

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 최종보고서로 제출합니다.

2026. 01.

(본과제) 총괄연구책임자 : 박 지 수

위탁연구기관명 : 부산대학교 산학협력단

위탁연구책임자 : 이 상 헌

위탁참여연구원 : 이 다 빈

“ : 김 관 우

“ : 장 효 근

“ : 김 명 준

“ : 박 상 훈

“ : 김 예 진

“ : 김 재 흥

“ : 김 재 순

“ : 이 윤 지

“ : 김 성 준

“ : 김 지 성

“ : 김 명 섭

“ : 이 종 혁

“ : 전 재 하

“ : 최 하 영

“ : 나 민 철

보고서 초록

위탁연구과제명	남극해 식물플랑크톤에 의한 탄소 플럭스 변동 연구				
위탁연구책임자	이 상 현	해당과제 참여연구원수	17	해당과제 연구비	130,000,000원
연구기관명 및 소속부서명	부산대학교 해양학과		참여기업명		
국제공동연구	상대국명 : 상대국연구기관명 :				
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)				보고서 면수	118
- 남극해에서 식물플랑크톤 기반 유기탄소 플럭스의 변동을 규명하기 위해 거대 분자 조성, POC, DOC, BPC, TEP_C 등 Organic carbon pool 주요 항목을 유광층 - 심층에 걸쳐 시료를 확보하여 분석함 - Ross Sea에서 식물플랑크톤 유래 탄수화물, 단백질, 지질 및 POM 구성 탄소 농도를 시·공간 및 수심에 따라 정량 분석하여 분포 경향과 주요 농도 변화 범위를 확인함 - 입자성 유기탄소, 용존 유기탄소, BPC 및 TEP 기반 탄소 농도를 동시에 측정하여 남극해 유기탄소 풀의 구성 비중과 항목별 기여도를 파악함 - 백야·극야기, Ross Ice Shelf 인근 해역·외해, 유·무광층을 비교하여 해양환경 조건에 따른 유기탄소 농도 차이와 공간적 분포 특성을 체계적으로 조사함 - 분석된 자료를 통해 해역별 유기탄소 농도 범위, 구성 성분 비율 및 수층 간 변화 특성을 도출하고 관측된 값을 기반으로 탄소 거동의 공간·수직적 분포 경향을 제시함					
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. 제 목

남극해 식물플랑크톤에 의한 탄소 플럭스 변동 연구

II. 연구개발의 목적 및 필요성

- 남극해는 식물플랑크톤의 활발한 일차생산을 통해 수층에 존재하는 이산화탄소가 유기물 형태로 고정되고, 이 중 일부가 심층으로 제거되는 생물학적 탄소격리가 효과적으로 이루어지는 해역으로 널리 알려져 있음.
- 현재 진행 중인 기후변화는 남극해의 해빙 면적 감소, 수온 상승, 수층 안정도 변화 등을 유발하고 있으며, 이러한 환경 변화는 식물플랑크톤의 탄소 고정 능력뿐만 아니라 거대 분자 조성의 변화를 초래할 수 있는 것으로 보고되고 있음.
- 이에 따라, 기후변화에 따른 식물플랑크톤 기반 탄소 순환 구조 및 그 변동성을 이해하는 것은 남극해 생태계 기능과 전 지구적 탄소 순환을 평가하는 데 있어 필수적인 과제로 인식되고 있음.
- 본 연구는 식물플랑크톤의 거대 분자 조성(탄수화물, 단백질, 지질)과 입자성 유기탄소의 변동 특성을 분석함으로써, 남극해 food web 내 물질 순환 및 에너지 전달 과정에 미치는 영향을 종합적으로 파악하고 평가하기 위한 기초 자료를 제공하고자 함.

III. 연구개발의 내용 및 범위

- 남극해에서 식물플랑크톤의 거대 분자 농도 및 조성 파악.
- 남극해에서 식물플랑크톤의 입자성 유기탄소(POC)와 Biopolymeric Carbon (BPC) 농도 및 조성 파악.
- 남극해에서 백야 및 극야 기간 동안 식물플랑크톤의 생화학 조성 및 BPC 분석.
- 남극해에서 유광층부터 심층까지 POC, 용존 유기탄소(DOC), BPC, TEP_C 등 Organic carbon pool 주요 인자의 농도 분포 특성 파악.
- 남극해에서 Organic carbon pool 주요 인자들의 수심별·해역별 기여도 변동성 분석을 통한 유기탄소 조성 특성 규명.
- 식물플랑크톤 기반 유기탄소의 수직적 분포 및 조성 변화를 종합적으로 분석하여 남극해 유기탄소 순환 특성 파악.

IV. 연구개발결과

- Eastern Ross Sea (ANA11A)의 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, Non_detect-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.
- Eastern Ross Sea (ANA13B)의 유광층에서 탄수화물, 단백질, 지질, FM, 입자성 유기탄소, 용존 유기탄소, BPC, TEP_C의 범위는 각각 62.85-327.34, 35.31-329.62, 71.87-267.68, 191.01-894.24, 115.53-625.40, 538.86-1046.00, 110.77-481.05, 16.19-70.43 $\mu\text{g L}^{-1}$ 으로 나타났으며, 용존 유기탄소와 TEP_C를 제외한 대부분의 항목은 Ross Ice Shelf 인접 정점에서 상대적으로 높은 농도가 관측됨.
- Eastern Ross Sea (ANA13B)의 무광층에서 입자성 유기탄소, 용존 유기탄소, BPC, TEP_C의 범위는 각각 34.67-403.96, 543.97-777.30, 27.59-257.81, 3.23-40.67 $\mu\text{g L}^{-1}$ 으로 나타났으며, 유광층에 비해 무광층에서 용존 유기탄소의 기여도가 증가하였으며, TEP_C 기여도는 전 수심에서 낮은 수준을 유지한 반면, BPC 기여도는 수심에 따라 뚜렷한 변동성이 나타남.

V. 연구개발결과의 활용계획

- 남극해 해역에서 입자성 유기물의 거대 분자 조성 분석을 통해 해당 해역에서 진행 중인 환경 변화의 영향을 정량적으로 파악함으로써, 향후 남극해 해양생태계 구조 및 변동성 평가를 위한 기초 자료로 활용 가치가 높음.
- 남극해 유광층에서 심층으로 침강하는 입자성 유기탄소의 거동 특성을 규명함으로써, 국제적으로 중요성이 부각되고 있는 남극해 생물학적 펌프의 미래 변화 예측 연구에 활용 가능한 핵심 기반 자료를 제공 가능.
- 기후변화에 따른 해양 유기탄소 순환 변동에 대한 과학적 근거를 제시함으로써, 향후 대기 및 해양 연계 탄소 관리 및 기후변화 대응 정책 수립을 위한 기초 자료로 활용 가능.
- 식물플랑크톤의 거대 분자 조성 분석 결과를 바탕으로, 식물플랑크톤의 생리적 상태 및 환경 반응을 진단할 수 있는 생화학적 지표(biomarker) 개발로의 확장 가능.

S U M M A R Y

(영 문 요 약 문)

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 components of phytoplankton POM and particulate organic carbon in the Ross Sea.
- Estimation of relative contribution of each macromolecule to FM in the Ross Sea.
- Estimation of relative contribution of BPC and TEP_C to POC in the Ross Sea.
- Estimation of relative contribution of POC and DOC to Organic carbon pool in the Ross Sea.
- Estimation of the vertical variability in concentrations and relative contributions of key controlling factors of the organic carbon pool in the Ross Sea.

IV. R&D Results

- The ranges of carbohydrates, proteins, lipids, FM, POC, and BPC concentrations from the surface water of the Eastern Ross Sea during the ANA11A cruise 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 $\mu\text{g L}^{-1}$, respectively.
- The ranges of carbohydrates, proteins, lipids, FM, POC, and BPC concentrations

- within the euphotic zone of the Western Ross Sea were 14.61–450.71, 21.39–319.74, 32.50–264.53, 78.94–1023.05, 149.58–959.23, and 48.53–526.40 $\mu\text{g L}^{-1}$, respectively.
- The ranges of carbohydrates, proteins, lipids, FM, POC, and BPC concentrations from the surface water of Terra Nova Bay in the Western Ross Sea were 50.29–204.45, 0.00–226.06, 18.58–160.73, 85.78–585.81, 49.29–451.87, and 44.08–310.43 $\mu\text{g L}^{-1}$, respectively.
 - The ranges of carbohydrates, proteins, lipids, FM, POC, DOC, BPC, and TEP_C concentrations within the euphotic zone of the Eastern Ross Sea during the ANA13B cruise were 62.85–327.34, 35.31–329.62, 71.87–267.68, 191.01–894.24, 115.53–625.40, 538.86–1046.00, 110.77–481.05, and 16.19–70.43 $\mu\text{g L}^{-1}$, respectively.
 - The ranges of POC, DOC, BPC, and TEP_C concentrations within the aphotic zone of the Eastern Ross Sea during the ANA13B cruise were 34.67–403.96, 543.97–777.30, 27.59–257.81, 3.23–40.67 $\mu\text{g L}^{-1}$, respectively.

V. Application Plans of R&D Results

- To predict the effects of climate change on phytoplankton by monitoring macromolecular composition in the Ross Sea.
- To predict variations in carbon flux based on measurements of particulate organic carbon and BPC originating from phytoplankton in the Ross Sea.
- To develop indicators that represent environmental changes through analysis of the macromolecular composition characteristics of phytoplankton.

Contents

Summary (Korean)	iii
Summary (English)	v
Contents (English)	vii
List of Tables and Figures	viii
Contents (Korean)	xii
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	105
Chapter V . Future Directions	108
Chapter VI. Overseas Science and Technology Information	109
Chapter VII. References	110

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.

표 4. Eastern Ross Sea (ANA13B)의 연구 해역의 유광층에서 탄수화물, 단백질, 지질, FM, 입자성 유기탄소, 용존 유기탄소, BPC, TEP_C 농도의 범위와 수심별 평균 농도.

표 5. Eastern Ross Sea (ANA13B)의 연구 해역의 유광층에서 FM에 대한 탄수화물, 단백질, 지질의 비율과 Organic carbon pool에 대한 입자성·용존 유기탄소의 비율 및 입자성 유기탄소에 대한 BPC, TEP_C의 비율.

표 6. Eastern Ross Sea (ANA13B)의 연구 해역의 무광층에서 입자성 유기탄소, 용존 유기탄소, BPC, TEP_C 농도의 범위와 수심별 평균 농도.

표 7. Eastern Ross Sea (ANA13B)의 연구 해역의 무광층에서 수심별 Organic carbon pool에 대한 입자성·용존 유기탄소의 비율 및 입자성 유기탄소에 대한 BPC, TEP_C의 비율.

그림 1. 연구 해역(Eastern Ross Sea, *: ANA11A, ●: ANA13B).

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 Sea (ANA11A)의 연구 해역에서 표층 식물플랑크톤의 탄수화물, 단백질, 지질 농도.

그림 7. Eastern Ross Sea (ANA11A)의 연구 해역의 표층에서 탄수화물 농도의 공간 분포.

그림 8. Eastern Ross Sea (ANA11A)의 연구 해역의 표층에서 단백질 농도의 공간 분포.

그림 9. Eastern Ross Sea (ANA11A)의 연구 해역의 표층에서 지질 농도의 공간 분포.

그림 10. Eastern Ross Sea (ANA11A)의 연구 해역의 표층에서 FM 농도의 공간 분포.

그림 11. Eastern Ross Sea (ANA11A)의 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.

포.

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 Sea (ANA13B)의 연구 해역에서 유광층 내 탄수화물 농도의 수직 분포.

그림 31. Eastern Ross Sea (ANA13B)의 연구 해역에서 유광층 내 단백질 농도의 수직 분포.

그림 32. Eastern Ross Sea (ANA13B)의 연구 해역에서 유광층 내 지질 농도의 수직 분포.

그림 33. Eastern Ross Sea (ANA13B)의 연구 해역에서 유광층 내 FM 농도의 수직 분포.

그림 34. Eastern Ross Sea (ANA13B)의 연구 해역에서 탄수화물 농도의 공간 분포(유광층 평균).

그림 35. Eastern Ross Sea (ANA13B)의 연구 해역에서 단백질 농도의 공간 분포(유광층 평균).

그림 36. Eastern Ross Sea (ANA13B)의 연구 해역에서 지질 농도의 공간 분포(유광층 평균).

그림 37. Eastern Ross Sea (ANA13B)의 연구 해역에서 FM 농도의 공간 분포(유광층 평균).

그림 38. Eastern Ross Sea (ANA13B)의 연구 해역에서 유광층 내 FM에 대한 탄수화물 기여도의 수직 분포.

그림 39. Eastern Ross Sea (ANA13B)의 연구 해역에서 유광층 내 FM에 대한 단백질 기여도의 수직 분포.

그림 40. Eastern Ross Sea (ANA13B)의 연구 해역에서 유광층 내 FM에 대한 지질 기여도의 수직 분포.

그림 41. Eastern Ross Sea (ANA13B)의 연구 해역에서 FM에 대한 탄수화물 기여도의 공간 분포(유광층 평균).

그림 42. Eastern Ross Sea (ANA13B)의 연구 해역에서 FM에 대한 단백질 기여도의 공간 분포(유광층 평균).

그림 43. Eastern Ross Sea (ANA13B)의 연구 해역에서 FM에 대한 지질 기여도의 공간 분포(유광층 평균).

그림 44. Eastern Ross Sea (ANA11A)의 연구 해역 표층에서 입자성 유기탄소와 BPC 농도.

그림 45. Eastern Ross Sea (ANA11A)의 연구 해역 표층에서 입자성 유기탄소의 공간 분포.

그림 46. Eastern Ross Sea (ANA11A)의 연구 해역 표층에서 BPC의 공간 분포.

그림 47. Eastern Ross Sea (ANA11A)의 연구 해역 표층에서 입자성 유기탄소에 대한 BPC 기여도의 공간 분포.

그림 48. Western Ross Sea의 연구 해역에서 유광층 내 입자성 유기탄소 농도의 수직 분포.

그림 49. Western Ross Sea의 연구 해역에서 유광층 내 BPC 농도의 수직 분포.

그림 50. Western Ross Sea의 연구 해역에서 입자성 유기탄소 농도의 공간 분포(유광층 평균).

그림 51. Western Ross Sea의 연구 해역에서 BPC 농도의 공간 분포(유광층 평균).

그림 52. Western Ross Sea의 연구 해역에서 유광층 내 입자성 유기탄소에 대한 BPC 기여도의 수직 분포.

그림 53. Western Ross Sea의 연구 해역에서 입자성 유기탄소에 대한 BPC 기여도의 공간 분포(유광층 평균).

그림 54. Western Ross Sea의 Terra Nova Bay에 위치한 JBS의 표층에서 입자성 유기탄소, BPC 농도 및 입자성 유기탄소에 대한 BPC 기여도의 시계열 분포(2015).

그림 55. Western Ross Sea의 Terra Nova Bay에 위치한 JBS의 표층에서 입자성 유기탄소, BPC 농도 및 입자성 유기탄소에 대한 BPC 기여도의 시계열 분포(2017-2018).

그림 56. Eastern Ross Sea (ANA13B)의 연구 해역에서 입자성 유기탄소 농도의 수심별 분포.

그림 57. Eastern Ross Sea (ANA13B)의 연구 해역에서 용존 유기탄소 농도의 수심별 분포.

그림 58. Eastern Ross Sea (ANA13B)의 연구 해역에서 BPC 농도의 수심별 분포.

그림 59. Eastern Ross Sea (ANA13B)의 연구 해역에서 TEP_C 농도의 수심별 분포.

그림 60. Eastern Ross Sea (ANA13B)의 연구 해역에서 입자성 유기탄소 농도의 공간 분포(유광층 평균).

그림 61. Eastern Ross Sea (ANA13B)의 연구 해역에서 용존 유기탄소 농도의 공간 분포(유광층 평균).

그림 62. Eastern Ross Sea (ANA13B)의 연구 해역에서 BPC 농도의 공간 분포(유광층 평균).

그림 63. Eastern Ross Sea (ANA13B)의 연구 해역에서 TEP_C 농도의 공간 분포(유광층 평균).

그림 64. Eastern Ross Sea (ANA13B)의 연구 해역에서 Organic carbon pool에 대한 입자성 및 용존 유기탄소 기여도의 수심별 분포.

그림 65. Eastern Ross Sea (ANA13B)의 연구 해역에서 Organic carbon pool에 대한 입자성 유기탄소 기여도의 공간 분포(유광층 평균).

그림 66. Eastern Ross Sea (ANA13B)의 연구 해역에서 Organic carbon pool에 대한 용존 유기탄소 기여도의 공간 분포(유광층 평균).

그림 67. Eastern Ross Sea (ANA13B)의 연구 해역에서 입자성 유기탄소에 대한 BPC 및 TEP_C 기여도의 수심별 분포.

그림 68. Eastern Ross Sea (ANA13B)의 연구 해역에서 입자성 유기탄소에 대한 BPC 기여도의 공간 분포(유광층 평균).

그림 69. Eastern Ross Sea (ANA13B)의 연구 해역에서 입자성 유기탄소에 대한 TEP_C 기여도의 공간 분포(유광층 평균).

그림 70. Eastern Ross Sea (ANA13B)의 연구 해역에서 입자성 유기탄소 농도의 공간 분포(무광층 평균).

그림 71. Eastern Ross Sea (ANA13B)의 연구 해역에서 용존 유기탄소 농도의 공간 분포(무광층 평균).

그림 72. Eastern Ross Sea (ANA13B)의 연구 해역에서 BPC 농도의 공간 분포(무광층 평균).

그림 73. Eastern Ross Sea (ANA13B)의 연구 해역에서 TEP_C 농도의 공간 분포(무광층 평균).

그림 74. Eastern Ross Sea (ANA13B)의 연구 해역에서 Organic carbon pool에 대한 입자성 유기탄소 기여도의 공간 분포(무광층 평균).

그림 75. Eastern Ross Sea (ANA13B)의 연구 해역에서 Organic carbon pool에 대한 용존 유기탄소 기여도의 공간 분포(무광층 평균).

그림 76. Eastern Ross Sea (ANA13B)의 연구 해역에서 입자성 유기 탄소에 대한 BPC 기여도의 공간 분포(무광층 평균).

그림 77. Eastern Ross Sea (ANA13B)의 연구 해역에서 입자성 유기 탄소에 대한 TEP_C 기여도의 공간 분포(무광층 평균).



목 차

국문 요약.....	iii
영문 요약.....	v
영문 목차.....	vii
표·그림 목차.....	viii
국문 목차.....	xii
제 1장 서론.....	1
제 2장 국내외 기술 개발 현황.....	3
제 3장 연구개발수행 내용 및 결과.....	5
제 4장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도.....	105
제 5장 연구개발결과의 활용 계획.....	108
제 6장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보.....	109
제 7장 참고문헌.....	110

제 1장 서론

제 1절. 연구개발의 목적

식물플랑크톤은 남극해 생태계에서 먹이사슬의 기초를 이루는 주요 일차생산자로서, 상위 영양단계 생물들에게 먹이를 제공하며 그들의 생물량과 생리 상태에 영향을 미칠 수 있다. 남극해는 전 대양에서 일어나는 CO₂ sink의 절반가량을 차지한다고 알려져 있으며, 전 지구적 탄소 순환에 핵심적인 역할을 한다고 알려져 있다. 해양으로 유입되는 CO₂는 다양한 물리·화학적 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. 이처럼 생물학적 과정은 남극해에서의 탄소 순환을 조절하는 중요한 메커니즘 중 하나이다. 현재 진행 중인 기후변화는 남극해 해빙 면적 감소, 수온 상승, 수층 안정도 변화 등을 유발하고 있으며, 이러한 환경 변화는 식물플랑크톤의 탄소 고정 능력뿐만 아니라, 세포 외 고분자 물질 분비 특성과 거대 분자 조성에도 영향을 미칠 수 있는 것으로 보고되고 있다. 이에 따라, 식물플랑크톤 기반 유기탄소의 생성·응집·침강 과정 전반이 변화할 가능성이 제기되고 있으며, 이는 남극해 생물학적 탄소 펌프의 구조적 변화를 초래할 수 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, 용존 유기탄소, Biopolymeric Carbon (탄수화물, 단백질, 지질을 구성하는 탄소량의 합; BPC)뿐만 아니라, Transparent exopolymer particle (TEP)와 같은 세포 외 유기탄소 성분에 대한 종합적인 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 시·공간적 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 해빙연구선 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 대한민국 쉼빙연구선 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 과학기지과 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 역할을 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, CO₂ 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; Borriane 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 상당한 감소를 유발시켰으며, 남극해 해빙의 경우 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 조성별 기여도를 분석하고, 남극해에서 식물플랑크톤에 의한 침강 입자의 특성을 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). 또한, 2023년 2월 ANA13B cruise를 통해 Eastern Ross Sea에서 총 11개 정점(st.85, st.88, st.89, st.90, st.91, st.92, st.100, st.103, st.107, st.111, st.113)에 대한 추가 정점 조사를 수행하여 해수 샘플을 확보하였다(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 Jang 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 300-1000 ml의 해수 샘플을 사전에 미리 연소한 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. Transparent exopolymer particle (TEP) 측정 방법

TEP 분석을 위한 해수 시료는 유광층(100%-1%)의 해당 수심에서 채집하였다. TEP 분석을 위해 해수 50-150 ml의 해수 샘플을 0.4 µm의 pore size를 가진 polycarbonate membrane (25mm) 필터지에 여과한 후, 여과된 샘플은 Alcian Blue 용액으로 염색한 후 증류수를 통해 세척해주었으며, 이후 분석 전까지 냉동 보관하였다(-80 °C). TEP 농도는 Passow and

Allredge (1995)에 의해 제시된 방법을 따랐으며, 검탄산이 표준물질로 사용되었다. TEP 추출을 위해 염색된 샘플들은 80% 황산 용액에서 3시간 동안 추출하였으며, spectrophotometer를 이용하여 787nm에서 흡광도를 측정하였다. TEP의 탄소량 계산을 위해 전환계수는 $0.51 \mu\text{g Xeq. L}^{-1}$ 를 사용하였다(Engel and Passow, 2001).

4. 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 연소한(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 spectrometer를 이용해 입자성 유기탄소량이 분석되었다(그림 4). 본 연구의 Eastern Ross Sea에서의 표층에 존재하는 입자성 유기탄소 농도는 Western Ross Sea에서 확인된 표층의 입자성 유기탄소와 BPC의 상관관계 식을 통해 계산되었다(입자성 유기탄소 = $1.5553 \times \text{BPC} + 140.23$, $r^2 = 0.6386$, $p < 0.01$, 그림 5).

5. 용존 유기탄소 분석 방법

용존 유기탄소 농도를 측정하기 위한 해수 시료는 유광층(100%-1%)의 해당 수심에서 채집되었다. 용존 유기탄소 농도 측정을 위해 사전에 미리 연소한(450°C , 4시간) GF/F 여과지(47 mm)를 이용해 여과한 후, 40 mL 갈색 유리 vial (PTFE 뚜껑)에 담아 분석 전까지 냉동 보관하였다. 용존 유기탄소 농도는 TOC-L_{CSH/CPH} total organic carbon analyzer를 이용하여 high-temperature catalytic oxidation 방법을 통해 측정하였다(Sugimura and Suzuki, 1988). 측정의 정확도와 신뢰성을 확보하기 위해 Hansell Consensus Reference Material Program에서 제공하는 심층 해수 기반의 표준물질(CRM)을 사용하여 품질 관리를 수행하였다(Hansell, 2005).

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 나타났다. 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 나타났다. 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 나타났다. 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 나타났다. st.67에서 최솟값, st.63에서 최댓값이 관측되었다(그림 6, 10). st.70에서의 가장 높은 탄수화물 농도를 제외한다면 네 항목 모두 Ice edge에서 멀어질수록 낮은 농도를 보였다.

연구 해역에서 FM에 대한 탄수화물의 비율은 15-79% ($28 \pm 19\%$)의 범위를 보였으며, st.64에서 최소 비율을 st.70에서 최대 비율을 보였다(그림 11). FM에 대한 단백질의 비율은 7-37% ($27 \pm 9\%$)의 범위를 보였으며, st.70에서 최소 비율을 st.67에서 최대 비율을 보였다. FM에 대한 지질의 비율은 14-61% ($45 \pm 14\%$)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 $14.61-450.71 \mu\text{g L}^{-1}$ ($139.67 \pm 113.33 \mu\text{g L}^{-1}$)로 나타났으며, st.51의 1% 광 수심에서 최솟값, st.47의 1% 광 수심에서 최댓값이 관측되었다(그림 12). 유광층 내 단백질 농도의 범위는 $21.39-319.74 \mu\text{g L}^{-1}$ ($123.01 \pm 78.31 \mu\text{g L}^{-1}$)로 나타났으며, st.51의 1% 광 수심에서 최솟값, st.47의 1% 광 수심에서 최댓값이 관측되었다(그림 13). 유광층 내 지질 농도의 범위는 $32.50-264.53 \mu\text{g L}^{-1}$ ($120.60 \pm 59.91 \mu\text{g L}^{-1}$)로 나타났으며, st.52의 1% 광 수심에서 최솟값, st.45의 1% 광 수심에서 최댓값이 관측되었다(그림 14). 유광층 내 FM 농도의 범위는 $78.94-1023.05 \mu\text{g L}^{-1}$ ($383.28 \pm 242.60 \mu\text{g L}^{-1}$)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 나타났

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

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

다. Eastern Ross Sea (ANA13B)

연구 해역에서 광 수심에 따른 탄수화물, 단백질, 지질, FM 농도는 표 4에 제시하였다. 유광층 내 탄수화물 농도의 범위는 62.85-327.34 $\mu\text{g L}^{-1}$ ($180.60 \pm 71.94 \mu\text{g L}^{-1}$)로 나타났으며, st.92의 100% 광 수심에서 최솟값, st.100의 100% 광 수심에서 최댓값이 관측되었다(그림 30). 유광층 내 단백질 농도의 범위는 35.31-329.62 $\mu\text{g L}^{-1}$ ($131.51 \pm 70.43 \mu\text{g L}^{-1}$)로 나타났으며, st.91의 100% 광 수심에서 최솟값, st.111의 100% 광 수심에서 최댓값이 관측되었다(그림 31). 유광층 내 지질 농도의 범위는 71.87-267.68 $\mu\text{g L}^{-1}$ ($147.12 \pm 44.28 \mu\text{g L}^{-1}$)로 나타났으며, st.92의 1% 광 수심에서 최솟값, st.111의 1% 광 수심에서 최댓값이 관측되었다(그림 32). 유광층 내 FM 농도의 범위는 191.01-894.24 $\mu\text{g L}^{-1}$ ($459.23 \pm 162.23 \mu\text{g L}^{-1}$)로 나타났으며, st.92의 100% 광 수심에서 최솟값, st.111의 100% 광 수심에서 최댓값이 관측되었다(그림 33). 100% 광 수심에서의 탄수화물, 단백질, 지질, FM의 평균 농도는 각각 $193.16 \pm 80.02 \mu\text{g L}^{-1}$, $132.93 \pm 81.91 \mu\text{g L}^{-1}$, $153.88 \pm 48.85 \mu\text{g L}^{-1}$, $479.97 \pm 187.73 \mu\text{g L}^{-1}$ 으로 나타났다(표 4). 30% 광 수심에서의 탄수화물, 단백질, 지질, FM의 평균 농도는 각각 $171.55 \pm 39.87 \mu\text{g L}^{-1}$, $113.65 \pm 31.84 \mu\text{g L}^{-1}$, $142.94 \pm 18.37 \mu\text{g L}^{-1}$, $428.13 \pm 59.85 \mu\text{g L}^{-1}$ 으로 나타났다(표 4). 1% 광 수심에서의 탄수화물, 단백질, 지질, FM의 평균 농도는 각각 $170.50 \pm 73.40 \mu\text{g L}^{-1}$, $134.96 \pm 69.87 \mu\text{g L}^{-1}$, $141.52 \pm 46.50 \mu\text{g L}^{-1}$, $446.98 \pm 162.09 \mu\text{g L}^{-1}$ 으로 나타났다(표 4). 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.90에서 탄수화물 농도가 가장 높았으며, st.111에서는 단백질, 지질 및 FM 농도가 가장 높게 나타났다(그림 34, 35, 36, 37).

연구 해역에서 유광층 내 FM에 대한 탄수화물의 비율은 29-52% ($39 \pm 8\%$)의 범위를 보였으며, st.111의 1% 광 수심에서 최소 비율을, st.88의 100% 광 수심에서 최대 비율을 보였다(그림 38). 유광층 내 FM에 대한 단백질의 비율은 17-44% ($28 \pm 8\%$)의 범위를 보였으며, st.91의 100% 광 수심에서 최소 비율을, st.111의 1% 광 수심에서 최대 비율을 보였다(그림 39). 유광층 내 FM에 대한 지질의 비율은 23-49% ($33 \pm 5\%$)의 범위를 보였으며, st.89의 1% 광 수심에서 최소 비율을, st.91의 100% 광 수심에서 최대 비율을 보였다(그림 40). 100% 광 수심에서의 FM에 대한 탄수화물, 단백질, 지질의 평균 비율은 각각 $39 \pm 8\%$, $29 \pm 8\%$, $32 \pm 4\%$ 로 나타났다(표 5). 30% 광 수심에서의 FM에 대한 탄수화물, 단백질, 지질의 평균 비율은 각각 $47 \pm 7\%$, $24 \pm 6\%$, $28 \pm 2\%$ 로 나타났다(표 5). 1% 광 수심에서의 FM에 대한 탄수화물, 단백질, 지질의 평균 비율은 각각 $38 \pm 7\%$, $27 \pm 8\%$, $35 \pm 6\%$ 로 나타났다(표 5). 유광층 내 FM에 대한 거대분자 조성 기여도의 수심별 비교 결과, 통계적으로 유의한 차이는 확인되지 않았으나(t -test, $p > 0.05$), 탄수화물 비율은 30% 광 수심에서, 단백질 비율은 100% 광 수심에서, 지질 비율은 1% 광 수심에서 상대적으로 높은 값을 보이는 경향이 관측되었다. FM에 대한 탄수화물 기여도의 유광층 평균값은 st.90에서 가장 높게 나타났으며, 외해 방향으로 갈수록 증가하는 경향을 보이다가 가장 먼 정점에서는 Ross Ice Shelf 인접 정점과 유사한 기여도를 보였다(그림 41). FM에 대한 단백질 기여도의 유광층 평균값은 ANA11A와 유사하게 Ross Ice Shelf에 인접한 정점에서 상대적으로 높게 나타났다(그림 42). FM에 대한 지질 기여도의 유광층 평균값은 st.92에서 가장 높게 나타났다(그림 43).

