

제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “서남극해 온난화에 따른 탄소 흡수력 변동 및 생태계 반응 연구” 과제의 위탁연구 “남극해 식물플랑크톤에 의한 탄소 플럭스 변동 연구” 과제의 단계보고서로 제출합니다.



(본과제) 총괄연구책임자 : 박 지 수

위탁연구기관명 : 부산대학교 산학협력단

위탁연구책임자 : 이 상 현

위탁참여연구원 : 강 재 중

“ : 민 준 오

“ : 이 재 형

“ : 이 다 빈

“ : 조 나 은

“ : 오 영 근

“ : 김 관 우

“ : 장 효 근

“ : 김 명 준

“ : 김 예 진

“ : 박 상 훈

“ : 이 윤 지

보고서 초록

위탁연구과제명	남극해 식물플랑크톤에 의한 탄소 플럭스 변동 연구				
위탁연구책임자	이 상 현	해당단계 참여연구원수	13	해당단계 연구비	150,000,000원
연구기관명 및 소속부서명	부산대학교 해양학과		참여기업명		
국제공동연구	상대국명 :		상대국연구기관명 :		
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)				보고서 면수	
<ul style="list-style-type: none"> - 남극해에서 식물플랑크톤 기반 유기탄소 플럭스의 변동을 규명하기 위해 식물플랑크톤의 거대 분자 조성, 입자성 유기탄소 (POC), BPC에 대한 연구가 수행됨. - Eastern Ross Sea의 표층에서 관측된 탄수화물, 단백질, 지질, FM, POC, BPC의 범위는 각각 35.23-402.86, 35.16-222.05, 69.98-570.47, 79.61-960.00, 303.35-1079.08, 104.88-603.65 $\mu\text{g L}^{-1}$으로 나타남. - Western Ross Sea의 유광층에서 관측된 탄수화물, 단백질, 지질, FM, POC, BPC의 범위는 각각 14.61-450.71, 21.39-319.74, 32.50-264.53, 78.94-1023.05, 149.58-959.23, 48.53-526.40 $\mu\text{g L}^{-1}$으로 나타남. - Western Ross Sea에 위치한 Terra Nova Bay의 표층에서 관측된 탄수화물, 단백질, 지질, FM, POC, BPC의 범위는 각각 50.29-204.45, 0.00-226.06, 18.58-160.73, 85.78-585.81, 49.29-451.87, 44.08-310.43 $\mu\text{g L}^{-1}$으로 나타남. 					
색 인 어 (각 5개 이상)	한 글	로스해, 식물플랑크톤, 탄수화물, 단백질, 지질, 입자성 유기탄소, 생체고분자 탄소			
	영 어	Ross Sea, Phytoplankton, Carbohydrates, Proteins, Lipids, Particulate Organic Carbon, Biopolymeric Carbon			

요 약 문

I. 제목

남극해 식물플랑크톤에 의한 탄소 플럭스 변동 연구

II. 연구개발의 목적 및 필요성

- 남극해는 식물플랑크톤의 일차생산을 통해 수층에 존재하는 이산화탄소가 유기물로 고정되어 심층으로 제거되는 탄소격리가 활발하게 일어나고 있는 해역으로 널리 알려져 있음.
- 현재 진행 중인 기후변화는 남극해 해빙 면적, 수온, 수층 안정도를 변화시키고 있으며 이에 따라 식물플랑크톤의 탄소 고정 능력과 거대 분자 조성의 변화를 야기할 수 있다고 보고됨
- 기후변화에 따른 식물플랑크톤 기반 탄소 순환 변동을 이해하는 것이 필요함.
- 식물플랑크톤의 거대 분자 조성과 입자성 유기탄소 변동 연구를 통해 남극해 food web에 미치는 영향을 파악 및 평가하는 기초자료로 활용 가능.

III. 연구개발의 내용 및 범위

- 남극해에서 식물플랑크톤의 거대 분자 농도 및 조성 파악.
- 남극해에서 식물플랑크톤의 입자성 유기탄소와 Biopolymeric Carbon (BPC) 농도 및 조성 파악.
- 남극해에서 백야 및 극야 기간 동안 식물플랑크톤의 생화학 조성 및 BPC 분석.

IV. 연구개발결과

- Eastern Ross Sea의 표층에서 관측된 탄수화물, 단백질, 지질, FM, 입자성 유기탄소, BPC의 범위는 각각 35.23-402.86, 35.16-222.05, 69.98-570.47, 79.61-960.00, 303.35-1079.08, 104.88-603.65 $\mu\text{g L}^{-1}$ 으로 나타났으며 Ross Ice Shelf와 인접한 정점에서 높은 농도가 관측됨.
- Western Ross Sea의 유광층에서 관측된 탄수화물, 단백질, 지질, FM, 입자성 유기탄소, BPC의 범위는 각각 14.61-450.71, 21.39-319.74, 32.50-264.53, 78.94-1023.05, 149.58-959.23, 48.53-526.40 $\mu\text{g L}^{-1}$ 으로 나타났으며 Ross Ice Shelf와 인접한 정점에서 높은 농도가 관측됨.
- Western Ross Sea에 위치한 Terra Nova Bay의 표층에서 관측된 탄수화물, 단백질, 지질, FM, 입자성 유기탄소, BPC의 범위는 각각 50.29-204.45, 0.00-226.06, 18.58-160.73,

85.78-585.81, 49.29-451.87, 44.08-310.43 $\mu\text{g L}^{-1}$ 으로 나타났으며 극야 기간에 비해 백야 기간에 높은 농도가 관측됨.

V. 연구개발결과의 활용계획

- Ross Sea에서 입자성 유기 물질의 거대 분자 조성 분석을 통해 이곳에서 일어나고 있는 환경변화의 영향을 파악함으로써 앞으로 로스해 해양생태계의 변동성을 파악하는데 기초적인 자료로 활용 가치가 높음.
- Ross Sea 유광층에서 심층으로 침강하는 입자성 유기탄소의 거동을 파악함으로써 국제적으로 대두되고 있는 남극해 생물학적 펌프의 미래 변동 연구에 대한 중요한 기반 자료로 활용 가치가 높음.
- 기후변화에 따른 해양 유기탄소의 변동에 맞춰 대기 및 해양 관리 정책 마련의 기반 자료로 활용 가능.
- 식물플랑크톤의 거대 분자 조성 분석을 통해 식물플랑크톤의 생리적인 상태를 확인할 수 있는 bio-marker로 개발 가능.



S U M M A R Y

I. Title

Variation in carbon flux by phytoplankton in the Antarctic Sea

II. Purpose and Necessity of R&D

- To investigate the spatial distribution of macromolecular components constituting phytoplankton in the Ross Sea.
- To identify the macromolecular composition of particulate organic matter within euphotic depth in the Ross Sea.
- To understand the variation in phytoplankton-based carbon flux due to current climate events.

III. Contents and Extent of R&D

- Measurement of macromolecular component of phytoplankton POM and particulate organic carbon in the Ross Sea.
- Estimation of relative contribution of each macromolecules to FM in the Ross Sea.
- Estimation of relative contribution of BPC to POC in the Ross Sea.

IV. R&D Results

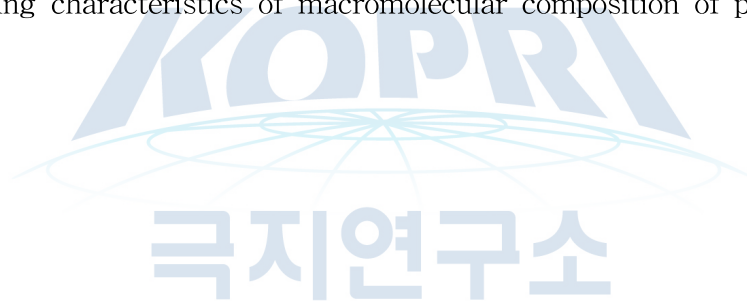
- The ranges of carbohydrate, protein, lipid, FM, POC, and BPC concentrations were 35.23–402.86, 35.16–222.05, 69.98–570.47, 79.61–960.00, 303.35–1079.08, and 104.88–603.65 $\mu\text{g L}^{-1}$ from the surface water in the Eastern Ross Sea, respectively.
- The ranges of carbohydrate, protein, lipid, FM, POC, and BPC concentrations were 14.61–450.71, 21.39–319.74, 32.50–264.53, 78.94–1023.05, 149.58–959.23,

48.53–526.40 $\mu\text{g L}^{-1}$ within the euphotic zone in the Western Ross Sea, respectively.

- The ranges of carbohydrate, protein, lipid, FM, POC, and BPC concentrations were 50.29–204.45, 0.00–226.06, 18.58–160.73, 85.78–585.81, 49.29–451.87, 44.08–310.43 $\mu\text{g L}^{-1}$ from the surface water at the Terra Nova Bay in the Western Ross Sea, respectively.

V. Application Plans of R&D Results

- To predict an effect of the climate change on the phytoplankton by monitoring macromolecular composition in the Ross Sea.
- To predict the variation in carbon flux based on the measurement of the particulate organic carbon and BPC which originated from phytoplankton in the Ross Sea.
- To develop a indicator which represent environmental changes through studying characteristics of macromolecular composition of phytoplankton.



Contents

Summary (Korean).....	iii
Summary (English).....	v
Contents (English).....	vii
List of Tables and Figures.....	viii
Contents (Korean).....	x
Chapter I. Introduction.....	1
Chapter II. Current standing and state of the art.....	3
Chapter III. Content and results of the study.....	5
Chapter IV. Research Goal Attained.....	58
Chapter V. Future Directions.....	60
Chapter VI. Overseas Science and Technology Information.....	61
Chapter VII. References.....	62

표·그림 목차

- 표 1. 연구 해역의 정점 정보.
- 표 2. Western Ross Sea의 연구 해역의 유광층에서 탄수화물, 단백질, 지질, FM, 입자성 유기탄소, BPC 농도의 범위와 수심별 평균 농도.
- 표 3. Western Ross Sea의 연구 해역의 유광층에서 FM에 대한 탄수화물, 단백질, 지질의 비율과 입자성 유기탄소에 대한 BPC의 비율.
- 그림 1. 연구 해역 (Eastern Ross Sea, *: ANA11A).
- 그림 2. 연구 해역 (Western Ross Sea, ▲: ANA11A, ■: JBS).
- 그림 3. 탄수화물, 단백질, 지질 정량 분석 방법.
- 그림 4. 입자성 유기탄소 분석 방법.
- 그림 5. Western Ross Sea의 연구 해역에서 입자성 유기탄소와 BPC의 상관관계 (표층).
- 그림 6. Eastern Ross Sea의 연구 해역에서 표층 식물플랑크톤의 탄수화물, 단백질, 지질 농도.
- 그림 7. Eastern Ross Sea의 연구 해역의 표층에서 탄수화물 농도의 공간 분포.
- 그림 8. Eastern Ross Sea의 연구 해역의 표층에서 단백질 농도의 공간 분포.
- 그림 9. Eastern Ross Sea의 연구 해역의 표층에서 지질 농도의 공간 분포.
- 그림 10. Eastern Ross Sea의 연구 해역의 표층에서 FM 농도의 공간 분포
- 그림 11. Eastern Ross Sea의 연구 해역의 표층에서 FM에 대한 탄수화물, 단백질, 지질의 기여도.
- 그림 12. Western Ross Sea의 연구 해역에서 유광층 내 탄수화물 농도의 수직 분포.
- 그림 13. Western Ross Sea의 연구 해역에서 유광층 내 단백질 농도의 수직 분포.
- 그림 14. Western Ross Sea의 연구 해역에서 유광층 내 지질 농도의 수직 분포.
- 그림 15. Western Ross Sea의 연구 해역에서 유광층 내 FM 농도의 수직 분포.
- 그림 16. Western Ross Sea의 연구 해역에서 탄수화물 농도의 공간 분포 (유광층 평균).
- 그림 17. Western Ross Sea의 연구 해역에서 단백질 농도의 공간 분포 (유광층 평균).
- 그림 18. Western Ross Sea의 연구 해역에서 지질 농도의 공간 분포 (유광층 평균).
- 그림 19. Western Ross Sea의 연구 해역에서 FM 농도의 공간 분포 (유광층 평균).
- 그림 20. Western Ross Sea의 연구 해역에서 유광층 내 FM에 대한 탄수화물 기여도의 수직 분포.
- 그림 21. Western Ross Sea의 연구 해역에서 유광층 내 FM에 대한 단백질 기여도의 수직 분포.
- 그림 22. Western Ross Sea의 연구 해역에서 유광층 내 FM에 대한 지질 기여도의 수직 분포.
- 그림 23. Western Ross Sea의 연구 해역에서 FM에 대한 탄수화물 기여도의 공간 분포 (유광층 평균).
- 그림 24. Western Ross Sea의 연구 해역에서 FM에 대한 단백질 기여도의 공간 분포 (유광층 평균).
- 그림 25. Western Ross Sea의 연구 해역에서 FM에 대한 지질 기여도의 공간 분포 (유광층 평균).
- 그림 26. Western Ross Sea의 Terra Nova Bay에 위치한 JBS의 표층에서 탄수화물, 단백질, 지질, FM 농도의 시계열 분포 (2015).

- 그림 27. Western Ross Sea의 Terra Nova Bay에 위치한 JBS의 표층에서 FM에 대한 탄수화물, 단백질, 지질 기여도의 시계열 분포 (2015).
- 그림 28. Western Ross Sea의 Terra Nova Bay에 위치한 JBS의 표층에서 탄수화물, 단백질, 지질, FM 농도의 시계열 분포 (2017-2018).
- 그림 29. Western Ross Sea의 Terra Nova Bay에 위치한 JBS의 표층에서 FM에 대한 탄수화물, 단백질, 지질 기여도의 시계열 분포 (2017-2018)
- 그림 30. Eastern Ross Sea의 연구 해역 표층에서 입자성 유기탄소와 BPC 농도.
- 그림 31. Eastern Ross Sea의 연구 해역 표층에서 입자성 유기탄소의 공간 분포.
- 그림 32. Eastern Ross Sea의 연구 해역 표층에서 BPC의 공간 분포.
- 그림 33. Eastern Ross Sea의 연구 해역 표층에서 입자성 유기탄소에 대한 BPC 기여도의 공간 분포.
- 그림 34. Western Ross Sea의 연구 해역에서 유광층 내 입자성 유기탄소 농도의 수직 분포.
- 그림 35. Western Ross Sea의 연구 해역에서 유광층 내 BPC 농도의 수직 분포.
- 그림 36. Western Ross Sea의 연구 해역에서 유광층 내 입자성 유기탄소에 대한 BPC 기여도의 수직 분포
- 그림 37. Western Ross Sea의 연구 해역에서 입자성 유기탄소 농도의 공간 분포 (유광층 평균).
- 그림 38. Western Ross Sea의 연구 해역에서 BPC 농도의 공간 분포 (유광층 평균).
- 그림 39. Western Ross Sea의 연구 해역에서 입자성 유기탄소에 대한 BPC 기여도의 공간 분포 (유광층 평균).
- 그림 40. Western Ross Sea의 Terra Nova Bay에 위치한 JBS의 표층에서 입자성 유기탄소, BPC 농도 및 입자성 유기탄소에 대한 BPC 기여도의 시계열 분포 (2015)
- 그림 41. Western Ross Sea의 Terra Nova Bay에 위치한 JBS의 표층에서 입자성 유기탄소, BPC 농도 및 입자성 유기탄소에 대한 BPC 기여도의 시계열 분포 (2017-2018).

목 차

국문 요약.....	iii
영문 요약.....	v
영문 목차.....	vii
표·그림 목차.....	viii
국문 목차.....	x
제 1장 서론.....	1
제 2장 국내외 기술 개발 현황.....	3
제 3장 연구개발수행 내용 및 결과.....	5
제 4장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도.....	58
제 5장 연구개발결과의 활용 계획.....	60
제 6장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보.....	61
제 7장 참고문헌.....	62

제 1장 서론

제 1절. 연구개발의 목적

식물플랑크톤은 남극해 생태계에서 먹이사슬의 기초가 되는 주요 일차생산자로서 상위 영양 단계 생물들에게 먹이를 제공하며 그들의 생물량과 생리 상태에 영향을 미칠 수 있다. 남극해는 전 대양에서 일어나는 CO₂ sink의 절반가량을 차지한다고 알려져 있고 전 지구적 탄소 순환에 중요한 역할을 한다고 알려져 있다. 해양으로 유입되는 CO₂는 여러 가지 물리 화학적인 프로세스에 의해 조절된다고 알려져 있으며 수층에 존재하는 CO₂는 광합성을 통한 식물플랑크톤의 유기물 합성에 사용된다. 이렇게 고정된 탄소는 상위 영양단계에 소비되어 축적될 수 있고 분해되어 수층으로 CO₂의 형태로 방출될 수 있다. 이렇듯 생물학적인 프로세스 또한 남극해에서 일어나는 탄소 순환에 기여하고 있다. 현재 진행 중인 기후변화는 남극해 해빙 면적, 수온, 수층 안정도를 변화시키고 있으며 이에 따라 식물플랑크톤의 탄소 고정 능력과 거대 분자 조성에 영향을 미칠 수 있다고 보고되고 있다. 급격한 환경변화를 겪고 있는 남극해에서 기후변화에 따른 남극해에서의 식물플랑크톤 기반 유기탄소 플럭스 변동을 규명하기 위해 식물플랑크톤의 거대 분자 조성 (탄수화물, 단백질, 지질), 입자성 유기탄소, Biopolymeric Carbon (탄수화물, 단백질, 지질을 구성하는 탄소량의 합; BPC)에 대한 연구가 필요하다. 본 연구 결과는 향후 남극해 해빙/해양생태계 변동 파악 및 예측에 중요한 과학적 근거 자료로 사용될 수 있다.

제 2절. 연구개발의 필요성

남극해는 식물플랑크톤의 일차생산을 통해 수층에 존재하는 이산화탄소가 유기물로 고정되어 심층으로 제거되는 탄소격리가 활발하게 일어나고 있는 해역이다. 또한 남극 저층수의 형성 등 해양-탄소-해류 순환과 밀접하게 관련된 해역으로 전 지구적인 기후체계에 중요한 역할을 하고 있다. 하지만 현재 진행 중인 기후변화의 영향으로 남극해 해양환경은 급격한 변화를 겪고 있다. 특히 남극의 서쪽과 남쪽 지역의 해양에서 해빙과 빙하의 시공간적 분포 변화가 감지되고 있으며 전 세계적으로 인공위성을 활용한 남극해의 해빙과 빙하 모니터링 연구가 활발히 진행되고 있다. 하지만 현장 관측은 지리적 접근성과 혹독한 기상으로 인해 연구가 제한되어 있어 연구가 적게 이루어져 있다. 현장 관측 자료는 인공위성 자료를 통해 생산된 결과를 검증할 때 필수적이기 때문에 실측 자료에 대한 수요가 증가하고 있다. 따라서 국제적 경쟁력을 갖춘 대한민국의 쇄빙연구선 아라온을 이용한 남극해 연구는 국내 협력 기반을 구축할 뿐 아니라 현장 관측을 통해 실측 자료를 축적할 수 있을 것이다.

1. 기술적 측면의 연구개발 중요성

- 가. 주요 해양 해빙 이화학적 환경 변수의 연속 관측 기술 개발
- 나. 남극해 해빙 해양생태계 특성 묘사 지표 개발
- 다. 남극해 해빙 환경 변동에 따른 해빙 해양생태계 변동성 파악

2. 경제 산업적 측면에서의 연구개발 중요성

- 가. 남극해 연구에 대한민국의 쇄빙연구선 아라온의 효율적 활용

- 나. 국제 수준의 극지 연구 수행을 통한 국가 위상 증대
- 다. 광역 해빙 해양생태계 연구를 위한 전문 인력 양성과 배출
- 라. 극 지역의 환경변화에 따른 한반도 기후변화 예측 모델 개발 기초자료 제공



제 2장 국내외 기술 개발 현황

제 1절. 국내 기술 개발 현황

1. 2010년부터 쇄빙연구선 아라온호 도입을 통해 독자적인 남극 연구가 수행되기 시작함.
2. 남극 세종과학기지, 장보고 과학기지와 더불어 쇄빙연구선을 통한 현장 조사가 가능해짐에 따라 장기적이고 지속적인 연구가 진행될 것으로 예상됨.
3. 식물플랑크톤은 해양생태계에서 일차생산자로서 먹이그물에서 가장 기초적인 위치를 가짐.
4. 따라서 식물플랑크톤의 전 지구 및 극지 생태 환경에 미치는 영향에 대한 연구의 주요 내용은 남극해 유기탄소 flux 중 생물 펌프의 주요 인자로서의 식물플랑크톤의 입자성 유기탄소 및 BPC 조사임.
5. 식물플랑크톤의 광합성, 일차생산량 조절, 거대 분자 조성에 영향을 미치는 환경요인 연구.
6. 크기에 따른 식물플랑크톤의 탄소, 질소 섭취율 비교 연구.
7. 식물플랑크톤의 고유한 생리현상으로 거대 분자 조성 연구가 이루어지고 있음.
8. 장기적인 관점에서 주요 식물플랑크톤 우점종이 환경변화와 함께 천이함에 따라 해양생태계에 미치는 영향에 대한 연구가 진행 중임.
9. 1차 소비자의 주요 먹이원으로서의 식물플랑크톤 연구.
10. 해빙 내 광합성 생물의 생물량을 조절하는 조절 환경요인 연구.
11. 다양한 연구들이 국내 연구진으로부터 수행되고 있지만 장기적인 관점에서 다른 선진국의 극지 연구 방향같이 지속성의 성격을 띠는 연구가 필요함.

제 2절. 국외 기술 개발 현황

1. KOPRI Amundsen project, iSTAR, ASPIRE, DynaLiFe 등 여러 국제 연구 프로그램이 아문젠해에 대한 연구를 수행하고 있음.
2. 극지 해양생태계의 구조와 기능에 대한 연구는 세계 주요 극지 연구 프로그램의 대표사업 중 하나로 운영되고 있음.
3. 대부분의 국외 연구 프로젝트는 장기 관측 프로그램으로 유지되며 생태계 변화를 예측할 수 있는 모델 개발을 궁극적인 목표로 함.
4. 전 세계 주요 해역을 대상으로 하는 국제 프로그램인 GLOBEC (Global Ocean Ecosystem Dynamics)에서도 연구 해역 중의 하나로 남극해를 선정함.
5. 영국 남극 연구소 British Antarctic Survey는 남 조지아섬 해역에서 약 5년 단위의 장기 프로그램을 통해 남극 해양생태계 변동 과정 연구를 지난 수십 년 동안 수행해오고 있음.
6. 독일의 Alfred Wegener Institute of Polar and Marine Research는 남극 순환류가 통과하는 해역에서 세계 최대의 쇄빙연구소 Polarstern을 이용하여 표층 해양생태계 구조와 기능 연구를 매년 수행하고 있음.
7. 일본의 극지연구소는 매년 해양생태계 연구를 정기적으로 수행하고 있음.
8. 중국의 극지연구소는 2년 주기로 장성기지와 중산 기지 사이의 환 남극 해역에서 종합 해양생태계 조사를 수행하고 있음.
9. 미국은 쇄빙연구선 Palmer호를 통해 남극 생태계 연구가 진행 중임.

10. 호주 극지연구소는 Tasmania의 Hobart에 항구와 크릴 연구를 위한 연구기관을 건설할 예정이다.



