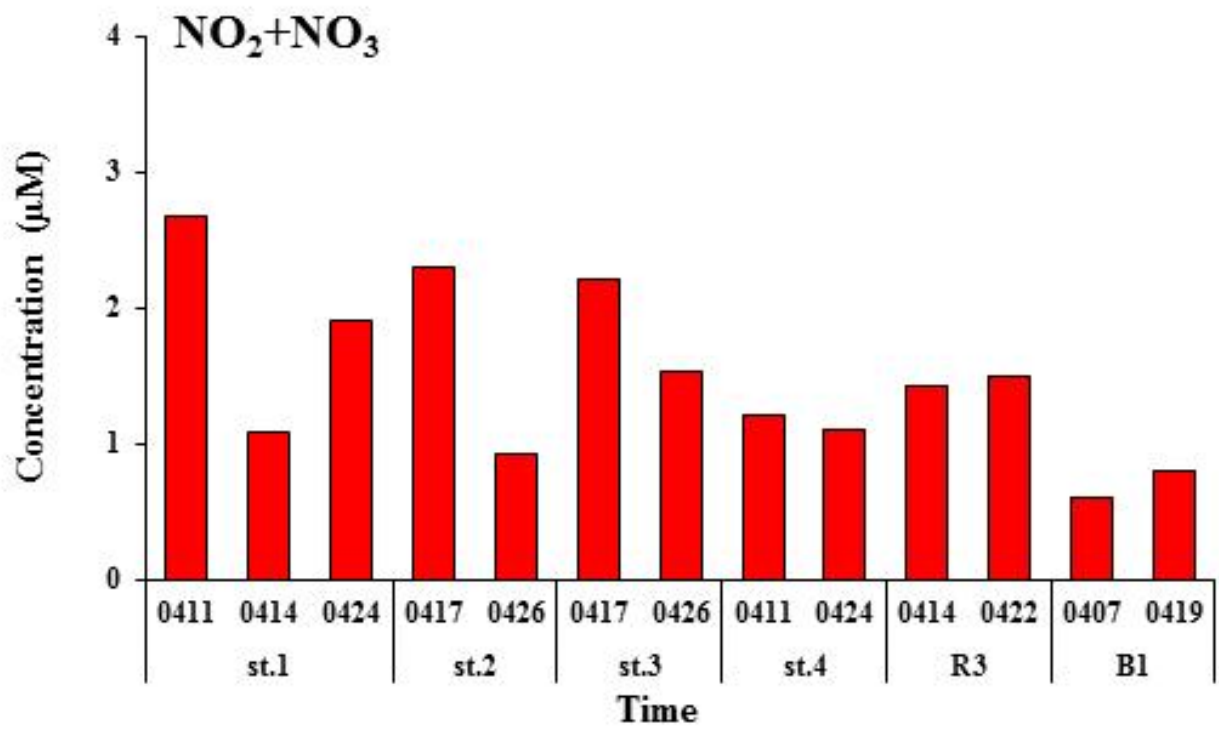
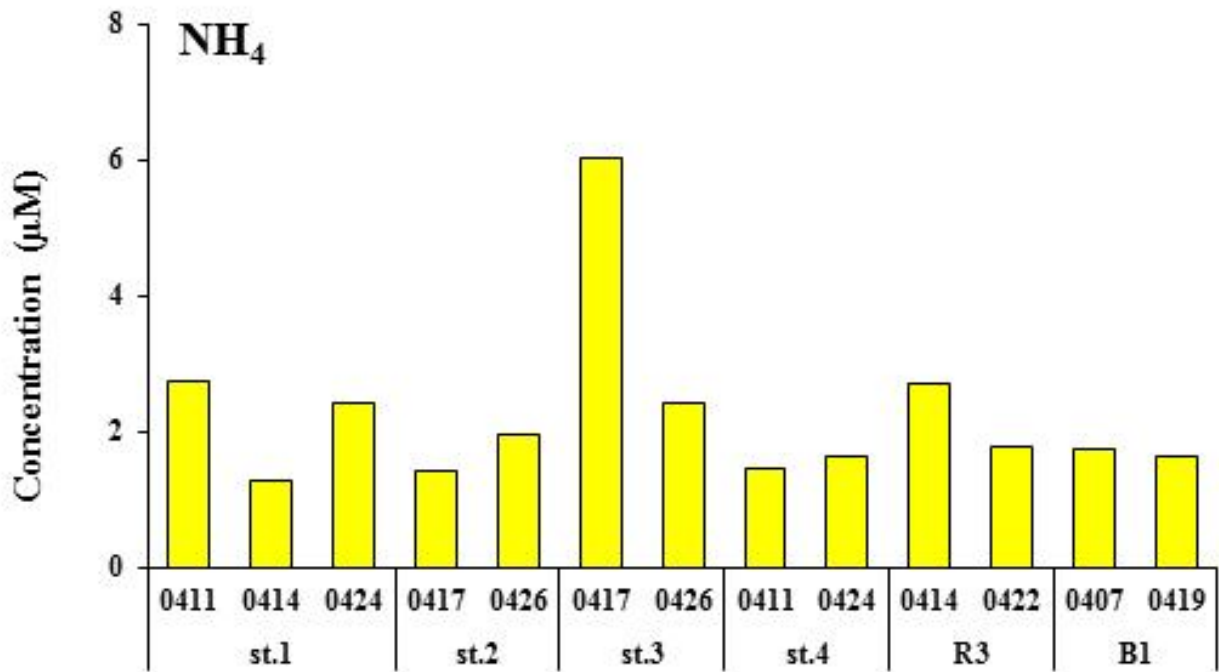


그림 3.13. 해빙에서 측정된 무기 영양염 농도 (2018년)



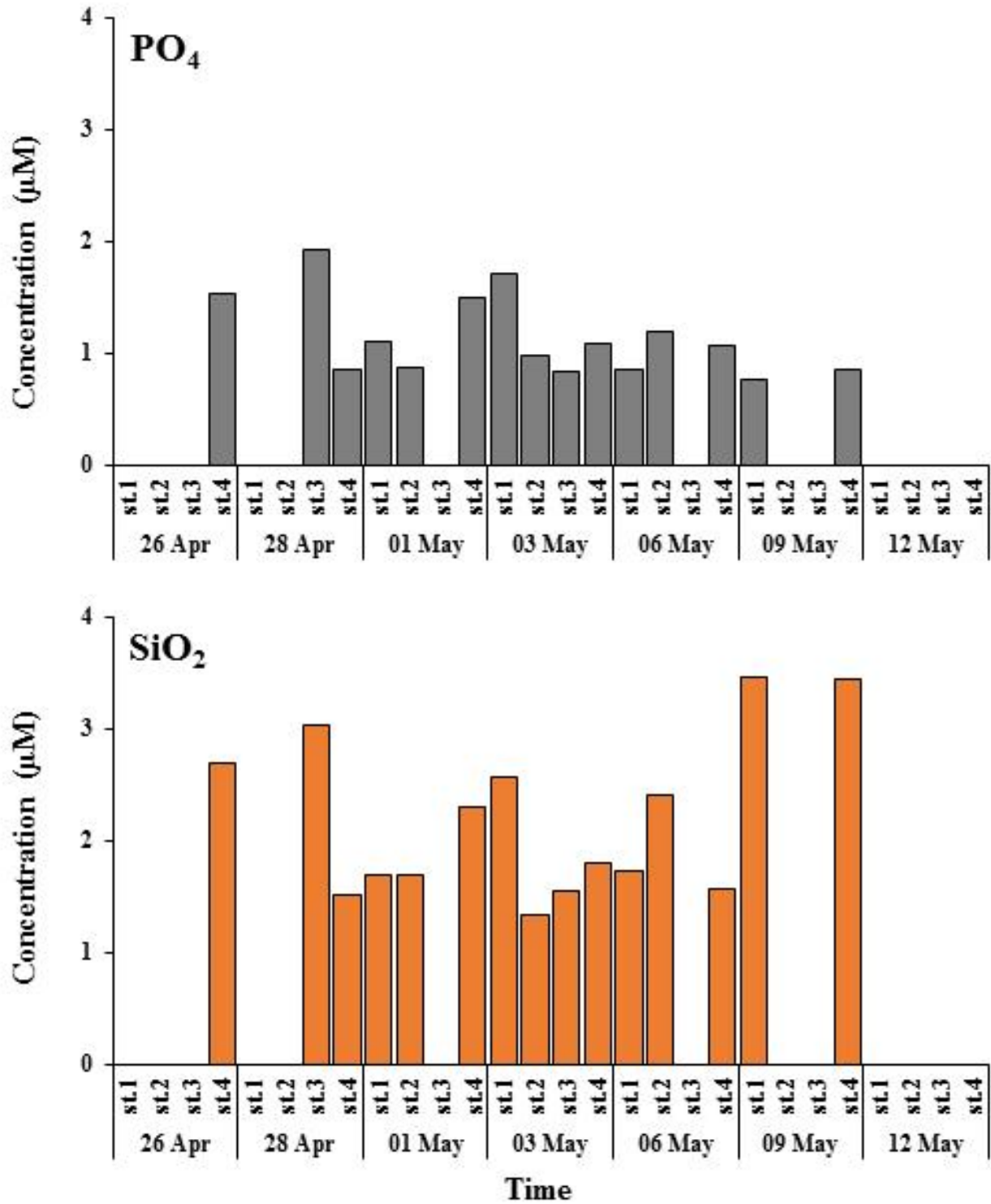


그림 3.14. 표층 해수에서 측정된 무기 영양염 농도 (2018년)

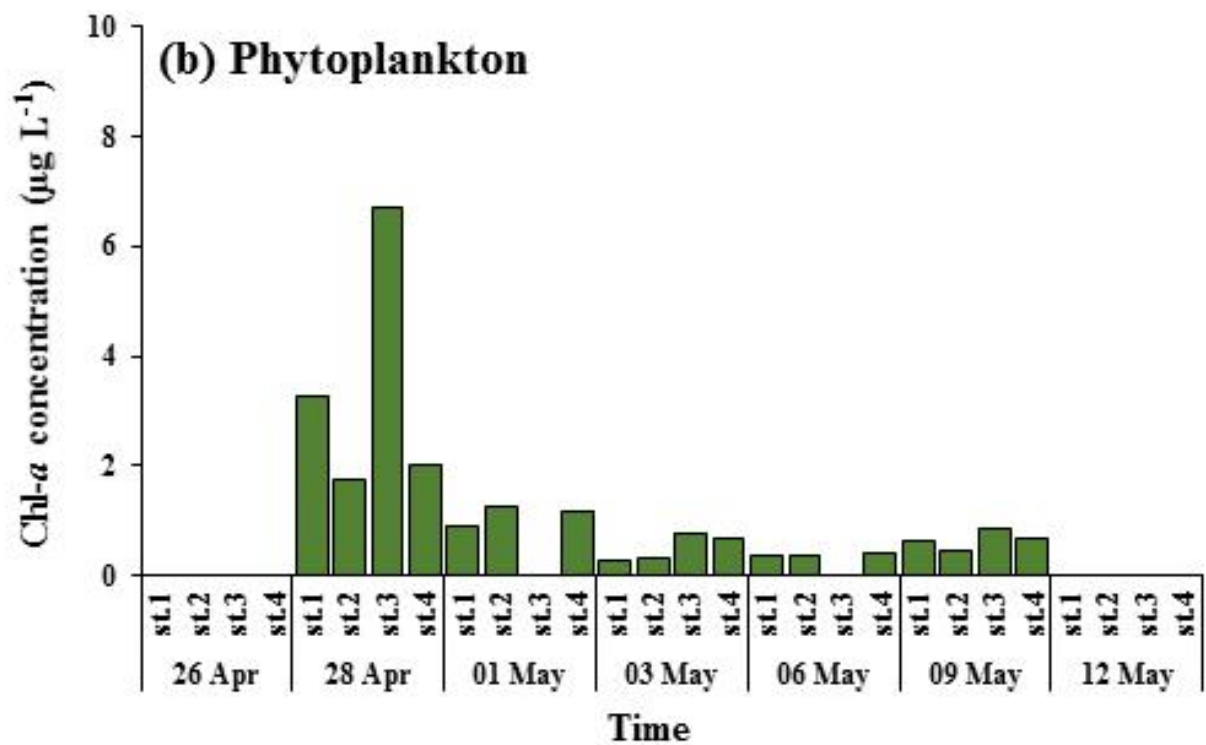
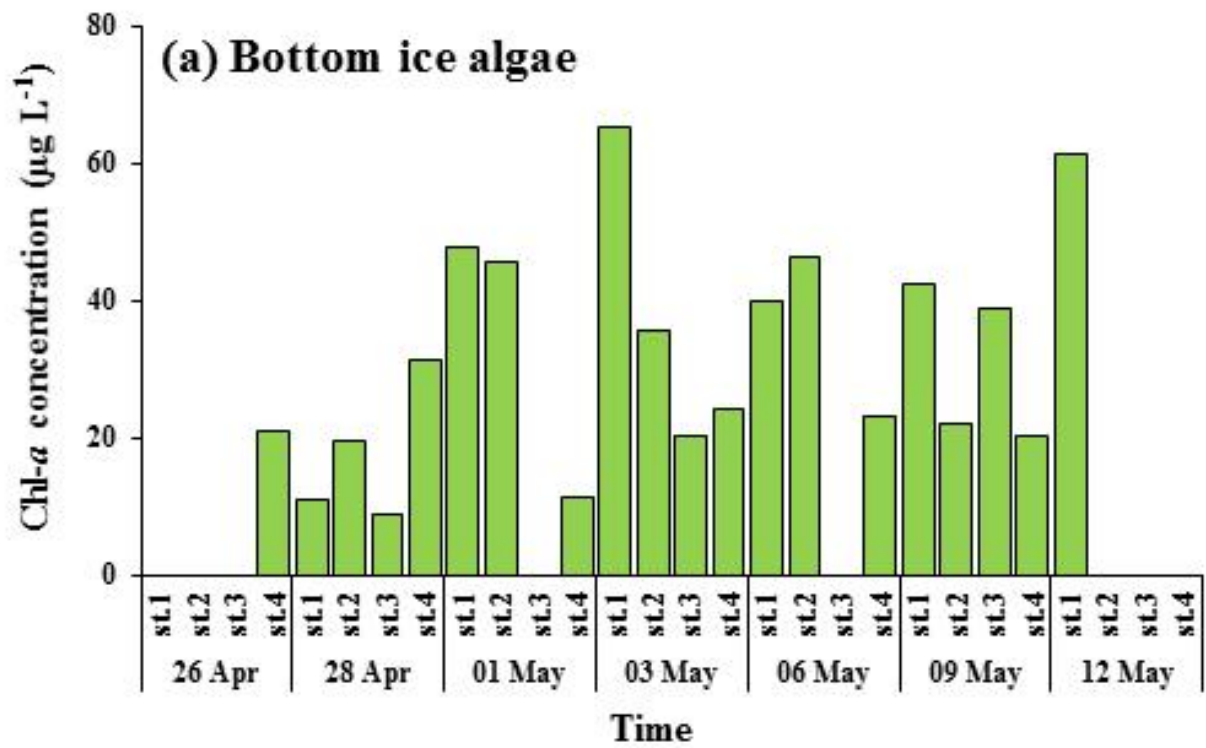


그림 3.15. 해빙 미세조류와 식물플랑크톤의 chl-a 농도 (2017년)

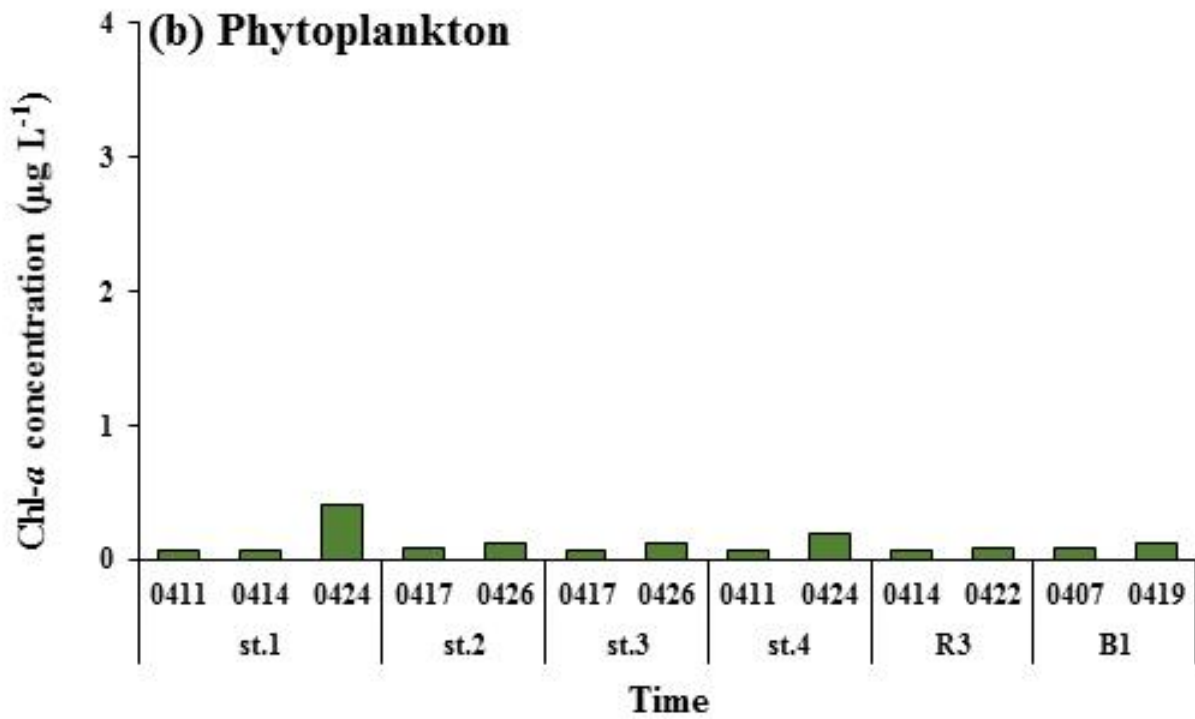
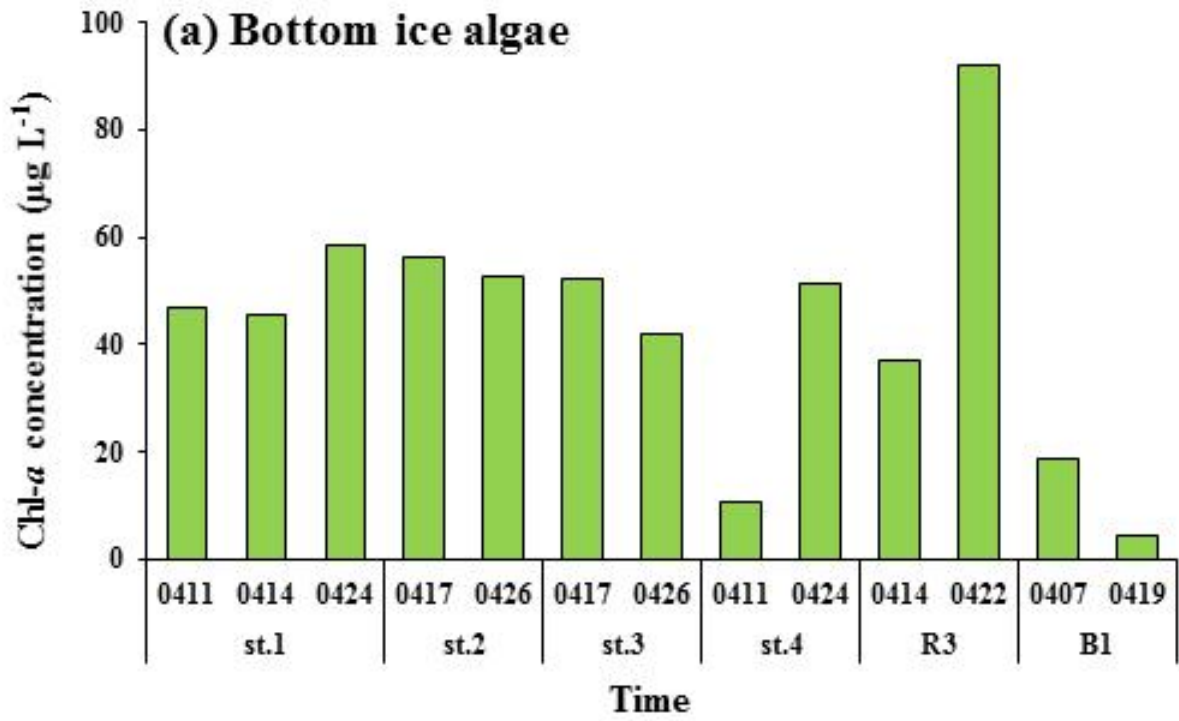
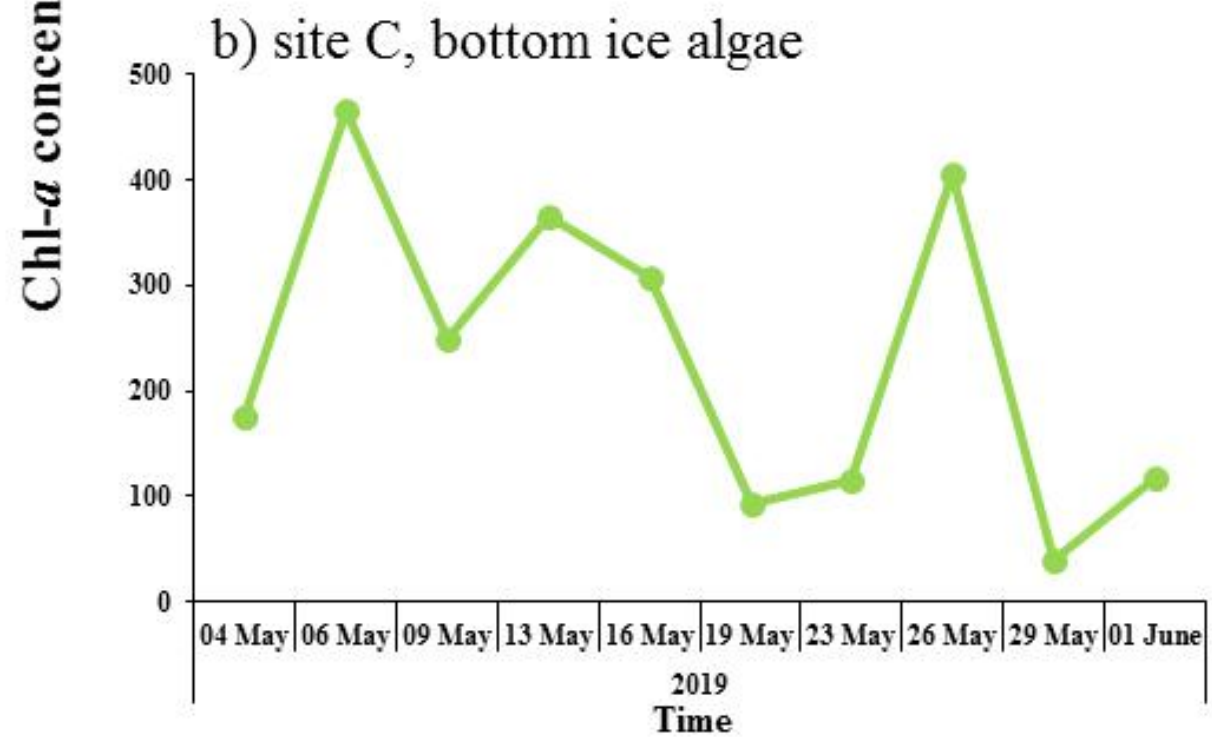
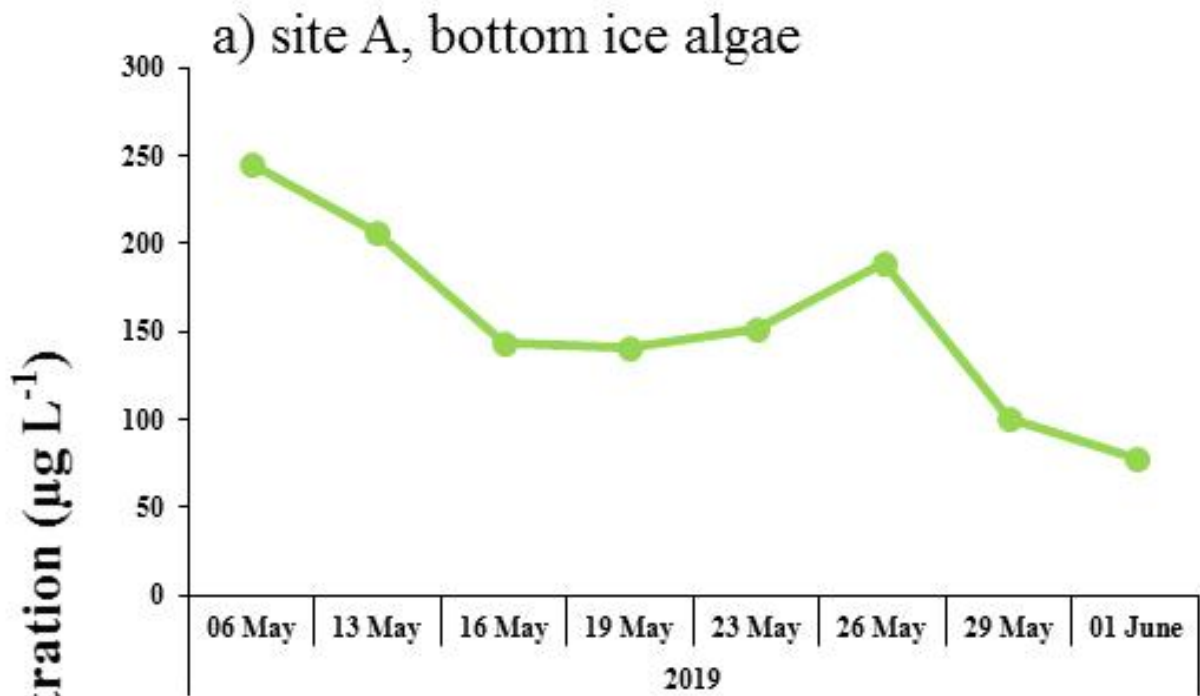