2. 남극해 식물플랑크톤의 입자성 유기탄소 및 BPC 농도

가. Eastern Ross Sea (ANA11A)

연구 해역에서 입자성 유기탄소 농도의 범위는 $303.35\text{--}1079.08\ \mu\text{g L}^{-1}$ ($553.08 \pm 283.22\ \mu\text{g L}^{-1}$)로 나타났으며, st.67에서 최솟값, st.63에서 최댓값이 관측되었다(그림 44, 45). BPC 농도의 범위는 $104.88\text{--}603.65\ \mu\text{g L}^{-1}$ ($265.45 \pm 182.10\ \mu\text{g L}^{-1}$)로 나타났으며, st.67에서 최솟값, st.63에서 최댓값이 관측되었다(그림 44, 46). 입자성 유기탄소에 대한 BPC의 비율은 35–56% ($45 \pm 8\%$)의 범위를 보였다(그림 44, 47). 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 $149.58\text{--}959.23\ \mu\text{g L}^{-1}$ ($452.82 \pm 224.91\ \mu\text{g L}^{-1}$)로 나타났으며, st.52의 1% 광 수심에서 최솟값, st.40의 1% 광 수심에서 최댓값이 관측되었다(그림 48). 유광층 내 BPC 농도의 범위는 $48.53\text{--}526.40\ \mu\text{g L}^{-1}$ ($202.59 \pm 123.81\ \mu\text{g L}^{-1}$)로 나타났으며, st.51의 1% 광 수심에서 최솟값, st.47의 1% 광 수심에서 최댓값이 관측되었다(그림 49). 100% 광 수심에서의 입자성 유기탄소, BPC의 평균 농도는 각각 $485.98 \pm 225.06\ \mu\text{g L}^{-1}$, $222.30 \pm 115.64\ \mu\text{g L}^{-1}$ 으로 나타났다(표 2). 30% 광 수심에서의 입자성 유기탄소, BPC의 평균 농도는 각각 $361.82 \pm 148.32\ \mu\text{g L}^{-1}$, $150.99 \pm 71.88\ \mu\text{g L}^{-1}$ 으로 나타났다(표 2). 1% 광 수심에서의 입자성 유기탄소, BPC의 평균 농도는 각각 $472.75 \pm 261.53\ \mu\text{g L}^{-1}$, $223.32 \pm 151.90\ \mu\text{g L}^{-1}$ 으로 나타났다(표 2). 입자성 유기탄소 농도의 유광층 평균값은 st.40에서 가장 높았으며, 외해에서는 낮은 값이 나타났다(그림 50). BPC 농도의 유광층 평균값은 st.47에서 가장 높았으며, 외해에서는 낮은 값이 나타났다(그림 51).

연구 해역에서 유광층 내 입자성 유기탄소에 대한 BPC의 비율은 28–76% ($44 \pm 10\%$)의 범위를 보였으며, st.52의 30% 광 수심에서 최소 비율을, st.47의 1% 광 수심에서 최대 비율을 보였다(그림 52). 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 53).

(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 $58.18\text{--}451.87\ \mu\text{g L}^{-1}$ ($102.56 \pm 83.37\ \mu\text{g L}^{-1}$), $44.08\text{--}310.43\ \mu\text{g L}^{-1}$ ($73.84 \pm 55.87\ \mu\text{g L}^{-1}$)로 나타났으며, 2월에 가장 높은 농도를 보였다(그림 54). 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 54). 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 55). 연구 기간 동안 입자성 유기탄소에 대한 BPC의 비율은 87-100%로 나타났다(그림 55).

3. 남극해 Organic carbon pool (입자성 유기탄소, 용존 유기탄소, BPC, TEP_C)의 농도 및 기여율

가. Eastern Ross Sea (ANA13B)

(1) 유광층

연구 해역에서 광 수심에 따른 입자성 유기탄소, 용존 유기탄소, BPC, TEP_C 농도는 표 4에 제시하였다. 연구 해역에서 유광층 내 입자성 유기탄소 농도의 범위는 $115.53-625.40 \mu\text{g L}^{-1}$ ($392.97 \pm 115.19 \mu\text{g L}^{-1}$)로 나타났으며, st.92의 100% 광 수심에서 최솟값, st.90의 100% 광 수심에서 최댓값이 관측되었다(그림 56). 연구 해역에서 유광층 내 용존 유기탄소 농도의 범위는 $538.86-1046.00 \mu\text{g L}^{-1}$ ($780.23 \pm 128.21 \mu\text{g L}^{-1}$)로 나타났으며, st.107의 100% 광 수심에서 최솟값, st.85의 1% 광 수심에서 최댓값이 관측되었다(그림 57). 유광층 내 BPC 농도의 범위는 $110.77-481.05 \mu\text{g L}^{-1}$ ($247.02 \pm 84.83 \mu\text{g L}^{-1}$)로 나타났으며, st.92의 1% 광 수심에서 최솟값, st.111의 100% 광 수심에서 최댓값이 관측되었다(그림 58). 유광층 내 TEP_C 농도의 범위는 $16.19-70.43 \mu\text{g L}^{-1}$ ($39.50 \pm 15.55 \mu\text{g L}^{-1}$)로 나타났으며, st.92의 100% 광 수심에서 최솟값, st.90의 1% 광 수심에서 최댓값이 관측되었다(그림 59).

100% 광 수심에서의 입자성 유기탄소, 용존 유기탄소, BPC, TEP_C의 평균 농도는 각각 $403.96 \pm 137.81 \mu\text{g L}^{-1}$, $777.30 \pm 124.29 \mu\text{g L}^{-1}$, $257.81 \pm 97.55 \mu\text{g L}^{-1}$, $40.67 \pm 16.66 \mu\text{g L}^{-1}$ 으로 나타났다(표 4). 30% 광 수심에서의 입자성 유기탄소, 용존 유기탄소, BPC, TEP_C의 평균 농도는 각각 $344.60 \pm 95.87 \mu\text{g L}^{-1}$, $772.32 \pm 92.58 \mu\text{g L}^{-1}$, $231.51 \pm 31.40 \mu\text{g L}^{-1}$, $39.67 \pm 15.02 \mu\text{g L}^{-1}$ 으로 나타났다(표 4). 1% 광 수심에서의 입자성 유기탄소, 용존 유기탄소, BPC, TEP_C의 평균 농도는 각각 $395.18 \pm 100.87 \mu\text{g L}^{-1}$, $785.31 \pm 149.09 \mu\text{g L}^{-1}$, $240.47 \pm 85.50 \mu\text{g L}^{-1}$, $38.28 \pm 15.94 \mu\text{g L}^{-1}$ 으로 나타났다(표 4). 입자성 유기탄소 농도의 유광층 평균값은 st.90에서 가장 높았으며, Ross Ice Shelf에 인접한 정점과 외해 일부 정점에서 높은 값이 나타났다(그림 60). 용존 유기탄소 농도의 유광층 평균값은 st.92에서 가장 높았으며, 외해에서 높은 값이 나타났다(그림 61). BPC의 유광층 평균값은 st.111에서 가장 높았으며, Ross Ice Shelf 인접 정점에서 외해에 비해 높은 값이 나타났으며(그림 62), TEP_C의 유광층 평균값은 st.90에서 가장 높았으며, 입자성 유기탄소와 유사한 패턴이 나타났다(그림 63).

연구 해역에서 유광층 내 Organic carbon pool에 대한 입자성 유기탄소의 기여도는 10-45% ($33 \pm 8\%$)의 범위를 보였고, st.92의 100% 광 수심에서 최솟값, st.111의 1% 광 수심에서 최댓값을 보였으며, 100%, 30%, 1%의 광 수심에서 Organic carbon pool에 대한 입자성 유기탄소의 기여도는 각각 $34 \pm 9\%$, $30 \pm 4\%$, $34 \pm 8\%$ 로 나타났다(그림 64, 표 5). 연구 해역에서 유

광층 내 Organic carbon pool에 대한 용존 유기탄소의 기여도는 55-90% ($67 \pm 8\%$)의 범위를 보였고, st.111의 1% 광 수심에서 최솟값, st.92의 100% 광 수심에서 최댓값을 보였으며, 100%, 30%, 1%의 광 수심에서 Organic carbon pool에 대한 용존 유기탄소의 기여도는 각각 $66 \pm 9\%$, $70 \pm 4\%$, $66 \pm 8\%$ 로 나타났다(그림 64, 표 5). 연구 해역에서 Organic carbon pool에 대한 입자성 및 용존 유기탄소의 기여도는 100%, 30%, 1% 광 수심 간에 통계적으로 유의한 차이를 보이지 않았다(t -test, $p > 0.05$). Organic carbon pool에 대한 입자성 유기탄소 기여도의 유광층 평균값은 st.111에서 가장 높았으며(그림 65), 용존 유기탄소 기여도의 유광층 평균값은 st.92에서 가장 높게 나타났다(그림 66). 전반적으로 Organic carbon pool에 대한 용존 유기탄소의 기여도는 50% 이상으로 나타났으며, 특히 외해 일부 해역에서는 그 기여도가 현저히 높은 수준을 보였다.

연구 해역에서 유광층 내 입자성 유기탄소에 대한 BPC의 기여도는 42-97% ($64 \pm 14\%$)의 범위를 보였으며, st.90의 100% 광 수심에서 최소 기여도를, st.92의 100% 광 수심에서 최대 기여도를 보였다(그림 67). 연구 해역에서 유광층 내 입자성 유기탄소에 대한 TEP_C의 기여도는 6-17% ($10 \pm 3\%$)의 범위를 보였으며 st.91의 1% 광 수심에서 최소 기여도를, st.88의 100% 광 수심에서 최대 기여도를 보였다(그림 67). 100%, 30%, 1%의 광 수심에서 입자성 유기탄소에 대한 BPC의 기여도는 각각 $66 \pm 17\%$, $69 \pm 14\%$, $60 \pm 11\%$ 로 나타났으며, TEP_C의 기여도는 각각 $10 \pm 3\%$, $11 \pm 2\%$, $10 \pm 3\%$ 로 나타났다(표 5). 연구 해역에서 입자성 유기탄소에 대한 BPC 및 TEP_C의 기여도는 100%, 30%, 1% 광 수심에서 통계적인 차이를 보이지 않았다(t -test, $p > 0.05$). 입자성 유기탄소에 대한 BPC 기여도의 유광층 평균값은 st.111에서 가장 높았으며(그림 68), TEP_C의 유광층 평균값은 st.92에서 가장 높게 나타났다(그림 69). 입자성 유기탄소에 대한 BPC 기여도는 Ross Ice Shelf 인접 해역에서 상대적으로 높게 나타난 반면 TEP_C는 Ross Ice Shelf 인접 해역에서는 낮고, 외해 해역에서 상대적으로 높게 나타났다.

(2) 무광층

연구 해역에서 무광층 내 수심별 입자성 유기탄소, 용존 유기탄소, BPC, TEP_C 농도는 표 6에 제시하였다. 무광층 내 입자성 유기탄소 농도의 범위는 34.67 - $403.96 \mu\text{g L}^{-1}$ ($168.07 \pm 145.52 \mu\text{g L}^{-1}$)로 나타났으며, st.92의 약 2000m 수심에서 최솟값, st.85의 약 30m 수심에서 최댓값이 관측되었다(그림 56). 연구 해역에서 무광층 내 용존 유기탄소 농도의 범위는 543.97 - $777.30 \mu\text{g L}^{-1}$ ($654.69 \pm 80.28 \mu\text{g L}^{-1}$)로 나타났으며, st.107의 50m 수심에서 최솟값, st.92의 60m 수심에서 최댓값이 관측되었다(그림 57). 무광층 내 BPC 농도의 범위는 27.59 - $257.81 \mu\text{g L}^{-1}$ ($107.70 \pm 92.40 \mu\text{g L}^{-1}$)로 나타났으며, st.111의 300m 수심에서 최솟값, st.111의 30m 수심에서 최댓값이 관측되었다(그림 58). 무광층 내 TEP_C 농도의 범위는 3.23 - $40.67 \mu\text{g L}^{-1}$ ($15.59 \pm 14.61 \mu\text{g L}^{-1}$)로 나타났으며 st.90의 약 700m 수심에서 최솟값, st.90의 약 50m 수심에서 최댓값이 관측되었다(그림 59). 입자성 유기탄소 농도의 무광층 평균값은 st.85에서 가장 높았으며, Ross Ice Shelf에 인접한 정점과 외해 일부 정점에서 높은 값이 나타났다(그림 70). 용존 유기탄소 농도의 무광층 평균값 또한 st.85에서 가장 높았으며, 전반적으로 외해에서 높은 값이 나타났다(그림 71). BPC의 무광층 평균값은 st.111에서 가장 높았으며, Ross Ice Shelf 인접 정점에서 높은 값이 나타났다(그림 72). TEP_C의 무광층 평균값은 st.85에서 가장 높았으며, 전반적으로 입자성 유기탄소와 유사한 공간 분포 특성을 보였다(그림

73). 입자성 유기탄소, BPC 및 TEP_C 농도는 수심이 증가함에 따라 전반적으로 감소하는 경향을 보인 반면, 용존 유기탄소 농도는 수심이 깊어져도 비교적 일정한 수준을 유지하는 것으로 나타났다.

연구 해역에서 무광층 내 Organic carbon pool에 대한 입자성 유기탄소의 기여도는 6-34% ($17 \pm 11\%$)의 범위를 보였고, st.92의 약 2000m 수심에서 최솟값, st.85의 약 30m 수심에서 최댓값을 보였으며, Organic carbon pool에 대한 용존 유기탄소의 기여도는 66-94% ($83 \pm 11\%$)의 범위를 보였고, st.85의 약 30m 수심에서 최솟값, st.92의 약 2000m 수심에서 최댓값을 보였다(그림 64, 표 7). Organic carbon pool에 대한 입자성 유기탄소 기여도의 무광층 평균값은 st.111에서 가장 높았으며(그림 74), 용존 유기탄소 기여도의 무광층 평균값은 st.92에서 가장 높게 나타났다(그림 75). 전반적으로 무광층 내 Organic carbon pool에서 용존 유기탄소의 기여도는 80% 이상으로 나타났으며, 특히 외해 해역에서 상대적으로 높은 기여도를 보였다. 또한 유광층 평균 기여도와 비교할 때, 무광층에서는 용존 유기탄소의 기여가 현저히 증가하는 경향이 확인되었다. 연구 해역에서 무광층 내 입자성 유기탄소에 대한 BPC의 기여도는 60-90% ($67 \pm 8\%$)의 범위를 보였으며, st.90의 300m 수심에서 최소 기여도를, st.89의 약 3500m 수심에서 최대 기여도를 보였다(그림 67, 표 7). 연구 해역에서 무광층 내 입자성 유기탄소에 대한 TEP_C의 기여도는 7-11% ($9 \pm 1\%$)의 범위를 보였으며, st.89의 700m 수심에서 최소 기여도를, st.92의 700m 수심에서 최대 기여도를 보였다(그림 67, 표 7). 입자성 유기탄소에 대한 BPC 기여도의 무광층 평균값은 st.107에서 가장 높았으며(그림 76), TEP_C의 무광층 평균값은 st.92에서 가장 높게 나타났다(그림 77). 입자성 유기탄소에 대한 BPC 기여도는 Ross Ice Shelf 인접 해역에서 상대적으로 높게 나타난 반면, TEP_C는 Ross Ice Shelf 인접 해역에서는 낮고 외해 해역에서 상대적으로 높게 나타났다. 입자성 유기탄소에 대한 TEP_C의 기여도는 전 수심에서 낮은 수준을 유지하며 수심에 따른 큰 변동은 관측되지 않았다. 반면, BPC의 기여도는 수심에 따라 뚜렷한 변동성을 보였다.

표 1. 연구 해역의 정점 정보

Study region	Station	Latitude	Longitude
Eastern Ross Sea (ANA11A)	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
Eastern Ross Sea (ANA13B)	st.85	-76.41047	-163.4581
	st.88	-76.16748	-163.0986
	st.89	-75	-160
	st.90	-75.5	-161.2121
	st.91	-75.89153	-162.1612
	st.92	-76.01937	-163.5866
	st.100	-76.80697	-163.4635
	st.103	-77.39777	-162.2888
	st.107	-77.71053	-161.853
	st.111	-78.19975	-161.7233
	st.113	-78.4957	-163.923

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 유기탄소	BPC
100	154.20 ± 123.04	137.22 ± 71.49	124.5 ± 48.87	415.93 ± 233.81	485.98 ± 225.06	222.30 ± 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	158.90 ± 124.85	130.76 ± 96.41	127.59 ± 78.60	417.25 ± 291.99	472.75 ± 261.53	223.32 ± 151.90
범위 (평균±표준편차)	14.61-450.71 (139.67 ± 113.33)	21.39-319.74 (123.01 ± 78.31)	32.50-264.53 (120.60 ± 59.91)	78.94-1023.05 (383.28 ± 242.6)	149.58-959.23 (452.82 ± 224.91)	48.53-526.40 (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 = %



표 4. Eastern Ross Sea (ANA13B)의 연구 해역의 유광층에서 탄수화물, 단백질, 지질, FM, 입자성 유기탄소, 용존 유기탄소, BPC, TEP_C 농도의 범위와 수심별 평균 농도

광 수심 (%)	탄수화물	단백질	지질	FM	입자성 유기 탄소	용존 유기 탄소	BPC	TEP_C
100	193.16 ± 80.02	132.93 ± 81.91	153.88 ± 48.85	479.97 ± 187.73	403.96 ± 137.81	777.30 ± 124.29	257.81 ± 97.55	40.67 ± 16.66
30	171.55 ± 39.87	113.65 ± 31.84	142.94 ± 18.37	428.13 ± 59.85	344.60 ± 95.87	772.32 ± 92.58	231.51 ± 31.40	39.67 ± 15.02
1	170.50 ± 73.40	134.96 ± 69.87	141.52 ± 46.50	446.98 ± 162.09	395.18 ± 100.87	785.31 ± 149.09	240.47 ± 85.50	38.28 ± 15.94
범위 (평균±표준편차)	62.85-327.34 (180.60 ± 71.94)	35.31-329.62 (131.51 ± 70.43)	71.87-267.68 (147.12 ± 44.28)	191.01-894.24 (459.23 ± 162.23)	115.53-625.40 (392.97 ± 115.19)	538.86-1046.00 (780.23 ± 128.21)	110.77-481.05 (247.02 ± 84.83)	16.19-70.43 (39.50 ± 15.55)

단위 = $\mu\text{g L}^{-1}$

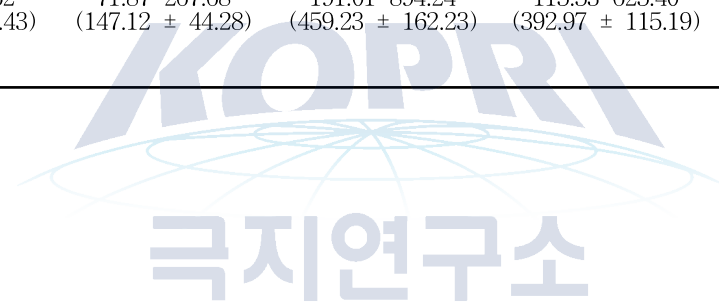


표 5. Eastern Ross Sea (ANA13B)의 연구 해역의 유광층에서 FM에 대한 탄수화물, 단백질, 지질의 비율과 Organic carbon pool에 대한 입자성·용존 유기탄소의 비율 및 입자성 유기탄소에 대한 BPC, TEP_C의 비율

광 수심 (%)	탄수화물	단백질	지질	입자성	용존	BPC/입자성 유기탄소	TEP_C/입자성 유기탄소
				유기탄소/Organic carbon pool	유기탄소/Organic carbon pool		
100	39 ± 8	29 ± 8	32 ± 4	34 ± 9	66 ± 9	66 ± 17	10 ± 3
30	47 ± 7	24 ± 6	28 ± 2	30 ± 4	70 ± 4	69 ± 14	11 ± 2
1	38 ± 7	27 ± 8	35 ± 6	34 ± 8	66 ± 8	60 ± 11	10 ± 3
범위 (평균±표준편차)	29-52 (39 ± 8)	17-44 (28 ± 8)	23-49 (33 ± 5)	10-45 (33 ± 8)	55-90 (67 ± 8)	42-97 (64 ± 14)	6-17 (10 ± 3)

단위 = %



표 6. Eastern Ross Sea (ANA13B)의 연구 해역의 무광층에서 입자성 유기탄소, 용존 유기탄소, BPC, TEP_C 농도의 범위와 수심별 평균 농도

수심 (m)	입자성 유기탄소	용존 유기탄소	BPC	TEP_C
30	354.99 ± 146.09	705.15 ± 101.21	213.53 ± 75.30	29.35 ± 12.97
50	239.73 ± 101.55	709.18 ± 242.61	149.34 ± 66.37	21.56 ± 12.08
60	186.76 ± 80.00	726.02 ± 327.20	119.40 ± 57.13	17.94 ± 10.20
100	106.23 ± 43.78	611.93 ± 86.32	68.60 ± 27.11	8.35 ± 4.44
150	99.62 ± 28.21	628.35 ± 104.29	59.36 ± 20.82	8.69 ± 4.59
200	84.01 ± 21.60	610.11 ± 90.27	51.36 ± 14.88	6.89 ± 4.40
300	63.59 ± 20.67	582.85 ± 51.53	35.87 ± 11.68	4.65 ± 1.71
500	53.09 ± 16.82	593.21 ± 58.30	32.39 ± 4.97	4.01 ± 1.19
700	65.89 ± 34.54	581.82 ± 50.53	44.39 ± 23.48	5.11 ± 2.45
1000	45.48 ± 12.07	662.94 ± 141.27	34.18 ± 8.74	4.50 ± 0.68
1500	46.28 ± 19.25	610.64 ± 97.66	30.32 ± 2.50	4.15 ± 0.81
2000	47.76 ± 25.60	563.35 ± 60.34	29.89 ± 7.80	3.78 ± 1.20
3000	47.78 ± 6.09	543.97 ± 18.84	27.59 ± 2.33	3.23 ± 0.61
3500	34.67	580.39	40.38	3.32
범위 (평균±표준편차)	34.67-403.96 (168.07 ± 145.52)	543.97-777.30 (654.69 ± 80.28)	27.59-257.81 (107.70 ± 92.40)	3.23-40.67 (15.59 ± 14.61)

단위 = $\mu\text{g L}^{-1}$

표 7. Eastern Ross Sea (ANA13B)의 연구 해역의 무광층에서 수심별 Organic carbon pool에 대한 입자성·용존 유기탄소의 비율 및 입자성 유기탄소에 대한 BPC, TEP_C의 비율

수심 (m)	입자성 유기탄소/Organic carbon pool	용존 유기탄소/Organic carbon pool	BPC/입자성 유기탄소	TEP_C/입자성 유기탄소
30	33 ± 9	67 ± 9	63 ± 16	9 ± 3
50	25 ± 9	75 ± 9	63 ± 15	9 ± 2
60	21 ± 8	79 ± 8	64 ± 16	9 ± 2
100	15 ± 5	85 ± 5	67 ± 20	8 ± 3
150	14 ± 4	86 ± 4	61 ± 18	8 ± 3
200	12 ± 3	88 ± 3	62 ± 16	8 ± 3
300	10 ± 3	90 ± 3	60 ± 19	8 ± 3
500	8 ± 3	92 ± 3	63 ± 18	9 ± 6
700	10 ± 5	90 ± 5	60 ± 28	11 ± 11
1000	7 ± 2	93 ± 2	72 ± 22	11 ± 3
1500	7 ± 3	93 ± 3	73 ± 25	11 ± 6
2000	8 ± 4	92 ± 4	74 ± 32	11 ± 9
3000	8 ± 1	92 ± 1	60 ± 1	7 ± 2
3500	6	94	90	10
범위 (평균±표준편차)	6-34 (17 ± 11)	66-94 (83 ± 11)	60-90 (67 ± 8)	7-11 (9 ± 1)

단위 = %

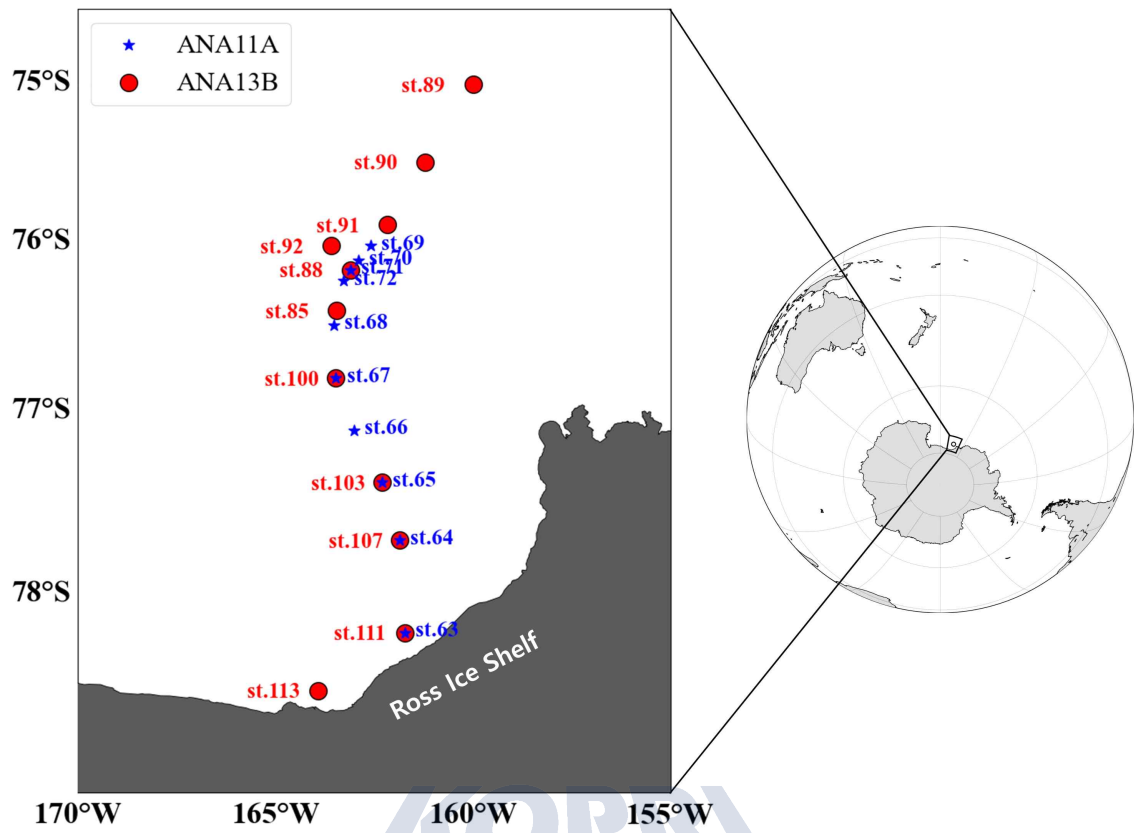


그림 1. 연구 해역(Eastern Ross Sea, *: ANA11A, ●: ANA13B).

극지연구소

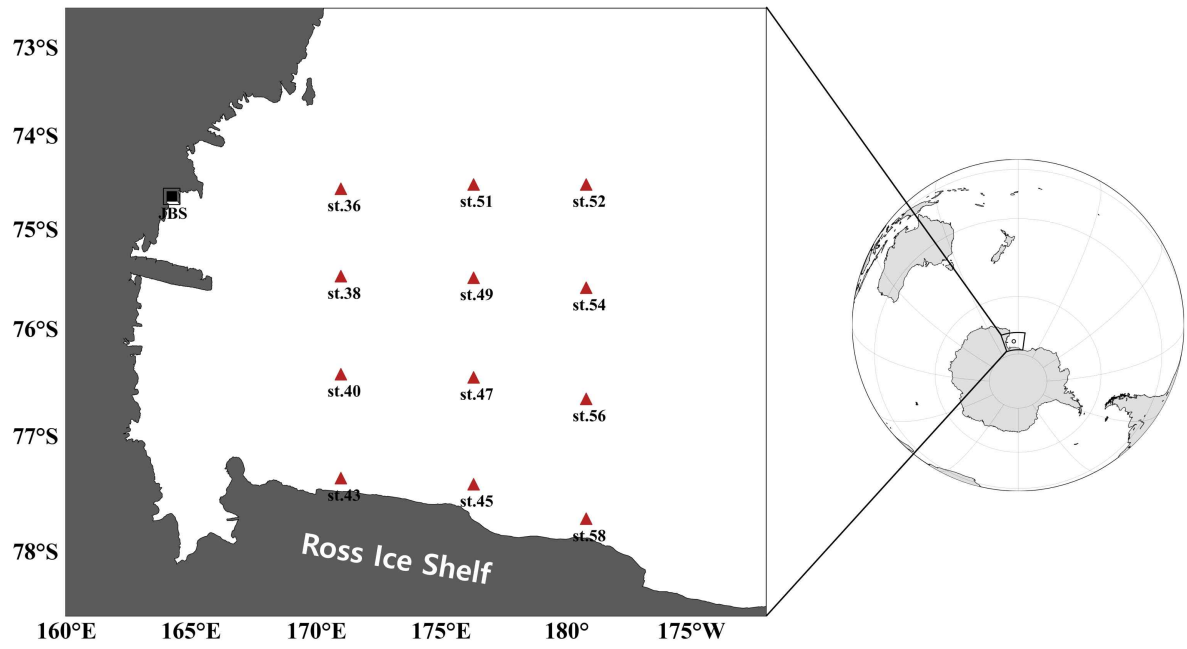


그림 2. 연구 해역(Western Ross Sea, ▲: ANA11A cruise, ■: JBS).



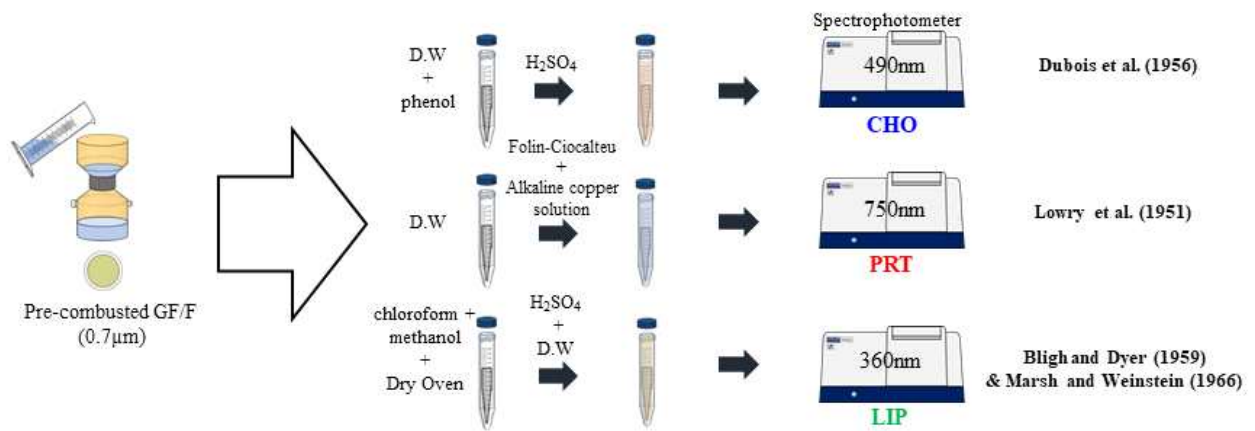


그림 3. 탄수화물, 단백질, 지질 정량 분석 방법.



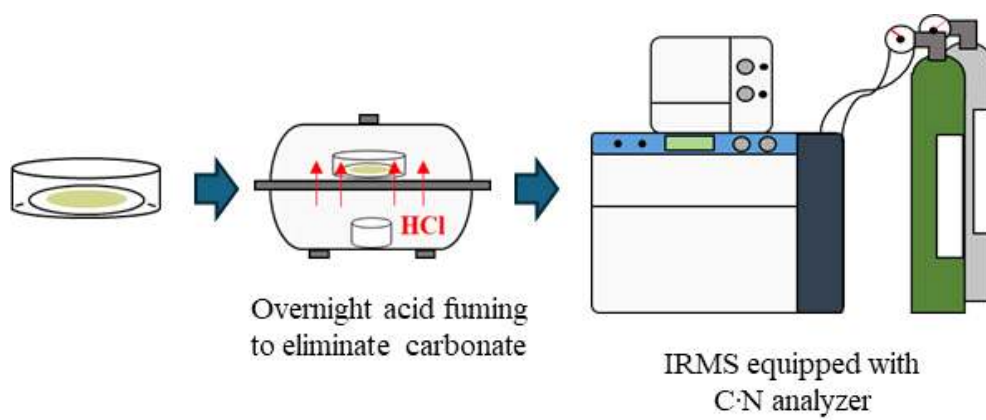


그림 4. 입자성 유기탄소 분석 방법.