제 3장 연구개발수행 내용 및 결과

제 1절. 서론

바다는 인류 기원 CO₂를 제거하는 중요한 역할 하고 있으며 해양에서 흡수되는 CO₂의 거의 절반가량이 남극해에서 일어나고 있다 (Smith and Nelson, 1985; Nelson et al., 1996). 전 지구적인 탄소 순환에서 남극해의 CO₂ 제거 역할의 중요성이 대두되고 있지만 여러 가지 불확실성이 존재하며 수온과 해빙의 큰 변화를 겪고 있는 생산성이 높은 남극 연안 지역에서의 기작규명 등이 필요하다 (Sedwick and Ditullio, 1997; Sedwick et al., 2000; Krell et al., 2005).

극지 해역의 시스템은 현재 진행 중인 기후 변화에 큰 영향을 받지만 (Doney et al., 2012) 다른 한편으로는 해빙과 빙봉의 존재로 인한 어업 산업의 제한으로 지구상의 모든 해양생태계 중에서 인간 활동에 의한 영향을 가장 적게 받은 해역 중의 하나이며 Ross Sea가 좋은 예라고 할 수 있다 (Halpern et al., 2008). Ross Sea 대륙붕 해역의 먹이 그물은 거의 오염되지 않았지만 이산화 탄소 농도 증가로 인해 pH의 감소와 함께 아라고나이트 포화도는 1에 가까워지고 있는 등 화학적인 특성 변화가 급격하게 일어나고 있다 (Orr et al., 2005, Matson et al., 2011). 해빙의 계절적 변동성 또한 빠르게 변하고 있다 (Stammerjohn et al., 2008, 2012). 이와 같이 이 지역의 생태 및 먹이 사슬 역학의 일부 측면은 교란되지 않은 상태로 남아 있는 반면 다른 측면은 환경변화에 빠르게 반응하고 있다 (Smith et al., 2012). 두 조건 모두 Ross Sea를 자연적 상호작용과 과정을 다루는 가설을 테스트하기 위한 남극해의 가장 이상적인 "자연 실험실" 중 하나로 만든다.

Ross Sea는 식물플랑크톤의 생체량과 일차생산에 있어 강한 계절적 변화를 보이며 남극해에서 가장 생산적인 해역 중 하나이다 (Nelson et al., 1996; Park et al., 2021). 이러한 고위도의 극지 해역에서 식물플랑크톤의 빛 가용성은 여름 동안의 짧은 ice-free period에 한정되어 있다 (Arrigo and Van Dijken, 2004; Borrione and Schlitzer, 2013). 이 기간 동안 식물플랑크톤은 광합성을 통해 Particulate organic matter (POM)을 합성하고 ice-free period와 ice-covered period에 걸친 기간 동안 전체 해양생태계를 부양하는 중요한 먹이원을 공급한다 (Falkowski, 1994; Fabiano et al., 1996). 현재 진행 중인 기후변화는 수십 년 동안 북극 해빙의 엄청난 감소와 남극해 해빙의 소폭 증가시켰다 (Arrigo et al., 2008; Markus et al., 2009; Liu and Curry, 2010; Comiso, 2012; Hobbs et al., 2016). 해빙 면적의 변화뿐만 아니라 해빙이 형성되는 시점과 기간 또한 변하고 있다 (Hobbs et al., 2016; Eayrs et al., 2019). 남극해의 Western Ross Sea에서의 연간 ice-free period는 2.6개월로 짧아졌으며 Bellingshausen Sea에서는 3.3개월로 길어졌다 (Parkinson, 1994, 2002; Stammerjohn et al., 2008, 2012; Hobbs et al., 2016; Eayrs et al., 2019). Ice-free period의 변화는 식물플랑크톤이 성장하는 기간과 식물플랑크톤을 먹이로 하는 상위 영양단계 생물의 영양학적 상태에 영향을 미칠 수 있다 (Quetin et al., 2007; Arrigo et al., 2008; Ross et al., 2008; Markus et al., 2009; Quetin and Ross, 2009; Massom et al., 2013). 따라서 본 연구의 목적은 남극해에서 식물플랑크톤을 구성하는 거대 분자 농도의 시·공간 분포와 조성 별 기여도를 분석하고, 남극해에서 식물플랑크톤에 의한 침강 입자 특성 파악하여 기후변화에 따른 남극해에서의 식물플랑크톤 기반 유기탄소 플럭스 변동성을 규명하는 것이다.

제 2절. 재료 및 방법

1. 연구 해역 및 샘플링

쇄빙선 아라온호를 이용하여 2020년 12월 ANA11A cruise를 통해 Eastern Ross Sea (그림 1)와 Western Ross Sea의 Open sea (그림 2)에서 해수 샘플을 획득하였다. Eastern Ross Sea의 총 10개 정점 (st.63, st.64, st.65, st.66, st.67, st.68, st.69, st.70, st.71, st.72)에서 표층 해수가 채집되었다 (표 1). Western Ross Sea의 Open sea의 총 12개 정점 (st.36, st.38, st.40, st.43, st.45, st.47, st.49, st.51, st.52, st.54, st.56, st.58)의 유광층에서 샘플이 채집되었다 (표 1). CTD (Conductivity-Temperature-Depth)를 장착한 rosette sampler를 이용하여 해수 샘플을 수집하였으며 유광층 수심은 표층 (100% 광 수심)부터 1% 광 수심까지로 정의했다. 극야 기간 동안 POM의 biochemical composition 거동 파악을 위해 Ross Sea의 연안에 위치한 Terra Nova Bay의 Jan Bogo Station (JBS)에서 2015년 2월부터 10월, 2017년 11월부터 2018년 10월의 입자성 유기 물질의 거대 분자 조성 자료를 확보하였다 (그림 2, 표 1).

2. 식물플랑크톤의 거대 분자 조성 측정 방법

식물플랑크톤의 거대 분자 조성 (탄수화물, 단백질, 지질) 분석을 위한 해수 시료는 유광층 (100%-1%)의 해당 수심에서 채집하였다. 거대 분자 조성 분석을 위해 해수 300-500 ml의 해수 샘플을 GF/F (47 mm) 필터지에 여과한 후 여과된 샘플은 분석 전까지 냉동 보관하였다 (-80 °C). 식물플랑크톤이 함유하는 탄수화물, 단백질, 지질 분석은 그림 3에 제시된 방법으로 정량 분석하였다. 탄수화물의 정량 분석은 Dubois et al. (1956)에 의해 제시된 phenol-sulfuric method에 따라 수행되었으며 glucose solution (1 mg mL⁻¹, Sigma)이 표준물질로 사용되었다 (그림 3). 단백질의 정량 분석은 Lowry et al. (1951)에 의해 제시된 방법에 따라 수행되었으며 protein standard (2 mg mL⁻¹, Sigma)가 표준물질로 사용되었다. 지질의 정량 분석은 Bligh and Dyer (1959)와 Marsh and Weinstein (1966)의 방법에 따라 수행되었으며 tripalmitin solution (Sigma)이 표준물질로 사용되었다. 추출과 발색이 완료된 시료는 HITACHI UH5300 spectrophotometer를 이용하여 흡광도를 측정하였다. 탄수화물, 단백질, 지질의 농도는 각각의 표준물질의 농도와 흡광도 사이의 선형관계식을 통해 도출되었으며 탄수화물, 단백질, 지질의 합을 Food material (FM)로 정의하였다 (Danovaro et al., 2000). 탄수화물, 단백질, 지질의 탄소 전환 계수는 각각 0.40, 0.49, 0.75 g C g⁻¹을 사용하였으며 탄수화물, 단백질, 지질의 탄소량의 합을 Biopolymeric carbon (BPC)로 정의하였다 (Fichez, 1991a,b; Danovaro et al., 2000).

3. 입자성 유기탄소 분석 방법

입자성 유기탄소 농도를 측정하기 위한 해수 시료는 유광층(100%-1%)의 해당 수심에서 채집되었다. 입자성 유기탄소 농도 측정을 위해 사전에 미리 태운 (450 °C, 4시간) GF/F 여과지 (25 mm)를 이용해 200-300 ml의 해수 시료를 여과하였다. 여과된 샘플은 냉동 보관하였으며 (-20 °C) 진한 염산 증기로 무기 탄소를 제거하여 Alaska Stable Isotope Facility의 Finnigan Delta+XL mass spectrometer을 이용해 입자성 유기탄소량이 분석되었다 (그림 4). 본 연구의 Eastern Ross Sea에서의 표층에 존재하는 입자성 유기탄소 농도는 Western Ross Sea에서 확

인된 표층의 입자성 유기탄소와 BPC의 상관관계 식을 통해 계산되었다 (입자성 유기탄소 = $1.5553 \cdot \text{BPC} + 140.23$, $r^2 = 0.6386$, $p < 0.01$, 그림 5).

제 3절. 결과

1. 남극해 식물플랑크톤의 거대 분자 조성

가. Eastern Ross Sea (ANA11A)

연구 해역에서 탄수화물 농도의 범위는 $35.23\text{--}402.86 \mu\text{g L}^{-1}$ ($120.15 \pm 107.08 \mu\text{g L}^{-1}$)로 나타났으며 st.67에서 최솟값, st.70에서 최댓값이 관측되었다 (그림 6, 7). 단백질 농도의 범위는 $35.16\text{--}222.05 \mu\text{g L}^{-1}$ ($109.74 \pm 63.09 \mu\text{g L}^{-1}$)로 나타났으며 st.70에서 최솟값, st.63에서 최댓값이 관측되었다 (그림 6, 8). 지질 농도의 범위는 $69.98\text{--}570.47 \mu\text{g L}^{-1}$ ($218.15 \pm 192.81 \mu\text{g L}^{-1}$)로 나타났으며 st.70에서 최솟값, st.63에서 최댓값이 관측되었다 (그림 6, 9). FM 농도의 범위는 $179.61\text{--}960.00 \mu\text{g L}^{-1}$ ($444.04 \pm 280.24 \mu\text{g L}^{-1}$)로 나타났으며 st.67에서 최솟값, st.63에서 최댓값이 관측되었다. st.70에서의 가장 높은 탄수화물 농도를 제외한다면 네 항목 모두 ice edge에서 멀어질수록 낮은 농도를 보였다 (그림 6, 10).

연구 해역에서 FM에 대한 탄수화물의 비율은 $15\text{--}79\%$ ($28 \pm 19\%$)의 범위를 보였으며 st.64에서 최소 비율을 st.70에서 최대 비율을 보였다 (그림 11). FM에 대한 단백질의 비율은 $7\text{--}37\%$ ($27 \pm 9\%$)의 범위를 보였으며 st.70에서 최소 비율을 st.67에서 최대 비율을 보였다. FM에 대한 지질의 비율은 $14\text{--}61\%$ ($45 \pm 14\%$)의 범위를 보였으며 st.70에서 최소 비율을 st.64에서 최대 비율을 보였다. Ice edge에 가까울수록 지질의 비율이 높게 나타났다.

나. Western Ross Sea

(1) Open Sea (ANA11A)

연구 해역에서 광 수심에 따른 탄수화물, 단백질, 지질, FM 농도는 표 2에 제시하였다. 유광층 내 탄수화물 농도의 범위는 $14.61\text{--}450.71 \mu\text{g L}^{-1}$ ($139.67 \pm 113.33 \mu\text{g L}^{-1}$)로 나타났으며 st.51의 1% 광 수심에서 최솟값, st.47의 1% 광 수심에서 최댓값이 관측되었다 (그림 12). 유광층 내 단백질 농도의 범위는 $21.39\text{--}319.74 \mu\text{g L}^{-1}$ ($123.01 \pm 78.31 \mu\text{g L}^{-1}$)로 나타났으며 st.51의 1% 광 수심에서 최솟값, st.47의 1% 광 수심에서 최댓값이 관측되었다 (그림 13). 유광층 내 지질 농도의 범위는 $32.50\text{--}264.53 \mu\text{g L}^{-1}$ ($120.60 \pm 59.91 \mu\text{g L}^{-1}$)로 나타났으며 st.52의 1% 광 수심에서 최솟값, st.45의 1% 광 수심에서 최댓값이 관측되었다 (그림 14). 유광층 내 FM 농도의 범위는 $78.94\text{--}1023.05 \mu\text{g L}^{-1}$ ($383.28 \pm 242.60 \mu\text{g L}^{-1}$)로 나타났으며 st.51의 1% 광 수심에서 최솟값, st.47의 1% 광 수심에서 최댓값이 관측되었다 (그림 15). 100% 광 수심에서의 탄수화물, 단백질, 지질, FM의 평균 농도는 각각 $154.20 \pm 123.04 \mu\text{g L}^{-1}$, $137.22 \pm 71.49 \mu\text{g L}^{-1}$, $124.50 \pm 48.87 \mu\text{g L}^{-1}$, $415.93 \pm 233.81 \mu\text{g L}^{-1}$ 으로 나타났다 (표 2). 30% 광 수심에서의 탄수화물, 단백질, 지질, FM의 평균 농도는 각각 $81.78 \pm 53.09 \mu\text{g L}^{-1}$, $85.38 \pm 45.58 \mu\text{g L}^{-1}$, $101.91 \pm 41.28 \mu\text{g L}^{-1}$, $269.08 \pm 134.46 \mu\text{g L}^{-1}$ 으로 나타났다 (표 2). 1% 광 수심에서의 탄수화물, 단백질, 지질, FM의 평균 농도는 각각 $158.90 \pm 124.85 \mu\text{g L}^{-1}$, $130.76 \pm 96.41 \mu\text{g L}^{-1}$, $127.59 \pm 78.60 \mu\text{g L}^{-1}$, $417.25 \pm 291.99 \mu\text{g L}^{-1}$ 으로 나타났다 (표 2). 연구 해역에서 탄수화물, 단백질, 지질, FM 농도는 100%, 30% 1% 광 수심에서 통계적인 차이를 보이지 않았다 (t -test,

$p > 0.05$). 탄수화물, 단백질, 지질, FM 농도의 유광층 평균값은 st.47에서 가장 높았으며 외해에서는 낮은 값이 나타났다 (그림 16, 17, 18, 19).

연구 해역에서 유광층 내 FM에 대한 탄수화물의 비율은 17-52% ($33 \pm 9\%$)의 범위를 보였으며 st.52의 30% 광 수심에서 최소 비율을 st.42의 100% 광 수심에서 최대 비율을 보였다 (그림 20). 유광층 내 FM에 대한 단백질의 비율은 24-40% ($32 \pm 5\%$)의 범위를 보였으며 st.52의 1% 광 수심에서 최소 비율을 st.56의 30% 광 수심에서 최대 비율을 보였다 (그림 21). 유광층 내 FM에 대한 지질의 비율은 21-55% ($35 \pm 8\%$)의 범위를 보였으며 st.40의 100% 광 수심에서 최소 비율을 st.51의 30% 광 수심에서 최대 비율을 보였다 (그림 22). 100% 광 수심에서의 FM에 대한 탄수화물, 단백질, 지질의 평균 비율은 각각 $33 \pm 11\%$, $34 \pm 4\%$, $33 \pm 7\%$ 로 나타났다 (표 3). 30% 광 수심에서의 FM에 대한 탄수화물, 단백질, 지질의 평균 비율은 각각 $28 \pm 8\%$, $32 \pm 5\%$, $41 \pm 8\%$ 로 나타났다 (표 3). 1% 광 수심에서의 FM에 대한 탄수화물, 단백질, 지질의 평균 비율은 각각 $37 \pm 8\%$, $30 \pm 4\%$, $34 \pm 9\%$ 로 나타났다 (표 3). 유광층 내 FM에 대한 단백질 비율의 차이는 100%의 광 수심과 1%의 광 수심에서 나타났으며 탄수화물 비율의 차이는 30%의 광 수심과 1%의 광 수심에서 나타났다 (t -test, $p < 0.05$). FM에 대한 탄수화물 기여도의 유광층 평균값은 st.40에서 가장 높았고 외해로 갈수록 낮아졌다 (그림 23). FM에 대한 단백질 기여도의 유광층 평균값은 Ross Ice Shelf에 인접한 정점에서 높게 나타났다 (그림 24). FM에 대한 지질 기여도의 유광층 평균값은 st.51에서 가장 높게 나타났다 (그림 25).

(2) Coastal region (JBS in Terra Nova Bay)

① 2015.02-2015.10

연구 해역에서 조사 기간 동안 표층 해수의 탄수화물, 단백질, 지질, FM 농도의 범위는 각각 52.48-204.45 $\mu\text{g L}^{-1}$ ($94.98 \pm 31.72 \mu\text{g L}^{-1}$), 0.39-220.62 $\mu\text{g L}^{-1}$ ($22.51 \pm 49.56 \mu\text{g L}^{-1}$), 18.58-160.73 $\mu\text{g L}^{-1}$ ($33.09 \pm 29.57 \mu\text{g L}^{-1}$), 85.78-585.81 $\mu\text{g L}^{-1}$ ($150.59 \pm 103.35 \mu\text{g L}^{-1}$)로 나타났으며 2월에 가장 높은 농도를 보였다 (그림 26). Ice-free period 동안 탄수화물, 단백질, 지질, FM의 평균 농도는 각각 $142.92 \pm 55.90 \mu\text{g L}^{-1}$, $143.60 \pm 80.54 \mu\text{g L}^{-1}$, $100.33 \pm 59.14 \mu\text{g L}^{-1}$, $386.89 \pm 194.22 \mu\text{g L}^{-1}$ 으로 나타났다. Ice-covered period 동안 탄수화물, 단백질, 지질, FM의 평균 농도는 각각 $88.99 \pm 22.99 \mu\text{g L}^{-1}$, $7.37 \pm 7.76 \mu\text{g L}^{-1}$, $24.69 \pm 4.56 \mu\text{g L}^{-1}$, $121.05 \pm 24.58 \mu\text{g L}^{-1}$ 으로 나타났다.

연구 기간 동안 FM에 대한 탄수화물, 단백질, 지질의 비율은 각각 34-87% ($69 \pm 14\%$), 0-40% ($9 \pm 11\%$), 13-30% ($21 \pm 4\%$)의 범위를 보였다 (그림 27). Ice-free period 동안 FM에 대한 탄수화물, 단백질, 지질의 평균 비율은 $39 \pm 8\%$, $36 \pm 5\%$, $25 \pm 3\%$ 로 나타났다. Ice-covered period 동안 FM에 대한 탄수화물, 단백질, 지질의 평균 비율은 $73 \pm 9\%$, $6 \pm 6\%$, $21 \pm 4\%$ 로 나타났다.

② 2017.11-2018.10

연구 해역에서 조사 기간 동안 표층 해수의 탄수화물, 단백질, 지질, FM 농도의 범위는 각각 50.29-194.69 $\mu\text{g L}^{-1}$ ($123.72 \pm 31.68 \mu\text{g L}^{-1}$), 0.00-226.06 $\mu\text{g L}^{-1}$ ($39.32 \pm 68.88 \mu\text{g L}^{-1}$), 51.08-141.88 $\mu\text{g L}^{-1}$ ($73.76 \pm 27.06 \mu\text{g L}^{-1}$), 114.18-499.52 $\mu\text{g L}^{-1}$ ($236.80 \pm 108.67 \mu\text{g L}^{-1}$)로 나타났으며 탄수화물은 10월에 가장 높은 농도를 보였으며 단백질과 지질은 2월에 가장 높은 농도를 보였다 (그림 28). 봄철 (11월, 12월) 탄수화물, 단백질, 지질, FM의 평균 농도는 각각

104.43 ± 33.75 μg L⁻¹, 26.68 ± 40.52 μg L⁻¹, 72.15 ± 22.48 μg L⁻¹, 203.26 ± 84.83 μg L⁻¹으로 나타났다. 여름철 (1월, 2월) 탄수화물, 단백질, 지질, FM의 평균 농도는 각각 143.48 ± 19.59 μg L⁻¹, 173.84 ± 50.84 μg L⁻¹, 120.49 ± 21.57 μg L⁻¹, 437.80 ± 75.97 μg L⁻¹으로 나타났다. 가을철 (3월, 4월) 탄수화물, 단백질, 지질, FM의 평균 농도는 각각 136.45 ± 19.97 μg L⁻¹, 28.88 ± 36.16 μg L⁻¹, 74.25 ± 22.09 μg L⁻¹, 239.58 ± 45.40 μg L⁻¹으로 나타났다. 겨울철 (5월-10월) 탄수화물, 단백질, 지질, FM의 평균 농도는 각각 123.58 ± 33.39 μg L⁻¹, 0.15 ± 0.51 μg L⁻¹, 57.52 ± 5.35 μg L⁻¹, 181.25 ± 34.46 μg L⁻¹으로 나타났다.

연구 기간 동안 FM에 대한 탄수화물, 단백질, 지질의 비율은 각각 27-78% (57 ± 15%), 0-45% (10 ± 15%), 22-54% (33 ± 6%)의 범위를 보였다 (그림 29). 봄철 동안 FM에 대한 탄수화물, 단백질, 지질의 평균 비율은 53 ± 11%, 10 ± 12, 37 ± 8%로 나타났다. 여름철 동안 FM에 대한 탄수화물, 단백질, 지질의 평균 비율은 33 ± 6%, 39 ± 5, 28 ± 2%로 나타났다. 가을철 동안 FM에 대한 탄수화물, 단백질, 지질의 평균 비율은 59 ± 15%, 11 ± 12, 31 ± 5%로 나타났다. 겨울철 동안 FM에 대한 탄수화물, 단백질, 지질의 평균 비율은 67 ± 5%, 0 ± 0%, 33 ± 5%로 나타났다.

2. 남극해 식물플랑크톤의 입자성 유기탄소 및 BPC 농도

가. Eastern Ross Sea (ANA11A)

연구 해역에서 입자성 유기탄소 농도의 범위는 303.35-1079.08 μg L⁻¹ (553.08 ± 283.22 μg L⁻¹)로 나타났으며 st.67에서 최솟값, st.63에서 최댓값이 관측되었다 (그림 30, 31). BPC 농도의 범위는 104.88-603.65 μg L⁻¹ (265.45 ± 182.10 μg L⁻¹)로 나타났으며 st.67에서 최솟값, st.63에서 최댓값이 관측되었다 (그림 30, 32). 입자성 유기탄소에 대한 BPC의 비율은 35-56% (45 ± 8%)의 범위를 보였다 (그림 30, 33). Ross Ice Shelf에서 멀어질수록 입자성 유기탄소, BPC 낮은 농도와 입자성 유기탄소에 대한 BPC의 낮은 비율이 관측되었다.

나. Western Ross Sea

(1) Open sea (ANA11A)

연구 해역에서 광 수심에 따른 입자성 유기탄소, BPC 농도는 표 2에 제시하였다. 연구 해역에서 유광층 내 입자성 유기탄소 농도의 범위는 149.58-959.23 μg L⁻¹ (452.82 ± 224.91 μg L⁻¹)로 나타났으며 st.52의 1% 광 수심에서 최솟값, st.40의 1% 광 수심에서 최댓값이 관측되었다 (그림 34). 유광층 내 BPC 농도의 범위는 48.53-526.40 μg L⁻¹ (202.59 ± 123.81 μg L⁻¹)로 나타났으며 st.51의 1% 광 수심에서 최솟값, st.47의 1% 광 수심에서 최댓값이 관측되었다 (그림 35). 100% 광 수심에서의 입자성 유기탄소, BPC의 평균 농도는 각각 485.98 ± 225.06 μg L⁻¹, 222.30 ± 115.64 μg L⁻¹으로 나타났다 (표 2). 30% 광 수심에서의 입자성 유기탄소, BPC의 평균 농도는 각각 361.82 ± 148.32 μg L⁻¹, 150.99 ± 71.88 μg L⁻¹으로 나타났다 (표 2). 1% 광 수심에서의 입자성 유기탄소, BPC의 평균 농도는 각각 472.75 ± 261.53 μg L⁻¹, 223.32 ± 151.90 μg L⁻¹으로 나타났다 (표 2). 입자성 유기탄소 농도의 유광층 평균값은 st.40에서 가장 높았으며 외해에서는 낮은 값이 나타났다 (그림 37). BPC 농도의 유광층 평균값은 st.47에서 가장 높았으며 외해에서는 낮은 값이 나타났다 (그림 37).