그림 3.16. 해빙 미세조류와 식물플랑크톤의 chl-a 농도 (2018년)



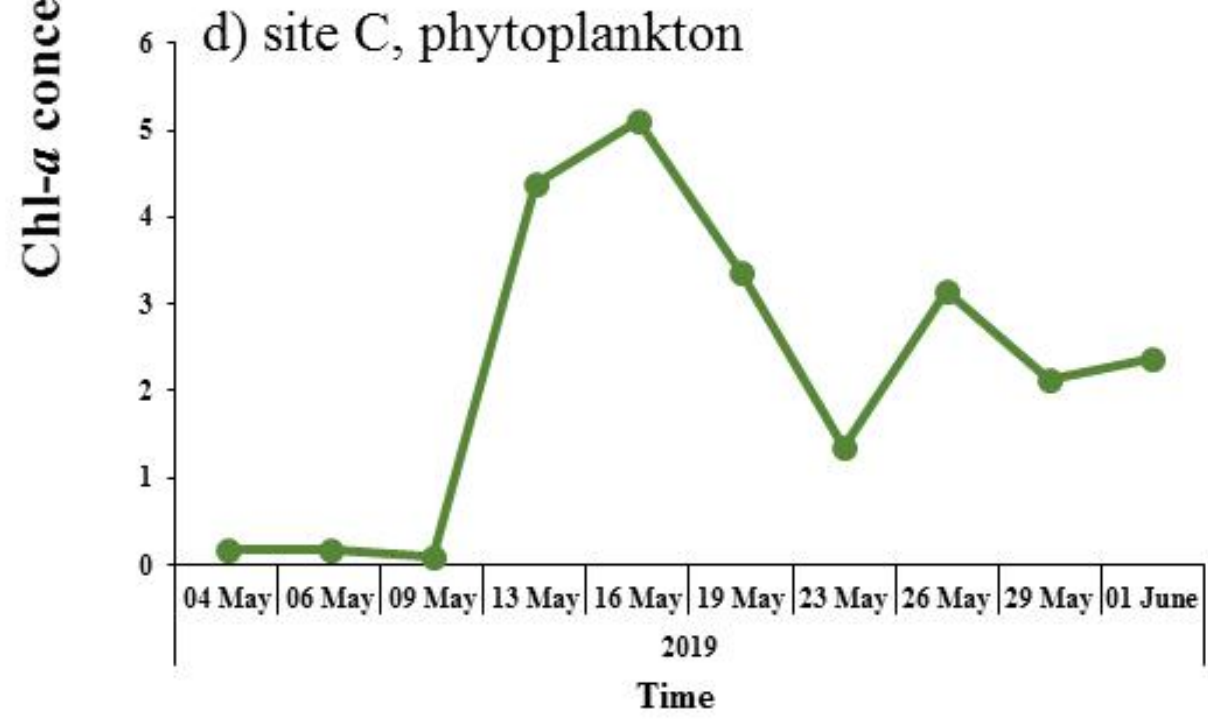
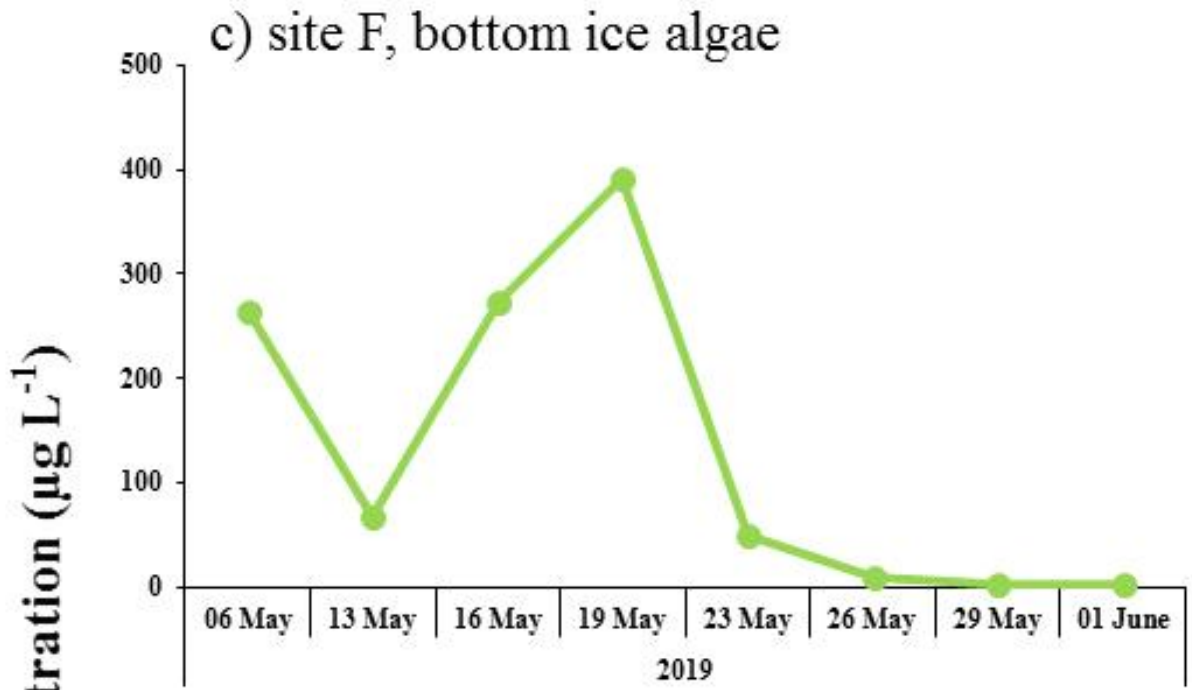


그림 3.17. 해빙 미세조류와 식물플랑크톤의 chl-a 농도 (2019년)

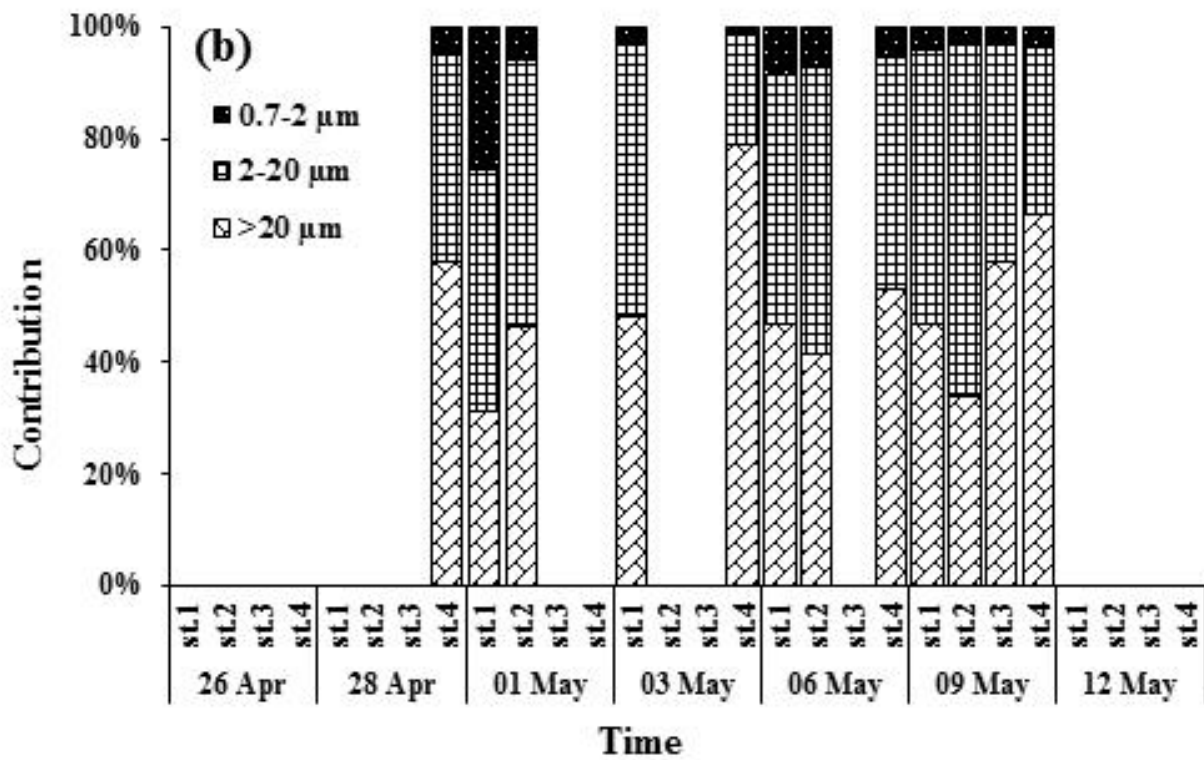
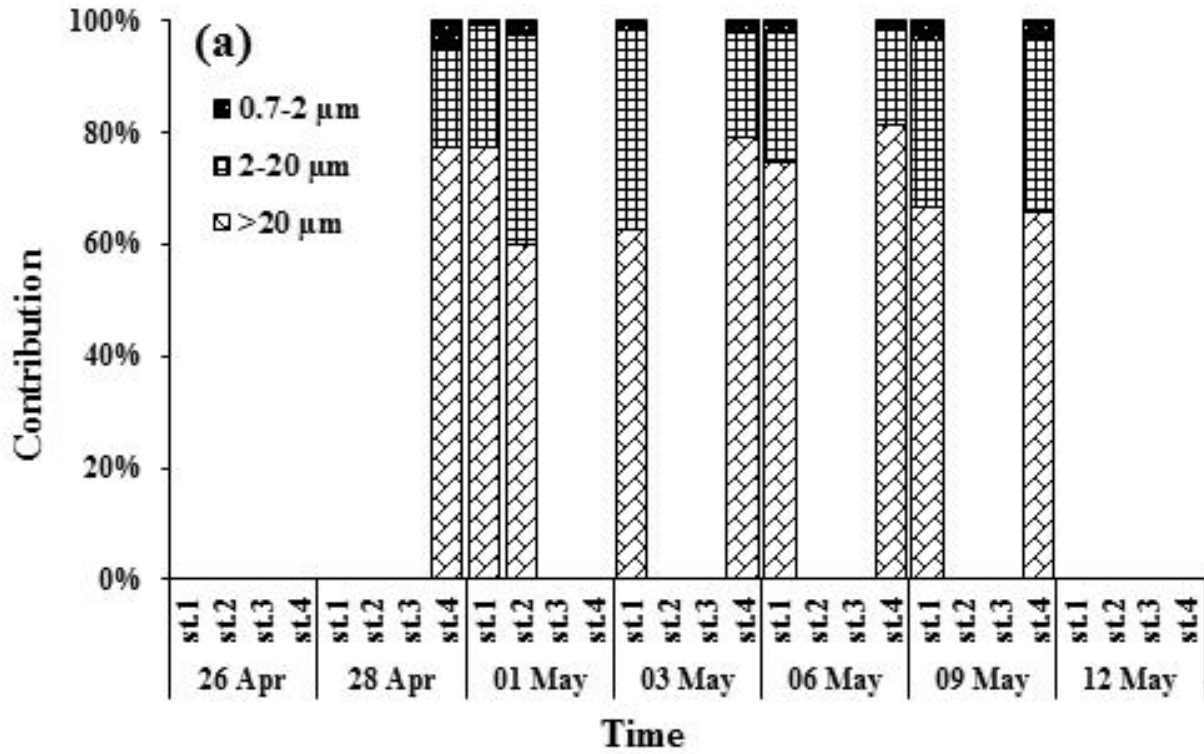


그림 3.18. 해빙 미세조류 (a)와 식물플랑크톤 (b)의 총 chl-a 농도에 대한 크기 별 기여도 (2017년)

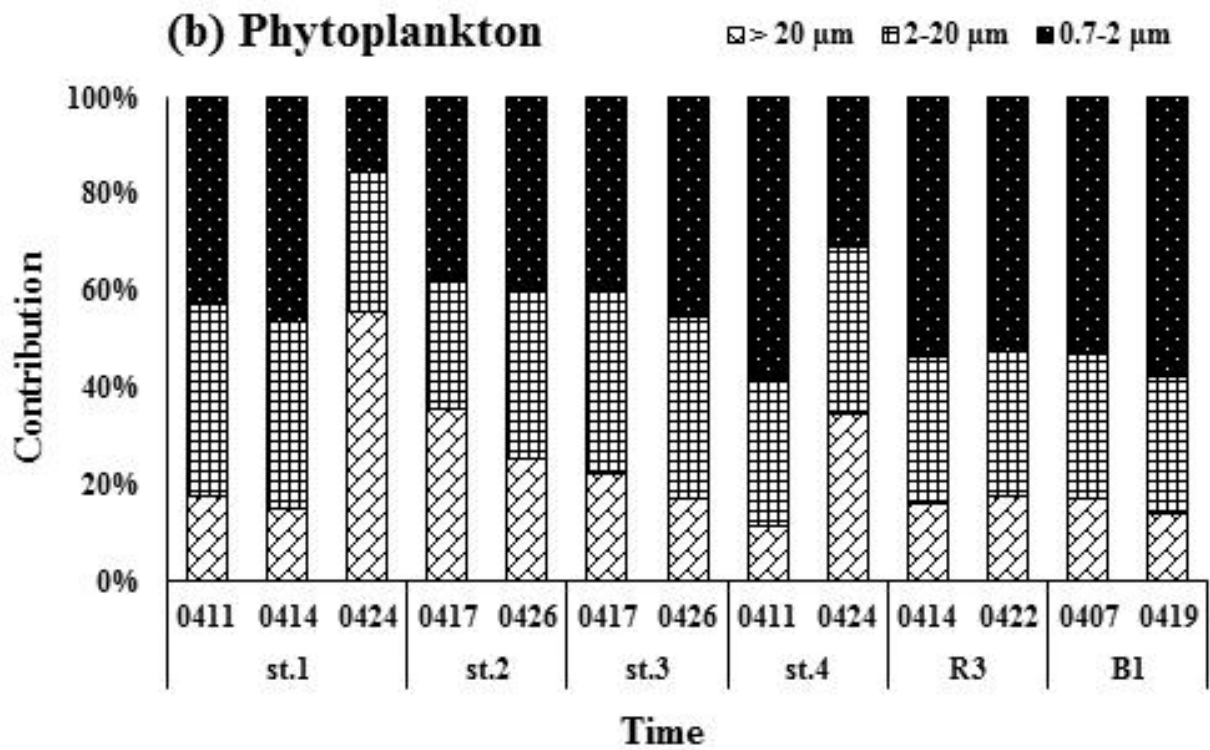
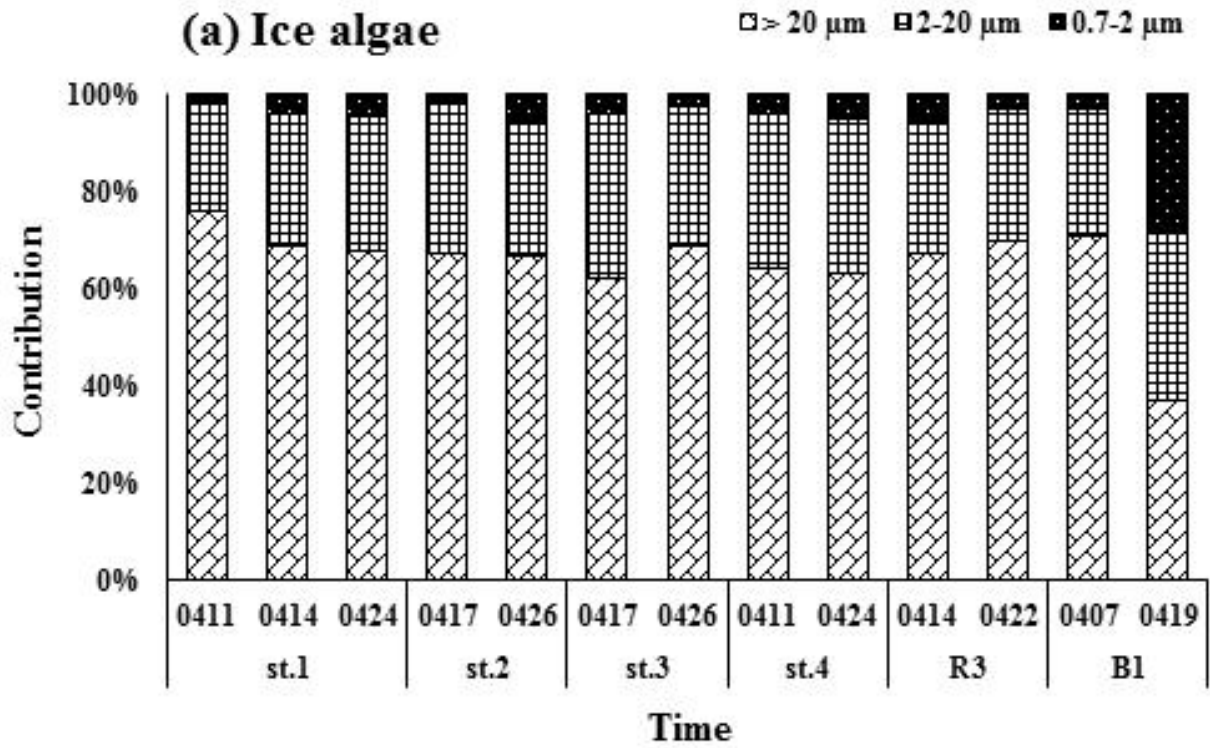
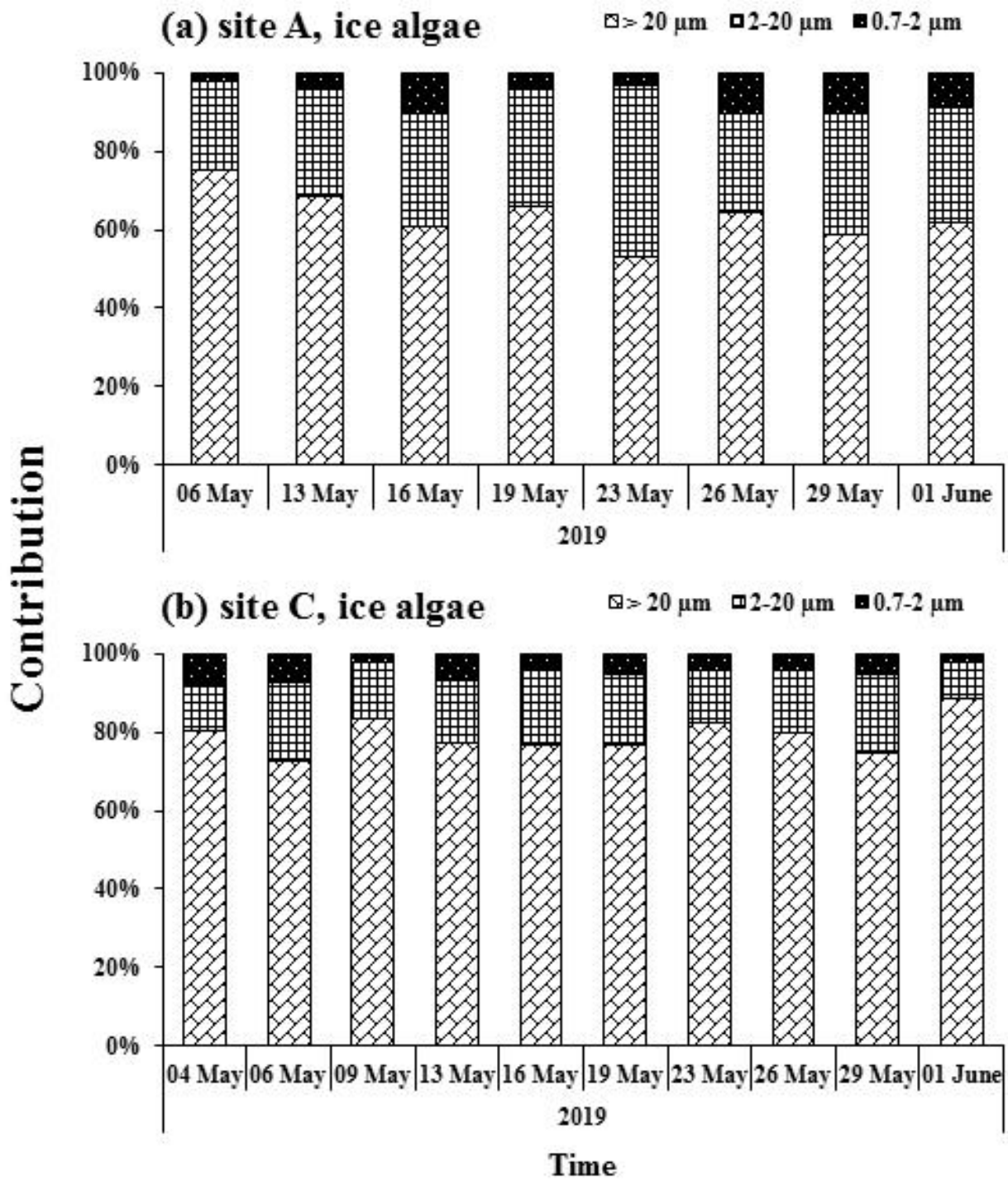


그림 3.19. 해빙 미세조류 (a)와 식물플랑크톤 (b)의 총 chl-a 농도에 대한 크기 별 기여도 (2018년)