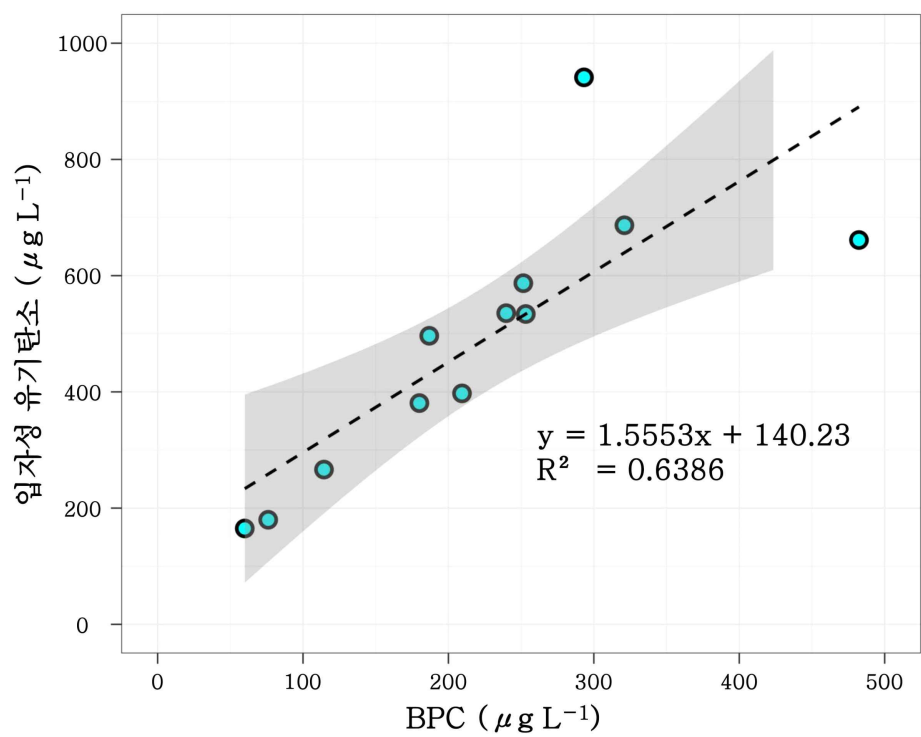


그림 5. Western Ross Sea의 연구 해역에서 입자성 유기탄소와 BPC의 상관관계(표층).



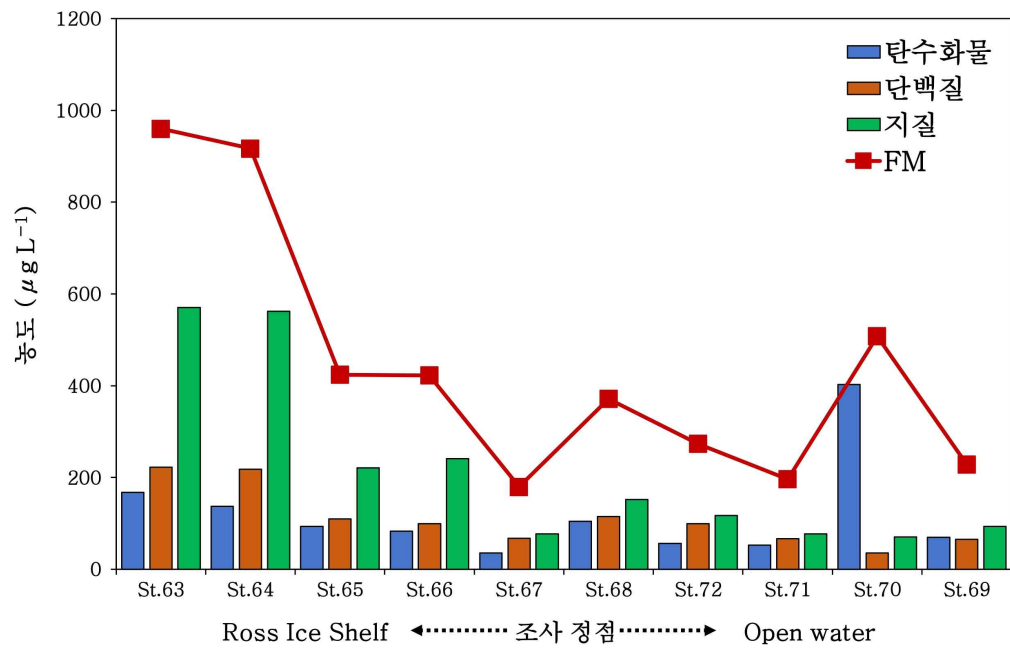


그림 6. Eastern Ross Sea (ANA11A)의 연구 해역에서 표층 식물플랑크톤의 탄수화물, 단백질, 지질 농도.



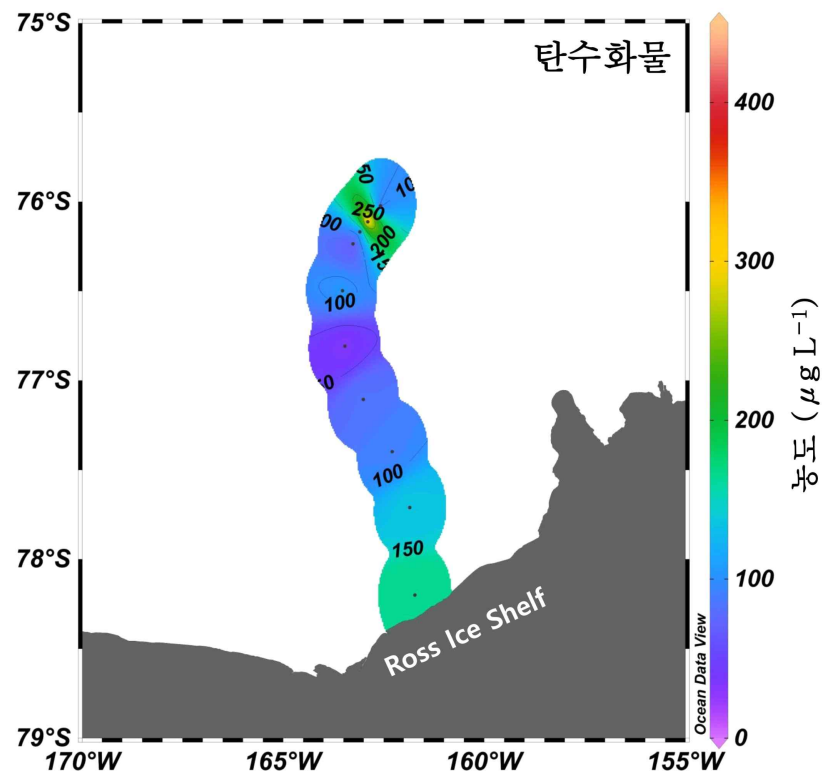


그림 7. Eastern Ross Sea (ANA11A)의 연구 해역의 표층에서 탄수화물 농도의 공간 분포.



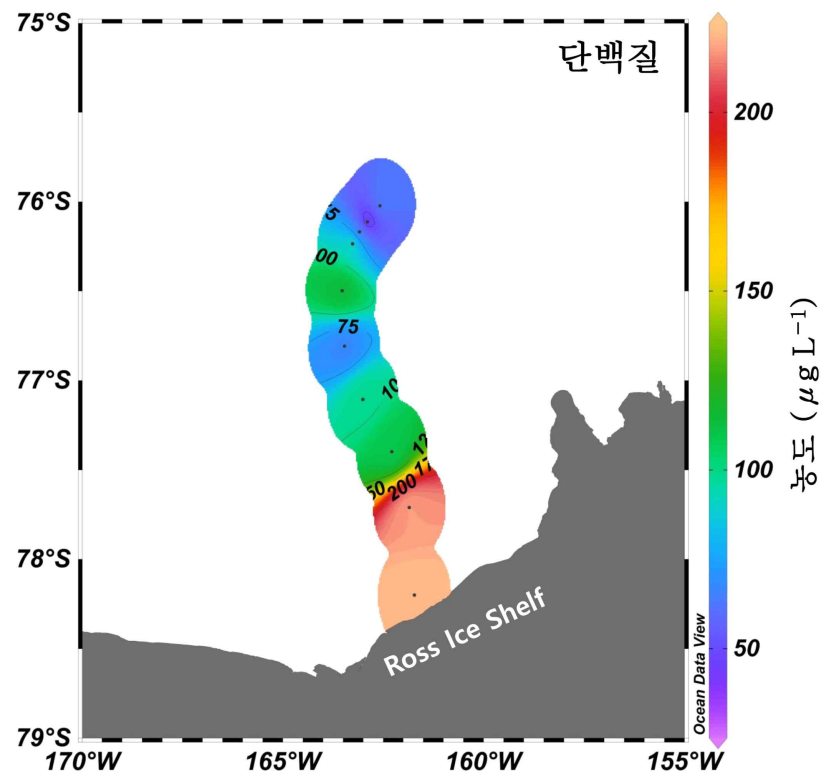


그림 8. Eastern Ross Sea (ANA11A)의 연구 해역의 표층에서 단백질 농도의 공간 분포.



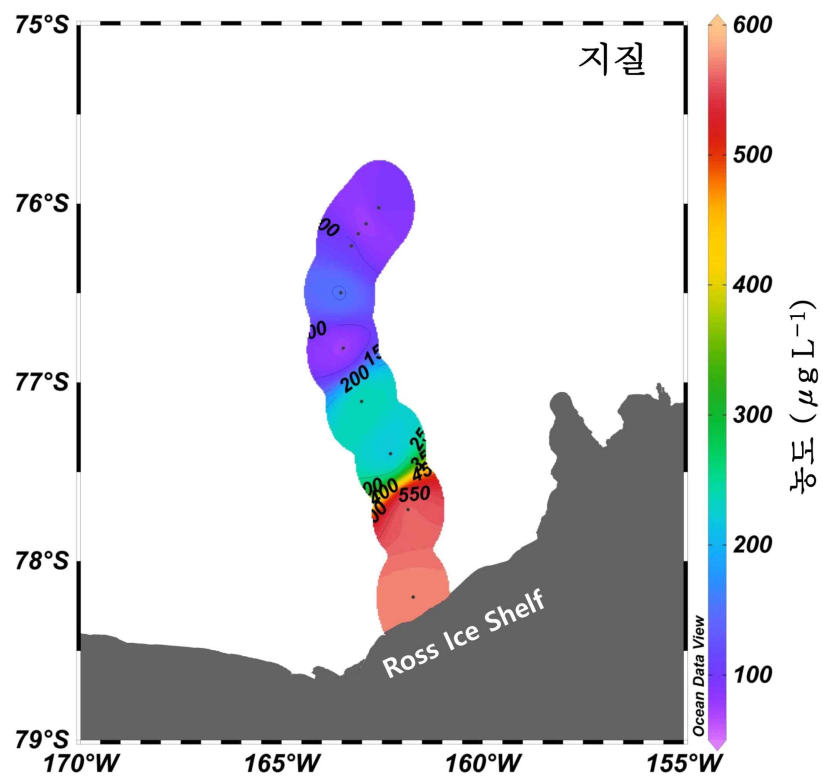


그림 9. Eastern Ross Sea (ANA11A)의 연구 해역의 표층에서 지질 농도의 공간 분포.



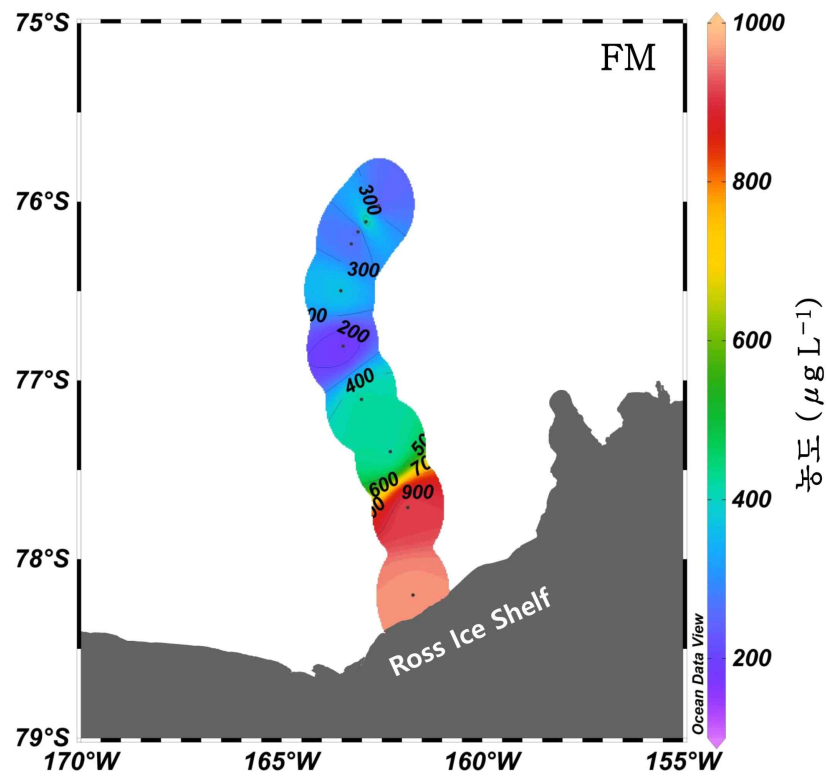


그림 10. Eastern Ross Sea (ANA11A)의 연구 해역의 표층에서 FM 농도의 공간 분포.



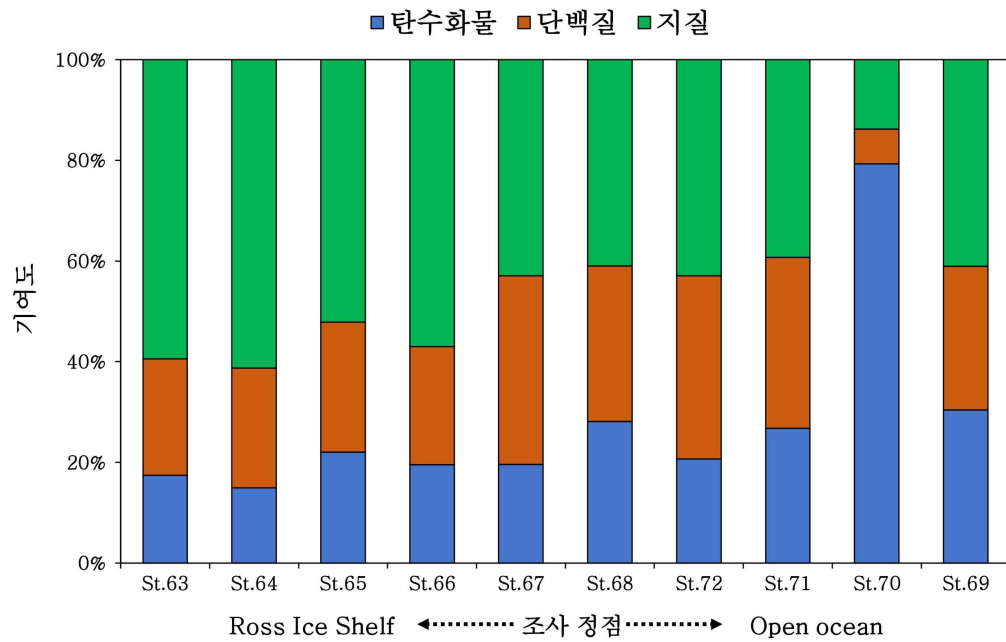


그림 11. Eastern Ross Sea (ANA11A)의 연구 해역의 표층에서 FM에 대한 탄수화물, 단백질, 지질의 기여도.



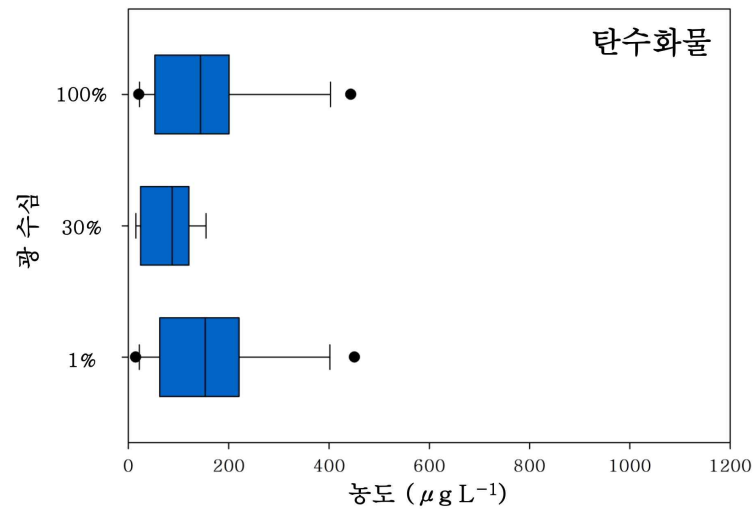


그림 12. Western Ross Sea의 연구 해역에서 유광층 내 탄수화물 농도의 수직 분포.



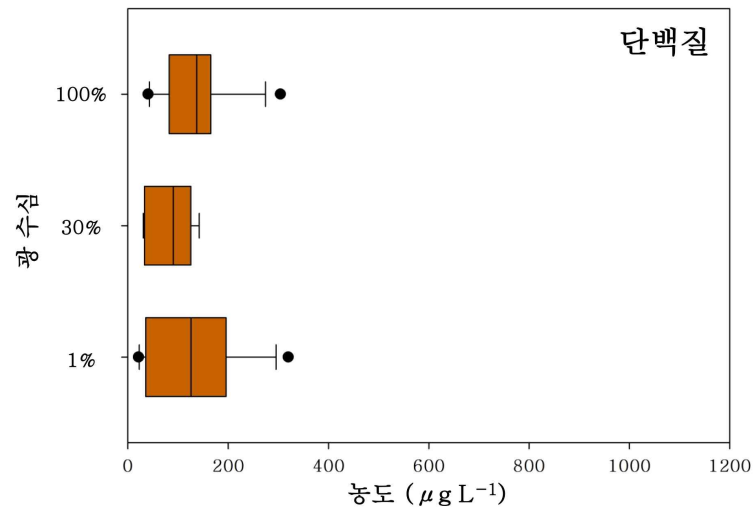


그림 13. Western Ross Sea의 연구 해역에서 유광층 내 단백질 농도의 수직 분포.



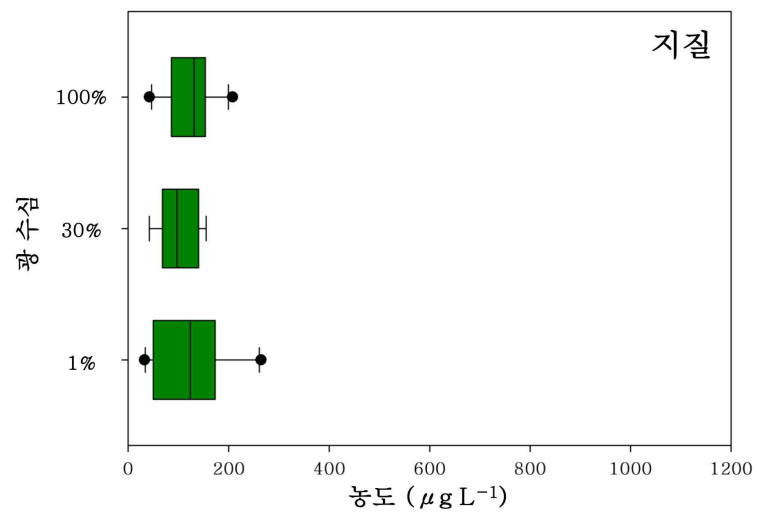


그림 14. Western Ross Sea의 연구 해역에서 유광층 내 지질 농도의 수직 분포.



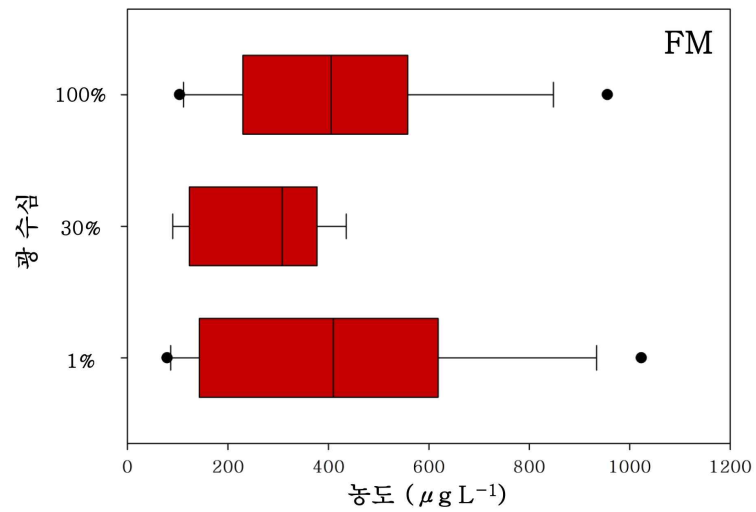


그림 15. Western Ross Sea의 연구 해역에서 유광층 내 FM 농도의 수직 분포.



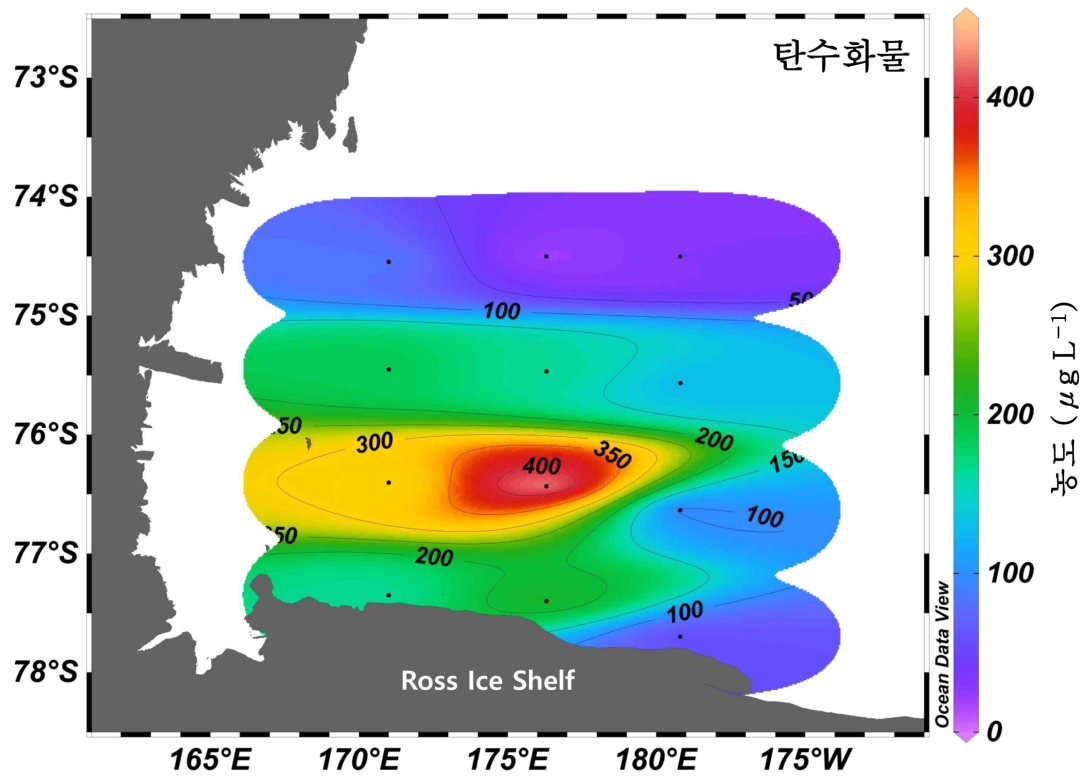


그림 16. Western Ross Sea의 연구 해역에서 탄수화물 농도의 공간 분포(유광층 평균).



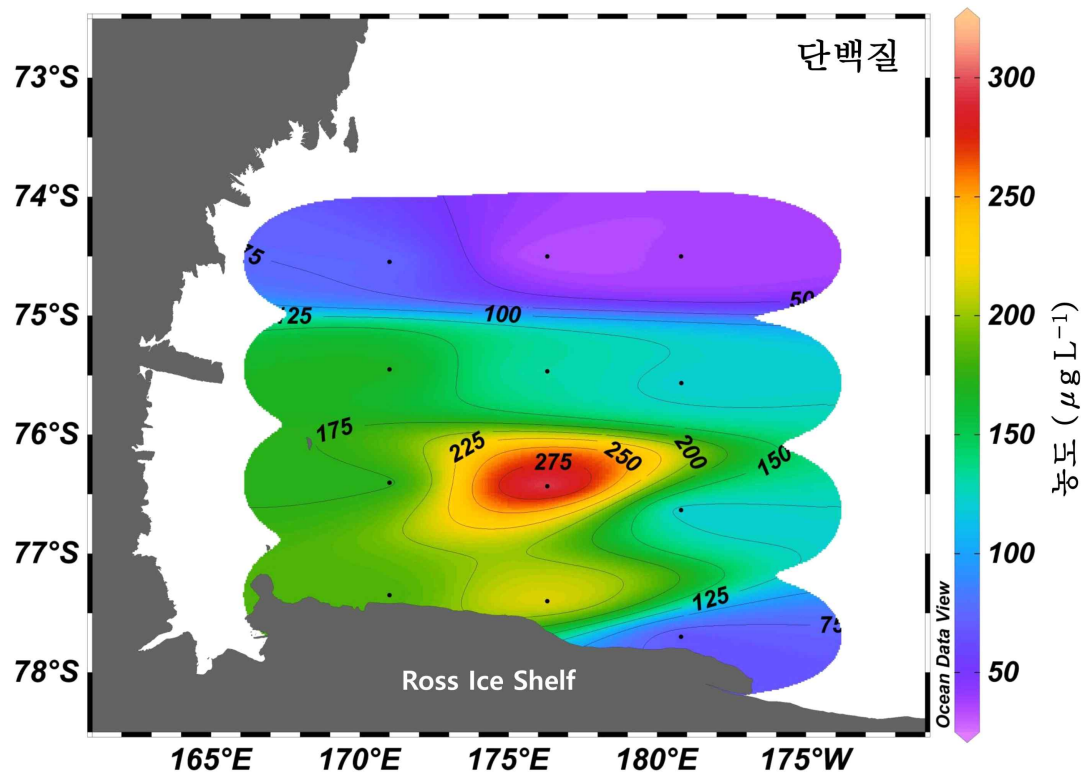


그림 17. Western Ross Sea의 연구 해역에서 단백질 농도의 공간 분포(유광층 평균).



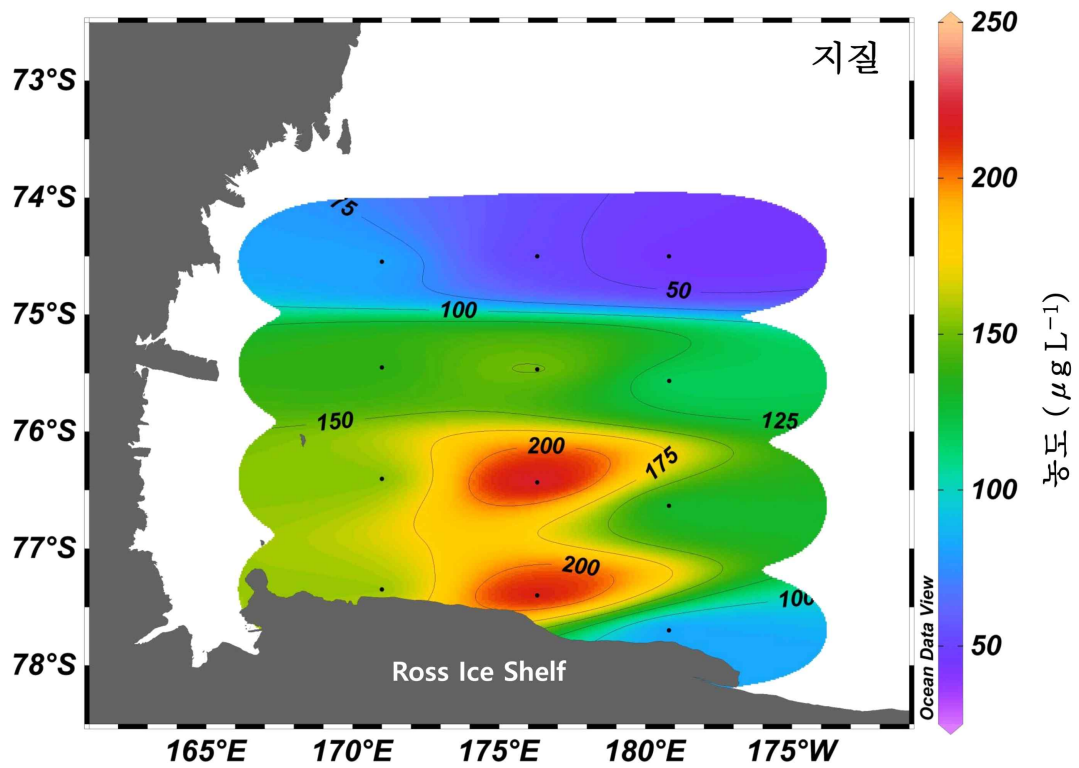


그림 18. Western Ross Sea의 연구 해역에서 지질 농도의 공간 분포(유광층 평균).



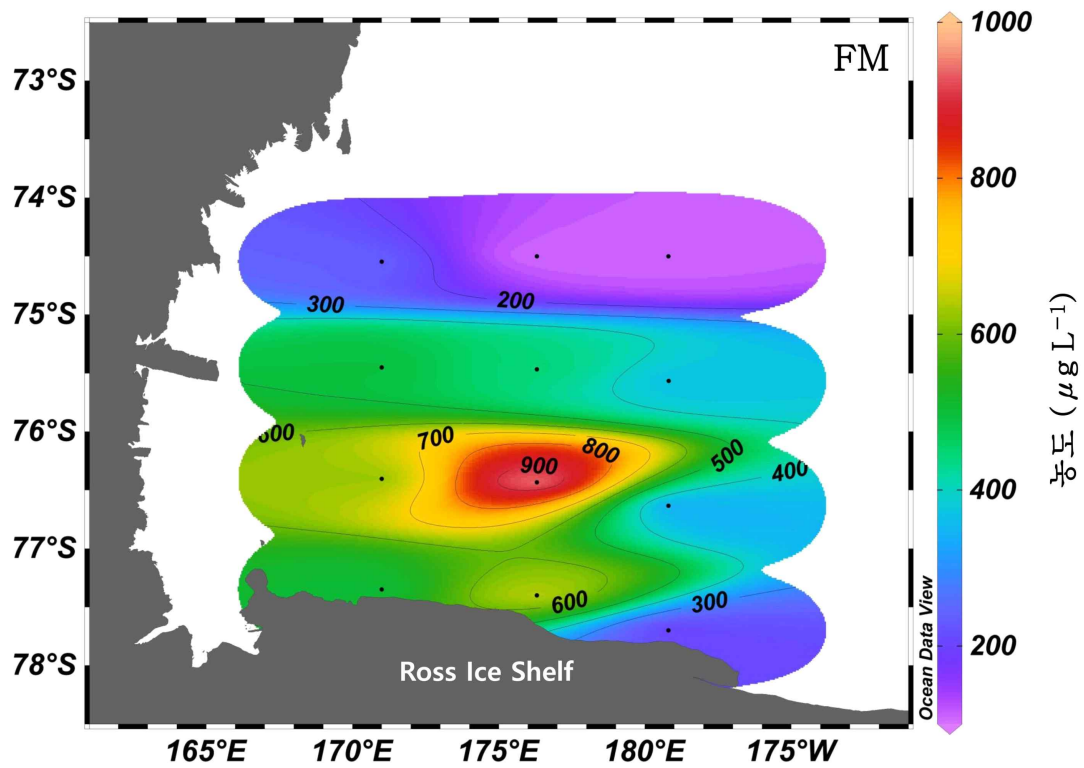


그림 19. Western Ross Sea의 연구 해역에서 FM 농도의 공간 분포(유광층 평균).