연구 해역에서 유광층 내 입자성 유기탄소에 대한 BPC의 비율은 28-76% (44 ± 10%)의 범

위를 보였으며 st.52의 30% 광 수심에서 최소 비율을 st.47의 1% 광 수심에서 최대 비율을 보였다 (그림 36). 100%, 30%, 1%의 광 수심에서 입자성 유기탄소에 대한 BPC의 비율은 각각 $45 \pm 10\%$, $41 \pm 7\%$, $44 \pm 12\%$ 로 나타났다. 연구 해역에서 입자성 유기탄소에 대한 BPC의 비율은 100%, 30% 1% 광 수심에서 통계적인 차이를 보이지 않았다 (t -test, $p > 0.05$). 입자성 유기탄소에 대한 BPC 기여도의 유광층 평균값은 st.47에서 가장 높았으며 외해에서는 낮은 값이 나타났다 (그림 39).

(2) Coastal region (JBS in Terra Nova Bay)

① 2015.02-2015.10

연구 해역에서 조사 기간 동안 표층 해수의 입자성 유기탄소, BPC 농도의 범위는 각각 $58.18-451.87 \mu\text{g L}^{-1}$ ($102.56 \pm 83.37 \mu\text{g L}^{-1}$), $44.08-310.43 \mu\text{g L}^{-1}$ ($73.84 \pm 55.87 \mu\text{g L}^{-1}$)로 나타났으며 2월에 가장 높은 농도를 보였다 (그림 40). Ice-free period 동안 입자성 유기탄소, BPC의 평균 농도는 $292.93 \pm 155.90 \mu\text{g L}^{-1}$, $202.78 \pm 105.59 \mu\text{g L}^{-1}$ 으로 나타났다. Ice-covered period 동안 입자성 유기탄소, BPC의 평균 농도는 $78.77 \pm 20.64 \mu\text{g L}^{-1}$, $57.73 \pm 10.91 \mu\text{g L}^{-1}$ 으로 나타났다.

연구 기간 동안 입자성 유기탄소에 대한 BPC의 비율은 57-100% ($74 \pm 10\%$)의 범위를 보였다 (그림 40). Ice-free period와 ice-covered period 동안 입자성 유기탄소에 대한 BPC의 평균 비율은 $70 \pm 1\%$, $75 \pm 11\%$ 로 나타났다.

② 2017.11-2018.10

연구 해역에서 조사 기간 동안 표층 해수의 입자성 유기탄소, BPC 농도의 범위는 각각 $49.29-239.54 \mu\text{g L}^{-1}$ ($92.46 \pm 46.57 \mu\text{g L}^{-1}$), $67.41-267.84 \mu\text{g L}^{-1}$ ($124.08 \pm 58.49 \mu\text{g L}^{-1}$)로 나타났으며 2월에 가장 높은 농도를 보였다 (그림 41). 연구 기간 동안 입자성 유기탄소에 대한 BPC의 비율은 87-100%로 나타났다 (그림 41).

표 1. 연구 해역의 정점 정보

Study region	Station	Latitude	Longitude
Eastern Ross Sea	st.63	-78.1998	-161.7233
	st.64	-77.7105	-161.8530
	st.65	-77.3978	-162.2888
	st.66	-77.1052	-163.0070
	st.67	-76.8070	-163.4636
	st.68	-76.4976	-163.5259
	st.69	-76.0216	-162.5846
	st.70	-76.1117	-162.8977
	st.71	-76.1674	-163.0956
	st.72	-76.2346	-163.2665
Western Ross Sea	st.36	-74.5460	171.0007
	st.38	-75.4516	171.0000
	st.40	-76.4034	170.9999
	st.43	-77.3475	170.9978
	st.45	-77.3999	176.2994
	st.47	-76.4330	176.2998
	st.49	-75.4660	176.3000
	st.51	-74.5001	176.3007
	st.52	-74.4999	-179.1996
	st.54	-75.5666	-179.1994
st.56	-76.6334	-179.1999	
st.58	-77.6972	-179.2007	
JBS	-74.6279	164.2392	

표 2. Western Ross Sea의 연구 해역의 유광층에서 탄수화물, 단백질, 지질, FM, 입자성 유기탄소, BPC 농도의 범위와 수심별 평균 농도

광 수심 (%)	탄수화물	단백질	지질	FM	입자성 유기 탄소	BPC
100	154.2 ± 123.04	137.22 ± 71.49	124.5 ± 48.87	415.93 ± 233.81	485.98 ± 225.06	222.3 ± 115.64
30	81.78 ± 53.09	85.38 ± 45.58	101.91 ± 41.28	269.08 ± 134.46	361.82 ± 148.32	150.99 ± 71.88
1	158.9 ± 124.85	130.76 ± 96.41	127.59 ± 78.6	417.25 ± 291.99	472.75 ± 261.53	223.32 ± 151.9
범위 (평균±표준편차)	14.61-450.71 (139.67 ± 113.33)	21.39-319.74 (123.01 ± 78.31)	32.5-264.53 (120.6 ± 59.91)	78.94-1023.05 (383.28 ± 242.6)	149.58-959.23 (452.82 ± 224.91)	48.53-526.4 (206.59 ± 123.81)

단위 = $\mu\text{g L}^{-1}$

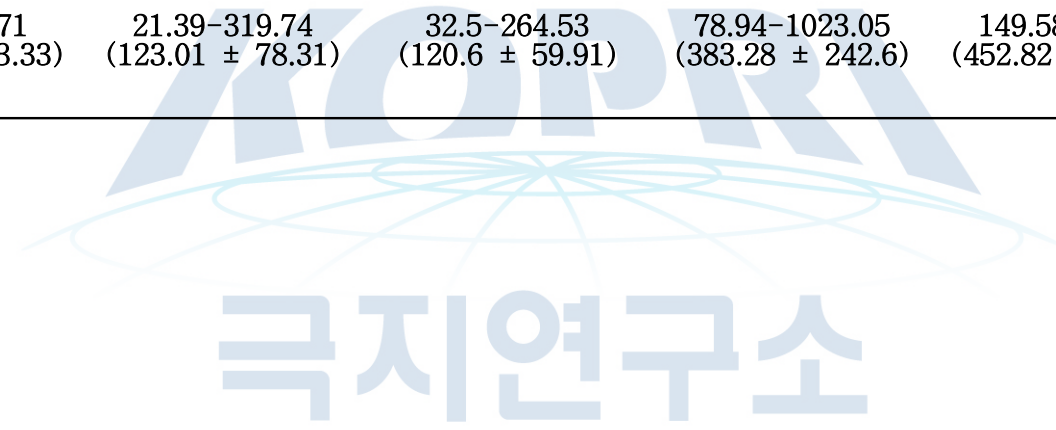


표 3. Western Ross Sea의 연구 해역의 유광층에서 FM에 대한 탄수화물, 단백질, 지질의 비율과 입자성 유기탄소에 대한 BPC의 비율

광 수심 (%)	탄수화물	단백질	지질	BPC/입자성 유기탄소
100	33 ± 10	34 ± 4	33 ± 7	45 ± 10
30	28 ± 8	32 ± 5	41 ± 8	40 ± 7
1	37 ± 8	30 ± 5	34 ± 9	45 ± 12
범위 (평균±표준편차)	17-52 (33 ± 9)	24-40 (32 ± 5)	21-55 (35 ± 8)	28-76 (44 ± 10)

단위 = %



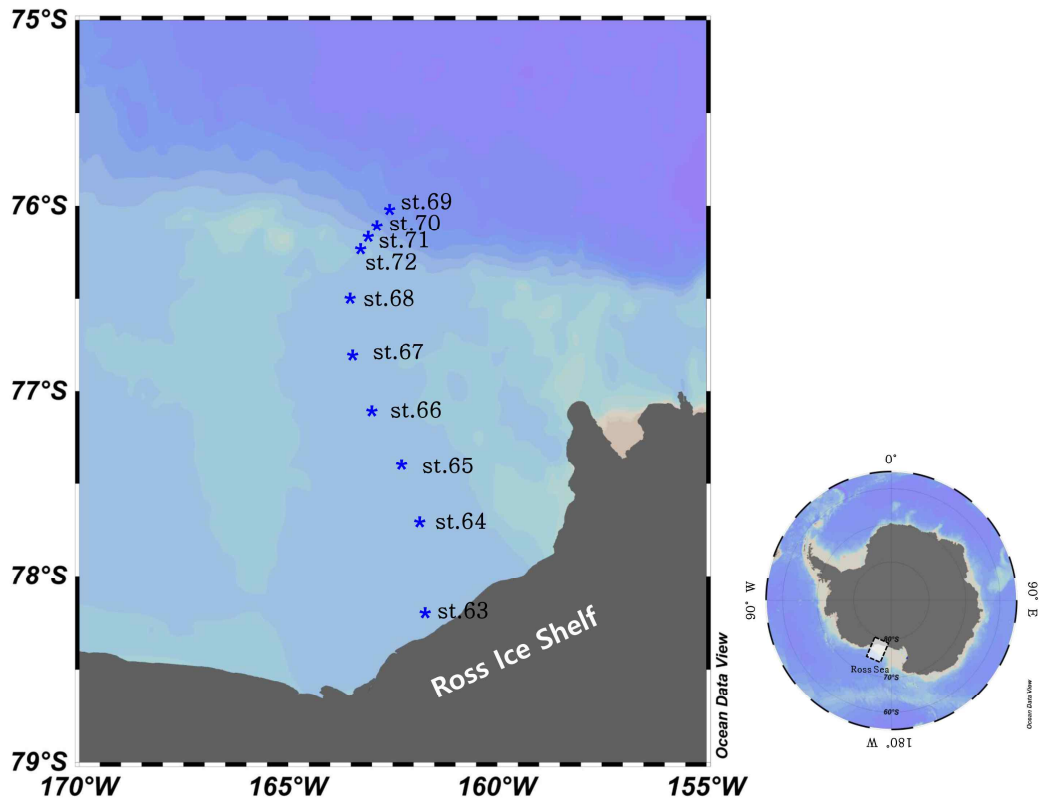


그림 1. 연구 해역 (Eastern Ross Sea, * : ANA11A cruise).



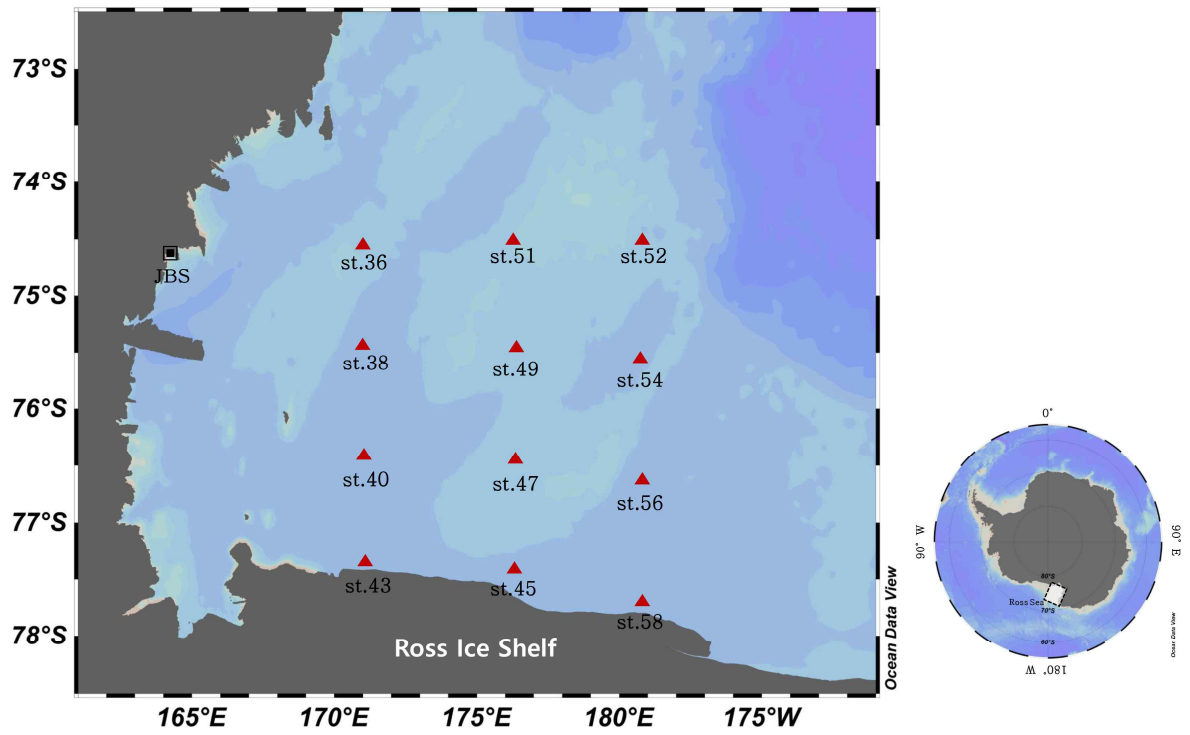


그림 2. 연구 해역 (Western Ross Sea, ▲: ANA11A cruise, ■: JBS).



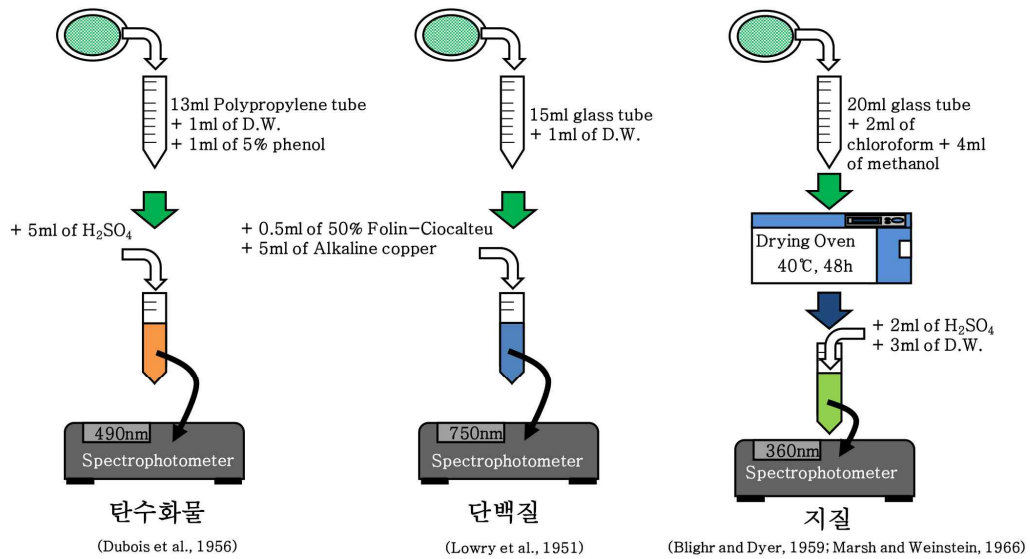


그림 3. 탄수화물, 단백질, 지질 정량 분석 방법.



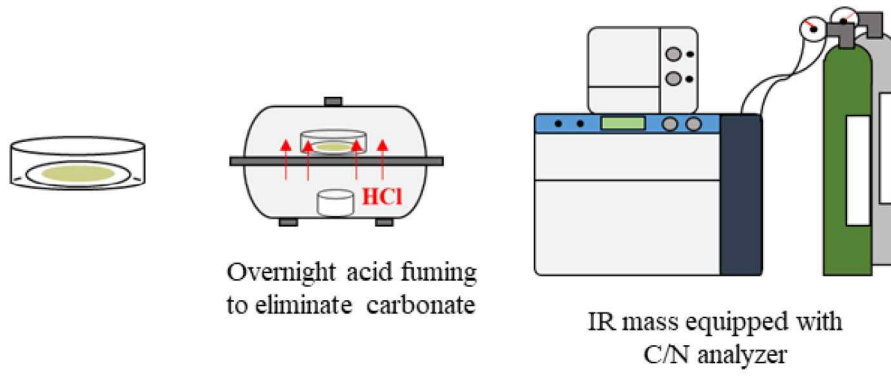


그림 4. 입자성 유기탄소 분석 방법.



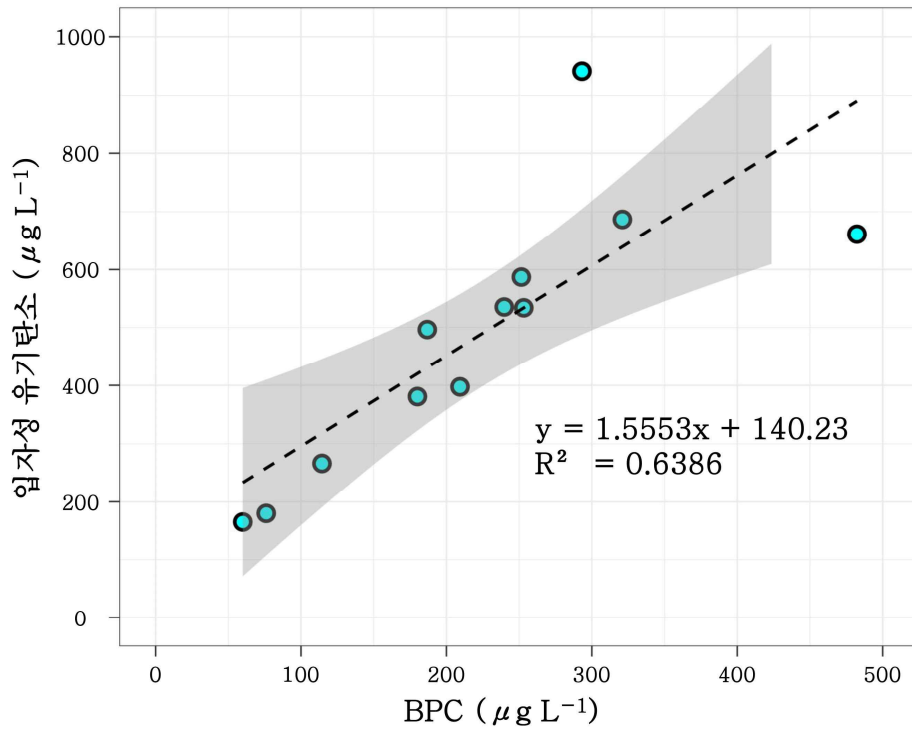


그림 5. Western Ross Sea의 연구 해역에서 입자성 유기탄소와 BPC의 상관관계 (표층).



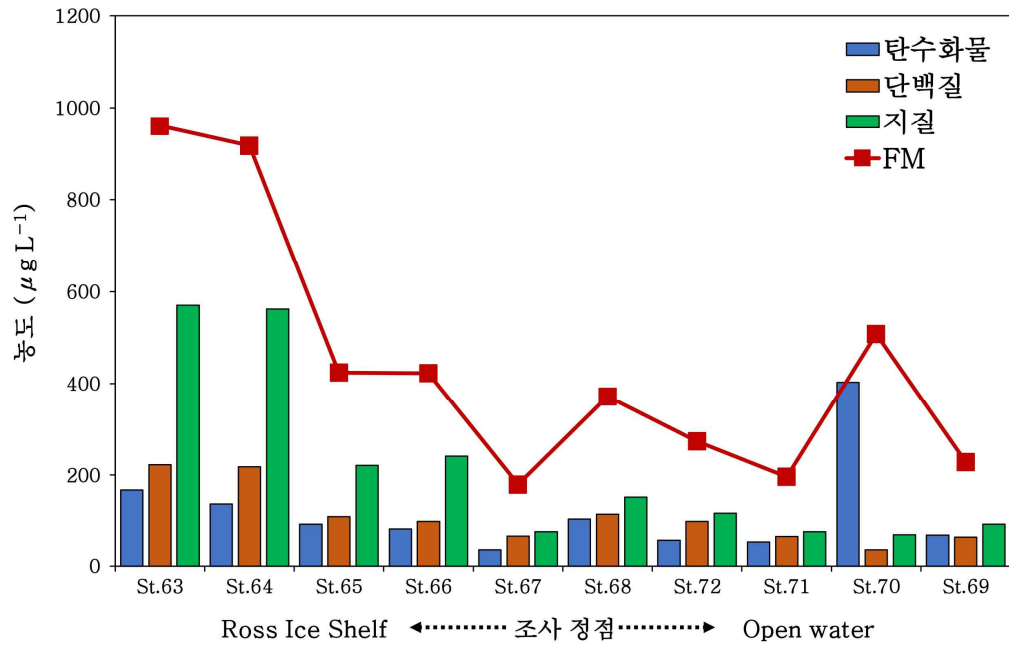


그림 6. Eastern Ross Sea의 연구 해역에서 표층 식물플랑크톤의 탄수화물, 단백질, 지질 농도.



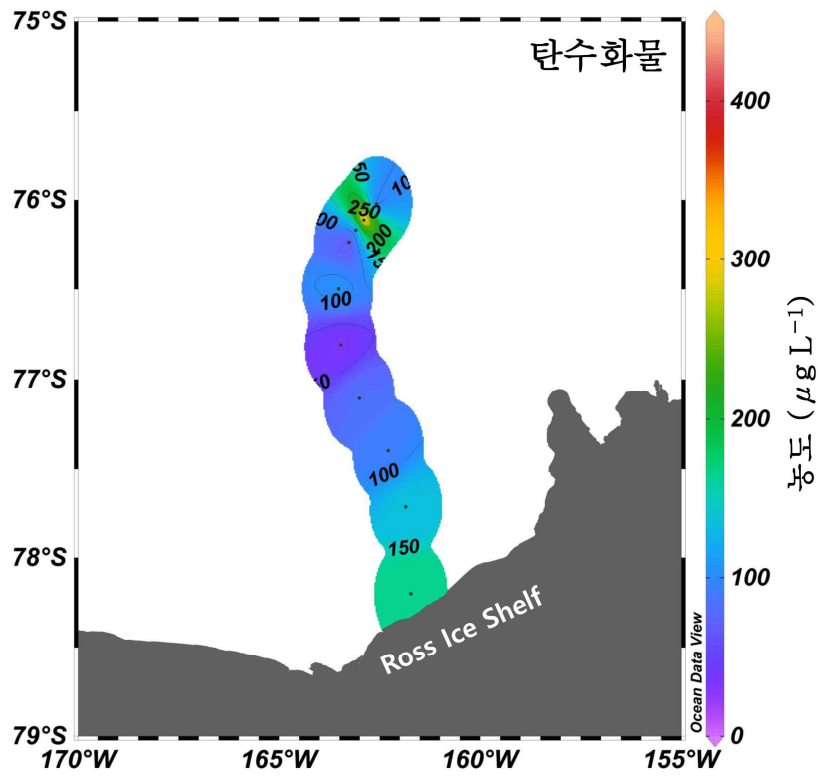
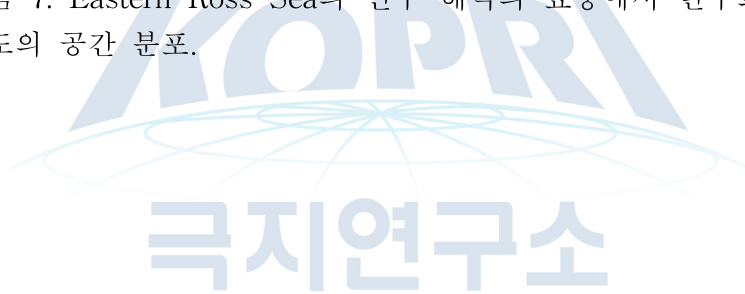


그림 7. Eastern Ross Sea의 연구 해역의 표층에서 탄수화물 농도의 공간 분포.