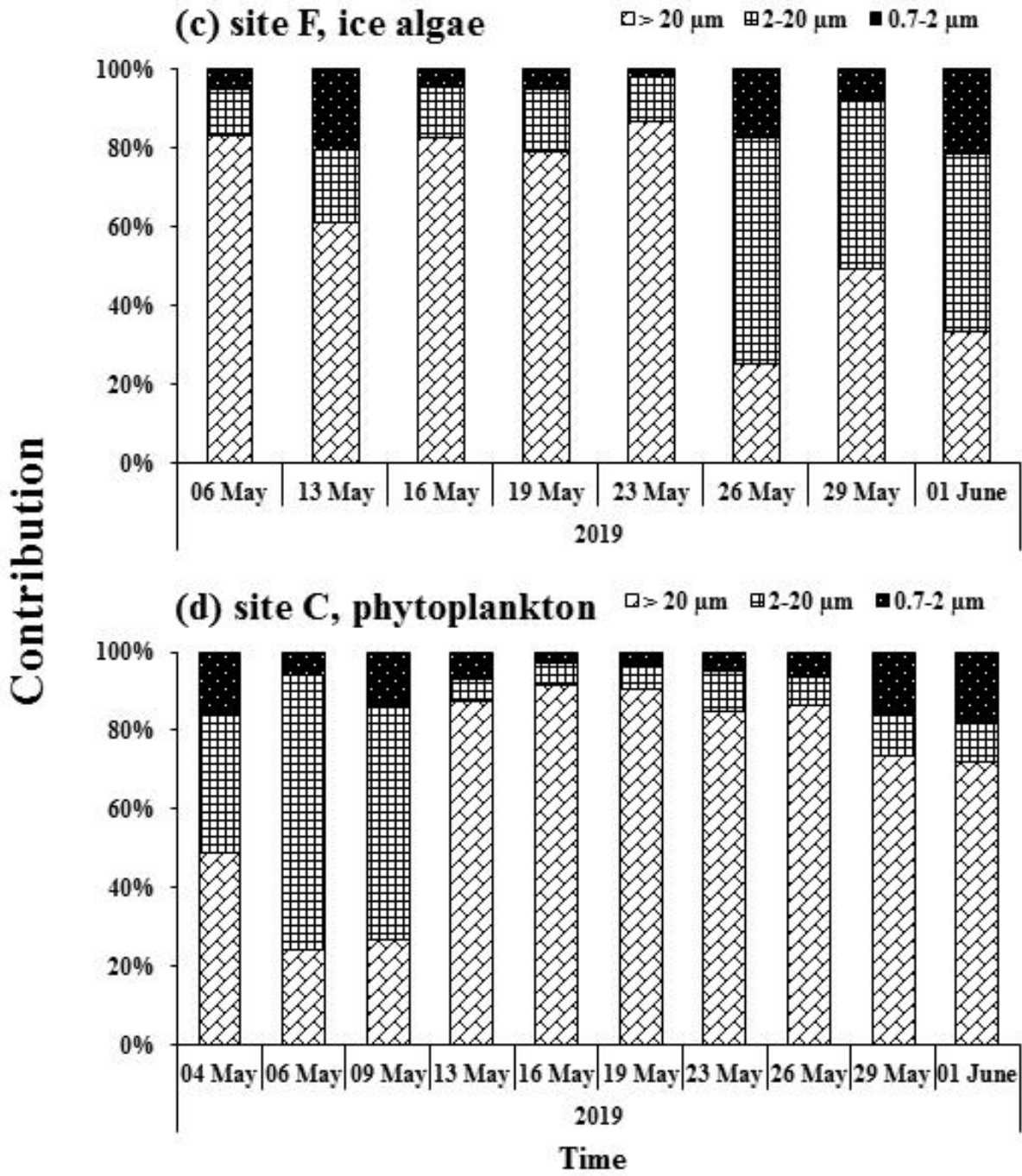


그림 3.20. 해빙 미세조류 (a, b, c)와 식물플랑크톤 (d)의 총 chl-a 농도에 대한 크기별 기여도 (2019년)

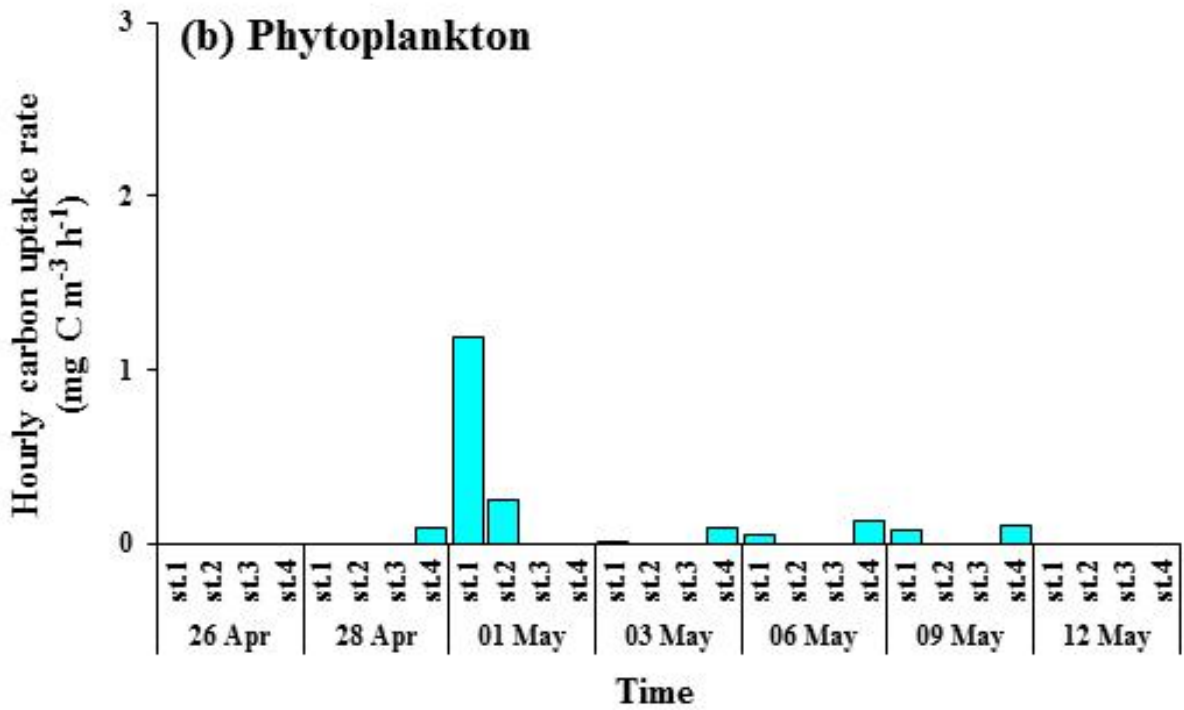
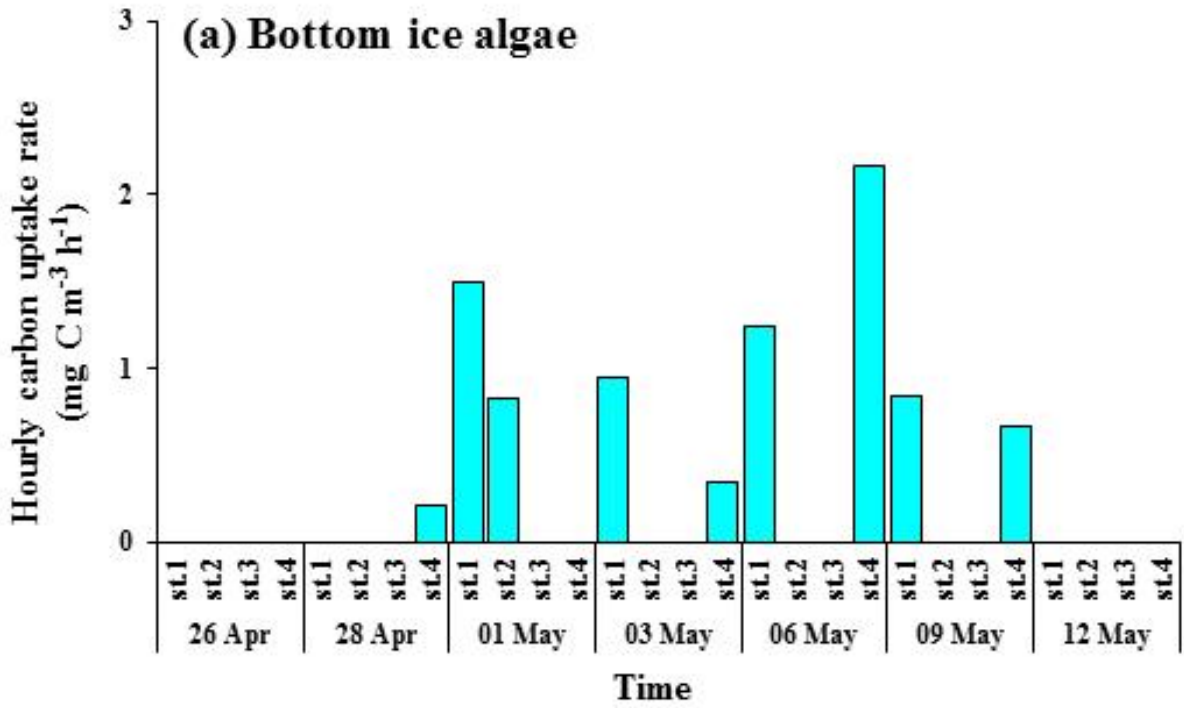


그림 3.21. 해빙 미세조류와 식물플랑크톤의 탄소흡수율 (2017년)

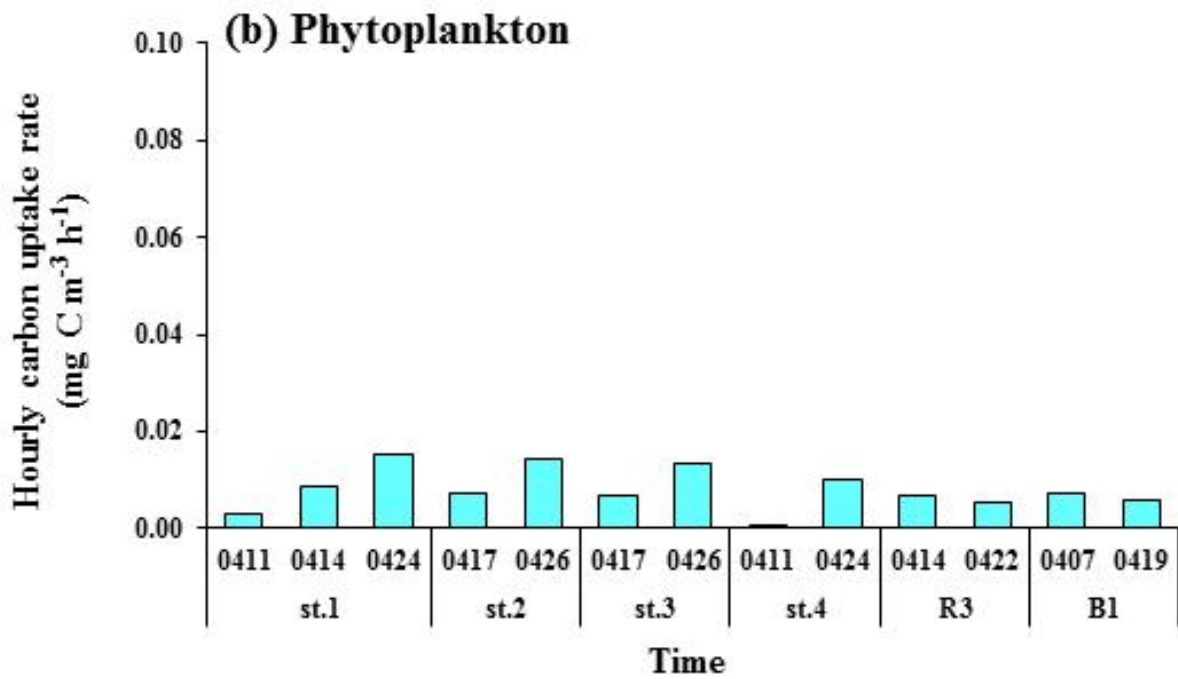
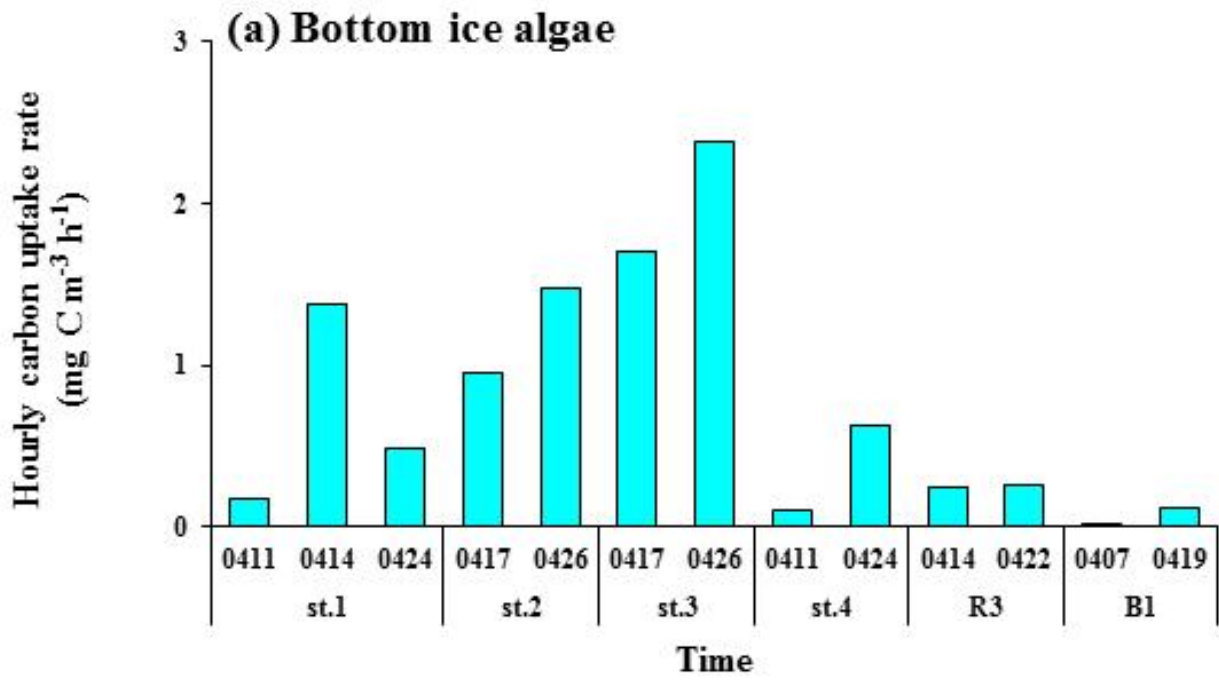


그림 3.22. 해빙 미세조류와 식물플랑크톤의 탄소흡수율 (2018년)

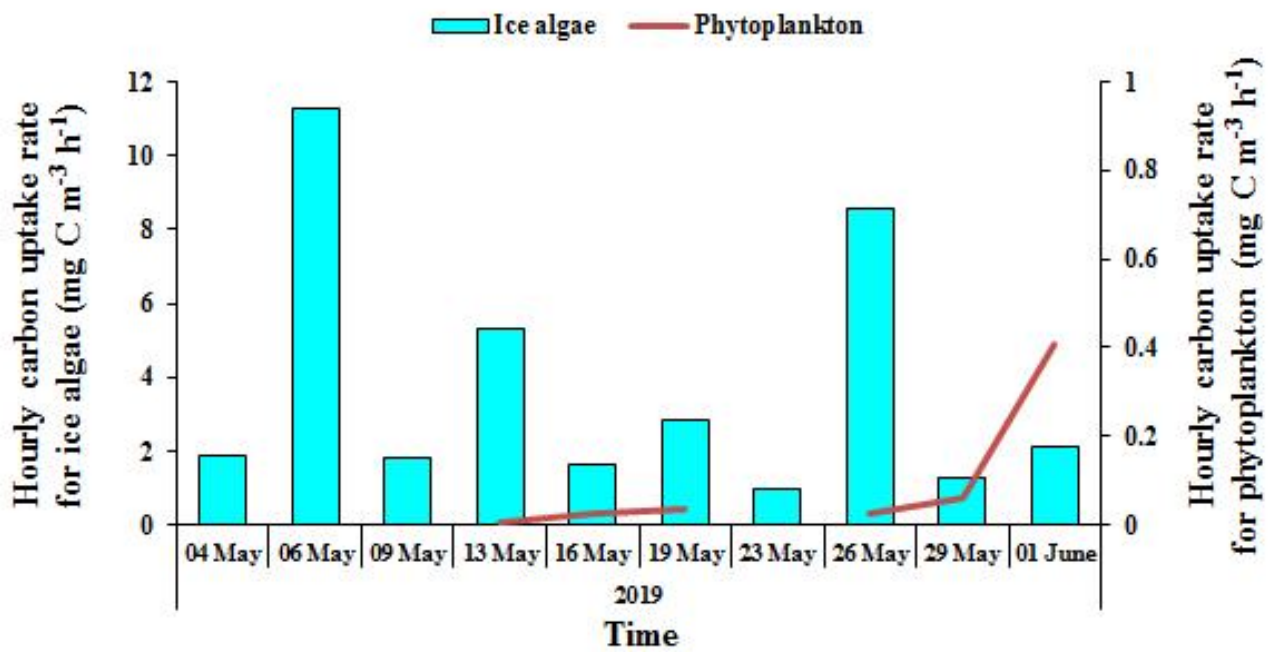
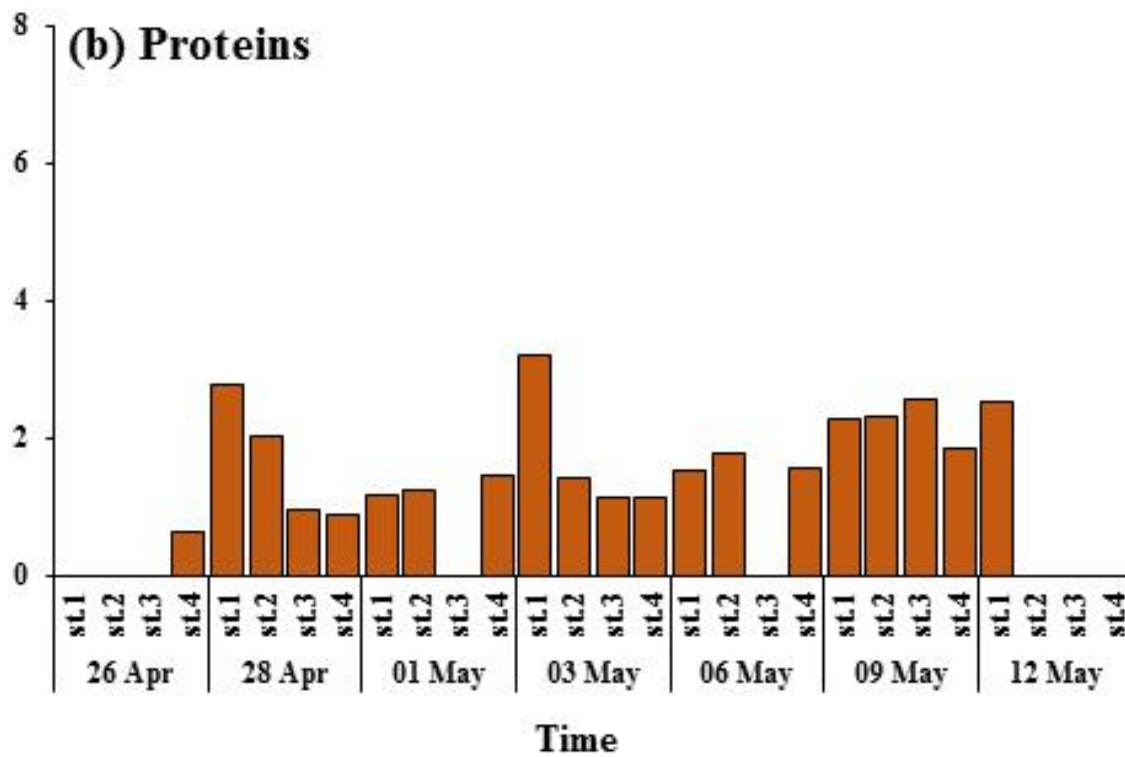
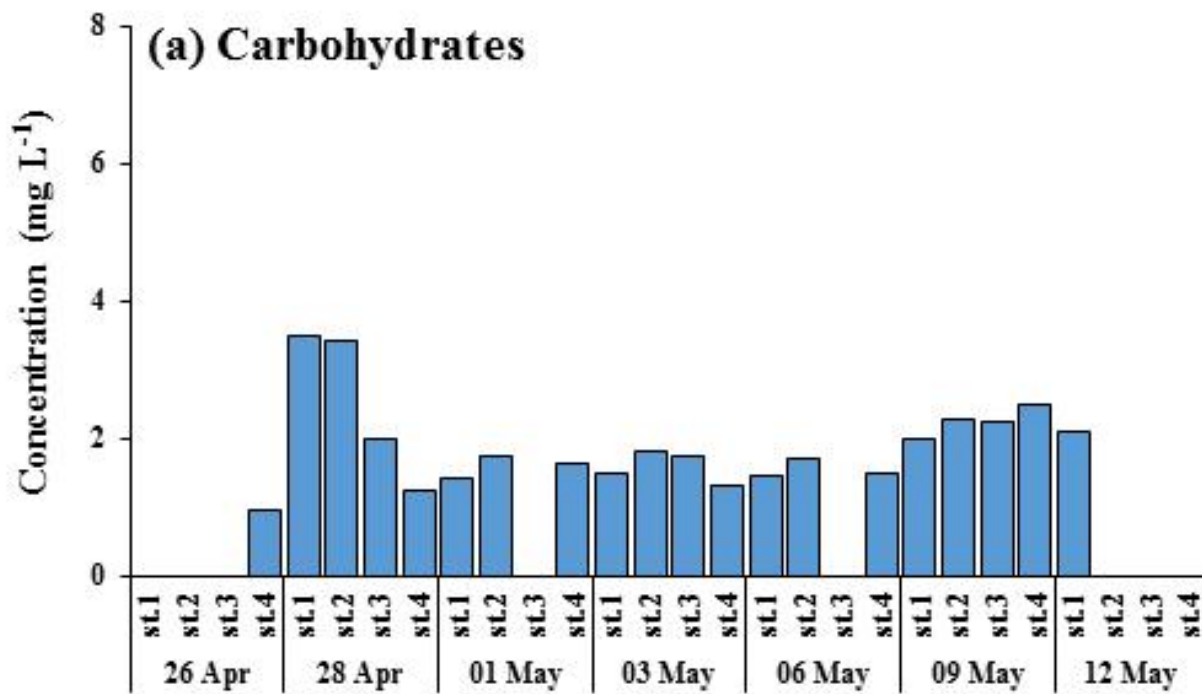


그림 3.23. 해빙 미세조류와 식물플랑크톤의 탄소흡수율 (2019년)