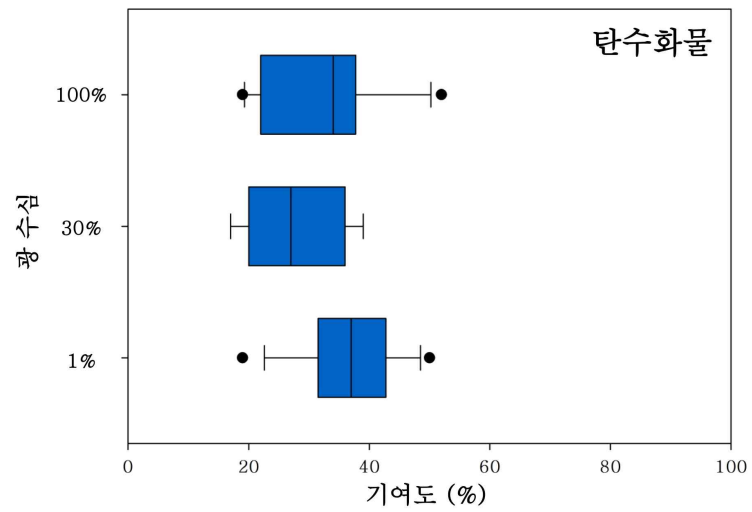


그림 20. Western Ross Sea의 연구 해역에서 유광층 내 FM에 대한 탄수화물 기여도의 수직 분포.



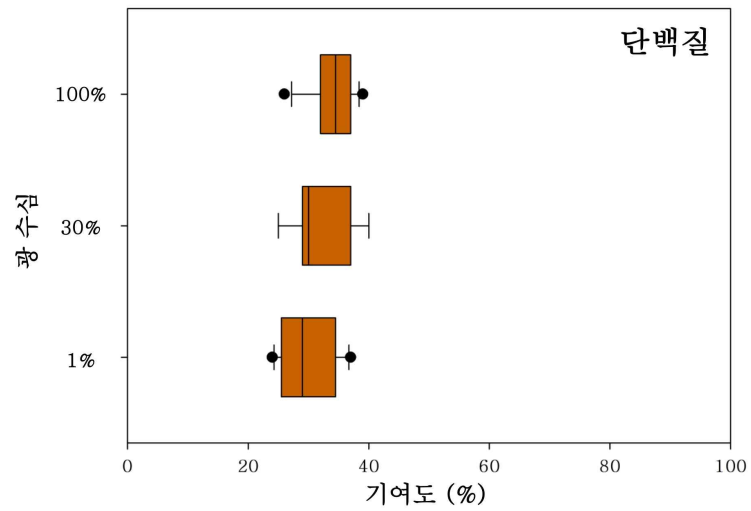


그림 21. Western Ross Sea의 연구 해역에서 유광층 내 FM에 대한 단백질 기여도의 수직 분포.



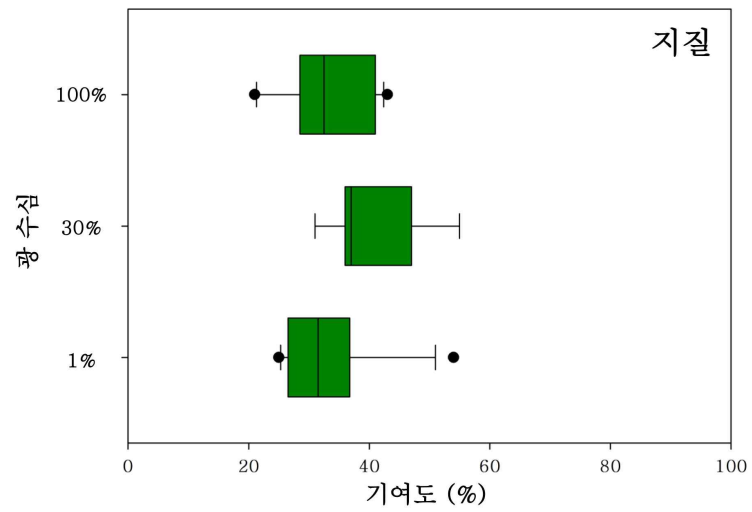


그림 22. Western Ross Sea의 연구 해역에서 유광층 내 FM에 대한 지질 기여도의 수직 분포.



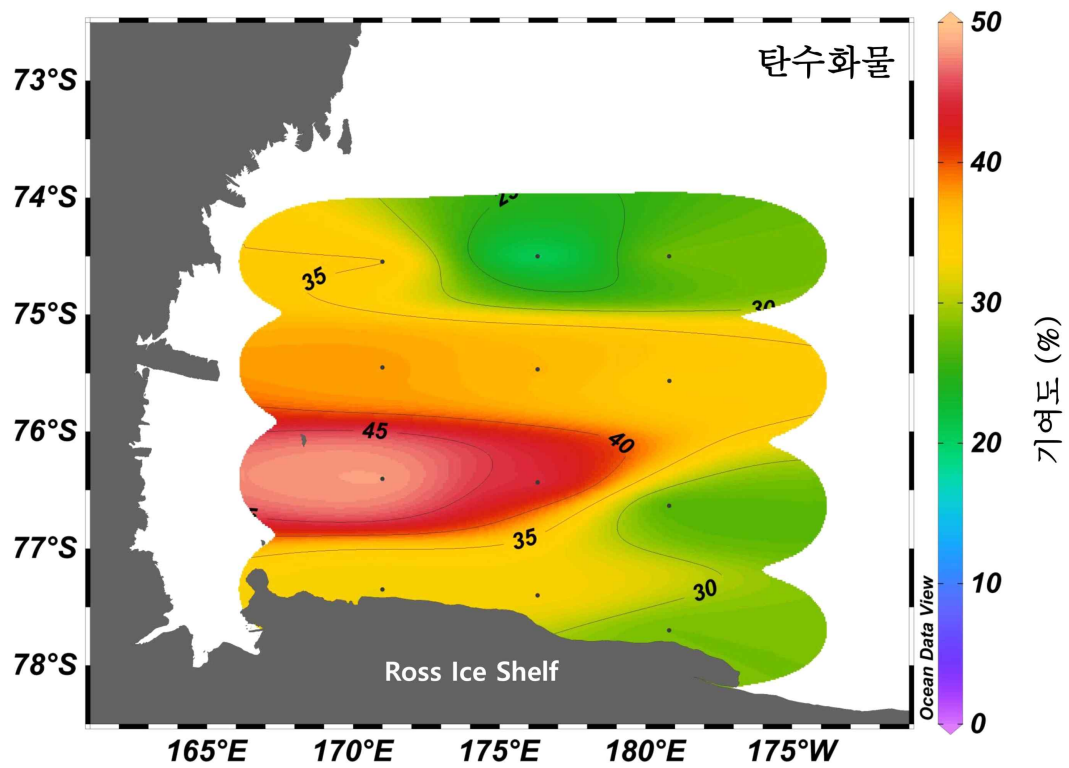


그림 23. Western Ross Sea의 연구 해역에서 FM에 대한 탄수화물 기여도의 공간 분포(유광층 평균).



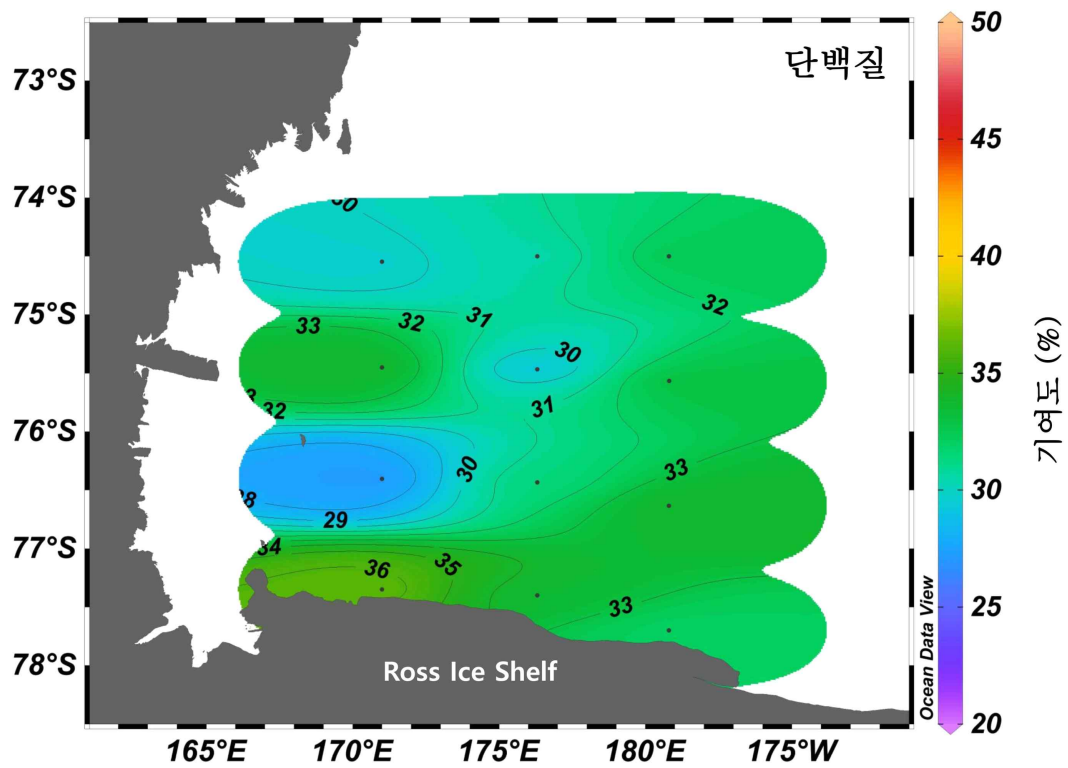


그림 24. Western Ross Sea의 연구 해역에서 FM에 대한 단백질 기여도의 공간 분포(유광층 평균).



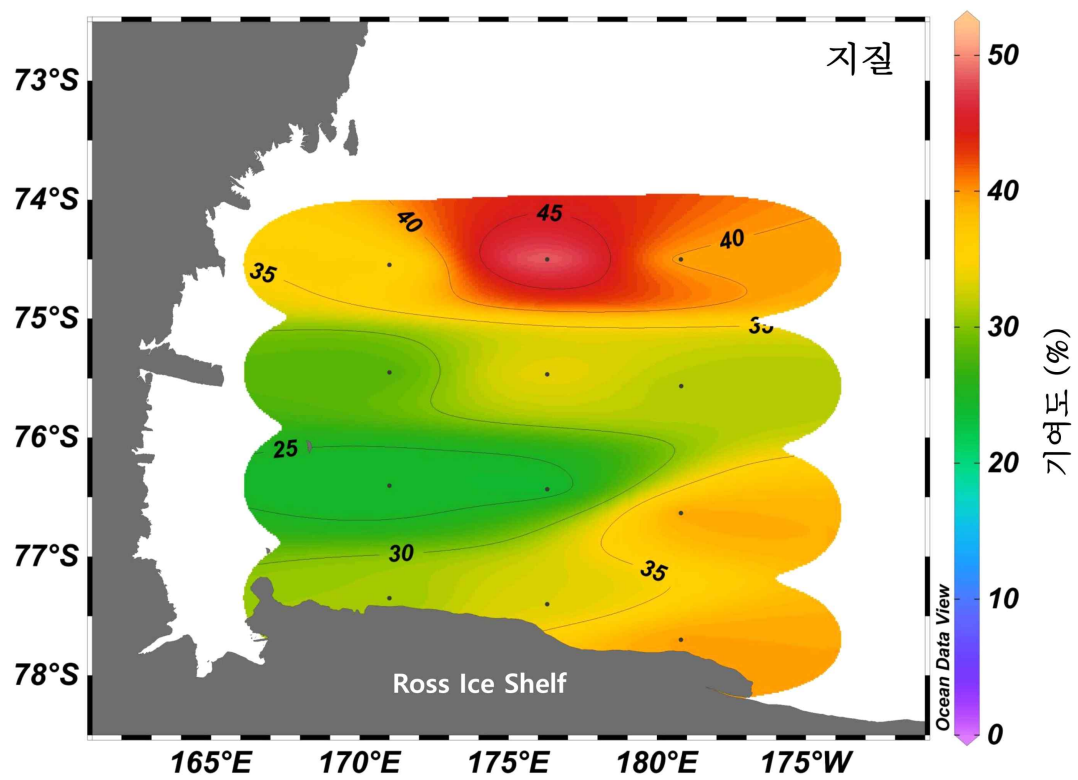


그림 25. Western Ross Sea의 연구 해역에서 FM에 대한 지질 기여도의 공간 분포(유광층 평균).



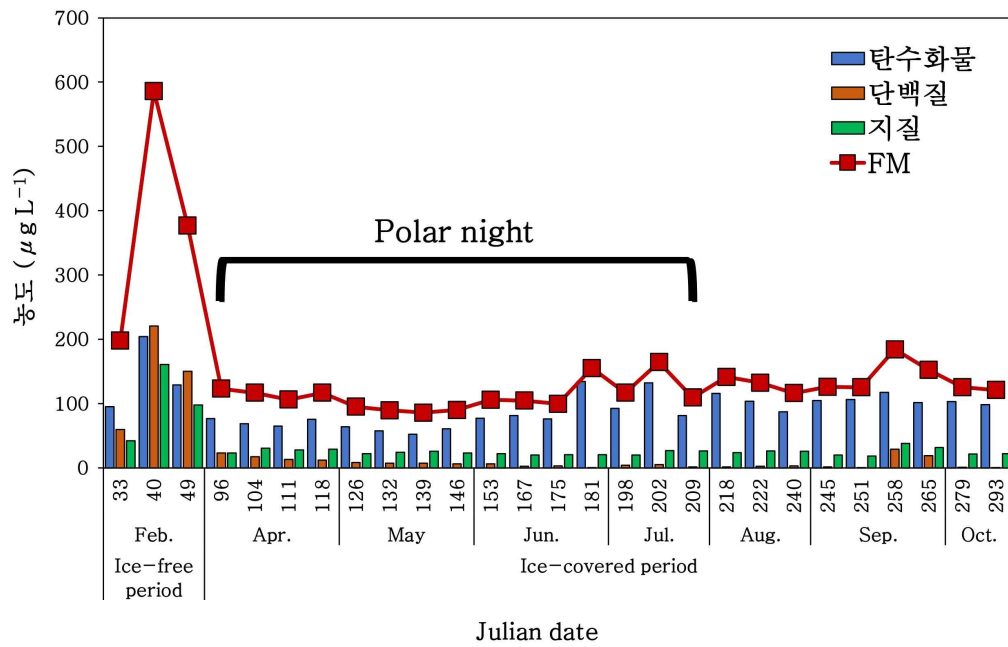


그림 26. Western Ross Sea의 Terra Nova Bay에 위치한 JBS의 표층에서 탄수화물, 단백질, 지질, FM 농도의 시계열 분포(2015).



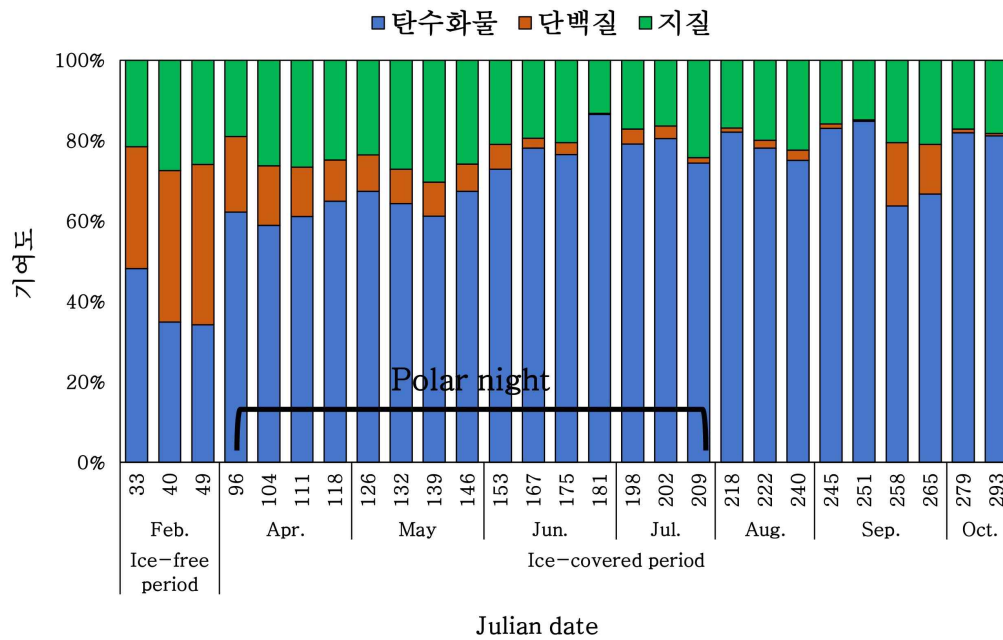


그림 27. Western Ross Sea의 Terra Nova Bay에 위치한 JBS의 표층에서 FM에 대한 탄수화물, 단백질, 지질 기여도의 시계열 분포(2015).



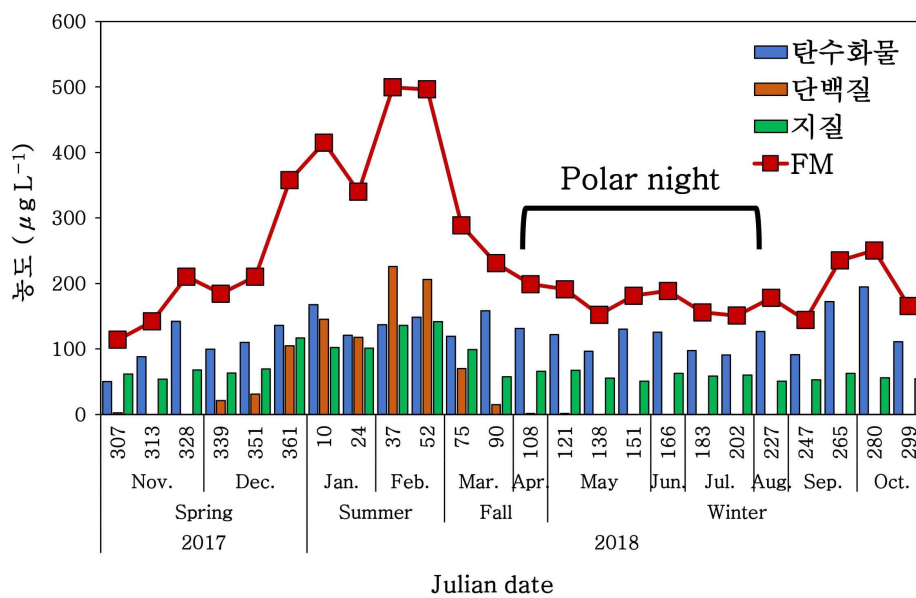


그림 28. Western Ross Sea의 Terra Nova Bay에 위치한 JBS의 표층에서 탄수화물, 단백질, 지질, FM 농도의 시계열 분포(2017-2018).



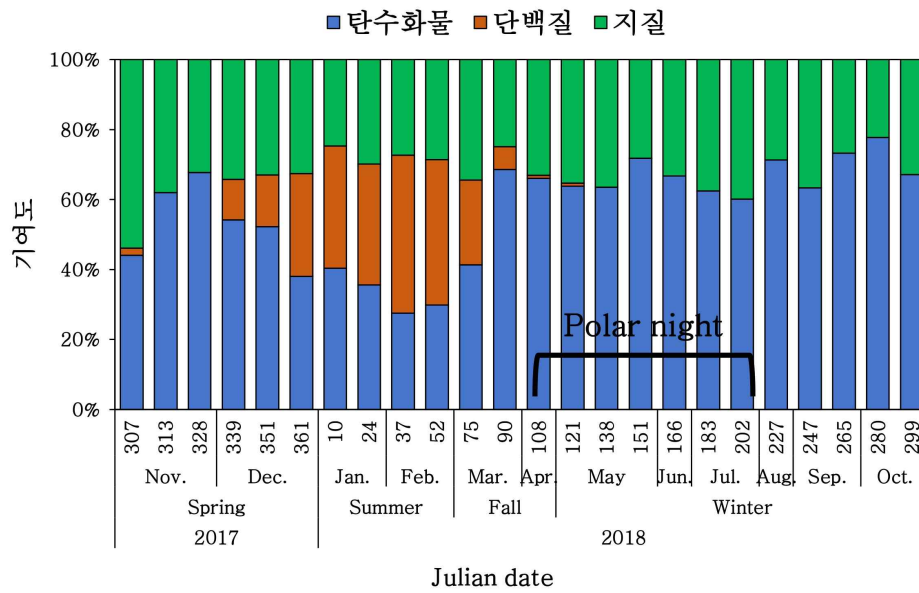


그림 29. Western Ross Sea의 Terra Nova Bay에 위치한 JBS의 표층에서 FM에 대한 탄수화물, 단백질, 지질 기여도의 시계열 분포 (2017-2018).



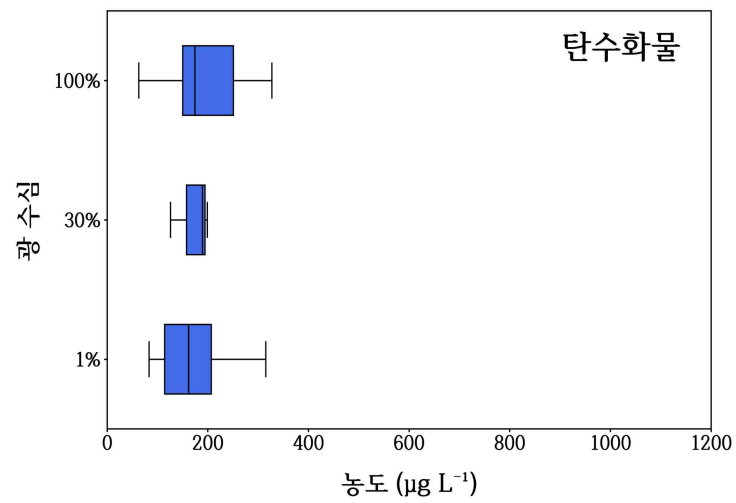


그림 30. Eastern Ross Sea (ANA13B)의 연구 해역에서 유광층 내 탄수화물 농도의 수직 분포.



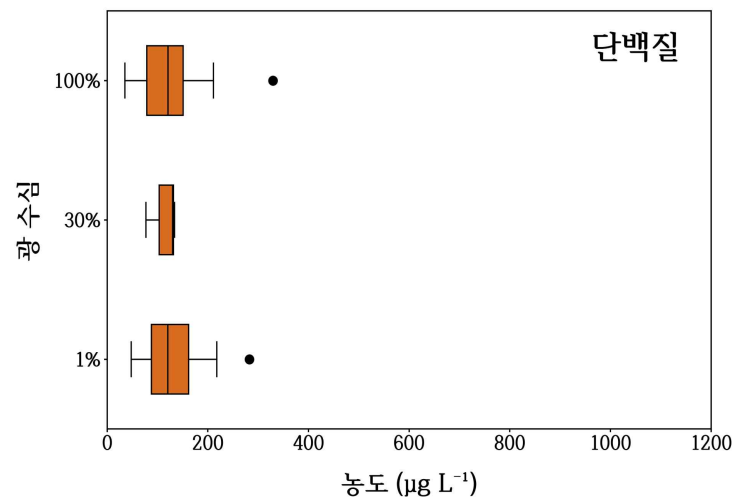


그림 31. Eastern Ross Sea (ANA13B)의 연구 해역에서 유광층 내 단백질 농도의 수직 분포.



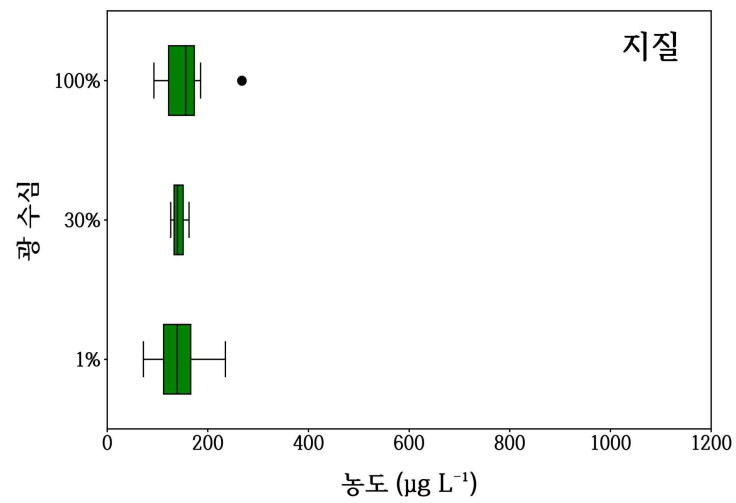


그림 32. Eastern Ross Sea (ANA13B)의 연구 해역에서 유광층 내 지질 농도의 수직 분포.



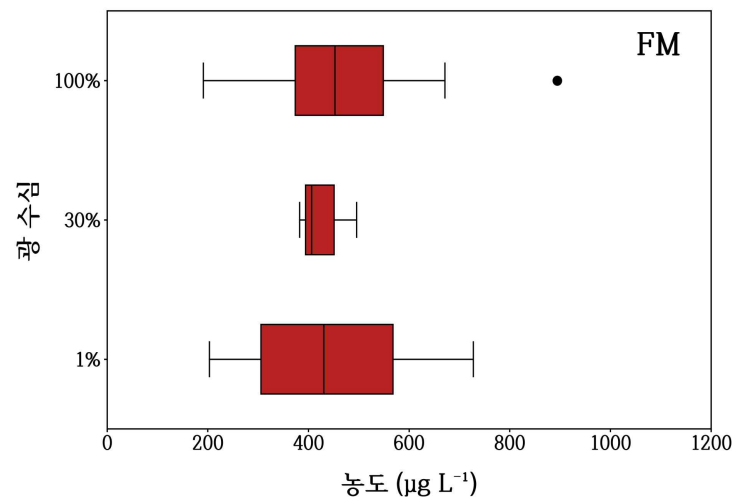


그림 33. Eastern Ross Sea (ANA13B)의 연구 해역에서 유광층 내 FM 농도의 수직 분포.



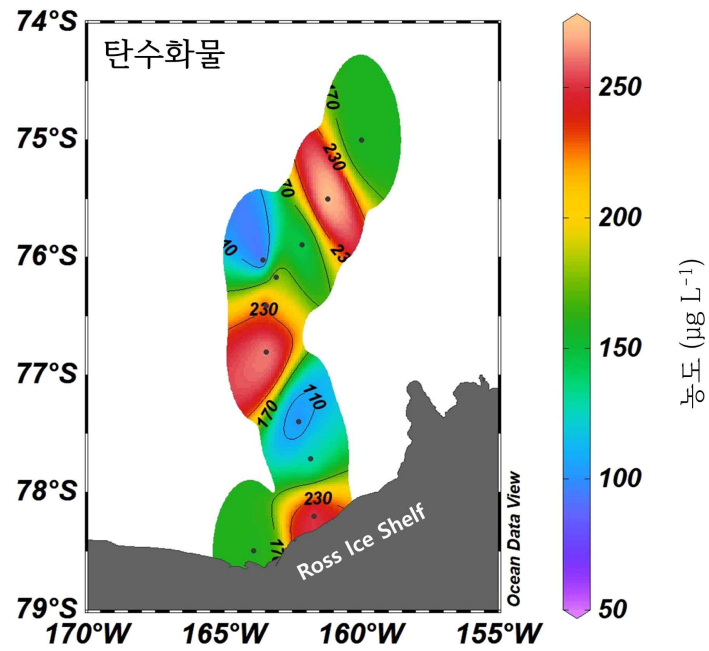


그림 34. Eastern Ross Sea (ANA13B)의 연구 해역에서 탄수화물 농도의 공간 분포(유광층 평균).



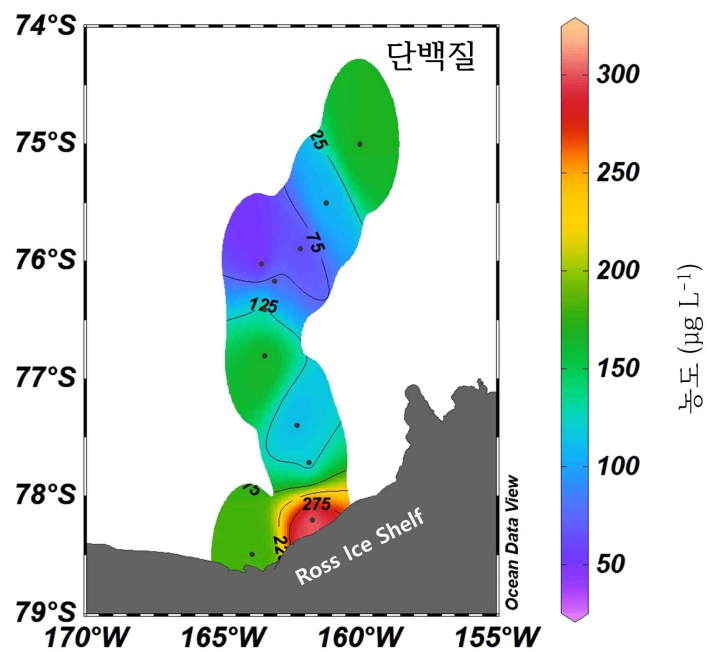


그림 35. Eastern Ross Sea (ANA13B)의 연구 해역에서 단백질 농도의 공간 분포(유광층 평균).



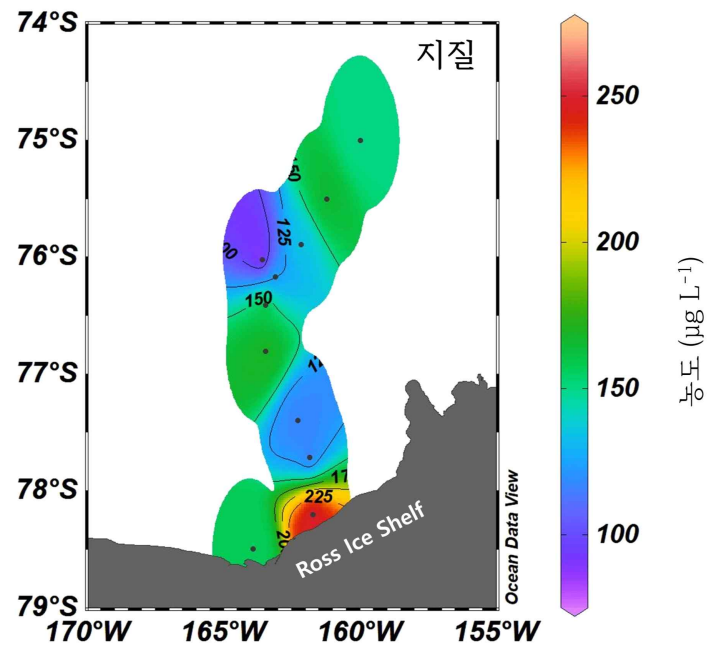


그림 36. Eastern Ross Sea (ANA13B)의 연구 해역에서 지질 농도의 공간 분포(유광층 평균).