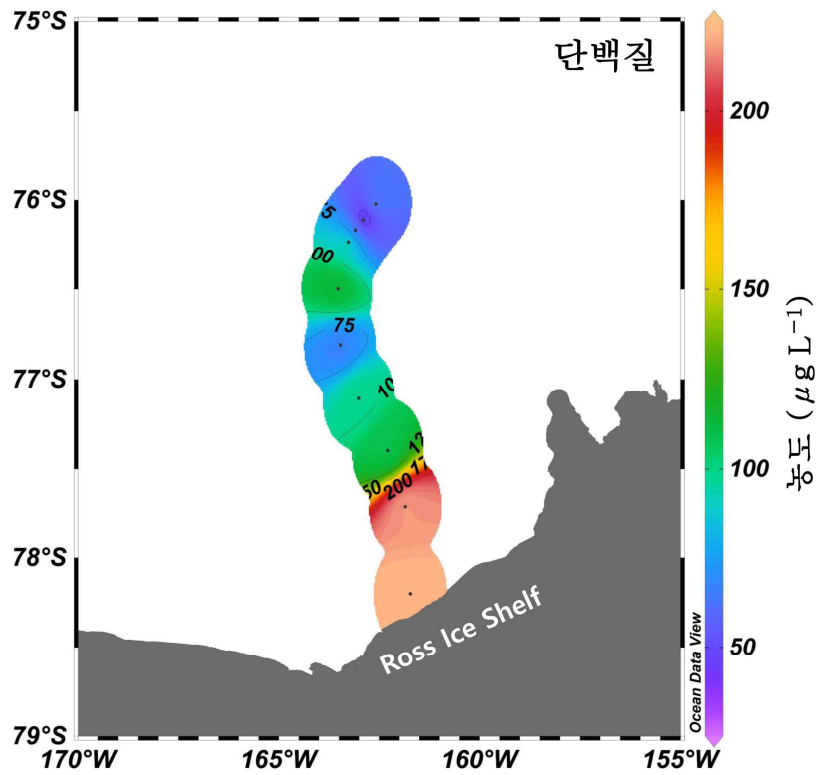
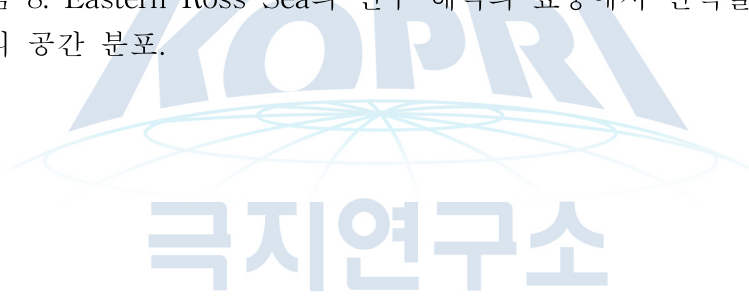


그림 8. Eastern Ross Sea의 연구 해역의 표층에서 단백질 농도의 공간 분포.



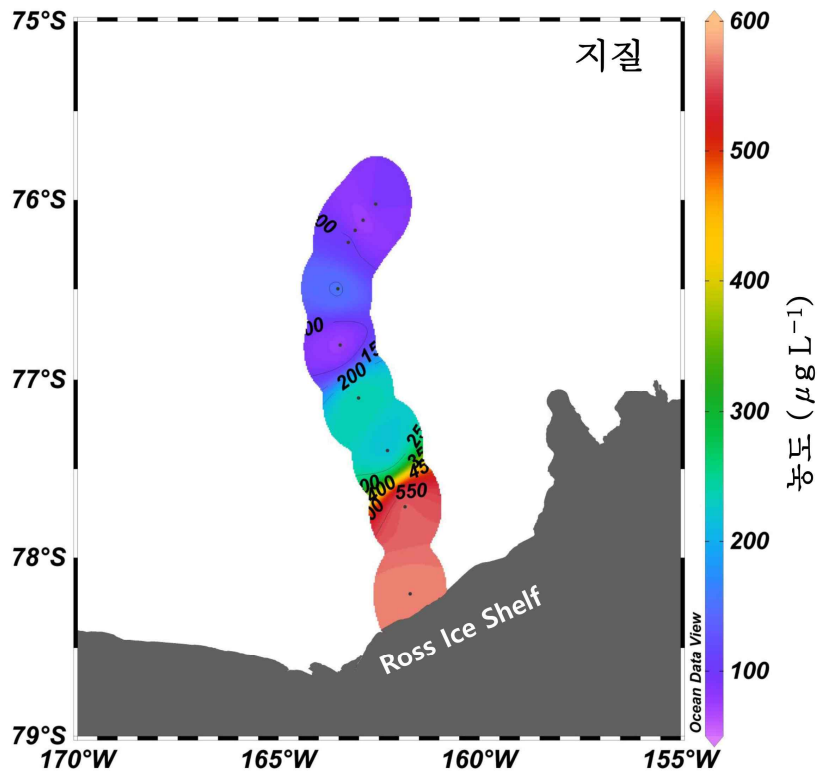
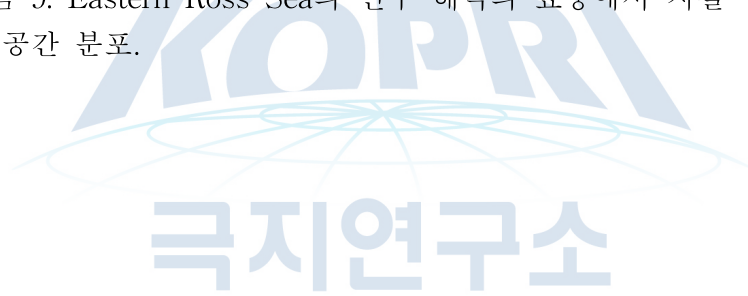


그림 9. Eastern Ross Sea의 연구 해역의 표층에서 지질 농도의 공간 분포.



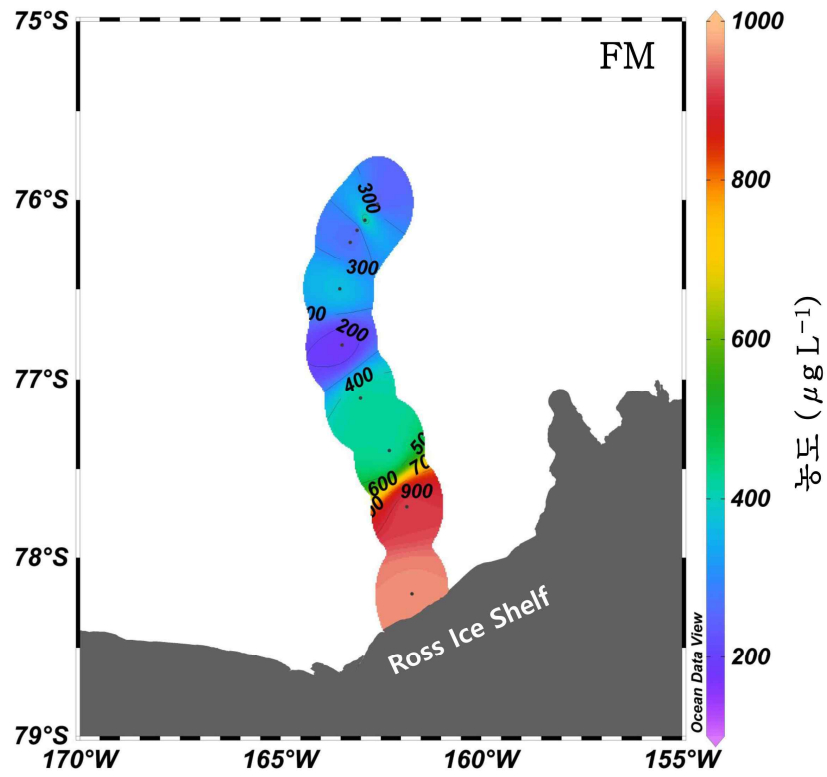
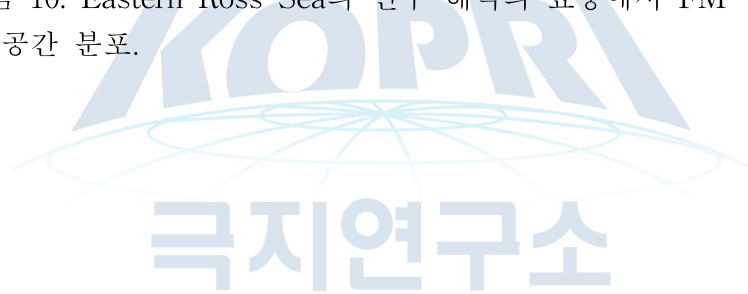


그림 10. Eastern Ross Sea의 연구 해역의 표층에서 FM 농도의 공간 분포.



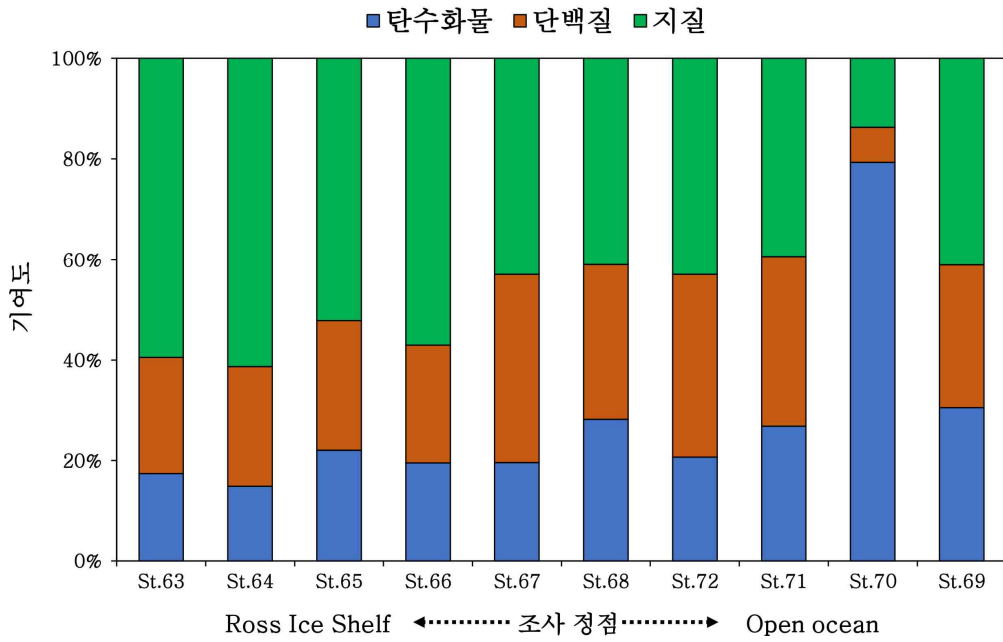


그림 11. Eastern Ross Sea의 연구 해역의 표층에서 FM에 대한 탄수화물, 단백질, 지질의 기여도.



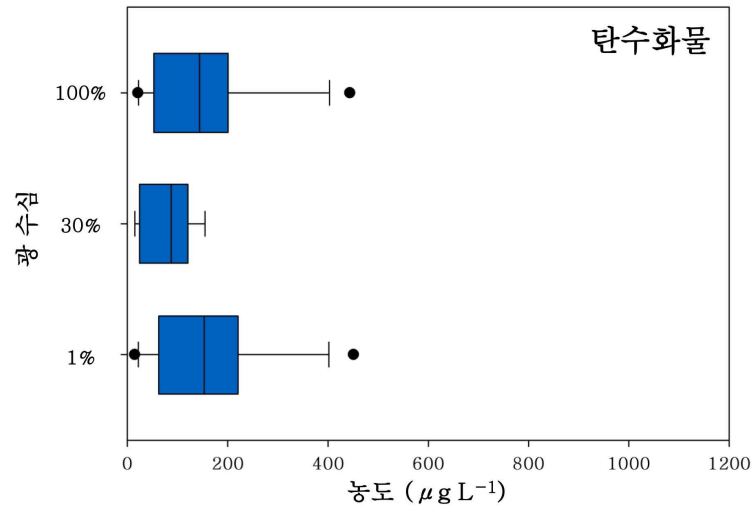


그림 12. Western Ross Sea의 연구 해역에서 유광층 내 탄수화물 농도의 수직 분포.



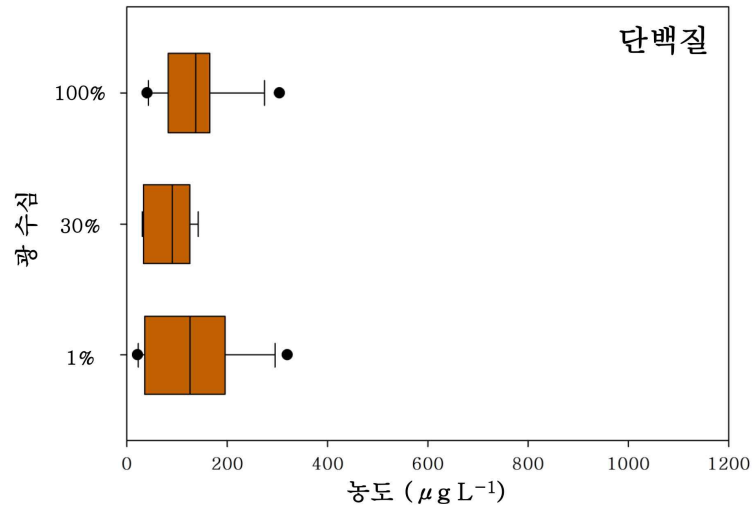


그림 13. Western Ross Sea의 연구 해역에서 유광층 내 단백질 농도의 수직 분포.



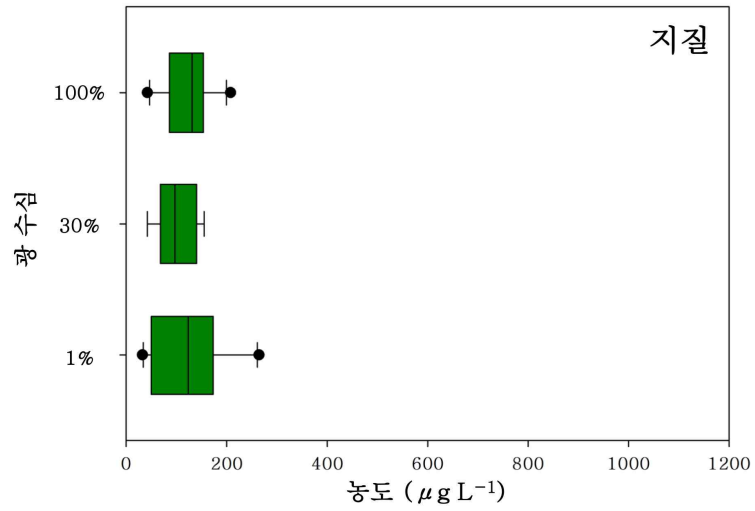


그림 14. Western Ross Sea의 연구 해역에서 유광층 내 지질 농도의 수직 분포.



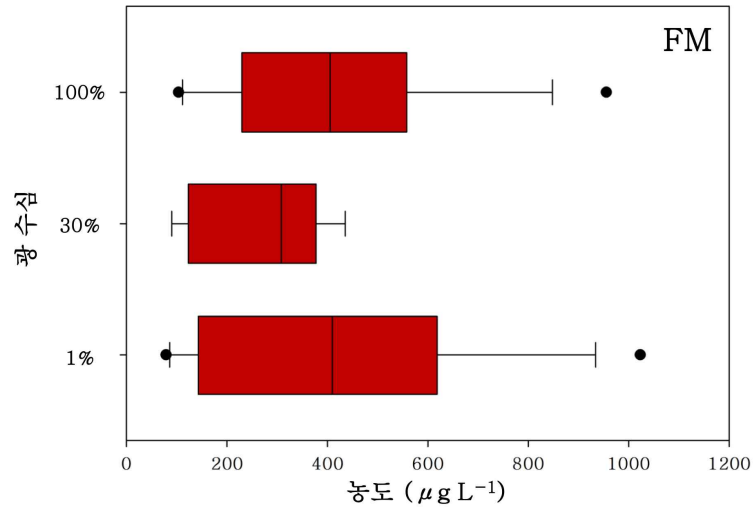


그림 15. Western Ross Sea의 연구 해역에서 유광층 내 FM 농도의 수직 분포.



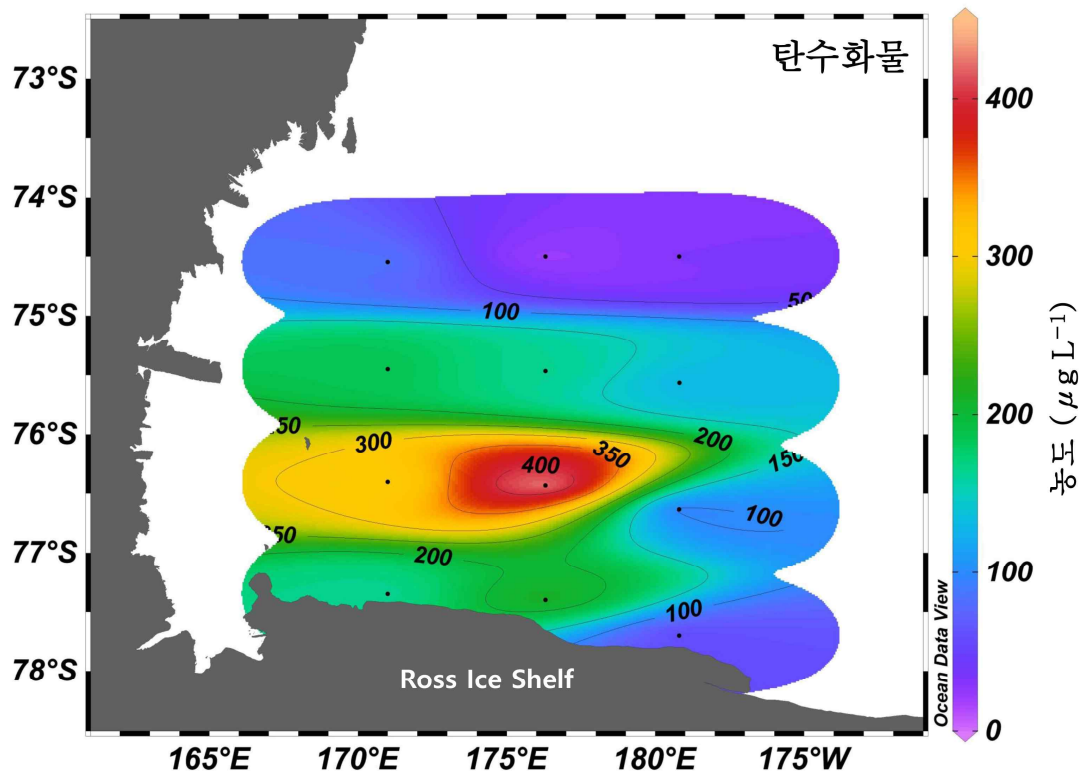


그림 16. Western Ross Sea의 연구 해역에서 탄수화물 농도의 공간 분포 (유광층 평균).



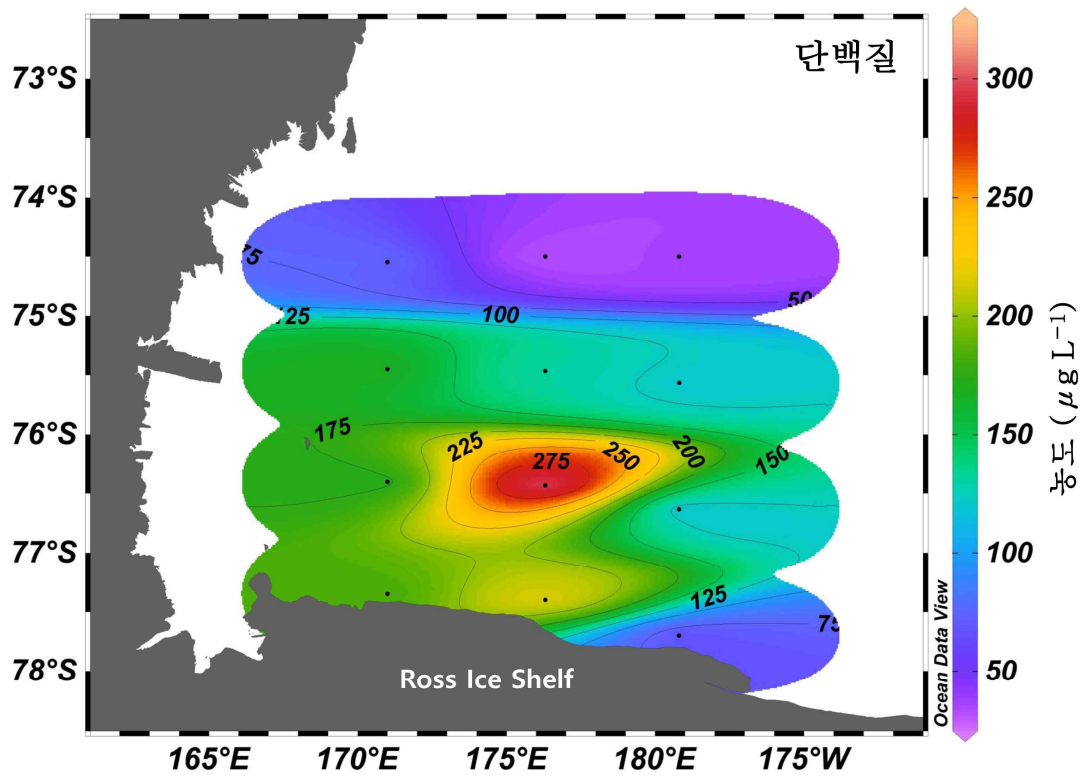


그림 17. Western Ross Sea의 연구 해역에서 단백질 농도의 공간 분포 (유광층 평균).



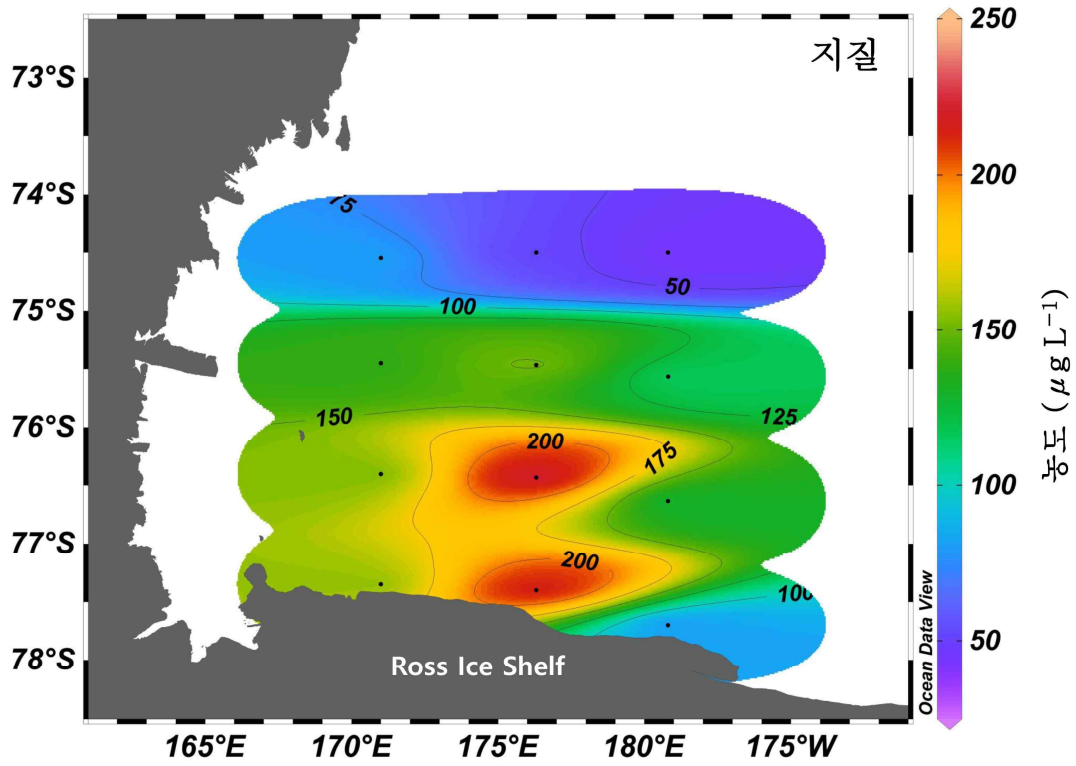


그림 18. Western Ross Sea의 연구 해역에서 지질 농도의 공간 분포 (유광층 평균).