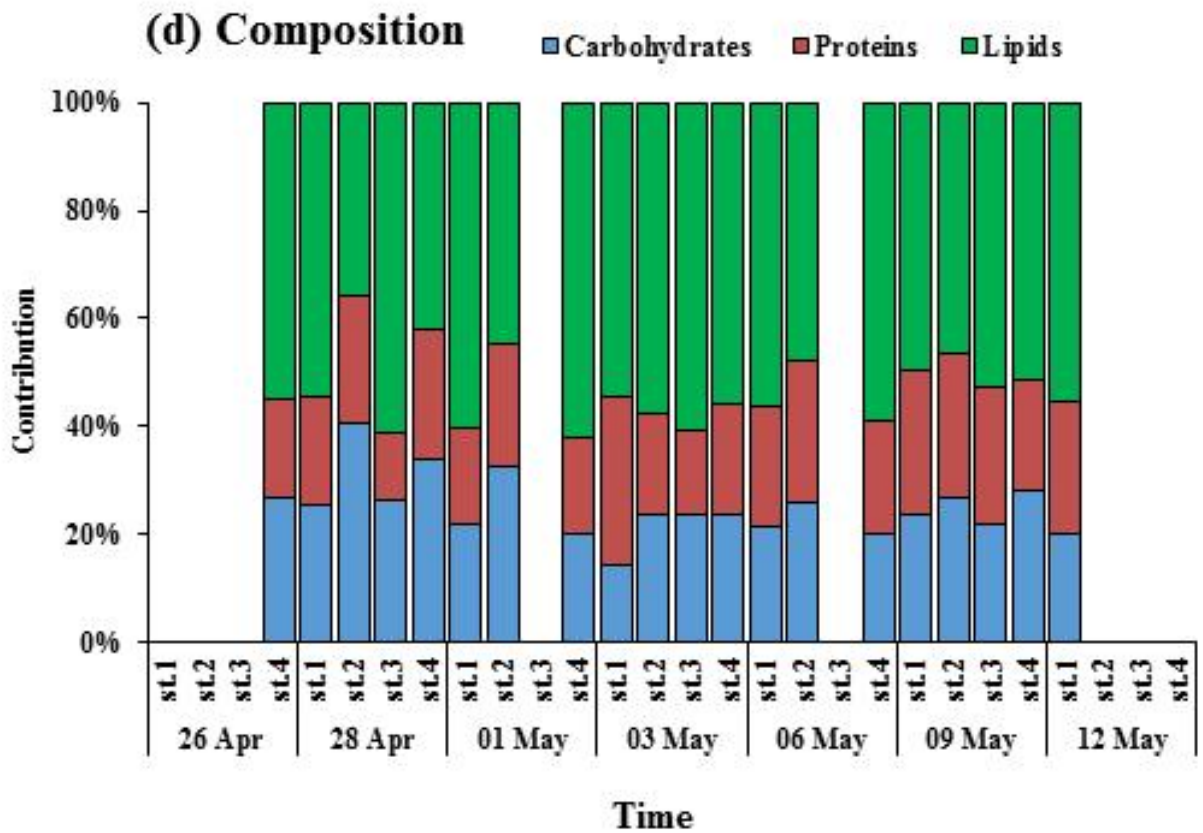
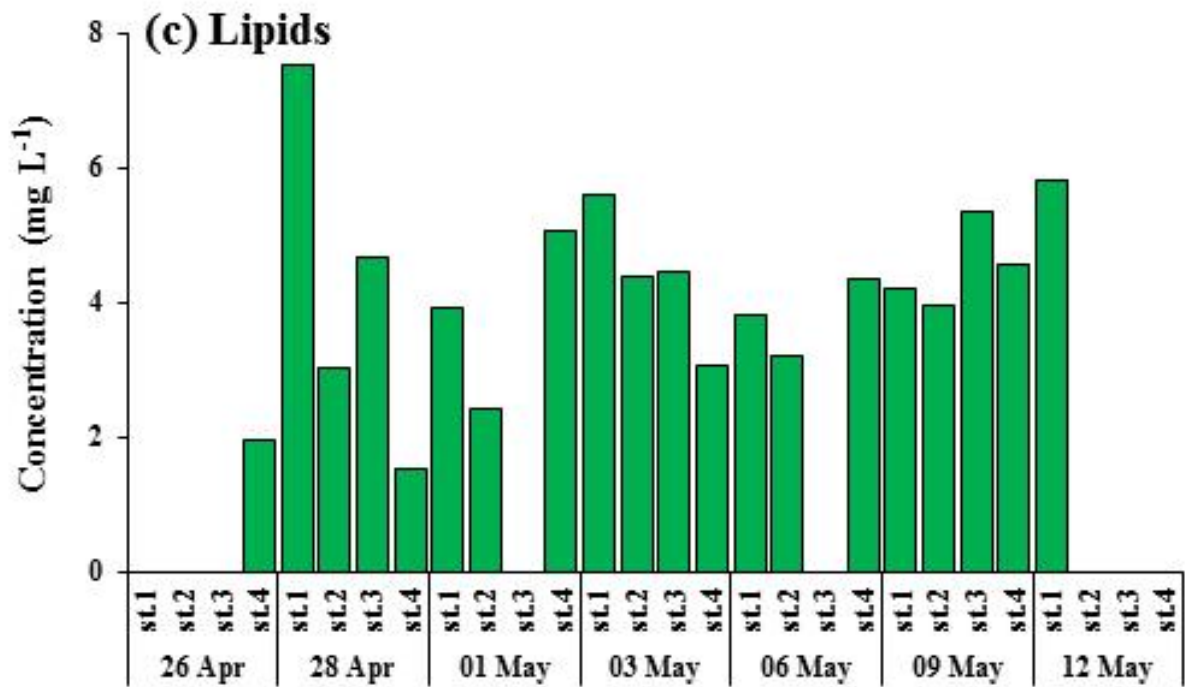
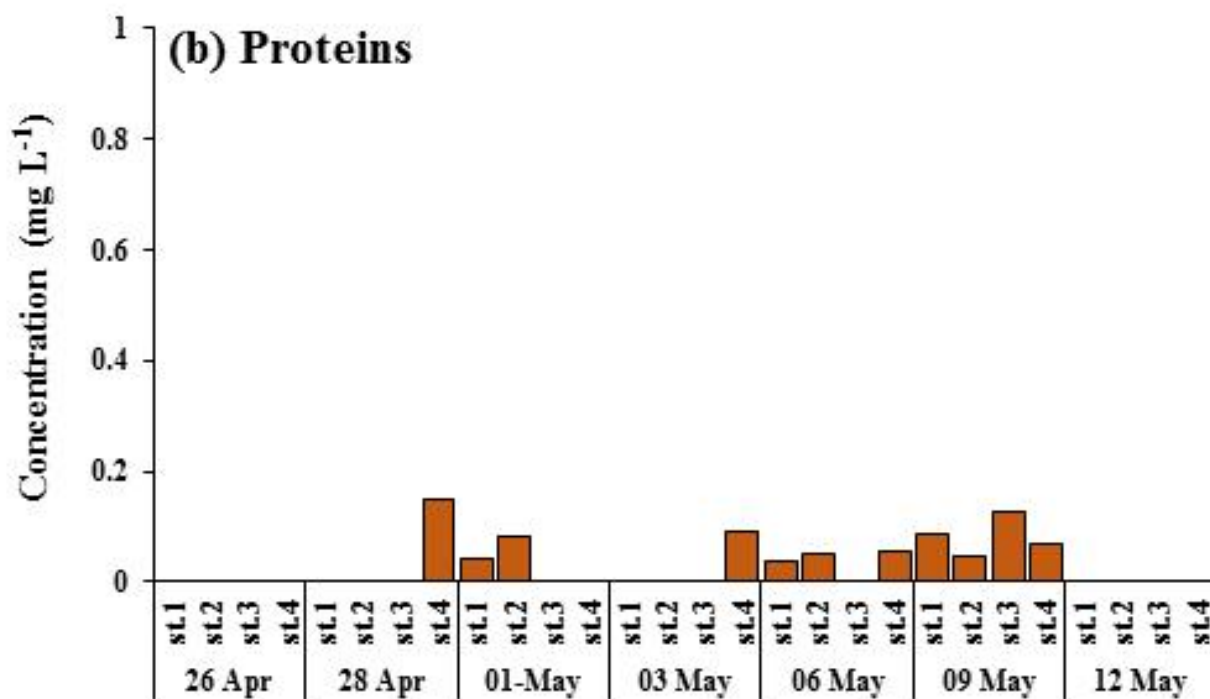
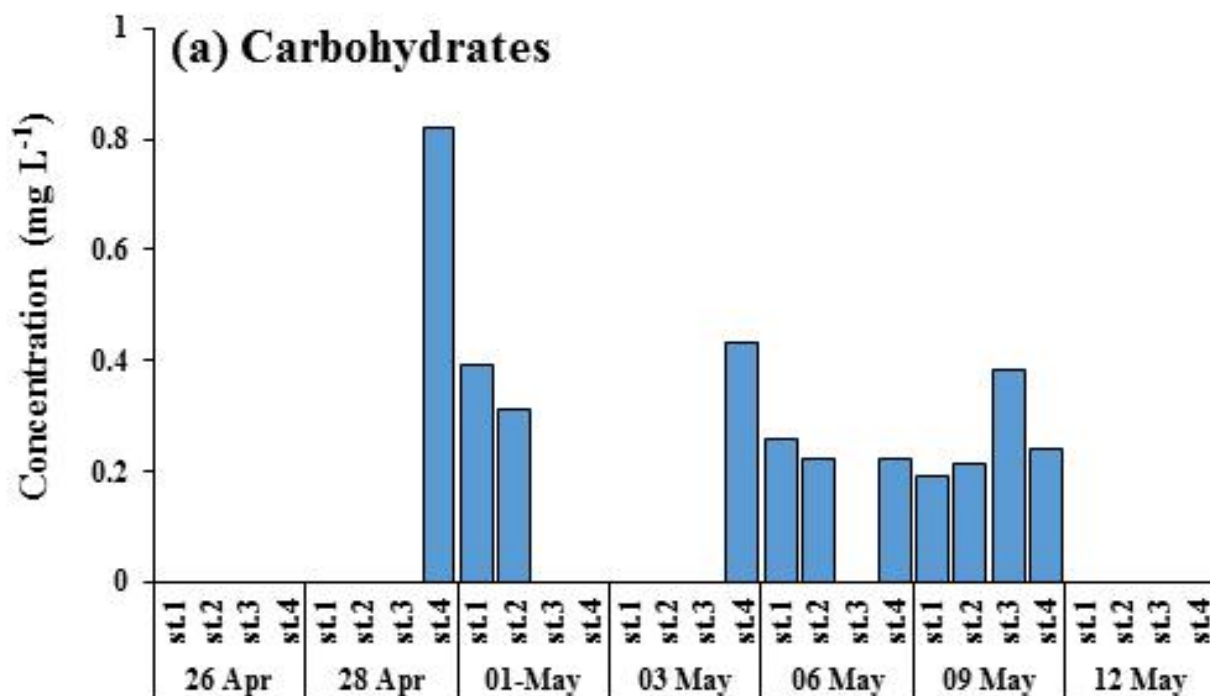


그림 3.24. 해빙 미세조류의 거대분자조성 (2017년)



Time

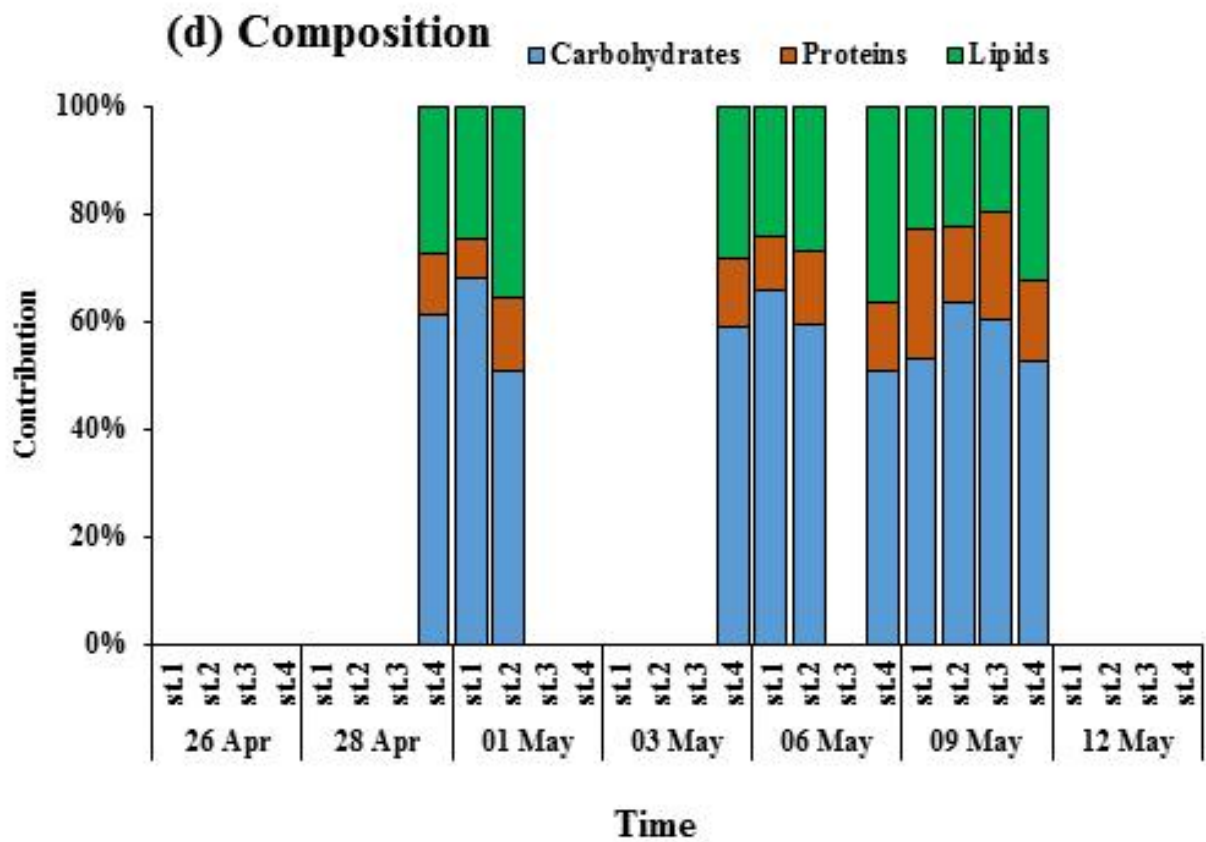
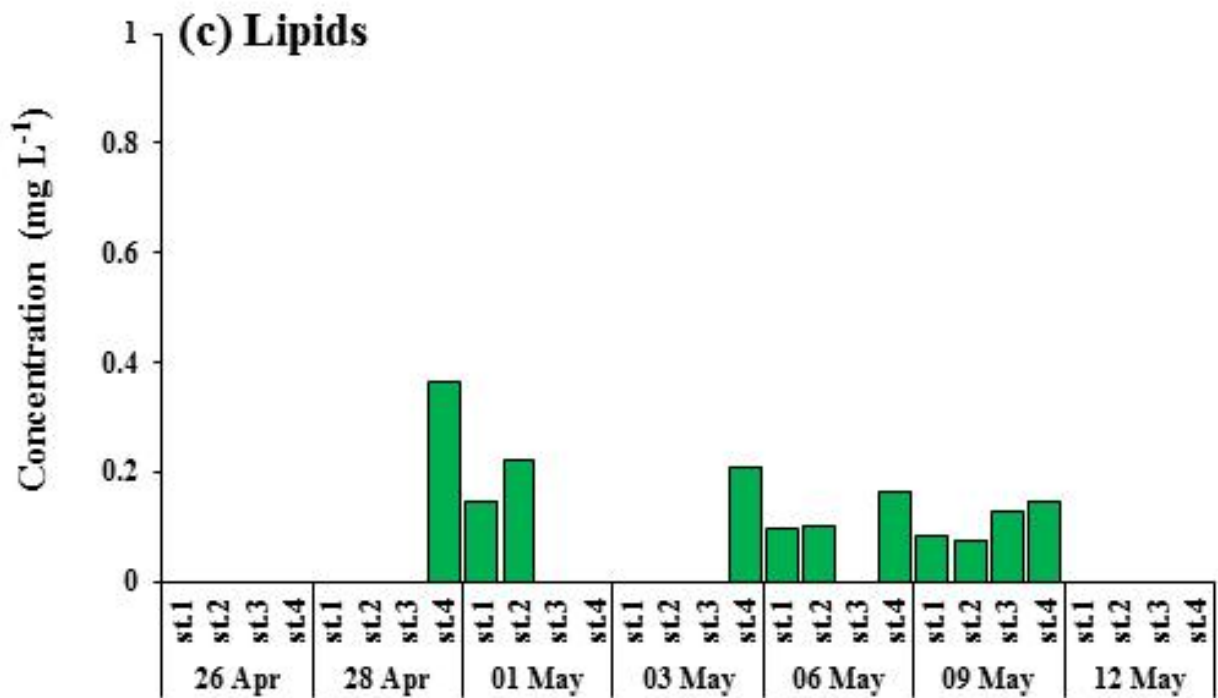
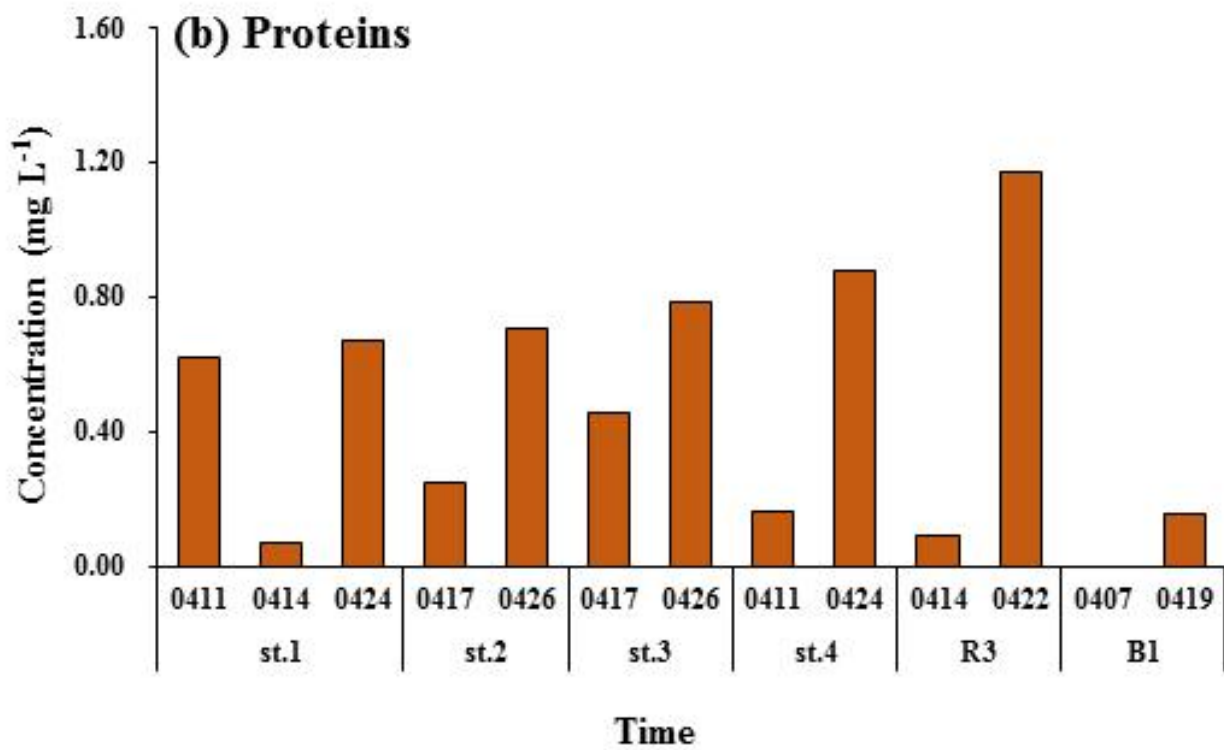
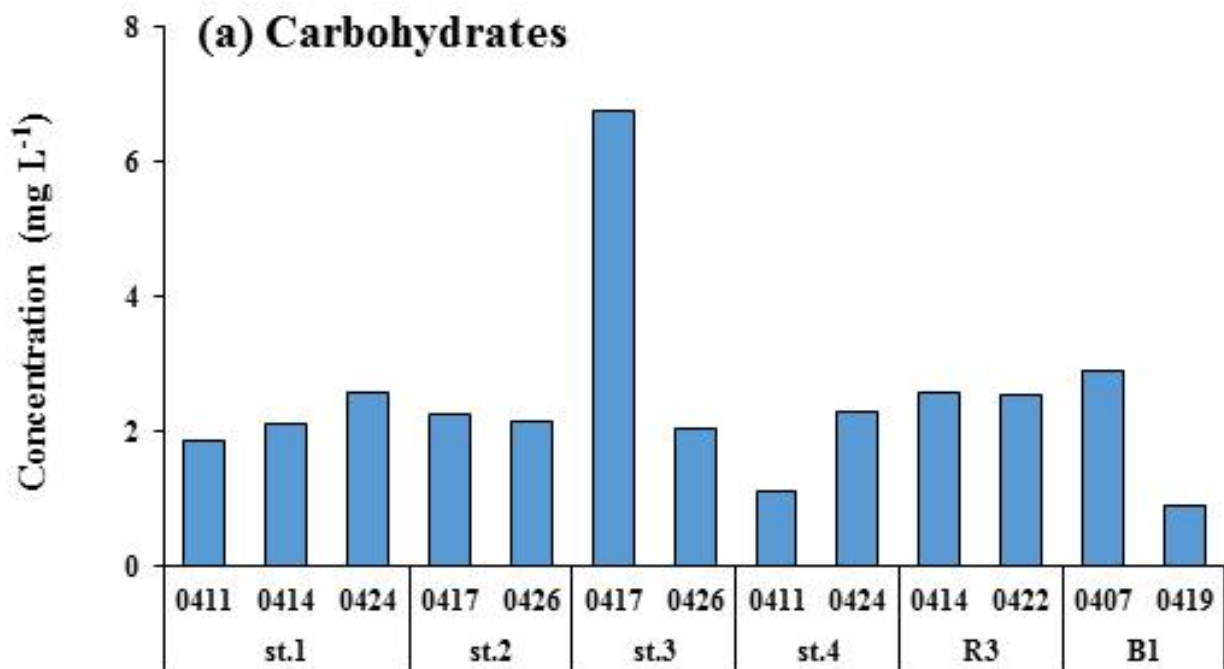


그림 3.25. 식물플랑크톤의 거대분자조성 (2017년)