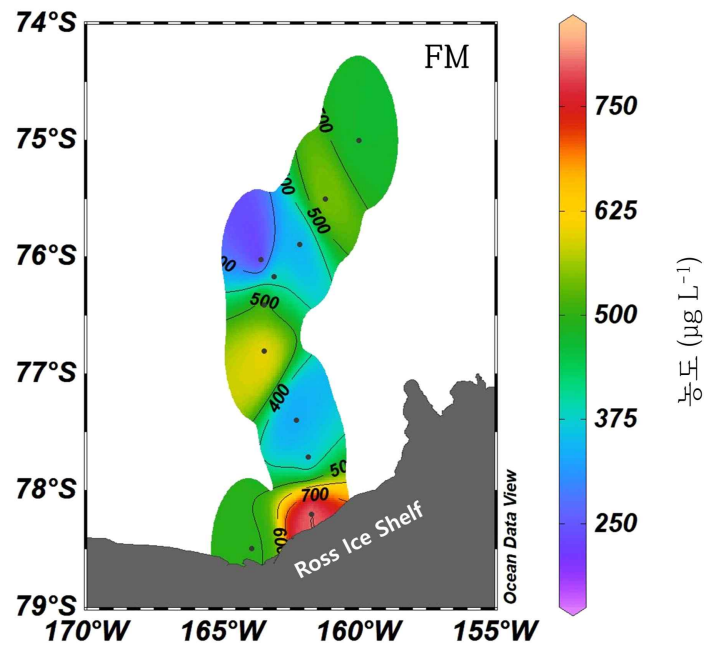


그림 37. Eastern Ross Sea (ANA13B)의 연구 해역에서 FM 농도의 공간 분포(유광층 평균).



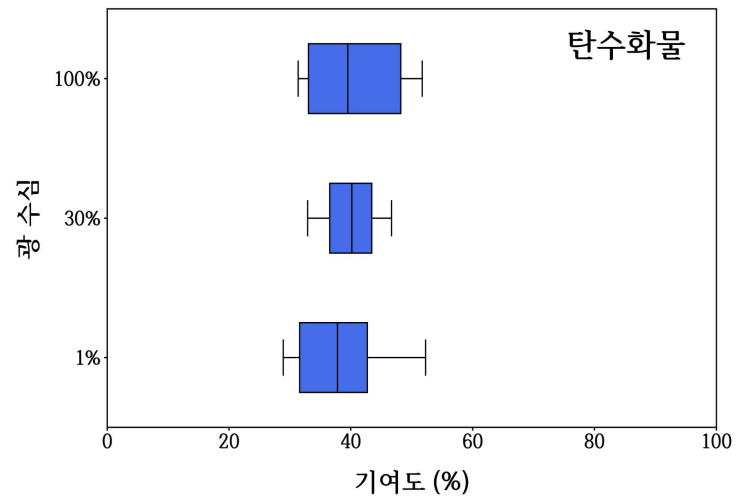


그림 38. Eastern Ross Sea (ANA13B)의 연구 해역에서 유광층 내 FM에 대한 탄소화물 기여도의 수직 분포.



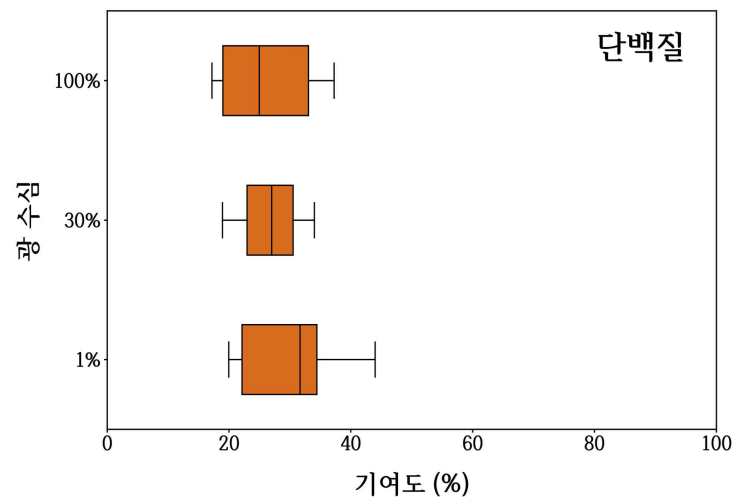


그림 39. Eastern Ross Sea (ANA13B)의 연구 해역에서 유광층 내 FM에 대한 단백질 기여도의 수직 분포.



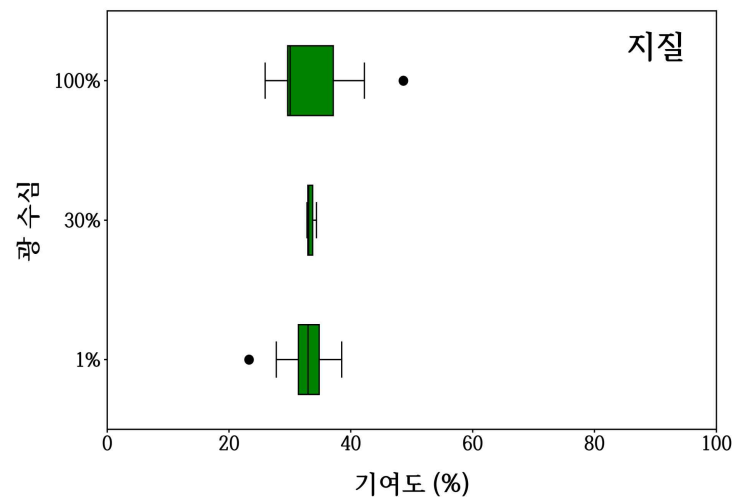


그림 40. Eastern Ross Sea (ANA13B)의 연구 해역에서 유광층 내 FM에 대한 지질 기여도의 수직 분포.



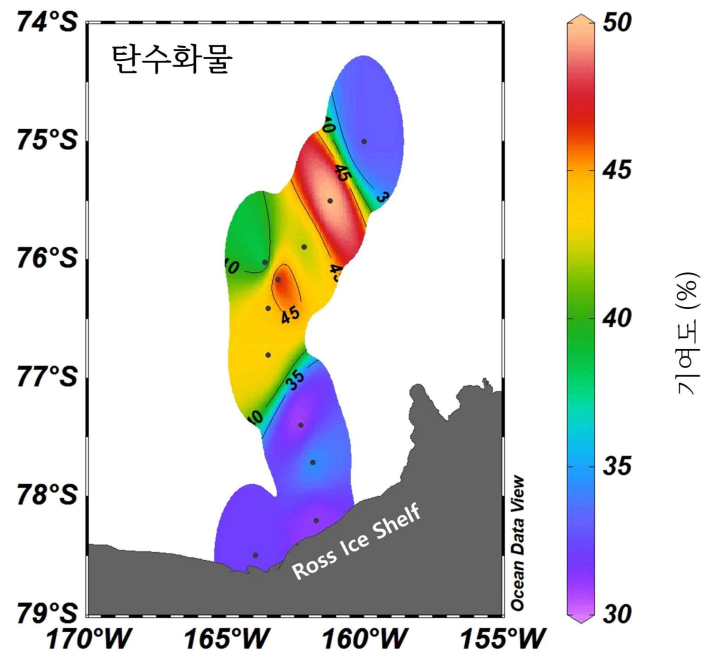


그림 41. Eastern Ross Sea (ANA13B)의 연구 해역에서 FM에 대한 탄수화물 기여도의 공간 분포(유광층 평균).



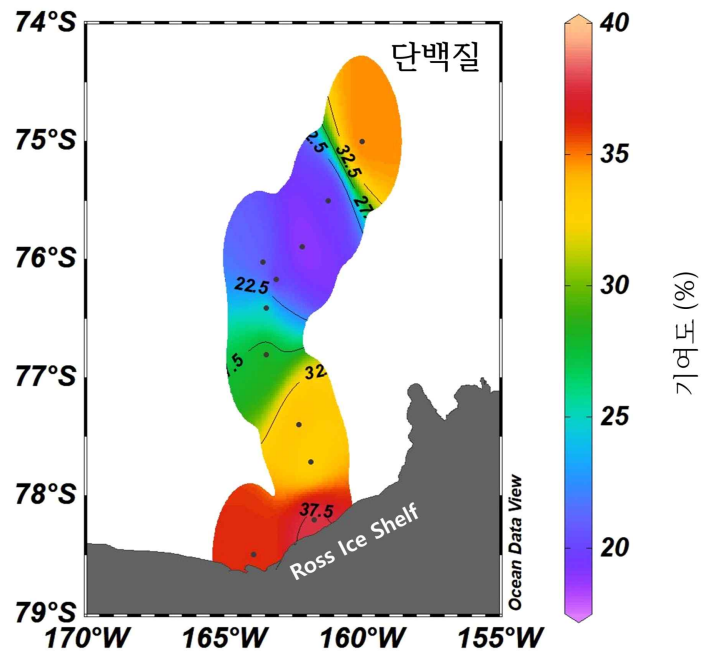


그림 42. Eastern Ross Sea (ANA13B)의 연구 해역에서 FM에 대한 단백질 기여도의 공간 분포(유광층 평균).



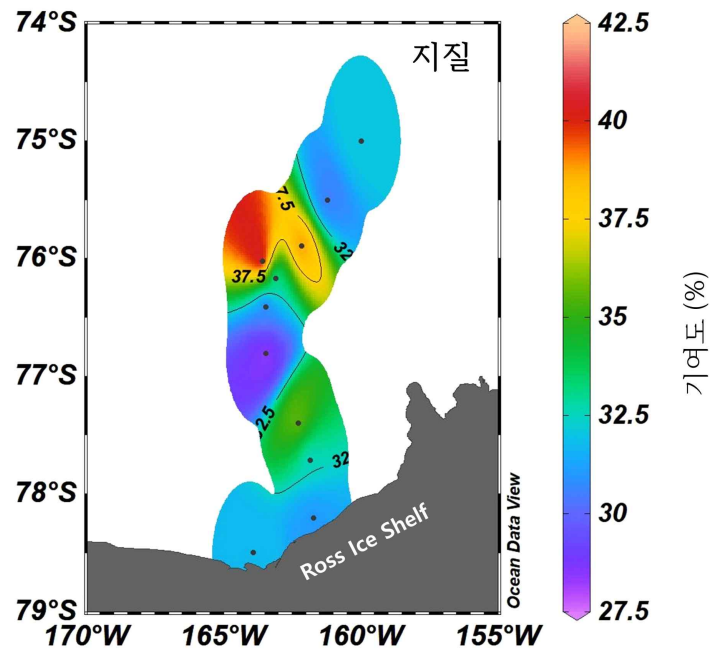


그림 43. Eastern Ross Sea (ANA13B)의 연구 해역에서 FM에 대한 지질 기여도의 공간 분포(유광층 평균).



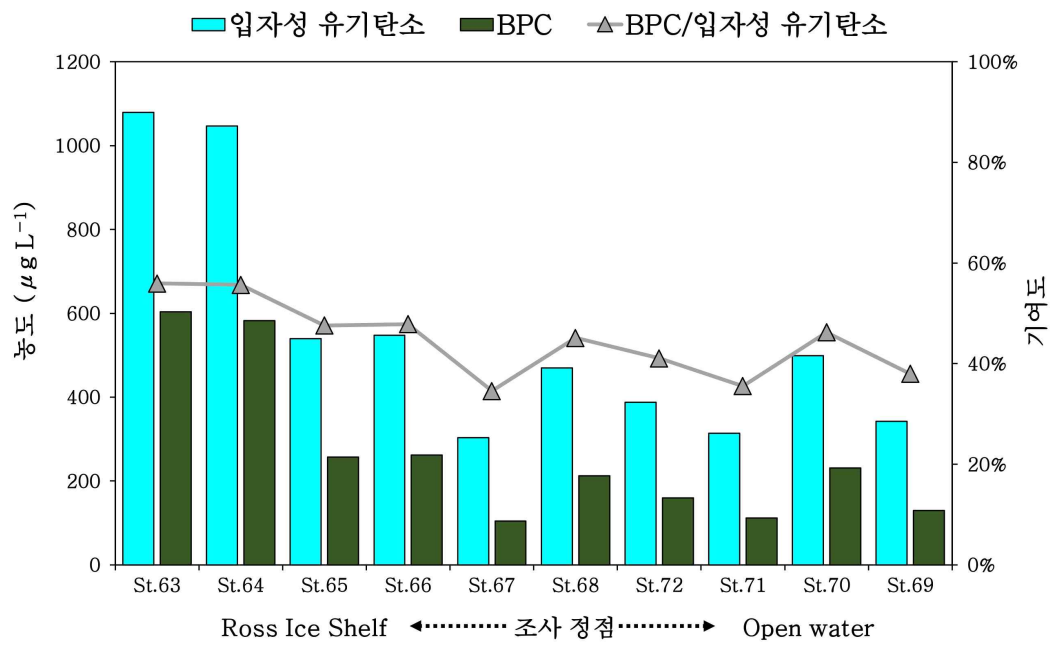


그림 44. Eastern Ross Sea (ANA11A)의 연구 해역 표층에서 입자성 유기탄소와 BPC 농도.



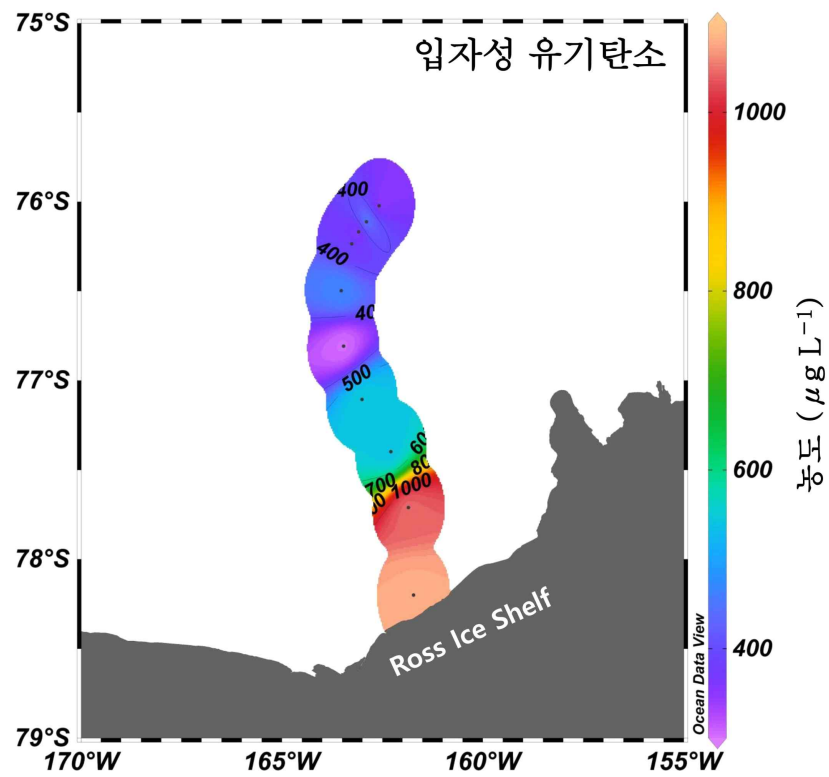


그림 45. Eastern Ross Sea (ANA11A)의 연구 해역 표층에서 입자성 유기탄소의 공간 분포.



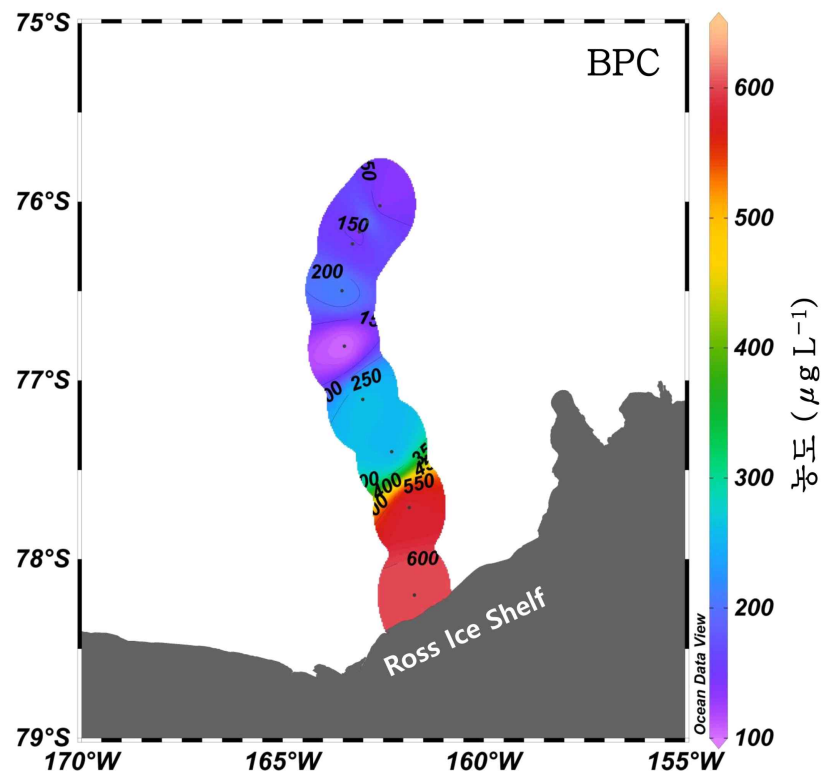


그림 46. Eastern Ross Sea (ANA11A)의 연구 해역 표층에서 BPC의 공간 분포.



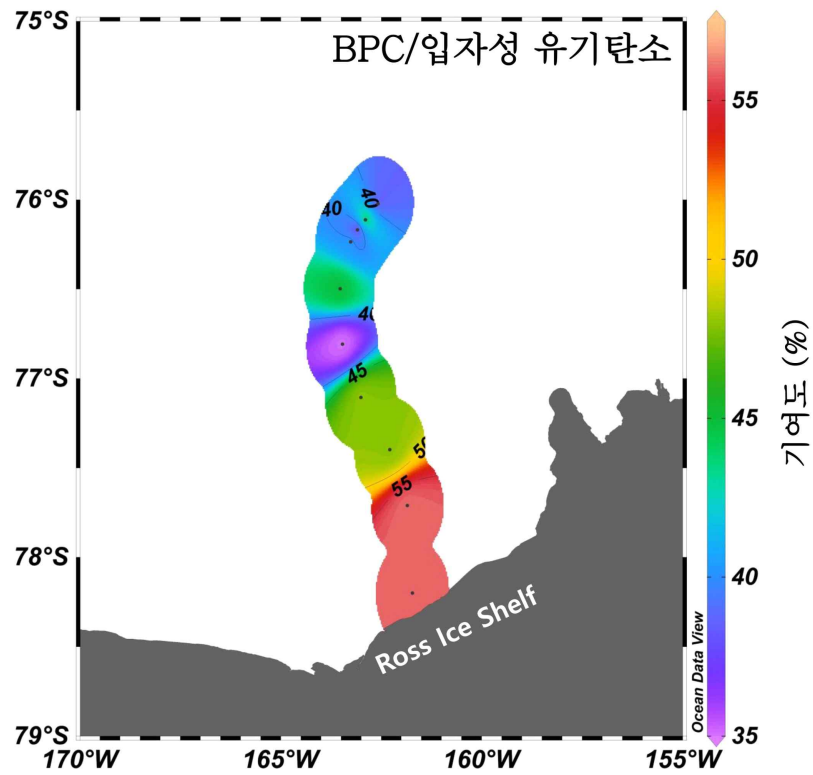


그림 47. Eastern Ross Sea (ANA11A)의 연구 해역 표층에서 입자성 유기탄소에 대한 BPC 기여도의 공간 분포.



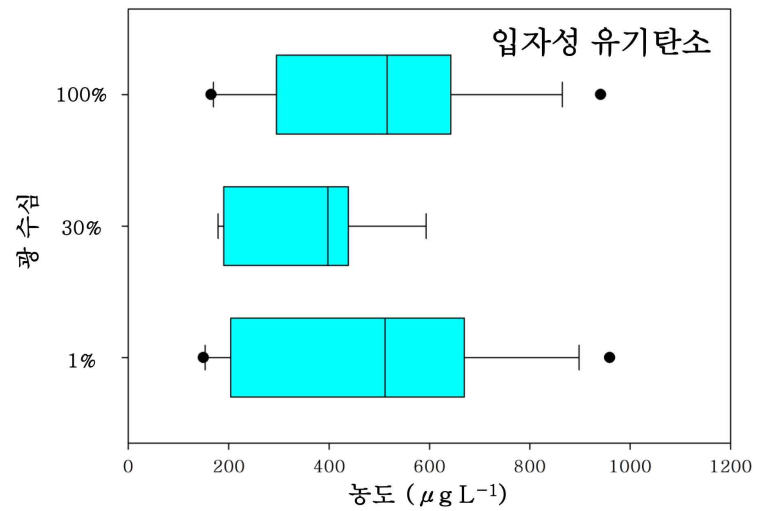


그림 48. Western Ross Sea의 연구 해역에서 유광층 내 입자성 유기탄소 농도의 수직 분포.



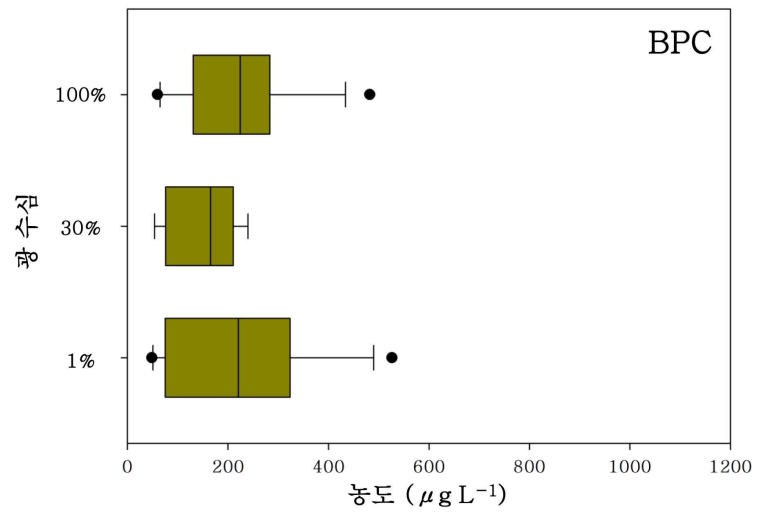


그림 49. Western Ross Sea의 연구 해역에서 유광층 내 BPC 농도의 수직 분포.



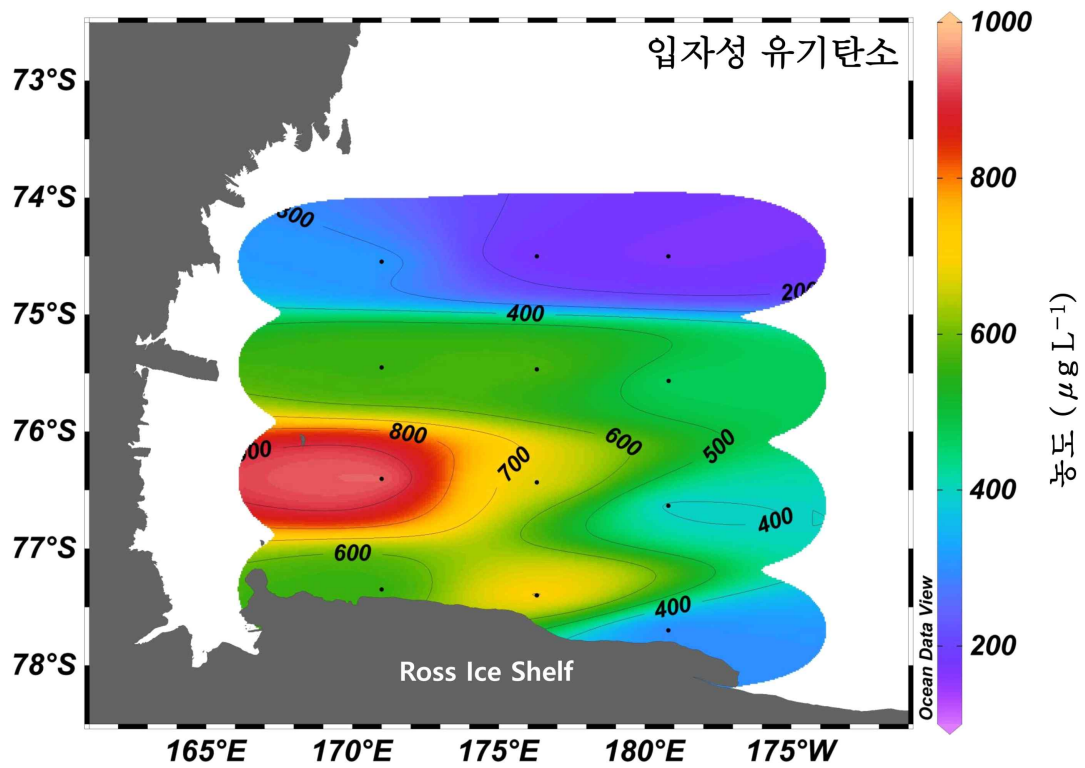


그림 50. Western Ross Sea의 연구 해역에서 입자성 유기탄소 농도의 공간 분포 (유광층 평균).



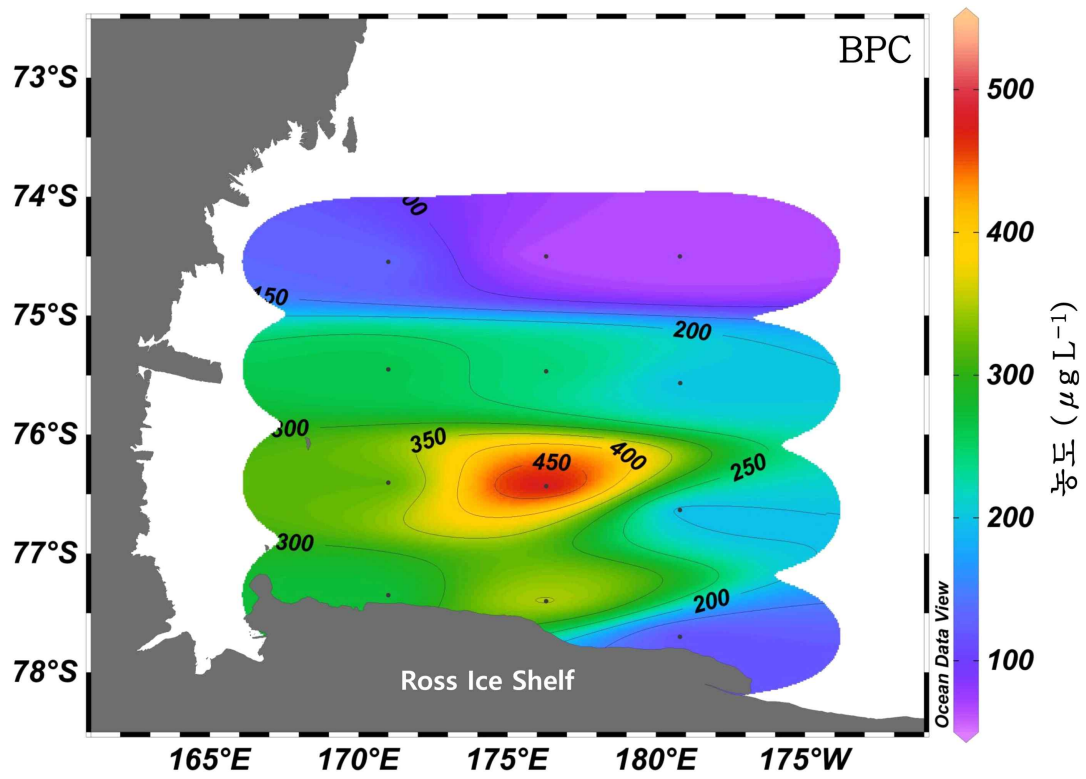


그림 51. Western Ross Sea의 연구 해역에서 BPC 농도의 공간 분포(유광층 평균).



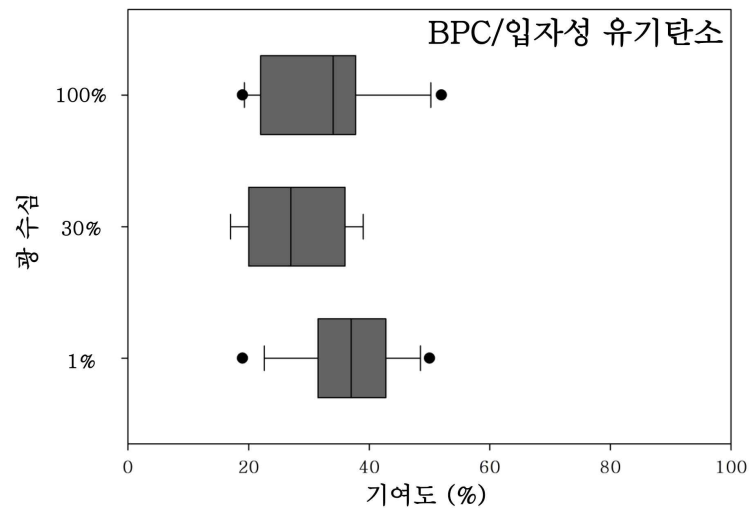


그림 52. Western Ross Sea의 연구 해역에서 유광층 내 입자성 유기탄소에 대한 BPC 기여도의 수직 분포.



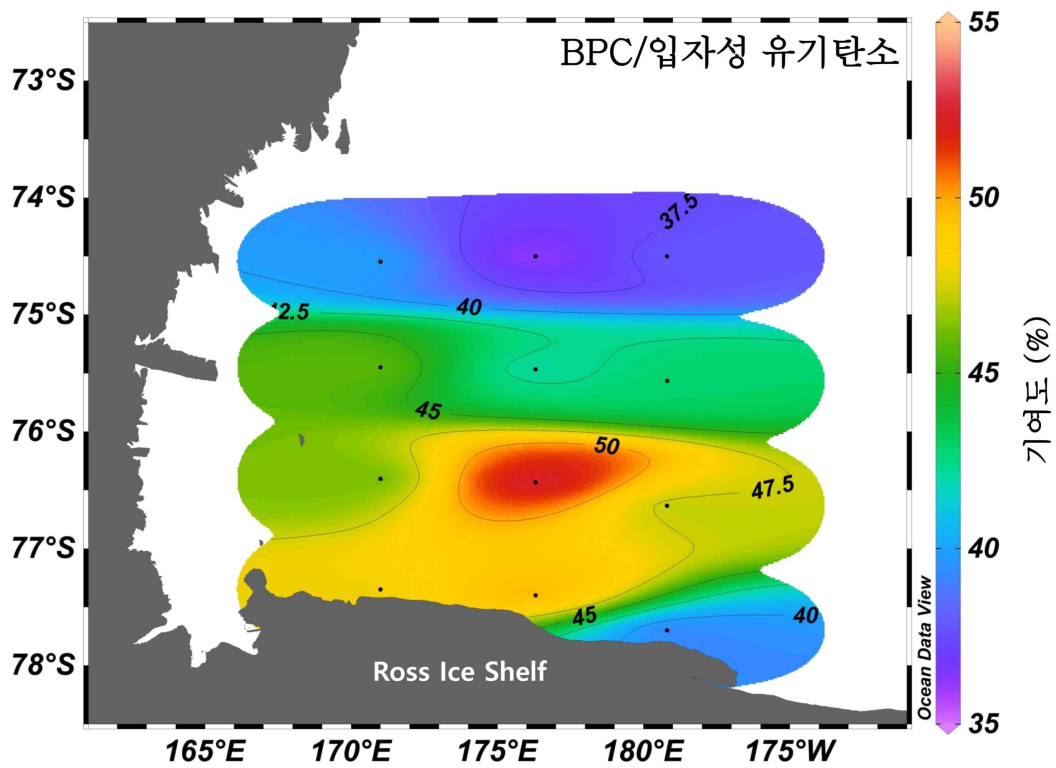


그림 53. Western Ross Sea의 연구 해역에서 입자성 유기탄소에 대한 BPC 기여도의 공간 분포(유광층 평균).