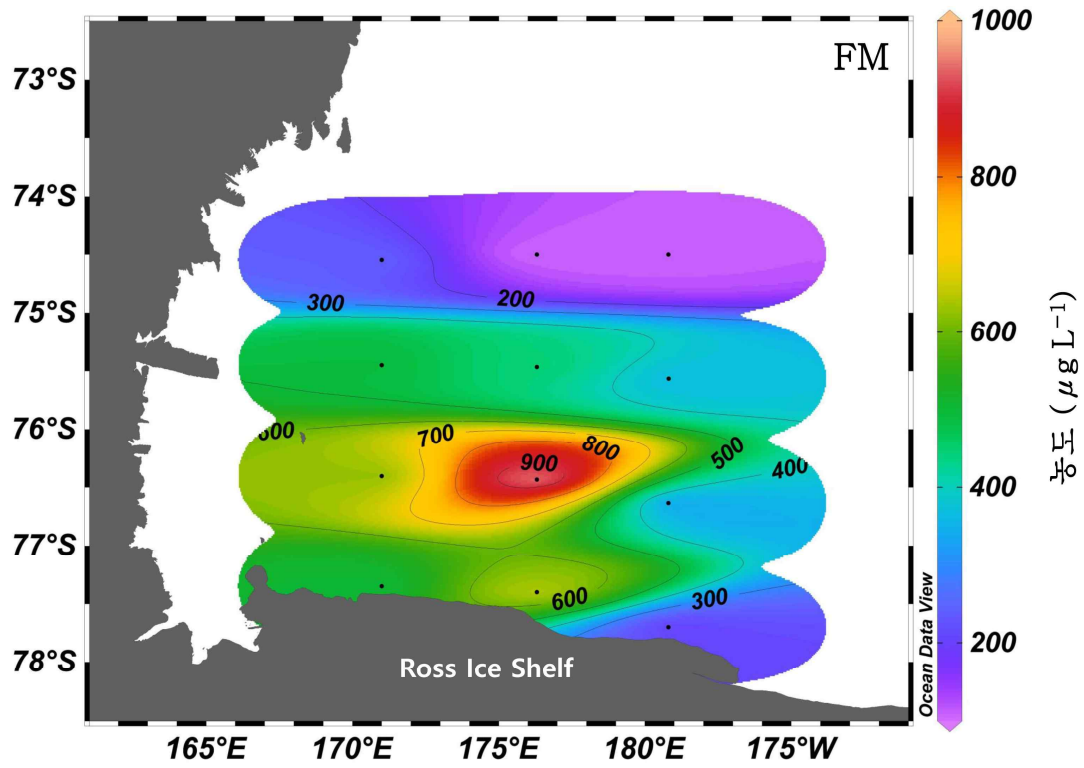


그림 19. Western Ross Sea의 연구 해역에서 FM 농도의 공간 분포 (유광층 평균).



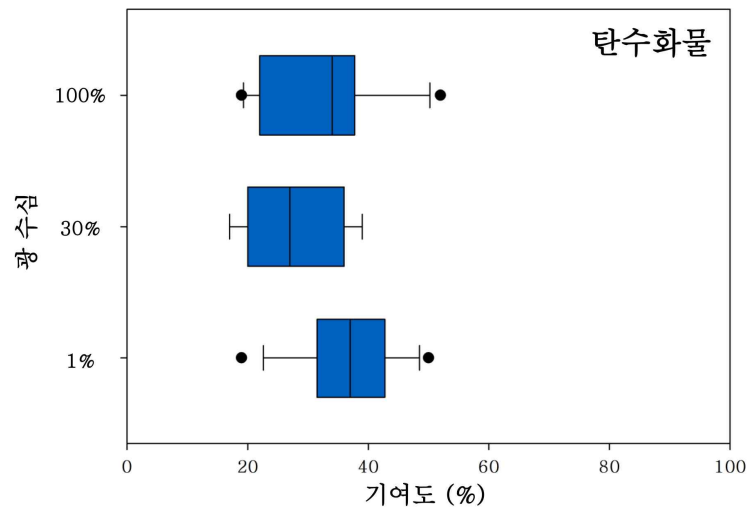


그림 20. Western Ross Sea의 연구 해역에서 유광층 내 FM에 대한 탄수화물 기여도의 수직 분포.



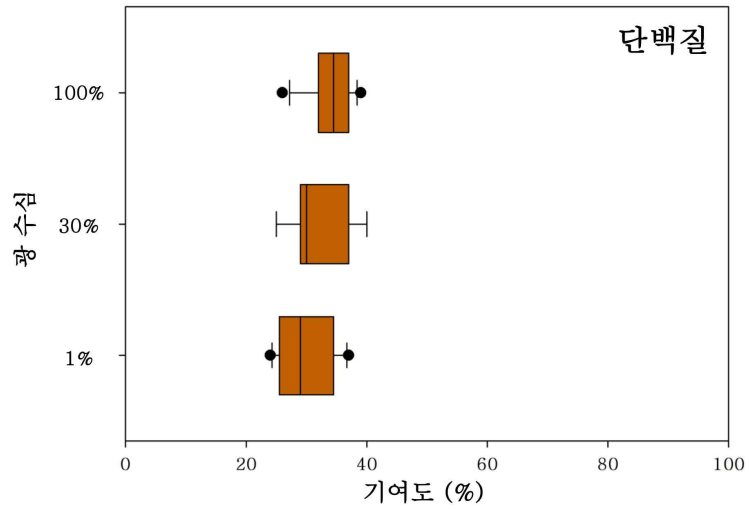


그림 21. Western Ross Sea의 연구 해역에서 유광층 내 FM에 대한 단백질 기여도의 수직 분포.



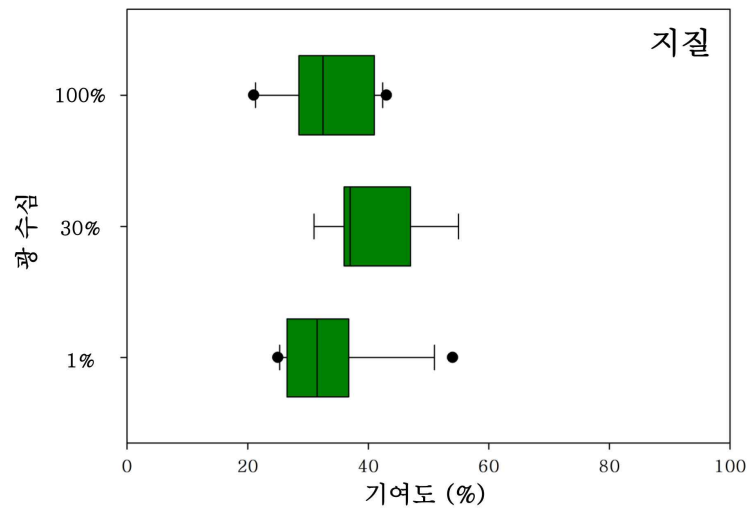


그림 22. Western Ross Sea의 연구 해역에서 유광층 내 FM에 대한 지질 기여도의 수직 분포.



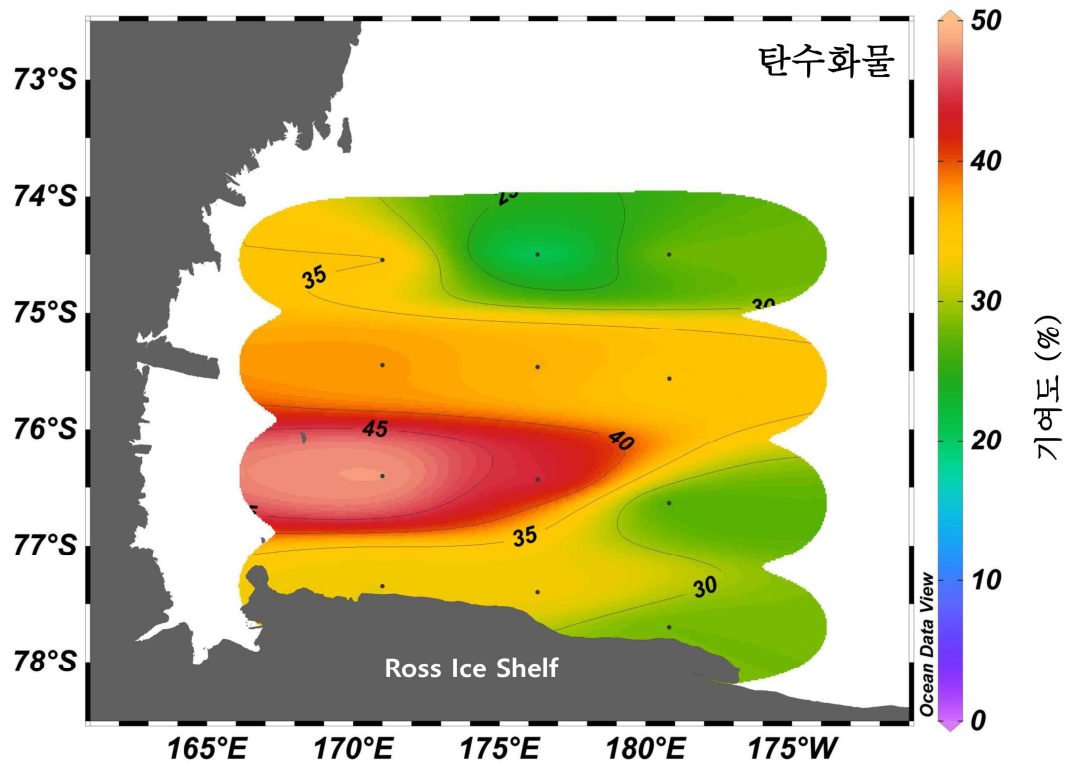


그림 23. Western Ross Sea의 연구 해역에서 FM에 대한 탄수화물 기여도의 공간 분포 (유광층 평균).



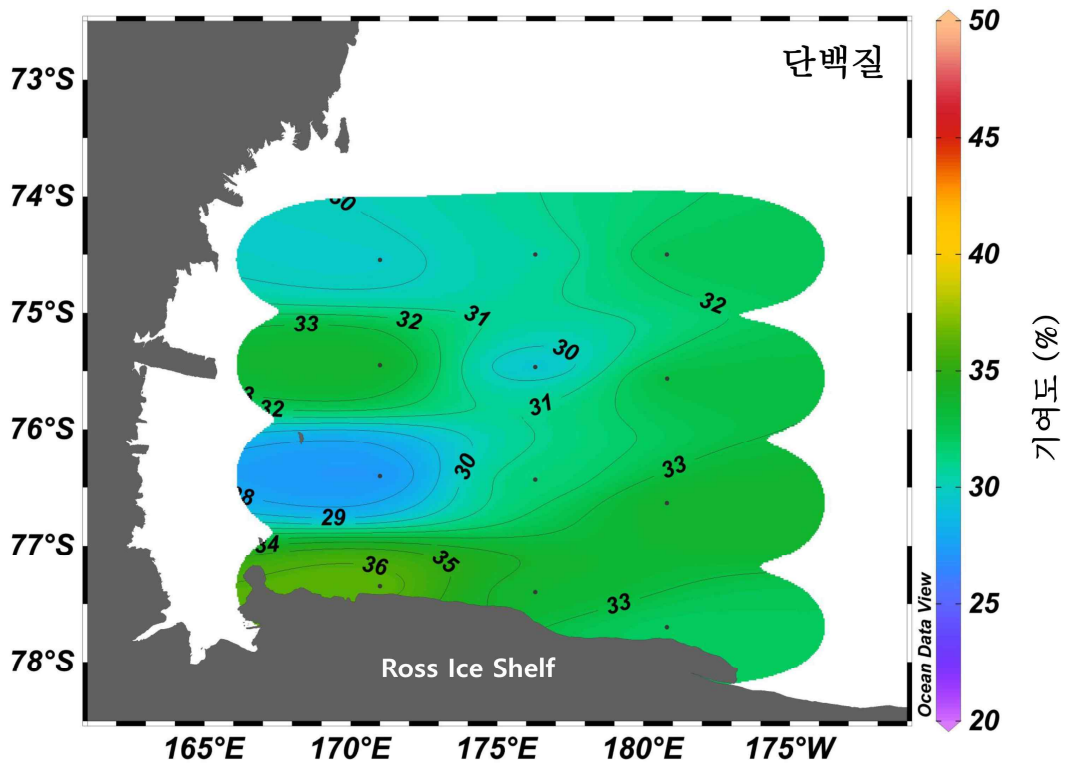


그림 24. Western Ross Sea의 연구 해역에서 FM에 대한 단백질 기여도의 공간 분포 (유광층 평균).



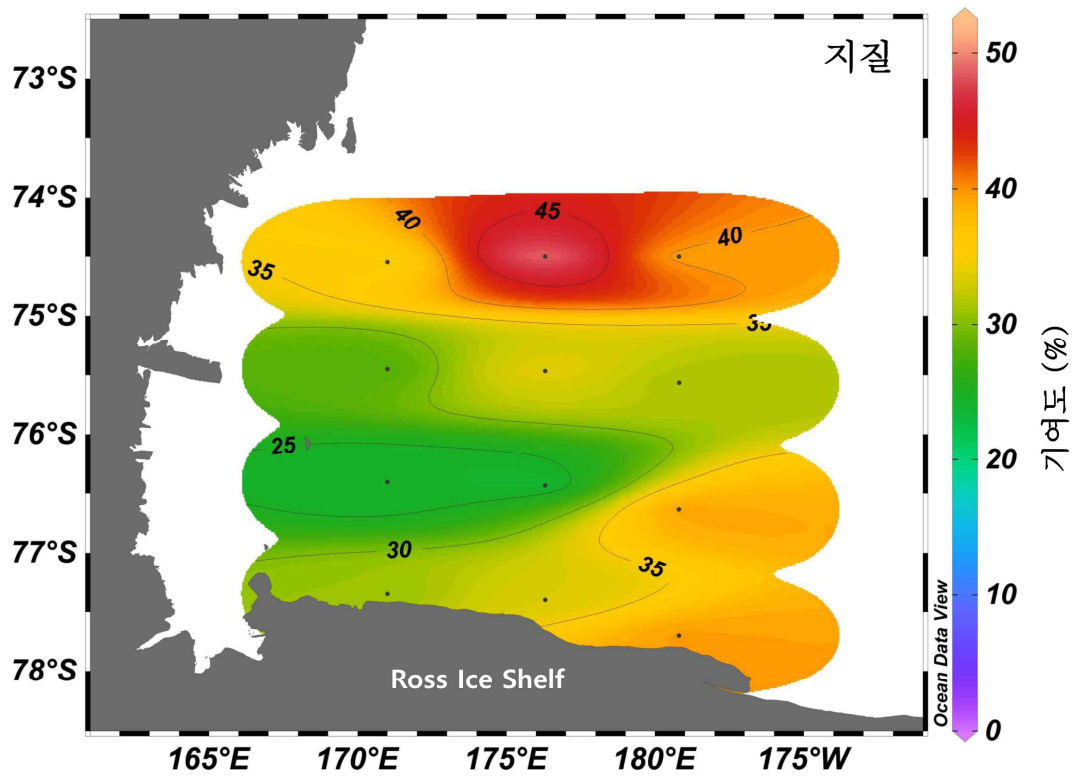


그림 25. Western Ross Sea의 연구 해역에서 FM에 대한 지질 기여도의 공간 분포 (유광층 평균).



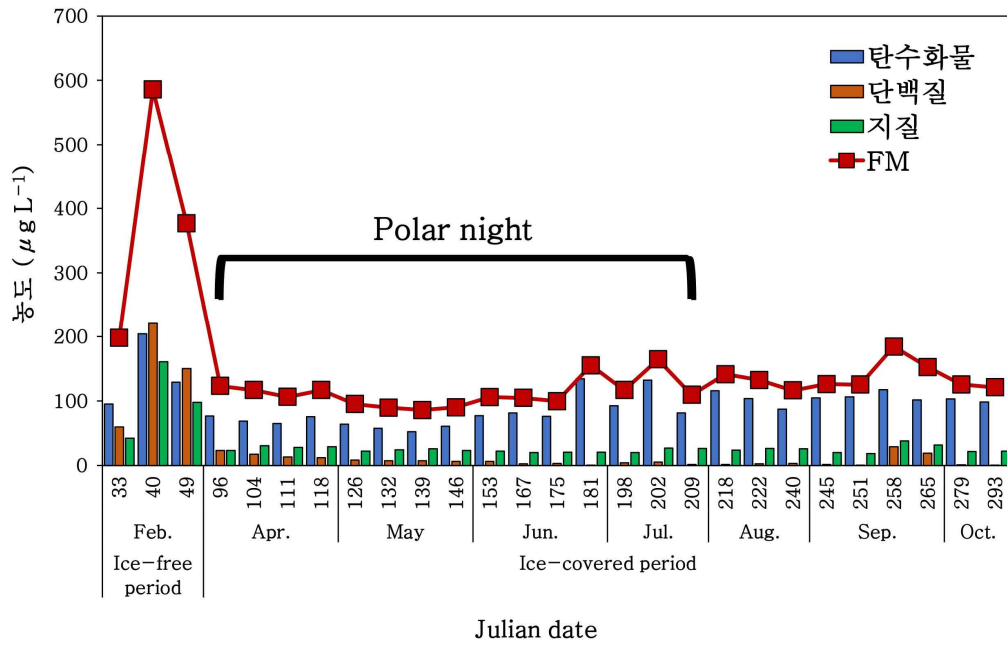


그림 26. Western Ross Sea의 Terra Nova Bay에 위치한 JBS의 표층에서 탄수화물, 단백질, 지질, FM 농도의 시계열 분포 (2015).



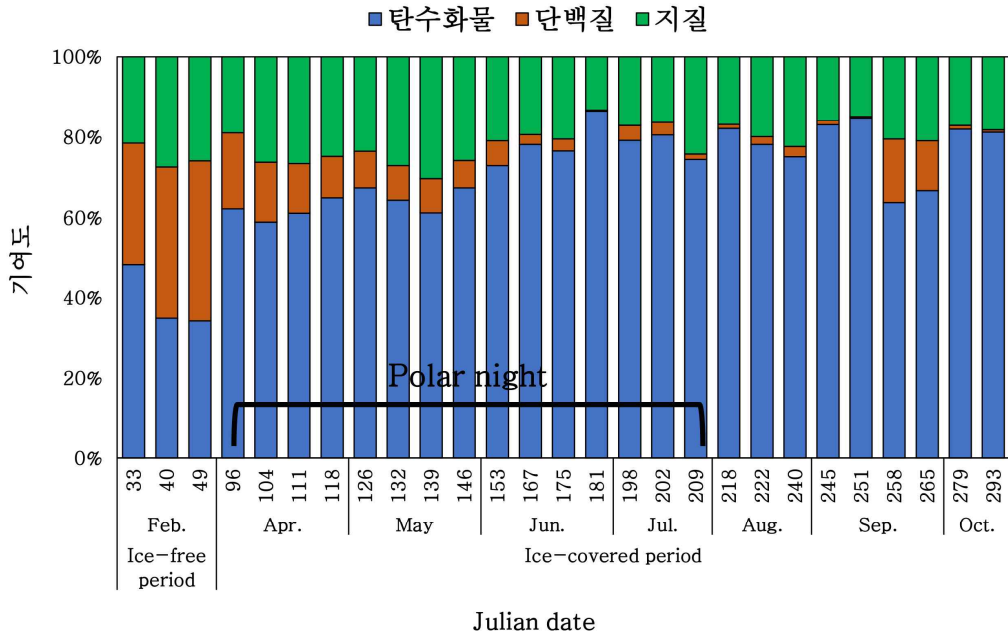


그림 27. Western Ross Sea의 Terra Nova Bay에 위치한 JBS의 표층에서 FM에 대한 탄수화물, 단백질, 지질 기여도의 시계열 분포 (2015).



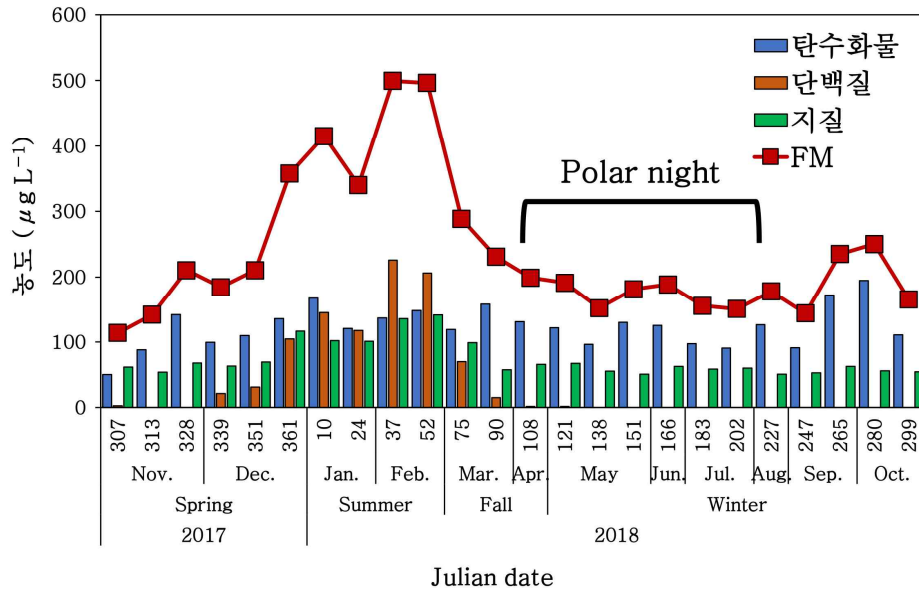


그림 28. Western Ross Sea의 Terra Nova Bay에 위치한 JBS의 표층에서 탄수화물, 단백질, 지질, FM 농도의 시계열 분포 (2017-2018).



