

아문젠 해역 작은 식물플랑크톤 기여도를
이용한 환경 변화 감지

Small phytoplankton contribution as a indicator for
environmental changes in the Amundsen Sea



부산대학교 산학협력단

제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “아문젠해 빙붕소멸 속도와 해양변동 추세 연구” 과제의 위탁연구 “아문젠 해역 작은 식물플랑크톤 기여도를 이용한 환경 변화 감지” 과제의 최종 보고서로 제출합니다.



(본과제) 총괄연구책임자	: 김 태 완
위탁연구기관명	: 부산대학교
위탁연구책임자	: 이 상 현
위탁참여연구원	: 강 재 중
“	: 민 준 오
“	: 이 재 형
“	: 이 다 빈
“	: 조 나 은
“	: 김 관 우
“	: 김 명 준
“	: 장 효 근
“	: 이 창 화

보고서 초록

위탁연구과제명	아문젠 해역 작은 식물플랑크톤 기여도를 이용한 환경 변화 감지				
위탁연구책임자	이상헌	해당단계 (2017~2019) 참여연구원수	25	해당단계 (2017~2019) 연구비	135,000,000 원
연구기관명 및 소속부서명	부산대학교 해양학과		참여기업명		
국제공동연구	상대국명 :		상대국연구기관명 :		
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)				보고서면 수	
<ul style="list-style-type: none"> - 온난화로 인한 수온 상승과 성층이 강화된 해양환경에서 작은 식물플랑크톤의 중요성이 강조되어 왔지만 남극해에서 작은 식물플랑크톤의 기여도에 대한 이용 가능한 정보는 거의 없음 - 본 연구에서 크고 작은 식물플랑크톤의 탄소 섭취율과 질소 섭취율의 시기에 따른 변동성을 분석하였고 총 일차생산에 대한 작은 식물플랑크톤의 기여도와 작은 식물플랑크톤의 거대분자 조성을 분석함 - polynya 지역에서 총 일차생산은 1월 초 $0.84 \pm 0.18 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 에서 2월-3월에 $0.19 \pm 0.04 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$까지 감소했음 - polynya 지역에서 총 탄소 섭취율에 대한 작은 식물플랑크톤의 기여도는 1월 초($14.9 \pm 8.4\%$)부터 2월에서 3월($50.8 \pm 18.4\%$)까지 증가함 - 총 일일 질산염 섭취율에 대한 작은 식물플랑크톤의 기여도는 non-polynya 지역에서는 $44.2 \pm 33.3\%$, polynya 지역에서는 $63.1 \pm 38\%$의 값을 보였으며 총 암모늄 섭취율에 대한 작은 식물플랑크톤의 기여도는 non-polynya 지역에서는 44.9%, polynya 지역에서는 45.1%의 값이 나타남 - 2018년 ANA08B cruise 동안 총 탄수화물, 단백질, 지질에 대한 작은 식물플랑크톤의 기여도는 각각 $46.7 \pm 11.1\%$, $43.9 \pm 21.4\%$, $52.2 \pm 14.7\%$으로 나타남 					
색 인 어 (각 5개 이상)	한 글	아문젠해, 식물플랑크톤, 작은식물플랑크톤 기여도, 일차생산, 신생산, 재생산, 폴리냐, 거대분자조성			
	영 어	Amundsen Sea, Phytoplankton, Small phytoplankton contribution, Primary production, New production, Regenerated production, polynya, Macromolecular composition			

요 약 문

I. 제 목

아문젠 해역 작은 식물플랑크톤 기여도를 이용한 환경 변화 감지

II. 연구개발의 목적 및 필요성

- 남극해에서 식물플랑크톤은 해양 생태계에서 기초가 되는 주요 일차생산자로 기후변화 식물플랑크톤에 미치는 영향을 이해하는 것이 필요함
- 작은 식물플랑크톤은 최근 따뜻해지고 담수화가 진행되는 해양에서 더 중요해 질 것으로 예상됨
- 작은 식물플랑크톤의 생태학적, 생리학적인 연구를 통해 남극 기후변동에 따라 해양 먹이그물에 미치는 영향을 파악 및 평가

III. 연구개발의 내용 및 범위

- 아문젠 해역에서 작은 식물플랑크톤의 생체량과 해양환경 파악
- 아문젠 해역에서 polynya 지역과 non-polynya 지역에서의 크기에 따른 식물플랑크톤의 일차생산, 신 생산 및 재생산 기여율 산정
- 아문젠 해역에서 수층에 따른 식물플랑크톤의 거대 분자 조성 측정

IV. 연구개발결과

- polynya 지역에서 총 일차생산은 1월 초 $0.84 \pm 0.18 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 에서 2월-3월에 $0.19 \pm 0.04 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 까지 감소하며 아문젠 해에서 식물플랑크톤의 일차생산이 보이는 전형적인 계절적 변동성을 보임

- 총 탄소 섭취율에 대한 작은 식물플랑크톤의 기여도는 1월 초($14.9 \pm 8.4\%$)부터 2월에서 3월($50.8 \pm 18.4\%$)까지 증가함
- 질산염 섭취율에 대한 작은 식물플랑크톤의 기여도는 non-polynya 지역에서는 $44.2 \pm 33.3\%$, polynya 지역에서는 $63.1 \pm 38\%$ 의 값을 보였으며 총 암모늄 섭취율에 대한 작은 식물플랑크톤의 기여도는 non-polynya 지역에서는 44.9% , polynya 지역에서는 45.1% 의 값을 보임
- 2018년 ANA08B cruise 동안 총 탄수화물 단백질, 지질에 대한 작은 식물플랑크톤의 기여도는 각각 $46.7 \pm 11.1\%$, $43.9 \pm 21.4\%$, $52.2 \pm 14.7\%$ 으로 나타남.

V. 연구개발결과의 활용계획

- 아문젠해에서 환경변화에 민감하게 반응하는 작은 식물플랑크톤 관찰시 향후 환경변화에 따른 영향 측정 가능
- 식물플랑크톤의 크기에 따른 탄소 및 질소 섭취율 측정을 통해 환경변화에 따른 해양의 일차생산량과 작은 식물플랑크톤의 기여도 변동 유추 가능
- 크기에 따른 식물플랑크톤의 특성 파악을 통해 환경변화의 지시자로 이용 가능
- 식물플랑크톤의 크기에 따른 거대분자조성분석을 통해 식물플랑크톤의 생리적인 상태를 확인할 수 있는 bio-marker로 개발 가능

S U M M A R Y

I. Title

Small phytoplankton contribution as a indicator for environmental changes in the Amundsen Sea

II. Purpose and Necessity of R&D

- To understand effect of climate change on phytoplankton as a primary producer of marine ecosystem in Southern Ocean
- The importance of small phytoplankton in warming and stratified water conditions has been emphasized recently
- To assess effect of climate change on ocean ecosystem through ecological and physiological studying of small phytoplankton in Southern Ocean

III. Contents and Extent of R&D

- Measurement of biomass of small phytoplankton and environmental parameters in the Amundsen Sea.
- Estimation of primary production, new and regenerated production of large and small phytoplankton in polynya and non-polynya regions in Amundsen Sea
- Estimation of physiological status of large and small phytoplankton by macromolecular composition analysis

IV. R&D Results

- The total primary production in the polynya region decreased from $0.84 \pm 0.18 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ in early January to $0.19 \pm 0.04 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ in February–March, which is typical of the seasonal variation in the primary production of phytoplankton in the Amundsen Sea.

- The small phytoplankton contributions to the total carbon uptake rates increased considerably from early January ($14.9 \pm 8.4\%$) to February–March ($50.8 \pm 18.4\%$) in the polynya region.
- The small phytoplankton contribution to total daily nitrate uptake rate was $44.2 \pm 33.3\%$ in the non-polynya region and $63.1 \pm 38\%$ in the polynya region, and the small phytoplankton contribution to total daily ammonium uptake rate was 44.9% and 45.1% in the non-polynya and polynya region, respectively.
- Small phytoplankton contributions to total carbohydrates, proteins and lipids during the 2018 ANA08B cruise were $46.7 \pm 11.1\%$, $43.9 \pm 21.4\%$ and $52.2 \pm 14.7\%$, respectively.

V. Application Plans of R&D Results

- To predict an affect of environmental change by monitoring small phytoplankton in the Amundsen Sea
- To predict variations of primary production caused by climate changes through carbon and nitrogen uptake rates of small phytoplankton against current environment change
- To develop a indicator which represents environmental changes through studying characteristics of large and small phytoplankton
- To develop bio-marker which represents phytoplankton physiological statis from macromolecular analysis

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	49
Chapter V. Future Directions	51
Chapter VI. Reference	54

List of Tables and Figures

Table 1. Physical and biological characteristics of stations in the Amundsen Sea in January–February 2016 and February–March 2012. The concentrations of chl-a and POC and carbon uptake rates of phytoplankton were integrated from the surface to 1 % of PAR.

Table 2. Comparisons of the small phytoplankton contributions in the Amundsen Sea between previous study (Lee et al., 2017) and this study.

Table 3. Small phytoplankton contributions to total nitrate and ammonium uptake rate in the Amundsen Sea during early January 2014, January–February 2016, and February–March 2012.

Table 4. Macromolecular compositions of phytoplankton in the Amundsen Sea during January–February 2018.

Fig. 1. Map showing the locations of productivity stations in the Amundsen Sea in the Southern Ocean during February–March 2012 (ANA02C).

Fig. 2. Map showing the locations of productivity stations in the Amundsen Sea in the Southern Ocean during January–February 2016 (ANA06B).

Fig. 3. Map showing the locations of productivity stations in the Amundsen Sea in the Southern Ocean during early January 2014 (ANA04B).

Fig. 4. Map showing the locations for macromolecular composition in the Amundsen Sea in the Southern Ocean during January–February 2018 (ANA08B).

Fig. 5. The temperature and salinity diagrams from the surface to 100 m in the (a) non-polynya and (b) polynya regions in early January 2014 (blue asterisks), January–February 2016 (red circles), and February–March 2012 (black triangles). The data from Lee et al. (2017) and Kim et al. (2015) were used for early January 2014 and February–March 2012, respectively.

Fig. 6. Vertical profiles of the mean concentrations of inorganic major nutrients—(a) phosphate, (b) nitrite + nitrate, (c) silicate, and (d) ammonium—from the surface to 100 m in the nonpolynya and polynya regions during the three periods. The data of Kim et al. (2015) were used for February–March 2012.

Fig. 7. The chl-a concentrations of large and small phytoplankton during (a) early January 2014, (b) January–February 2016, and (c) February–March 2012.

Fig. 8. The POC concentrations of large and small phytoplankton during (a) early January 2014, (b) January–February 2016, and (c) February–March 2012.

Fig. 9. The chl-a concentrations of total phytoplankton (large + small) during January–February 2018.

Fig. 10. The contribution of large and small phytoplankton to total biomass of phytoplankton during January–February 2018.

Fig. 11. The relationships between the POC and chl-a concentrations of large (triangles) and small phytoplankton (circles) in (a) early January 2014, (b) January–February 2016, and (c) February–March 2012.

Fig. 12. The carbon uptake rates of large and small phytoplankton during (a) early January 2014, (b) January–February 2016, and (c) February–March 2012.

- Fig. 13. The nitrate uptake rates of large and small phytoplankton during early January 2014.
- Fig. 14. The nitrate uptake rates of large and small phytoplankton during January–February 2016.
- Fig. 15. The nitrate uptake rates of large and small phytoplankton during early February–March 2012.
- Fig. 16. The ammonium uptake rates of large and small phytoplankton during early January 2014.
- Fig. 17. The ammonium uptake rates of large and small phytoplankton during January–February 2016.
- Fig. 18. The ammonium uptake rates of large and small phytoplankton during February–March 2012.
- Fig. 19. biochemical compositions of large phytoplankton during January–February 2018.
- Fig. 20. biochemical compositions of small phytoplankton during January–February 2018.
- Fig. 21. Seasonal variations of the total values (bar graph) and small phytoplankton contributions (line graph) in the non-polynya and polynya regions.
- Fig. 22. The average specific uptake rates of large and small phytoplankton in the non-polynya and polynya regions during the three periods. The data of early January 2014 were adopted from Lee et al. (2017), and the values of large phytoplankton in February–March 2012 were calculated from total values described by

Kim et al. (2015).



목차

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	49
제 5장 연구개발결과의 활용 계획	51
제 6장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보	53
제 7장 참고문헌	54

제 1장 서론

제 1절. 연구개발의 목적

남극해에서 식물플랑크톤은 해양 생태계에서 기초가 되는 주요 일차생산자로서 상위 영양단계 생물들에게 기초적인 먹이 원을 제공 할 뿐만 아니라 그들의 생물량과 생리상태에 영향을 미칠 수 있다. 현재 진행 중인 기후변화는 남극해의 지역에 따라 생태계에 다른 영향을 미치고 있기 때문에 환경변화의 지시자인 식물플랑크톤이 어떻게 반응하는지 연구할 필요가 있다. 또한 남극해에서 작은 크기의 식물플랑크톤의 중요성이 커질 것이라 예상되고 있기 때문에 크기에 따른 식물플랑크톤의 생태 연구를 통해 남극 해양 생태계가 어떻게 변화 할 지에 대한 연구를 수행해야 한다. 이를 위해서는 식물플랑크톤의 생태학적, 생리학적인 조사를 통해 남극 기후변동이 남극해 먹이그물에 미치는 영향을 파악하고 평가하는 것이 중요하다. 따라서 전 세계적으로 관심을 받아가고 있는 아문젠해에서 환경변화에 따른 크기별 식물플랑크톤의 생리적 특성과 먹이양으로써의 생물량 그리고 먹이 질의 측정은 향후 남극해에 일어날 해빙/해양 생태계의 변화 연구에 대한 기반 자료로서 중요한 과학적 근거자료로 사용될 수 있다.

제 2절. 연구개발의 필요성

남극해는 식물플랑크톤의 일차생산을 통해 많은 양의 이산화탄소를 저층으로 제거 할 수 있는 능력과 남극저층수의 형성 등 해양의 탄소 및 해류 순환에 밀접하게 관련되어 있는 지역으로 전 지구적인 기후체계에 아주 중요한 역할을 하고 있다. 하지만 현재 진행 중인 지구온난화 및 기후변화의 영향으로 남극의 해양 환경이 최근 들어 급격하게 변화하는 현상들이 관측되고 있다. 특히 남극의 서쪽과 남쪽 지역의 해양에서 해빙과 빙하의 시공간적 분포 변화가 감지됨에 따라 전 세계적으로 인공위성을 활용한 남극해의 해빙과 빙하의 면적에 대한 시공간 분포 변화를 모니터링 하려는 연구가 활발히 진행되고 있다. 하지만 현장 관측은 지리적으로 멀고 기상악화로 인해 접근에 많은 제한을 받고 있다. 특히 인공위성 자료에 기반 한 결과들을 해석하는데 필수적인 식물플랑크톤의 현장 관측 자료에 대한 수요가 증가하고 있지만 실측 자료는 많지 않다. 따라서 국제적 경쟁력을 갖춘 대한민국의 쇄빙연구선 아라온을 이용한 남극해 연구는 국내 협력 기반 구축 뿐 아니라 현장관측을 통해 실측자료를 획득할 수 있을 것이라 사료된다.

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 쇄빙연구선 아라온의 효율적 활용
- 나. 국제 수준의 극지연구 수행을 통한 국가 위상 증대
- 다. 광역 해빙 해양 생태계 연구를 위한 전문 인력 양성과 배출
- 라. 극지역의 해빙 변화에 따른 한반도 기후변화 예측 모델 개발 기초 자료 제공



제 2장 국내외 기술 개발 현황

제 1절. 국내 기술 개발 현황

1. 2010년부터 쇄빙연구선 아라온호 도입을 통해 독자적인 남극연구가 수행되기 시작함
2. 남극 세종과학기지, 장보고과학기지과 더불어 장기적이고 지속적인 연구가 진행될 것으로 예상됨
3. 식물플랑크톤은 해양생태계에서 중요한 역할을 하는 생물로 먹이그물에서 가장 기초적인 위치를 가짐
4. 따라서 식물플랑크톤의 전 지구 및 극지생태 환경에 미치는 영향에 대해 연구의 주요 내용은 남극해 탄소 flux 중 생물 펌프의 주요 인자로서의 플랑크톤 연구
5. 식물플랑크톤의 광합성, 일차생산량 조절 환경요인 연구
6. 크기에 따른 식물플랑크톤의 탄소, 질소 섭취율 비교 연구
7. 식물플랑크톤의 고유한 생리현상으로 거대분자 조성 연구가 이루어지고 있음
8. 장기적인 관점에서 주요 식물플랑크톤 우점종이 환경 변화와 함께 천이함에 따라 해양 생태계에 미치는 영향에 대한 연구가 진행 중임
9. 1차 소비자의 주요 먹이 원으로서의 식물플랑크톤 연구
10. 해빙 내 식물플랑크톤의 생물량을 조절하는 조절 환경요인 연구
11. 다양한 연구들이 국내 연구진으로 부터 수행되고 있지만 장기적인 관점에서 다른 선진국의 극지 연구방향 같이 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 극지연구 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 남극연구소 British Antarctic Survey는 남조지아섬 해역에서 약 5년 단위의 장기 프로그램을 통해 남극해양생태계 변동 과정 연구를 지난 수 십 년 동

안 수행해오고 있음

6. 독일의 Alfred Wegener Institute of Polar and Marine Research는 남극 순환류가 통과하는 해역에서 세계 최대의 쇄빙연구소 Polarstern을 이용하여 표층 해양 생태계 구조와 기능 연구를 매년 수행하고 있음

7. 일본의 극지연구소는 매년 해양생태계 연구를 정기적으로 수행하고 있음

8. 중국의 극지연구소는 2년 주기로 장성기지과 중산 기지 사이의 환남극 해역에서 종합 해양생태계 조사를 수행하고 있음

9. 미국은 해빙연구선 Palmer호를 통해 남극생태계 연구가 진행 중에 있음

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



제 3장 연구개발수행 내용 및 결과

요 약

온난화로 따른 수온상승과 그로 인해 성층이 강화된 해양환경에서 작은 식물플랑크톤의 중요성이 강조되어 왔지만 남극해에서 작은 식물플랑크톤의 기여도에 대한 이용 가능한 정보는 적은 실정이다. 본 연구에서 크고 작은 식물플랑크톤의 탄소 섭취율과 질소 섭취율의 시기에 따른 변동성을 분석하였고 총 일차생산에 대한 작은 식물플랑크톤의 기여도를 분석했다. 데이터는 2012년부터 2016년 사이 세 번의 서로 다른 현장 조사와 2018년 1월에서 2월의 현장 조사를 통해 아문젠 해역에서 수집되었다. Polynya 지역에서 총 일차생산은 1월 초 $0.84 \pm 0.18 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 에서 2월-3월에 $0.19 \pm 0.04 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 까지 감소하였으며 이것은 아문젠 해에서 식물플랑크톤의 일차생산이 보이는 전형적인 계절적 변동성이다. 이와 대조적으로 polynya 지역에서 총 탄소 섭취율에 대한 작은 식물플랑크톤의 기여도는 1월 초 ($14.9 \pm 8.4\%$)부터 2월에서 3월($50.8 \pm 18.4\%$)까지 증가했다. 작은 식물플랑크톤의 기여도의 증가는 작은 식물플랑크톤의 생물량이나 specific uptake rate의 증가 보다는 연구 기간 동안 큰 식물플랑크톤의 생물량의 감소와 specific uptake rate의 감소 때문으로 사료된다. 세 번의 조사를 통한 polynya 지역에서 일차생산에 대한 작은 식물플랑크톤의 기여도($25.5 \pm 15.7\%$)는 이전 연구($14.9 \pm 8.4\%$) 보다 상당히 높았다. 총 일일 질산염 섭취율에 대한 작은 식물플랑크톤의 기여도는 non-polynya 지역에서는 $44.2 \pm 33.3\%$, polynya 지역에서는 $63.1 \pm 38\%$ 의 값을 보였으며 총 암모늄 섭취율에 대한 작은 식물플랑크톤의 기여도는 non-polynya 지역에서는 44.9% , polynya 지역에서는 45.1% 의 값을 보였다. 질산염과 암모늄 섭취율에 대한 작은 식물플랑크톤의 기여도는 non-polynya 지역과 polynya 지역간 뚜렷한 차이는 없었다. 2018년 ANA08B cruise 동안 총 탄수화물, 단백질, 지질에 대한 작은 식물플랑크톤의 기여도는 각각 $46.7 \pm 11.1\%$, $43.9 \pm 21.4\%$, $52.2 \pm 14.7\%$ 으로 나타났다.

제 1절. 서론

최근 연구들은 급속한 기후변화가 남극해 해빙의 거동을 변화시켜 왔다고 보고했다 (Pritchard et al., 2012; Rignot et al., 2008; Stammerjohn et al., 2012; Thompson & Solomon, 2002). 기후 변화에 특히 민감한 서 남극 반도의 아문젠 해는 빙하의 해빙과 해빙의 감소 때문에 주목을 받고 있다(Criscitiello et al., 2013; Jacobs et al., 2013; Stammerjohn et al., 2015). 이러한 환경 변화들은 해양 생태계의 구조를 바꿀 수 있다. 예를 들어 용빙수의 유입은 다양한 해양 생물의 서식지가 되는 유광층의 환경을 변화시킬 수 있다(Meredith et al., 2016; Montes Hugo et al., 2009; Rose et al., 2009).

남극해에는 다양한 식물플랑크톤 군집이 있으며 봄과 여름 동안 높은 일차생산성이 나타난다(e.g., Arrigo & Van Dijken, 2003; Boyd et al., 2000; Lee et al., 2012). 일반적으로 규조류와 *Phaeocystis antarctica* 는 이 지역에서 식물플랑크톤 bloom 시기에 우점 하는 종으로 알려져 있다(Alvain et al., 2008; Arrigo et al., 1999; Fragoso & Smith, 2012; Petrou et al., 2016; Smith & Asper, 2001). 남극해에서 식물플랑크톤의 bloom 시기가 철의 이용가능성, 혼합층 수심, 빛 조건 등의 환경 요인들에 의해 계절적으로 영향을 받기 때문에(Alderkamp et al., 2012; Alderkamp et al., 2015; Arrigo et al., 2012; Boyd, 2002; Boyd et al., 2000; Coale et al., 2003; Mills et al., 2012; Petrou et al., 2016) 일반적으로 우점 하는 식물플랑크톤 군집의 계절적 변동성이 관측되었다(Clarke & Leakey, 1996; Mongin et al., 2008). 실제로 12월에서 1월 그리고 2월에서 3월에 아문젠 해에서 일차생산의 큰 계절적 변동성이 Kim et al. (2015)에 의해 보고되었다.

보편적으로 Picophytoplankton(0.7-2 μm)과 nanophytoplankton(2-20 μm)이 빈 영양수피에서 중요한 그룹으로 알려져 있지만 남극해와 같이 생산성이 높은 해역에서도 작은 식물플랑크톤의 중요성이 강조되고 있다. 게다가 이전 연구들은 수온이 증가하고 성층화된 수피 조건에서 번영할 수 있는 picophytoplankton 의 능력 때문에 그들의 중요성이 증가할 것이라고 주장했다(Agawin et al., 2000; Lee et al., 2013; Lee et al., 2017; Li et al., 2009; Morán et al., 2010). 식물플랑크톤은 환경 변화에 대한 지시자의 역할을 하기 때문에 총 일차생산에 대한 작은 식물플랑크톤의 기여도의 연구는 생태계 변화들을 모니터링 하는데 유용할 수 있다(Agawin et al., 2000; Agawin et al., 2002; Bell & McDermott, 2000; Goffart et al., 2000; Moline et al., 2004). 예를 들어 Moline et al. (2004)은 남극 반도를 따라 큰 규조류로부터 작은 은편모조류로의 식물플랑크톤 군집의 주기적인 변화가 용빙수 유입의 변동과 밀접하게 관련되어 있음을 보고했다. 그러므로 총 생물량과 일차생산에 대한 작은 식물플랑크톤의 비율은 해양 생태계의 잠재적인 영향을 이해하기 위해 중요하다.