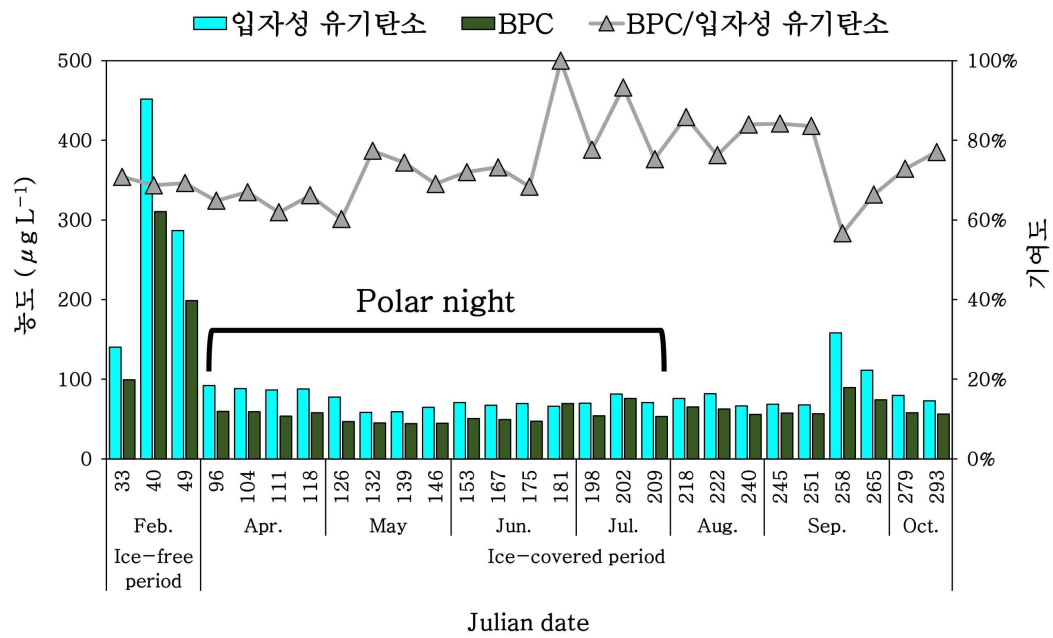


그림 54. Western Ross Sea의 Terra Nova Bay에 위치한 JBS의 표층에서 입자성 유기탄소, BPC 농도 및 입자성 유기탄소에 대한 BPC 기여도의 시계열 분포 (2015).



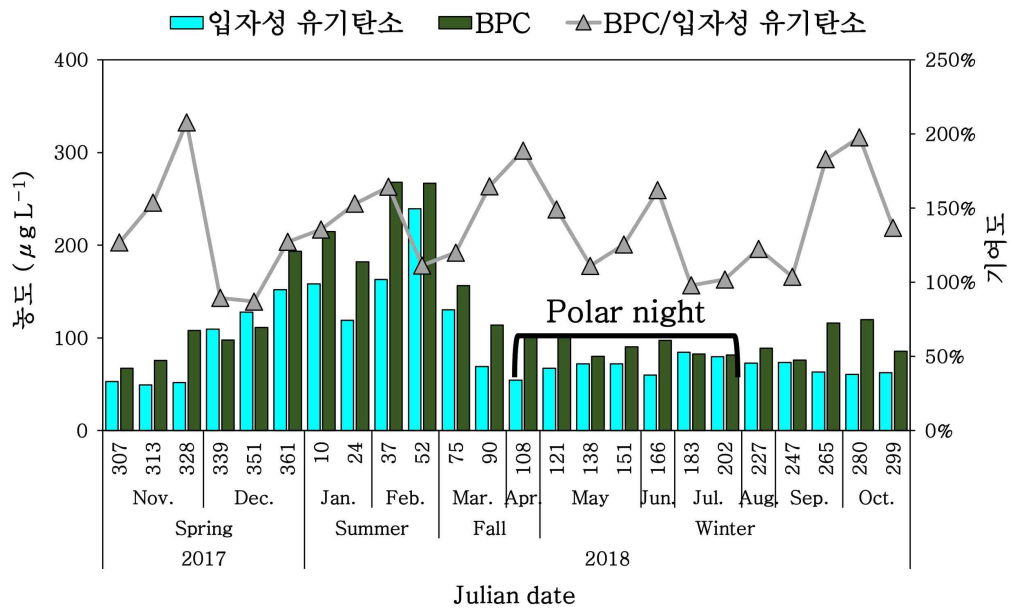


그림 55. Western Ross Sea의 Terra Nova Bay에 위치한 JBS의 표층에서 입자성 유기탄소, BPC 농도 및 입자성 유기탄소에 대한 BPC 기여도의 시계열 분포(2017-2018).



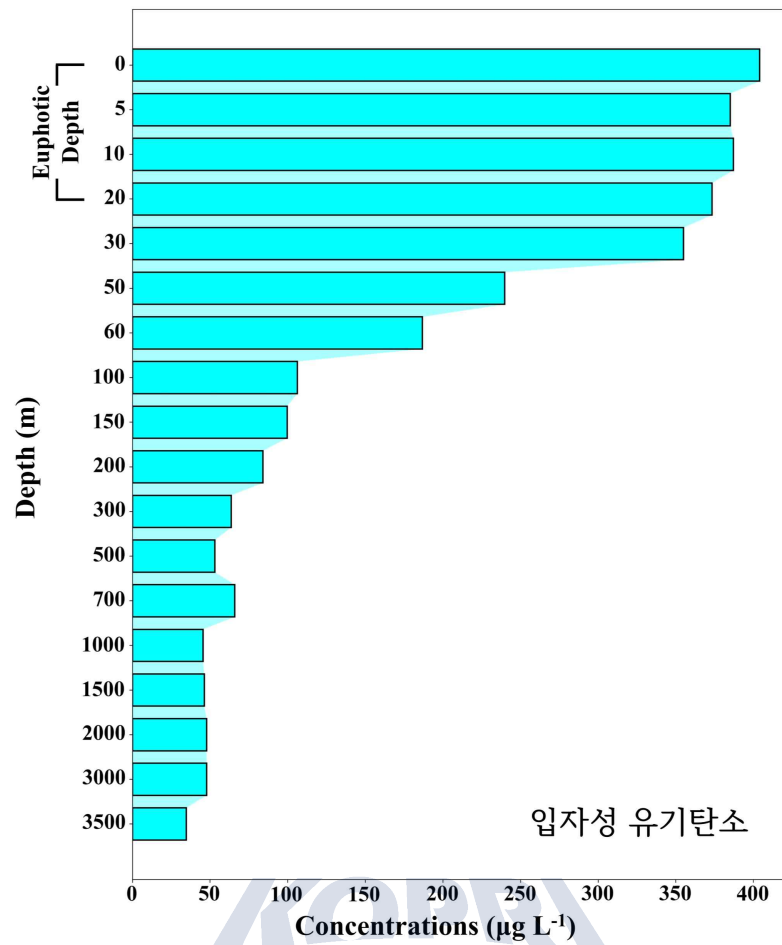


그림 56. Eastern Ross Sea (ANA13B)의 연구 해역에서 입자성 유기탄소 농도의 수심별 분포.

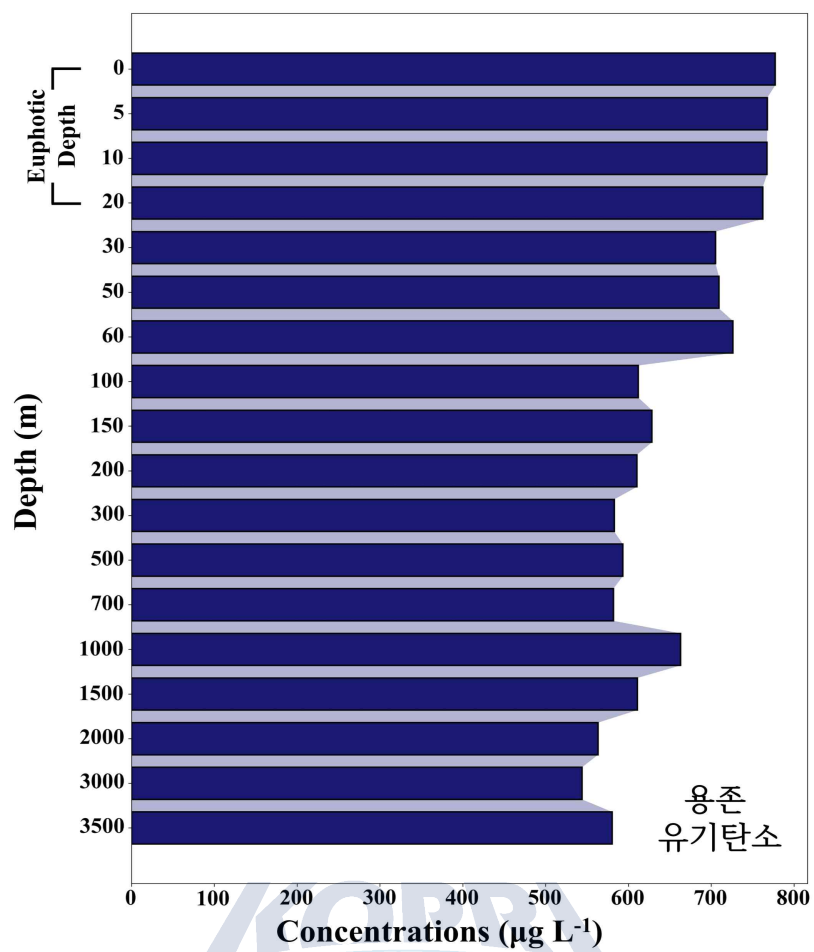


그림 57. Eastern Ross Sea (ANA13B)의 연구 해역에서 용존 유기탄소 농도의 수심별 분포.

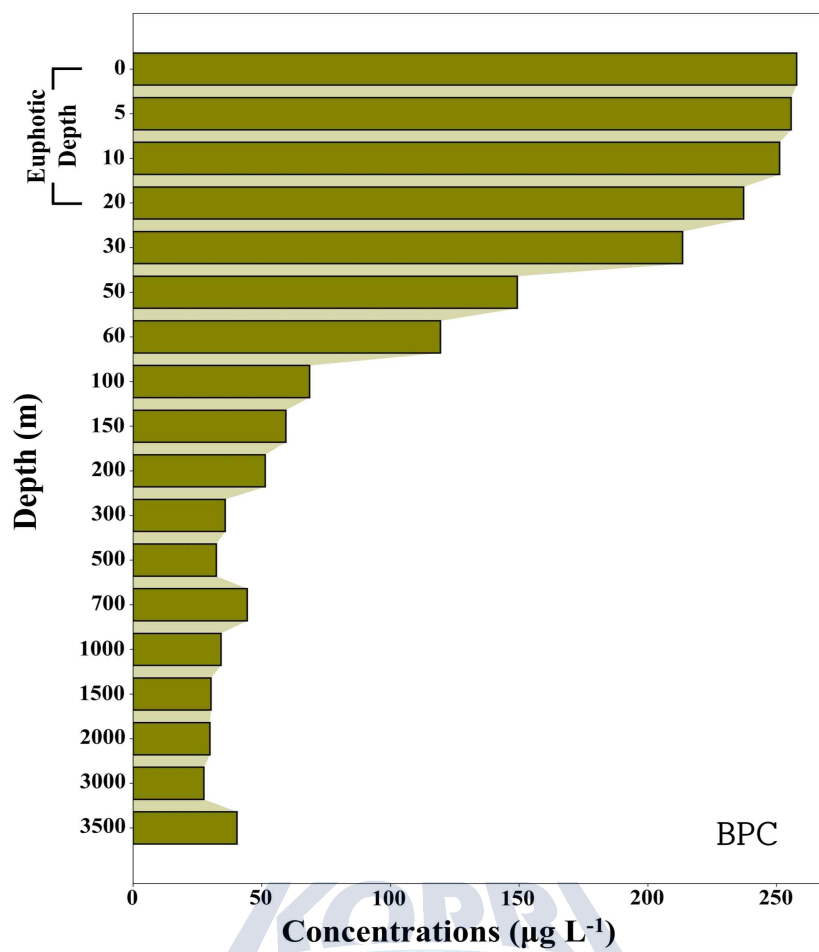


그림 58. Eastern Ross Sea (ANA13B)의 연구 해역에서 BPC 농도의 수심별 분포.

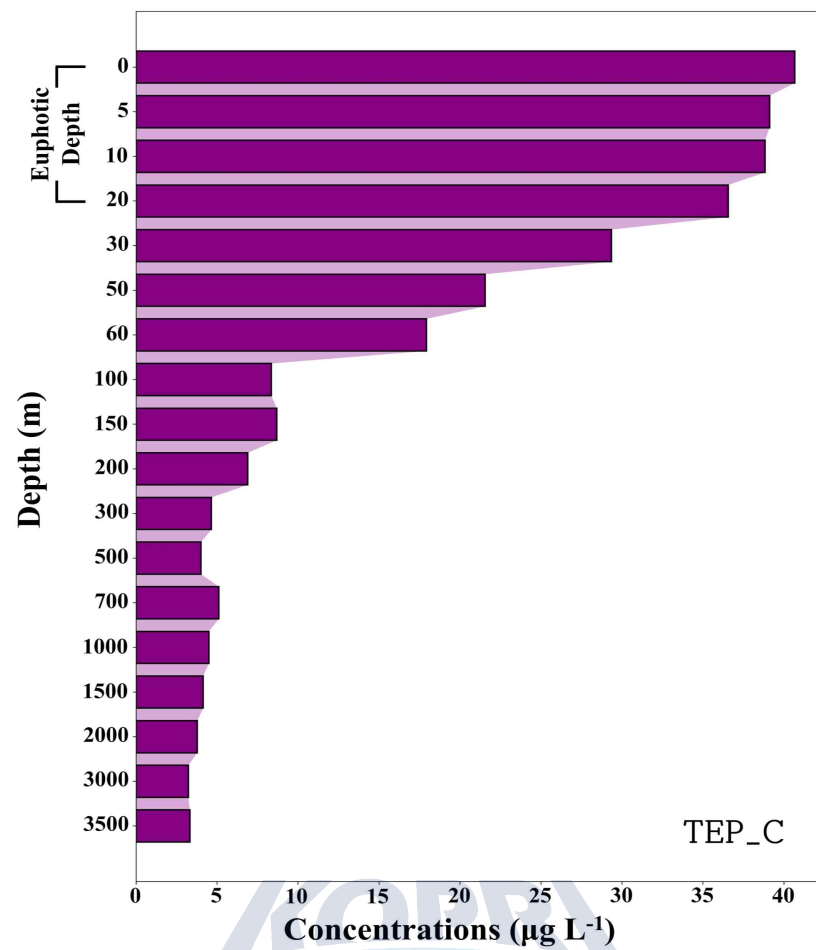


그림 59. Eastern Ross Sea (ANA13B)의 연구 해역에서 TEP_C 농도의 수심별 분포.

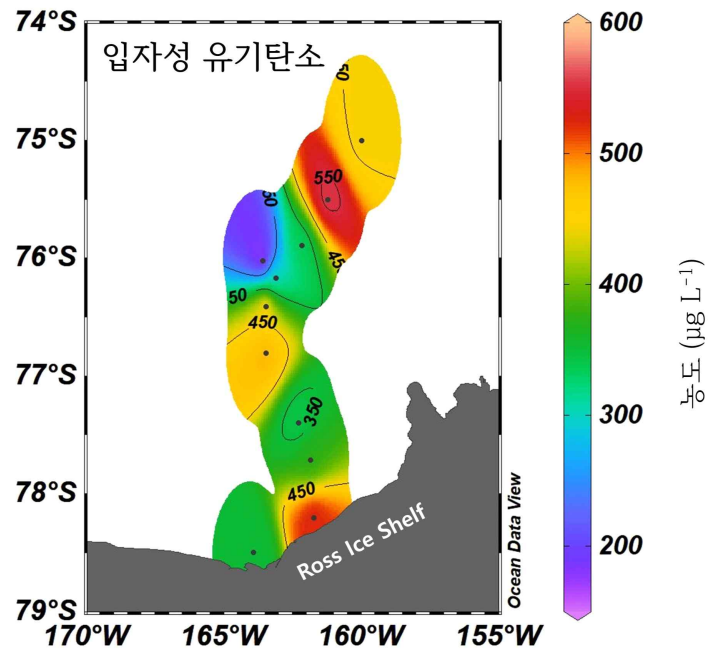


그림 60. Eastern Ross Sea (ANA13B)의 연구 해역에서 입자성 유기탄소 농도의 공간 분포(유광층 평균).



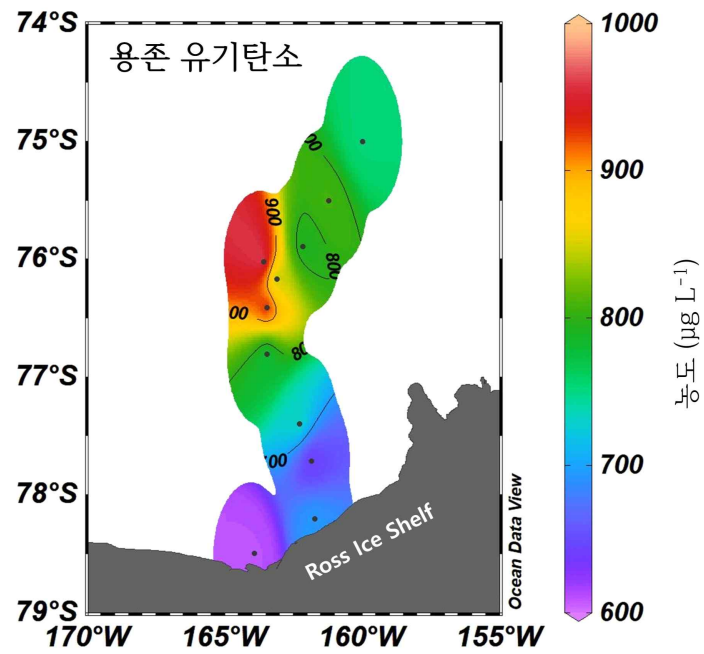


그림 61. Eastern Ross Sea (ANA13B)의 연구 해역에서 용존 유기탄소 농도의 공간 분포(유광층 평균).



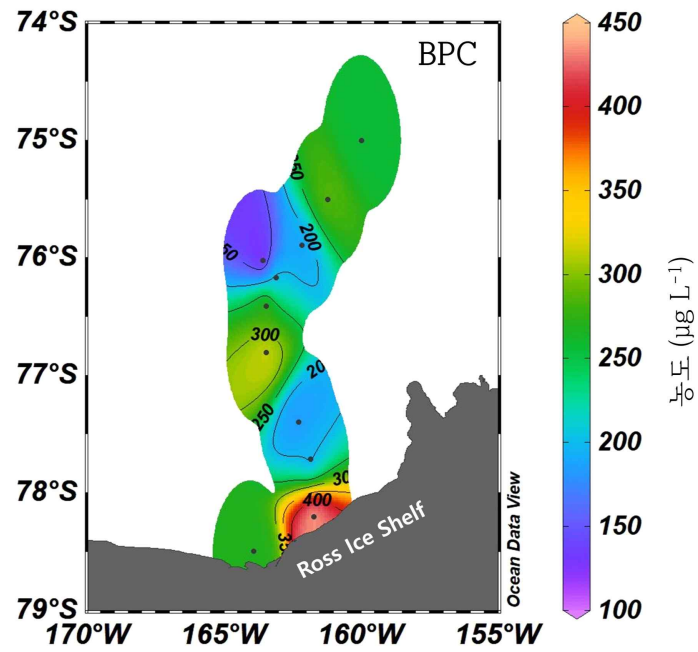


그림 62. Eastern Ross Sea (ANA13B)의 연구 해역에서 BPC 농도의 공간 분포(유광층 평균).



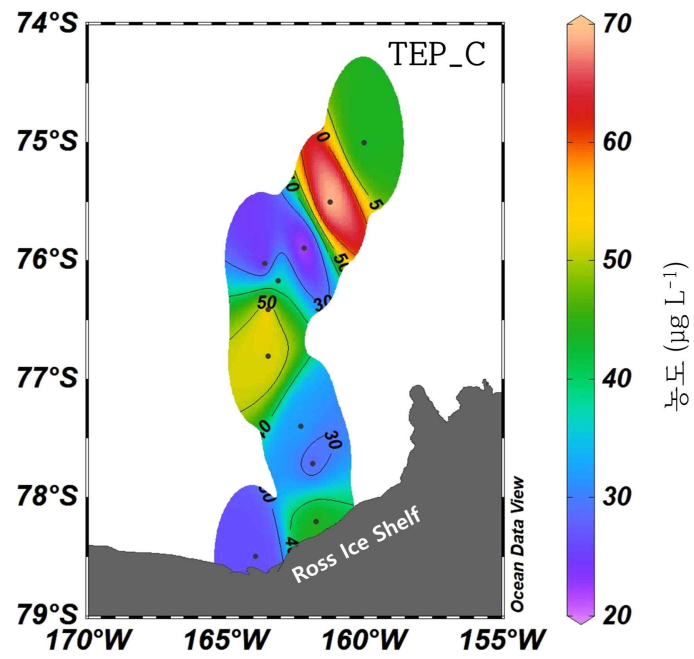


그림 63. Eastern Ross Sea (ANA13B)의 연구 해역에서 TEP_C 농도의 공간 분포(유광층 평균).



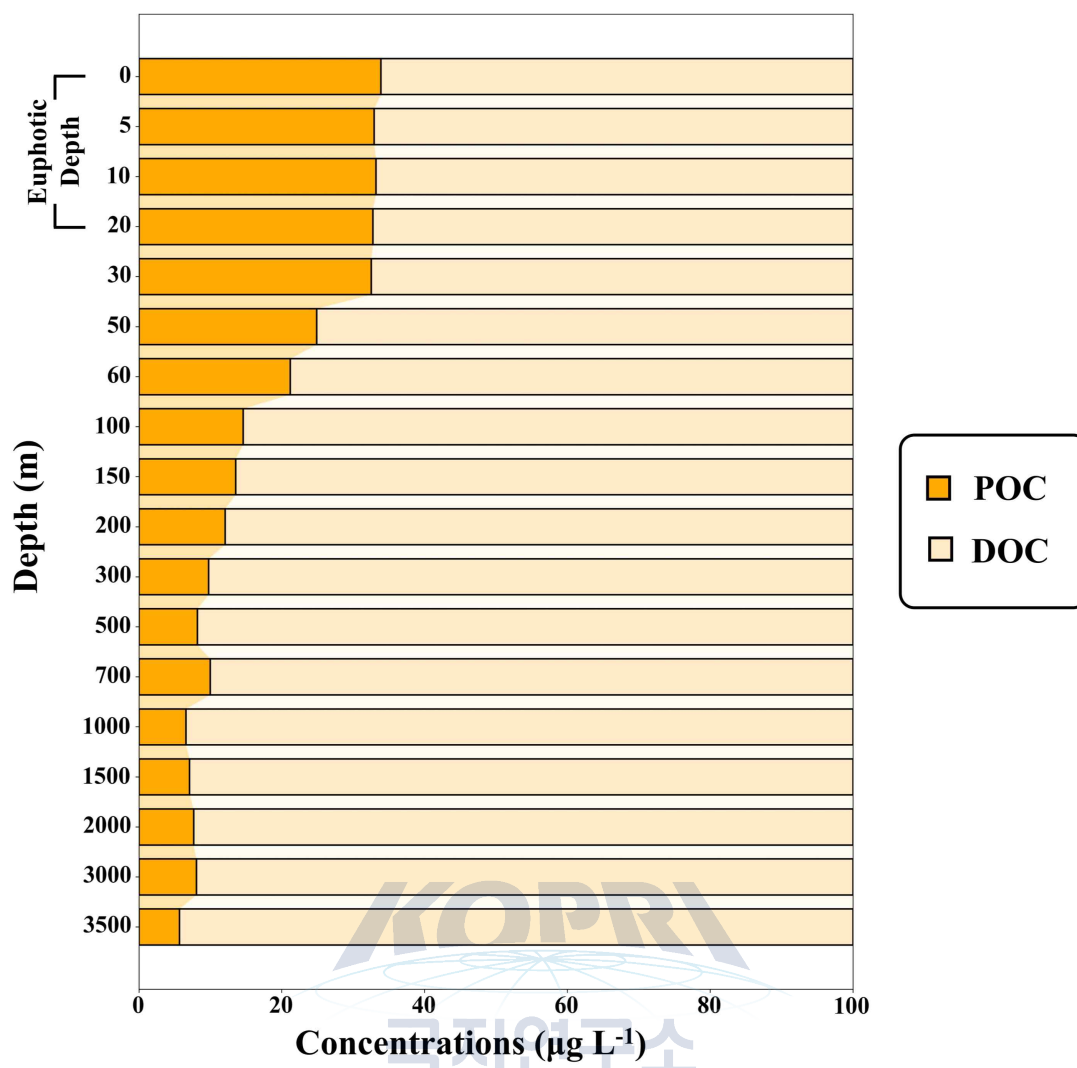


그림 64. Eastern Ross Sea (ANA13B)의 연구 해역에서 Organic carbon pool에 대한 입자성 및 용존 유기탄소 기여도의 수심별 분포.

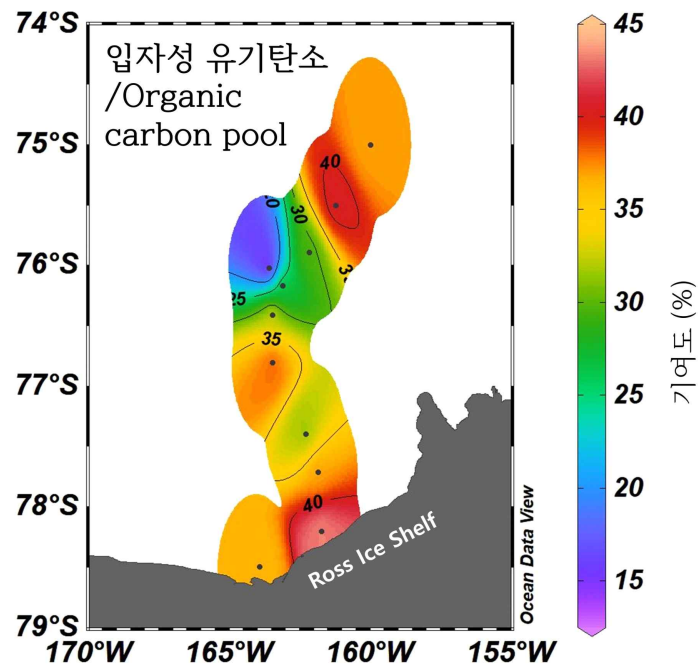


그림 65. Eastern Ross Sea (ANA13B)의 연구 해역에서 Organic carbon pool에 대한 입자성 유기탄소 기여도의 공간 분포(유광층 평균).



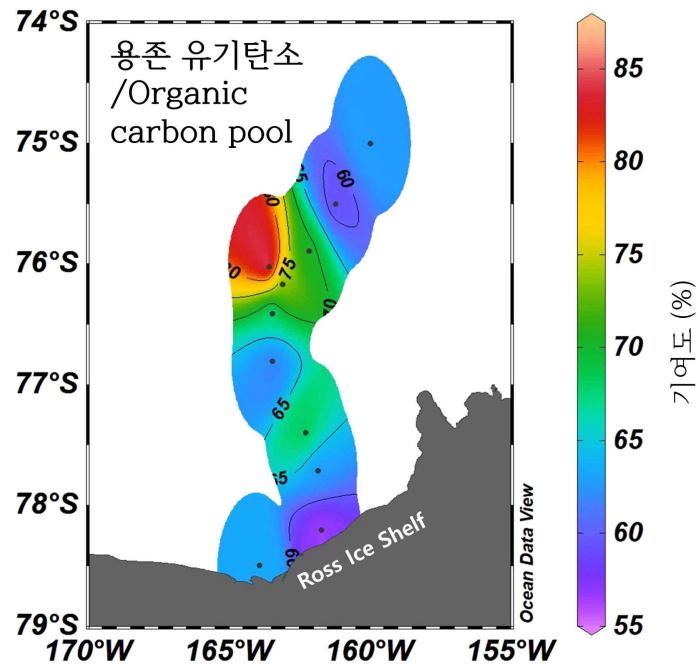


그림 66. Eastern Ross Sea (ANA13B)의 연구 해역에서 Organic carbon pool에 대한 용존 유기탄소 기여도의 공간 분포(유광층 평균).



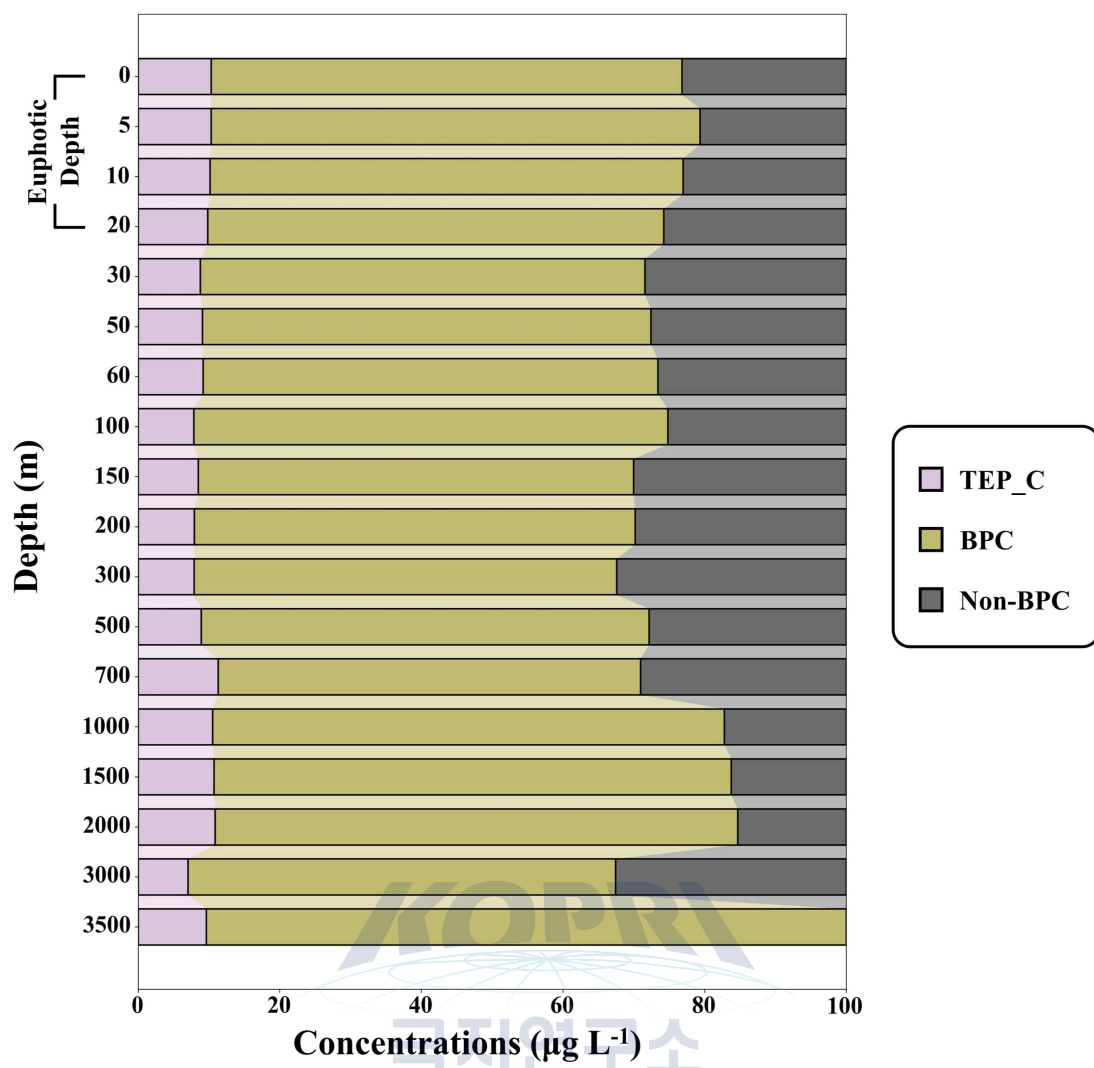


그림 67. Eastern Ross Sea (ANA13B)의 연구 해역에서 입자성 유기탄소에 대한 BPC 및 TEP_C 기여도의 수심별 분포.