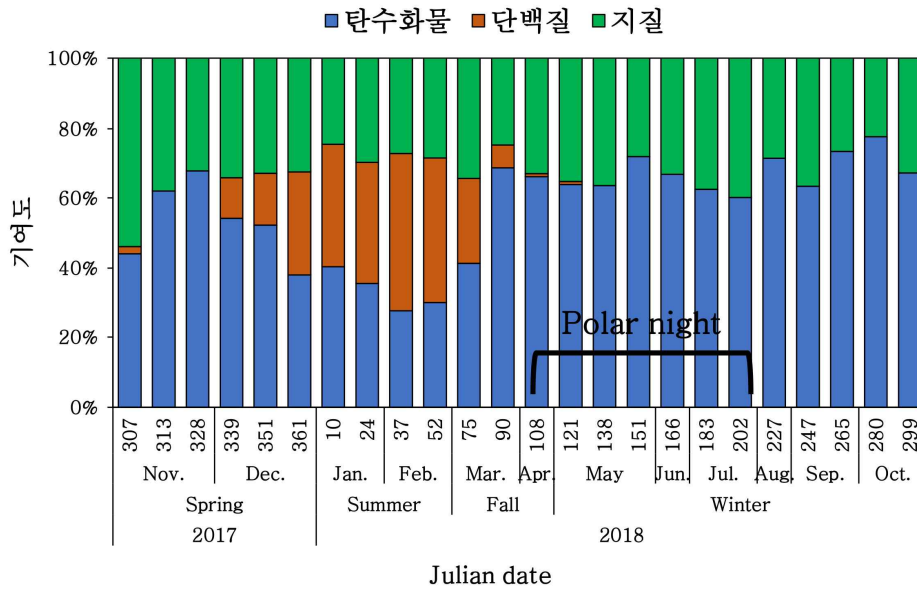


그림 29. Western Ross Sea의 Terra Nova Bay에 위치한 JBS의 표층에서 FM에 대한 탄수화물, 단백질, 지질 기여도의 시계열 분포 (2017-2018)



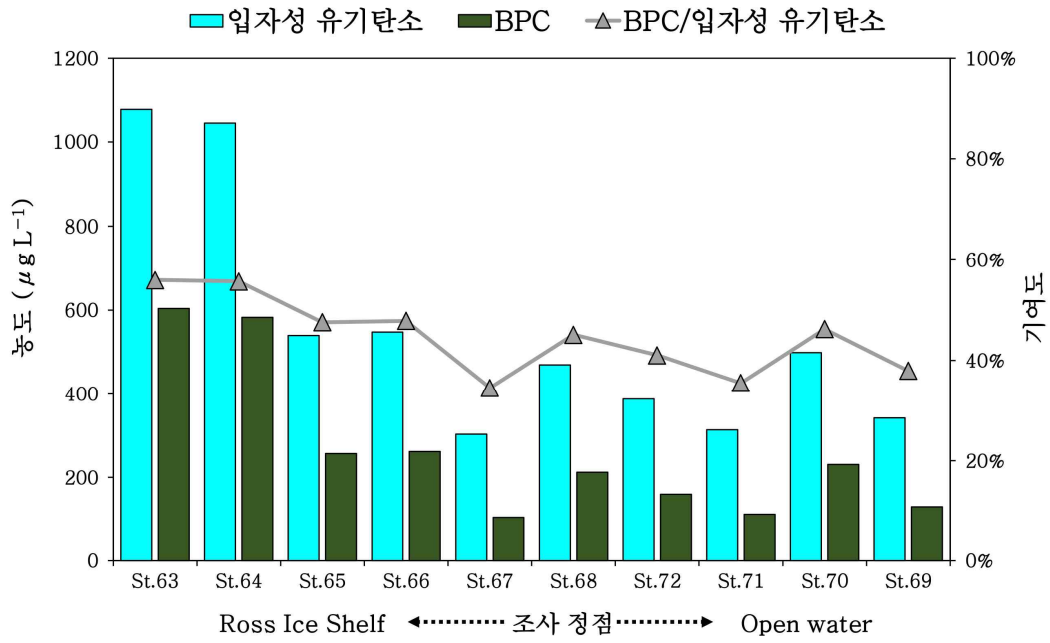


그림 30. Eastern Ross Sea의 연구 해역 표층에서 입자성 유기탄소와 BPC 농도.



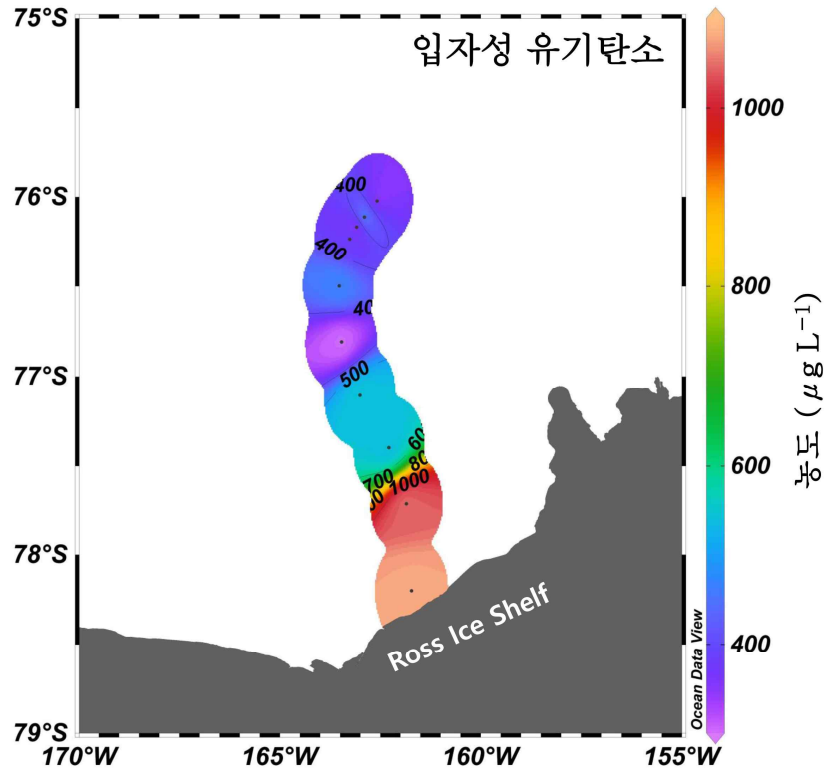
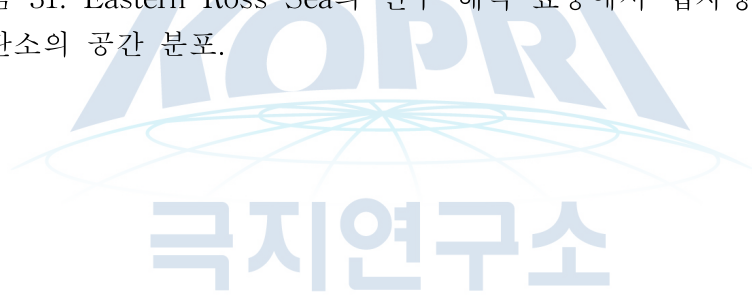


그림 31. Eastern Ross Sea의 연구 해역 표층에서 입자성 유기탄소의 공간 분포.



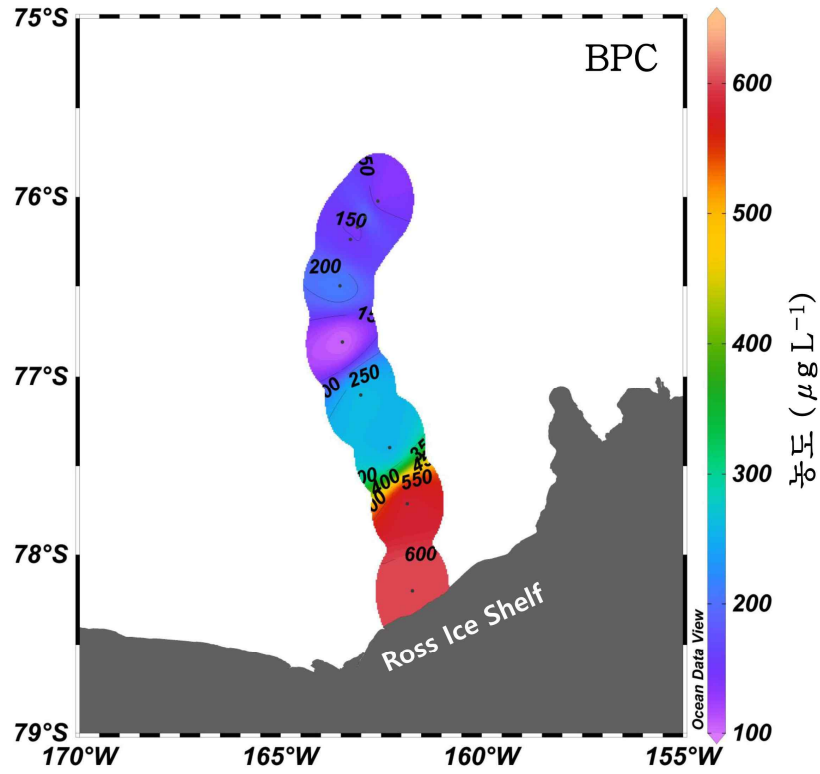
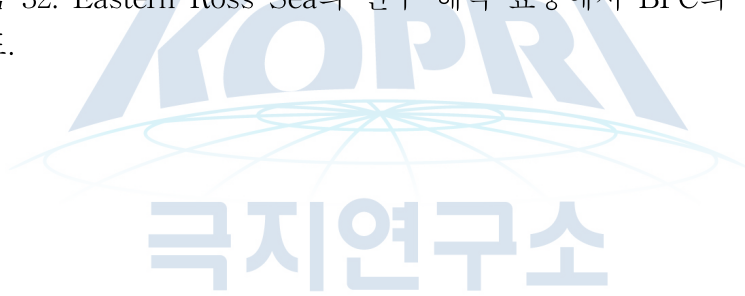


그림 32. Eastern Ross Sea의 연구 해역 표층에서 BPC의 공간 분포.



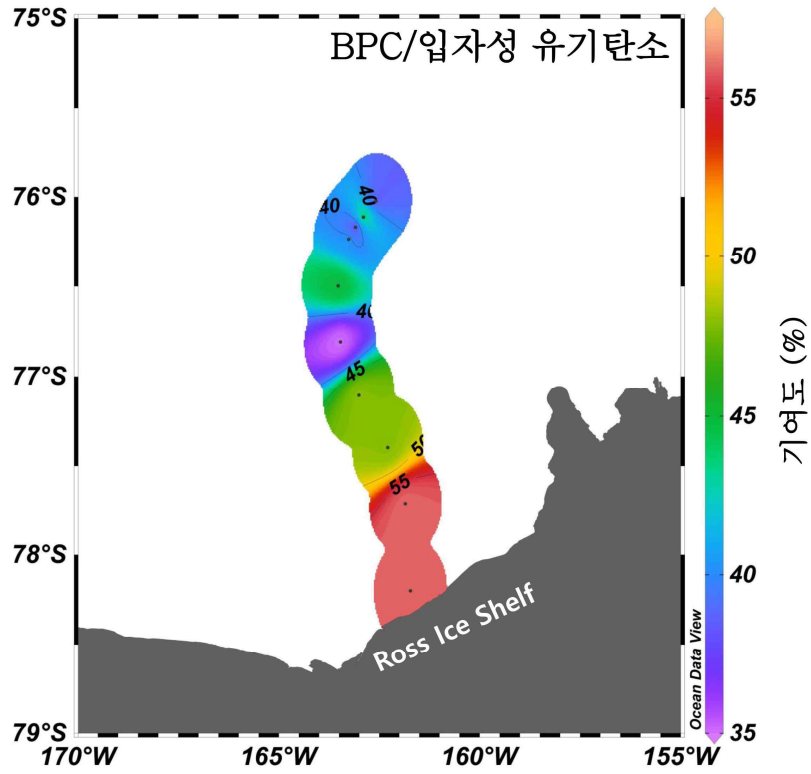
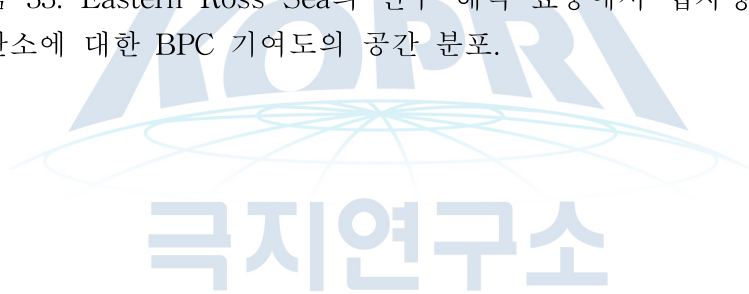


그림 33. Eastern Ross Sea의 연구 해역 표층에서 입자성 유기탄소에 대한 BPC 기여도의 공간 분포.



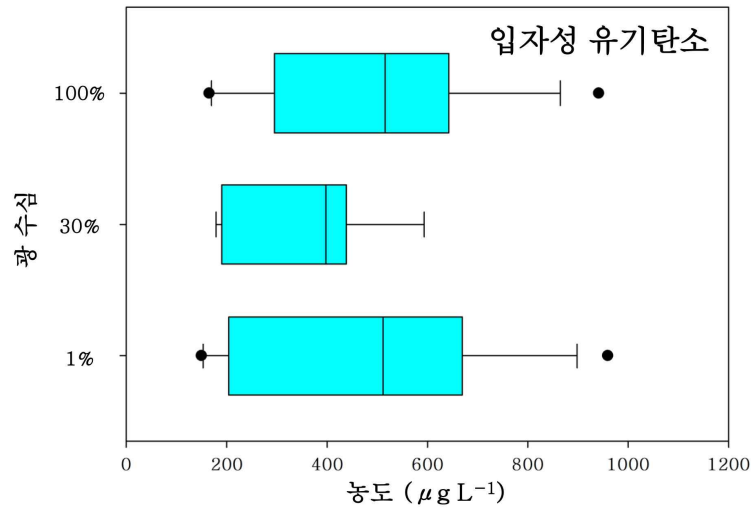


그림 34. Western Ross Sea의 연구 해역에서 유광층 내 입자성 유기탄소 농도의 수직 분포.



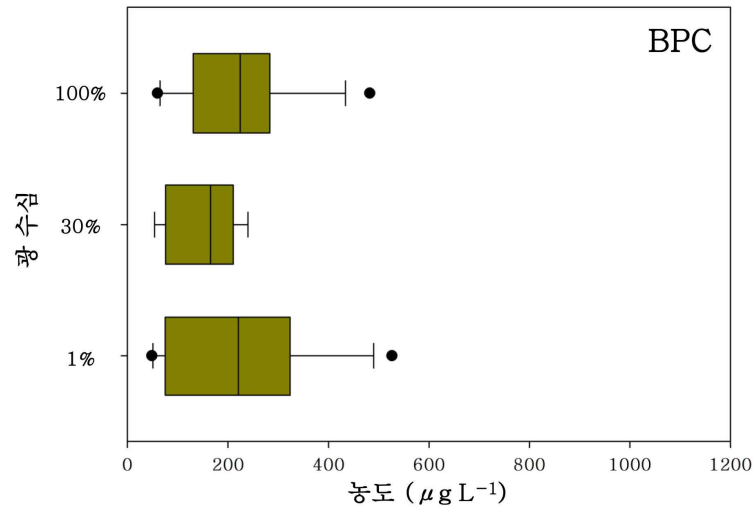


그림 35. Western Ross Sea의 연구 해역에서 유광층 내 BPC 농도의 수직 분포.



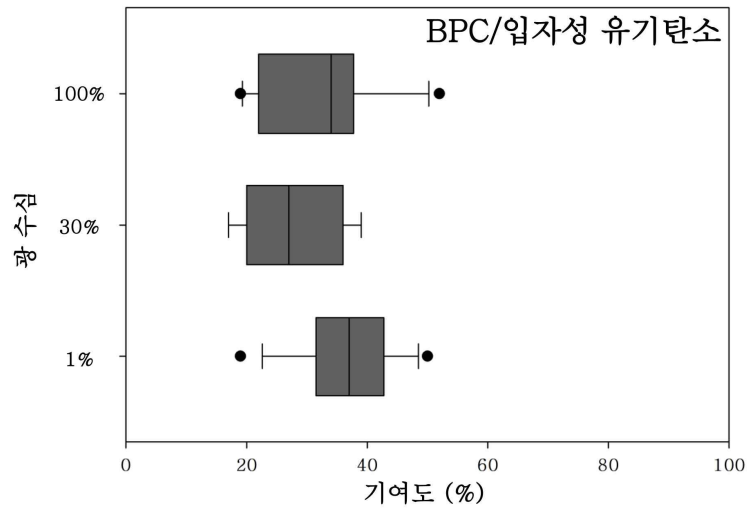


그림 36. Western Ross Sea의 연구 해역에서 유광층 내 입자성 유기탄소에 대한 BPC 기여도의 수직 분포.



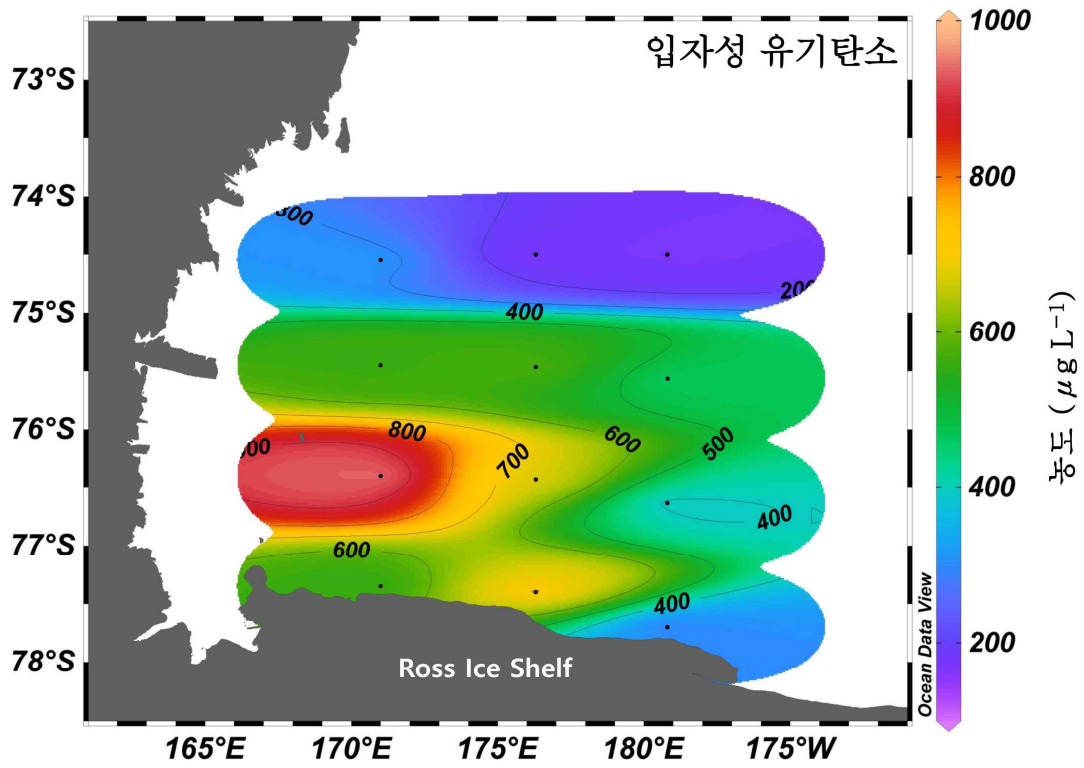
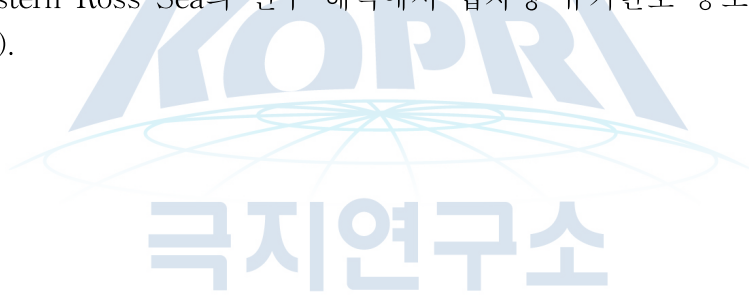


그림 37. Western Ross Sea의 연구 해역에서 입자성 유기탄소 농도의 공간 분포 (유광층 평균).



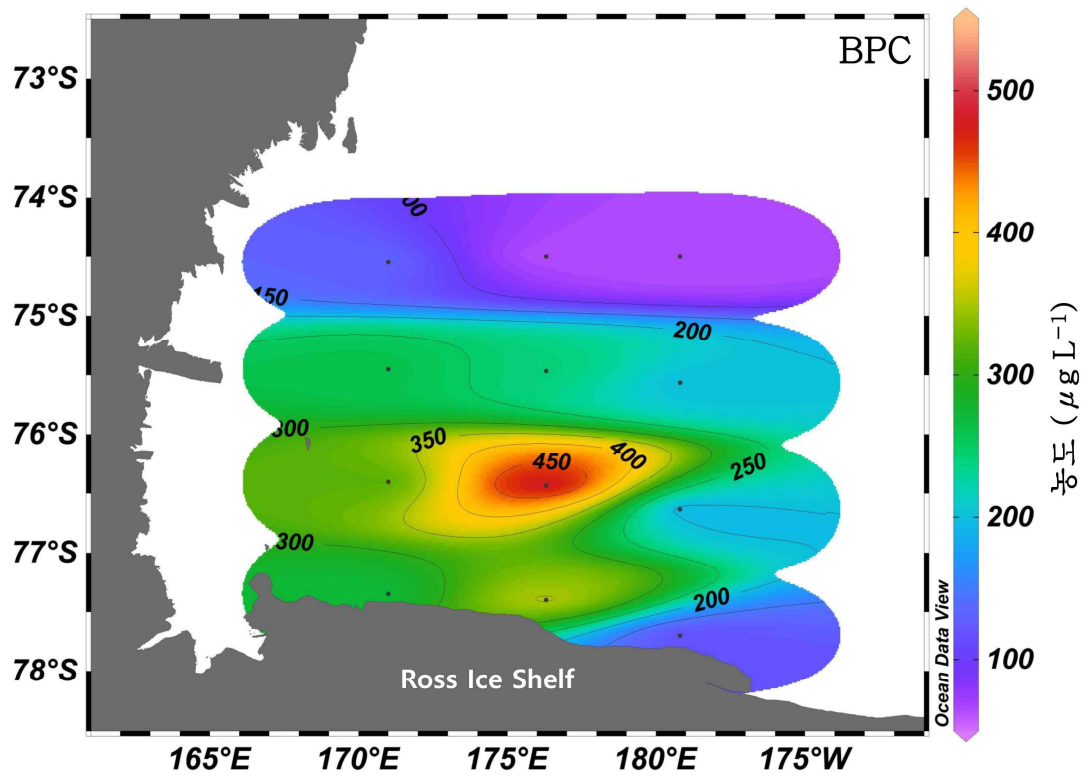


그림 38. Western Ross Sea의 연구 해역에서 BPC 농도의 공간 분포 (유광층 평균).



