TSPP16020-054-12

결빙해역 식물플랑크톤 신생산성과 생리상태 연구

New production and physiological status of phytoplankton in sea ice zone in 2016

KOPRI 극지연구소

부산대학교

제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 "온난화 관측 모델 시스템으로 서남극 아문젠해 해빙역 연구" 과제의 위탁연구 "결빙해역 식물플랑크톤 생리상태 연구" 과제의 최종보고서로 제출합니다.

2017. 1 .

(본과제) 총괄연구책임자 : 이 상 훈

위탁연구기관명 : 부산대학교 산학협력단

위탁연구책임자 : 이 상 헌

위탁참여연구원 : 주 희 태
" : 안 소 현
" : 김 예 원

보고서 초록

위탁연구과제명	결빙해역 식물플랑크톤 생리상태 연구				
위탁연구책임자	이상헌	해당단계 참여연구원 수	3명	해당단계 연구비	60,000,000원
연구기관명 및 소속부서명	부산대학교 해양학과		참여기업명		
국제공동연구	상대국명 :		상대국연구기관명 :		
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자이내)				보고서 면수	

- 해양환경이 변함에 따라 식물플랑크톤 군집 내 작은 식물플랑크톤이 더 중요할 것이라 기대됨
- 하지만 아문젠해에서 전체 식물플랑크톤에 대한 작은 식물플랑크톤 기여도는 거의 알려진 바가 없음
- 2014.01.01.-01.15 기간 동안 아문젠해에서 탄소/질소 섭취율 실험을 실시함
- non-polynya 지역과 polynya 지역의 전체 식물플랑크톤의 평균 일일 탄소 섭취율은 각각 0.42 g C m^{-2} d^{-1} (S.D. = ± 0.30 g C m^{-2} d^{-1})와 0.84 g C m^{-2} d^{-1} (S.D. = ± 0.18 g C m^{-2} d^{-1})이었고, 전체 식물플랑크톤의 일일 질소 (질산염, 암모늄) 섭취율은 각각 0.12 g N m^{-2} d^{-1}(S.D. = ± 0.09 g N m^{-2} d^{-1}) and 0.21 g N m^{-2} d^{-1} (S.D. = ± 0.11 g N m^{-2} d^{-1})이었음
- 작은 식물플랑크톤의 탄소/질소 섭취율은 각각 26.9 %, 27.7%로 chlorophyll-a 기여도(19.4%)보다 높았음
- chlorophyll-a와 일차생산량에 대한 작은 식물플랑크톤 기여도는 non-polynya 지역에서 42.4%, 50.8%이고 polynya 지역에서 7.9 %, 14.9 % 이었음
- 작은 식물플랑크톤의 기여도와 전체 식물플랑크톤 일일 일차생산량 사이에 강한 음의 상관관계 (r^2 = 0.790, $p < 0.05$)를 볼 수 있음
- 이는 주로 크기가 큰 식물플랑크톤에 비해 작은 크기의 식물플랑크톤의 탄소 섭취율이 더 낮기 때문
- 지속적인 환경변화가 아문젠해의 작은 식물플랑크톤 기여도를 증가시킬 수도 있음

색 인 어 (각 5개 이상)	한 글	식물플랑크톤, 일차생산, 폴리냐, 아문젠해, 작은 식물플랑크톤 기여도
	영 어	Phytoplankton, Primary production, Polynya, Amundsen Sea, Small phytoplankton contribution

요 약 문

Ⅰ. 제 목

2016년 결빙해역 식물플랑크톤의 신생산성과 생리상태 연구

Ⅱ. 연구개발의 목적 및 필요성

- 남극해에서 식물플랑크톤은 해양 생태계에서 기초가 되는 주요 일차생산자로 기후변화가 식물플랑크톤에 미치는 영향을 이해하는 것이 필요함
- 식물플랑크톤의 생태학적, 생리학적인 연구를 통해 남극해의 기후변동에 따라 해양 먹이그물에 미치는 영향을 파악 및 평가