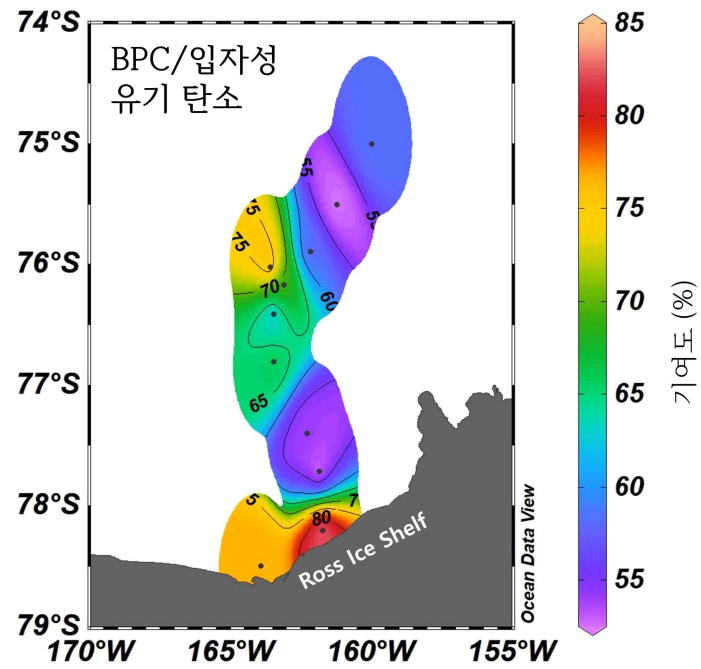


그림 68. Eastern Ross Sea (ANA13B)의 연구 해역에서 입자성 유기탄소에 대한 BPC 기여도의 공간 분포 (유광층 평균).



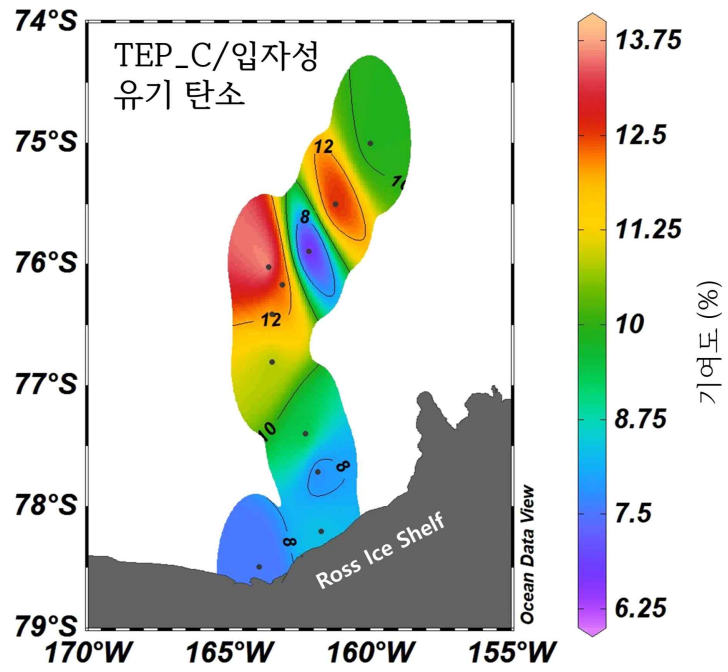


그림 69. Eastern Ross Sea (ANA13B)의 연구 해역에서 입자성 유기탄소에 대한 TEP_C 기여도의 공간 분포 (유광층 평균).



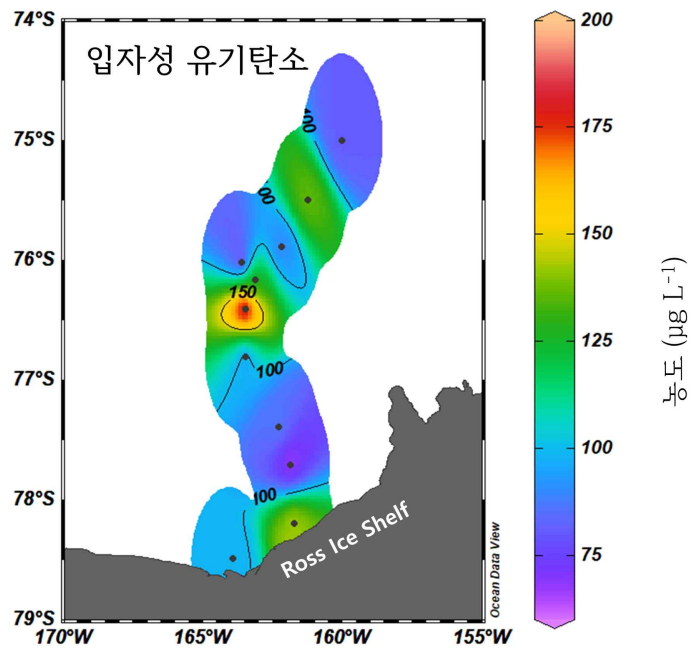


그림 70. Eastern Ross Sea (ANA13B)의 연구 해역에서 입자성 유기탄소 농도의 공간 분포(무광층 평균).



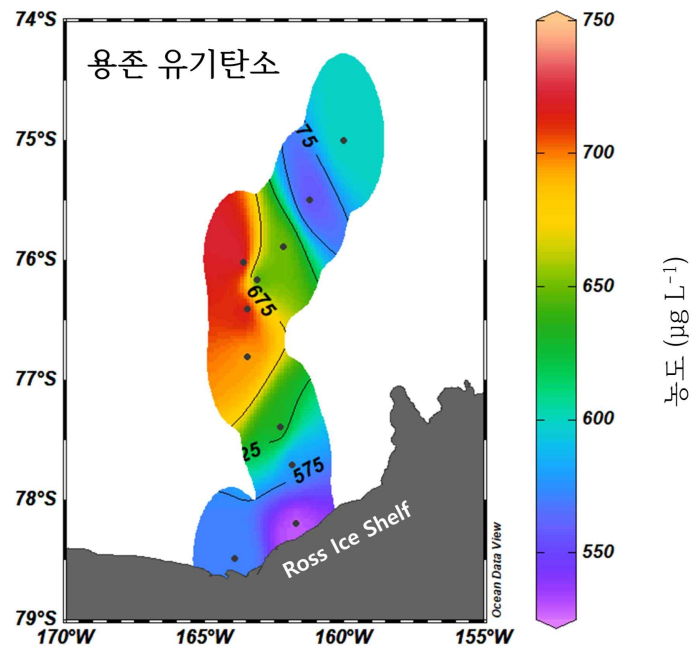


그림 71. Eastern Ross Sea (ANA13B)의 연구 해역에서 용존 유기탄소 농도의 공간 분포(무광층 평균).



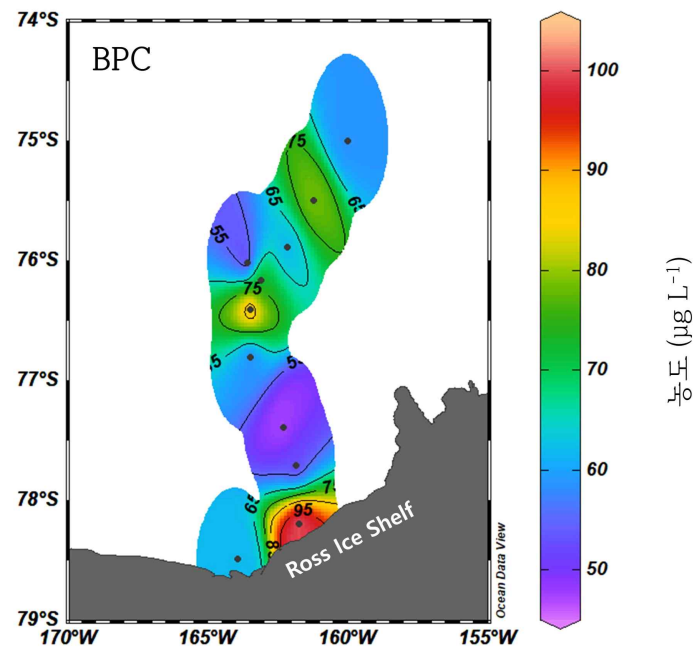


그림 72. Eastern Ross Sea (ANA13B)의 연구 해역에서 BPC 농도의 공간 분포(무광층 평균).



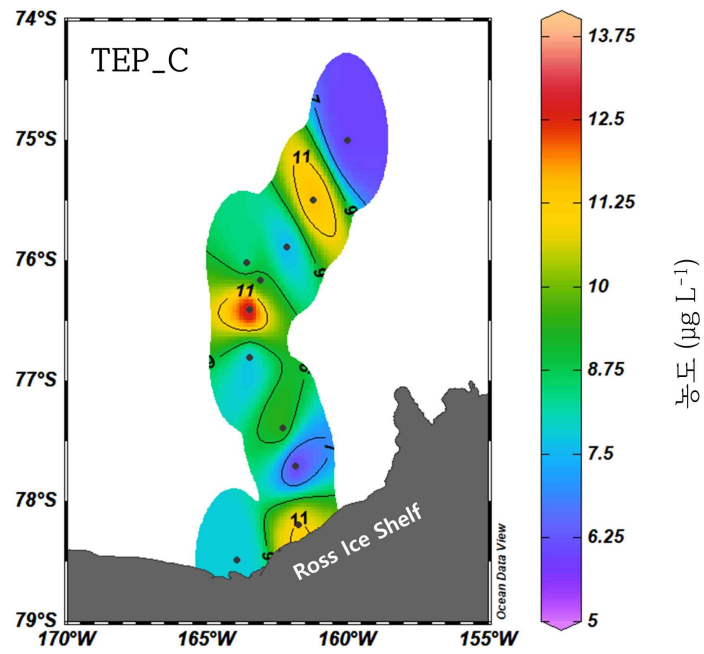


그림 73. Eastern Ross Sea (ANA13B)의 연구 해역에서 TEP_C 농도의 공간 분포(무광층 평균).



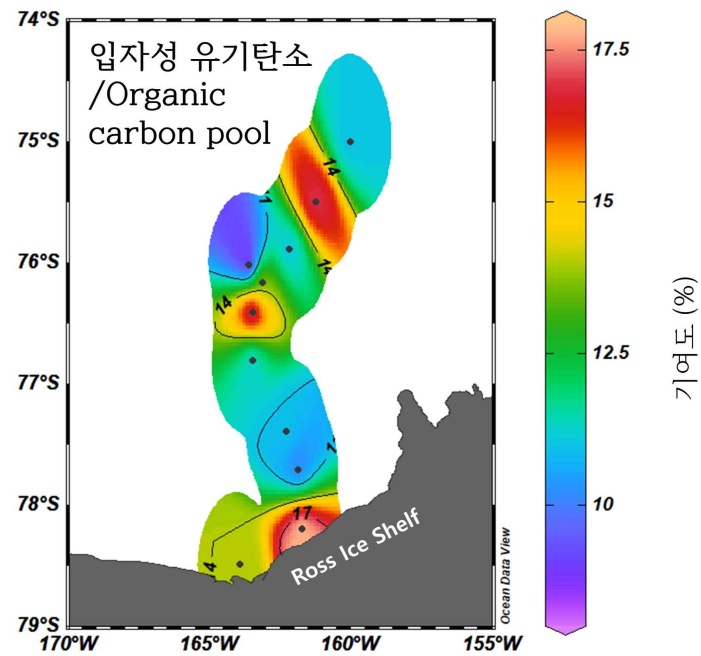


그림 74. Eastern Ross Sea (ANA13B)의 연구 해역에서 Organic carbon pool에 대한 입자성 유기탄소 기여도의 공간 분포(무광층 평균).



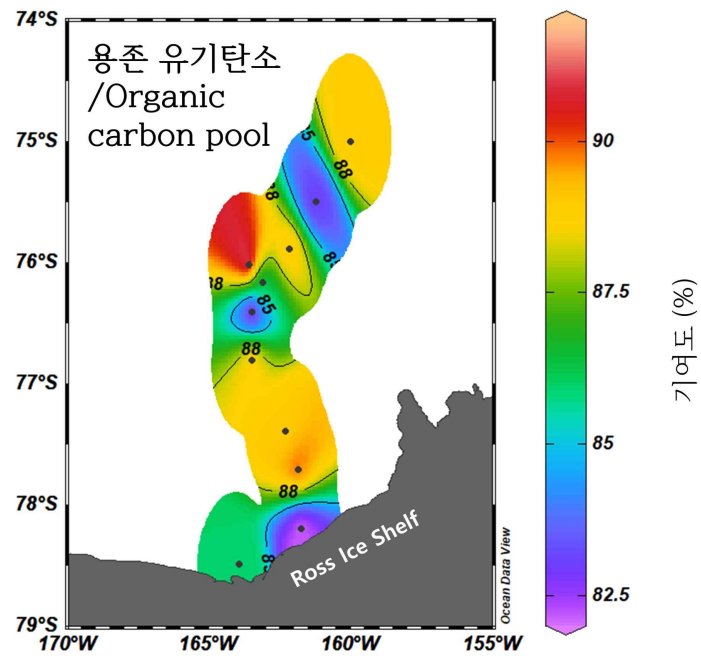


그림 75. Eastern Ross Sea (ANA13B)의 연구 해역에서 Organic carbon pool에 대한 용존 유기탄소 기여도의 공간 분포(무광층 평균).



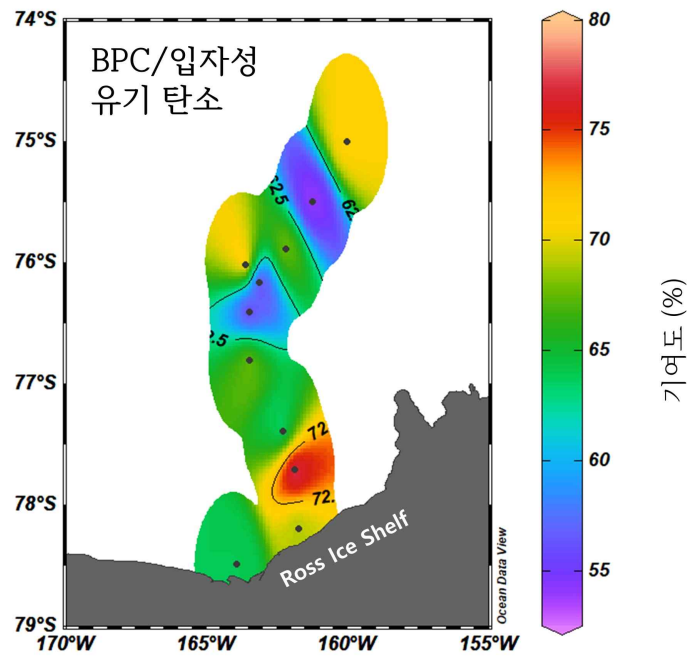


그림 76. Eastern Ross Sea (ANA13B)의 연구 해역에서 입자성 유기탄소에 대한 BPC 기여도의 공간 분포(무광층 평균).



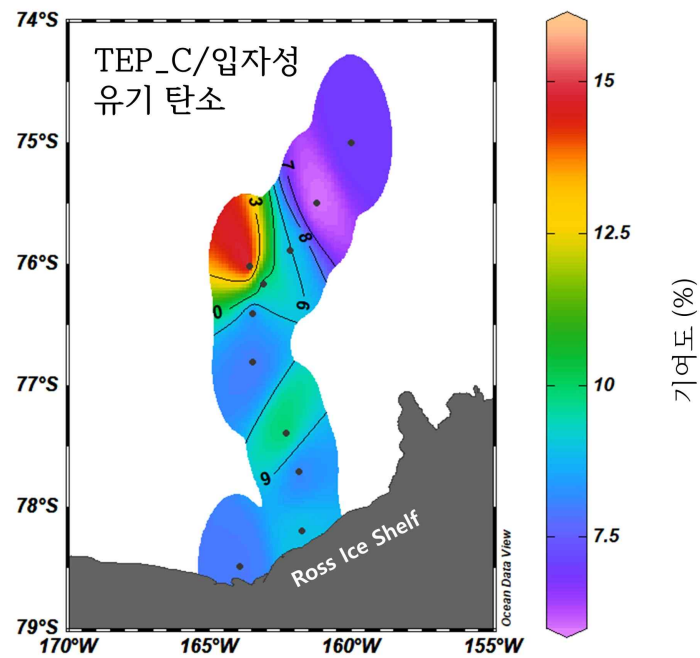


그림 77. Eastern Ross Sea (ANA13B)의 연구 해역에서 입자성 유기탄소에 대한 TEP_C 기여도의 공간 분포(무광층 평균).



제 4절. 고찰

1. 식물플랑크톤의 거대 분자 조성

Eastern Ross Sea (ANA11A) 연구 해역에서 식물플랑크톤의 거대분자 조성은 st.70에서 관측된 높은 탄수화물 농도를 제외하면, 전반적으로 탄수화물, 단백질, 지질 및 FM 농도가 ice edge에 가까워질수록 증가하는 경향을 보였으며(그림 6), Ross Ice Shelf에 인접할수록 FM에 대한 지질의 비율이 높게 나타났다(그림 11). 또한, Western Ross Sea의 open water 해역에서도 Ross Ice Shelf 인근 정점들에서 탄수화물, 단백질, 지질 및 FM 농도가 상대적으로 높게 관측되었고, 이 해역에서는 거대분자 조성 중 지질 및 탄수화물의 기여도가 가장 우세하게 나타났다(그림 23, 25). 해양에서 식물플랑크톤의 거대분자 조성은 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) 등 다양한 환경 요인에 의해 조절되는 것으로 알려져 있다. 특히 남극해에서는 혼합층 수심과 혼합 기간에 따라 식물플랑크톤이 이용 가능한 광 환경이 크게 달라질 수 있으며(Smith and Jones, 2015), Mitchell and Holm-Hansen (1991)은 West Antarctic Peninsula 해역에서 혼합층 수심이 40 m 이상으로 깊어질 경우 식물플랑크톤의 성장과 생물량 축적이 제한될 수 있음을 제시하였다. 일반적으로 광 이용이 제한되거나 변동성이 큰 환경에서는 에너지 저장 물질인 지질 또는 탄수화물의 축적이 증가하는 경향이 보고된 바 있다(Fiala and Oriol, 1990; Suárez and Marañón, 2003; Friedman et al., 1991; Lee et al., 2008, 2009). 또한, 식물플랑크톤의 군집 조성 역시 거대분자 조성에 중요한 영향을 미칠 수 있다(Brown et al., 1991). 남극해의 주요 식물플랑크톤 군집 중 하나인 규조류(diatom)는 cytoplasmic lipid droplet과 같은 저장 생산물에 탄소를 축적함으로써 지질 함량을 증가시킬 수 있는 것으로 보고되었다(DiTullio et al., 1996; Fabiano et al., 2000). 연구 해역인 Ross Sea는 일반적으로 무기 영양염의 제한이 일어나지 않는다고 알려져 있기 때문에, ANA11A Eastern Ross Sea 및 Western Ross Sea에서 관측된 높은 지질 농도와 기여도는 혼합층 심화에 따른 제한적인 광 환경과 규조류 중심의 군집 구조가 복합적으로 작용한 결과일 가능성이 있다. 반면, ANA13B cruise에서 수행된 Eastern Ross Sea에서는 ANA11A의 결과와 달리 ice edge 인접 해역에서 단백질의 기여도가 상대적으로 높게 나타나는 특징을 보였다. 일반적으로 비교적 안정적이고 충분한 광 조건에서는 식물플랑크톤의 성장률이 증가하며, 단백질 합성이 우세해질 수 있음이 보고된 바 있으며(Fiala and Oriol, 1990; Suárez and Marañón, 2003), ANA13B에서 관측된 단백질 기여도의 증가는 ice edge 주변에서 상대적으로 얇은 혼합층과 함께 양호한 광 환경이 형성되었을 가능성을 시사한다. 이러한 결과는 Ross Sea 해역에서 식물플랑크톤의 거대분자 조성이 연도별 및 해역별 물리적 환경 조건과 생물학적 군집 구조, 특히 ice edge 위치와 혼합층 구조의 차이에 따라 상이하게 조절될 수 있음을 보여준다.

Western Ross Sea의 Coastal region에서 2015년과 2017-2018년의 백야 기간과 극야 기간에 식물플랑크톤의 거대 분자 농도와 조성의 뚜렷한 차이를 보였다(그림 26, 27). 탄수화물, 단백질, 지질 농도는 2월에 최댓값을 보이는 반면, 해빙으로 덮힌 극야 기간 동안 가장 낮은 값을 나타냈다. 극야 기간 동안 탄수화물과 지질 농도는 비교적 일정하게 유지된 반면, 단백질 농도는 거의 측정되지 않았다. 백야 기간 동안 각 거대분자 농도가 증가한 것은 빛 조건의 개선에

따른 결과로 해석될 수 있다. 남극해에서는 해빙의 형성과 쇠퇴에 따라 빛 환경이 계절적으로 크게 변동하며, 이는 식물플랑크톤의 일차생산과 거대분자 조성을 조절하는 핵심적인 환경 요인으로 작용한다. 또한 질소가 충분히 공급되는 조건에서는, 광합성이 활발할 경우 식물플랑크톤이 세포 내 단백질을 상대적으로 효과적으로 축적할 수 있는 것으로 보고된 바 있다 (Fabiano et al., 1993; Lee et al., 2009). 본 연구 해역은 2월 이전에는 해빙으로 덮여 있었고, 3월에 해빙이 없어지기 시작한다. 앞서 언급했던 바와 같이, 과도한 빛 조건은 식물플랑크톤의 단백질 합성을 제한할 수 있는 것으로 알려져 있으나 (Suárez and Marañón, 2003; Lee et al., 2008, 2009), 2월에 관측된 단백질 농도의 증가는 성장 기간 동안 단백질 합성을 저해할 정도의 과도한 광 조건에 노출되지 않았음을 시사한다. 반면, 해빙으로 덮인 극야 기간 동안 식물플랑크톤은 극도로 제한된 빛 조건에 놓이게 된다. Handa (1969)는 해양 규조류인 *Skeletonema costatum*을 어두운 환경에서 18일간 배양한 결과, 생화학적 조성에 뚜렷한 변화가 나타났음을 보고하였다. 해당 연구에 따르면, 빛이 차단된 초기 단계에서 *Skeletonema costatum*은 호흡을 위한 에너지원으로 non-structure 탄수화물, glucose, β -1,3-glucan을 이용했으며, mannan과 pentosan과 같은 cell-structure를 구성하는 탄수화물은 이용하지 않았다 (Handa, 1969). 이러한 결과는 암 조건 하에서 식물플랑크톤이 생존을 위해 즉각적으로 이용 가능한 탄수화물을 우선적으로 소비하며, 이후 단백질을 소비하는 것으로 해석할 수 있다. 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 보고하였으며, Bunt and Lee (1972)는 남극 해빙 미세조류 중 일부 diatom 종들이 어두운 빛 조건과 함께 -1.8 °C에서 90일간 생존했다고 보고했다. 이는 어두운 환경에서 낮은 수온이 diatom의 생존에 중요한 역할을 할 수 있음을 나타낸다.

한편, 많은 유형의 식물플랑크톤은 생활사 과정에서 휴지기를 갖는 것으로 알려져 있으며 (Ellegaard and Ribeiro, 2018), 이러한 휴지기는 유성생식과 연관되거나 성장기 말기의 환경 변화에 대응한 휴면 포자 형태의 무성 생식으로 나타날 수 있다. 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 이용하며 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 기여도가 증가함을 보고하였으며, 이는 특정 식물플랑크톤 군집이 거대분자 조성을 조절할 수 있음을 시사한다. 그러나 본 연구 해역인 Terra Nova Bay에서는 *P. antarctica*가 아닌 diatom이 주요 식물플랑크톤 군집으로 우점하는 것으로 보고하였다 (Arrigo et al., 2003; Fonda Umani et al., 2005; Mangoni et al., 2019; Park et al., 2021). 본 연구 결과에서도 탄수화물의 농도와 기여도는 백야 및 극야 기간 동안 상대적으로 큰 변동을 보이지 않은 반면, 단백질 농도는 백야 기간에서 극야 기간으로 전이되며 가장 뚜렷한 감소를 나타냈다 (그림 27, 28). 이는 Terra Nova Bay에서의 거대분자 조성 변화가 Kim et al. (2018)에서 보고

된 탄수화물 중심의 조성 변화와는 달리, diatom 중심 군집의 계절적 성장 특성과 관련되어 있음을 시사한다. 즉, 백야 기간 동안 형성되는 안정적이고 충분한 광 조건 하에서 diatom의 성장이 활발해지면서 단백질 합성이 증가하고, 이후 극야 기간의 광 제한 환경에서는 단백질이 빠르게 감소함에 따라 백야와 극야 사이에서 단백질 농도의 뚜렷한 차이가 나타난 것으로 해석될 수 있다. 따라서, 본 연구 결과는 남극해에서 관측되는 거대분자 조성의 계절적 변동이 단순한 광 환경 변화뿐만 아니라, 우점 식물플랑크톤 군집의 차이에 따라 상이한 생화학적 반응을 보일 수 있음을 보여준다.

앞서 언급한 바와 같이, 백야 기간에서 극야 기간으로 시간이 경과함에 따라 세 가지 거대분자 중 단백질이 가장 빠르게 감소하는 양상이 관측되었다(그림 26). 본 연구에서 확인된 단백질 농도의 현저한 감소는 Amundsen Sea에서 유광층에서 심층으로 침강하는 유기물의 거대분자 조성 변화와 유사한 경향을 보였다(Kim et al., 2018). 일반적으로 단백질은 다양한 아미노산으로 구성되어 있어 다른 거대분자에 비해 상대적으로 빠르게 소비·분해될 수 있는 것으로 알려져 있다(Handa and Tominaga, 1969; Dawson and Liebezeit, 1982; Fabiano et al., 1995; Danovaro et al., 2000). 반면, 탄수화물은 침강 입자 내에서 다른 구성 성분에 비해 분해가 제한적으로 일어나는 것으로 보고되어 왔다(Ittekkot et al., 1982; Liebezeit, 1984; Fabiano et al., 1993; Danovaro et al., 2000; Hedges et al., 2001; Kim et al., 2018). 본 연구에서는 백야 기간 동안 생성된 단백질의 약 5%와 탄수화물의 약 60%가 극야 기간 동안 유지된 반면, 지질은 단백질에 비해 상대적으로 높은 비율인 약 25%가 유지되었다. 지질은 긴 극야 기간 동안 대사율을 저감한 상태에서 생존해야 하는 식물플랑크톤에게 중요한 에너지원으로 작용할 수 있다. Bunt et al.(1966)은 낮은 수온 조건에서 *Fragilaria sublinearis*의 신진대사가 감소하여, 암 호흡량이 3 °C에서 10 °C 조건에 비해 50% 미만으로 감소하였음을 보고하였다. 또한, diatom은 낮은 온도에서의 낮은 신진대사 활성화 하에 생존을 유지하기 위해, 세포 내에 저장된 에너지 생성물을 활용할 수 있는 것으로 알려져 있다(Palmisano and Sullivan, 1982). 따라서, 세포 내에서 탄수화물과 지질을 상대적으로 높은 수준으로 유지하는 것은 긴 극야 기간 동안 식물플랑크톤이 제한된 광 환경과 저온 조건에 적응하기 위한 중요한 생존 전략으로 해석된다.

또한, 2022년 Ross Sea 정점 관측 결과는 이러한 거대분자 조성이 수직 방향으로도 강한 대비를 보인다는 점을 확인하였다. 유광층에서는 탄수화물, 단백질, 지질이 모두 높은 농도로 관측되었지만, 무광층으로 내려갈수록 단백질 농도와 기여도가 빠르게 감소하고 지질 및 구조성 탄수화물 비율이 상대적으로 높게 유지되었다. 이러한 경향은 단백질과 같은 labile 구성 성분이 상부 수층에서 우선적으로 소비 및 분해되는 반면, 지질과 구조성 탄수화물과 같은 상대적으로 안정적인 성분은 심층에서도 잔존할 수 있음을 시사하며, 이는 선행 연구에서 보고된 심층 유기물 조성 변화와도 일치한다(Fabiano et al., 1993; Fabiano et al., 2000; Kim et al., 2018). 따라서, 남극해에서 표층에서 형성된 생화학적 특성이 침강 과정 동안 점차 resistant 특성이 강화되는 방향으로 전환되며, 결국 심층 유기탄소의 저장 효율과 분해 속도를 결정하는 중요한 요인임을 뒷받침한다.

2. 식물플랑크톤의 입자성 유기탄소에 대한 BPC 농도

Eastern Ross Sea (ANA11A, ANA13B) 및 Western Ross Sea 연구 해역에서 Ross Ice Shelf에 인접한 정점들의 BPC 농도가 높게 관측되었으며(그림 46, 51, 62), 입자성 유기탄소에 대한 BPC의 기여율 또한 상대적으로 높게 나타났다(그림 47, 53, 70). 입자성 유기탄소에 대한

BPC의 높은 비율은 입자성 유기탄소의 주요 기원이 식물플랑크톤임을 지시하는 지표로 알려져 있다(Pusceddu et al., 1996; Fabiano et al., 1997; Danovaro et al., 2000). 위성 자료를 기반으로 한 연구에서는 Ross Ice Shelf 주변 해역에서 eddy와 같은 물리적인 영향으로 인해 low-salinity high-biomass lens가 형성되는 현상이 관측되었다(*P. antarctica* 우점) (Li et al., 2017). 한편, 과거의 현장 관측 및 모델링 연구들은 남극 대륙붕 해역 표층으로의 철 공급이 다양한 경로를 통해 이루어진다고 보고하였다(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 침범, 그리고 해빙 및 빙하 용융수의 유입 등이 주요한 철 공급 프로세스로 알려져 있다(McGillicuddy et al., 2015). 따라서, 본 연구에서 Ross Ice Shelf 근처에서 관측된 BPC의 높은 농도 및 기여율은 이러한 물리·화학적 요인들의 복합적인 상호작용에 의해 식물플랑크톤 생물량이 증가한 결과로 해석될 수 있다.