지금까지 급속한 얼음 판의 용빙으로(Schmidtke et al., 2014) 인해 환경변화를 겪고 있는 아문젠해에서 작은 식물플랑크톤의 기여도의 계절적 변동에 대한 연구는

많지 않다(Lee et al., 2017; Yager et al., 2012). 최근에 Lee et al. (2017)은 아문젠해에서 non-polynya와 polynya 지역에서 총 생물량과 총 일차생산에 대한 작은 식물플랑크톤의 기여도를 보고했다. 그러나 작은 식물플랑크톤의 비율은 2014년 1월 초에 있었던 한 번의 현장 관측에 기반하고 있다. 본 연구에서는 아문젠해에서 총 생물량, 탄소 섭취율, 질소 섭취율에 대한 작은 식물플랑크톤의 시간적 변동을 분석하기 위해 2012년부터 2016년 까지 세 번의 크루즈로부터 격년 데이터를 비교 분석했다. 또한 2018년에 수행되었던 ANA08B cruise 를 통해 식물플랑크톤의 거대 분자 조성에 대한 작은 식물플랑크톤의 기여도를 분석하였다.

제 2절. 재료 및 방법

1. 연구지역

쇄빙선 아라온호를 이용하여 2012년 2월 11일부터 3월 14일 까지 그리고 2016년 1월 15일부터 2월 6일까지 ANA02C cruise 와 ANA06B cruise 를 통해 아문젠해에서 해수 샘플을 획득하였다 (Fig. 1, Fig. 2). CTD (Sea-Bird Conductivity-Temperature-Depth) 를 장착한 rosette sampler 를 이용하여 해수 샘플을 수집하였고 수심, 수온, 염분과 같은 물리 요소들을 측정하였다. 혼합층 수심은 표층의 밀도 보다 0.05 kg m^{-3} 높은 수심으로 정의했으며 유광층 수심은 표층 광합성 유효방사의 100%인 수심부터 1%인 수심까지로 정의했다. 조사 기간 동안 서로 다른 수심에서 주요 무기 영양염(인산염, 질산염+아질산염, 암모늄, 규산염) 분석을 위한 해수 샘플을 획득하였다. QuAatro auto analyzer 를 이용해 연구 항해 동안 주요 무기 영양염을 측정하였다. 2014년 1월 1일부터 1월 15일에 걸친 ANA04B cruise 동안 아문젠해에서 획득한 자료를 시기에 따른 작은 식물플랑크톤의 기여도 비교를 위해 Lee et al. (2017)의 연구를 참고하였다 (Fig. 3). ANA02C cruise 와 ANA06B cruise 동안 작은 식물플랑크톤의 탄소 및 질소 섭취율 실험을 각각 7개와 20개의 정점에서 수행하였다. National Snow & Ice Data Center 가 생산한 해빙 정보에 따라 Non-polynya 지역과 polynya 지역을 구분하였다. Polynya는 해빙의 농도가 10% 미만이고 해빙으로 둘러싸인 열린 바다이다(Arrigo & Van Dijken, 2003). St. 12R 과 St. 29R 은 재방문 하였을 때 바다가 완전히 열려있었기 때문에 이 두 재방문 정점을 non-polynya 지역에 포함시켰다. 작은 식물플랑크톤 기여도의 시기별 변동성을 확인하기 위하여 조사 년도 순서 대신에 샘플을 확보한 월별 순서로, ANA04B cruise 는 “early January”, “ANA06B cruise 는 “January-February” 그리고 ANA02C cruise 는 “February-March” 로 배열했다. 또한 2018년 1월 16일부터 2월 2일에 걸친 ANA08B cruise 를 통해 아문젠해에서 식물플랑크톤의 거대 분자 조성(탄수화물, 단백질, 지질)에 대한 작은 식물플랑크톤의 기여도 분석을 위한 해수 샘플링을 수행하였다 (Fig. 4).

2. 총 Chlorophyll-a (chl-a) 농도 및 크기별 chl-a 측정 방법

식물플랑크톤의 총 chl-a 농도와 크기별 chl-a 농도 측정을 위한 해수 시료는 ANA02C, ANA06B cruise 기간 동안 각각 7개, 20개의 정점에서 이루어졌다. 총 chl-a 농도와 크기별 농도는 유광층 (100% ~ 1%)에 해당하는 수심에서 채수하였다. 총 chl-a 농도는 Whatman glass fiber 여과지(GF/F, 0.7 μm , 25 mm)를 이용해 해수 시료를 여과하였다. 크기별 chl-a 농도를 위한 해수 시료는 Nucleopore 여과지(20, 5 μm , 47 mm)로 순차적으로 여과한 후, GF/F 여과지(0.7 μm , 47 mm)로 여과하였다. ANA02C cruise 기간 동안의 chl-a 농도는 Kim et al, (2015)에 제시된 방법을 이용해 여과지를 추출한 후, Trilogy fluorometer (Turner Designs, USA)를 이용하여 승선 중에 분석하였다. ANA06B cruise 와 ANA08B cruise 기간 동안의 chl-a 샘플은 냉동 보관한 후, 실험실에서 아세톤을 통해 추출한 후 10-AU fluorometer 를 이용하여 분석하였다. 위에 제시된 분석들과 계산은 Parsons et al. (1984)에 기초하여 수행하였다.

본 연구에서는 총 chl-a, 크기별 chl-a의 농도 및 기여도에 관한 결과는 각 정점에서 100%부터 1% 광 수심까지 수직 적분하여 나타내었다.

3. 입자성 유기 탄소 분석 방법

총 입자성 유기탄소(POC)와 작은 크기의 POC 농도를 측정하기 위한 해수시료는 유광층(100%-1%)에 해당하는 수심에서 채집되었다. 총 POC 농도는 사전에 미리 태운 (450 $^{\circ}\text{C}$, 4시간) GF/F 여과지 (25 mm)를 이용해 해수시료를 여과하였다. 작은 크기의 POC 농도는 5 μm 크기의 Nucleopore 여과지 (47 mm)로 해수 시료를 여과한 뒤, 미리 태운 GF/F 여과지 (25 mm)를 이용해 해수시료를 순차적으로 여과하였다. 여과된 샘플은 -80 $^{\circ}\text{C}$ 에 즉시 보관한 뒤, Alaska Stable Isotope Facility의 Finnigan Delta+XL mass spectrometer 로 분석되었다.

4. 식물플랑크톤의 탄소 섭취율 및 질소 섭취율 측정 방법

식물플랑크톤의 탄소와 질소 섭취율 실험은 이전에 아문젠해에서 실시되었던 (Lee et., 2012; Kim et al., 2015) ^{13}C - ^{15}N dual stable isotope tracer technique를 이용해 실시되었다. 본 연구에서는 Lee et al. (2012)와 동일한 과정을 따라 실험을 수행하였다. 간단하게 요약하면, LI-COR underwater 4 π light sensor 를 통해 6개의 광 수심 (100, 50, 30, 12, 5, 1%)을 결정한 후 CTD rosette 채수기로 해수를 채수하였다. 채취된 각 수심별 해수 시료는 각 광 깊이에 일치하게 포장된 polycarbonate bottle (1 L)에 각각 옮겨 담았다. 해수 시료를 담은 배양병에 탄소 (NaH^{13}C)와 질

산염 ($K^{15}NO_3$), 암모늄 ($^{15}NH_4Cl$) 시약을 넣은 후, 갑판 위 자연광 아래에서 polycarbonate 배양기에 표층수를 지속적으로 흐르게 하면서 배양시켰다. 4-5시간 정도 배양 후, 배양된 해수 시료는 잘 섞어 전체 식물플랑크톤 ($> 0.7 \mu m$)과 작은 크기의 식물플랑크톤 ($0.7-5 \mu m$)의 탄소, 질소 섭취율을 알아보기 위해 2개로 나누어 여과시켰다. 전체 식물플랑크톤의 섭취율을 알아보기 위해 배양된 해수 시료의 subsample 은 pre-combusted GF/F 여과지 (25 mm)를 통해 여과시키고, 작은 크기의 식물플랑크톤의 섭취율을 알아보기 위한 해수 시료는 큰 크기의 식물플랑크톤 ($> 5 \mu m$)를 제거하기 위해 $5 \mu m$ Nuclepore 여과지 (47 mm)를 이용하여 거른 후, 25 mm 크기의 GF/F 여과지를 통해 여과시켰다. 본 연구에서 큰 크기의 식물플랑크톤의 값은 전체와 작은 크기의 식물플랑크톤의 값의 차이를 이용하여 계산하였다. 여과지는 질량 분석 전까지 $-80^\circ C$ 에 즉시 보관하였다. 샘플의 탄산염을 제거하기 위해 24시간 동안 염산을 이용해 fume을 한 후, 입자성 유기탄소 (POC), 입자성 유기질소 (PON)의 농도와, $\delta^{13}C$, $\delta^{15}N$ 의 값은 미국 Alaska Stable Isotope Facility의 Finnigan Delta+XL mass spectrometer 를 이용하여 분석하였다.

본 연구에서 작은 식물플랑크톤 기여도의 모든 결과는 각 정점에서 100%부터 1% 광 수심까지 수직 적분하여 전체 식물플랑크톤에 대한 작은 식물플랑크톤을 비교하여 나타내었다. 식물플랑크톤의 일일 탄소, 질소 섭취율은 본 연구에서 측정된 시간당 섭취율과 아문젠해에서의 여름동안 하루 24시간 광주기에 기초한 것이다 (Lee et al., 2012).

5. 식물플랑크톤의 거대 분자 조성 측정 방법

식물플랑크톤의 거대분자조성 (탄수화물, 단백질, 지질)을 분석하기 위해 유광층의 100, 30, 1% 광 수심에서 얻은 해수 샘플 (0.3 - 1 L)을 GF/F (47 mm) 필터지에 여과한 후 실험실에서 분광계 분석 전까지 $-80^\circ C$ 에 냉동 보관하였다. 식물플랑크톤을 함유하고 있는 필터지는 균질기를 이용하여 균질화한 후 식물플랑크톤의 생화학적 구성성분의 농도가 측정되었다 (Kim et al., 2015). 총 단백질 함유량은 Lowry method (1951)에 의해 측정 하였으며 총 지질의 추출을 위해서 1:2 (vol:vol) chloroform-methanol 혼합액이 사용되었다. 총 지질 함유량은 sulfo-phospho-vanillin (SPV) reaction (Bligh and Dyer, 1959; Marsh and Weinstein, 1966)에 의해 측정되었다. 탄수화물 함유량은 Dubois et al. (1956)의 phenol-sulfuric method 를 따라 측정되었다.

제 3절. 결과

1. 물리 화학적 특성

세 연구 기간 동안 non-polynya와 polynya 지역의 0-100 m 수심에서 보인 수온과 염분 분포는 Fig. 5 에 나와 있다. 전반적으로 non-polynya 지역에서 표층 수온의 시간적 변동이 관측되었고 1, 2월에 st.12R 과 st.29R을 제외한 non-polynya 지역에서 표층염분은 계절에 따른 차이를 보이지 않았다. 이는 해빙이 후퇴한 이후에 open water가 되었기 때문으로 생각된다. Polynya 지역에서 표층 수온 (SST; Sea surface temperature)과 표층 염분 (SSS; Sea surface salinity)은 연구 기간 동안에 통계적으로 유의미한 변동을 보였다. SST 와 SSS 는 early January 와 January-February (해빙과 가까운 st.7 제외) 사이에는 비슷했지만 February-March 에는 가장 낮은 SST 와 SSS 가 관측되었다 (Fig. 5). Polynya 지역에서 1월에서 3월까지 SST 의 증가와 SSS 의 감소는 빛의 세기, 기온, 그리고 해빙의 해빙과 같은 계절적 변동성과 관련되어 있다. Jacobs and Comiso (1997)는 아문젠해에서 기온이 증가하고 있으며 9월에서 3월까지 ice edge 가 점진적으로 후퇴하고 있다고 보고했다.

혼합층 수심은 각 연구 기간의 모든 정점들로부터 평균했다 (Table 1). 혼합층 수심의 평균값은 early January에는 37.3 m (\pm 43.8 m), January-February 에는 49.6 m (\pm 40.6 m), February-March 에는 34.0 m (\pm 12.9 m)이었다. 혼합층 수심은 non-polynya 지역에서 큰 시간적 변동성을 보였지만 (early January = 11.7 ± 8.0 , January - February = 39.8 ± 19.2 , February - March = 23.3 ± 1.5 m) polynya 지역에서는 시간적 변동성이 작았다 (early January = 48.3 ± 48.8 , January - February = 52.6 ± 45.5 , February - March = 42.0 ± 11.4 m). 일반적으로 non-polynya 지역과 polynya 지역의 표층 100 m에서의 인산염, 질산염+아질산염, 규산염의 높은 농도가 관측되었다 (Fig. 6). Non-polynya 지역에서 early January, January-February, February-March 의 인산염 평균 농도는 각각 1.6 ± 0.5 μ M, 1.7 ± 0.4 μ M, 2.0 ± 0.3 μ M 이었다 (Fig. 6 a). Non-polynya 지역에서 early January, January-February, February-March 의 질산염+아질산염 의 평균 농도는 각각 25.0 ± 5.9 μ M, 23.7 ± 6.1 μ M, 24.9 ± 4.5 μ M 이었고 (Fig. 6b) 규산염의 평균 농도는 각각 65.1 ± 3.3 μ M, 74.0 ± 10.0 μ M, 71.7 ± 9.2 μ M 이었다 (Fig. 6c). 그러나 non-polynya 지역에서 February-March의 암모늄 농도는 다른 기간들 보다 통계적으로 유의미하게 높았다. Polynya 지역에서 early January, January-February, February-March의 인산염 농도는 각각 1.2 ± 0.4 , 1.7 ± 0.4 , 1.8 ± 0.4 μ M 이고 질산염+아질산염 농도는 각각 12 ± 7.1 , 22.4 ± 5.4 , 20.6 ± 6.6 μ M 이며 규산염 농도는 82.2 ± 6.5 , 82.4 ± 5.9 , 79.1 ± 8.8 μ M 으로 non-polynya 지역과 비슷했다. 그러나 암모늄 농도는 early January, January-February,

February-March 에 각각 0.8 ± 0.6 , 0.6 ± 0.6 , $1.5 \pm 0.8 \mu\text{M}$ 이며 polynya 지역에서 계절적인 차이를 보였다.

Early January, January-February, February-March의 세 연구 기간 동안 인산염, 질산염+아질산염, 규산염의 농도는 식물플랑크톤이 성장하는데 충분할 만큼 높았으며 이는 과거 아문젠해에서 무기영양염의 제한이 없었다는 이전 연구결과와 일치한다 (Kim et al., 2015; Lee et al., 2012). 그러나 February-March 에 식물플랑크톤의 신생산은 높은 암모늄 농도에 의해 제한을 받은 것으로 보인다 (Arrigo et al., 2012; Dortch, 1990; Dugdale et al., 2007; Glibert, 1982; Goeyens et al., 1995; Kim et al., 2015). 이것은 앞선 기간 동안의 큰 bloom 이후에 remineralization 에 의한 가능성이 있다. Kim et al. (2015)은 같은 기간 동안 높은 암모늄 농도가 재생산에 기여하는 질소원에 대한 암모늄의 선호도를 야기했을 수 있다고 보고했다 (Doolittle et al., 2008). 특히 본 연구는 큰 식물플랑크톤의 specific uptake rate가 작은 식물플랑크톤 보다는 암모늄 농도에 더 영향을 받을 것으로 추정된다.

2. 큰 식물플랑크톤과 작은 식물플랑크톤의 생체량 비교

유광층에서 적분한 큰 식물플랑크톤 ($> 5 \mu\text{m}$)과 작은 식물플랑크톤 ($0.7-5 \mu\text{m}$)의 chl-a 농도가 세 연구 기간 동안 비교되었다 (Fig. 7). Non-polynya 지역에서의 평균 유광층 수심은 early January, January-February, February-March 에 각각 $35.0 \pm 18.5 \text{ m}$, $23.5 \pm 3.3 \text{ m}$, $31.7 \pm 2.9 \text{ m}$ 로 나타났다. 이와 비교하여 non-polynya 지역의 평균 유광층 수심은 각각 $12.8 \pm 2.9 \text{ m}$, $24.4 \pm 8.0 \text{ m}$, $34.3 \pm 4.4 \text{ m}$ 으로 나타났다. Non-polynya 지역에서 큰 식물플랑크톤의 chl-a 농도는 early January, January-February, February-March 에 각각 $28.04 \pm 32.87 \text{ mg chl-a m}^{-2}$, $60.72 \pm 22.59 \text{ mg chl-a m}^{-2}$, $26.11 \pm 22.12 \text{ mg chl-a m}^{-2}$ 이다. 이와 비교하여 작은 식물플랑크톤의 chl-a 농도는 early January, January-February, February-March 에 각각 $7.06 \pm 1.99 \text{ mg chl-a m}^{-2}$, $11.50 \pm 5.69 \text{ mg chl-a m}^{-2}$, $4.54 \pm 2.72 \text{ mg chl-a m}^{-2}$ 이다. Polynya 지역에서 큰 식물플랑크톤의 chl-a 농도는 early January, January-February, February-March 에 각각 $63.46 \pm 12.52 \text{ mg chl-a m}^{-2}$, $84.93 \pm 40.57 \text{ mg chl-a m}^{-2}$, $52.71 \pm 24.25 \text{ mg chl-a m}^{-2}$ 이다. 작은 식물플랑크톤의 chl-a 농도는 $5.07 \pm 1.12 \text{ mg chl-a m}^{-2}$, $28.19 \pm 23.04 \text{ mg chl-a m}^{-2}$, $7.53 \pm 2.98 \text{ mg chl-a m}^{-2}$ 이다. Polynya 지역에서 1월부터 3월까지 큰 식물플랑크톤의 chl-a 농도는 작은 식물플랑크톤의 chl-a 농도 보다 통계적으로 유의미하게 높았다 (t test, $p < 0.05$) (Fig. 8). 2018년 1월 16일부터 2월 2일까지 아문젠해에서 식물플랑크톤의 총 chl-a 농도는 $65.67 \pm 37.34 \text{ mg chl-a m}^{-2}$ 로 나타났다 (Fig. 9). 큰 식물플랑크톤의 chl-a 농도는 $52.65 \pm 32.88 \text{ mg chl-a m}^{-2}$ 로 나타났으며 작은 식물플랑크톤의 chl-a 농도는 $13.02 \pm 8.94 \text{ mg chl-a m}^{-2}$ 으로 나타났다 (Fig. 10).

입자성 유기 탄소 (POC)의 농도는 non-polynya 와 polynya 지역에서 chl-a 농도의 패턴과 비슷한 모습을 보였다 (Fig. 8). Non-polynya 지역에서 January-February 에 큰 식물플랑크톤의 POC 농도는 $6.47 \pm 1.51 \text{ g C m}^{-2}$ 로 나타났다으며 early January ($3.16 \pm 1.08 \text{ g C m}^{-2}$)의 값과 February - March 의 값 ($2.03 \pm 0.70 \text{ g C m}^{-2}$) 보다 통계적으로 유의미하게 높았다. 그러나 non-polynya 지역에서 early January, January-February, February-March 에 작은 식물플랑크톤의 POC 농도는 각각 $3.03 \pm 0.78 \text{ g C m}^{-2}$, $3.83 \pm 1.04 \text{ g C m}^{-2}$, $2.66 \pm 0.46 \text{ g C m}^{-2}$ 의 값을 보이며 세 연구 기간 사이에 큰 차이를 발견할 수 없었다. Polynya 지역에서 큰 식물플랑크톤과 작은 식물플랑크톤의 최대 POC 농도는 January-February 에 관측되었다 (큰 식물플랑크톤 = 7.96 ± 4.30 , 작은 식물플랑크톤 = $4.74 \pm 1.29 \text{ g C m}^{-2}$) (Fig. 8).

큰 식물플랑크톤의 POC 농도는 세 번의 연구 기간 동안 모든 정점에서 chl-a 농도와 높은 상관관계가 나타났다 (Fig. 11). 일반적으로 본 연구 기간 중 January-February 을 제외하면 non-polynya와 polynya 지역에서 작은 식물플랑크톤은 큰 식물플랑크톤 보다 POC/chl-a 비율이 높았다. Holm Hansen and Huntley (1984)는 남극의 vicinity of Anvers Island 에서 총 식물플랑크톤에 대한 nano-cell 의 기여도가 증가 할수록 POC/chl-a 비율이 증가한다고 제안했다. Lee et al. (2017)은 작은 식물플랑크톤의 높은 POC 기여에 대해 extracellular carbon mucilage 의 잠재적인 영향에 대해 보고했다. 아문젠해에서 *P. antarctica* 가 일반적으로 우점 하는 종으로 알려져 있으며 (Lee et al., 2012; Lee et al., 2016), *P. antarctica* 는 colonial matrix 형태의 많은 양의 탄수화물 물질을 방출 한다 (Matrai et al., 1995; Mathot et al., 2000; Schoemann et al., 2005; Lee et al., 2017; Kim et al., 2018). 그러나 Becquevort et al. (2007)은 *P. antarctica* 의 extracellular polymers 가 총 POC 농도에 기여하는 바가 5% 미만이라고 주장했다. 비록 아문젠해에서 *P. antarctica* 집합체의 bloom으로부터 많은 mucilage 방출 되었을 가능성이 있지만 이 효과는 작은 식물플랑크톤의 높은 POC 기여도에 비해 작을 것이라 사료 된다 (Becquevort et al., 2007; Lee et al., 2017; Mathot et al., 2000). 결과적으로 early January, January-February, February-March 의 결과들은 큰 식물플랑크톤 보다 작은 식물플랑크톤의 chl-a 당 높은 POC를 보였으며 이는 이전 연구와 일치했다. 하지만 단일 *P. antarctica* 의 영향 때문에 January-February의 작은 식물플랑크톤과 큰 식물플랑크톤의 POC/chl-a 비율은 비슷했다. Smith et al. (2003)은 늦은 봄 (1월 말/2월 초) 로스해에서 chl-a 와 *P. antarctica* 군체가 최고치 일 때 mucilaginous materials 이 많이 나타나며 *P. antarctica* 의 단일 형태는 mucilaginous materials 을 가지지 않는다고 보고했다. 이전의 연구결과들로 미루어 볼 때, 다른 시기와 비교하여 January-February 에 작은 식물플랑크톤의 낮은 POC/chl-a 비율은 그 시기에 chl-a 최대로 와 함께 가장 번성했을 것으로 보이는 단일 *P. antarctica* 의 영향을 크게 받았을 것으로 사료된다.

3. 큰 식물플랑크톤과 작은 식물플랑크톤의 탄소 섭취율 비교

연구 기간 동안 큰 식물플랑크톤과 작은 식물플랑크톤의 탄소 섭취율을 비교했다. Non-polynya 지역에서의 큰 식물플랑크톤과 작은 식물플랑크톤의 탄소 섭취율은 early January 부터 February-March 까지 각각 $0.29 (\pm 0.32 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1})$ 부터 $0.10 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1} (\pm 0.06 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1})$ 까지 그리고 $0.13 (\pm 0.06 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1})$ 부터 $0.03 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1} (\pm 0.01 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1})$ 로 감소했다 (Fig. 12). Polynya 지역에서 큰 식물플랑크톤의 탄소 섭취율은 early January 부터 February-March 까지 $0.71 (\pm 0.17 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1})$ 에서 $0.10 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1} (\pm 0.05 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1})$ 까지 계속해서 감소했고 작은 식물플랑크톤의 탄소 섭취율은 early January 부터 February-March 까지 $0.12 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1} (\pm 0.07 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1})$ 에서 $0.09 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1} (\pm 0.04 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1})$ 까지 약간 감소했다. 일반적으로 총 탄소 섭취율의 계절적인 감소 패턴은 non-polynya 와 polynya 지역에서의 큰 식물플랑크톤의 패턴과 유사했다. early January 부터 February-March 까지 non-polynya 와 polynya 지역의 총 탄소 섭취율의 범위는 각각 $0.13\text{-}0.41 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 과 $0.19\text{-}0.84 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 이며 이 값들은 아문젠해에서 수행되었던 이전 연구의 결과 범위 안에 속 한다 (Kim et al., 2015; Lee et al., 2012). 아문젠해에서 식물플랑크톤의 탄소 섭취율의 계절적 변동은 non-polynya 지역 보다 polynya 지역에서 상대적으로 높았다. 현장조사와 인공위성을 기반으로 한 자료를 바탕으로 아문젠해의 polynya 지역에서의 탄소 섭취율이 최대를 보이는 시기는 12월 말로 알려져 있다 (Arrigo et al., 2012; Kim et al., 2015; Lee et al., 2012). 아문젠해 polynya 지역에서의 최대 총 탄소 섭취율은 Lee et al. (2012)이 2010-2011년 12월 말과 early January 에 $2.2 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 로 보고했다.