Ⅲ. 연구개발의 내용 및 범위

- 서남극해 결빙해역에서의 식물플랑크톤의 생체량과 해양 환경 파악
- 서남극해에서 polynya 지역과 non-polynya 지역에서의 크기에 따른 식물플랑크톤의 탄소와 질소 섭취율을 통한 일차생산성 측정
- 서남극해 결빙해역에서 크기가 작은 식물플랑크톤의 기여도 파악

Ⅳ. 연구개발결과

- 서남극해 결빙해역에서 탄소/질소 섭취율의 경우, polynya 지역(0.84 ± 0.18 g C m-2 d-1; 0.21 ± 0.11 g N m-2 d-1)이 non-polynya 지역(0.42 ± 0.30 g C m-2 d-1; 0.12 ± 0.09 g N m-2 d-1)보다 높은 결과값을 보였음
- chlorophyll-a와 일차생산량에 대한 작은 식물플랑크톤 기여도는 non-polynya 지역에서 42.4%, 50.8%이고 polynya 지역에서 7.9 %, 14.9 % 이었음
- 작은 식물플랑크톤의 기여도와 전체 식물플랑크톤 일일 일차생산량 사이에 강한 음의 상관관계 (r2 = 0.790, $p < 0.05$)를 볼 수 있음

KOPRI 극지연구소

Ⅴ. 연구개발결과의 활용계획

- 급속 융빙해역에서 탄소/질소 섭취율 연구를 통해 환경 변화에 따른 해양의 일차생산량 변동 유추 가능
- 크기에 따른 식물플랑크톤의 특성 파악을 통해 환경변화의 지시자로 이용가능

S U M M A R Y

I. Title

New production and physiological status of phytoplankton in sea ice zone in 2016

II. Purpose and Necessity of R&D

- To understand effect of climate change on phytoplankton as a primary producer of marine ecosystem in Antarctica
- To assess change of marine foodweb caused by climate change through ecological and physiological studying in the Amundsen Sea, Antarctica

III. Contents and Extent of R&D

- The analysis of biomass of phytoplankton and environmental parameters in the western Antarctica
- Measurement of carbon and nitrogen uptake rates of size-fractionated phytoplankton in polynya and non-polynya areas
- Estimation of small phytoplankton contributions in the western Antarctica

IV. R&D Results

- The daily carbon/nirtrogen uptake rates of total phytoplankton were higher in polynya region (0.84 ± 0.18 g C m-2 d-1; 0.21 ± 0.11 g N m-2 d-1) than non-polynya region (0.42 ± 0.30 g C m-2 d-1; 0.12 ± 0.09 g N m-2 d-1).
- The contributions of chlorophyll-a concentration and primary production of small

KOPRI 극지연구소

phytoplankton were 42.4 % and 50.8 % in non-polynya region whereas 7.9 % and 14.9 % in polynya region.

- A strong negative correlation (r2 = 0.790, $p < 0.05$) was found between the contributions of small phytoplankton and the total daily primary production of phytoplankton.

V. Application Plans of R&D Results

- To predict variations of primary production caused by climate chanages through carbon/nitrogen uptake rates in the rapid melting seas

- To develop a indicator which represents environmental changes through studying characteristics of size-fractionated phytoplankton

CONTENTS

Summary (Korean) iii

Summary (English) v

Contents (English) vii

List of Tables and Figures viii

Contents (Korean) ix

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 23

Chapter V. Future Directions 26

Chapter VI. International Science-Technology Informations 27

Chapter VII. Reference 28

KOPRI 극지연구소

List of Tables and Figures

Table 1 . Contributions (%) of chlorophyll-a, POC, PON, and carbon and nitrogen uptake rates of small phytoplankton.

Figure 1. Sampling locations in the Amundsen Sea. Red closed circles represent productivity stations. Sea ice concentration data during the cruise period from Nimbus-7 SMMR and DMSP SSM/ISSMIS Passive Microwave data provided by National Snow & Ice Data Center.

Figure 2. Water column-integrated chlorophyll-a concentration at the productivity stations in the Amundsen Sea.

Figure 3. Water column-integrated concentrations of POC and PON of small and large phytoplankton.

Figure 4. Water column-integrated daily carbon uptake rates of small and large phytoplankton.