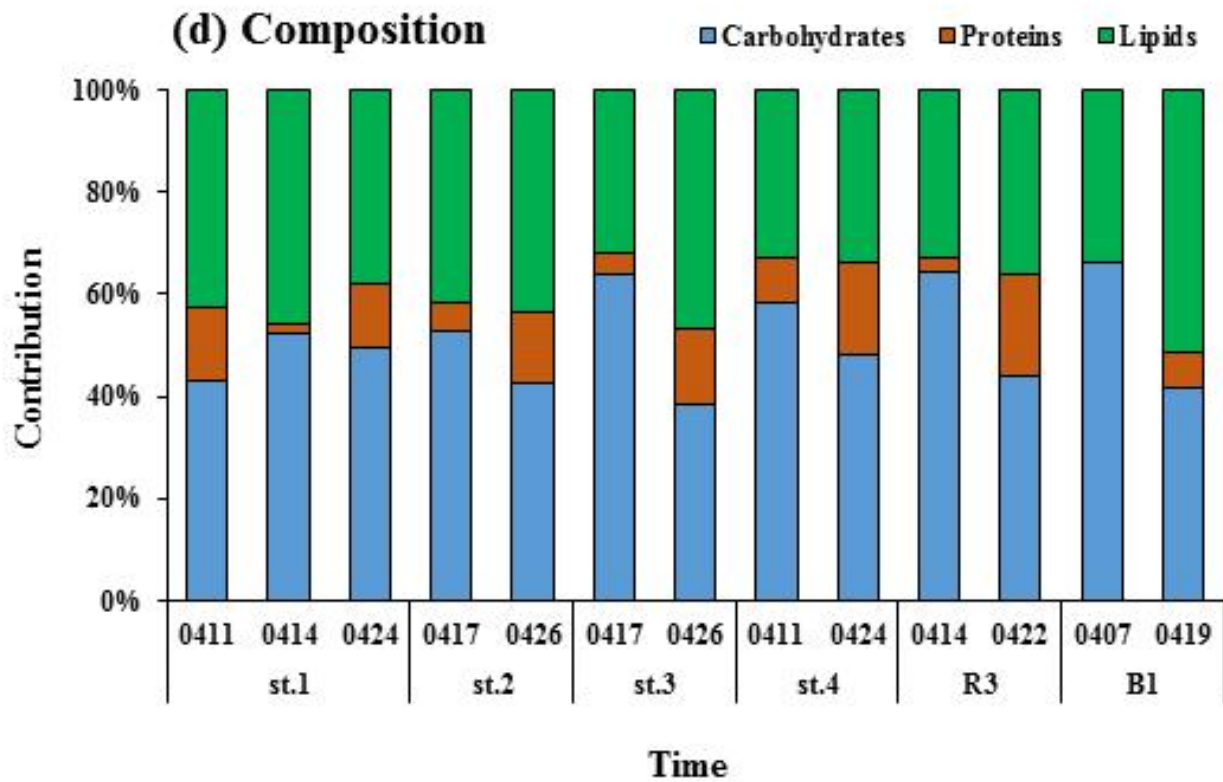
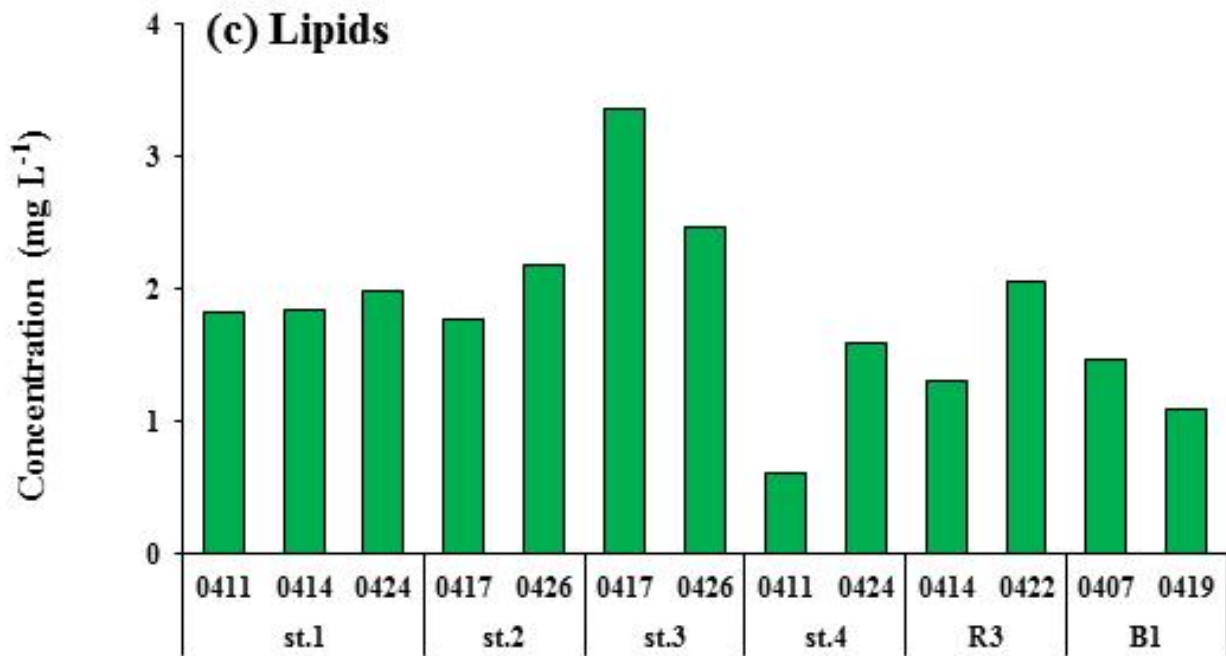
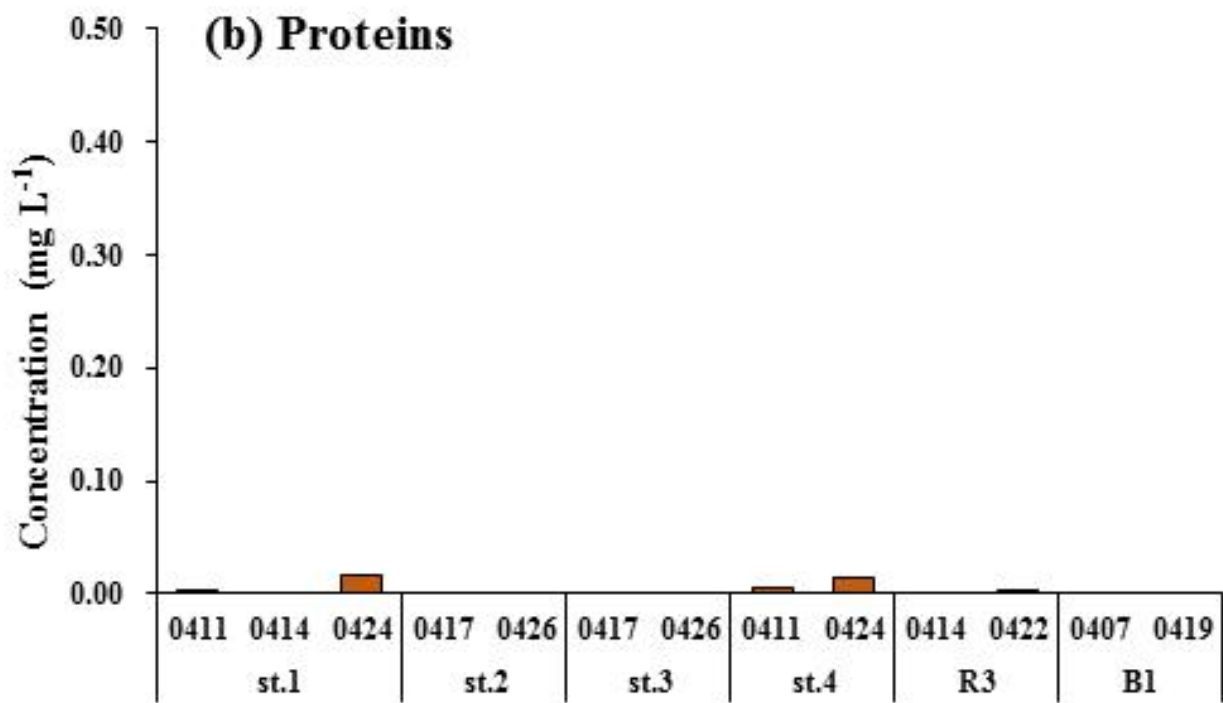
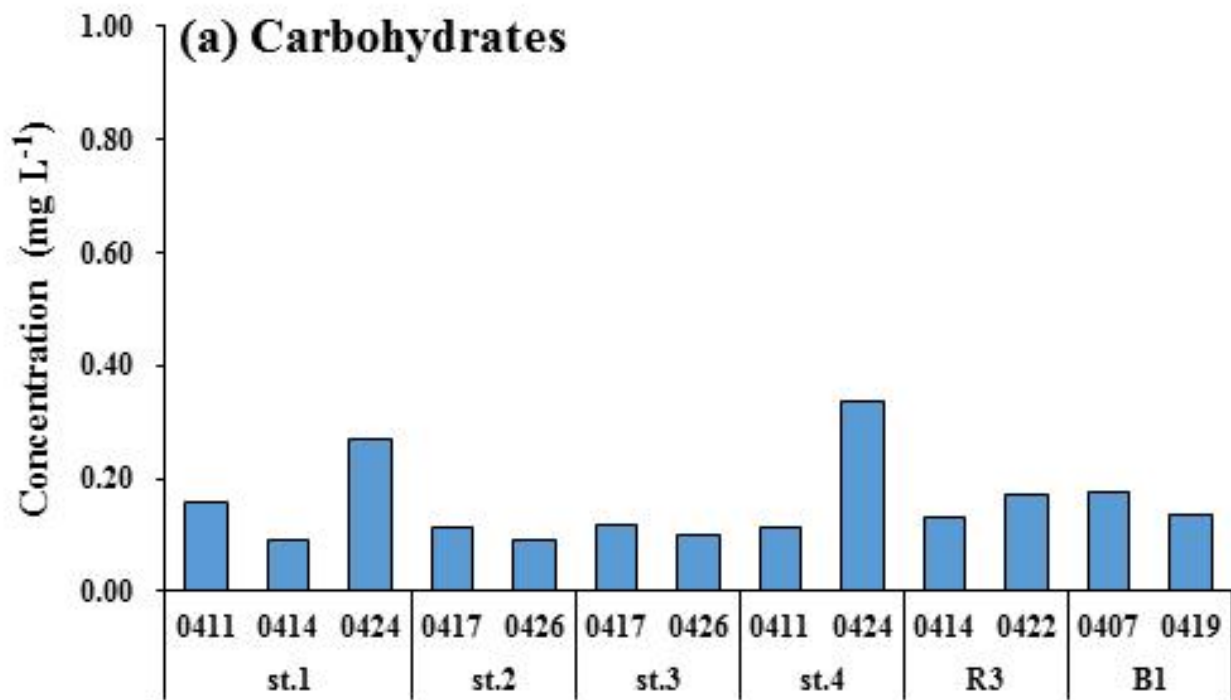


그림 3.26. 해빙 미세조류의 거대분자조성 (2018년)



Time

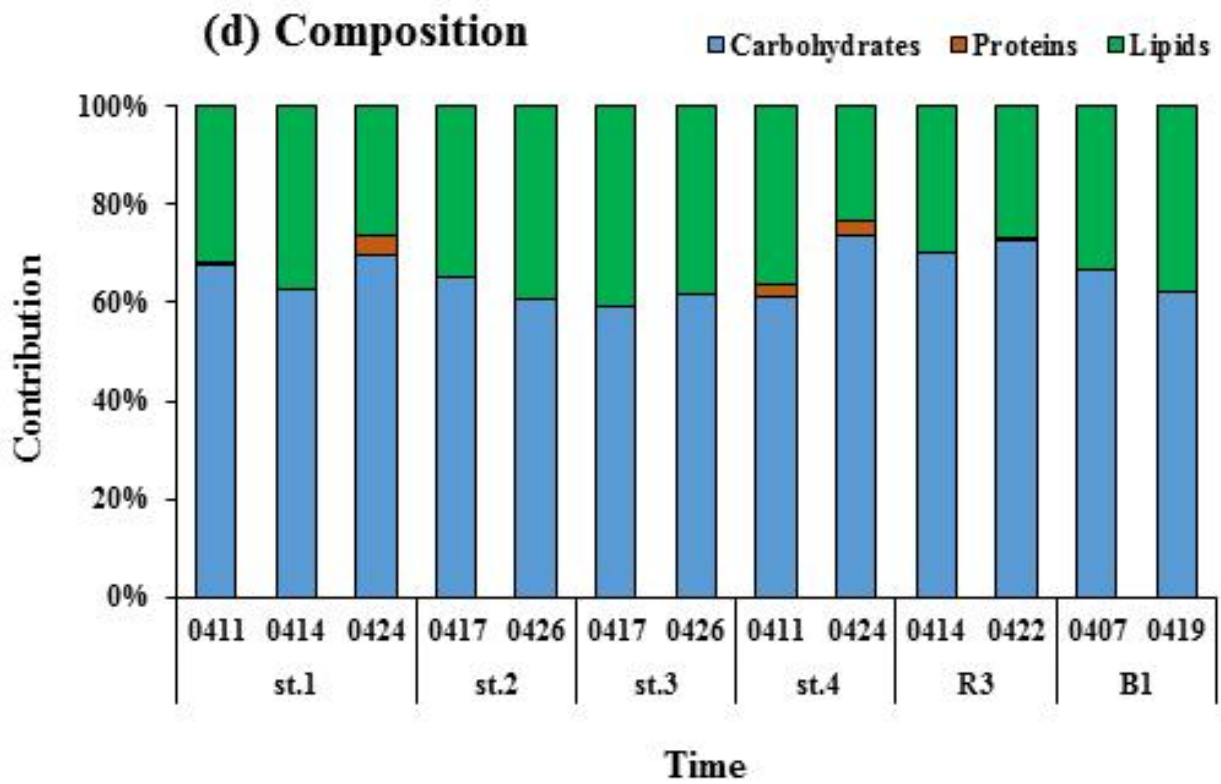
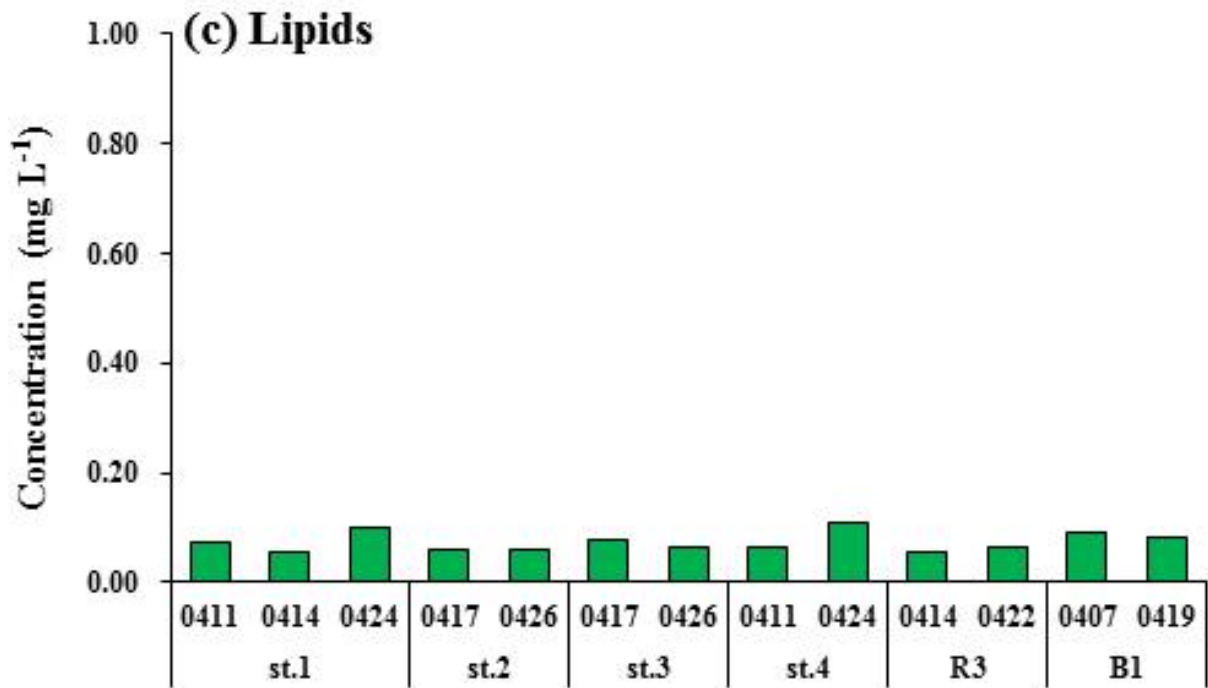
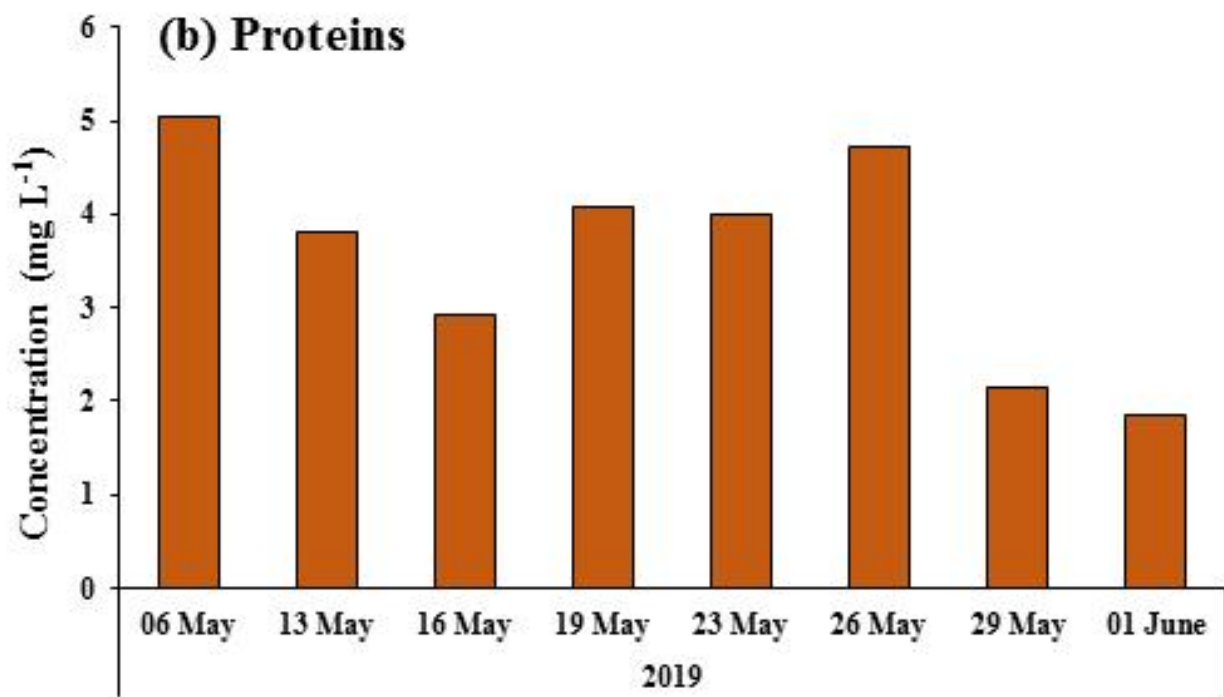
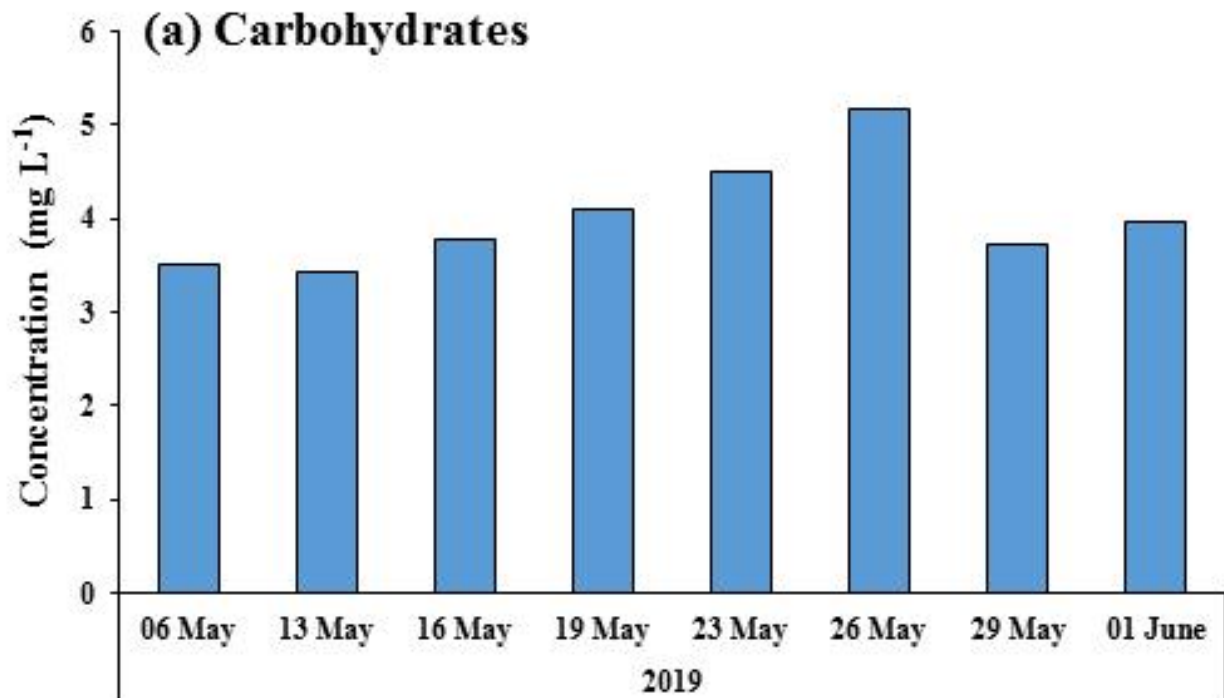


그림 3.27. 식물플랑크톤의 거대분자조성 (2018년)