4. 큰 식물플랑크톤과 작은 식물플랑크톤의 질소 섭취율 비교

가. 큰 식물플랑크톤과 작은 식물플랑크톤의 질산염 섭취율 비교

조사 기간 중 early January의 총 식물플랑크톤의 질산염 섭취율의 범위는 $34.02\text{-}174.18 \text{ mg N m}^{-2} \text{ d}^{-1} (93.71 \pm 43.23 \text{ mg N m}^{-2} \text{ d}^{-1})$ 인 반면 작은 식물플랑크톤의 섭취율의 범위는 $6.11\text{-}40.89 \text{ mg N m}^{-2} \text{ d}^{-1} (20.13 \pm 13.08 \text{ mg N m}^{-2} \text{ d}^{-1})$ 이다. 큰 식물플랑크톤의 섭취율의 범위는 $18.19\text{-}133.29 \text{ mg N m}^{-2} \text{ d}^{-1} (74.71 \pm 35.37 \text{ mg N m}^{-2} \text{ d}^{-1})$ 이다 (Fig. 13). 총 일일 질산염 섭취율에 대한 작은 식물플랑크톤의 기여도는 $21.5 \pm 11.1\%$ 이다. January-February 의 총 식물플랑크톤의 섭취율 범위는 $10.93\text{-}124.89 \text{ mg N m}^{-2} \text{ d}^{-1} (64.64 \pm 35.23 \text{ mg N m}^{-2} \text{ d}^{-1})$ 이다. 작은 식물플랑크톤의 섭취율 범위는 $3.01\text{-}45.82 \text{ mg N m}^{-2} \text{ d}^{-1} (19.24 \pm 12.76 \text{ mg N m}^{-2} \text{ d}^{-1})$ 이다. 큰 식물플랑크톤의 섭취율 범위는 $7.92\text{-}99.81 \text{ mg N m}^{-2} \text{ d}^{-1} (45.40 \pm 27.23 \text{ mg N m}^{-2} \text{ d}^{-1})$ 이다 (Fig. 14). 총 일일 질산염 섭취율에 대한 작은 식물플랑크톤의 기여도는 $30.8 \pm 11.2\%$ 이다. February-March의 총 식물플랑크톤의 섭취율 범위는

8.11-51.83 mg N m⁻² d⁻¹ (23.72 ± 16.93 mg N m⁻² d⁻¹)이다. 작은 식물플랑크톤의 섭취율 범위는 4.61-16.34 mg N m⁻² d⁻¹ (10.28 ± 3.98 mg N m⁻² d⁻¹)이다. 큰 식물플랑크톤의 섭취율 범위는 1.19-47.22 mg N m⁻² d⁻¹ (15.82 ± 19.90 mg N m⁻² d⁻¹)이다 (Fig. 15). 총 일일 질산염 섭취율에 대한 작은 식물플랑크톤의 기여도는 56.8 ± 34.4% 이다. 식물플랑크톤의 월별 질산염 섭취율은 점차 감소하며 작은 식물플랑크톤의 기여도는 1월이 가장 낮았고 3월이 가장 높음으로 시간이 흐름에 따라 점차 작은 식물플랑크톤의 기여도가 높아지는 것으로 나타난다.

조사 기간 중 early January 의 non-polynya 지역에서 식물플랑크톤의 총 일일 질산염 섭취율은 34.02-142.07 mg N m⁻² d⁻¹ 의 범위 내에 있었고 71.86 mg N m⁻² d⁻¹ (± 48.41 mg N m⁻² d⁻¹)의 평균값을 보인 반면, polynya 지역에서는 44.24-174.18 mg N m⁻² d⁻¹의 범위 내에서 104.63 mg N m⁻² d⁻¹ (± 39.03 mg N m⁻² d⁻¹)의 평균값을 보였다. 이와 비교해보면, 작은 식물플랑크톤의 일일 질산염 섭취율은 non-polynya 지역과 polynya 지역에서 각각 7.47-26.60 mg N m⁻² d⁻¹의 범위 내에서 16.72 mg N m⁻² d⁻¹ (± 7.83 mg N m⁻² d⁻¹)의 평균값 그리고 6.11-40.89 mg N m⁻² d⁻¹의 범위에서 20.13 mg N m⁻² d⁻¹ (± 13.08 mg N m⁻² d⁻¹)의 평균값을 보였다. 큰 식물플랑크톤의 일일 질산염 섭취율은 non-polynya 지역과 polynya 지역에서 각각 18.19-115.47 mg N m⁻² d⁻¹의 범위 내에서 55.14 mg N m⁻² d⁻¹ (± 43.33 mg N m⁻² d⁻¹)의 평균값 그리고 38.14-133.29 mg N m⁻² d⁻¹의 범위에서 84.50 mg N m⁻² d⁻¹ (± 28.87 mg N m⁻² d⁻¹)의 평균값을 보였다. 총 일일 질산염 섭취율에 대한 작은 식물플랑크톤의 기여도는 non-polynya 지역에서는 28.2 ± 15.9%, polynya 지역에서는 18.1 ± 6.8%의 값을 보였다. January-February 의 non-polynya 지역에서 식물플랑크톤의 총 일일 질산염 섭취율은 38.54-60.76 mg N m⁻² d⁻¹의 범위 내에 있었고 49.65 mg N m⁻² d⁻¹ (± 15.71 mg N m⁻² d⁻¹)의 평균값을 보인 반면, polynya 지역에서는 10.93-127.89 mg N m⁻² d⁻¹의 범위 내에서 66.95 mg N m⁻² d⁻¹ (± 37.20 mg N m⁻² d⁻¹)의 평균값을 보였다. 이와 비교해보면, 작은 식물플랑크톤의 일일 질산염 섭취율은 non-polynya 지역과 polynya 지역에서 각각 6.61-13.72 mg N m⁻² d⁻¹의 범위 내에서 10.16 mg N m⁻² d⁻¹ (± 5.03 mg N m⁻² d⁻¹)의 평균값, 3.01-45.82 mg N m⁻² d⁻¹의 범위에서 20.64 mg N m⁻² d⁻¹ (± 13.12 mg N m⁻² d⁻¹)의 평균값을 보였다. 큰 식물플랑크톤의 일일 질산염 섭취율은 non-polynya 지역과 polynya 지역에서 각각 31.94-47.04 mg N m⁻² d⁻¹의 범위 내에서 39.49 mg N m⁻² d⁻¹ (± 10.68 mg N m⁻² d⁻¹)의 평균값 그리고 7.92-99.81 mg N m⁻² d⁻¹의 범위에서 46.31 mg N m⁻² d⁻¹ (± 29.14 mg N m⁻² d⁻¹)의 평균값을 보였다. 총 일일 질산염 섭취율에 대한 작은 식물플랑크톤의 기여도는 non-polynya 지역에서는 19.9 ± 3.8%, polynya 지역에서는 32.5 ± 11.1%의 값을 보였다. February-March의 non-polynya 지역에서 식물플랑크톤의 총 일일 질산염 섭취율은 8.11-43.64 mg N m⁻² d⁻¹의 범위 내에 있었고 21.21 mg N m⁻² d⁻¹ (± 19.52 mg N m⁻² d⁻¹)의 평균값을 보인 반면, polynya 지역에서는 15.76-51.83 mg N m⁻² d⁻¹

의 범위 내에서 $25.60 \text{ mg N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ($\pm 17.55 \text{ mg N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)의 평균값을 보였다. 이와 비교해보면, 작은 식물플랑크톤의 일일 질산염 섭취율은 non-polynya 지역과 polynya 지역에서 각각 $8.05\text{--}9.27 \text{ mg N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 의 범위 내에서 $8.78 \text{ mg N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (S.D. = $\pm 0.64 \text{ mg N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)의 평균값, $4.61\text{--}16.34 \text{ mg N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 의 범위에서 $11.41 \text{ mg N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ($\pm 5.24 \text{ mg N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)의 평균값을 보였다. 큰 식물플랑크톤의 일일 질산염 섭취율은 non-polynya 지역과 polynya 지역에서 각각 $3.83\text{--}34.63 \text{ mg N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 의 범위 내에서 $19.23 \text{ mg N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ($\pm 21.78 \text{ mg N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)의 평균값, $1.19\text{--}47.22 \text{ mg N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 의 범위에서 $14.12 \text{ mg N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ($\pm 22.14 \text{ mg N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)의 평균값을 보였다. 총 일일 질산염 섭취율에 대한 작은 식물플랑크톤의 기여도는 non-polynya 지역에서는 $44.2 \pm 33.3\%$, polynya 지역에서는 $63.1 \pm 38\%$ 의 값을 보였다. 식물플랑크톤의 질산염 섭취율을 non-polynya와 polynya 지역으로 비교해보았을 때, 일반적으로 polynya 지역이 non-polynya 지역보다 높았지만 작은식물플랑크톤의 기여도는 non-polynya 지역과 polynya 지역간 차이는 뚜렷하게 나타나지 않았다 (Table 3).

나. 큰 식물플랑크톤과 작은 식물플랑크톤의 암모늄 섭취율 비교

조사 기간 중 early January 의 총 식물플랑크톤의 암모늄 섭취율의 범위는 $12.33\text{--}269.33 \text{ mg N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ($86.69 \pm 75.91 \text{ mg N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)인 반면, 작은 식물플랑크톤의 섭취율의 범위는 $9.14\text{--}81.11 \text{ mg N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ($25.68 \pm 21.14 \text{ mg N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)이다. 큰 식물플랑크톤의 섭취율의 범위는 $0.81\text{--}188.22 \text{ mg N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ($61.01 \pm 56.57 \text{ mg N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)이다 (Fig. 16). 전체 암모늄 섭취율에 대한 작은 식물플랑크톤의 기여도는 $25.68 \pm 21.14\%$ 이다. January-February 의 총 식물플랑크톤의 섭취율 범위는 $13.12\text{--}339.87 \text{ mg N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ($74.68 \pm 88.40 \text{ mg N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)이다. 작은 식물플랑크톤의 섭취율 범위는 $4.84\text{--}86.72 \text{ mg N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ($25.17 \pm 22.54 \text{ mg N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)이다. 큰 식물플랑크톤의 섭취율 범위는 $1.38\text{--}73.01 \text{ mg N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ($22.53 \pm 18.74 \text{ mg N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)이다 (Fig. 17). 총 암모늄 섭취율에 대한 작은 식물플랑크톤의 기여도는 $35.2 \pm 14.2\%$ 이다. February-March 의 총 식물플랑크톤의 섭취율 범위는 $7.06\text{--}63.04 \text{ mg N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ($29.61 \pm 21.62 \text{ mg N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)이다. 작은 식물플랑크톤의 섭취율 범위는 $6.92\text{--}19.64 \text{ mg N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ($13.37 \pm 5.46 \text{ mg N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)이다. 큰 식물플랑크톤의 섭취율 범위는 $8.40\text{--}19.07 \text{ mg N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ($13.74 \pm 7.54 \text{ mg N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)이다 (Fig. 18). 전체 암모늄 섭취율에 대해 작은 식물플랑크톤의 기여도는 45% 이다. 식물플랑크톤의 월별 암모늄 섭취율 기여도는 1월이 가장 낮았고 3월이 가장 높음으로 시간이 흐름에 따라 점차 작은 식물플랑크톤의 기여도가 높아지는 것을 확인할 수 있으며 이는 질산염 섭취율의 경향과 비슷하다.

조사 기간 중 early January의 non-polynya 지역에서 식물플랑크톤의 총 암모늄 섭취율은 $18.08\text{--}269.33 \text{ mg N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 의 범위 내에 있었고 $105.17 \text{ mg N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$

($\pm 84.6 \text{ mg N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)의 평균값을 보인 반면, polynya 지역에서는 12.33-106.05 $\text{mg N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 의 범위 내에서 49.73 $\text{mg N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ($\pm 41.16 \text{ mg N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)의 평균값을 보였다. 이와 비교해보면, 작은 식물플랑크톤의 암모늄 섭취율은 non-polynya 지역과 polynya 지역에서 각각 9.14-22.36 $\text{mg N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 의 범위 내에서 15.75 $\text{mg N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ($\pm 6.41 \text{ mg N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)의 평균값, 9.89-81.11 $\text{mg N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 의 범위에서 30.65 $\text{mg N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ($\pm 24.50 \text{ mg N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)의 평균값을 보였다. 큰 식물플랑크톤의 암모늄 섭취율은 non-polynya 지역과 polynya 지역에서 각각 0.81-86.06 $\text{mg N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 의 범위 내에서 33.98 $\text{mg N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ($\pm 39.81 \text{ mg N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)의 평균값, 8.19-188.22 $\text{mg N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 의 범위에서 74.52 $\text{mg N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ($\pm 61.03 \text{ mg N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)의 평균값을 보였다. 총 암모늄 섭취율에 대한 작은 식물플랑크톤의 기여도는 non-polynya 지역에서는 $52.8 \pm 40.5\%$, polynya 지역에서는 $31.6 \pm 10.1\%$ 의 값을 보였다. January-February의 non-polynya 지역에서 식물플랑크톤의 총 암모늄 섭취율은 22.02-105.81 $\text{mg N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 의 범위 내에 있었고 63.91 $\text{mg N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ($\pm 59.24 \text{ mg N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)의 평균값을 보인 반면, polynya 지역에서는 13.12-339.87 $\text{mg N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 의 범위 내에서 74.68 $\text{mg N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ($\pm 88.40 \text{ mg N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)의 평균값을 보였다. 이와 비교해보면, 작은 식물플랑크톤의 암모늄 섭취율은 non-polynya 지역과 polynya 지역에서 각각 5.85-16.79 $\text{mg N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 의 범위 내에서 11.32 $\text{mg N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ($\pm 7.74 \text{ mg N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)의 평균값, 4.84-86.72 $\text{mg N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 의 범위에서 25.17 $\text{mg N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ($\pm 22.54 \text{ mg N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)의 평균값을 보였다. 큰 식물플랑크톤의 암모늄 섭취율은 non-polynya 지역과 polynya 지역에서 각각 16.18-89.02 $\text{mg N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 의 범위 내에서 52.60 $\text{mg N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ($\pm 51.50 \text{ mg N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)의 평균값, 8.28-253.15 $\text{mg N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 의 범위에서 49.51 $\text{mg N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ($\pm 67.77 \text{ mg N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)의 평균값을 보였다. 총 암모늄 섭취율에 대한 작은 식물플랑크톤의 기여도는 non-polynya 지역에서는 $21.2 \pm 7.5\%$, polynya 지역에서는 $37.4 \pm 13.9\%$ 의 값을 보였다. February-March의 non-polynya 지역에서 식물플랑크톤의 총 암모늄 섭취율은 10.93-53.25 $\text{mg N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 의 범위 내에 있었고 26.50 $\text{mg N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ($\pm 23.27 \text{ mg N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)의 평균값을 보인 반면, polynya 지역에서는 7.06-63.04 $\text{mg N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 의 범위 내에서 31.94 $\text{mg N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ($\pm 23.61 \text{ mg N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)의 평균값을 보였다. 이와 비교해보면, 작은 식물플랑크톤의 암모늄 섭취율은 non-polynya 지역과 polynya 지역에서 각각 6.92-11.40 $\text{mg N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 의 범위 내에서 9.16 $\text{mg N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ($\pm 3.17 \text{ mg N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)의 평균값, 15.52-19.64 $\text{mg N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 의 범위에서 17.58 $\text{mg N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ($\pm 2.91 \text{ mg N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)의 평균값을 보였다. 총 암모늄 섭취율에 대한 작은 식물플랑크톤의 기여도는 non-polynya 지역에서는 44.9%, polynya 지역에서는 45.1%의 값을 보였다. 식물플랑크톤의 암모늄 섭취율을 non-polynya와 polynya 지역으로 비교해보았을 때, 전반적으로 polynya 지역이 non-polynya 지역보다 높았으며, 질산염 섭취율과 마찬가지로 작은 식물플랑크톤의 기여도는 non-polynya 지역과 polynya 지역간 차이는 뚜렷하게 보이지 않았다.

(Table 3).

5. 큰 식물플랑크톤과 작은 식물플랑크톤의 거대 분자 조성 비교

ANA08B cruise 를 통해 조사된 총 13개의 정점에서 큰 식물플랑크톤의 탄수화물 농도는 $15.06 - 246.29 \mu\text{g L}^{-1}$ ($126.04 \pm 66.09 \mu\text{g L}^{-1}$) 범위에 속했고, 단백질은 $0.27 - 242.30 \mu\text{g L}^{-1}$ ($81.95 \pm 59.01 \mu\text{g L}^{-1}$), 지질의 경우 $3.08 - 199.63 \mu\text{g L}^{-1}$ ($59.91 \pm 37.28 \mu\text{g L}^{-1}$) 범위였다 (Fig. 19). 큰 식물플랑크톤의 Food Material (FM)은 $16.21 - 588.51 \mu\text{g L}^{-1}$ ($243.11 \pm 146.30 \mu\text{g L}^{-1}$)의 범위를 보였다. FM 에 대한 탄수화물, 단백질, 지질의 기여도는 각각 $50.22 \pm 8.53\%$, $29.87 \pm 7.93\%$, $19.84 \pm 5.41\%$ 로 나타났다. 연구 기간 동안 작은 식물플랑크톤의 탄수화물 농도는 $31.15 - 213.30 \mu\text{g L}^{-1}$ ($104.40 \pm 37.12 \mu\text{g L}^{-1}$) 범위에 속했고, 단백질은 $1.56 - 87.04 \mu\text{g L}^{-1}$ ($44.12 \pm 20.73 \mu\text{g L}^{-1}$), 지질의 경우 $17.67 - 108.62 \mu\text{g L}^{-1}$ ($48.56 \pm 16.53 \mu\text{g L}^{-1}$)의 범위를 보였다 (Fig. 19). 작은 식물플랑크톤의 FM 값은 $56.67 - 378.96 \mu\text{g L}^{-1}$ ($197.08 \pm 62.64 \mu\text{g L}^{-1}$)의 범위를 보였으며 탄수화물, 지질, 단백질은 각각 $51.58 \pm 6.15\%$, $24.47 \pm 3.55\%$, $23.95 \pm 6.53\%$ 순으로 높은 값을 차지했다. 2018년 ANA08B cruise 동안 총 식물플랑크톤의 탄수화물 농도는 $55.38 - 410.84 \mu\text{g L}^{-1}$ ($223.35 \pm 97.83 \mu\text{g L}^{-1}$) 범위를 보였으며 단백질은 $8.12 - 272.58 \mu\text{g L}^{-1}$ ($116.81 \pm 72.19 \mu\text{g L}^{-1}$), 지질은 $16.46 - 247.61 \mu\text{g L}^{-1}$ ($93.13 \pm 43.87 \mu\text{g L}^{-1}$) 범위를 보였다. 전반적으로 탄수화물의 평균 농도가 $223.35 \mu\text{g L}^{-1}$ ($\pm 97.83 \mu\text{g L}^{-1}$)으로 가장 높았고, 단백질의 평균 농도는 $116.81 \mu\text{g L}^{-1}$ ($\pm 72.19 \mu\text{g L}^{-1}$), 지질은 $93.13 \mu\text{g L}^{-1}$ ($\pm 43.87 \mu\text{g L}^{-1}$) 순으로 나타났다. 총 탄수화물, 단백질, 지질에 대한 작은 식물플랑크톤의 기여도는 각각 $46.7 \pm 11.1\%$, $43.9 \pm 21.4\%$, $52.2 \pm 14.7\%$ 이다. 총 식물플랑크톤의 FM 값의 범위는 $84.25 - 832.19 \mu\text{g L}^{-1}$ ($433.30 \pm 195.45 \mu\text{g L}^{-1}$) 이며 이에 대한 작은 식물플랑크톤의 기여도는 $45.8 \pm 10.7\%$ 로 나타났다 (Table 4).

Table 1. Physical and biological characteristics of stations in the Amundsen Sea in January–February 2016 and February–March 2012. The concentrations of chl-a and POC and carbon uptake rates of phytoplankton were integrated from the surface to 1 % of PAR.

Period (cruise)	Date (UTC)	Station	Latitude (°S)	Longitude (°W)	Euphotic depth (1%;m)	Mixed Layer depth (m)	Column integrated chl-a (mg chl-a/m ²)		Column integrated POC (g C/m ²)		Column integrated carbon uptake rate (g C/m ² /day)	
							total	small	total	small	total	small
January-February 2016 (ANA06B)	Non-polynya											
	Jan. 15	St. 1 (Open Sea)	70	125	27	39	42.34	3.98	9.53	3.15	0.39	0.05
	Jan. 16	St. 4 (Marginal Ice Zone)	72.099	118.886	19	17	101.67	15.75	11.75	3.11	0.35	0.07
	Feb. 7	St. 12R (End of Polynya)	73.282	114.948	24	64	83.51	10.23	9.19	3.71	0.61	0.12
	Feb. 6	St. 29R (End of Polynya)	72.85	112.5	24	39	61.38	16.07	10.74	5.34	0.08	0.04
	Polynya											
	Jan. 17	St. 7	72.455	116.334	24	10	97.49	10.36	9.31	3.27	0.16	0.04
	Jan. 18	St. 10	73.04	115.725	19	29	132.26	45.62	9.77	5.49	0.89	0.39
	Jan. 18	St. 12	73.28	114.951	16	67	86.46	33.63	6.89	3.99	0.43	0.14
	Jan. 21	St. 16	73.82	113.045	19	29	190.58	73	16.77	6.26	0.99	0.23
	Jan. 20	St. 19	74.172	112.528	22	65	207.37	71.66	19.8	6.33	1.15	0.17
	Jan. 22	St. 25	73.699	111.598	16	23	179.65	15.6	19.83	4.86	1.59	0.21
	Jan. 24	St. 29	72.846	112.481	24	10	123.93	15.57	19.4	5.3	1.41	0.22
	Jan. 25	St. 36	73.701	114.216	16	30	105.2	24.4	11.46	3.28	0.68	0.11
	Jan. 26	St. 39	74.083	115.715	41	159	136.06	37.49	17	6.79	0.47	0.12
	Jan. 31	St. 55	73.888	118.726	30	98	45.39	13.93	9.44	4.47	0.39	0.09
	Jan. 31	St. 58	73.942	117.278	33	26	47.67	11.24	10.16	5.08	0.17	0.05
Feb. 3	St. 62 (Pine Island Polynya)	75.059	102.152	35	112	37.48	4.12	5.09	2.66	0.4	0.12	
Feb. 3	St. 64 (Pine Island Polynya)	74.707	101.762	22	26	81.08	9.92	10.18	3.85	0.64	0.11	
February-March 2012 (ANA02C)	Non-polynya											
	Mar. 3	St. 6	72.39	117.719	30	25	87.56	-	5.09	3.51	0.16	0.03
	Mar. 5	St. 85	71.417	114.346	30	23	13.09	2.61	3.87	2.33	0.06	0.02
	Feb. 27	St. 86	73.812	106.536	35	22	48.21	6.46	5.5	2.98	0.17	0.03
	Polynya											
	Feb. 14	St. 17	73.5	114.01	35	29	66.68	6.07	8.94	4.66	0.15	0.08
	Feb. 16	St. 19	74.202	112.511	40	47	26.75	5.48	5.45	3.22	0.2	0.15
Feb. 18	St. 22	73.924	116.137	30	37	56.32	6.62	8.39	4.31	0.17	0.07	
Feb. 24	St. 31 (Pine Island Polynya)	75.087	101.759	32	55	91.2	11.95	8.02	4.17	0.25	0.09	

Note: The concentrations of chl-a and POC and carbon uptake rates of phytoplankton were integrated from the surface to 1% of the PAR. Physical properties and total values of February–March 2012 were adopted from Kim et al. (2015).

Table 2. Comparisons of the small phytoplankton contributions in the Amundsen Sea between previous study (Lee et al., 2017) and this study.

Period	Region	Small phytoplankton contribution			References
		Chl-a	POC	Carbon uptake rate	
Early January 2014	Non-polynya	42.4 ± 37.2%	49.5 ± 15.0%	50.8 ± 42.8%	Lee et al. (2017)
	Polynya	7.7 ± 2.5%	36.9 ± 4.3%	14.9 ± 8.4%	
	All the stations	19.3 ± 26.0%	41.1 ± 10.6%	26.9 ± 29.3%	
Early January 2014	Non-polynya	26.6 ± 25.8%	48.3 ± 14.4%	34.7 ± 29.1%	this study
January-February 2016,	Polynya	16.9 ± 11.1%	41.4 ± 10.1%	25.5 ± 15.7%	
February-March 2012	All the stations	19.7 ± 16.8%	43.5 ± 11.8%	28.3 ± 20.7%	

극지연구소

Table 3. Small phytoplankton contributions to total nitrate and ammonium uptake rate in the Amundsen Sea during early January 2014, January–February 2016, and February–March 2012.