Western Ross Sea의 coastal region에서 2015년과 2017 - 2018년 동안 관측된 BPC 농도가 입자성 유기탄소와 유사하게 백야 기간인 2월에 가장 높은 값을 보였다(그림 54, 55). 이는 앞서 언급한 바와 같이, 백야 기간 동안 형성된 광 조건의 개선과 이에 따른 식물플랑크톤 성장에 유리한 환경의 결과로 해석될 수 있다. 또한 이 시기에 입자성 유기탄소에 대한 BPC의 높은 기여율은 관측된 입자성 유기탄소의 주요 기원이 식물플랑크톤임을 시사하며, 육상 기원의 유기물 공급이 거의 없는 남극해 환경 특성을 잘 반영하는 것으로 판단된다. 더 나아가, 극야 기간에도 상대적으로 높은 BPC 기여도가 유지된 것은 이 시기에 존재하는 입자성 유기탄소 역시 주로 식물플랑크톤 기원임을 보여준다.

2022년 관측 결과는 이러한 분포 특성이 수직 방향에서도 뚜렷하게 나타난다는 점을 보여주었다. *P. antarctica* 우점 정점에서는 유광층에서 높은 BPC 농도와 기여율이 확인되었으며, 무광층에서는 BPC 농도는 감소하지만 Non-BPC는 일정 수준 유지되어, 식물플랑크톤 기원의 refractory carbon이 심층까지 전달될 가능성을 시사하였다. 반면 diatom과 *P. antarctica*가 혼재하는 정점에서는 BPC가 수심 증가에 따라 급격히 감소하고 Non-BPC의 비율이 빠르게 증가하는 양상이 확인되었다. 이러한 결과는 남극해에서 BPC의 감쇠 및 분해에 대한 선행 연구 결과(Fabiano et al., 1997; Danovaro et al., 2000; Kim et al., 2018)와 일관성을 보이며, Non-BPC 잔존도가 남극 대륙붕 심층 탄소 저장 효율을 결정하는 변수임을 보여준다.

3. 식물플랑크톤의 입자성 유기탄소에 대한 TEP_C 농도

ANA13B cruise를 통한 Eastern Ross Sea 연구 해역에서 Ross Ice Shelf에 인접한 정점들의 입자성 유기탄소에 대한 BPC의 기여율이 상대적으로 높게 나타난 반면, TEP_C의 농도 및 입자성 유기탄소에 대한 기여율은 상대적으로 낮게 나타났다(그림 63, 69). 이러한 Ross Ice Shelf 인접 정점들에서의 낮은 TEP_C 농도는 식물플랑크톤 우점 군집으로 인한 차이일 수 있다. TEP 농도는 다양한 요인들 중에서 종 조성의 차이로 인해 야기될 수 있다는 이전 연구 사례가 있다(Passow, 2002). 이전 연구에 따르면, 본 연구 해역에서 우점한 *P. antarctica*는 이전 연구들에서 높은 TEP 생성을 유도할 수 있는 분류군으로 보고된 바 있으나(Hong et al., 1997), diatom 및 dinoflagellate가 우점하는 해역에서도 TEP 농도가 유의하게 증가할 수 있음이 여러 연구를 통해 제시되어 왔다(Passow, 2002; Hung et al., 2003; Zamanillo et al., 2019; Park et al., 2021). 이러한 선행 연구들은 TEP 생성이 특정 분류군 하나에 의해 일관되게 조

절되기보다는, 지역별 우점 군집 구성과 환경 조건에 따라 상이한 양상으로 나타날 수 있음을 시사한다. 특히, 기존 연구들은 주로 Western Ross Sea 혹은 Gulf of Mexico 해역을 중심으로 수행되어 왔으며(Hong et al., 1997; Passow, 2002; Hung et al., 2003; Zamanillo et al., 2019; Park et al., 2021), Eastern Ross Sea를 대상으로 한 TEP 관련 연구는 거의 이루어지지 않았다. 이러한 연구 공백을 고려할 때, 본 ANA13B cruise를 통해 관측된 Eastern Ross Sea 연구 해역에서는 *P. antarctica*의 우점 여부만으로 생태계 내 물질 순환 특성을 설명하기보다는, diatom 및 dinoflagellate를 포함한 전체 군집 구조와 그 상대적 기여를 함께 고려할 필요가 있다. 따라서 본 연구 해역에서 관측된 결과는 Eastern Ross Sea가 기존에 주로 연구된 남극해 해역들과는 구별되는 군집 구조적 특성을 가질 가능성을 시사하며, 향후 이 해역의 식물플랑크톤 군집과 생지화학적 과정 간의 관계를 보다 정밀하게 규명할 필요가 있다.

TEP는 주로 식물플랑크톤으로부터 분비되는 산성 다당류를 기원으로 하며, 소량의 단백질과 핵산 등을 포함하는 탄소 함량이 높은 겔 형태의 유기 입자로 정의된다(Alldredge et al., 1993; Passow, 2002). TEP는 입자성 유기물 중에서 상대적으로 높은 점도를 가지며, 이로 인해 입자간 응집을 촉진하여 응집체 형성과 유광층에서 심층으로의 탄소 수송을 강화하는 중요한 역할을 수행하는 것으로 알려져 있다(Passow, 2002; Mari et al., 2017; Ge et al., 2022). 본 연구 해역 중 Ross Ice Shelf에 인접한 정점들에서 관측된 낮은 TEP_C의 비율은 응집체 형성과 이에 따른 입자성 유기탄소의 침강 과정이 제한적으로 작동했을 가능성을 시사한다(그림 69). 이러한 해석은 유광층 내 입자성 유기탄소 농도가 상대적으로 높게 나타났음에도 불구하고, 생물학적 생산성이 낮은 다른 해역과 비교하여 입자성 유기탄소 수송량이 유의하게 크지 않았다는 기존 연구 결과들(Kim et al., 2017; Park et al., 2021)과 일치한다. 즉, Ross Ice Shelf 인접 해역에서는 TEP 기반의 응집 및 침강 효율이 낮아, 입자성 유기탄소가 심층으로 빠르게 제거되기보다는 수층 내에 상대적으로 오래 체류하며, 식물플랑크톤 세포에 직접 기원한 입자성 유기물 형태로 유지되고 있을 가능성이 크다. 앞서 언급한 바와 같이, 입자성 유기탄소에 대한 BPC의 높은 기여율은 Ross Ice Shelf 인접 해역에서 POC의 주요 기원이 식물플랑크톤임을 뒷받침한다. 이러한 특성은 본 연구 해역의 수층 POC가 재가공된 겔 형태의 유기물보다는 식물플랑크톤 세포 또는 세포 내 구성 성분과 같은 세포 기반 유기물에 의해 주로 구성되어 있음을 시사한다.

Ross Sea에서 관측된 TEP_C 수직 분포 또한 유광층과 무광층의 기능적 차이를 확인하는데 중요한 정보를 제공하였다(그림 59). *P. antarctica* 우점 정점에서는 유광층에 높은 TEP_C가 분포하여 응집체 형성과 생물학적 침강을 촉진할 수 있는 환경이 조성된 반면, 무광층에서는 절대 농도 및 기여율이 모두 급격히 감소하였다. 이는 TEP가 상부 수층에서는 응집과 sinking flux를 가속하지만, 심층에서는 빠르게 분해되거나 다른 입자에 재흡착됨으로써 장기간 보존되지 않는다는 기존 연구 결과(Passow, 2002; Hung et al., 2003; Mari et al., 2017; Ge et al., 2022)와 잘 부합한다. 한편, 심층으로 전달되는 유기물의 장기 저장 기능은 TEP_C보다는 Non-BPC와 같은 화학적으로 안정한 구성 성분이 주도하는 것으로 판단되며, 이는 남극 대륙붕 식물플랑크톤 군집 구성 변화가 탄소 수송 효율뿐 아니라 저장 잠재력에도 직접적인 영향을 미친다는 것을 보여준다.

4. Organic carbon pool에 대한 입자성 및 용존 유기탄소 농도 및 기여율

Eastern Ross Sea (ANA11A, ANA13B) 및 Western Ross Sea 연구 해역에서 Ross Ice

Shelf에 인접한 정점들에서는 입자성 유기탄소 농도가 높게 관측되었으며(그림 45, 50, 60), 이에 따라 organic carbon pool 내에서 입자성 유기탄소가 차지하는 비중 또한 증가하는 경향을 보였다(그림 64). 이는 Ross Ice Shelf 인접 해역에서 활발한 식물플랑크톤 생산에 의해 유기탄소가 주로 입자성 형태로 축적되고 있음을 시사한다. 반면, 용존 유기탄소는 ANA13B cruise를 통해 수행된 Eastern Ross Sea 연구 해역에서만 관측 및 분석되었으며, 해당 해역에서 용존 유기탄소 농도는 Ross Ice Shelf 인접 정점보다는 외해 정점에서 상대적으로 높게 나타났다(그림 57). 이러한 분포 특성은 생물량이 상대적으로 낮은 외해 해역에서는 organic carbon pool 내에서 용존 유기탄소의 기여율이 증가하여, 유기탄소가 입자성 형태보다는 용존 형태로 수괴 내에 우세하게 존재함을 의미한다. 즉, ANA13B 관측 결과에 따르면 생산성이 높은 Ross Ice Shelf 인접 해역에서는 입자성 유기탄소 중심의 carbon pool 구조가 형성되는 반면, 외해역에서는 상대적으로 낮은 생물학적 생산성으로 인해 유기탄소가 용존 유기탄소 풀에 축적되는 경향이 두드러지는 것으로 해석된다. 이러한 결과는 최근 인공위성 관측 자료와 입자성 유기탄소 알고리즘을 활용한 연구에서 Ross Ice Shelf 인근 해역에서 높은 입자성 유기탄소 농도가 보고된 바 있다는 점과도 잘 부합한다(Chen et al., 2021).

Western Ross Sea의 coastal region에서 2015년과 2017 - 2018년 동안 관측된 입자성 유기탄소 농도는 백야 기간인 2월에 가장 높은 값을 보였다(그림 54, 55). 이는 백야 기간 동안 증가한 태양복사 에너지와 해빙 후 수층 안정화로 인해 식물플랑크톤의 광합성 활동과 생물량이 크게 증가하면서 유기탄소가 입자성 형태로 집중적으로 생산·축적되었기 때문으로 해석된다.

Organic carbon pool에 대한 수직 분포 특성 파악 결과, 구성 성분이 상부 수층과 심층에서 매우 다른 방식으로 유지되고 변화한다는 점이 명확히 나타났다(그림 64, 67). 입자성 유기탄소 및 그 구성 성분(BPC, TEP_C, Non-BPC)의 수직 분포는 Ross Sea의 해역 차이(Eastern - Western)뿐 아니라 수직 방향에서도 높은 차이를 보인다는 점을 확인하는 데 핵심적인 정보를 제공하였다. 특히 *P. antarctica* 우점 정점에서는 Non-BPC 농도 및 기여율이 유광층과 심층에서 모두 높았으며, 감소율을 살펴보았을 때 Non-BPC가 예측된 감소율보다 느리게 감소하는 현상이 관측되었다. 이는 해당 수역에서 생산된 탄소 중 일부가 심층까지 효율적으로 전달되고 장기적으로 저장될 수 있음을 시사하며(Fabiano et al., 1997; Danovaro et al., 2000), 반면 diatom이 우점하거나 혼재하는 정점에서는 labile carbon이 중·상부 수층에서 대부분 소비되어 carbon retention 해역의 기능을 수행한다는 상반된 패턴을 확인하였다. 따라서, 남극 Ross Sea의 Organic carbon pool 구조는 생산성 수준만으로 설명될 수 없으며, 군집 구성, 혼합층 특성, 해빙 - 용빙 과정, 철 공급(Boyd et al., 2012; Sedwick et al., 2011)을 포함한 다양한 환경 요인이 복합적으로 상호작용하여 남극 대륙붕에서의 carbon fate을 결정하는 것으로 보인다.

제 4장 연구개발목표 달성도 및 대외 기여도

제 1절. 연구개발목표 및 달성도

1. 1단계

성과목표	세부목표		달성 주요 내용	달성도 (%)
1. 식물 플랑크톤의 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 수심에 따른 생 화학조성 변동에 관한 사전조사	남극해 해역별 입자성 유기 물질의 수심에 따른 생 화학조성 변동에 관한 과거 및 기존확보자료 분석	100
	1-3	과거 및 기존확보자료 분석을 바탕으로 생물학적 탄소 펌프에 의한 유기탄소 침층수송량 파악에 관한 사전조사	과거 및 기존확보자료 분석을 바탕으로 식물플랑크톤 기반의 생물학적 탄소 펌프에 의한 유기탄소 침층수송량 파악	100
2. 남극해에서 식물 플랑크톤을 구성하는 거대 분자 농도의 시·공간 분포와 조성 별 기여도 분석	2-1	남극해 해역별 식물플랑크톤 POM의 Proteins, Lipids, Carbohydrates 농도 파악	남극해 해역별 식물플랑크톤 POM의 Proteins, Lipids, Carbohydrates 농도 측정	100
	2-2	남극해 식물플랑크톤 POM을 구성하는 거대 분자 조성 별 기여도 파악	남극해 식물플랑크톤 POM을 구성하는 거대 분자 조성 별 기여도 계산	100
	2-3	남극해 극야 기간에 POM의 biochemical composition 거동 파악	남극해 백야 및 극야 기간에 POM의 biochemical composition 측정	100
3. 남극해에서 식물 플랑크톤에 의한 침강 유기탄소의 입자 특성 파악	3-1	남극해 유광층 내 POM의 Proteins, Lipids, Carbohydrates 조성 파악	남극해 유광층 내 POM의 Proteins, Lipids, Carbohydrates 조성 측정	100
	3-2	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

2. 2단계

성과목표	세부목표		달성 주요 내용	달성도 (%)
1. 유광층 내 입자성 유기물의 생화학적 조성 및 POC 조성 별 기여도 분석	1-1	로스해 유광층 내 광 수심 별 입자성 유기물의 탄수화물, 단백질, 지질의 농도 파악	탄수화물, 단백질, 지질 농도 측정을 통한 입자성 유기물의 생화학적 조성 분포 파악	100
	1-2	생화학 조성을 기반으로 POC에 대한 Biopolymeric carbon 기여도 파악	로스해 유광층 내 POC 조성 별 기여도 분석	100
2. 로스해 유광층 내 Organic carbon pool 주요 인자들의 특성 파악	2-1	유광층 내 Organic carbon pool 주요 인자인 POC, DOC, BPC, TEP_C 농도 분석	로스해 유광층 내 Organic carbon pool 주요 인자들의 분포 파악	100
	2-2	로스해 유광층 내 Organic carbon pool에 대한 기여도 변동성 파악	Organic carbon pool에 대한 주요 인자들의 유광층 내 조성별 기여도 분석	100
3. 로스해 유광층에서 심층으로의 유기 탄소 거동 파악	3-1	로스해의 유광층에서 심층까지 POC, DOC, BPC, TEP_C의 농도 파악	로스해에서 Organic carbon pool에 대한 주요 인자들의 수직적 분포 파악	100
	3-2	유광층에서 심층으로 침강하는 유기물의 Organic carbon pool에 대한 기여도 변동성 파악	로스해 유광층에서 심층까지의 Organic carbon pool에 대한 주요 인자들의 기여도 특성 파악	100
	3-3	유광층과 심층 간의 Organic carbon pool 주요 인자 분포와 이에 대한 기여도 사이의 상관성 분석	유광층과 심층의 Organic carbon pool 주요 인자 농도와 기여도의 상관성 확인을 위한 통계적 분석	100

제 2절. 관련분야에의 기여도

1. 해빙/해양 생물연구 분야

- 가. 남극 Ross Sea 해역에서 유기탄소 구성요소(입자성 유기탄소, 용존 유기탄소, BPC, TEP-C)를 계층적으로 구분하여 정량 분석함으로써 해빙 및 해양환경 변화에 따른 남극해 탄소 플럭스 변동성 파악에 이용 가능.
- 나. 남극 Ross Sea 유광층에 존재하는 입자성 유기탄소, BPC 및 TEP-C의 수직 분포와 계절 및 공간적 변동성 분석을 통해 유광층에서 생성된 유기탄소가 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 미치는 영향 예측.
- 라. 남극 Ross Sea 해역에서 확보한 실측 자료는 인공위성을 이용한 식물플랑크톤 및 입자성 유기탄소 원격탐사 연구에서의 알고리즘 검·보정 및 적용성 평가 가능.



제 5장 연구개발결과의 활용 계획

제 1절. 학술적 파급 효과

1. 남극해는 전 해양 면적의 약 20%에 불과하지만, 인류 기원 이산화탄소의 약 50%를 흡수하는 주요 탄소 흡수 지역으로서 전 지구적 탄소 순환에서 결정적인 역할을 수행하고 있음. 본 연구는 이러한 남극해에서의 식물플랑크톤 기반 생물학적 탄소 거동에 대해 정량적으로 규명한 사례로, 향후 남극 기후변화 대응 연구의 과학적 기반 자료로 활용될 수 있음.
2. 식물플랑크톤의 광합성 기반 탄소 흡수율과 POM의 생화학적 조성(단백질, 지질, 탄수화물) 분석을 통해 유기탄소의 침강 및 변환 과정을 시계열적·수직적 관점에서 통합적으로 분석하였으며 이는 기존의 단편적 접근을 보완하는 체계적 탄소 거동 분석 자료로 평가됨.
3. 유광층과 심층 간의 유기탄소 구성요소(BPC, DOC, TEP-C 등)의 상대적 기여도 및 변동 특성을 정량적이고 계층적으로 분석한 시도 중 하나로서, 향후 남극 생물학적 탄소 펌프의 변동 및 전환에 대한 시나리오 예측 모델 구축에 핵심 기반자료로 활용 가능함.
4. Ross Sea를 중심으로 확보한 장기·수직 프로파일 자료는 남극 연안 생태계의 시·공간적 유기탄소 조성 변동성을 이해하는 데 중요한 사례가 되며 구성요소 간 상관성 분석 결과는 환경 변화 감지 및 생태계 모니터링 지표로서의 활용 가능성 또한 높게 평가됨.
5. 궁극적으로 본 연구는 기후변화 대응을 위한 해양정책 수립 및 국제 협약 이행 평가에 기초 자료로 활용될 수 있으며, 남극해 생물학적 펌프 기능 변화 예측 및 탄소 순환 모델 정교화에 실질적 기여가 가능함.
6. 극지 장기생태모니터링 및 국제 공동연구 네트워크와의 연계 기반으로 작용할 수 있으며, 이를 통해 한국의 극지 탄소 연구 참여 확대 및 국제적 위상 제고에 이바지할 것으로 기대됨.

제 2절. 경제적 파급 효과

1. 남극해 생물생산력 변화와 어획 가능 자원량 간의 연계 분석을 위한 기초자료를 제공하며, 장기적으로는 극지 수산자원 지속 가능성 평가 모델 고도화에 기여할 수 있음.
2. 유기탄소 Pool 구성 핵심 요소(DOC, POC, BPC, TEP-C 등)의 정량적 분석 결과는 향후 생태계 기반 수산자원 관리(EAFM) 전략 수립 시 과학적 근거자료로 활용될 수 있으며, 기후변화에 따른 생산성 변화 예측 및 대응전략 마련에 중요한 정보로 기능함.
3. 남극해 생물기원 탄소흡수량에 대한 정량적 자료는 기후 관련 국제협약 이행 보고 및 자국 기여도 산정에 있어 핵심 자료로 활용될 수 있으며, 이는 국가 탄소 예산 작성 및 국제 외교 전략 수립에도 기여 가능함.
4. 연구 과정에서 확보한 유기탄소 분석 항목별 표준화 방법 및 전환계수는 해양 유기탄소 정량 분석 프로토콜의 국내외 표준화 작업에 실용적인 기반을 제공함.
5. 남극해 생물학적 펌프의 정량적 특성 규명을 통해 탄소 순환의 불확실성을 줄이고 해양 탄소 관리 정책의 정밀성 향상에 기여함으로써, 향후 온실가스 감축 및 탄소중립 정책과 연계된 실질적 경제적 가치 창출도 기대할 수 있음.

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 구조류에서 크기가 작은 식물플랑크톤이 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

- Allredge, A. L., Passow, U., & Logan, B. E. (1993). The abundance and significance of a class of large, transparent organic particles in the ocean. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 40(6), 1131 - 1140.
- Arrigo, K. R., Van Dijken, G., & Pabi, S. (2008). Impact of a shrinking Arctic ice cover on marine primary production. *Geophysical Research Letters*, 35.
- Arrigo, K. R., & 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., & 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(C7), 3231.
- Biddanda, B., & 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., & Dyer, W. J. (1959). A rapid method of total lipid extraction and purification. *Canadian Journal of Biochemistry and Physiology*, 37, 911 - 917.
- Borrione, I., & 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. E., Bowie, A. R., Buesseler, K. O., & 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., & Schofield, O. M. E. (2019). Enhanced oceanic CO₂ uptake along the rapidly changing West Antarctic Peninsula. *Nature Climate Change*, 9, 678 - 683.
- Brown, P., Painting, S., & 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., & Lee, C. (1972). Data on the composition and dark survival of four sea-ice microalgae. *Limnology and Oceanography*, 17, 458 - 461.
- Bunt, J., Owens, O. V. H., & Hoch, G. (1966). Exploratory studies on the physiology and ecology of a psychrophilic marine diatom. *Journal of Phycology*, 2, 96 - 100.
- Chen, S., Smith, W. O., Jr., & 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.
- 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., &

- 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., & Liebezeit, G. (1982). Biochemical compounds in the pelagic and sedimentary environment of Antarctic waters. *Centre National pour l'Exploitation des Océans*, 14, 67 - 86.
- DiTullio, G. R., & Smith, W. O., Jr. (1996). Spatial patterns in phytoplankton biomass and pigment distributions in the Ross Sea. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 101(C8), 18467 - 18477.
- Doney, S. C., Ruckelshaus, M., Duffy, J. E., Barry, J. P., Chan, F., English, C. A., Galindo, H. M., Grebmeier, J. M., Hollowed, A. B., & 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., & 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., & 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.
- Engel, A., & Passow, U. (2001). Carbon and nitrogen content of transparent exopolymer particles (TEP) in relation to their Alcian Blue adsorption. *Marine Ecology Progress Series*, 219, 1 - 10.
- Ellegaard, M., & 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., & Albertelli, G. (1997). Short-term variations in particulate matter flux in Terra Nova Bay, Ross Sea. *Antarctic Science*, 9, 143 - 149.
- Fabiano, M., & 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., & Pusceddu, A. (2000). Bacteria, protozoa and organic matter composition in the sediments of Terra Nova Bay (Ross Sea). In F. M. Faranda, L. Guglielmo, & A. Ianora (Eds.), *Ross Sea ecology* (pp. 159 - 169). Springer.
- Fabiano, M., Danovaro, R., Crisafi, E., La Ferla, R., Povero, P., & 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., & Danovaro, R. (1993). Distribution and composition of particulate organic matter in the Ross Sea (Antarctica). *Polar Biology*, 13, 525 - 533.
- Fabiano, M., Povero, P., & Danovaro, R. (1996). Particulate organic matter composition in Terra Nova Bay (Ross Sea, Antarctica) during summer 1990. *Antarctic Science*, 8, 7 - 13.

- Fabiano, M., & 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., & 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. E., Johnson, K. S., Gordon, R. M., Coale, K. H., & Smith, W. O., Jr. (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., & 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.
- Ge, Z., Li, Q. P., Yang, W., Liu, X., & Wu, Z. (2022). Transparent exopolymer particle dynamics along a shelf-to-sea gradient and impacts on the regional carbon cycle. *Science of the Total Environment*, 808, 152117.
- Halpern, B. S., Walbridge, S., Selkoe, K. A., Kappel, C. V., Micheli, F., D'Agrosa, C., Bruno, J. F., Casey, K. S., Ebert, C., & 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., & Tominaga, H. (1969). A detailed analysis of carbohydrates in marine particulate matter. *Marine Biology*, 2, 228 - 235.
- Hansell, D. A. (2005). Dissolved organic carbon reference material program. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 85, 36.
- Harrison, P. J., Thompson, P. A., & Calderwood, G. S. (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., G  linas, Y., Lee, C., Peterson, M. L., & 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., & Meier, W. (2016). A review of recent changes in Southern Ocean sea ice, their drivers and forcings. *Global and Planetary Change*, 143, 228 - 250.
- Hong, Y., Smith, W. O., & White, A. M. (1997). Studies on transparent exopolymer

- particles (TEPs) produced in the Ross Sea (Antarctica) and by *Phaeocystis antarctica* (Prymnesiophyceae). *Journal of Phycology*, 33, 368 - 376.
- Hung, C. C., Guo, L., Santoshi, P. H., Alvarado-Quiroz, N., & Haye, J. M. (2003). Distributions of carbohydrate species in the Gulf of Mexico. *Marine Chemistry*, 81(3 - 4), 119 - 135.
- Ittekkot, V., Degens, E. T., & Brockmann, U. (1982). Monosaccharide composition of acid-hydrolyzable carbohydrates in particulate matter during a plankton bloom. *Limnology and Oceanography*, 27, 770 - 776.
- Kakinuma, M., Coury, D., Kuno, Y., Itoh, S., Kozawa, Y., Inagaki, E., Yoshiura, Y., & 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., & 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., & 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., & 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.
- Kim, M., Hwang, J., Rho, T., Lee, T., Kang, D. J., Chang, K. I., Noh, S., Joo, H., Kwak, J. H., Kang, C. K., & Kim, K. R. (2017). Biogeochemical properties of sinking particles in the southwestern part of the East Sea (Japan Sea). *Journal of Marine Systems*, 167, 33 - 42.
- Krell, A., Schnack-Schiel, S. B., Thomas, D. N., Kattner, G., Zipan, W., & 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., & Whitledge, 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., Whitledge, T. E., & Kang, S.-H. (2008). Springtime 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, D. J., Jr., Dinniman, M. S., & 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., & 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 of the United States of America*, 107, 14987 - 14992.
- Lowry, O. H. (1951). Protein measurement with the Folin phenol reagent. *Journal of Biological Chemistry*, 193, 265 - 275.
- Mangoni, O., Saggiomo, M., Bolinesi, F., Castellano, M., Povero, P., Saggiomo, V., & DiTullio, G. R. (2019). Phaeocystis antarctica unusual summer bloom in stratified Antarctic coastal waters (Terra Nova Bay, Ross Sea). *Marine Environmental Research*, 151, 104733.
- Mari, X., Passow, U., Migon, C., Burd, A. B., & Legendre, L. (2017). Transparent exopolymer particles: Effects on carbon cycling in the ocean. *Progress in Oceanography*, 151, 13 - 37.
- Markus, T., Stroeve, J. C., & Miller, J. (2009). Recent changes in Arctic sea ice melt onset, freezeup, and melt season length. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 114, C12024.
- Marsh, J. B., & Weinstein, D. B. (1966). Simple charring method for determination of lipids. *Journal of Lipid Research*, 7, 574 - 576.
- Massom, R. A., Reid, P., Stammerjohn, S., Raymond, B., Fraser, A., & 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., & Hofmann, G. E. (2011). High-frequency observations of pH under Antarctic sea ice in the southern Ross Sea. *Antarctic Science*, 23, 607 - 613.
- McGillicuddy, D. J., Jr., Sedwick, P. N., Dinniman, M. S., Arrigo, K. R., Bibby, T. S., Greenan, B. J. W., Hofmann, E. E., Klinck, J. M., Smith, W. O., Jr., & Mack, S. L. (2015). Iron supply and demand in an Antarctic shelf ecosystem. *Geophysical Research Letters*, 42, 8088 - 8097.
- McQuoid, M. R. (1996). Diatom resting stages. *Journal of Phycology*, 32, 889 - 902.
- Measures, C. I., Hatta, M., & Grand, M. M. (2012). Bioactive trace metal distributions and biogeochemical controls in the Southern Ocean. *Oceanography*, 25, 122 - 133.
- Mitchell, B. G., & Holm-Hansen, O. (1991). Observations and modeling of the Antarctic phytoplankton crop in relation to mixing depth. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 38, 981 - 1007.
- Moal, J., Martin-Jézéquel, V., Harris, R., Samain, J.-F., & Poulet, S. A. (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., & Smith, W. O., Jr. (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., & 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., & 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., & Joos, F. (2005). Anthropogenic ocean acidification over the twenty-first century and its impact on calcifying organisms. *Nature*, 437, 681 - 686.
- Palmisano, A. C., & Sullivan, C. W. (1982). Physiology of sea ice diatoms. I. Response of three polar diatoms to a simulated summer - winter 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., & 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.
- Passow, U. (2002). Transparent exopolymer particles (TEP) in aquatic environments. *Progress in Oceanography*, 55(3 - 4), 287 - 333.
- Pirt, S. J. (1975). Principles of microbe and cell cultivation. Blackwell Scientific Publications.
- Pusceddu, A., Serra, E., Sanna, O., & 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., & Ross, R. M. (2009). Life under Antarctic pack ice: A krill perspective. In I. Krupnik, M. A. Lang, & S. E. Miller (Eds.), *Smithsonian at the Poles: Contributions to International Polar Year Science*. Smithsonian Institution.
- Quetin, L. B., Ross, R. M., Fritsen, C. H., & 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., & 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., & Voytek, M. A. (1987). Photoadaptations of photosynthesis and carbon metabolism by phytoplankton from McMurdo Sound, Antarctica. I. Species-specific and community responses to reduced irradiances. *Limnology and Oceanography*, 32, 249 - 259.

- Ross, R. M., Quetin, L. B., Martinson, D. G., Iannuzzi, R. A., Stammerjohn, S. E., & 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., & 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., & 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., & Smith, W. O., Jr. (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, C02019.
- Smayda, T. J., & Mitchell-Innes, B. (1974). Dark survival of autotrophic, planktonic marine diatoms. *Marine Biology*, 25, 195 - 202.
- Smith, W. O., Jr., Ainley, D. G., Arrigo, K. R., & Dinniman, M. S. (2014). The oceanography and ecology of the Ross Sea. *Annual Review of Marine Science*, 6, 469 - 487.
- Smith, W. O., Jr., & Jones, R. M. (2015). Vertical mixing, critical depths, and phytoplankton growth in the Ross Sea. *ICES Journal of Marine Science*, 72, 1952 - 1960.
- Smith, W. O., Jr., Nelson, D. M., DiTullio, G. R., & 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, W. O., Jr., Sedwick, P. N., Arrigo, K. R., Ainley, D. G., & Orsi, A. H. (2012). The Ross Sea in a sea of change. *Oceanography*, 25, 90 - 103.
- Smith, W. O., & 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., & Martinson, D. (2012). Regions of rapid sea ice change: An inter-hemispheric seasonal comparison. *Geophysical Research Letters*, 39, L06501.
- Stammerjohn, S. E., Martinson, D., Smith, R. C., Yuan, X., & 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, C03S90.
- Suárez, I., & 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.
- Sugimura, Y., & Suzuki, Y. (1988). A high-temperature catalytic oxidation method for the

determination of non-volatile dissolved organic carbon in seawater by direct injection of a liquid sample. *Marine Chemistry*, 24(2), 105 - 131.

Umani, S. F., Monti, M., Bergamasco, A., Cabrini, M., De Vittor, C., Burba, N., & 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.

Zamanillo, M., Ortega-Retuerta, E., Nunes, S., Rodríguez-Ros, P., Dall'Osto, M., Estrada, M., Sala, M. M., & Simó, R. (2019). Main drivers of transparent exopolymer particle distribution across the surface Atlantic Ocean. *Biogeosciences*, 16(3), 733 - 749.

Zhu, Z., Xu, K., Fu, F., Spackeen, J. L., Bronk, D. A., & 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.



뒷 면

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.

붙임. 위탁과제 국·영문 사사(acknowledgment) 표기 방법