site A



Time

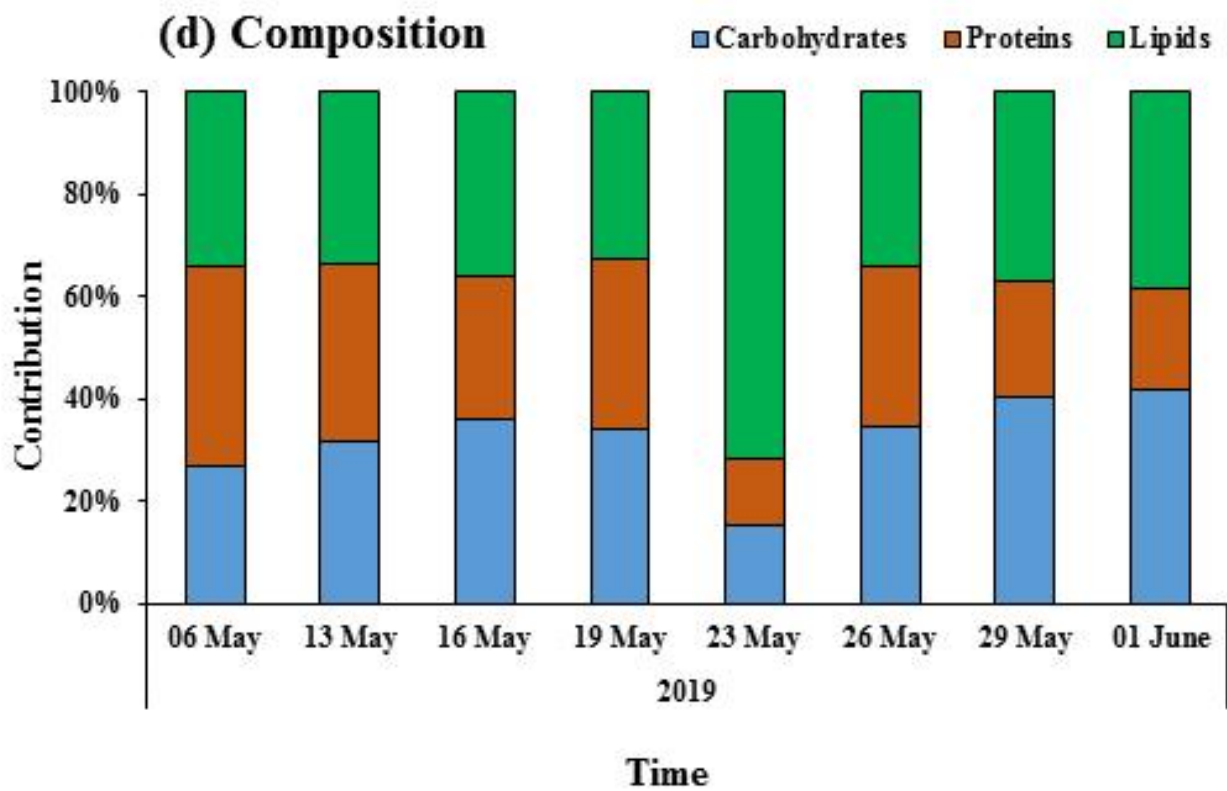
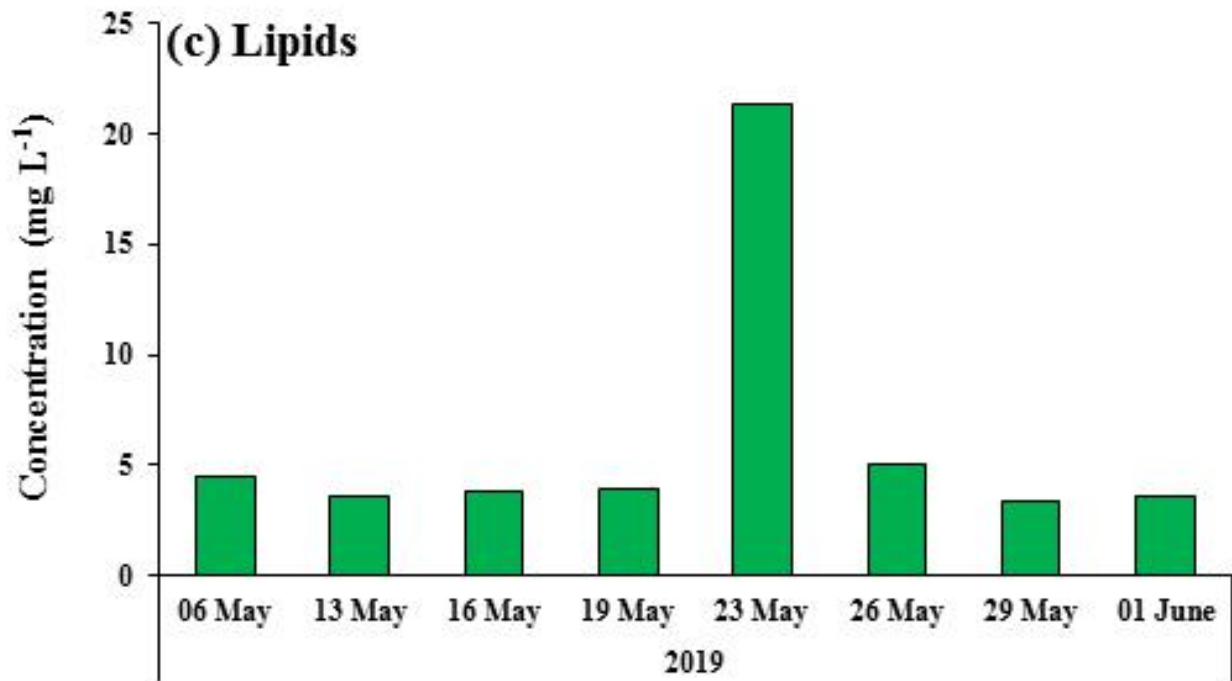
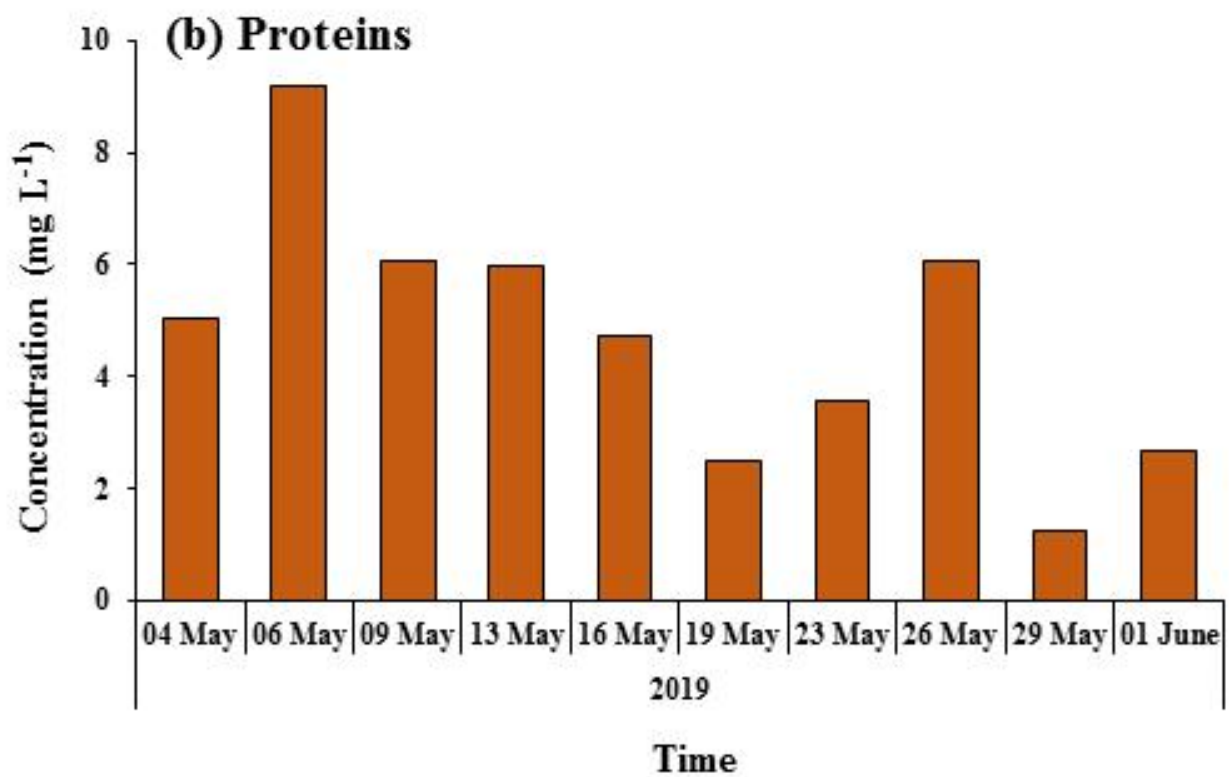
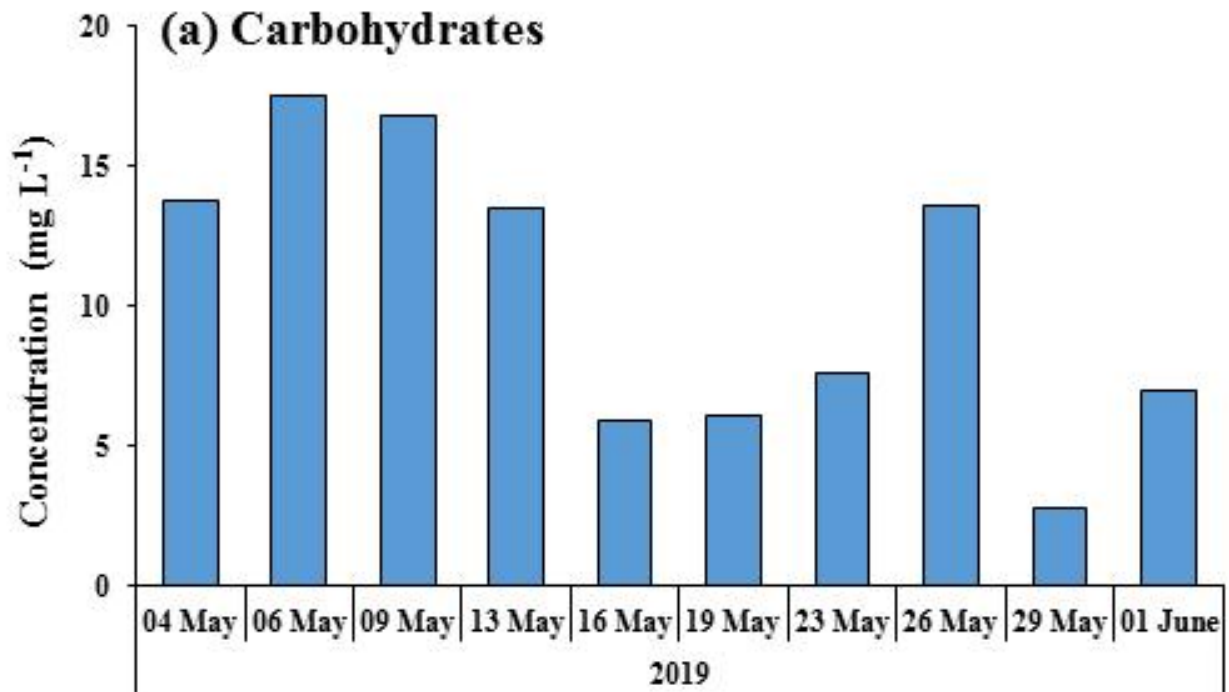


그림 3.28. site A에서 해빙 미세조류의 거대분자조성 (2019년)

site C



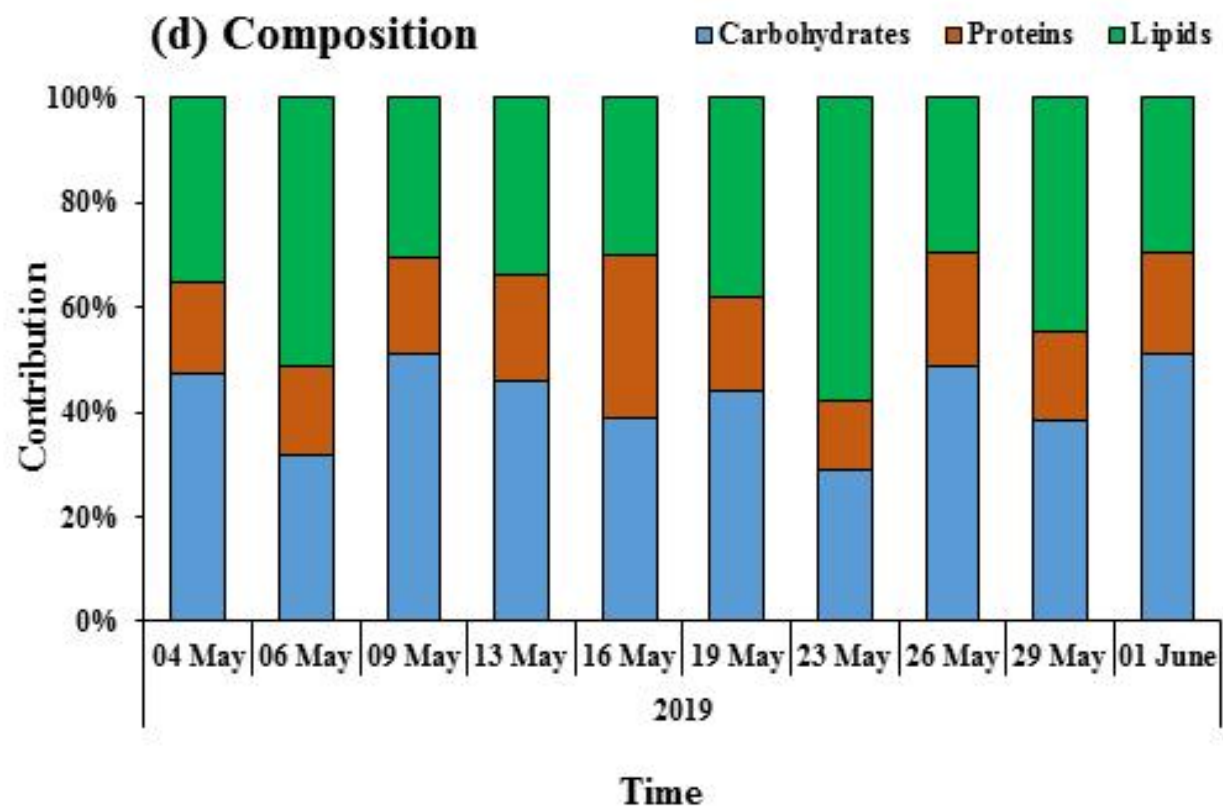
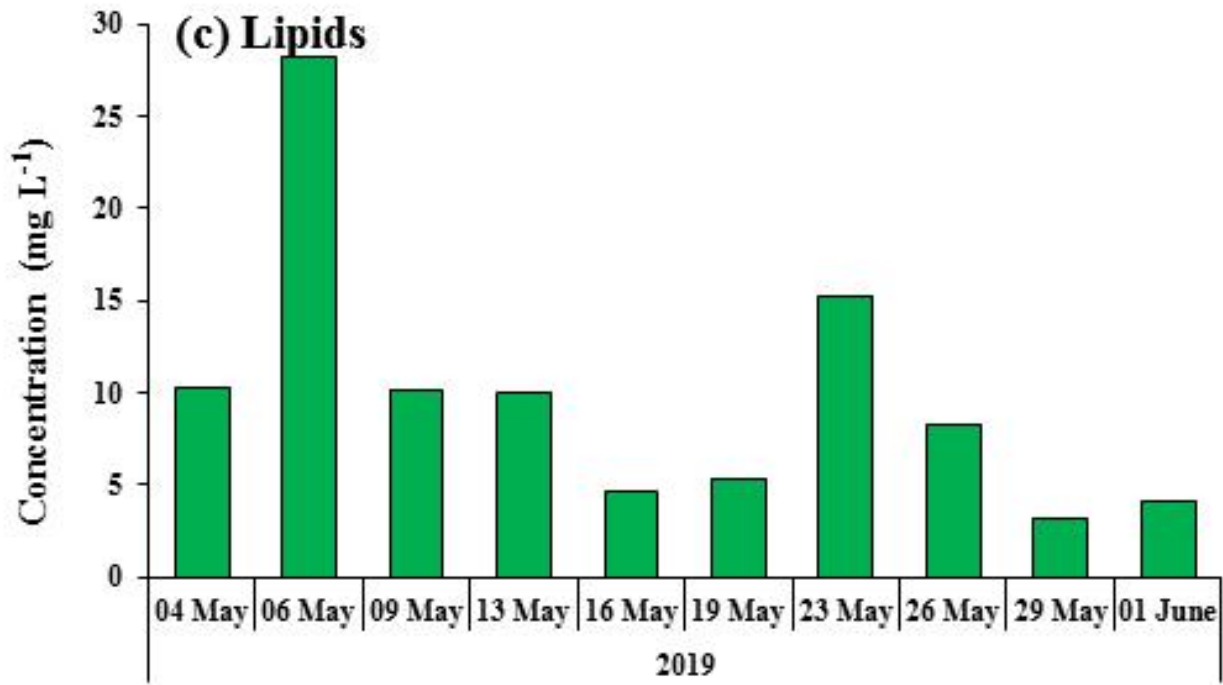
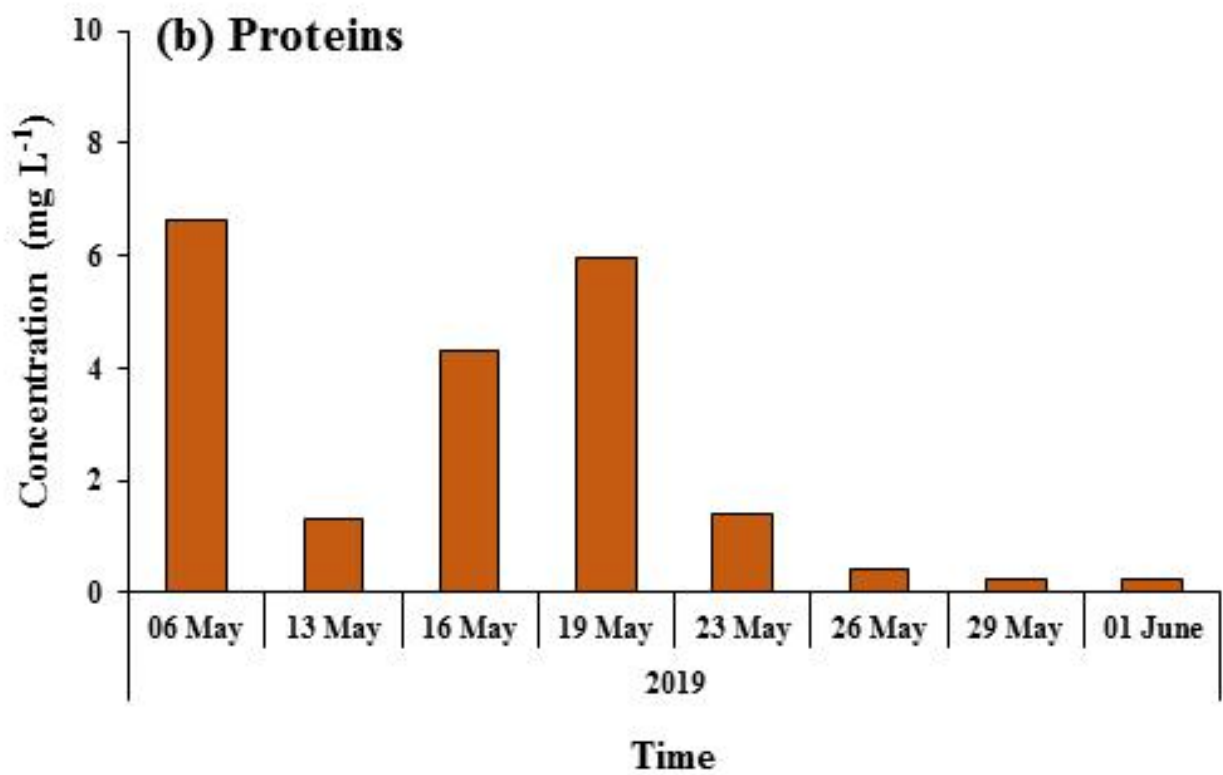
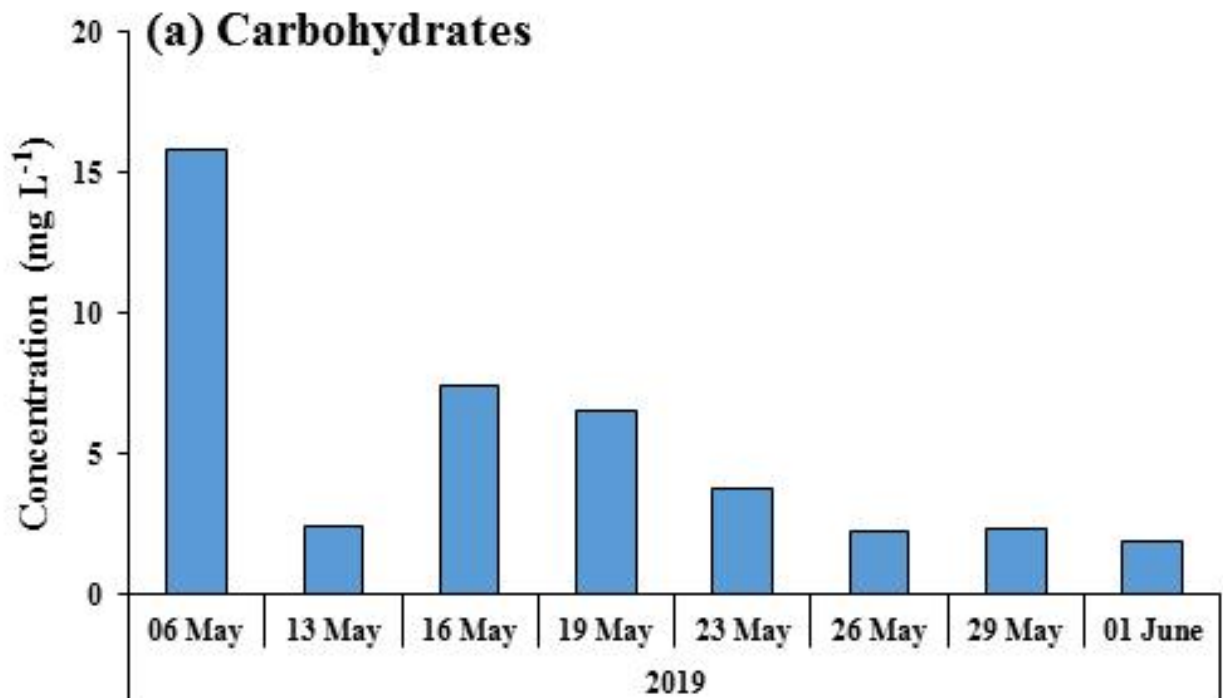


그림 3.29. site C에서 해빙 미세조류의 거대분자조성 (2019년)

site F



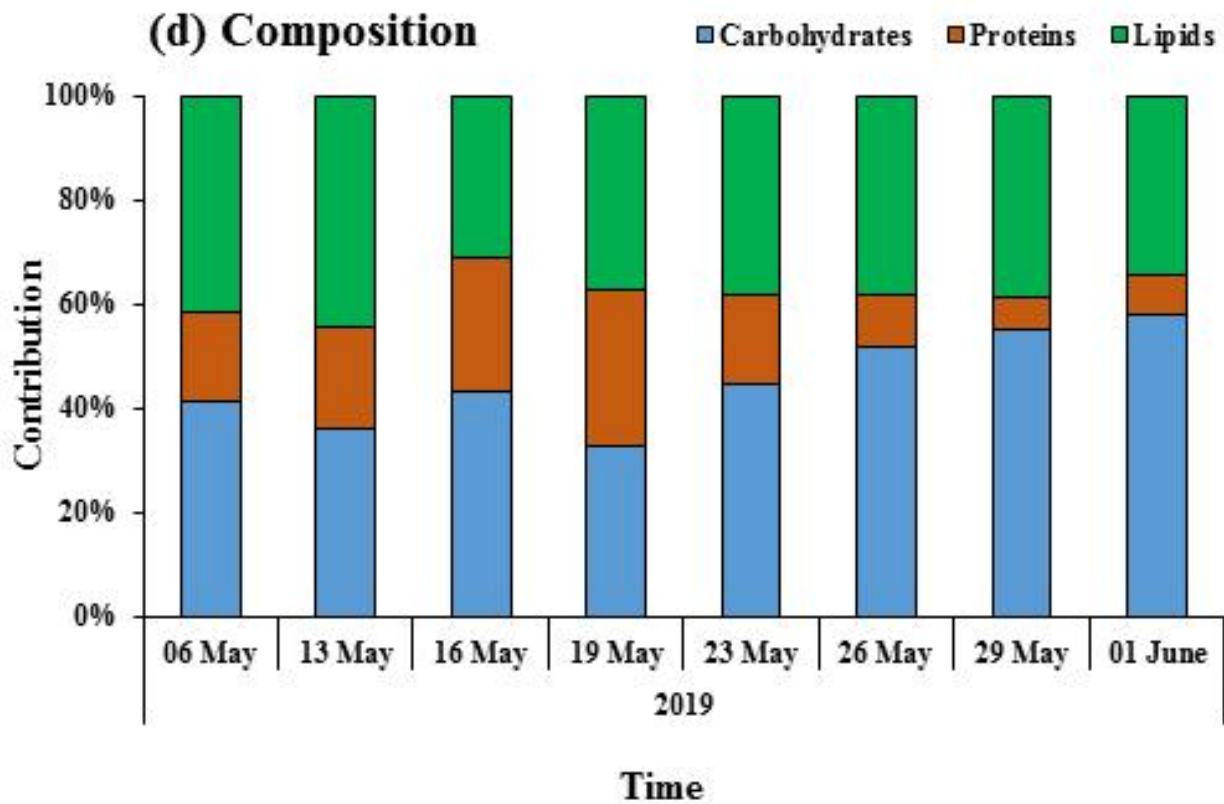
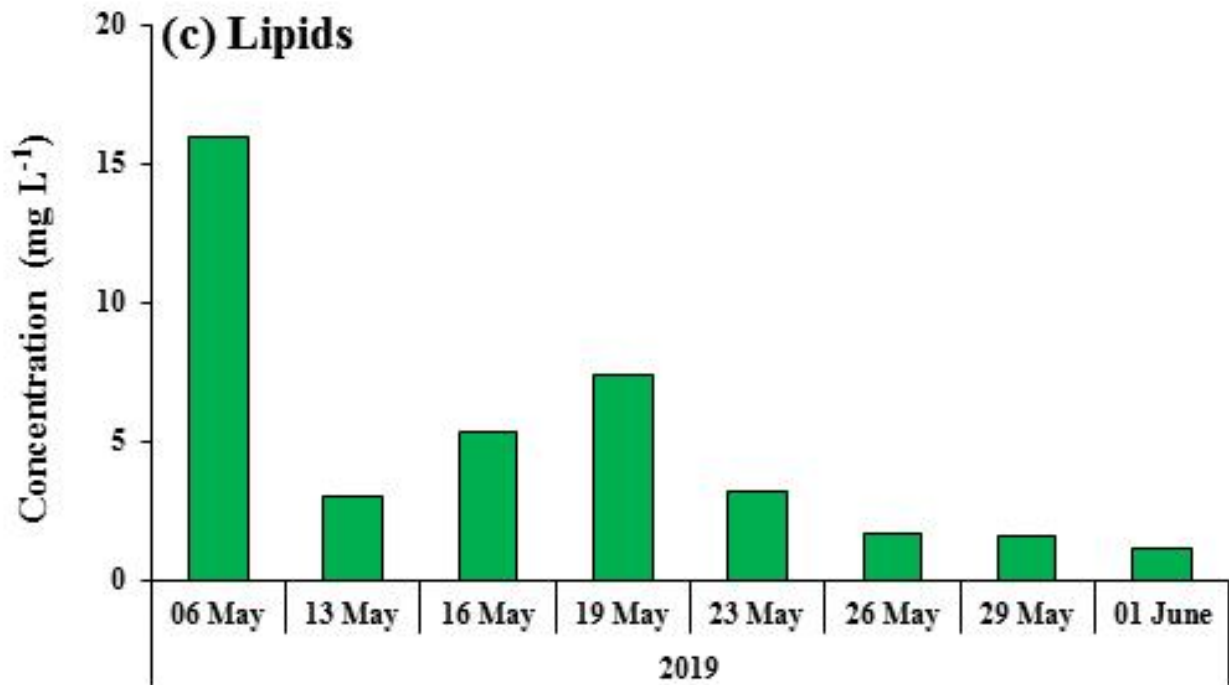
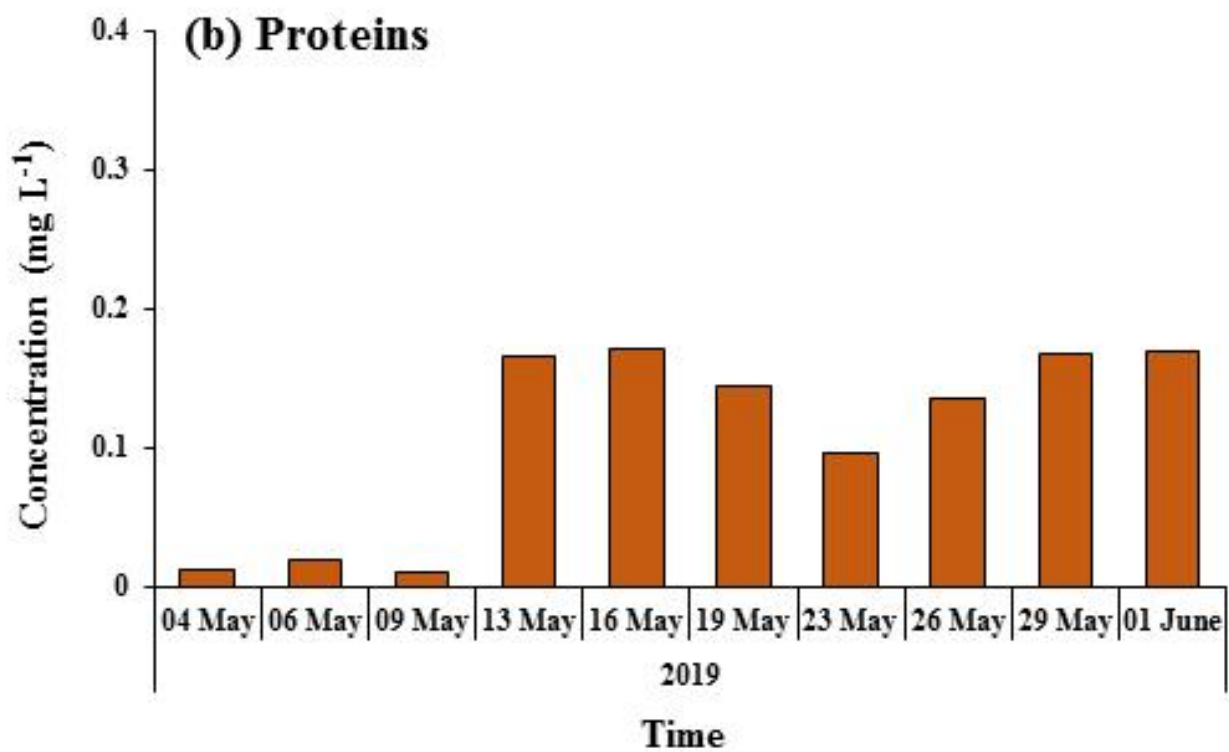
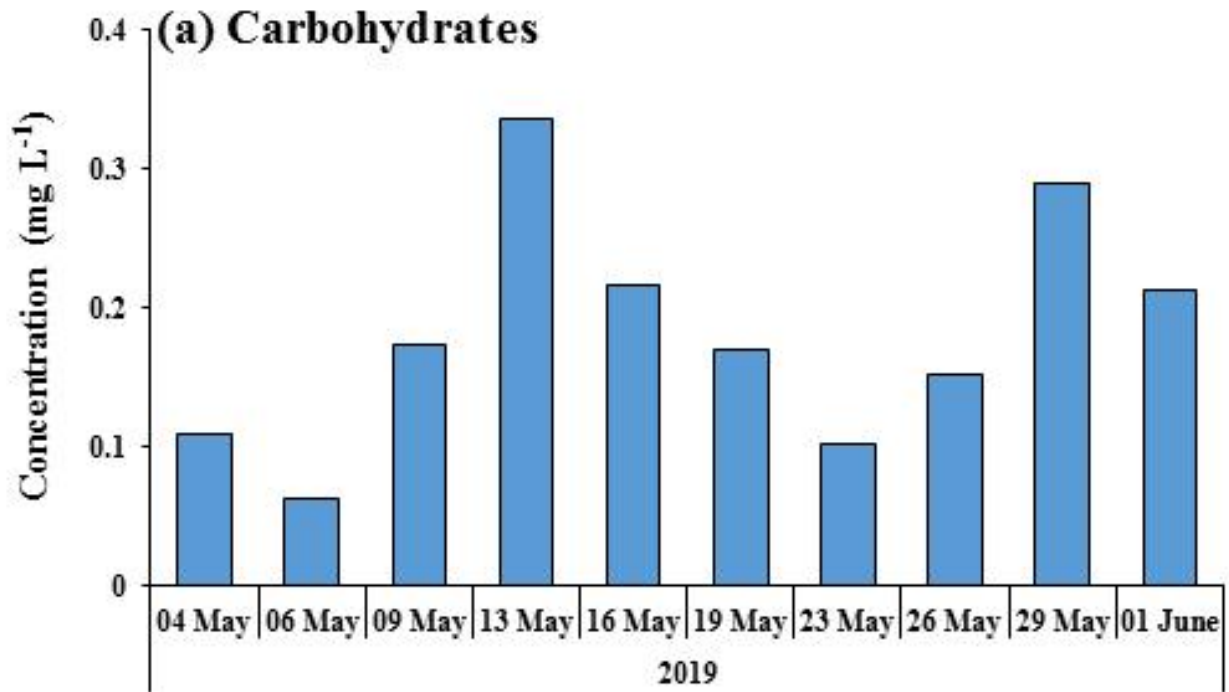