Period	Region	Small phytonplankton contribution	
		Nitrate uptake rate	Ammonium uptake rate
Early January 2014	Nonpolyna	28.1 ± 15.9%	52.8 ± 40.5%
	Polyna	18.1 ± 6.8%	31.6 ± 10.1%
	All the stations	21.5 ± 11.1%	38.7 ± 24.9%
January-February 2016	Nonpolyna	19.9 ± 3.8%	21.2 ± 7.5%
	Polyna	32.5 ± 11.1%	37.4 ± 13.9%
	All the stations	30.8 ± 11.2%	35.2 ± 14.2%
February-March 2012	Nonpolyna	44.2 ± 33.3%	44.90%
	Polyna	63.1 ± 38.0%	45.10%
	All the stations	56.8 ± 34.4%	45%

Table 4. Macromolecular compositions and chl-a concentrations of phytoplankton in the Amundsen Sea during January–February 2018.

Period (cruise)	Date (UTC)	Station	Latitude (°S)	Longitude (°W)	Column integrated chl-a (mg chl-a/m ³)		Column averaged macromolecular composition (µg/L)							
							Carbohydrates		Proteins		Lipids		Food material	
							total	small	total	small	total	small	total	small
January-February 2016 (ANA08B)	Jan. 16	st.11	-66.466	-155.736	4.59	1.91	58.90	47.74	12.12	8.44	24.10	29.44	95.11	85.62
	Jan. 18	st.12	-73.659	-127.402	48.41	18.67	102.67	49.06	54.94	38.51	60.55	29.08	218.16	116.65
	Jan. 19	st.18	-73.945	-127.807	87.54	38.55	232.28	103.79	143.26	75.58	97.51	55.54	473.05	234.91
	Jan. 20	st.22	-74.227	-128.558	62.47	17.33	295.71	119.59	161.74	76.32	113.24	42.29	570.69	238.20
	Jan. 22	st.27	-73.889	-118.728	77.87	10.99	148.82	67.56	112.71	45.73	92.97	46.32	354.51	159.61
	Jan. 23	st.29	-73.900	-117.273	65.64	11.58	253.13	97.58	166.99	54.14	133.32	48.28	553.43	200.00
	Jan. 24	st.31	-73.500	-116.500	39.27	8.85	250.79	116.20	145.61	48.27	92.76	47.22	489.16	211.69
	Jan. 24	st.33	-73.280	-114.949	69.28	11.38	276.91	130.31	181.56	59.58	104.00	44.52	562.47	234.41
	Jan. 25	st.34	-73.711	-114.215	84.33	7.94	296.09	95.41	146.31	33.14	88.54	51.96	530.95	180.51
	Jan. 27	st.38	-74.174	-112.724	97.42	12.97	318.15	135.43	91.50	44.80	109.53	73.83	519.18	254.05
	Jan. 27	st.42	-74.176	-112.135	59.38	7.72	163.27	97.53	58.66	25.50	70.58	45.74	292.52	168.77
	Jan. 28	st.46	-72.850	-112.500	127.94	20.60	398.05	175.54	223.88	64.54	152.97	72.31	774.90	312.39
	Jan. 29	st.47	-73.000	-113.500	42.07	9.86	149.65	82.34	95.79	46.80	69.28	45.06	314.73	174.20
	Jan. 29	st.49	-72.782	-115.125	111.86	24.42	297.60	135.29	124.78	55.60	84.31	65.39	506.69	256.28
	Jan. 31	st.52	-72.000	-118.417	12.65	3.93	137.24	15.50	17.21	84.85	32.65	25.13	187.10	36.07
	Jan. 30	st.53	-71.000	-120.000	7.44	3.62	105.03	90.76	13.07	12.43	76.64	36.41	194.74	139.59
	Feb. 02	st.23(re)	-73.354	-128.051	118.24	11.04	312.74	139.27	235.63	29.29	180.26	51.87	728.63	220.42

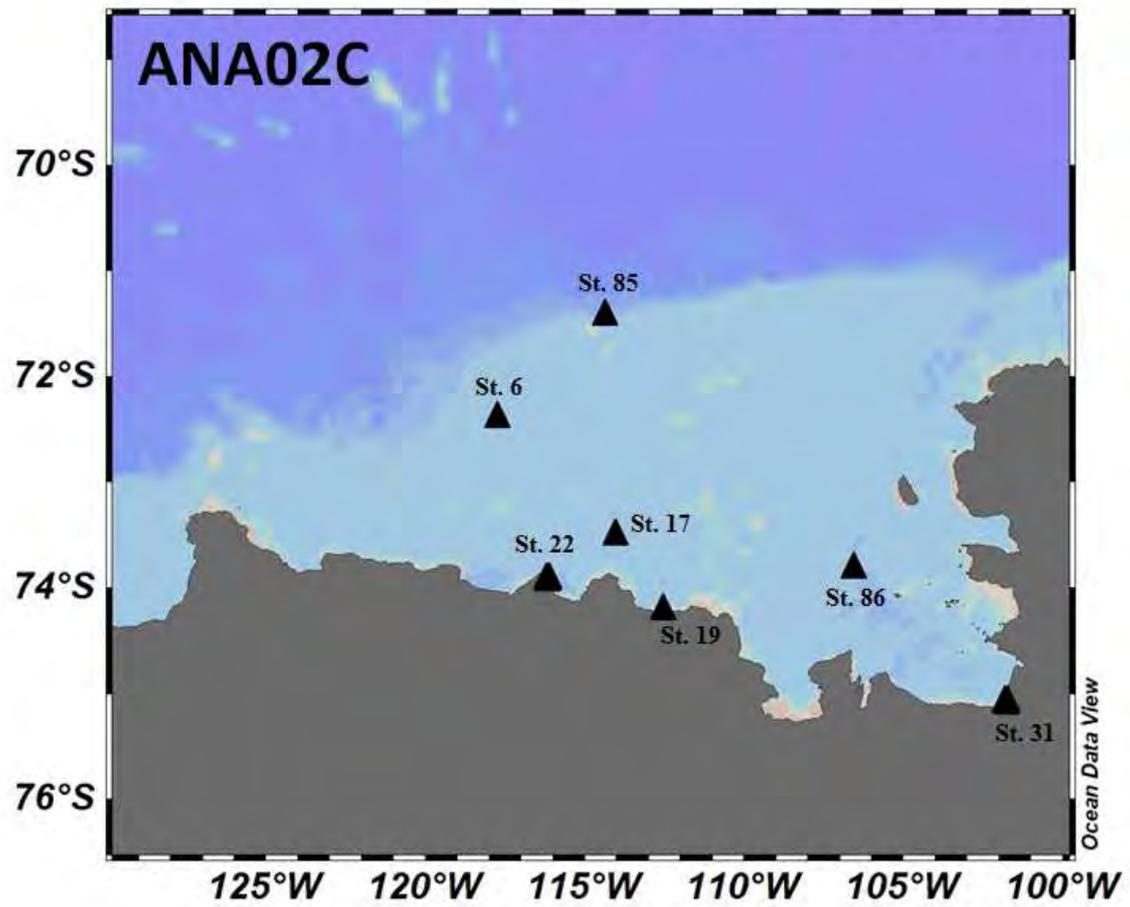


Fig. 1. Map showing the locations of productivity stations in the Amundsen Sea in the Southern Ocean during February–March 2012 (ANA02C).

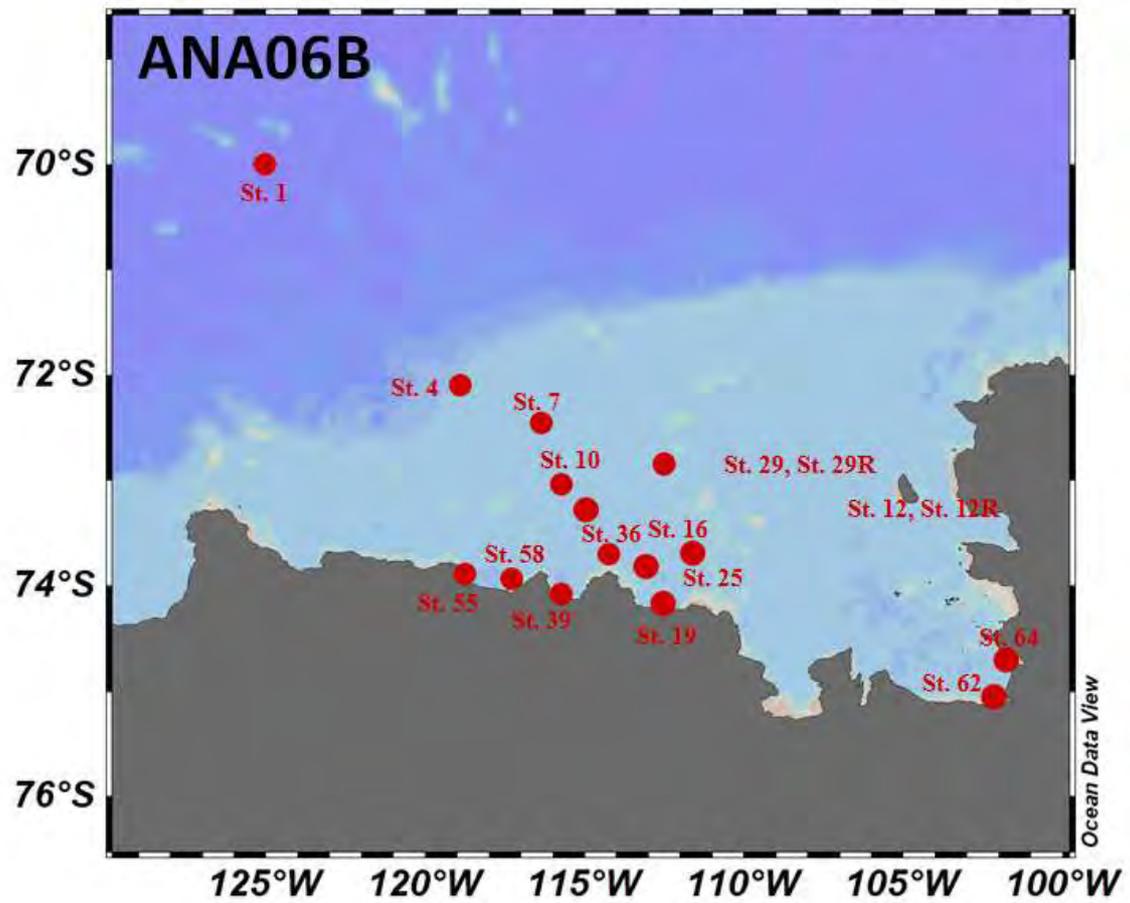


Fig. 2. Map showing the locations of productivity stations in the Amundsen Sea in the Southern Ocean during January–February 2016 (ANA06B).

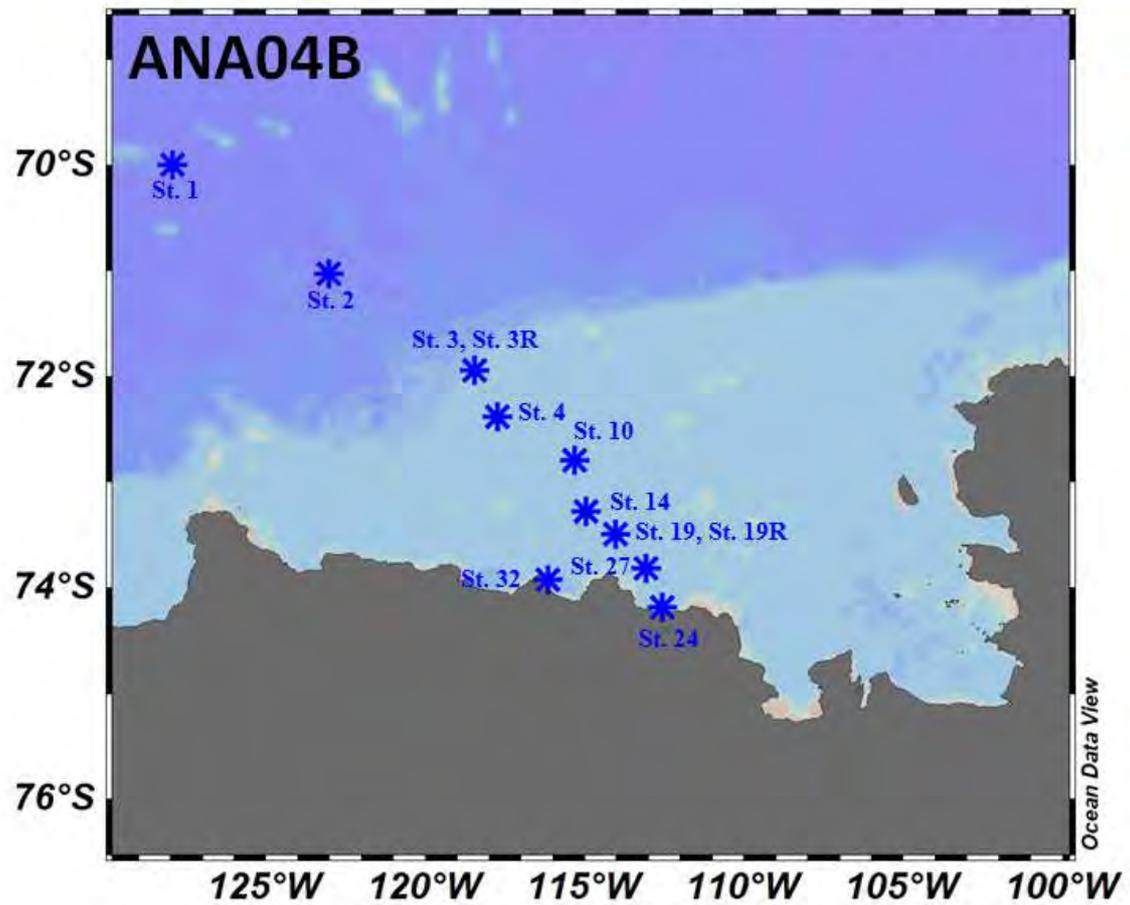


Fig. 3. Map showing the locations of productivity stations in the Amundsen Sea in the Southern Ocean during early January 2014 (ANA04B).

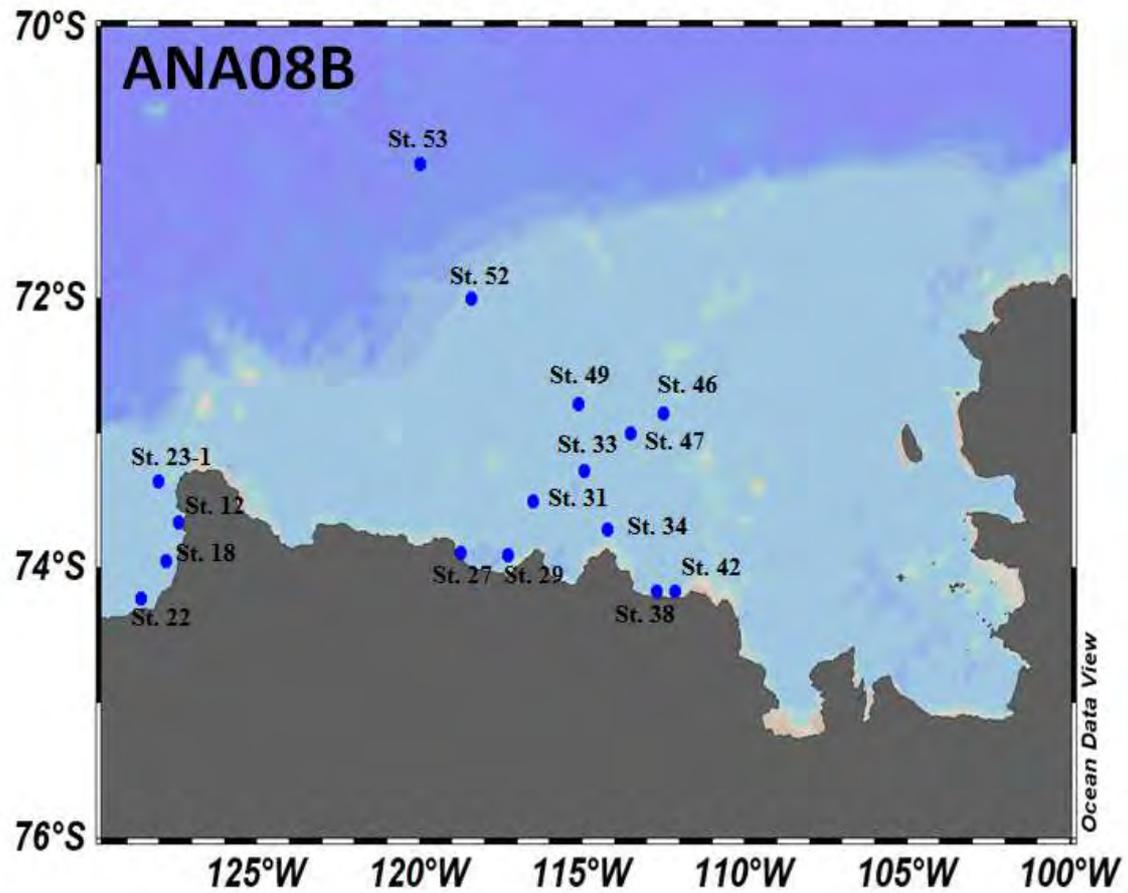


Fig. 4. Map showing the locations for macromolecular composition in the Amundsen Sea in the Southern Ocean during January–February 2018 (ANA08B).

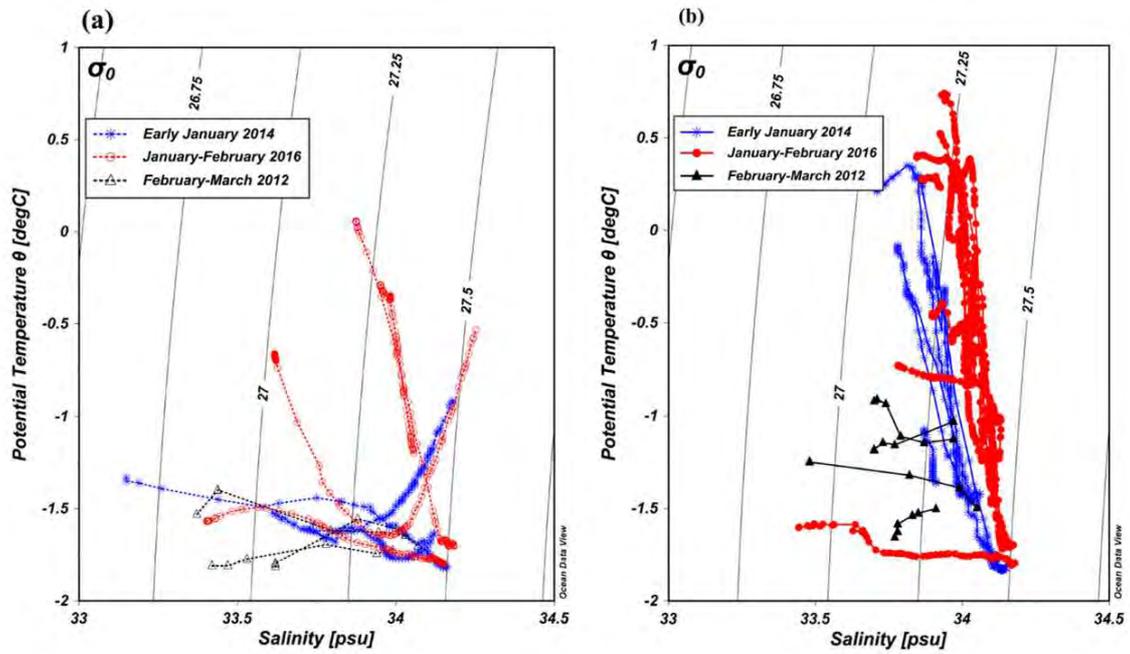


Fig. 5. The temperature and salinity diagrams from the surface to 100 m in the (a) nonpolynya and (b) polynya regions in early January 2014 (blue asterisks), January-February 2016 (red circles), and February-March 2012 (black triangles). The data from Lee et al. (2017) and Kim et al. (2015) were used for early January 2014 and February-March 2012, respectively.

극지연구소

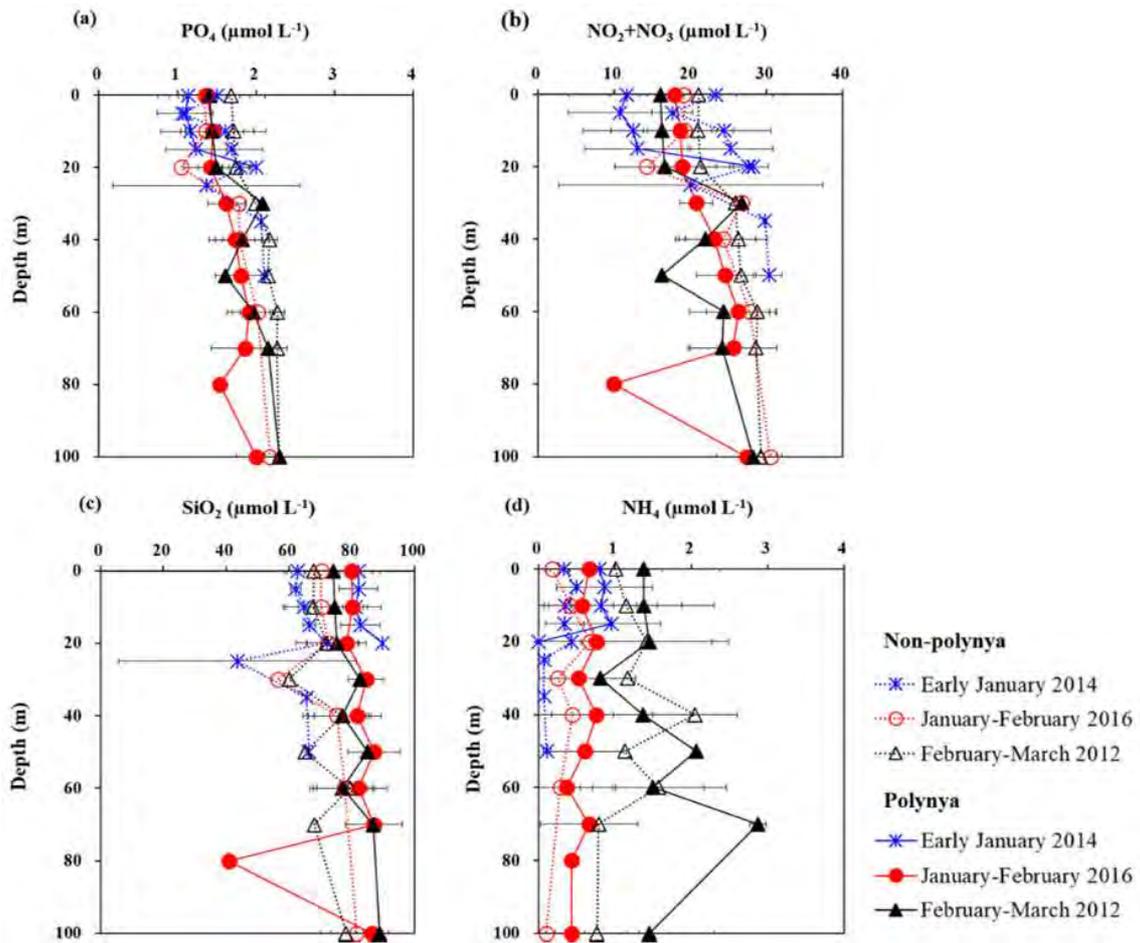


Fig. 6. Vertical profiles of the mean concentrations of inorganic major nutrients—(a) phosphate, (b) nitrite + nitrate, (c) silicate, and (d) ammonium—from the surface to 100 m in the nonpolynya and polynya regions during the three periods. The data of Kim et al. (2015) were used for February–March 2012.