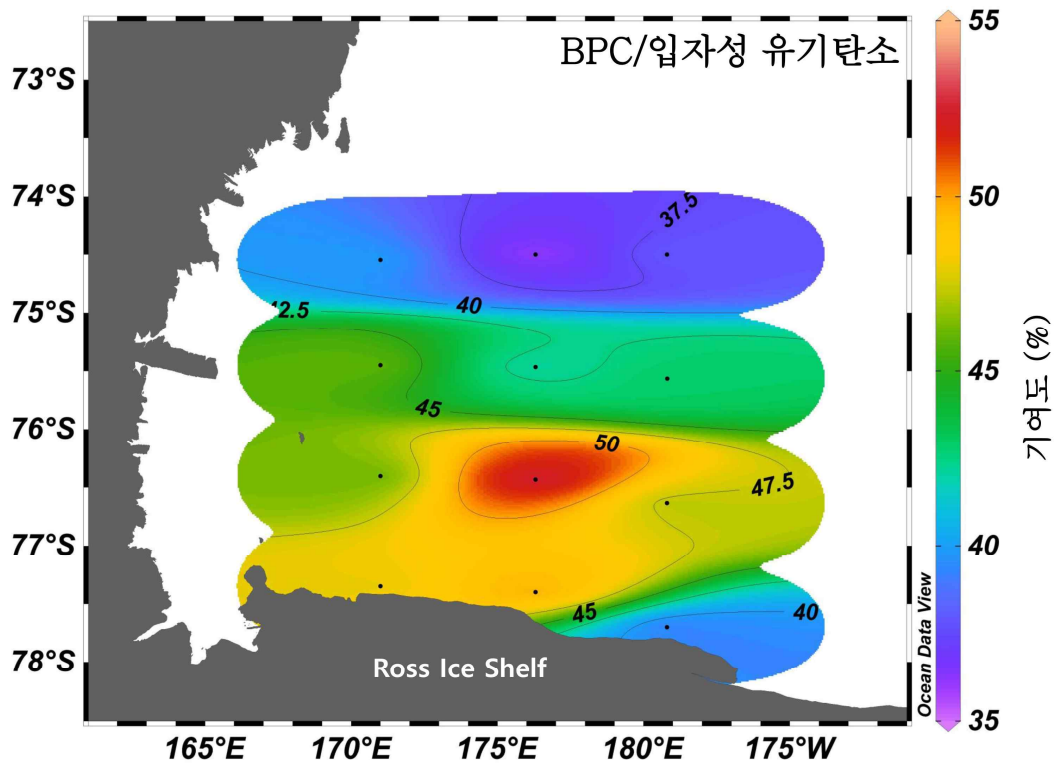
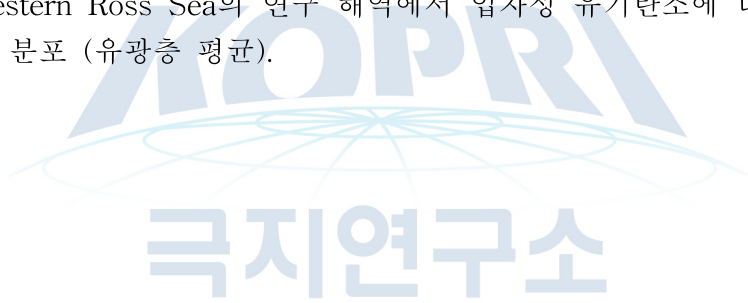


그림 39. Western Ross Sea의 연구 해역에서 입자성 유기탄소에 대한 BPC 기여도의 공간 분포 (유광층 평균).



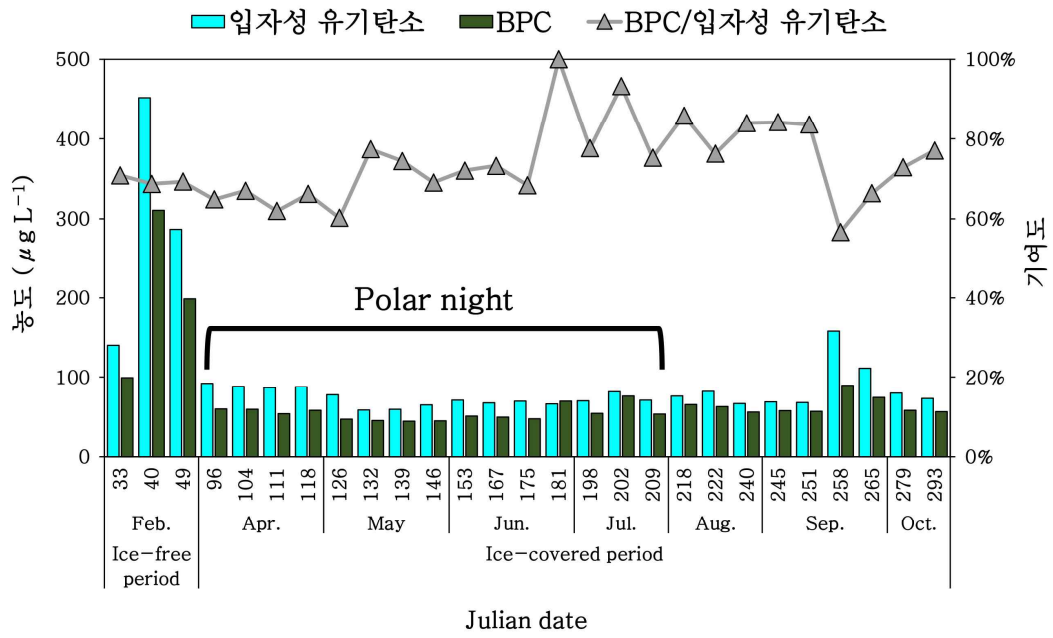


그림 40. Western Ross Sea의 Terra Nova Bay에 위치한 JBS의 표층에서 입자성 유기탄소, BPC 농도 및 입자성 유기탄소에 대한 BPC 기여도의 시계열 분포 (2015)



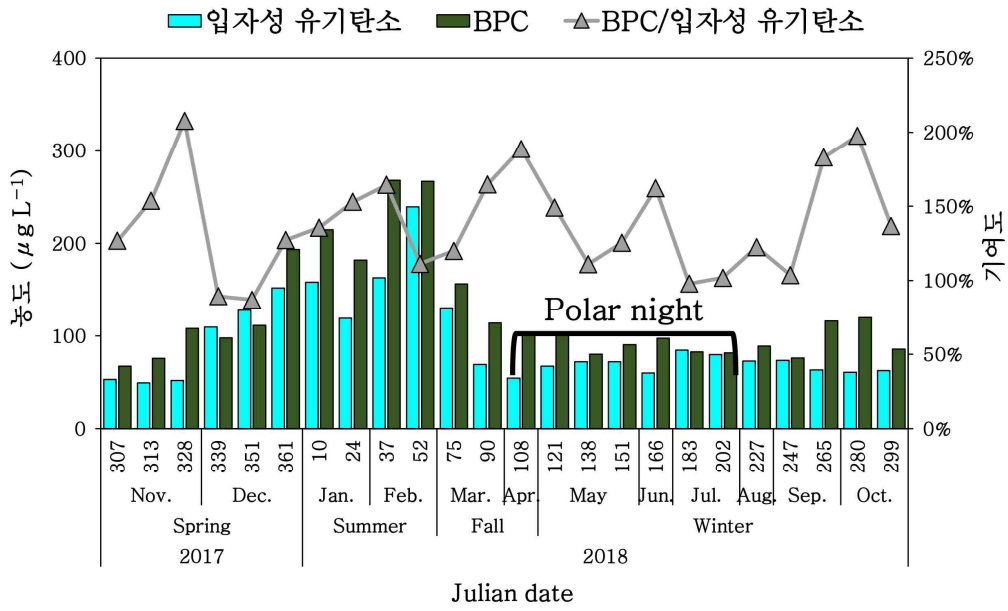


그림 41. Western Ross Sea의 Terra Nova Bay에 위치한 JBS의 표층에서 입자성 유기탄소, BPC 농도 및 입자성 유기탄소에 대한 BPC 기여도의 시계열 분포 (2017-2018).



제 4절. 고찰

1. 식물플랑크톤의 거대 분자 조성

Eastern Ross Sea의 연구 해역에서 식물플랑크톤의 거대 분자 조성은 st.70에서 관측된 높은 탄수화물 농도를 제외하면, 탄수화물, 단백질, 지질, FM 농도는 ice edge에 가까워질수록 높은 값을 보였으며 (그림 6), Ross Ice Shelf에 가까워질수록 FM에 대한 지질의 비율이 높게 나타났다 (그림 11). Western Ross Sea의 open water에서 또한 Ross Ice Shelf 근처에서 높은 탄수화물, 단백질, 지질, FM 농도가 관측되었다. 그리고 Western Ross Sea의 open water에서 측정된 거대 분자 중 지질의 기여도가 가장 높게 나타났다. 본 연구에서의 높은 지질 농도와 기여도는 과거 Ross Sea에서 높은 단백질의 농도와 기여도를 보고한 이전 논문과 상반된 결과였다 (Smith et al., 1996; Fabiano et al., 1996; Fabiano and Pusceddu, 1998; Fabiano et al., 1999). 해양에서 식물플랑크톤의 거대 분자 조성을 조절하는 요인은 빛 (Fiala and Oriol, 1990; Suárez and Marañón, 2003; Lee et al., 2009), 수온 (Pirt, 1975; Fiala and Oriol, 1990; Kakinuma et al., 2006; Doney et al., 2012), 영양염 (Fabiano et al., 1993; Biddanda and Benner, 1997; Lee et al., 2009; Kim et al., 2015), 그리고 미량원소 (Sedwick et al., 2000, 2011; Zhu et al., 2016) 등으로 알려져 있다. 풍부한 빛은 식물플랑크톤의 성장률을 증가시킬 수 있다고 보고되었지만 지나치게 강한 빛 조건은 식물플랑크톤의 단백질 함량을 감소시킬 수 있다고 보고되었으며 (Fiala and Oriol, 1990; Suárez and Marañón, 2003; Lee et al., 2008, 2009), 충분하지 않은 빛 조건은 식물플랑크톤의 탄수화물과 지질의 함량을 증가시킬 수 있다고 보고되었다 (Friedman et al., 1991; Suárez and Marañón, 2003). 남극해에서 혼합층 수심과 혼합 기간에 따라 식물플랑크톤이 이용이 가능한 빛 환경이 달라질 수 있다 (Smith and Jones, 2015). Mitchell and Holm-Hansen (1991)의 연구는 West Antarctic Peninsula에서 혼합층 수심이 40m 이상일 때 식물플랑크톤의 성장과 생물량 축적에 제한을 받을 것이라 제안했다. 따라서 본 연구에서 나타난 식물플랑크톤의 높은 지질 조성은 깊은 혼합층 수심에 의한 제한된 빛 환에 의해 야기되었을 가능성이 있다. 식물플랑크톤의 군집 조성 또한 식물플랑크톤의 거대 분자 조성 차이를 야기할 수 있다 (Brown et al., 1991). 특히 남극의 주요 식물플랑크톤 군집 중 하나인 diatom은 cytoplasmic lipid droplet와 같은 저장 생산물에 존재하는 탄소의 양을 변화시킴으로써 지질을 축적할 수 있다고 보고되었다 (Ditullio et al., 1996; Fabiano et al., 2000). 연구 해역인 Ross Sea는 일반적으로 무기 영양염의 제한이 일어나지 않는다고 알려져 있기 때문에 주요 식물플랑크톤 군집 조성은 빛 조건과 같은 환경요인에 의해 본 연구에서 높은 지질 조성이 나타났을 가능성이 있다.

Western Ross Sea의 Coastal region에서 2015년과 2017-2018년의 백야 기간과 극야 기간에 식물플랑크톤의 거대 분자 농도와 조성의 뚜렷한 차이를 보였다. 탄수화물, 단백질, 지질 농도는 2월에 최댓값을 보이는 반면 해빙으로 덮힌 극야 기간 동안 가장 낮은 농도를 보였다. 극야 기간 동안 탄수화물과 지질 농도는 비교적 일정하게 유지된 반면 단백질 농도는 극야 기간 동안 거의 측정되지 않았다. 백야 기간 동안 각각의 거대 분자 농도가 높게 나타나는 이유는 빛 조건이 개선된 결과일 수 있다. 질소가 풍부한 환경에서 식물플랑크톤은 광합성을 하는 동안 세포 내에서 활발하게 단백질을 축적할 수 있다고 알려져 있다 (Fabiano et al., 1993; Lee et al., 2009). 빛은 식물플랑크톤의 일차생산과 거대 분자 조성에 영향을 미치는 환경 요인들 중에서 해빙의 유무에 따라 계절적으로 가장 큰 변화를 보인다. 본 연구 해역은 2월 이전에는 해

빙으로 덮여 있었고 3월에 해빙이 없어지기 시작한다. 앞선 바와 같이, 과도한 빛 조건은 식물 플랑크톤의 단백질 합성을 제한할 수 있다 (Suárez and Marañón, 2003; Lee et al., 2008, 2009). 그러나 2월에 관찰된 단백질의 증가는 식물플랑크톤이 성장 기간동안 단백질 합성을 저해할 정도의 강한 빛 조건에 노출되지 않았음을 보여준다. 해빙으로 덮인 극야 기간 동안 식물 플랑크톤 극도로 낮은 빛 조건에 놓여진다. Handa (1969)의 연구는 해양 diatom인 *Skeletonema costatum*을 어두운 환경에서 18일간 배양한 후에 생화학적인 조성에 변화가 있었다고 보고했다. 빛을 차단한 상태의 초기에 *Skeletonema costatum*은 호흡을 위해 non-structure 탄수화물, glucose, β -1,3-glucan을 이용했으며 mannan과 pentosan과 같은 cell-structure를 구성하는 탄수화물은 이용하지 않았다 (Handa, 1969). 이들은 생존을 위해 즉각적으로 이용 가능한 탄수화물을 소비한 단백질을 소비한다. 극야 기간 동안 지질은 다른 두 거대 분자와는 달리 유의미한 변동을 보이지 않았다. Smayda and Mitchell-Innes (1974)의 연구는 *Skeletonema costatum*이 빛이 차단된 조건하에 20 °C에서 1-4주 동안 살아 남았지만 2 °C에서 24주간 생존했다고 보고했다. 또한 Bunt and Lee (1972)의 연구는 남극 해빙 미세조류 중 두 종류의 diatom이 어두운 빛 조건과 함께 -1.8 °C에서 90일간 생존했다고 보고했다. 이는 어두운 환경에서 낮은 온도가 diatom의 생존에 중요한 역할을 할 수 있음을 나타낸다.

많은 유형의 식물플랑크톤은 생활사에서 휴지기를 갖는다고 알려져 있다 (Ellegaard and Ribeiro, 2018). 일부 휴지기는 유성생식과 관련되어 있으며 다른 일부는 성장기가 끝날 무렵의 환경 조건의 변화에 따라 휴면 포자와 같은 무성 생식의 형태를 띤다. Diatom의 휴면포자는 살아있는 세포와 구별되는 형태학적인 특성을 가지고 있으며 더 규화되어 있다 (Oku and Kamatani, 1995; McQuoid and Hobson, 1996). 또한 휴면 포자에 에너지 저장 물질로서 탄수화물과 지질을 축적하는 것으로 알려져 있으며 중성지질의 형태로 다량의 유기탄소를 축적하고 있다 (Oku and Kamatani, 1999). 본 연구에서 극야 기간 동안 단백질에 비해 높은 탄수화물과 지질의 농도와 기여도는 어두운 환경 아래에서 이 두 거대 분자를 주요 에너지원으로 이용하여 생존하고 있다는 것을 암시한다.

백야 기간과 극야 기간 사이에 나타나는 거대 분자의 조성 차이는 식물플랑크톤 우점 군집의 차이로 인해 야기될 수 있다 (Moal et al., 1987; Rivkin and Voytek, 1987; Harrison et al., 1990; Kim et al., 2018). Kim et al. (2018)은 남극 Amundsen Sea에서 *P. antarctica*의 우점으로 인해 탄수화물 농도와 기여도의 증가를 보고했다. 일반적으로 본 연구 해역인 Terra Nova Bay에서 나타나는 식물플랑크톤 주요 군집은 diatom으로 보고되었다 (Arrigo et al., 2003; Fonda Umani et al., 2005; Mangoni et al., 2019, Park et al., 2021).

백야 기간에서 극야 기간으로 시간이 지남에 따라 세 거대 분자 중 단백질이 가장 빠르게 감소했다. 본 연구에서 관찰된 단백질 농도의 현저한 감소는 Amundsen Sea에서 유광층에서 심층으로 가라앉는 유기물의 거대 분자 조성 변화와 유사했다 (Kim et al., 2018). 단백질은 다른 화합물보다 더 쉽게 소비될 수 있는 다양한 아미노산으로 구성되어 있다고 보고되었다 (Handa and Tominaga, 1969; Dawson and Liebezeit, 1982; Fabiano et al., 1995; Danovaro et al., 2000). 또한 탄수화물은 다른 구성 성분들에 비해서 침강 입자 속에서 분해가 제한적으로 일어난다고 보고되었다 (Ittekkot et al., 1982; Liebezeit, 1984; Fabiano et al., 1993; Danovaro et al., 2000; Kim et al., 2018; Hedges et al., 2001). 백야 기간 동안 생성된 단백질의 약 5%와 탄수화물의 약 60%가 극야 기간 동안 남아있었으며 지질은 비교적 높은 비율 (25%)로 남아있었다. 지질은 긴 극야 기간 동안 대사율을 낮추는 식물플랑크톤의 생존에 중요한 에너지원으로 작용할 수 있다. Bunt et al (1966)의 연구는 낮은 수온이 *Fragilaria sublinearis*의 신진

대사를 감소시켜 암 호흡량이 3°C에서 10°C에서의 50% 미만으로 감소했다고 보고했다. Diatom은 낮은 온도에서의 낮은 신진대사 활성화 하에 생존하기 위해 저장된 에너지 생성물을 사용할 수 있다고 보고 되었다 (Palmisano and Sullivan, 1982). 따라서 세포 체내에서 탄수화물과 지질을 유지하는 것은 긴 극야 기간 동안 식물플랑크톤의 중요한 생존 전략으로 보인다.

2. 식물플랑크톤의 입자성 유기탄소 및 BPC 농도

Eastern Ross Sea와 Western Ross Sea의 연구 해역에서 Ross Ice Shelf와 인접한 정점에서 입자성 유기탄소 및 BPC의 높은 농도와 입자성 유기탄소에 대한 BPC의 높은 비율이 관측되었다. 입자성 유기탄소에 대한 BPC의 높은 비율은 입자성 유기탄소의 기원이 식물플랑크톤 기원임을 가리킨다 (Pusceddu et al., 1996; Fabiano et al., 1997; Danovaro et al., 2000). 최근 인공위성 자료와 입자성 유기탄소 알고리즘으로 Ross Ice Shelf 근처 해역에서 높은 입자성 유기탄소 농도가 보고되었다 (Chen et al., 2021). 또한 인공위성 자료를 바탕으로 Ross Ice shelf 근처에서 eddy와 같은 물리적인 영향으로 인한 low-salinity high-biomass lens가 발견되었다 (*P. antarctica* 우점) (Li et al., 2017). 과거 현장 조사와 모델링 연구는 남극 대륙붕 해역의 표층에 유입되는 철이 다양한 경로로 유입된다는 것을 보고했다 (Boyd et al., 2012; Fitzwater et al., 2000; Measures et al., 2012; Raiswell et al., 2006; Sedwick et al., 2011). 겨울철의 convective mixing, 얇은 저서로부터의 유입, Circumpolar Deep Water의 침범과 해빙과 빙하가 녹은 물의 유입 등이 주요한 철 공급 프로세스로 알려져 있다 (McGillicuddy et al., 2015). 본 연구에서 입자성 유기탄소, BPC의 높은 농도는 Ross Ice Shelf 근처에서 여러 가지 물리화학적인 요인의 상호작용으로 인한 식물플랑크톤의 생물량 증가의 결과일 것이라 생각한다. Western Ross Sea의 Coastal region에서 2015년과 2017-2018년의 백야 기간과 극야 기간에 입자성 유기탄소와 BPC 농도는 2월에 가장 높은 농도를 보였다. 이것은 앞서 언급한 백야 기간에 식물플랑크톤의 성장에 유리한 환경 조건이 형성된 결과로 보인다. 백야 기간 동안 입자성 유기탄소에 대한 BPC의 높은 기여도는 입자성 유기탄소의 기원이 식물플랑크톤임을 가리킨다. 이 결과는 육상기원의 유기물 공급이 거의 없는 남극해의 특성을 잘 반영하는 것으로 보인다. 또한 높은 BPC 기여도는 극야 기간 동안 존재하는 입자성 유기탄소 또한 식물플랑크톤 기원이라는 것을 보여준다.

제 4장 연구개발목표 달성도 및 대외 기여도

제 1절. 연구개발목표 및 달성도

성과목표	세부목표		달성 주요 내용	달성도 (%)
1. 식물플랑크톤의 탄소 및 질산염 흡수율과 입자성 유기 물질의 생화학 조성에 대한 해역별 특성 사전 연구	1-1	남극해 해역별 식물플랑크톤의 탄소 및 질산염 흡수율에 관한 사전조사	남극해 해역별 식물플랑크톤의 탄소 및 질산염 흡수율에 관한 과거 및 기존확보자료 분석	100
	1-2	남극해 해역별 입자성 유기 물질의 수집에 따른 생 화학조성 변동에 관한 사전조사	남극해 해역별 입자성 유기 물질의 수집에 따른 생 화학조성 변동에 관한 과거 및 기존확보자료 분석	100
	1-3	과거 및 기존확보자료 분석을 바탕으로 생물학적 탄소 펌프에 의한 유기탄소 심층수송량 파악에 관한 사전조사	과거 및 기존확보자료 분석을 바탕으로 식물플랑크톤 기반의 생물학적 탄소 펌프에 의한 유기탄소 심층수송량 파악	100
2. 남극해에서 식물플랑크톤을 구성하는 거대 분자 농도의 시·공간 분포와 조성 별 기여도 분석	1-1	남극해 해역별 식물플랑크톤 POM의 Proteins, Lipids, Carbohydrates 농도 파악	남극해 해역별 식물플랑크톤 POM의 Proteins, Lipids, Carbohydrates 농도 측정	100
	1-2	남극해 식물플랑크톤 POM을 구성하는 거대 분자 조성 별 기여도 파악	남극해 식물플랑크톤 POM을 구성하는 거대 분자 조성 별 기여도 계산	100
	1-3	남극해 극야 기간에 POM의 biochemical composition 거동 파악	남극해 백야 및 극야 기간에 POM의 biochemical composition 측정	100
3. 남극해에서 식물플랑크톤에 의한 침강 유기탄소의 입자 특성 파악	1-1	남극해 유광층 내 POM의 Proteins, Lipids, Carbohydrates 조성 파악	남극해 유광층 내 POM의 Proteins, Lipids, Carbohydrates 조성 측정	100
	1-2	남극해 유광층 내 입자성 유기물에 대한 biopolymeric carbon (BPC)의 기여도 파악	남극해 유광층 내 입자성 유기물에 대한 biopolymeric carbon (BPC)의 기여도 계산	100

제 2절. 관련분야에의 기여도

1. 해빙/해양 생물연구 분야

- 가. 남극 Ross Sea의 식물플랑크톤의 거대 분자 조성, 입자성 유기탄소 농도, BPC 농도 측정 결과는 현재의 기후변화에 따른 환경변화가 남극해 탄소 플럭스 변동성 파악에 이용 가능.
- 나. 남극 Ross Sea 유광층에 존재하는 입자성 유기탄소 및 BPC 농도를 파악함으로써 심층으로 제거되는 탄소량의 변동성에 대한 연구 수행 가능.
- 다. 식물플랑크톤의 체내 조성 분석을 통해 해빙/해양 환경요인과 일차생산자의 생리 상태 및 food quality 사이의 상관관계를 파악하고, 상위 영양단계에 미칠 영향 예측.
- 라. 남극 Ross Sea 해역에서 얻은 실측 자료는 인공위성을 이용한 원격 탐사 연구 시 calibration 자료로써 사용 가능



제 5장 연구개발결과의 활용 계획

제 1절. 학술적 파급 효과

1. 바다가 흡수하는 인간기원 이산화탄소의 절반가량이 전체 바다 면적의 20%인 남극해에서 일어나고 있으며 탄소 저감 역할의 중심에 있는 식물플랑크톤에 대한 연구는 국제적으로 다양하게 수행되고 있음.
2. 남극해에서 중요 일차생산자인 식물플랑크톤의 생태학적, 생리학적인 연구는 앞으로의 남극 기후변동이 해양생태계에 미치는 영양학적인 평가 등 앞으로의 활용 방안은 다양함.
3. Ross Sea 유광층에서 입자성 유기 물질의 거대 분자 조성 분석을 통해 이곳에서 일어나고 있는 환경변화의 영향을 파악함으로써 앞으로 Ross Sea 해양생태계의 변동성을 파악하는데 기초적인 자료로 활용 가치가 높음.
4. Ross Sea 유광층에서 심층으로 침강하는 입자성 유기탄소의 거동을 파악함으로써 국제적으로 대두되고 있는 남극해 생물학적 펌프의 미래 변동 연구에 대한 중요한 기반 자료로 활용 가치가 높음.
5. 기후변화에 따른 해양 유기탄소의 변동에 맞춰 대기 및 해양 관리 정책 마련의 기반 자료로 활용 가능.