그림 3.30. site F에서 해빙 미세조류의 거대분자조성 (2019년)

site C



site C

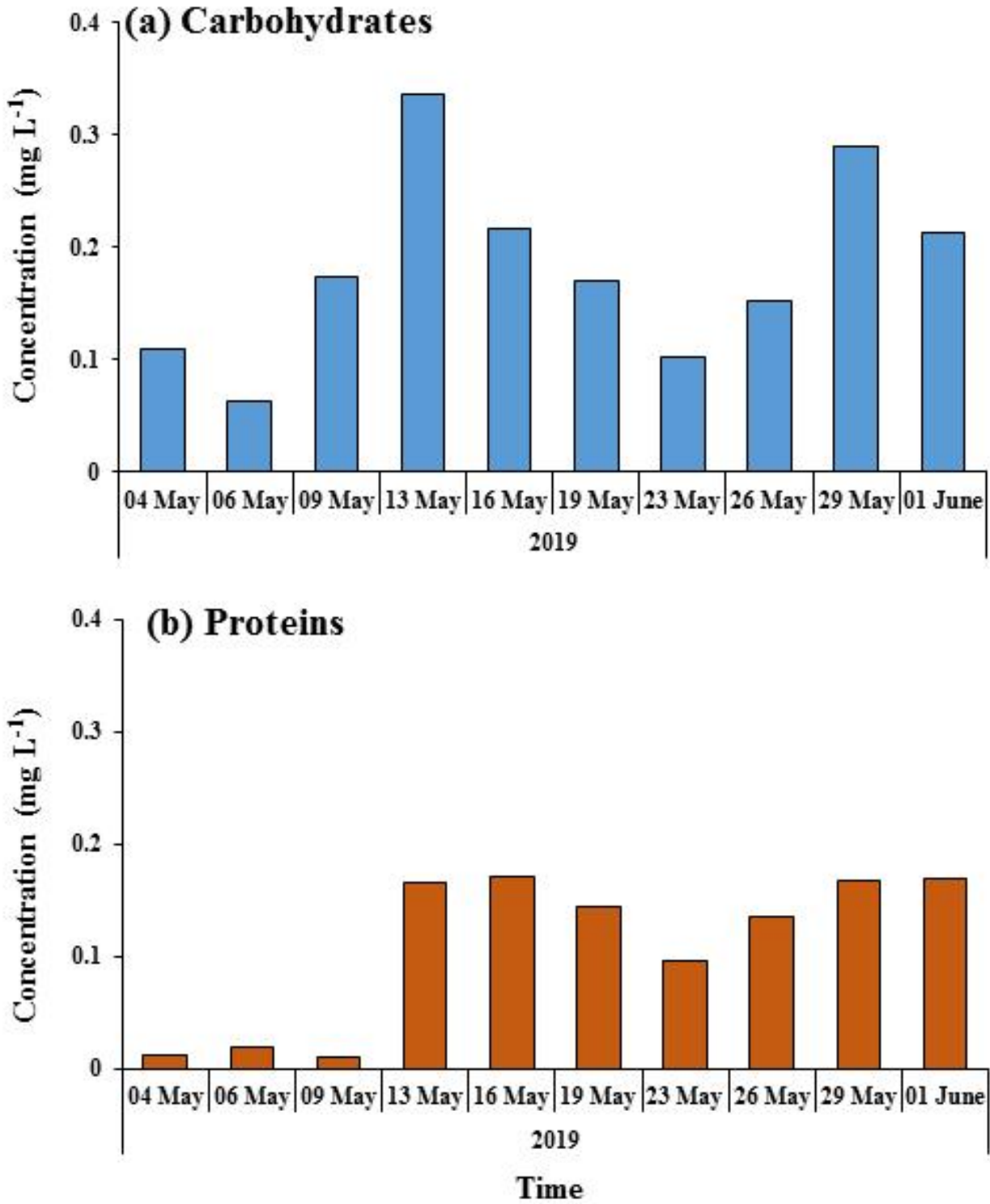


그림 3.31. site C에서 식물플랑크톤의 거대분자조성 (2019년)

마. 고찰

(1) 해빙 미세조류와 식물플랑크톤의 chl-a 농도

해빙 미세조류의 총 chl-a 농도에 대한 20 μm 이상의 조류가 차지하는 비율이 $72 \pm 8\%$ 라는 것은 이 크기의 생물들이 주된 광합성 생물이라는 것을 암시한다. 이 결과는 2003년 알래스카 barrow에서의 연구 결과(78%)와 비슷하다 (Lee and others, 2008). 이와 대조적으로 Campbell and others (2018)는 본 연구 해역과 같은 지역에서 20 μm 이상의 조류의 기여도가 6-38%로 관측했으며 이것은 해빙 조류 군집 조성의 큰 연간 변동과 공간 변화가 있음을 암시한다. 본 연구와 같은 해역에서 깃돌말류가 전체 해빙 조류 군집의 45%에서 80% 이상을 차지한다고 보고된 바 있다 (Dalman and others, 2019; Pogorzelec and others, submitted).

이전 연구들은 해빙조류는 주로 규조류로 구성되어 있다고 보고했다 (Horner, 1985; von Quillfeldt and others, 2003; Rózańska and others, 2009; Poulin and others, 2010). 규조류 중에서 큰 깃돌말류가 가장 흔하다고 알려져 있으며 이들의 크기는 20 μm 이상으로 알려져 있다 (Whitaker and Richardson, 1980; Lizotte and Sullivan, 1992; Rózańska and others, 2009; Arrigo and others, 2010). 그러나 해빙 조류 군집의 cell abundance와 분류군은 빛의 투과를 지배하는 눈 두께에 따라 변할 수 있다 (Rózańska and others, 2009). 게다가 규조류의 풍부도는 표층해수의 염분과 영양염 농도에 따라 영향을 받을 수 있다 (Campbell and others, 2018). 해빙조류와 의 크기 조성과 비교할 때 식물플랑크톤의 크기 조성은 20 μm 이상의 크기의 기여도가 낮게 나타났다.

본 연구 지역에서 chl-a농도의 큰 공간 변동성을 보인다는 것을 확인했고 특히 st.1과 st.4 사이에서 가장 큰 차이를 보였다. St.1과 st.4에서 chl-a의 평균 농도는 각각 $4.46 \pm 1.94 \text{ mg m}^{-2}$ 과 $2.19 \pm 0.65 \text{ mg m}^{-2}$ 로 나타났다. st.1과 st.4는 5 km거리이지만 st.1의 해저에 작은 언덕이 있어서 수심 차이는 크다. 이 작은 언덕으로 인해 st.1에서 해류의 속도는 0.2 m s^{-1} 로 보고되었다 (Dalman and others, 2019). 이러한 tidal current는 해양에서 해빙 바닥으로 열과 운동 에너지의 전달을 증가시킬 수 있다 (Widell and others, 2006). 이로 인해 st.1에서 해빙 두께가 얇게 나타난 것으로 사료된다. 본 연구의 평균 chl-a 농도는 the Kitikmeot Sea에서 수행되었던 이전 연구 결과의 범위 안에 속한다 (Campbell and others, 2016; Dalman and others, 2019; Table 4).

본 연구에서 나타난 해빙 조류의 chl-a 최댓값은 North American Arctic에서 보고된 연구 결과 보다 상대적으로 낮았다. Smith and others (1988)은 1985-1986에 Resolute Passage에서 $1.5\text{-}46 \text{ mg m}^{-2}$ 의 chl-a 범위를 보고했다. Smith and Herman (1991)은 1987-1988에 high Canadian Arctic에서 350 mg m^{-2} 의 chl-a 최댓값을 보고했다. Nozais and others (2001)과 Lee and others (2008)은 또한 본 연구보다 훨씬 높은 chl-a 농도를 보고했다. 빛의 세기는 봄에 해빙조류의 bloom을 시작하게 하는 주요한 조절 요인일지 모르지만 영양염 이용가능성은 해빙 조류의 생물량을 축적시키는데 가장 중요한 조절 인자이다 (Cota and others, 1987; Smith and others, 1990; Gradinger, 1999). 1-D model 시뮬레이션 결과를 토대로 Lee and others (2010)은 해빙 조류의 최대치를 조절하는 주요한 요인이 해빙 조류가 이용할 수 있는

주요 무기 영양염 농도라고 제안했다. 실제로 본 연구에서 해빙 바닥 10cm에서 보인 영양염 농도는 아주 낮았다. 본 연구에서 보인 N:P 와 N:Si ratio 는 각각 1.63-4.22 (2.71 ± 0.75)와 0.70-2.20 (1.44 ± 0.45)로 나타났다. 이 비율은 redfield ratio보다 낮다. Rózańska and others (2009)는 표층 해수의 낮은 N:P (1.5-2.0)와 N:Si (0.3) ratios가 해빙 미세 조류의 성장을 제한한다고 제안했다.

(2) 해빙 미세조류의 탄소흡수율

본 연구에서 보인 해빙 미세조류의 탄소 흡수율은 Canadian Arctic Archipelago에서 수행되었던 이전 연구들 보다 매우 낮았다. Resolute Passage에서 Smith and others (1988)과 Smith and Herman (1991)이 보고한 해빙조류의 탄소흡수율의 범위는 각각 21-463 $\text{mg C m}^{-2} \text{d}^{-1}$ (1985-1986) 그리고 20-157 $\text{mg C m}^{-2} \text{d}^{-1}$ (1987-1988)이다. Nozais and others (2001)와 Michel and others (2002)은 Canadian Arctic에 위치한 Baffin Bay에서 해빙 미세조류의 탄소흡수율의 범위를 각각 26-317 $\text{mg C m}^{-2} \text{d}^{-1}$ 그리고 2-153 $\text{mg C m}^{-2} \text{d}^{-1}$ 로 보고했다. Lee and others (2008) 또한 2002년 알래스카 barrow에서 해빙 조류의 탄소흡수율 범위를 0.72-84.24 $\text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$ 로 보고했다. 낮은 N:P와 N:Si ratio로 볼 때 질소기원의 영양염 부족이 본 연구지역에서의 낮은 탄소흡수율을 나타나게 했을 가능성이 있다.

(3) 해빙 미세조류와 식물플랑크톤의 거대분자 조성

본 연구에서 해빙 미세조류는 지질이, 식물플랑크톤은 탄수화물이 주요한 거대분자 조성이라는 것을 관측했다. Aaronson and others (1980)은 해빙 조류가 활발히 성장하는 시기에 총 지질의 비율이 건 중량의 1-45%까지 변한다고 보고했다. 해빙조류의 지질의 양은 빛의 세기, 영양염과 같은 환경 요인에 의해 영향을 받는다. 일반적으로 높은 지질 비율은 영양염 부족, 빛 세기의 증가, stationary growth phase로 설명될 수 있다. Smith and others (1997)은 영양염 부족으로 인해 성장이 더디지며 해빙 조류가 축적하는 탄소가 지질로의 할당이 증가하는 것을 발견했다. 본 연구 기간 동안 해빙의 두께나 빛의 세기에 뚜렷한 차이가 보이지 않았다. 앞서 언급한 낮은 N:P와 N:Si ratio를 봤을 때 본 연구 기간 동안 질소 제한이 일어났을 가능성이 있다. 단백질:탄수화물 비율은 질소 이용 가능 조건에 대한 지표가 될 수 있다. 이 비율이 1보다 높으면 일반적으로 질소가 풍부한 상태에서 생산적이거나 bloom기간임을 의미하며(Fabiano and others, 1984, 1992, 1993) 1보다 낮다면 질소가 결핍된 환경임을 가리킨다 (Mayzaud and others, 1989; Lizotte and Sullivan, 1992; Danovaro and others, 2000). 본 연구에서 단백질:탄수화물의 비율은 0.92 ± 0.35 로 나타났으며 이것은 해빙 조류의 질소 이용가능성이 제한을 받았다는 또 다른 증거가 될 수 있다. 본 연구에서 해빙 조류를 구성하는 거대분자 중 지질의 비율이 높은 것은 같은 연구 지역에서 빛이 증가하고 영양염이 결핍되며 탄수화물 축적에서 지질 축적으로 해빙 조류의 물질 합성이 변함을 발견한 이전 연구 결과와 일치한다 (Pogorzelec and others, 2017).

해빙조류와 비교하여 식물플랑크톤을 구성하는 거대분자의 농도는 상당히 낮았고 조성 또한 탄수화물이 우점하며 다른 모습을 보였다. Chukchi Sea 북부 해역에서 Kim and others (2014)

식물플랑크톤을 구성하는 거대분자 조성이 지질이 $50 \pm 11\%$ 로 가장 높고 탄수화물이 $35 \pm 11\%$ 를 차지했으며 단백질이 $15 \pm 11.2\%$ 를 차지한다고 보고했다. 또한 Yun and others (2015)는 Chukchi Sea 북부 해역에서 식물플랑크톤을 구성하는 거대분자 중 지질의 높은 비율 $58.4 \pm 8.2\%$ 관측했다. Ahn and others (2019)은 북극의 여름 기간 동안 Laptev sea와 Siberian seas에서 탄수화물이 식물플랑크톤을 구성하는 주된 거대 분자 조성으로 관측했다. 과거 연구들은 식물플랑크톤의 영양 상태에 따라 더 많은 탄수화물 혹은 지질을 생산할 수 있다고 보고했다 (Shifrin and Chisholm, 1981; Harrison and others, 1990; Hu, 2004; Ahn and others, 2019). 식물플랑크톤은 영양염이 부족한 조건에서 주요 저장 물질로 탄수화물을 생산하지만 영양염 부족이 지속될 때 두 번째 저장 물질로 탄수화물을 지질로 전환시킬 수 있다 (Fogg and Thake, 1987; Hu, 2004; Ahn and others, 2019). 따라서 본 연구의 자료는 식물플랑크톤이 해빙 조류에 비해 질소가 덜 부족한 환경에 있다는 것을 보여준다.



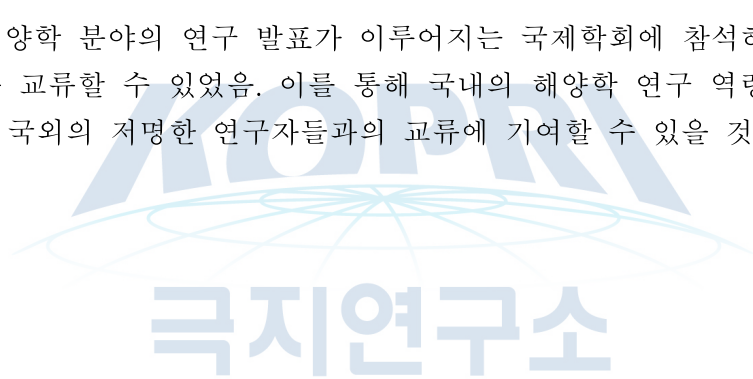
제 4장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

○ 연구개발목표 달성도

성과목표	세부목표		달성 주요내용	달성도 (%)
1. 해빙 미세조류 탄소 흡수율 측정	1-1	탄소 안정동위원소 추적자를 활용한 해빙 미세조류 탄소 흡수율 현장조사	- 4월 캐나다 Cambridge Bay 현장 조사를 통해 시료 채집 - 각 정점에서 채집된 Ice-algae의 Chlorophyll, Macro-composition 분석 - 해빙 미세조류의 현장 배양실험을 통한 탄소 흡수율 측정	100
		해빙 미세조류 생화학 지표 특성 확인	- 10월 다산기지 현장조사 및 시료 채취 - 생화학 지표 분석 및 결과 해석	100
2. 해빙생태계 구성인자에너지 흐름	2-1	해빙미세조류와 동물플랑크톤간 에너지 흐름 파악	- 4월 캐나다 Cambridge Bay 현장 조사를 통해 시료 채집 - 각 정점에서 채집된 Ice-algae의 Chlorophyll, Macro-composition 분석 - 해빙 미세조류의 현장 배양실험을 통한 탄소 흡수율 측정	100
		동물플랑크톤의 영양단계 파악 및 미소 먹이망구조의 역할 파악	- 4월 다산기지 현장조사를 통한 시료 채집 - 입자성 유기물의 탄소 및 질소 안정동위원소비 분석 - 동물 플랑크톤의 아미노산 질소 안정동위원소비 분석을 통한 생태적 위치 추정	100
3. 해빙 성장단계별 탄소흡수율 상호보완 관계 비교	3-1	해빙생태계의 발생, 성장, 소멸단계에 따른 탄소흡수율 측정	- 5월 캐나다 Coral Harbor 현장 조사를 통해 시료 채집 - 각 정점에서 채집된 Ice-algae의 Chlorophyll, Macro-composition 분석 - 해빙 미세조류의 현장 배양실험을 통한 탄소 흡수율 측정 - 3~4일 간격으로 시료 채집하여 탄소흡수율의 시간적인 변동 및 요인 해석	100
		해빙생태계의 성장단계에 따른 동물플랑크톤 먹이원 및 영양단계 변화 파악	- 7월 다산기지 현장조사를 통한 시료 채집 - 동물 플랑크톤의 아미노산 질소 안정동위원소비 분석을 통한 생태적 위치 추정 - 계절별 축적된 데이터를 통해 동물플랑크톤의 생태적 위치의 계절 변동 해석	100

○ 대외 기여도

- 아미노산의 안정동위원소비 분석 기법이 해양생지화학 및 생태학 연구에 적용된 것은 비교적 최근이나, 국제적으로 본 분석 기법의 활용도는 증가하는 추세에 있음.
- 특히 북극해역에서 해당 분석기법을 접목한 사례는 많지 않으며, 본 연구를 통해 해당 분석 기법을 이용하고 극지 해양학 연구에 접목한 것은 세계적인 해양학 연구 분야의 경쟁력을 확보하고 해양 환경에 대한 이해, 나아가 지속 가능한 해양 자원 관리에 기여할 수 있을 것으로 예측됨.
- 본 연구과제의 3년간 현장 조사 정점인 Cambridge Bay 및 Coral Harbor에서는 캐나다의 Manitoba 대학의 연구진과 협업하여 현장 조사를 수행하였음. 이를 통해 본 연구진과 캐나다 연구진과의 현장 조사 방법이나 결과 해석에 대한 교류를 수행하였으며, 이를 통해 국내 해빙 연구 분야의 경쟁력을 확인할 수 있었음.
- 본 연구내용을 해양학 분야의 연구 발표가 이루어지는 국제학회에 참석하여 연구 결과에 대해 국외 연구자들과 교류할 수 있었음. 이를 통해 국내의 해양학 연구 역량을 알릴 수 있었으며, 이는 보다 많은 국외의 저명한 연구자들과의 교류에 기여할 수 있을 것으로 생각됨.