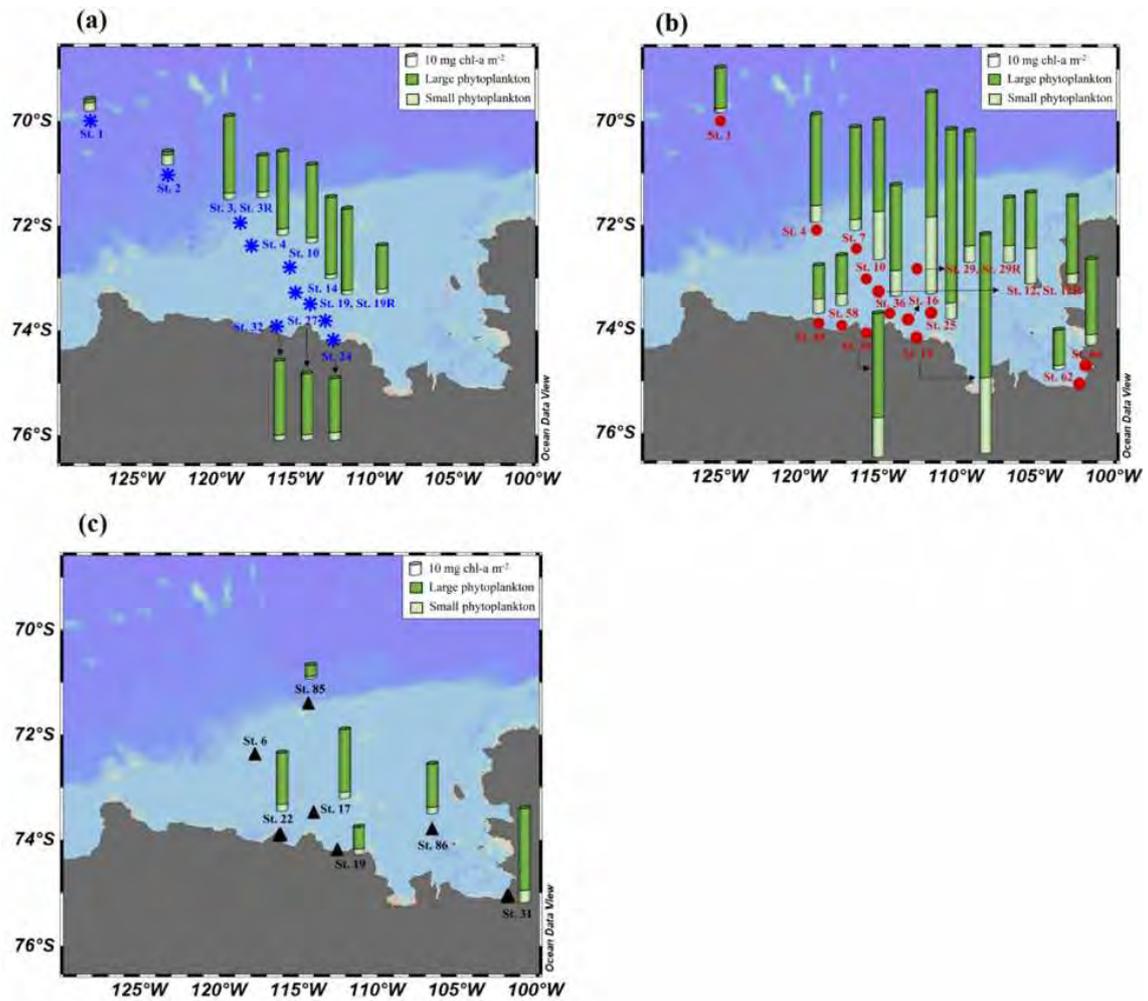


Fig. 7. The chl-a concentrations of large and small phytoplankton during (a) early January 2014, (b) January–February 2016, and (c) February–March 2012.

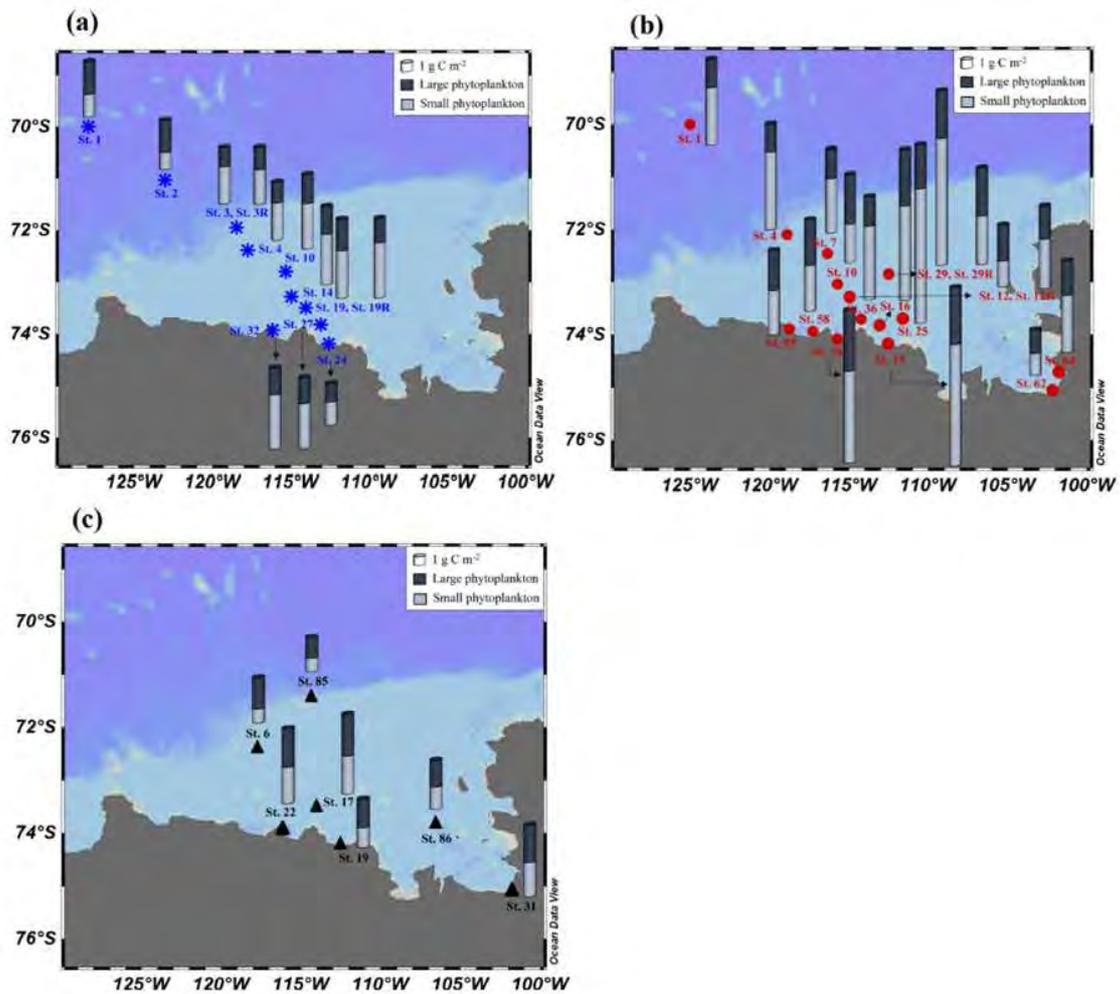


Fig. 8. The POC concentrations of large and small phytoplankton during (a) early January 2014, (b) January–February 2016, and (c) February–March 2012.

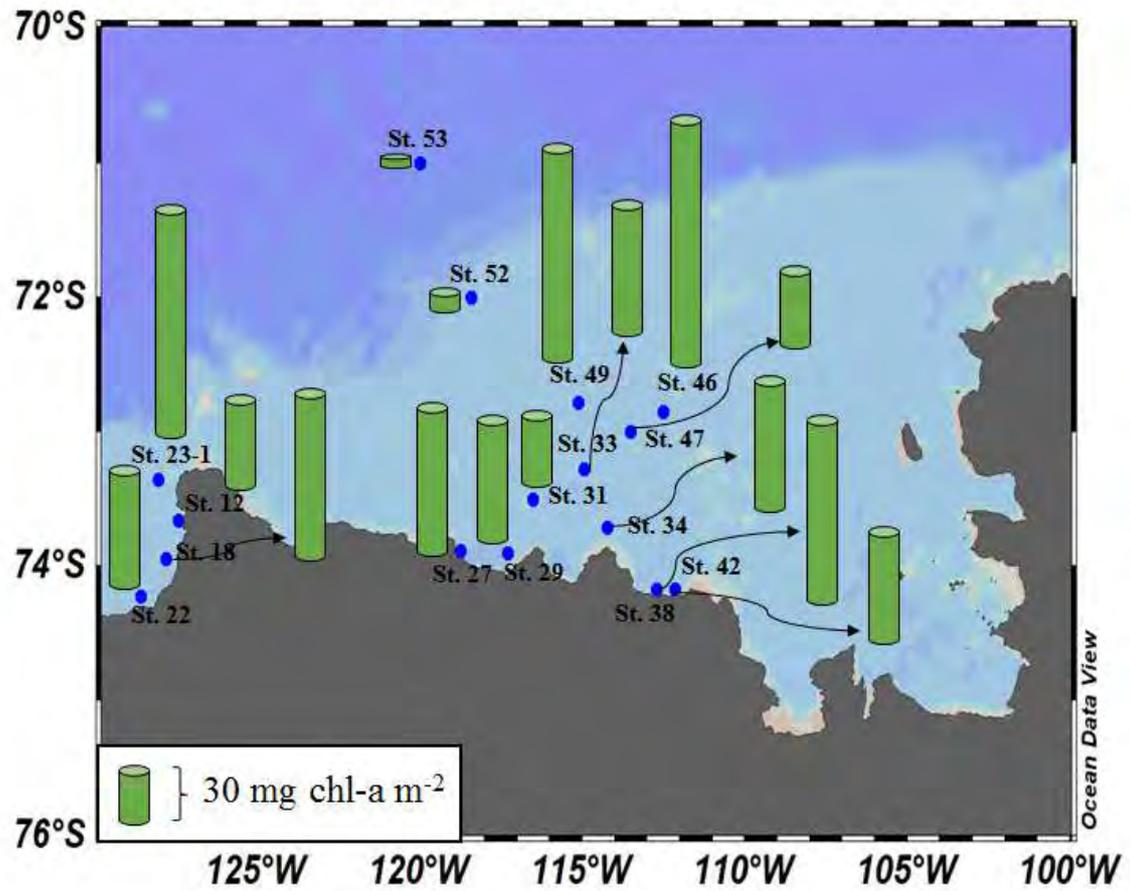


Fig. 9. The chl-a concentrations of total phytoplankton (large + small) during January-February 2018.

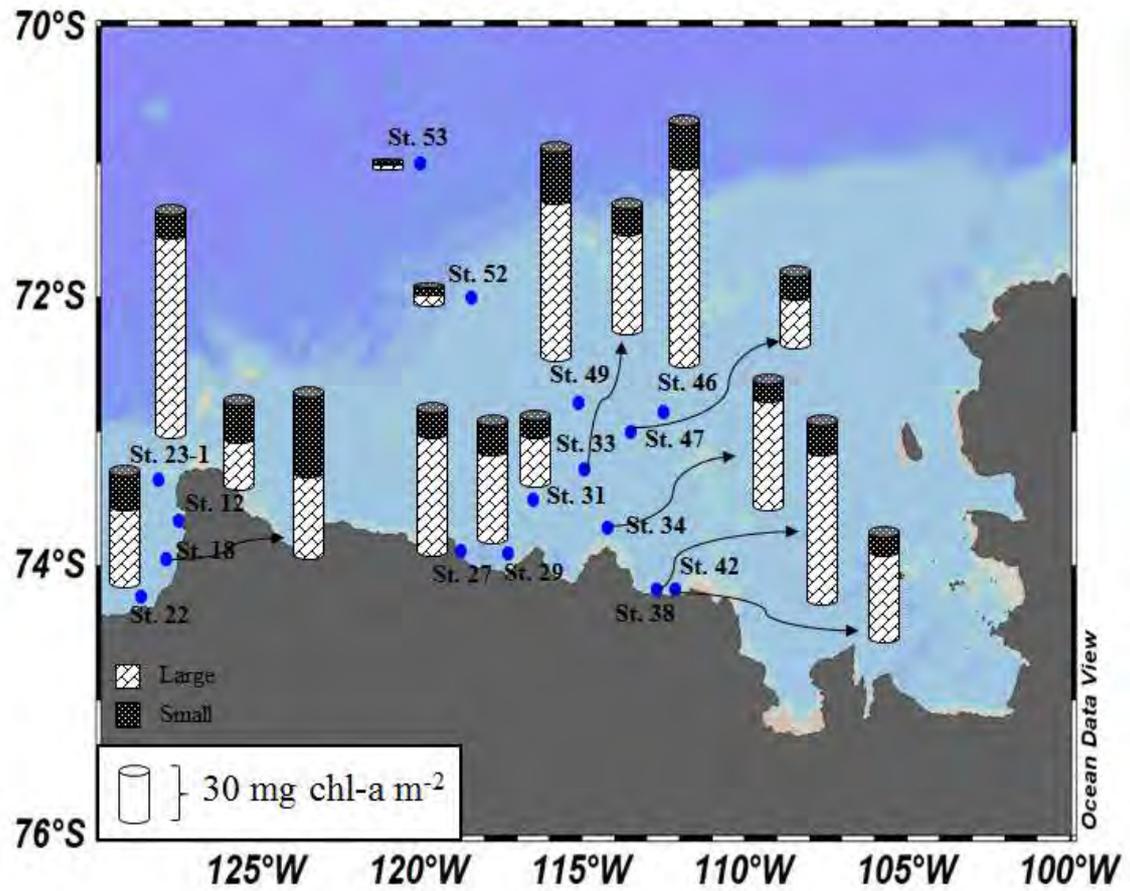


Fig. 10. The contribution of large and small phytoplankton to total biomass of phytoplankton during January–February 2018.

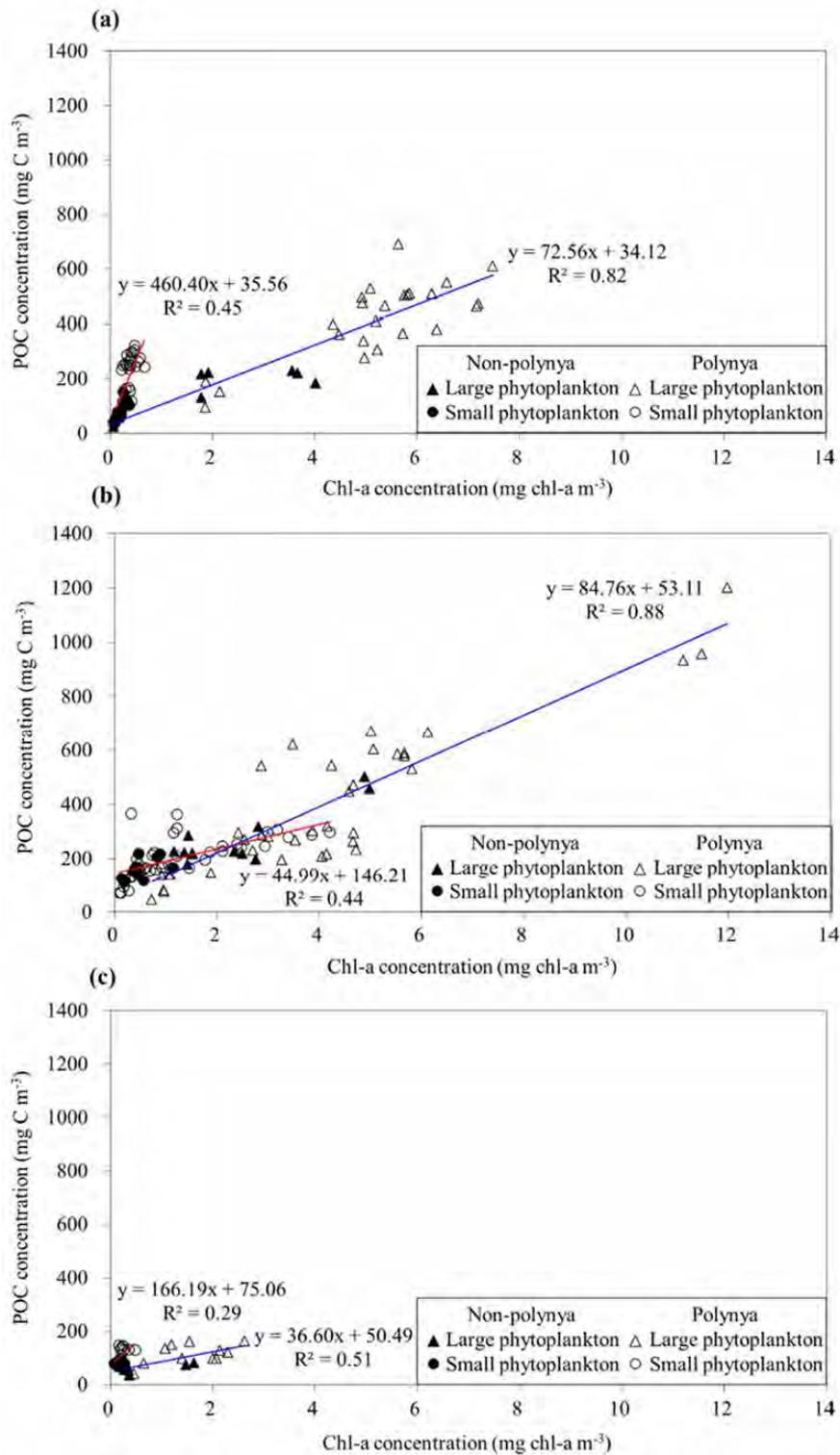


Fig. 11. The relationships between the POC and chl-a concentrations of large (triangles) and small phytoplankton (circles) in (a) early January 2014, (b) January–February 2016, and (c) February–March 2012.

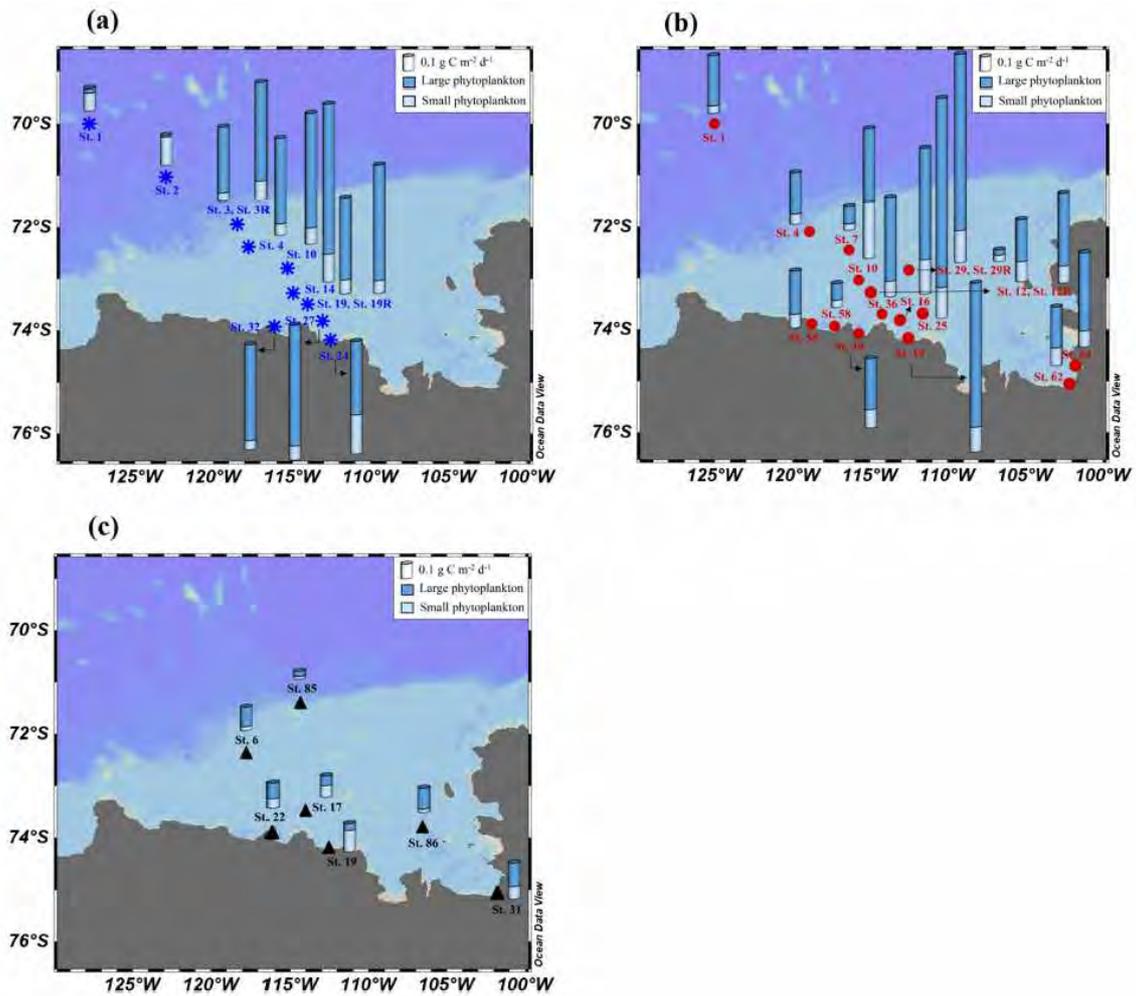


Fig. 12. The carbon uptake rates of large and small phytoplankton during (a) early January 2014, (b) January–February 2016, and (c) February–March 2012.

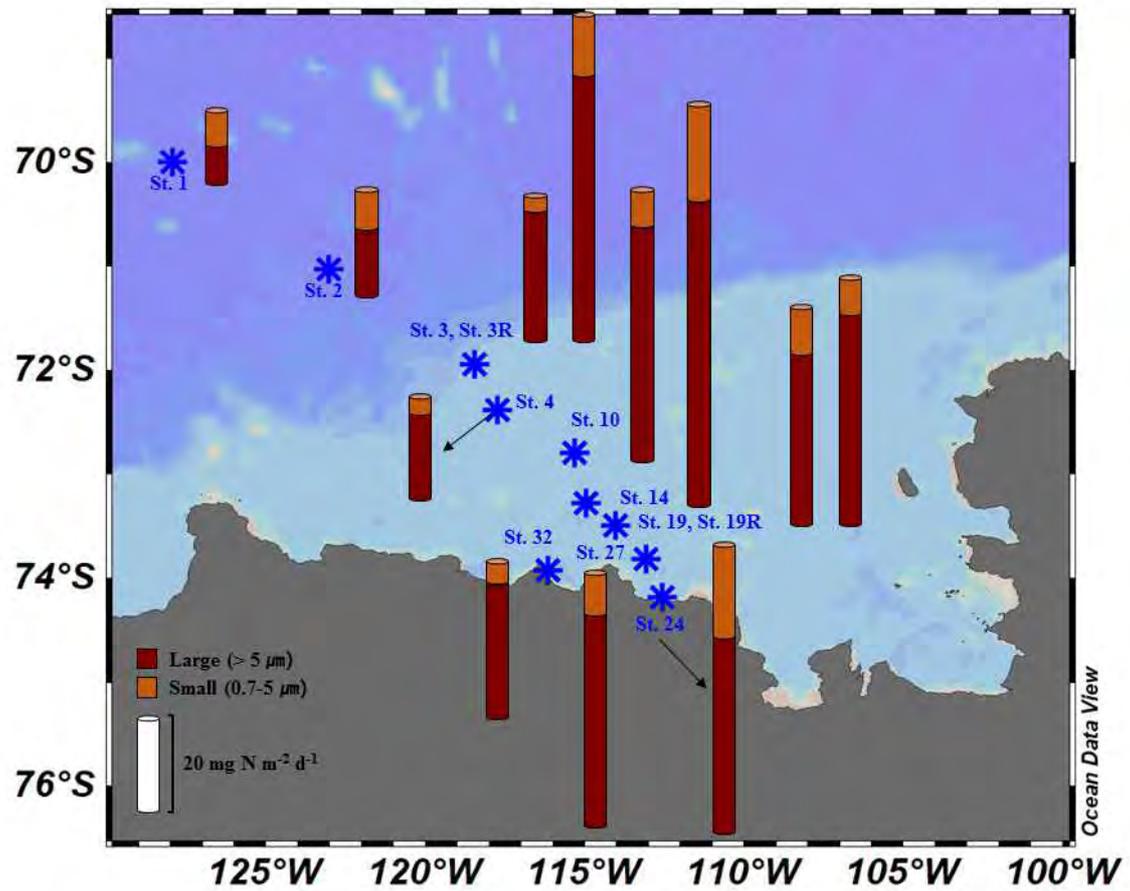


Fig. 13. The nitrate uptake rates of large and small phytoplankton during early January 2014.