제 2절. 경제적 파급 효과

1. Ross Sea에서 식물플랑크톤의 거대 분자 조성 데이터베이스를 구축하여 관련 분야 연구에 기여할 수 있음
 2. 지금까지 잘 이용되지 않은 새로운 연구기법을 도입함으로써 유사분야의 연구를 활성화시킬 수 있을 것으로 기대됨.
 3. 식물플랑크톤의 거대 분자 조성 연구는 관련 분야에 적용가능 및 해양산업의 육성.
 4. 남극해 장기 해양 연구 수행에 대한 국제적 활동을 통해 장기적인 극지해 해양생태계 연구의 국제적 흐름에 동참하여 차세대 해양강국으로 도약 가능.
 5. 국제적 기후변화협약과 관련한 과학적 기초자료 제공 및 대응 방안을 모색하는 데 활용 가능.
 6. 기후변화 모니터링 및 극지의 환경변화를 연구하는데 중요한 자료로써 활용 가능.
 7. 극지에 대한 시공간적 자료 축적으로 공공의 과학적 활용 증대.
 8. 앞으로 발사될 인공위성 활용 잠재적 수요분야를 창출.
 9. 미개척 분야인 방대한 극지 해역에 대한 현장 조사를 수행하는 데는 많은 비용이 소요되지만, 인공위성을 자료를 활용하여 방대한 시·공간 자료를 획득한다면 많은 비용 절감 가능.
 10. 기후변화에 있어 중요한 유기탄소 순환의 주요 인자에 대한 측정 방법의 체계화를 통한 프로토콜 정립.
2. 이산화탄소 및 기후 관련 국제 협약에 필요한 과학적 기초 형성.

제 6장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

제 1절. 남극해 연구 현황

1. 서 남극해 해역에서 급격한 기후변화와 관련한 다양한 연구들이 수행되고 있음.
2. Pine Island Bay의 Thwaites 빙하 후퇴와 Getz Ice Shelf 주위 얼음의 부피 감소가 가속화되고 있다는 것을 밝힘.
3. 급격한 기후변화를 겪고 있는 서남극 반도의 기후가 cold-dry polar-type에서 warm-humid sub-Antarctic-type으로 변함에 따라 해양 생물 생산성 차후의 변화를 일으킬 것으로 제시됨.
4. 인공위성 데이터를 이용해 남극해에서의 총 일일 탄소 섭취율의 큰 계절적 변동성 제시.

제 2절. 식물플랑크톤 연구 현황

1. 식물플랑크톤의 크기를 분류하여 특성을 파악하는 다양한 연구가 이루어짐.
2. 남반구의 봄/여름 동안 남극 Ross Sea polynya 지역과 marginal ice zone 지역에서 작은 식물플랑크톤의 Chlorophyll-a와 일일 탄소 섭취율 기여도에 대한 연구가 이루어짐.
3. 해빙수의 유입이 증가가 규조류에서 크기가 작은 지중식물이 우점하는 환경으로 변화하는 것을 발견했고, 이는 상위 영양단계의 변화와 먹이그물의 변화를 일으킬 것으로 보고됨.
4. 해양환경이 온난해짐에 따라 작은 식물플랑크톤의 중요성이 증가할 것으로 예상.
5. 북극 Canada basin 지역에서 성층화 강화와 영양염 공급이 감소 됨에 따라 작은 식물플랑크톤의 기여도가 증가하는 것이 보고됨.
6. 따뜻하고 영양염이 부족한 해양환경에서는 picophytoplankton이 상대적으로 우점한다는 것이 보고됨.
7. 여러 해역에서 작은 식물플랑크톤의 암모늄 선호 현상이 발견됨.

제 7장 참고문헌

- Arrigo, K.R., Van Dijken, G., and Pabi, S. (2008). Impact of a shrinking Arctic ice cover on marine primary production. *Geophysical Research Letters* 35.
- Arrigo, K.R., and Van Dijken, G.L. (2004). Annual changes in sea-ice, chlorophyll a, and primary production in the Ross Sea, Antarctica. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* 51, 117-138.
- Arrigo, K.R., Worthen, D.L., and Robinson, D.H. (2003). A coupled ocean ecosystem model of the Ross Sea: 2. Iron regulation of phytoplankton taxonomic variability and primary production. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 108.
- Biddanda, B., and Benner, R. (1997). Carbon, nitrogen, and carbohydrate fluxes during the production of particulate and dissolved organic matter by marine phytoplankton. *Limnology and Oceanography* 42, 506-518.
- Bligh, E.G., and Dyer, W.J. (1959). A rapid method of total lipid extraction and purification. *Canadian journal of biochemistry and physiology* 37, 911-917.
- Borrione, I., and Schlitzer, R. (2013). Distribution and recurrence of phytoplankton blooms around South Georgia, Southern Ocean. *Biogeosciences* 10, 217-231.
- Boyd, P.W., Watson, A.J., Law, C.S., Abraham, E.R., Trull, T., Murdoch, R., Bakker, D.C., Bowie, A.R., Buesseler, K., and Chang, H. (2000). A mesoscale phytoplankton bloom in the polar Southern Ocean stimulated by iron fertilization. *Nature* 407, 695-702.
- Brown, M.S., Munro, D.R., Feehan, C.J., Sweeney, C., Ducklow, H.W., and Schofield, O.M. (2019). Enhanced oceanic CO₂ uptake along the rapidly changing West Antarctic Peninsula. *Nature Climate Change* 9, 678-683.
- Brown, P., Painting, S., and Cochrane, K. (1991). Estimates of phytoplankton and bacterial biomass and production in the northern and southern Benguela ecosystems. *South African Journal of Marine Science* 11, 537-564.
- Bunt, J., and Lee, C. (1972). Data on the composition and dark survival of four sea-ice microalgae. *Limnology and Oceanography* 17, 458-461.
- Bunt, J., Van H. Owens, O., and Hoch, G. (1966). Exploratory studies on the physiology and ecology of a psychrophilic marine diatom. *Journal of Phycology* 2, 96-100.
- Chen, S., Smith Jr, W.O., and Yu, X. (2021). Revisiting the Ocean Color Algorithms for Particulate Organic Carbon and Chlorophyll a Concentrations in the Ross Sea. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 126, e2021JC017749.
- Comiso, J.C. (2012). Large decadal decline of the Arctic multiyear ice cover. *Journal of climate* 25, 1176-1193.
- Danovaro, R., Dell'anno, A., Pusceddu, A., Marrale, D., Della Croce, N., Fabiano, M., and Tselepidis, A. (2000). Biochemical composition of pico-, nano- and micro-particulate organic matter and bacterioplankton biomass in the oligotrophic Cretan Sea (NE Mediterranean). *Progress in Oceanography* 46, 279-310.
- Dawson, R., and Liebezeit, G. (1982). Biochemical compounds in the pelagic and

- sedimentary environment of Antarctic waters. *Centre National Pour l'Exploitation des Océans (France)* 14, 67 - 86.
- Ditullio, G.R., and Smith Jr, W.O. (1996). Spatial patterns in phytoplankton biomass and pigment distributions in the Ross Sea. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 101, 18467-18477.
- Doney, S.C., Ruckelshaus, M., Emmett Duffy, J., Barry, J.P., Chan, F., English, C.A., Galindo, H.M., Grebmeier, J.M., Hollowed, A.B., and Knowlton, N. (2012). Climate change impacts on marine ecosystems. *Annual review of marine science* 4, 11-37.
- Dubois, M., Gilles, K.A., Hamilton, J.K., Rebers, P.T., and Smith, F. (1956). Colorimetric method for determination of sugars and related substances. *Analytical chemistry* 28, 350-356.
- Eayrs, C., Holland, D., Francis, D., Wagner, T., Kumar, R., and Li, X. (2019). Understanding the Seasonal Cycle of Antarctic Sea Ice Extent in the Context of Longer Term Variability. *Reviews of Geophysics* 57, 1037-1064.
- Ellegaard, M., and Ribeiro, S. (2018). The long term persistence of phytoplankton resting stages in aquatic 'seed banks'. *Biological Reviews* 93, 166-183.
- Fabiano, M., Chiantore, M., Povero, P., Cattaneo-Vietti, R., Pusceddu, A., Misic, C., and Albertelli, G. (1997). Short-term variations in particulate matter flux in Terra Nova Bay, Ross Sea. *Antarctic Science* 9, 143-149.
- Fabiano, M., and Danovaro, R. (1999). Meiofauna distribution and mesoscale variability in two sites of the Ross Sea (Antarctica) with contrasting food supply. *Polar Biology* 22, 115-123.
- Fabiano, M., Danovaro, R., Chiantore, M., and Pusceddu, A. (2000). "Bacteria, protozoa and organic matter composition in the sediments of Terra Nova Bay (Ross Sea)," in *Ross Sea Ecology*. Springer), 159-169.
- Fabiano, M., Danovaro, R., Crisafi, E., La Ferla, R., Povero, P., and Acosta-Pomar, L. (1995). Particulate matter composition and bacterial distribution in Terra Nova Bay (Antarctica) during summer 1989 - 1990. *Polar Biology* 15, 393-400.
- Fabiano, M., Povero, P., and Danovaro, R. (1993). Distribution and composition of particulate organic matter in the Ross Sea (Antarctica). *Polar Biology* 13, 525-533.
- Fabiano, M., Povero, P., and Danovaro, R. (1996). Particulate organic matter composition in Terra Nova Bay (Ross Sea, Antarctica) during summer 1990. *Antarctic Science* 8, 7-13.
- Fabiano, M., and Pusceddu, A. (1998). Total and hydrolyzable particulate organic matter (carbohydrates, proteins and lipids) at a coastal station in Terra Nova Bay (Ross Sea, Antarctica). *Polar Biology* 19, 125-132.
- Falkowski, P.G. (1994). The role of phytoplankton photosynthesis in global biogeochemical cycles. *Photosynthesis research* 39, 235-258.
- Fiala, M., and Oriol, L. (1990). Light-temperature interactions on the growth of Antarctic diatoms. *Polar Biology* 10, 629-636.
- Fichez, R. (1991a). Composition and fate of organic-matter in submarine cave

- sediments—implications for the biogeochemical cycle of organic-carbon. *Oceanologica acta* 14, 369-377.
- Fichez, R. (1991b). Suspended particulate organic matter in a Mediterranean submarine cave. *Marine Biology* 108, 167-174.
- Fitzwater, S., Johnson, K., Gordon, R., Coale, K., and Smith Jr, W. (2000). Trace metal concentrations in the Ross Sea and their relationship with nutrients and phytoplankton growth. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* 47, 3159-3179.
- Friedman, O., Dubinsky, Z., and Arad, S.M. (1991). Effect of light intensity on growth and polysaccharide production in red and blue-green rhodophyta unicells. *Bioresource technology* 38, 105-110.
- Halpern, B.S., Walbridge, S., Selkoe, K.A., Kappel, C.V., Micheli, F., D'agrosa, C., Bruno, J.F., Casey, K.S., Ebert, C., and Fox, H.E. (2008). A global map of human impact on marine ecosystems. *science* 319, 948-952.
- Handa, N. (1969). Carbohydrate metabolism in the marine diatom *Skeletonema costatum*. *Marine Biology* 4, 208-214.
- Handa, N., and Tominaga, H. (1969). A detailed analysis of carbohydrates in marine particulate matter. *Marine Biology* 2, 228-235.
- Harrison, P., Thompson, P., and Calderwood, G. (1990). Effects of nutrient and light limitation on the biochemical composition of phytoplankton. *Journal of Applied Phycology* 2, 45-56.
- Hedges, J.I., Baldock, J.A., Gélinas, Y., Lee, C., Peterson, M., and Wakeham, S.G. (2001). Evidence for non-selective preservation of organic matter in sinking marine particles. *Nature* 409, 801-804.
- Hobbs, W.R., Massom, R., Stammerjohn, S., Reid, P., Williams, G., and Meier, W. (2016). A review of recent changes in Southern Ocean sea ice, their drivers and forcings. *Global and Planetary Change* 143, 228-250.
- Ittekkot, V., Degens, E.T., and Brockmann, U. (1982). Monosaccharide composition of acid hydrolyzable carbohydrates in particulate matter during a plankton bloom 1. *Limnology and Oceanography* 27, 770-776.
- Kakinuma, M., Coury, D., Kuno, Y., Itoh, S., Kozawa, Y., Inagaki, E., Yoshiura, Y., and Amano, H. (2006). Physiological and biochemical responses to thermal and salinity stresses in a sterile mutant of *Ulva pertusa* (Ulvales, Chlorophyta). *Marine Biology* 149, 97-106.
- Kim, B.K., Lee, J.H., Yun, M.S., Joo, H., Song, H.J., Yang, E.J., Chung, K.H., Kang, S.-H., and Lee, S.H. (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.
- Kim, B.K., Lee, S., Ha, S.Y., Jung, J., Kim, T.W., Yang, E.J., Jo, N., Lim, Y.J., Park, J., and Lee, S.H. (2018). Vertical distributions of macromolecular composition of particulate organic matter in the water column of the Amundsen Sea Polynya during

- the summer in 2014. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 123, 1393–1405.
- Kim, K., Park, J., Jo, N., Park, S., Yoo, H., Kim, J., and Lee, S.H. (2021). Monthly Variation in the Macromolecular Composition of Phytoplankton Communities at Jang Bogo Station, Terra Nova Bay, Ross Sea. *Frontiers in Microbiology* 12, 618999.
- Krell, A., Schnack-Schiel, S.B., Thomas, D.N., Kattner, G., Zipan, W., and Dieckmann, G.S. (2005). Phytoplankton dynamics in relation to hydrography, nutrients and zooplankton at the onset of sea ice formation in the eastern Weddell Sea (Antarctica). *Polar Biology* 28, 700–713.
- Lee, S.H., Kim, H.-J., and Whitley, T.E. (2009). High incorporation of carbon into proteins by the phytoplankton of the Bering Strait and Chukchi Sea. *Continental Shelf Research* 29, 1689–1696.
- 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, 204–212.
- Li, Y., Mcgillicuddy Jr, D.J., Dinniman, M.S., and Klinck, J.M. (2017). Processes influencing formation of low-salinity high-biomass lenses near the edge of the Ross Ice Shelf. *Journal of Marine Systems* 166, 108–119.
- Liebezeit, G. (1984). Particulate carbohydrates in relation to phytoplankton in the euphotic zone of the Bransfield Strait. *Polar Biology* 2, 225–228.
- Liu, J., and Curry, J.A. (2010). Accelerated warming of the Southern Ocean and its impacts on the hydrological cycle and sea ice. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 107, 14987–14992.
- Lowry, O.H. (1951). Protein measurement with the Folin phenol reagent. *J Biol Chem* 193, 265–275.
- Mangoni, O., Saggiomo, M., Bolinesi, F., Castellano, M., Povero, P., Saggiomo, V., and Ditullio, G.R. (2019). Phaeocystis antarctica unusual summer bloom in stratified antarctic coastal waters (Terra Nova Bay, Ross Sea). *Marine environmental research* 151, 104733.
- Markus, T., Stroeve, J.C., and Miller, J. (2009). Recent changes in Arctic sea ice melt onset, freezeup, and melt season length. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 114.
- Marsh, J.B., and Weinstein, D.B. (1966). Simple charring method for determination of lipids. *Journal of lipid research* 7, 574–576.
- Massom, R., Reid, P., Stammerjohn, S., Raymond, B., Fraser, A., and Ushio, S. (2013). Change and variability in East Antarctic sea ice seasonality, 1979/80 - 2009/10. *PLoS One* 8, e64756.
- Matson, P.G., Martz, T.R., and Hofmann, G.E. (2011). High-frequency observations of pH under Antarctic sea ice in the southern Ross Sea. *Antarctic Science* 23, 607–613.
- Mcgillicuddy Jr, D., Sedwick, P.N., Dinniman, M.S., Arrigo, K., Bibby, T., Greenan, B., Hofmann, E.E., Klinck, J.M., Smith Jr, W.O., and Mack, S. (2015). Iron supply and demand in an Antarctic shelf ecosystem. *Geophysical Research Letters* 42,

8088-8097.

- Mcquoid, M.R. (1996). Diatom resting stages. *Jour. Phycol.* 32, 889-902.
- Measures, C.I., Hatta, M., and Grand, M.M. (2012). Bioactive trace metal distributions and biogeochemical controls in the Southern Ocean. *Oceanography* 25, 122-133.
- Mitchell, B.G., and Holm-Hansen, O. (1991). Observations of modeling of the Antarctic phytoplankton crop in relation to mixing depth. *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers* 38, 981-1007.
- Moal, J., Martin-Jezequel, V., Harris, R., Samain, J.-F., and Poulet, S. (1987). Interspecific and intraspecific variability of the chemical-composition of marine-phytoplankton. *Oceanologica acta* 10, 339-346.
- Nelson, D.M., Demaster, D.J., Dunbar, R.B., and Smith Jr, W.O. (1996). Cycling of organic carbon and biogenic silica in the Southern Ocean: Estimates of water column and sedimentary fluxes on the Ross Sea continental shelf. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 101, 18519-18532.
- Oku, O., and Kamatani, A. (1995). Resting spore formation and phosphorus composition of the marine diatom *Chaetoceros pseudocurvisetus* under various nutrient conditions. *Marine Biology* 123, 393-399.
- Oku, O., and Kamatani, A. (1999). Resting spore formation and biochemical composition of the marine planktonic diatom *Chaetoceros pseudocurvisetus* in culture: ecological significance of decreased nucleotide content and activation of the xanthophyll cycle by resting spore formation. *Marine Biology* 135, 425-436.
- Orr, J.C., Fabry, V.J., Aumont, O., Bopp, L., Doney, S.C., Feely, R.A., Gnanadesikan, A., Gruber, N., Ishida, A., and Joos, F. (2005). Anthropogenic ocean acidification over the twenty-first century and its impact on calcifying organisms. *Nature* 437, 681-686.
- Palmisano, A.C., and Sullivan, C.W. (1982). Physiology of sea ice diatoms. I. response of three polar diatoms to a simulated summerwinter transition. *Journal of Phycology* 18, 489-498.
- Park, S., Park, J., Yoo, K.-C., Yoo, J., Kim, K., Jo, N., Jang, H.-K., Kim, J., Kim, J., and Kim, J. (2021). Seasonal Variations in the Biochemical Compositions of Phytoplankton and Transparent Exopolymer Particles (TEPs) at Jang Bogo Station (Terra Nova Bay, Ross Sea), 2017 - 2018. *Water* 13, 2173.
- Parkinson, C.L. (1994). Spatial patterns in the length of the sea ice season in the Southern Ocean, 1979 - 1986. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 99, 16327-16339.
- Parkinson, C.L. (2002). Trends in the length of the Southern Ocean sea-ice season, 1979 - 99. *Annals of Glaciology* 34, 435-440.
- Pirt, S.J. (1975). *Principles of microbe and cell cultivation*. Blackwell Scientific Publications.
- Pusceddu, A., Serra, E., Sanna, O., and Fabiano, M. (1996). Seasonal fluctuations in the nutritional value of particulate organic matter in a lagoon. *Chemistry and Ecology* 13, 21-37.
- Quetin, L.B., and Ross, R.M. (2009). Life under Antarctic pack ice: a krill perspective.

Smithsonian at the Poles: Contributions to International Polar Year Science.

- Quetin, L.B., Ross, R.M., Fritsen, C.H., and Vernet, M. (2007). Ecological responses of Antarctic krill to environmental variability: can we predict the future? *Antarctic Science* 19, 253–266.
- Raiswell, R., Tranter, M., Benning, L.G., Siegert, M., De'ath, R., Huybrechts, P., and Payne, T. (2006). Contributions from glacially derived sediment to the global iron (oxyhydr) oxide cycle: Implications for iron delivery to the oceans. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 70, 2765–2780.
- Rivkin, R.B., and Voytek, M.A. (1987). Photoadaptations of photosynthesis and carbon metabolism by phytoplankton from McMurdo Sound, Antarctica. 1. Species specific and community responses to reduced irradiances 1 2. *Limnology and oceanography* 32, 249–259.
- Ross, R.M., Quetin, L.B., Martinson, D.G., Iannuzzi, R.A., Stammerjohn, S.E., and Smith, R.C. (2008). Palmer LTER: Patterns of distribution of five dominant zooplankton species in the epipelagic zone west of the Antarctic Peninsula, 1993 - 2004. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* 55, 2086–2105.
- Sedwick, P.N., and Ditullio, G.R. (1997). Regulation of algal blooms in Antarctic shelf waters by the release of iron from melting sea ice. *Geophysical Research Letters* 24, 2515–2518.
- Sedwick, P.N., Ditullio, G.R., and Mackey, D.J. (2000). Iron and manganese in the Ross Sea, Antarctica: Seasonal iron limitation in Antarctic shelf waters. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 105, 11321–11336.
- Sedwick, P.N., Marsay, C., Sohst, B., Aguilar-Islas, A., Lohan, M., Long, M.C., Arrigo, K.R., Dunbar, R.B., Saito, M.A., and Smith, W. (2011). Early season depletion of dissolved iron in the Ross Sea polynya: Implications for iron dynamics on the Antarctic continental shelf. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 116.
- Smayda, T., and Mitchell-Innes, B. (1974). Dark survival of autotrophic, planktonic marine diatoms. *Marine Biology* 25, 195–202.
- Smith Jr, W.O., Ainley, D.G., Arrigo, K.R., and Dinniman, M.S. (2014). The oceanography and ecology of the Ross Sea. *Annual review of marine science* 6, 469–487.
- Smith Jr, W.O., and Jones, R.M. (2015). Vertical mixing, critical depths, and phytoplankton growth in the Ross Sea. *ICES Journal of Marine Science* 72, 1952–1960.
- Smith Jr, W.O., Nelson, D.M., Ditullio, G.R., and Leventer, A.R. (1996). Temporal and spatial patterns in the Ross Sea: phytoplankton biomass, elemental composition, productivity and growth rates. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 101, 18455–18465.
- Smith Jr, W.O., Sedwick, P.N., Arrigo, K.R., Ainley, D.G., and Orsi, A.H. (2012). The Ross Sea in a sea of change. *Oceanography* 25, 90–103.
- Smith, W.O., and Nelson, D.M. (1985). Phytoplankton bloom produced by a receding ice edge in the Ross Sea: spatial coherence with the density field. *Science* 227, 163–166.
- Stammerjohn, S., Massom, R., Rind, D., and Martinson, D. (2012). Regions of rapid sea ice

change: An inter hemispheric seasonal comparison. *Geophysical Research Letters* 39.

Stammerjohn, S.E., Martinson, D., Smith, R., Yuan, X., and Rind, D. (2008). Trends in Antarctic annual sea ice retreat and advance and their relation to El Niño - Southern Oscillation and Southern Annular Mode variability. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 113.

Suárez, I., and Marañón, E. (2003). Photosynthate allocation in a temperate sea over an annual cycle: the relationship between protein synthesis and phytoplankton physiological state. *Journal of Sea Research* 50, 285-299.

Umani, S.F., Monti, M., Bergamasco, A., Cabrini, M., De Vittor, C., Burba, N., and Del Negro, P. (2005). Plankton community structure and dynamics versus physical structure from Terra Nova Bay to Ross Ice Shelf (Antarctica). *Journal of Marine Systems* 55, 31-46.

Zhu, Z., Xu, K., Fu, F., Spackeen, J.L., Bronk, D.A., and Hutchins, D.A. (2016). A comparative study of iron and temperature interactive effects on diatoms and *Phaeocystis antarctica* from the Ross Sea, Antarctica. *Marine Ecology Progress Series* 550, 39-51.