제 5 장 연구개발결과의 활용계획

- 극지역을 활용한 기후변화 연구에 기초자료로 제공
 - 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 가능
 - 극지해역 해빙의 열적특성과 내부 단파복사 투과량을 정량적으로 산출함으로써, 최근 기후변화에 따라 변화되고 있는 해빙 두께변화에 따른 북극해 유입 태양복사량의 변화에 따른 해양환경 및 생태계 변화연구에 활용
 - Desk-top 수준의 빙해수조를 재현함으로써 실내에서 인위적으로 조성한 해빙생태계의 탄소 흡수율 및 피드백에 관한 연구를 지원하여 현장에서 확인된 결과를 재확인

- 기후변화 모델의 현장관측 자료로 활용
 - 관측된 북극해 해빙의 열적특성 및 대기, 해빙, 해수의 열교환량은 추후 북극해 대기, 해빙, 해양 접합모델의 정확도 향상에 필요한 기초자료로 활용
 - 기후 변화 피드백 순환고리 구성은 향후 북극 기후 모델을 구성하는 시나리오가 될 수 있고, 기후 변화 보고서 (IPCC)에서 제공하는 미래 기후 변화 시나리오와 연동하여 보다 정확하고 사실적인 북극 기후 모델을 재현 할 수 있는 기초 자료로 제공

- 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 기대

- 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 결과 제공
 - 북극권 활동 다변화를 위한 전략적 수단으로 해빙생태계 연구결과 활용

제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

○ 해빙 미세조류의 일차생산 측정 방법

- 캐나다에서는 Oxygen probe를 이용한 photosynthetic parameter를 측정하여 광합성 생물의 특성에 대한 연구를 주로 수행하고 있음
- 또한, Transmitted irradiance technique을 이용해 해빙을 투과하여 해빙 미세조류에 의해 흡수된 나머지 빛을 측정함으로써 해빙에 대한 손상을 최소화 하면서 해빙 미세조류의 생물량을 측정하는 연구가 수행되고 있음

○ 분자 단위 생체 지표의 안정동위원소 분석 기법의 활용

- 분자 단위 생체 지표의 안정동위원소 분석 기법을 확보하여 연구에 활용하고 있는 연구팀은 세계적으로 아직 적은 실정이나, 많은 생태학 연구 분야에 활용되고 있는 동시에 생체 지표의 안정동위원소 정보로부터 새로운 물질 대사 정보를 발견하고자 하는 연구들이 보고되고 있음.
- 여러 생태계에서 미생물에 의해 이루어지는 아미노산의 안정동위원소 분석을 통해, 미생물이 먹이 사슬 내에서 영양 단계에 미치는 영향을 파악하기 위한 연구와(Steffan et al., 2017) 미생물의 유기물 분해 및 재합성 과정에서 각 아미노산의 물질 대사를 해석한 연구가 보고된 바 있음(Yamaguchi et al., 2017). 최근에는 영양 단계를 구하는 식에 사용되는 glutamic acid 및 phenylalanine의 질소 안정동위원소 이외에, 다른 아미노산의 질소 안정동위원소비로부터 물질 대사 과정을 추적하고자 하는 시도가 이루어지고 있음.
- 아미노산의 물질 대사가 여러 환경 조건에 따라 변화할 수 있다는 점에 착안하여, starvation 실험을 통해 어류의 아미노산의 질소 안정동위원소비와 지방산의 탄소 안정동위원소비를 분석하여 물질 대사의 변동을 파악한 연구가 보고된 바 있음(Barreto-Curiel et al., 2017).
- 또한, 아미노산의 질소 안정동위원소비 분석 기법을 통해 해양 질소 순환에 대한 새로운 정보를 제시한 논문 또한 보고되고 있음. Gerringer et al (2017)은 아미노산의 질소 안정동위원소비와 위 내용물 분석법을 통해 심해 어류의 먹이원이 수심에 따라 상이하게 나타남을 보고하였으며, Yamaguchi and McCarthy (2018)은 입자성 유기 질소와 용존성 유기 질소의 기원을 아미노산의 질소 안정동위원소 분석을 통해 규명한 바 있음.

제 7 장 참고문헌

- Aaronson S, Bernet T, Dubinsky Z (1980) Microalgae as a source of chemicals and natural products. In Shelef G, Soeder CJ (Eds), *AlgaeBiomass: Production and Use*. Elsevier/North Holland Biomedical Press, Amsterdam, 575 - 601.
- Ahn SH, Whitley TE, Stockwell DA, Lee JH, Lee HW, Lee SH (2019) The biochemical composition of phytoplankton in the Laptev and East Siberian seas during the summer of 2013. *Polar Biol* 42:13-148. doi:10.1007/S00300-018-2408-0.
- Apollonio S (1965) Chlorophyll in Arctic sea ice. *Arctic*, 18(2), 118-122.
- Arrigo KR, Mock T, Lizotte MP (2010) Primary producers and sea ice. In: Thomas DN, Dieckmann GS (eds) *Sea ice*, 2nd edn. Wiley Blackwell Publishing, New York, pp 283 - 325.
- ATIENZA, D., CALBET, A., SAIZ, E., ALCARAZ, M. & TREPAT, 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.
- Barber, D.G., H. Hop, C.-J. Mundy, B.G.T. Else, I.A. Dmitrenko, J.-E. Tremblay, J.K. Ehn, P. Assmy, et al. 2015. Selected physical, biological and biogeochemical implications of a rapidly changing Arctic Marginal Ice Zone. *Progress in Oceanography* 139: 122 - 150.
- 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.
- Barreto-Curiel, F., Focken U., D'Abramo L. R., Viana M. T. (2017). Metabolism of *Seriola lalandi* during Starvation as Revealed by Fatty Acid Analysis and Compound-Specific Analysis of Stable Isotopes within Amino Acids. *PLoS ONE*, 12(1).
- Barber, D.G., H. Hop, C.-J. Mundy, B.G.T. Else, I.A. Dmitrenko, J.-E. Tremblay, J.K. Ehn, P. Assmy, et al. 2015. Selected physical, biological and biogeochemical implications of a rapidly changing Arctic Marginal Ice Zone. *Progress in Oceanography* 139: 122 - 150.
- Campbell, K, Mundy, CJ, Belzile, C, Delaforge, A and Rysgaard, S. 2018. Seasonal dynamics of algal and bacterial communities in Arctic sea ice under variable snow cover. *Polar Biol* 41(1): 41 - 58.
- Campbell, K, Mundy, CJ, Belzile, C, Delaforge, A and Rysgaard, S 2017a Seasonal dynamics of algal and bacterial communities in Arctic sea ice under variable snow cover. *Polar Biol*.
- Castellani G, Losch M, Lange BA, Flores H (2017) Modeling Arctic Sea-ice algae: physical

- drivers of spatial distribution and algae phenology. *Journal of Geophysical Research Oceans* 122:7466 - 7487.
- 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.
- Conover, R. (1988) Comparative life histories in the genera *Calanus* and *Neocalanus* in high latitudes of the northern hemisphere. *Hydrobiologia*, 167, 127-142.
- Cota GF, Prinsenberg SJ, Bennett EB, Loder JW, Lewis MR, Anning JL, Watson NHF (1987) Nutrient fluxes during extended blooms of Arctic ice algae. *J Geophys Res* 92: 1951 - 1962.
- Daase M, Falk-Petersen S, Varpe Ø, Darnis G, Søreide J, Wold A, Leu E, Berge J, Philip B, Louis F (2013) Timing of reproductive events in the marine copepod *Calanus glacialis*: a pan-Arctic perspective. *Can J Fish Aquat Sci* 70:871 - 884.
- Dalman, L.A., Else, B.G.T., Barber, D., Carmack, E., Williams, W.J., Campbell, K., Duke, P.J., Kirillov, S. and Mundy, C.J., 2019. Enhanced bottom-ice algal biomass across a tidal strait in the Kitikmeot Sea of the Canadian Arctic. *Elem Sci Anth*, 7(1), p.22.
- Danovaro R, Dell'Anno A, Pusceddu A, Marralle D, Della Croce N, Fabiano M, Tselepidis A (2000) Biochemical composition of pico-, nano- and micro-particulate organic matter and bacterioplankton biomass in the oligotrophic Cretan Sea (NE Mediterranean). *Progr Oceanogr* 46:279 - 310.
- Fabiano M, Zavattarelli M, Palmero S (1984) Observations sur la matière organique particulaire (Protéines, Glucides, Lipides, Chlorophylle) en Mer Ligure. *Tethys* 11:133-140.
- Fabiano M, Povero P, Medica D (1992) Carbohydrates, proteins and chlorophylls in the particulate organic matter of surface coastal waters of Ligurian Sea. *Boll Ocean Teor Appl* 10:41-51.
- Fabiano M, Povero P, Danovaro R (1993) Distribution and composition of particulate organic matter in the Ross Sea (Antarctica). *Polar Biol* 13:525-533.
- 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.
- Fernández-Méndez M, Wenzhöfer F, Peeken I, Sørensen HL, Glud RN, Boetius A (2014) Composition, buoyancy regulation and fate of ice algal aggregates in the Central Arctic Ocean. *Plos One* 9(9):e107452. doi:10.1371/journal.pone.0107452.
- Fogg G. E. and Thake B. (1987) *Algal cultures and phytoplankton ecology*. Univ of Wisconsin Press. 12-42.
- Gerringer, M. E., Popp, B. N., Linley, T. D., Jamieson, A.J., Drazen J.C. (2017). Comparative

- feeding ecology of abyssal and hadal fishes through stomach content and amino acid isotope analysis. *Deep-Sea Research Part 1*, 121, 110-120.
- Gosselin M, Levasseur M, Wheeler PA, Horner RA, Booth BC (1997) New measurements of phytoplankton and ice algal production in the Arctic Ocean. *Deep-Sea Res* 44: 1623-1644.
- Gradinger, R. (2009) Sea-ice algae: Major contributors to primary production and algal biomass in the Chukchi and Beaufort Seas during May/June 2002. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 56(17), 1201-1212.
- Gradinger, R., Kaufman, M. R., and Bluhm, B. A. (2009) Pivotal role of sea ice sediments in the seasonal development of near-shore Arctic fast ice biota. *Marine Ecology Progress Series*, 394, 49-63.
- GRIGOR, J. J., S REIDE, J. E. & VARPE, Ø. 2014. Seasonal ecology and life-history strategy of the high-latitude predatory zooplankton *Parasagitta elegans*. *Marine Ecology Progress Series*, 499, 77-88.
- GRIGOR, J. J., MARAIS, A. E., FALK-PETERSEN, S. & VARPE, Ø. 2015. Polar night ecology of a pelagic predator, the chaetognath *Parasagitta elegans*. *Polar Biology*, 38, 87-98.
- Hama, T., Miyazaki, T., Ogawa, Y., Iwakuma, T., Takahashi, M., Otsuki, A., and Ichimura, S. (1983) Measurement of photosynthetic production of a marine phytoplankton population using a stable ^{13}C isotope. *Marine Biology*, 73(1), 31-36.
- Harrison, P. J., Thompson, P. A., and Calderwood, G. S. (1990) Effects of nutrient and light limitation on the biochemical composition of phytoplankton. *Journal of Applied Phycology*, 2(1), 45-56.
- HOP, H., PEARSON, T., HEGSETH, E. N., KOVACS, K. M., WIENCKE, C., KWASNIEWSKI, S., EIANE, K., MEHLUM, F., GULLIKSEN, B. & WLODARSKA-KOWALCZUK, M. 2002. The marine ecosystem of Kongsfjorden, Svalbard. *Polar Research*, 21, 167-208.
- Horner, R. A. (1985) Ecology of sea ice microalgae. In *Sea ice biota* (pp. 83-103). CRC Press Boca Raton, FL.
- Hu, Q. (2004) Environmental effects on cell composition. *Handbook of microalgal culture: biotechnology and applied phycology*, 1, 83-93.
- Iwamoto, H., Yonekawa, G., Asai, T., and Nagahashi, N. (1955) Fat Synthesis in Unicellular Algae: Part I. Culture Conditions for Fat Accumulation in *Chlorella* Cells Part II. Chemical Composition of Nitrogen-deficient *Chlorella* Cells. *Journal of the Agricultural Chemical Society of Japan*, 19(4), 240-252.
- Kim BK, Lee JH, Yun MS, Joo HT, Song HJ, Yang EJ, Chung KH, Kang SH, Lee SH (2015) High lipid composition of particulate organic matter in the northern Chukchi Sea, 2011 *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 120, 72-81.

- KRAFT, A., BERGE, J., VARPE, O., FALK-PETERSON, S. 2013. Feeding in Arctic darkness: mid-winter diet of the pelagic amphipods *Themisto abyssorum* and *T. libellula*. *Marine Biology*, 2013, 241-248.
- KWANSNIEWSKI, S., HOP, H., FALK-PETERSEN, S., PEDERSEN, G. 2003. Distribution of *Calanus* species in Kongsfjorden, a glacial fjord in Svalbard. *Journal of Plankton Research*, 25(1), 1-20.
- Lavoie, D., Denman, K., and Michel, C. (2005) Modeling ice algal growth and decline in a seasonally ice covered region of the Arctic (Resolute Passage, Canadian Archipelago). *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 110(C11).
- Lee, S. H., Whitley, T. E., and Kang, S. H. (2008) Spring time production of bottom ice algae in the landfast sea ice zone at Barrow, Alaska. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 367(2), 204-212.
- Lee, S. H., Jin, M., and Whitley, T. E. (2010) Comparison of bottom sea-ice algal characteristics from coastal and offshore regions in the Arctic Ocean. *Polar biology*, 33(10), 1331-1337.
- Lee SH, McRoy CP, Joo HM, Gradinger R, Cui X, Yun MS, Chung KH, Kang S-H, Kang C-K, Choy EJ, Son SH, Carmack E, Whitley TE (2011) Holes in progressively thinning Arctic sea ice lead to new ice algae habitat. *Oceanography* 24(3):302-308.
- Lee SH, Kim BK, Joo HT, Park JW, Lee JH, Joo HM, Lee DB, Kang CK, Kang SH (2015) Carbon contribution of sea ice floes in the Arctic Ocean. *Deep-Sea Res Pt II* 120:35 - 42.
- Legendre, L., Ackley, S. F., Dieckmann, G. S., and Guliksen, B. others. 1992. Ecology of sea ice biota. *Polar Biol*, 12, 429-444.
- Leu, E., Wiktor, J., Søreide, J. E., Berge, J., and Falk-Petersen, S. (2010) Increased irradiance reduces food quality of sea ice algae. *Marine Ecology Progress Series*, 411, 49-60.
- Leu, E., C. J. Mundy, P. Assmy, K. Campbell, T. M. Gabrielsen, M. Gosselin, T. Juul-Pedersen, and R. Gradinger (2015), Arctic spring awakening Steering principles behind the phenology of vernal ice algal blooms, *Prog. Oceanogr.*, 139, 151 - 170.
- Lizotte, M. P., and Sullivan, C. W. (1992) Biochemical composition and photosynthate distribution in sea ice microalgae of McMurdo Sound, Antarctica: evidence for nutrient stress during the spring bloom. *Antarctic Science*, 4(1), 23-30.
- Lynch, A. H., Curry, J. A., Brunner, R. D., and Maslanik, J. A. (2004) Toward an integrated assessment of the impacts of extreme wind events on Barrow, Alaska. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 85(2), 209-222.
- Mayzaud, P., Chanut, J. P., and Ackman, R. G. (1989) Seasonal changes of the biochemical composition of marine particulate matter with special reference to fatty acids and sterols. *Marine ecology progress series*. Oldendorf, 56(1), 189-204.

- Michel, C., Legendre, L., Ingram, R. G., Gosselin, M., and Levasseur, M. (1996) Carbon budget of sea ice algae in spring: Evidence of a significant transfer to zooplankton grazers. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 101(C8), 18345–18360.
- Michel, C., Nielsen, T. G., Nozais, C., and Gosselin, M. (2002) Significance of sedimentation and grazing by ice micro- and meiofauna for carbon cycling in annual sea ice (northern Baffin Bay). *Aquatic Microbial Ecology*, 30(1), 57–68.
- Nozais, C., Gosselin, M., Michel, C., and Tita, G. (2001) Abundance, biomass, composition and grazing impact of the sea-ice meiofauna in the North Water, northern Baffin Bay. *Marine Ecology Progress Series*, 217, 235–250.
- PARENT, G. J., PLOURDE, S. TURGEON, J. 2012. Natural hybridization between *Calanus finmarchicus* and *C. glacialis* (Copepoda) in the Arctic and Northwest Atlantic. *Limnology and oceanography*, 57, 1057–1066.
- Parsons, T. R., Maita, Y., and Lalli, C. M. (1984) A manual of chemical and biological methods for seawater analysis. Oxford: Pergamon, 1, 173.
- Pogorzelec NM, Mundy CJ, Findlay CR, Campbell K, Diaz A, Ehn JK, Rysgaard S, Gough K (2017) FTIR imaging analysis of cell content in sea-ice diatom taxa during a spring bloom in the lower Northwest Passage of the Canadian Arctic. *Marine Ecology Progress Series*, 569, 77–88.
- POND, D. W. & WARD, P. J. J. O. P. R. 2010. Importance of diatoms for *Oithona* in Antarctic waters. 33, 105–118.
- Poulin, M., Daugbjerg, N., Gradinger, R., Ilyash, L., Ratkova, T., and von Quillfeldt, C. (2011) The pan-Arctic biodiversity of marine pelagic and sea-ice unicellular eukaryotes: a first-attempt assessment. *Marine Biodiversity*, 41(1), 13–28.
- Renaud, P. E., Riedel, A., Michel, C., Morata, N., Gosselin, M., Juul-Pedersen, T., and Chiuchiolo, A. (2007) Seasonal variation in benthic community oxygen demand: a response to an ice algal bloom in the Beaufort Sea, Canadian Arctic?. *Journal of Marine Systems*, 67(1–2), 1–12.
- Rózańska, M., Gosselin, M., Poulin, M., Wiktor, J. M., and Michel, C. (2009) Influence of environmental factors on the development of bottom ice protist communities during the winter - spring transition. *Marine Ecology Progress Series*, 386, 43–59.
- 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., KWASNIEWSKI, S., FALK-PETERSEN, 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.
- Seuthe, L., Iversen, K.R. (2011) Microbial processes in a high-latitude fjord (Kongsfjorden, Svalbard): II. Ciliates and dinoflagellates. *Polar Biology*, 34, 751–766.

- Shifrin NS, Chisholm SW. (1981) Phytoplankton lipids: Interspecific differences and effects of nitrate, silicate and light-dark cycles. *J Phycol* 17:374 - 384.
- Smith R. E. H., Clement P, Cota G F and Li W K (1987) Intracellular photosynthate allocation and the control of Arctic marine ice algal production. *Journal of Phycology*, 23(2), 124-132.
- Smith, R. E. H., J. Anning, P. Clement, and G. Cota (1988) Abundance and production of ice algae in Resolute Passage, Canadian Arctic, *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 48, 251 - 263.
- Smith, R. E. H., W. G. Harrison, L. R. Harris, and A. W. Herman (1990) Vertical fine structure of particulate matter and nutrients in sea ice of the high Arctic, *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 47, 1348 - 1355.
- Smith, R. E. H. and Herman, A. W. (1991) Productivity of sea ice algae: In situ vs. incubator methods. *Journal of Marine Systems*, 2(1-2), 97-110.
- Song, H. J., Lee, J. H., Kim, G. W., Ahn, S. H., Joo, H.-M., Jeong, J. Y., Yang, E. J., Kang, S. H., Lee, S. H. (2016) In-situ measured primary productivity of ice algae in Arctic sea ice floes using a new incubation method. *Ocean Science Journal*, 51(3), 387 - 396. <https://doi.org/10.1007/s12601-016-0035-7>.
- Søreide, J. E., Falk-Petersen, S., Hegseth, E. N., Hop, H., Carroll, M. L., Hobson, K. A. & Blachowiak-Samolyk, K. 2008. Seasonal feeding strategies of *Calanus* in the high-Arctic Svalbard region. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 55, 2225-2244.
- Søreide, J.E., Leu, E., Berge, J., Graeve, M., Falk-Petersen, S. (2010) Timing of blooms, algal food quality and *Calanus glacialis* reproduction and growth in a changing Arctic. *Global Change Biology* 16 (11).
- Steffan. S. A., Chikaraishi Y., Dharampal P. S., Pauli J. N., Guedot C., Ohkouchi N. (2017). Unpacking brown food-webs: Animal trophic identity reflects rampant microbivory, *Ecology and Evolution*, 7, 3532-3541.
- Tedesco, L., Vichi, M., and Scoccimarro, E. (2019) Sea-ice algal phenology in a warmer Arctic. *Science advances*, 5(5), eaav4830.
- TERAJAKI, M. 2004, Life history strategy of the chaetognath *Sagitta elegans* in the World Oceans. *Coastal Marine Science*, 29(1), 1-12.
- van Leeuwe, M. A., Tedesco, L., Arrigo, K. R., Assmy, P., Campbell, K., Meiners, K. M., Rintala, J. M., Selz, V., Thomas D. N., Stefels, J. (2018) Microalgal community structure and primary production in Arctic and Antarctic sea ice: A synthesis. *Elementa: Oceans*, 6, 1 - 25. <https://doi.org/10.1525/elementa.267>.
- von Quillfeldt, C. H., Ambrose, W. G., and Clough, L. M. (2003) High number of diatom species in first-year ice from the Chukchi Sea. *Polar Biology*, 26(12), 806-818.
- WALKUSZ, W., KWASNIEWSKI, S., PETERSEN, S. F., HOP, H., TVERBERG, V.,

- WIECZOREK, P. & WESLAWSKI, J. M. 2009. Seasonal and spatial changes in the zooplankton community of Kongsfjorden, Svalbard. *Polar Research*, 28, 254-281.
- Whitaker, T. M. and M. G. Richardson (1980) Morphology and chemical composition of a natural population of an ice-associated antarctic diatom *Nannocylindrocapsa glaciei*. *J. Phycol.* 16, 250-257.
- Widell, K., Fer, I., and Haugan, P. M. (2006) Salt release from warming sea ice. *Geophysical Research Letters*, 33(12).
- WOLD, A., JAEGER, I., HOP, H., GABRIELSEN, G. W., FALK-PETERSEN, S. 2011. Arctic seabird food chains explored by fatty acid composition and stable isotopes in Kongsfjorden, Svalbard. *Polar Biology*, 34, 1147-1155.
- Yamaguchi. Y., T., Chikaraishi Y., Takano Y., Ogawa N. O., Imachi H., Yokoyama Y., Ohkouchi N. (2017). Fractionation of nitrogen isotopes during amino acid metabolism in heterotrophic and chemolithoautotrophic microbes across Eukarya, Bacteria, and Archaea: Effects of nitrogen sources and metabolic pathways. *Organic Geochemistry*, 111, 101-112.
- Yamaguchi. Y., T., & McCarthy, M. D. (2018). Source and transformation of dissolved and particulate organic nitrogen in the North Pacific Subtropical Gyre indicated by compound-specific $\delta^{15}\text{N}$ analysis of amino acids. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 220, 329-347.
- Yun MS, Lee D, Kim BK, Kang JJ, Lee JH, Yang EJ, Park WG, Chung KH, Lee SH (2015) Comparison of phytoplankton macromolecular compositions and zooplankton proximate compositions in the northern Chukchi Sea. *Deep-Sea Res Pt II* 120:82 - 90.
- ZAMORA-TEROL, S., NIELSEN, T. G. & SAIZ, E. J. 2013. Plankton community structure and role of *Oithona similis* on the western coast of Greenland during the winter-spring transition. *Marine Ecology Progress Series*, 483, 85-102.



주 의

1. 이 보고서는 극지연구소 위탁과제 연구결과보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 극지연구소에서 위탁연구과제로 수행한 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안됩니다.