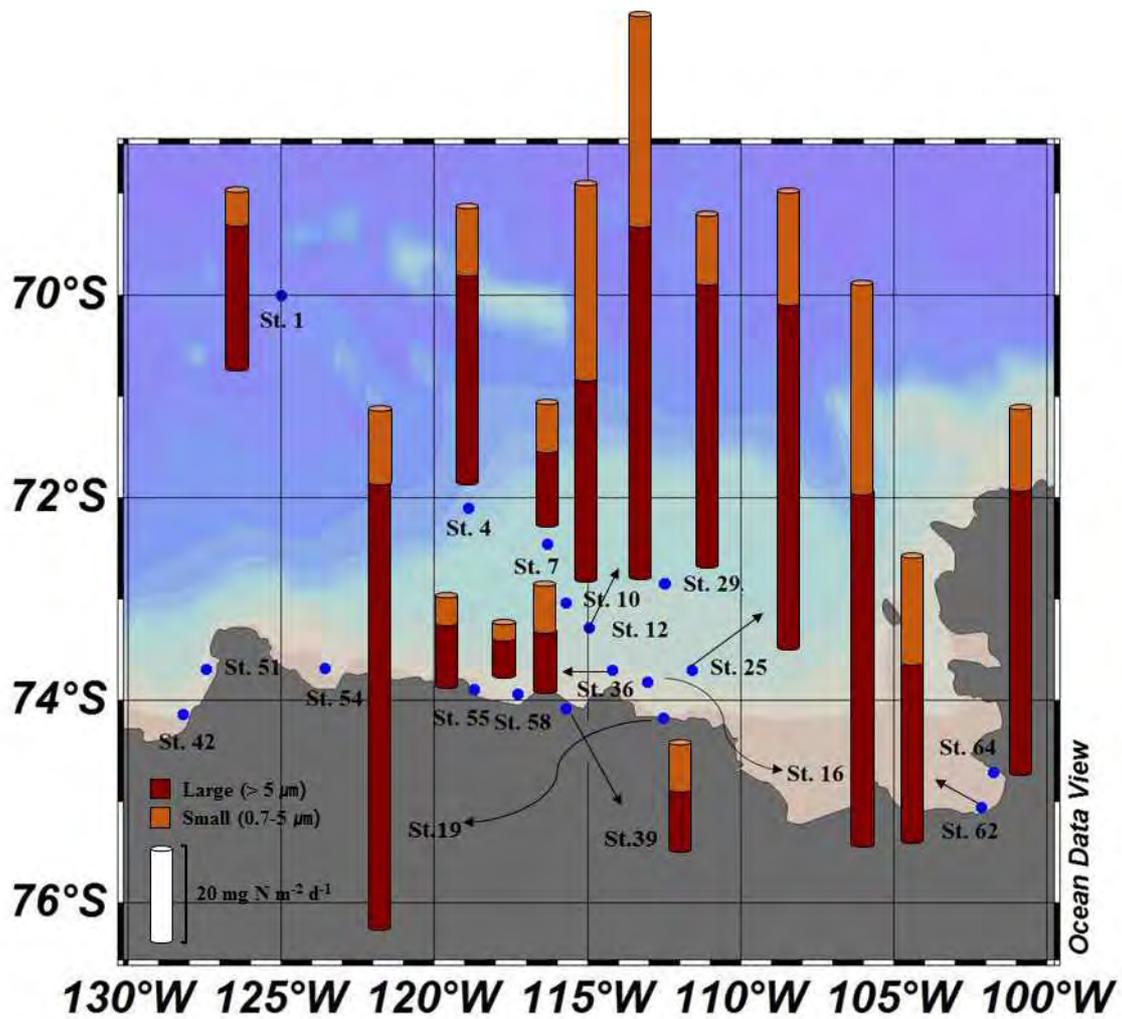


Fig. 14. The nitrate uptake rates of large and small phytoplankton during January–February 2016.

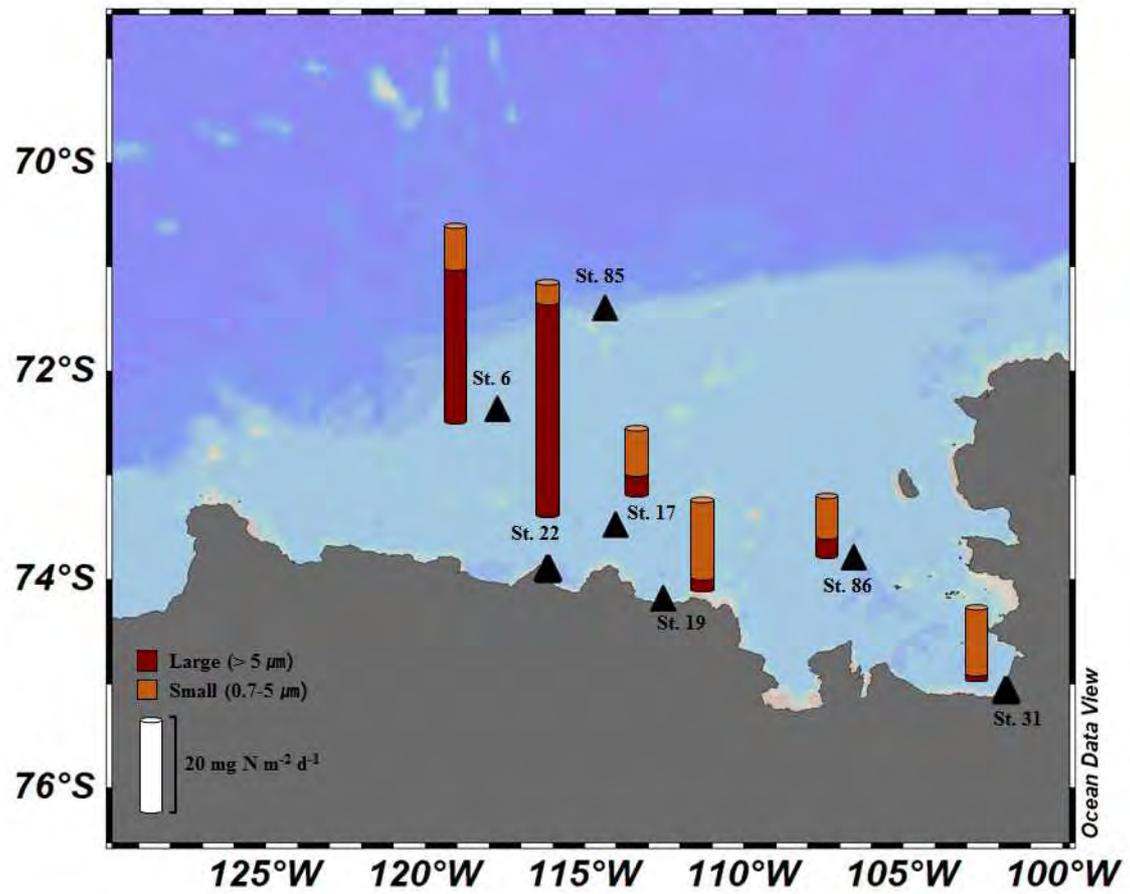


Fig. 15. The nitrate uptake rates of large and small phytoplankton during early February-March 2012.

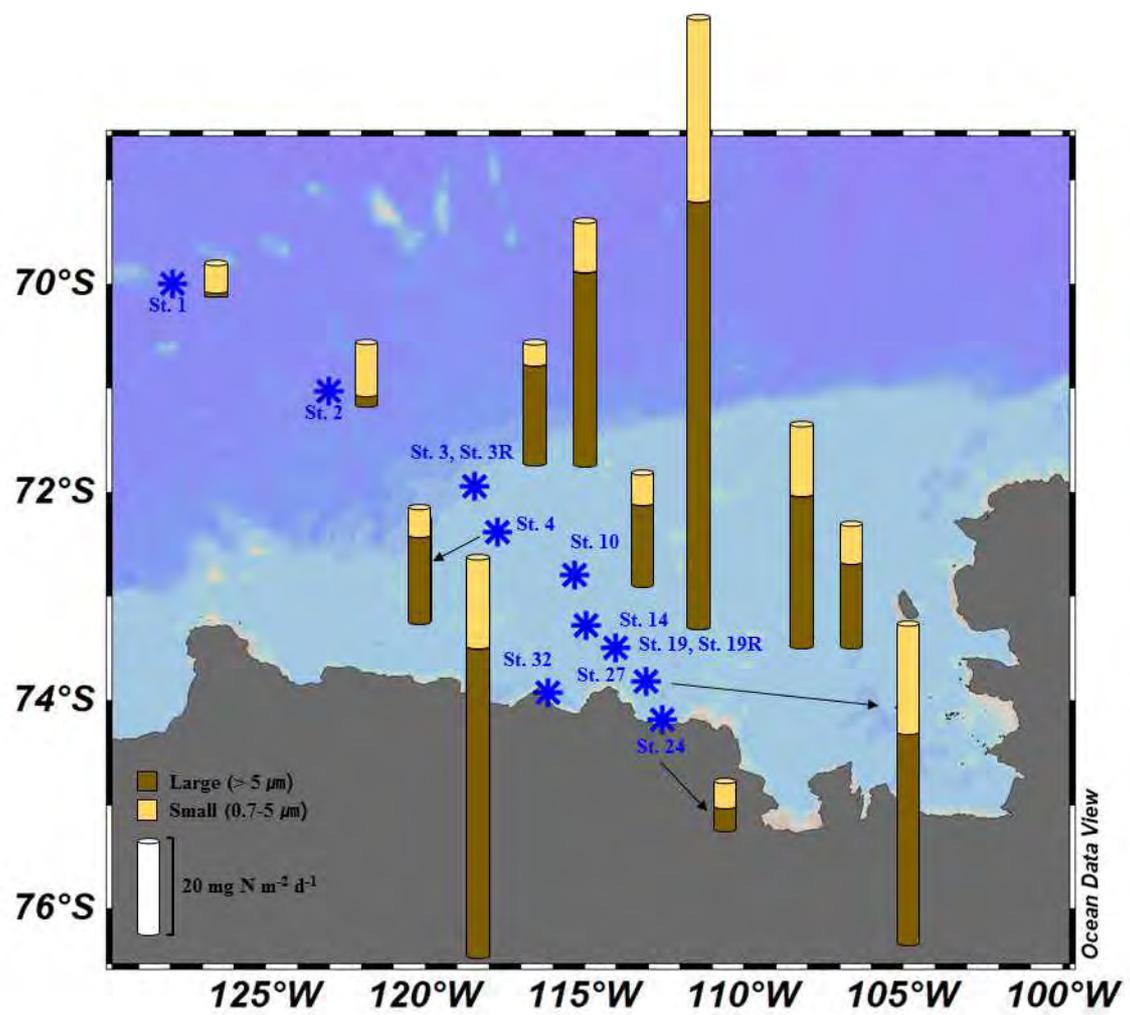


Fig. 16. The ammonium uptake rates of large and small phytoplankton during early January 2014.

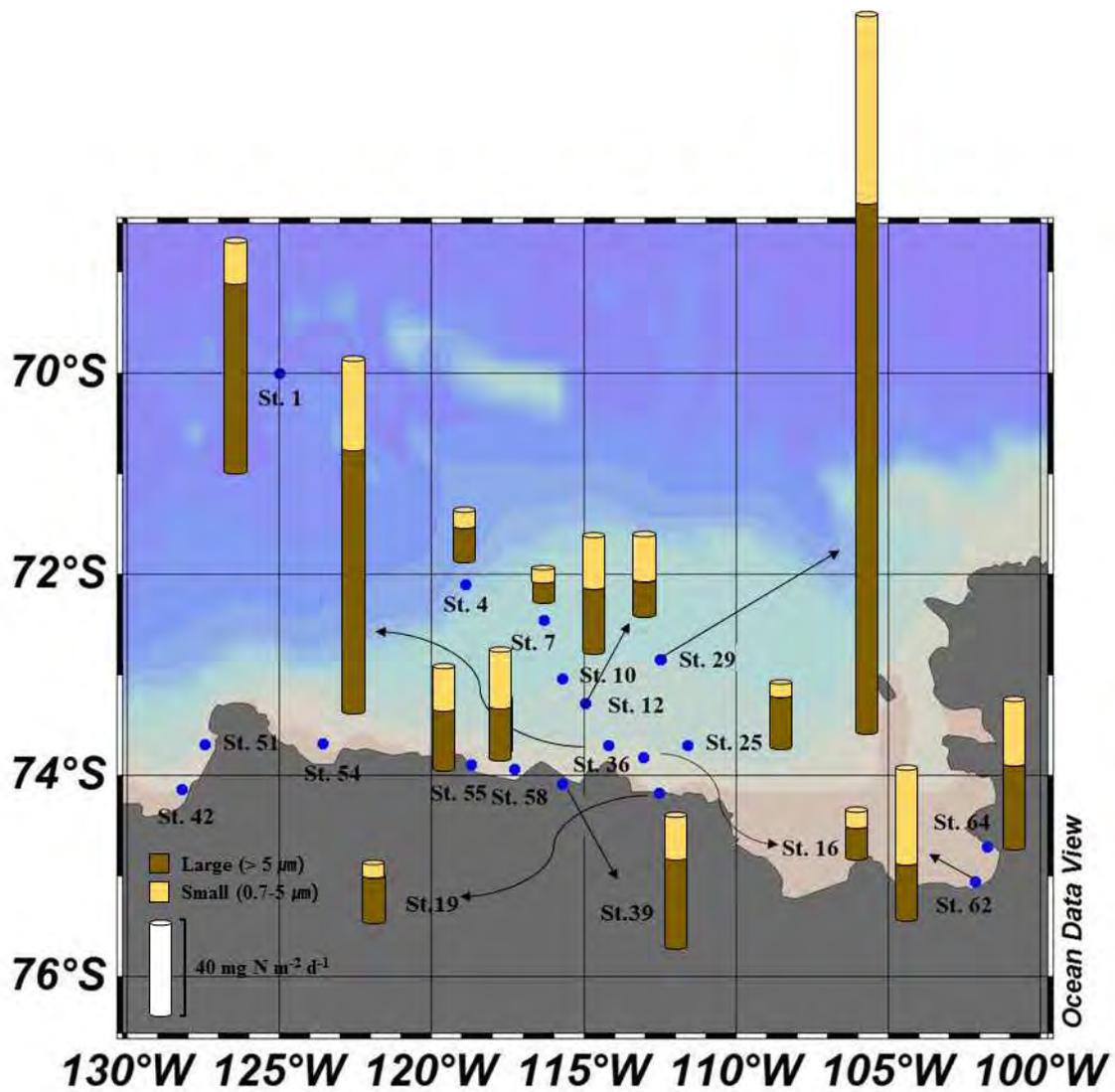


Fig. 17. The ammonium uptake rates of large and small phytoplankton during January–February 2016.

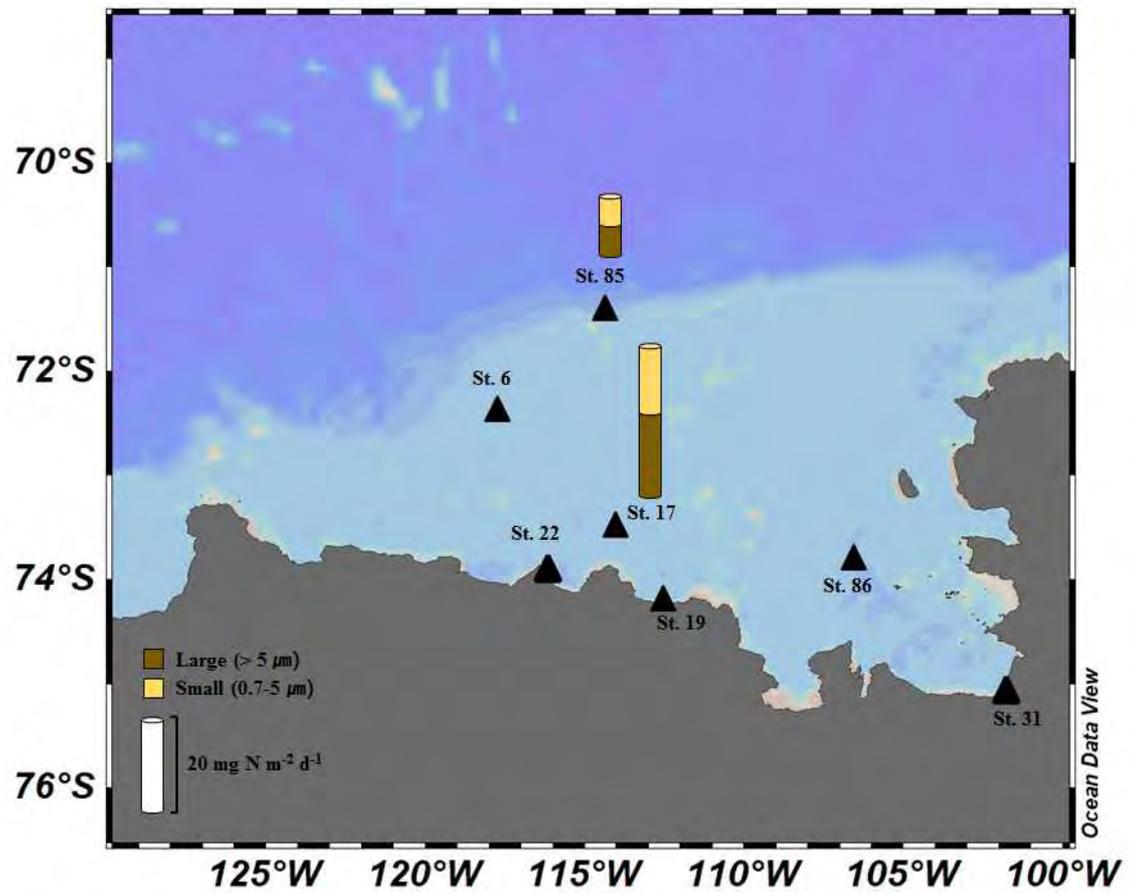


Fig. 18. The ammonium uptake rates of large and small phytoplankton during February-March 2012.

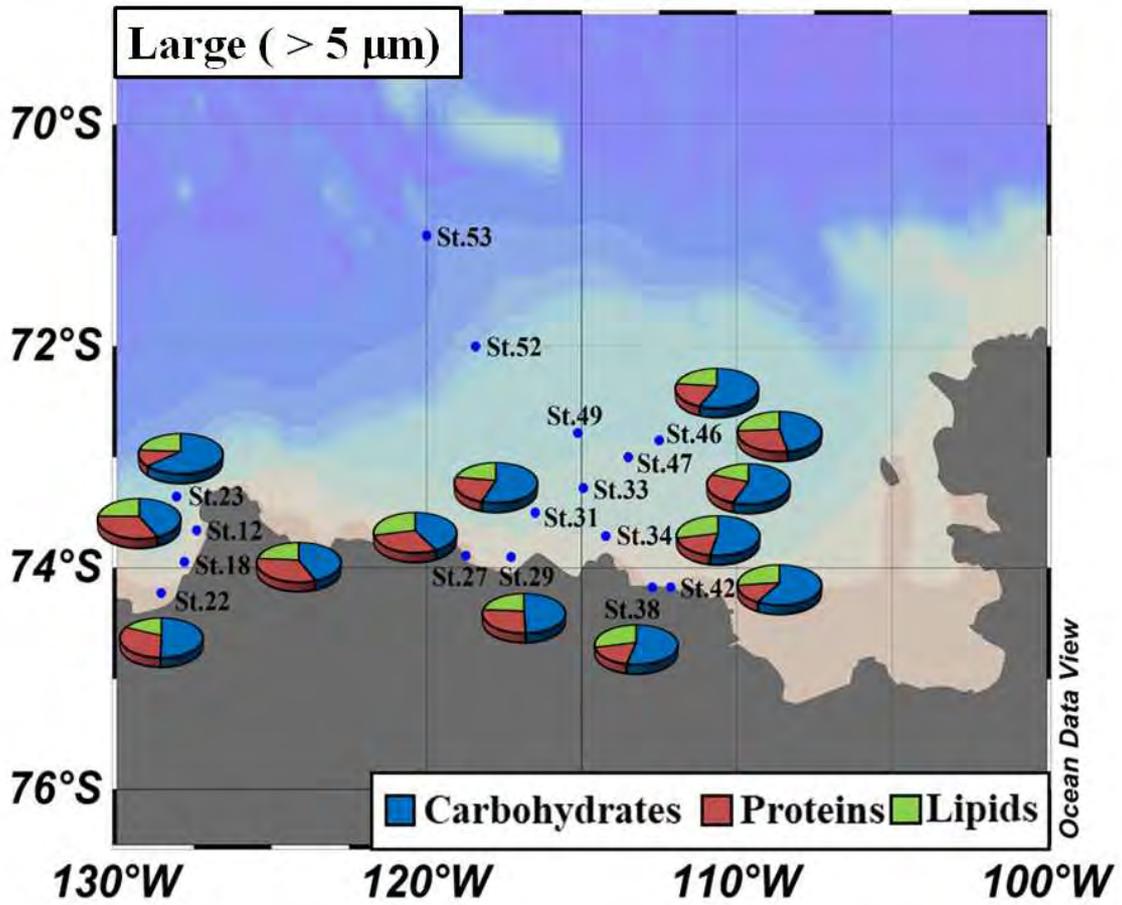


Fig. 19. biochemical compositions of large phytoplankton during January–February 2018.

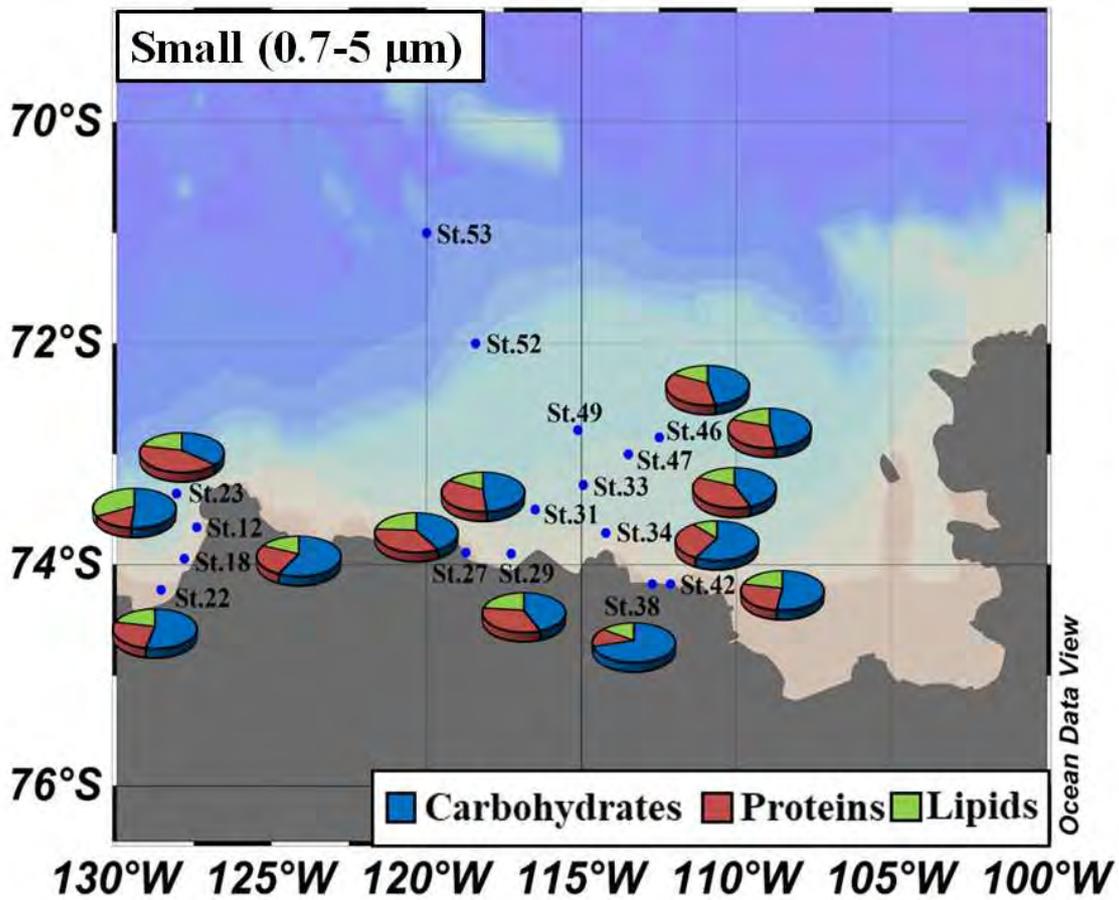


Fig. 20. biochemical compositions of small phytoplankton during January–February 2018.

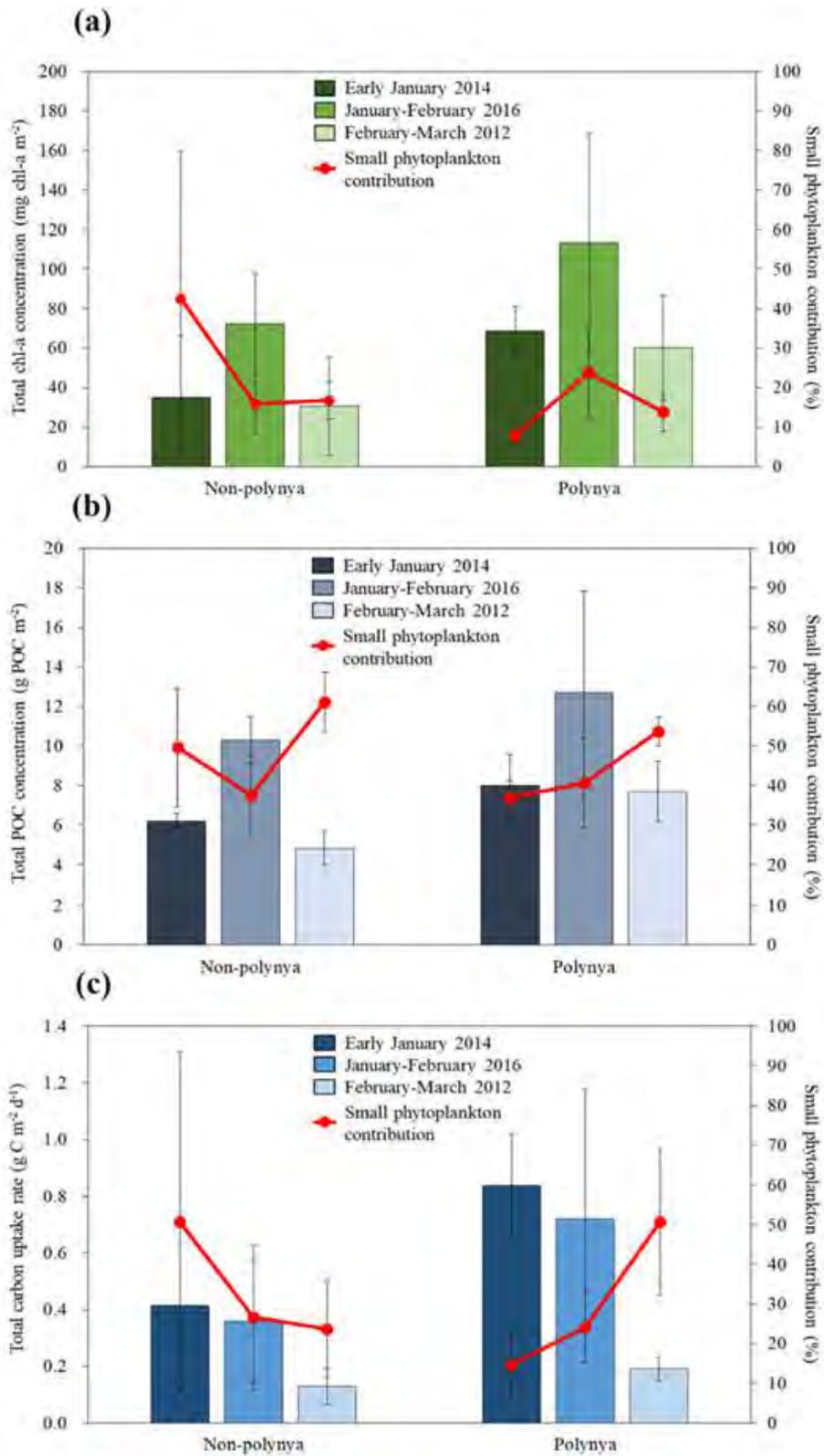


Fig. 21. Seasonal variations of the total values (bar graph) and small phytoplankton contributions (line graph) in the non-polynya and polynya regions.

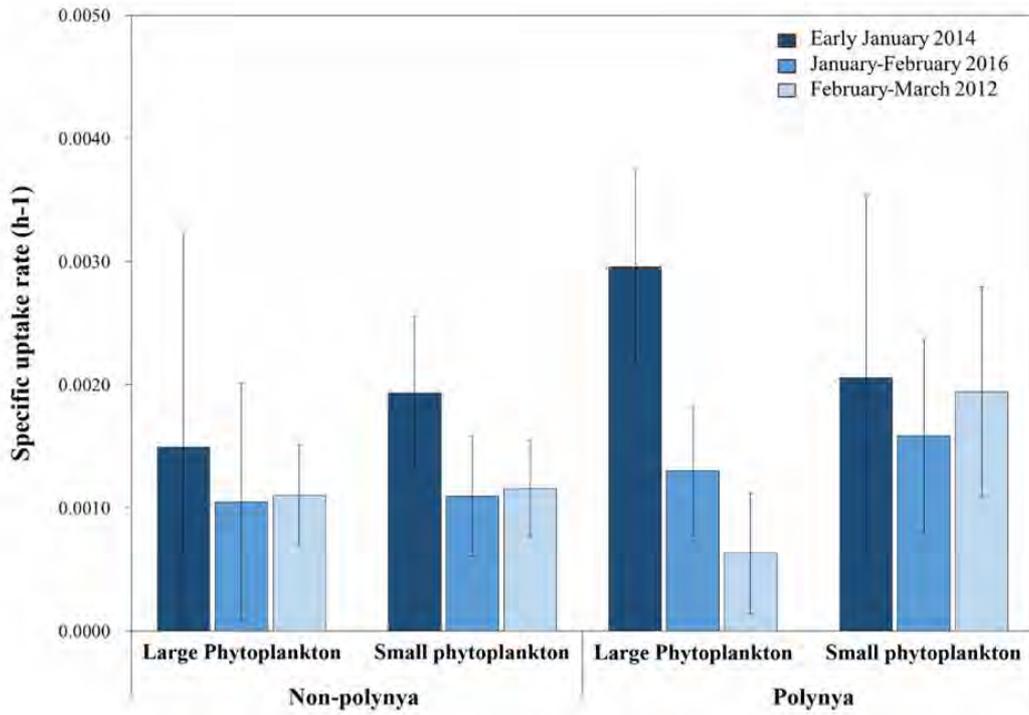


Fig. 22. The average specific uptake rates of large and small phytoplankton in the non-polynya and polynya regions during the three periods. The data of early January 2014 were adopted from Lee et al. (2017), and the values of large phytoplankton in February-March 2012 were calculated from total values described by Kim et al. (2015).

제 4절. 고찰

Polynya 지역에서 작은 식물플랑크톤의 chl-a 기여도는 큰 식물플랑크톤의 chl-a 농도가 연구기간 동안 비슷했기 때문에 early January ($7.7 \pm 2.5\%$) 와 February-March ($13.6 \pm 4.9\%$) 보다 January-February ($23.6 \pm 1.4\%$)에 높았다 (Fig. 20a). 그러나 작은 식물플랑크톤의 chl-a 농도는 January-February에 가장 높았다. Non-polynya 지역에서 early January, January-February, February-March 에 총 POC 농도에 대한 작은 식물플랑크톤의 기여도는 각각 $49.5\% (\pm 15.0\%)$, $37.4\% (\pm 10.1\%)$, $61.1\% (\pm 7.4\%)$ 로 나타났다 (Fig. 20b). 이와 대조적으로 polynya 지역에서 early January, January-February, February-March 에 총 POC 농도에 대한 작은 식물플랑크톤의 기여도는 각각 $36.9\% (\pm 4.3\%)$, $40.5\% (\pm 11.2\%)$, $53.6\% (\pm 3.6\%)$ 로 나타났다. 2018년 1월 16일부터 2월 2일까지 아문젠해에서 전체 chl-a 농도에 대한 큰 식물플랑크톤의 기여도는 $76.0 \pm 12.6\%$ 로 나타났다. 반면, 작은 식물플랑크톤의 기여도는 $24.1 \pm 12.6\%$ 로 나타났다. 크기별 chl-a 농도 자료를 보았을 때, 2018년의 연구기간 동안 아문젠해에서는 크기가 큰 식물플랑크톤이 약 76% 차지하며 우점 했다고 판단된다. 모든 정점에서 총 POC 농도에 대한 작은 식물플랑크톤의 전반적인 기여도는 총 chl-a 농도에 대한 작은 식물플랑크톤 기여도의 평균 보다 통계적으로 유의미하게 높았다 (Table 2). 이 결과는 아문젠해 (Lee et al., 2017)와 북극 척치해 (Lee et al., 2013)에서의 이전 결과들과 일치한다. 그들은 일반적으로 chl-a 농도가 식물플랑크톤의 생물량을 산출하는데 쓰이고 있지만 이러한 관습적인 chl-a 농도에 기반 한 생물량의 산출에서 작은 식물플랑크톤의 기여도가 과소평가 되어질 수 있다고 주장했다 (Lee et al., 2013; Lee et al., 2017). POC 의 기원이 주로 식물플랑크톤으로부터 유래했다고 가정 한다면 chl-a 농도 대신에 POC 를 기반으로 한 기여도는 작은 식물플랑크톤의 기여도를 측정하기 위한 더 나은 대안이 될 수 있다. 이 이론을 입증하기 위해 우리는 본 연구에서 POC 의 $\delta^{13}\text{C}$ 값과 C/N ratio 를 확인하였다. Early January, January-February, February-March 의 $\delta^{13}\text{C}$ 값은 각각 $-26.14 \pm 1.13\%$, $-27.12 \pm 1.48\%$, $-26.29 \pm 1.06\%$ 로 나타났다. 그리고 early January, January-February, February-March의 C/N ratio 는 각각 6.59 ± 0.54 , 7.68 ± 0.72 , 6.34 ± 0.44 로 나타났다. 과거 연구들에 따르면 식물플랑크톤의 $\delta^{13}\text{C}$ 값과 C/N ratio 의 범위는 각각 -27.5% 에서 -25.6% (Corbisier et al., 2004; Wada et al., 1987)과 6 에서 10 (Kim et al., 2016, references therein)의 범위를 갖는다. 본 연구에서의 값들은 POC 의 농도가 주로 식물플랑크톤에 의해 만들어 졌다는 가정을 뒷받침 한다 (Baumann et al., 1994; Kendall et al., 2001; Schoemann et al., 2005; Lee et al., 2013; Kim et al., 2016; Lee et al., 2017). 총 chl-a 에 대한 작은 식물플랑크톤의 기여도 보다 POC 에 대한 작은 식물플랑크톤의 기여도가 높은 이유는 큰 식물플랑크톤 보다 작은 식물플랑크톤의 높은 POC/chl-a 비 때문일 수 있다 (Holm-Hansen & Huntley, 1984; Lee et al., 2013;

Lee et al., 2017). 특히 early January 와 February-March 의 결과에는 그것이 확연하게 나타난다.

Non-polynya 지역에서 총 탄소 섭취율에 대한 작은 식물플랑크톤의 기여도는 early January 에 $50.8 \pm 42.8\%$ 에서 February-March 에 $23.8 \pm 12.4\%$ 로 감소했지만 공간 변동성이 크기 때문에 작은 식물플랑크톤의 기여도와 총 일차생산은 세 연구기간 동안 크게 차이 나지 않았다 (Fig. 12). 이와 대조적으로 같은 연구기간 동안 polynya 지역에서 early January 에서 February-March 까지 $14.9 \pm 8.4\%$ 에서 $50.8 \pm 18.4\%$ 로 총 일차생산에 대한 작은 식물플랑크톤의 기여도가 통계적으로 유의미하게 증가했다 (one-way ANOVA, $p < 0.05$). Polynya 지역에서 작은 식물플랑크톤 기여도의 증가는 cell 크기 차이에 따른 식물플랑크톤의 생물량과 specific uptake rate 변동의 결과이다. 유광층에서 큰 식물플랑크톤과 작은 식물플랑크톤의 specific uptake rate 가 식물플랑크톤의 개체 크기의 차이에 따른 광합성 능력을 비교하기 위해 분석되었다 (Fig. 21). 연구 기간 동안 non-polynya 지역에서 큰 식물플랑크톤의 평균 specific uptake rate 는 작은 식물플랑크톤과 비슷했다. Polynya 지역에서 early January 에 큰 식물플랑크톤의 specific uptake rate ($0.0030 \pm 0.0008 \text{ hr}^{-1}$)는 작은 식물플랑크톤 ($0.0021 \pm 0.0015 \text{ hr}^{-1}$)보다 통계적으로 유의미하게 높았지만 ($t \text{ test, } p < 0.05$) January-February 에는 큰 식물플랑크톤 ($0.0013 \pm 0.0015 \text{ hr}^{-1}$)과 작은 식물플랑크톤 ($0.0016 \pm 0.0014 \text{ hr}^{-1}$)은 크게 차이 나지 않았다. 반면에 February-March 에는 큰 식물플랑크톤 ($0.0006 \pm 0.0011 \text{ hr}^{-1}$) 보다 작은 식물플랑크톤 ($0.0019 \pm 0.0016 \text{ hr}^{-1}$)의 specific uptake rate 가 통계적으로 유의미하게 높았다 ($t \text{ test, } p < 0.05$). Early January 와 비교하여 January-February에 큰 식물플랑크톤이 낮은 specific uptake rate 를 보였지만 January-February 에 큰 식물플랑크톤의 생물량 상대적으로 높았기 때문에 이 시기에 총 일차생산이 early January와 비슷한 값으로 증가했다. Polynya 지역에서 큰 식물플랑크톤과 작은 식물플랑크톤의 비슷한 specific uptake rate 는 early January 와 January-February 에 총 일차생산에 대한 작은 식물플랑크톤의 기여도를 감소시켰다. Bloom 의 막바지인 February-March 에 큰 식물플랑크톤의 낮은 specific uptake rate는 이 기간 동안에 가장 낮은 총 탄소 섭취율을 야기했다 (Arrigo et al., 2012; Kim et al., 2015; Lee et al., 2012). 세 연구 기간 동안 February-March 에 나타난 총 탄소 섭취율에 대한 작은 식물플랑크톤의 가장 높은 기여도는 큰 식물플랑크톤 보다 작은 식물플랑크톤에서 더 높은 specific uptake rates가 나타난 것이 주요 원인으로 사료된다.

남극해에서 식물플랑크톤의 생물량과 specific uptake rate 는 성층화, 빛의 세기, 철의 이용 가능성 과 같은 계절적인 환경 요인들에 의해 영향을 받는다 (Alderkamp et al., 2015; Alvain et al., 2008; Arrigo et al., 2012; Boyd, 2002; Goffart et al., 2000; Smith et al., 2000). 특히 남극해에서 우점 하는 식물플랑크톤 군집의 가장 중요한 요인으로 혼합층 수심과 계절적인 빛 이용 가능성을 들 수 있

다 (Arrigo et al., 1999; Fragoso & Smith, 2012; Goffart et al., 2000; Kim et al., 2015; Sedwick et al., 2007). 구조류는 성층화된 수괴 조건을 선호하는 반면에 *P. antarctica* 는 깊게 혼합된 조건에서 보편적으로 발견 된다 (Alvain et al., 2008; Arrigo et al., 1999; Goffart et al., 2000). 그러나 polynya 해역에서 각 연구 기간 동안 혼합층 수심의 통계적으로 유의미한 차이는 발견할 수 없었다. 그러므로 혼합 조건은 본 연구의 polynya 지역에서 작은 식물플랑크톤 기여도의 시간적 변동성을 야기하는 주요 인자에서 제외시킬 수 있다. February-March 에 질산염 섭취를 방해할 수 있는 높은 암모늄 농도는 질소원으로 질산염을 가장 선호하는 큰 식물플랑크톤의 탄소 섭취율을 억제시켰을 가능성이 있다 (Dortch, 1990; Dugdale et al., 2007; Goeyens et al., 1995; Kim et al., 2015; Koike et al., 1986; Probyn & Painting, 1985). 빛 세기의 관점에서 12월에서 3월로 갈수록 빛 세기와 낮 시간이 감소하며 식물플랑크톤의 일차생산을 제한했을 수 있다 (Boyd, 2002; Kim et al., 2015; Lee et al., 2012; Lee et al., 2017; Park et al., 2017; Sedwick et al., 2007). 끝으로 일차생산은 식물플랑크톤의 bloom이 진행되며 유광층에서 이용 가능한 철 농도에 의해 제한 받았을 수 있다 (Boyd et al., 2004; Kim et al., 2015; Smith et al., 2000; Sunda & Huntsman, 1997; Thuróczy et al., 2012).

본 연구에서 표층 염분은 early January 와 January-February 부터 February-March 까지 감소했다 (Fig. 5). 이를 통해 Polynya 로 식물플랑크톤에게 철을 공급할 수 있는 용빙수의 계절적 공급이 일어났을 것이라 짐작할 수 있다 (Alderkamp et al., 2012; Alderkamp et al., 2015; Arneborg et al., 2012). 그러나 early January 와 January-February 동안 거대한 식물플랑크톤 bloom 때문에 이용 가능한 철 농도는 결핍될 수 있다 (Boyd et al., 2004; Coale et al., 2003; Gerringa et al., 2012). 큰 식물플랑크톤은 높은 표면 대 부피 비율 때문에 작은 식물플랑크톤에 비해 더 많은 철이 필요하다 (Hudson & Morel, 1990; Sunda and Huntsman, 1995; Timmermans et al., 2001; Hoffmann et al., 2006). 그러므로 큰 식물플랑크톤 군집은 총 탄소 섭취율과 작은 식물플랑크톤 기여도의 시간적 변동성을 조절하는 중요한 역할을 한다. 다시 말해 1월에서 3월로 갈수록 큰 식물플랑크톤의 생산성은 감소했지만 전체 연구 기간 동안 작은 식물플랑크톤은 일정하게 유지되었다 (Fig. 21). 이 결과에 기반 하여 아문젠해에서 작은 식물플랑크톤의 역할이 봄/여름 에서 가을로 넘어갈수록 큰 식물플랑크톤의 성장과 생산을 지원하는 영양염, 빛 조건, 철의 농도가 결핍될 것이기 때문에 더 중요해 질 것으로 사료된다. 또한 작은 식물플랑크톤은 큰 식물플랑크톤 보다 가혹한 조건에서 더 잘 적응할 수 있다 (Boyd, 2002; Boyd et al., 2004; Clarke & Leakey, 1996; Doolittle et al., 2008; Iriarte & Purdie, 1994; Li et al., 2009; Marañón et al., 2012).

본 연구의 모든 정점으로부터 평균한 총 탄소 섭취율에 대한 작은 식물플랑크톤의 기여도와 Lee et al. (2017)의 자료를 비교했다 (Table 2). 본 연구에서 모든 정점에서 chl-a 와 POC 에 대한 작은 식물플랑크톤의 기여도와 평균 총 탄소 섭취율은

Lee et al. (2017)의 결과와 다소 비슷했다. 그러나 non-polynya 지역과 polynya 지역에서 총 chl-a 농도와 총 탄소 섭취율에 대한 작은 식물플랑크톤의 기여도는 Lee et al. (2017)의 연구 결과와 달랐지만 두 연구에서 non-polynya 지역과 polynya 지역에서의 POC 에 대한 작은 식물플랑크톤의 기여도는 상대적으로 비슷했다. 총 탄소 섭취율에 대한 작은 식물플랑크톤의 기여도는 두 연구에서 달랐다. 본 연구에서 Lee et al. (2017)의 결과 보다 non-polynya 지역에서 낮고 polynya 지역에서 높은 작은 플랑크톤의 기여도가 관측되었다. 이 차이는 중 천이와 이전에 연구되었던 식물플랑크톤의 일차생산과 같은 계절적인 영향에 의해 작은 식물플랑크톤의 기여도가 뚜렷한 시간적 (계절적) 변동성에 의해 야기되었을 수 있다 (Alvain et al., 2008; Mongin et al., 2008; Rivkin, 1991; Smith et al., 2000; Sukhanova et al., 2009). 그러므로 아문젠해에서 광합성과 이에 대한 작은 식물플랑크톤 및 큰 식물플랑크톤 기여도의 시간적 변동성은 작은 식물플랑크톤의 기여도를 이끌어낼 때 반드시 고려되어야 한다.



Small phytoplankton contribution as a indicator for environmental changes in the Amundsen Sea

Abstract

The importance of small phytoplankton in warming and stratified water conditions has been emphasized, but little information on the small phytoplankton contribution is currently available in the Southern Ocean. In this study, we analyzed temporal variations in the carbon and nitrogen uptake rates of large and small phytoplankton and the small phytoplankton contributions to the total primary production. The data were collected in the Amundsen Sea polynya region using three different field observations (early January, January - February, and February - March) from 2012 to 2016 and one additional cruise from January - February in 2018. The total primary production in the polynya region decreased from $0.84 \pm 0.18 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ in early January to $0.19 \pm 0.04 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ in February - March, which is typical of the seasonal variation in the primary production of phytoplankton in the Amundsen Sea. In contrast, the small phytoplankton contributions to the total carbon uptake rates increased considerably from early January ($14.9 \pm 8.4\%$) to February - March ($50.8 \pm 18.4\%$) in the polynya region. This substantial increase of small phytoplankton contribution was not caused by increasing biomass and the specific uptake rates of small phytoplankton, but rather by seasonally declining biomass and the specific uptake rates of large phytoplankton during the study period. The overall contribution ($25.5 \pm 15.7\%$) of small phytoplankton to the primary production in the polynya region based on the three different time observations is significantly higher than the previous result ($14.9 \pm 8.4\%$) based on one time observation. The small phytoplankton contribution to total daily nitrate uptake rate was $44.2 \pm 33.3\%$ in the non-polynya region and $63.1 \pm 38\%$ in the polynya region, and the small phytoplankton contribution to total daily ammonium uptake rate was 44.9% and 45.1% in the non-polynya and polynya region, respectively. The small phytoplankton contribution to nitrate and ammonium uptake was not significantly different between the non-polynya and polynya regions. Small phytoplankton contributions to total carbohydrates, proteins and lipids during the 2018 ANA08B cruise were $46.7 \pm 11.1\%$, $43.9 \pm 21.4\%$ and $52.2 \pm 14.7\%$, respectively.

제 4장 연구개발목표 달성도 및 대외 기여도

제 1절. 연구개발목표 및 달성도

성과목표	세부목표		달성 주요 내용	달성도 (%)
1. 작은 식물플랑크톤의 일차생산 기여율 파악	1-1	작은 식물플랑크톤의 일차생산 기여도 파악	<ul style="list-style-type: none"> - 연구 해역에서의 전체 식물플랑크톤의 일차생산 및 작은 식물플랑크톤의 일차생산 추정 - 기여도 파악을 통한 연구 해역 주요 크기 종 파악 	100
	1-2	작은 식물플랑크톤 생체량 파악	<ul style="list-style-type: none"> - POC 분석 및 Chlorophyll-a 분석을 통한 작은 식물플랑크톤의 생체량 파악 	100
2. 작은 식물플랑크톤의 신생산 및 재생산 기여율 산정	2-1	작은 식물플랑크톤 신생산 및 재생산 추정	<ul style="list-style-type: none"> - 신생산 및 재생산 추정 - 신생산 및 재생산 특징 파악을 통한 연구 해역 생태계 특성 파악 	100
	2-2	신생산 및 재생산에서의 작은 식물플랑크톤 기여율 산정	<ul style="list-style-type: none"> - 전체 신생산, 재생산에서의 작은 식물플랑크톤 기여율 산정 	100
3. 크기별 식물플랑크톤의 거대분자 조성 비교	3-1	연구 해역에서의 크기별 식물플랑크톤의 체내 조성 비교	<ul style="list-style-type: none"> - 연구해역 크기별 식물플랑크톤 체내 조성 분석 - 작은 식물플랑크톤의 거대분자 분석 	100

제 2절. 관련분야에의 기여도

1.해빙/해양 생물연구 분야

가. 아문젠 해역의 작은 식물플랑크톤의 일차생산, 신생산, 재생산과 환경요인 사이의 상관관계 파악을 통해, 현재의 기후변화에 따른 환경변화가 남극 해양 생태계에 미치는 영향 예측

나. 식물플랑크톤의 크기별 신생산 및 재생산 측정을 통해 남극해에서 biological pump에 의해 제거되는 탄소량의 변동성에 대한 연구 수행 가능

다. 일차생산자의 체내조성 분석을 통해 해빙/해양 환경요인과 일차생산자의 생리상태 및 food quality 사이의 상관관계를 파악하고, 상위영양단계에 미칠 영향 예측

라. 수온이 상승하고 성층화가 진행됨에 따라 작은 식물플랑크톤의 중요성이 커지고 있으므로 크기에 따른 일차생산자의 체내조성 분석은 기후변화로 인한 먹이 질의 변화에 대한 예측 가능

마. 아문젠 해역에서 얻은 chl-a, 일차생산, 신생산 및 재생산 실측 자료는 인공위성을 이용한 원격 탐사 연구 시 calibration 자료로써 사용 가능

제 5장 연구개발결과의 활용 계획

제 1절. 학술적 파급 효과

1. 남극해에서 중요 일차 생산자인 식물플랑크톤의 생태학적, 생리학적인 연구는 앞으로의 남극 기후변동에 따라 해양 food-web에 미치는 영양학적인 평가를 위한 새로운 시도로써, 앞으로의 활용 방안은 다양함
2. 해양의 중요 일차 생산자인 식물플랑크톤의 탄소/질소 섭취율 연구는 앞으로의 남극 기후변동에 따라 탄소 저장고로서의 능력 평가의 기초가 되므로, 활용 방안이 다양함
3. 남극의 해양환경이 빠르게 변함에 따라 크기가 작은 식물 플랑크톤의 기여도가 어떻게 바뀔 지를 예측함으로써 향후 환경변화에 따른 남극 해양 생태계 영향을 파악할 수 있음
4. 작은 식물플랑크톤의 기여도와 총 일차생산량 사이의 상관관계 연구를 통해 앞으로의 환경변화에 따른 해양의 일차생산량 변동 유추 가능
5. 남극해에서 식물플랑크톤의 신생산과 재생산 현장 관측 자료의 생산으로 국제적으로 활발히 진행되고 있는 인공위성을 활용한 모델링에 보정 자료로써 활용 가치가 높음
6. 식물플랑크톤의 크기별 탄소 및 질소 섭취율을 평가함으로써 식물플랑크톤을 환경변화 지시자로 활용하는데 있어 앞으로의 활용방안이 아주 높을 것임
7. 해빙주변 미세조류의 여러 종류 단백질 조성과 환경적인 요소와의 상관관계분석 후 특정 환경에서 형성되는 특이 단백질 구성성분을 식물플랑크톤의 생리적인 상태 구분의 bio-marker로써 개발

제 2절. 경제적 파급 효과

1. 아문젠해에서 단백질 조성의 계절적인 변화에 대한 데이터베이스를 구축하여 관련 분야 연구에 기여할 수 있으며 다른 연구에 이용할 수 있다는 가능성 제시할 수 있음
2. 지금까지 잘 이용되지 않은 새로운 연구기법을 도입함으로써 유사분야의 연구를 활성화 시킬 수 있을 것으로 기대됨
3. 생산성이 뛰어난 식물플랑크톤의 광합성 기작을 연구하여 관련 분야에 적용가능 및 해양산업의 육성
4. 남극해 장기해양연구수행에 대한 국제적 활동을 통해 장기적인 극지해 해양생태

- 계 연구의 국제적 흐름에 동참하여 차세대 해양강국으로 도약 가능
5. 수치 모델을 이용한 해빙 분포 및 해양 환경 변화에 대한 예측 연구는 급격한 기후변화에 대한 과학적인 대처를 가능하게 해준다는 점에서 장기적인 관점에서 경제적 파급효과가 있을 것으로 기대
 6. 국제적 기후변화협약과 관련한 과학적 기초자료 제공 및 대응방안을 모색하는데 활용
 7. 지구온난화로 인한 기후변화 모니터링 및 극지의 환경변화를 연구하는데 중요한 자료로써 활용
 8. 극지에 대한 시공간적 자료 축적으로 공공의 과학적 활용이 증대
 9. 앞으로 발사 인공위성들의 잠재적 수요분야를 창출
 10. 수치 모델에 활용 가능한 환경 변수들을 제공함으로써 수치모델의 연구 활성화를 일으킬 수 있을 것으로 예측가능하며, 이는 급격한 기후변화에 대한 과학적인 대처를 가능하게 함으로 장기적인 관점에서 경제적 파급효과가 기대됨
 11. 미개척 분야인 방대한 극지 해역에 대한 현장 조사를 수행하는 데는 많은 비용이 소요되지만, 인공위성을 이용하여 관련정보 획득한다면 많은 비용을 절감



제 6장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

제 1절. 남극해 연구 현황

1. 서남극해 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 wam-humid sub-Antarctic-type으로의 변함에 따라 해양 생물 생산성 차후의 변화를 일으킬 것으로 제시됨.
4. 빙붕이 빠른 속도로 녹고 있는 아문젠해의 기후변동에 따른 환경변화에 관한 정보는 거의 없음.
5. 위성 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 로스해 polynya 지역과 marginal ice zone 지역에서 작은 식물플랑크톤의 chl-a와 일일 탄소 섭취율 기여도에 대한 연구가 이루어짐
3. 해빙수의 유입이 증가가 규조류에서 크기가 작은 지중식물이 우점하는 환경으로 변화하는 것을 발견했고, 이는 상위 영양단계의 변화와 먹이 그물의 변화를 일으킬 것임
4. 해양환경이 온난해짐에 따라 작은 식물플랑크톤의 중요성이 증가할 것으로 예상
5. 북극 Canada basin 지역에서 성층화 강화와 영양염 공급 감소에 따라 작은 식물플랑크톤이 증가하는 것을 발견함.
6. 따뜻하고 영양염이 부족한 해양환경에서는 picophytoplankton이 상대적으로 우점한다는 것을 발견함
7. 여러 해역에서 작은 식물플랑크톤의 암모늄 선호현상이 발견됨.

제 7장 참고문헌

- Agawin, N. S., Agustí, S., & Duarte, C. M. (2002). Abundance of Antarctic picophytoplankton and their response to light and nutrient manipulation. *Aquatic Microbial Ecology*, 29(2), 161-172.
- Agawin, N. S., Duarte, C. M., & Agustí, S. (2000). Nutrient and temperature control of the contribution of picoplankton to phytoplankton biomass and production. *Limnology and Oceanography*, 45(3), 591-600.
- Alderkamp, A.-C., Mills, M. M., van Dijken, G. L., Laan, P., Thuróczy, C.-E., Gerringa, L. J., . . . Buma, A. G. (2012). Iron from melting glaciers fuels phytoplankton blooms in the Amundsen Sea (Southern Ocean): Phytoplankton characteristics and productivity. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 71, 32-48.
- Alderkamp, A.-C., van Dijken, G. L., Lowry, K. E., Connelly, T. L., Lagerström, M., Sherrell, R. M., . . . Stammerjohn, S. E. (2015). Fe availability drives phytoplankton photosynthesis rates during spring bloom in the Amundsen Sea Polynya, Antarctica. *Elem Sci Anth*, 3.
- Alvain, S., Moulin, C., Dandonneau, Y., & Loisel, H. (2008). Seasonal distribution and succession of dominant phytoplankton groups in the global ocean: A satellite view. *Global Biogeochemical Cycles*, 22(3).
- Arneborg, L., Wåhlin, A., Björk, G., Liljebladh, B., & Orsi, A. (2012). Persistent inflow of warm water onto the central Amundsen shelf. *Nature Geoscience*, 5(12), 876.
- Arrigo, K. R., Lowry, K. E., & van Dijken, G. L. (2012). Annual changes in sea ice and phytoplankton in polynyas of the Amundsen Sea, Antarctica. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 71, 5-15.
- Arrigo, K. R., Robinson, D. H., Worthen, D. L., Dunbar, R. B., DiTullio, G. R., VanWoert, M., & Lizotte, M. P. (1999). Phytoplankton community structure and the drawdown of nutrients and CO₂ in the Southern

- Ocean. Science, 283(5400), 365-367.
- Arrigo, K. R., & Van Dijken, G. L. (2003). Phytoplankton dynamics within 37 Antarctic coastal polynya systems. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 108(C8).
- Baumann, M., Lancelot, C., Brandini, F., Sakshaug, E., & John, D. (1994). The taxonomic identity of the cosmopolitan prymnesiophyte *Phaeocystis*: a morphological and ecophysiological approach. *Journal of Marine Systems*, 5(1), 5-22.
- Becquevort, S., Lancelot, C., & Schoemann, V. (2007). The role of iron in the bacterial degradation of organic matter derived from *Phaeocystis antarctica*. *Biogeochemistry*, 83(1-3), 119-135.
- Bell, D., & McDermott, B. J. (2000). Contribution of de novo protein synthesis to the hypertrophic effect of IGF-1 but not of thyroid hormones in adult ventricular cardiomyocytes. *Molecular and cellular biochemistry*, 206(1-2), 113-124.
- Boyd, P. W. (2002). Environmental factors controlling phytoplankton processes in the Southern Ocean. *Journal of Phycology*, 38(5), 844-861.
- Boyd, P. W., Law, C. S., Wong, C., Nojiri, Y., Tsuda, A., Levasseur, M., . . . Strzepek, R. (2004). The decline and fate of an iron-induced subarctic phytoplankton bloom. *Nature*, 428(6982), 549.
- Boyd, P. W., Watson, A. J., Law, C. S., Abraham, E. R., Trull, T., Murdoch, R., . . . Chang, H. (2000). A mesoscale phytoplankton bloom in the polar Southern Ocean stimulated by iron fertilization. *Nature*, 407(6805), 695.
- Carrick, H. J., & Schelske, C. L. (1997). Have we overlooked the importance of small phytoplankton in productive waters? *Limnology and Oceanography*, 42(7), 1613-1621.
- Clarke, A., & Leakey, R. J. (1996). The seasonal cycle of phytoplankton, macronutrients, and the microbial community in a nearshore Antarctic marine ecosystem. *Limnology and Oceanography*, 41(6), 1281-1294.

- Coale, K. H., Wang, X., Tanner, S. J., & Johnson, K. S. (2003). Phytoplankton growth and biological response to iron and zinc addition in the Ross Sea and Antarctic Circumpolar Current along 170 W. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 50(3-4), 635-653.
- Criscitiello, A. S., Das, S. B., Evans, M. J., Frey, K. E., Conway, H., Joughin, I., . . . Steig, E. J. (2013). Ice sheet record of recent sea ice behavior and polynya variability in the Amundsen Sea, West Antarctica. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 118(1), 118-130.
- Doolittle, D. F., Li, W. K., & Wood, A. M. (2008). Wintertime abundance of picoplankton in the Atlantic sector of the Southern Ocean. *Nova Hedwigia*, 133, 147-160.
- Dortch, Q. (1990). The interaction between ammonium and nitrate uptake in phytoplankton. *Marine Ecology Progress Series*, 183-201.
- Dugdale, R., & Goering, J. (1967). Uptake of new and regenerated forms of nitrogen in primary productivity. *Limnology and Oceanography*, 12(2), 196-206.
- Dugdale, R. C., Wilkerson, F. P., Hogue, V. E., & Marchi, A. (2007). The role of ammonium and nitrate in spring bloom development in San Francisco Bay. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 73(1-2), 17-29.
- Fragoso, G. M., & Smith Jr, W. O. (2012). Influence of hydrography on phytoplankton distribution in the Amundsen and Ross Seas, Antarctica. *Journal of Marine Systems*, 89(1), 19-29.
- Gerringa, L. J., Alderkamp, A.-C., Laan, P., Thuroczy, C.-E., De Baar, H. J., Mills, M. M., . . . Arrigo, K. R. (2012). Iron from melting glaciers fuels the phytoplankton blooms in Amundsen Sea (Southern Ocean): Iron biogeochemistry. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 71, 16-31.
- Glibert, P. (1982). Regional studies of daily, seasonal and size fraction variability in ammonium remineralization. *Marine Biology*, 70(2),

209–222.

- Goeyens, L., Tréguer, P., Baumann, M., Baeyens, W., & Dehairs, F. (1995). The leading role of ammonium in the nitrogen uptake regime of Southern Ocean marginal ice zones. *Journal of Marine Systems*, 6(4), 345–361.
- Goffart, A., Catalano, G., & Hecq, J.-H. (2000). Factors controlling the distribution of diatoms and *Phaeocystis* in the Ross Sea. *Journal of Marine Systems*, 27(1–3), 161–175.
- Corbisier, T.N., Petti, M.A.V., Skowronski, R.S. P., Brito, T.A.S. (2004). Trophic relationships in the nearshore zone of Martel Inlet (King George Island, Antarctica): $\delta^{13}\text{C}$ stable-isotope analysis. *Polar Biology*, 27(2), 75–82.
- Hoffmann, L. J., Peeken, I., Lochte, K., Assmy, P., & Veldhuis, M. (2006). Different reactions of Southern Ocean phytoplankton size classes to iron fertilization. *Limnology and Oceanography*, 51(3), 1217–1229.
- Holm-Hansen, O., & Huntley, M. (1984). Feeding requirements of krill in relation to food sources. *Journal of Crustacean Biology*, 4(5), 156–173.
- Hudson, R. J., & Morel, F. M. (1990). Iron transport in marine phytoplankton: Kinetics of cellular and medium coordination reactions. *Limnology and Oceanography*, 35(5), 1002–1020.
- Iriarte, A., & Purdie, D. A. (1994). Size distribution of chlorophyll a biomass and primary production in a temperate estuary (Southampton Water): the contribution of photosynthetic picoplankton. *Marine Ecology Progress Series*, 283–297.
- Jacobs, S., Giulivi, C., Dutrieux, P., Rignot, E., Nitsche, F., & Mouginit, J. (2013). Getz Ice Shelf melting response to changes in ocean forcing. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 118(9), 4152–4168.
- Jacobs, S. S., & Comiso, J. C. (1997). Climate variability in the Amundsen and Bellingshausen Seas. *Journal of Climate*, 10(4), 697–709.
- Kendall, C., Silva, S. R., & Kelly, V. J. (2001). Carbon and nitrogen

- isotopic compositions of particulate organic matter in four large river systems across the United States. *Hydrological processes*, 15(7), 1301-1346.
- Kim, B. K., Joo, H., Song, H. J., Yang, E. J., Lee, S. H., Hahm, D., . . . Lee, S. H. (2015). Large seasonal variation in phytoplankton production in the Amundsen Sea. *Polar Biology*, 38(3), 319-331.
- Kim, B. K., Lee, J. H., Joo, H., Song, H. J., Yang, E. J., Lee, S. H., & Lee, S. H. (2016). Macromolecular compositions of phytoplankton in the Amundsen Sea, Antarctica. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 123, 42-49.
- Kim, B. K., Lee, S., Ha, S. Y., Jung, J., Kim, T. W., Yang, E. 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(2), 1393-1405.
- Koike, I., Holm-Hansen, O., & Biggs, D. C. (1986). Inorganic nitrogen metabolism by Antarctic phytoplankton with special reference to ammonium cycling. *Marine Ecology Progress Series*, 105-116.
- Lee, S. H., Kim, B. K., Lim, Y. J., Joo, H., Kang, J. J., Lee, D., . . . Lee, S. H. (2017). Small phytoplankton contribution to the standing stocks and the total primary production in the Amundsen Sea. *Biogeosciences*, 14(15), 3705.
- Lee, S. H., Kim, B. K., Yun, M. S., Joo, H., Yang, E. J., Kim, Y. N., . . . Lee, S. (2012). Spatial distribution of phytoplankton productivity in the Amundsen Sea, Antarctica. *Polar Biology*, 35(11), 1721-1733.
- Lee, S. H., Yun, M. S., Kim, B. K., Joo, H., Kang, S.-H., Kang, C. K., & Whitley, T. E. (2013). Contribution of small phytoplankton to total primary production in the Chukchi Sea. *Continental Shelf Research*, 68, 43-50.
- Lee, Y., Yang, E. J., Park, J., Jung, J., Kim, T. W., & Lee, S. (2016).

- Physical-biological coupling in the Amundsen Sea, Antarctica: Influence of physical factors on phytoplankton community structure and biomass. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 117, 51-60.
- Li, W. K., McLaughlin, F. A., Lovejoy, C., & Carmack, E. C. (2009). Smallest algae thrive as the Arctic Ocean freshens. *Science*, 326(5952), 539-539.
- Maranón, E., Cermenó, P., Latasa, M., & Tandonlécé, R. D. (2012). Temperature, resources, and phytoplankton size structure in the ocean. *Limnology and Oceanography*, 57(5), 1266-1278.
- Marañón, E., Holligan, P. M., Barciela, R., González, N., Mouriño, B., Pazó, M. J., & Varela, M. (2001). Patterns of phytoplankton size structure and productivity in contrasting open-ocean environments. *Marine Ecology Progress Series*, 216, 43-56.
- Mathot, S., Smith, W. O., Carlson, C. A., Garrison, D. L., Gowing, M. M., & Vickers, C. L. (2000). Carbon partitioning within *Phaeocystis antarctica* (Prymnesiophyceae) colonies in the Ross Sea, Antarctica. *Journal of Phycology*, 36(6), 1049-1056.
- Matrai, P., Vernet, M., Hood, R., Jennings, A., Brody, E., & Saemundsdottir, S. (1995). Light-dependence of carbon and sulfur production by polar clones of the genus *Phaeocystis*. *Marine Biology*, 124(1), 157-167.
- Meredith, M. P., Ducklow, H. W., Schofield, O., Wahlin, A., Newman, L., & Lee, S. (2016). The interdisciplinary marine system of the Amundsen Sea, Southern Ocean: Recent advances and the need for sustained observations. *Deep Sea Research II*, 123, 1-6.
- Mills, M. M., Alderkamp, A.-C., Thuróczy, C.-E., van Dijken, G. L., Laan, P., de Baar, H. J., & Arrigo, K. R. (2012). Phytoplankton biomass and pigment responses to Fe amendments in the Pine Island and Amundsen polynyas. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 71, 61-76.

- Moline, M. A., Claustre, H., Frazer, T. K., Schofield, O., & Vernet, M. (2004). Alteration of the food web along the Antarctic Peninsula in response to a regional warming trend. *Global Change Biology*, 10(12), 1973-1980.
- Mongin, M., Molina, E., & Trull, T. W. (2008). Seasonality and scale of the Kerguelen plateau phytoplankton bloom: A remote sensing and modeling analysis of the influence of natural iron fertilization in the Southern Ocean. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 55(5-7), 880-892.
- Montes-Hugo, M., Doney, S. C., Ducklow, H. W., Fraser, W., Martinson, D., Stammerjohn, S. E., & Schofield, O. (2009). Recent changes in phytoplankton communities associated with rapid regional climate change along the western Antarctic Peninsula. *Science*, 323(5920), 1470-1473.
- Morán, X. A. G., LÓPEZ URRUTIA, Á., CALVO DÍAZ, A., & Li, W. K. (2010). Increasing importance of small phytoplankton in a warmer ocean. *Global Change Biology*, 16(3), 1137-1144.
- Owens, N., Priddle, J., & Whitehouse, M. (1991). Variations in phytoplanktonic nitrogen assimilation around South Georgia and in the Bransfield Strait (Southern Ocean). *Marine Chemistry*, 35(1-4), 287-304.
- Park, J., Kuzminov, F. I., Bailleul, B., Yang, E. J., Lee, S., Falkowski, P. G., & Gorbunov, M. Y. (2017). Light availability rather than Fe controls the magnitude of massive phytoplankton bloom in the Amundsen Sea polynyas, Antarctica. *Limnology and Oceanography*, 62(5), 2260-2276.
- Parsons, T. R., Maita, Y., & Lalli, C. M. (1984). *A Manual of Chemical and Biological Methods for Seawater Analysis*. Pergamon Press, Oxford, 173 pp.
- Petrou, K., Kranz, S. A., Trimborn, S., Hassler, C. S., Ameijeiras, S. B., Sackett, O., . . . Davidson, A. T. (2016). Southern Ocean phytoplankton physiology in a changing climate. *Journal of plant physiology*, 203,

135-150.

- Pritchard, H., Ligtenberg, S., Fricker, H., Vaughan, D., Van den Broeke, M., & Padman, L. (2012). Antarctic ice-sheet loss driven by basal melting of ice shelves. *Nature*, 484(7395), 502.
- Probyn, T. (1985). Nitrogen uptake by size-fractionated phytoplankton populations in the southern Benguela upwelling system. *Marine Ecology Progress Series*, 249-258.
- Probyn, T., & Painting, S. (1985). Nitrogen uptake by size fractionated phytoplankton populations in Antarctic surface waters. *Limnology and Oceanography*, 30(6), 1327-1332.
- Rignot, E., Bamber, J. L., Van Den Broeke, M. R., Davis, C., Li, Y., Van De Berg, W. J., & Van Meijgaard, E. (2008). Recent Antarctic ice mass loss from radar interferometry and regional climate modelling. *Nature Geoscience*, 1(2), 106.
- Rivkin, R. B. (1991). Seasonal patterns of planktonic production in McMurdo Sound, Antarctica. *American Zoologist*, 31(1), 5-16.
- Rose, J., Feng, Y., DiTullio, G. R., Dunbar, R. B., Hare, C., Lee, P. A., . . . Sohst, B. (2009). Synergistic effects of iron and temperature on Antarctic phytoplankton and microzooplankton assemblages. *Biogeosciences*, 6(12).
- Schmidtko, S., Heywood, K. J., Thompson, A. F., & Aoki, S. (2014). Multidecadal warming of Antarctic waters. *Science*, 346(6214), 1227-1231.
- Sedwick, P., Garcia, N., Riseman, S., Marsay, C., & DiTullio, G. (2007). Evidence for high iron requirements of colonial *Phaeocystis antarctica* at low irradiance. *Biogeochemistry*, 83(1-3), 83-97.
- Smith Jr, W. O., & Asper, V. L. (2001). The influence of phytoplankton assemblage composition on biogeochemical characteristics and cycles in the southern Ross Sea, Antarctica. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 48(1), 137-161.

- Smith Jr, W. O., Dennett, M. R., Mathot, S., & Caron, D. A. (2003). The temporal dynamics of the flagellated and colonial stages of *Phaeocystis antarctica* in the Ross Sea. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 50(3-4), 605-617.
- Smith Jr, W. O., Marra, J., Hiscock, M. R., & Barber, R. T. (2000). The seasonal cycle of phytoplankton biomass and primary productivity in the Ross Sea, Antarctica. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 47(15-16), 3119-3140.
- Stammerjohn, S., Maksym, T., Massom, R., Lowry, K., Arrigo, K., Yuan, X., . . . Yager, P. (2015). Seasonal sea ice changes in the Amundsen Sea, Antarctica, over the period of 1979 - 2014. *Elem Sci Anth*, 3.
- Stammerjohn, S., Massom, R., Rind, D., & Martinson, D. (2012). Regions of rapid sea ice change: An inter hemispheric seasonal comparison. *Geophysical Research Letters*, 39(6).
- Stolte, W., & Riegman, R. (1995). Effect of phytoplankton cell size on transient-state nitrate and ammonium uptake kinetics. *Microbiology*, 141(5), 1221-1229.
- Sukhanova, I. N., Flint, M. V., Pautova, L. A., Stockwell, D. A., Grebmeier, J. M., & Sergeeva, V. M. (2009). Phytoplankton of the western Arctic in the spring and summer of 2002: Structure and seasonal changes. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 56(17), 1223-1236.
- Sunda, W. G., & Huntsman, S. A. (1997). Interrelated influence of iron, light and cell size on marine phytoplankton growth. *Nature*, 390(6658), 389.
- Thompson, D. W., & Solomon, S. (2002). Interpretation of recent Southern Hemisphere climate change. *Science*, 296(5569), 895-899.
- Thuróczy, C.-E., Alderkamp, A.-C., Laan, P., Gerringa, L. J., Mills, M. M., Van Dijken, G. L., . . . Arrigo, K. R. (2012). Key role of organic complexation of iron in sustaining phytoplankton blooms in the Pine

- Island and Amundsen Polynyas (Southern Ocean). *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 71, 49–60.
- Timmermans, K. R., Gerringa, L. J., De Baar, H. J., Van Der Wagt, B., Veldhuis, M. J., de Jong, J., . . . Boye, M. (2001). Growth rates of large and small Southern Ocean diatoms in relation to availability of iron in natural seawater. *Limnology and Oceanography*, 46(2), 260–266.
- Wada, E., Terazaki, M., Kabaya, Y., Nemoto, T. (1987). ^{15}N and ^{13}C abundances in the Antarctic Ocean with emphasis on the biogeochemical structure of the food web. *Deep-Sea Research*, 34(5–6), 829–841.
- Wright, S. W., Ishikawa, A., Marchant, H. J., Davidson, A. T., van den Enden, R. L., & Nash, G. V. (2009). Composition and significance of picophytoplankton in Antarctic waters. *Polar Biology*, 32(5), 797–808.
- Yager, P. L., Sherrell, R. M., Stammerjohn, S. E., Alderkamp, A. C., Schofield, O., Abrahamsen, E. P., ... & Lowry, K. E. (2012). ASPIRE: the Amundsen Sea Polynya international research expedition. *Oceanography*, 25(3), 40–53.

극지연구소

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.