Figure 5. Water column-integrated daily nitrate uptake rates of small and large phytoplankton.

Figure 6. Water column-integrated daily ammonium uptake rates of small and large phytoplankton.

Figure 7. Relationship between productivity contributions of small phytoplankton and the total daily carbon uptake rates of phytoplankton (large + small). The total daily carbon uptake rates were transformed into natural logs for a linear regression.

목 차

국문 요약 ····· iii

영문 요약 ····· v

영문 목차 ····· vii

표 · 그림 목차 ····· viii

국문 목차 ····· ix

제 1 장 서론 ····· 1

제 2 장 국내외 기술 개발 현황 ····· 3

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과 ····· 5

제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도 ····· 23

제 5 장 연구개발결과의 활용 계획 ····· 26

제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보 ····· 27

제 7 장 참고문헌 ····· 28

KOPRI 극지연구소

제 1 장 서론

제1절. 연구개발의 목적

남극해에서 해양 먹이그물의 기초가 되는 식물플랑크톤은 크기에 따라 다른 특성을 가지기 때문에 상위 영양단계에 다른 영향을 미침으로서 해양 생태계 변화를 지시할 수 있고 또한 일으킬 수도 있다. 최근 몇 십년간 급격한 기후변화는 서남극반도의 해양 생태계에 많은 영향을 주었고, 이에 따라 남극해에서 작은 크기의 식물플랑크톤의 중요성이 커질 것이라 예상됨에 따라 남극 해양 생태계가 어떻게 변화할 지에 대한 연구가 필요하다. 이를 위해서 일차생산에 대한 작은 식물플랑크톤의 기여도 연구를 통해 기후변동이 남극 해양 생태계에 어떤 영향을 미치는 지 현상태를 파악하고 미래를 예측하는 것이 중요하다. 따라서 전 세계적인 관심을 받고 있는 급속 융빙 해역의 환경변화에 따른 크기별 식물플랑크톤의 생체량과 일차생산의 측정은 향후 기후변화에 따른 남극해 해빙/해양 생태계 영향 파악 및 예측에 중요한 과학적 근거를 제시할 수 있을 것이라 사료된다.

제2절. 연구개발의 필요성

남극은 대기로 방출된 많은 양의 이산화탄소를 저층으로 보내 저장하는 탄소 저장고로서의 능력과 남극저층수의 형성 등 전 지구적인 물질 순환에 매우 중요한 역할을 하는 지역이다. 하지만 최근 지구온난화 및 기후변화로 인한 남극 해양 환경의 다양한 변화들이 관측되고 있다. 특히 서 남극해에서는 빙하와 빙상의 질량 감소 등 해빙/빙하의 시·공간적 분포에 많은 변화가 일어나고 있다. 이로 인해 전 세계적으로 인공위성 자료를 이용한 연구는 활발히 이루어지고 있지만, 날씨나 기후 등 여러 요인에 의한 접근의 제한성 때문에 현장관측을 통한 연구는 미비한 실정이다. 따라서 쇄빙연구선 아라온호를 이용하여 국내외 협력기반 구축뿐 아니라 현장관측을 통한 중요한 자료를 수집할 수 있을 것이라 예상된다.

1. 기술적 측면에서의 연구개발 중요성

가. 주요 해양/해빙 이화학적 환경 변수의 연속관측 기술 개발
나. 남극해 해양/해빙 생태계 특성을 묘사하는 다양한 지표 개발

다. 남극해 해빙 변동에 따른 해양/해빙 생태계 변화 예측 모델 개발 기초 자료 제공

2. 경제 산업적 측면에서의 연구개발 중요성

가. 남극해 연구에 쇄빙연구선 아라온호의 효율적 활용
나. 국제 수준의 극지연구 수행을 통한 국가 위상 증대
다. 광역 해양/해빙 생태계 연구를 위한 전문 인력 양성과 배출

3. 환경적 측면에서의 연구개발 중요성

가. 기후변화에 따른 남극 해양/해빙 생태계 변화 파악 및 예측 가능
나. 지구시스템 유지를 위한 남극해 역할 강조
다. 온실가스 저감을 위한 탄소 저장고 능력 파악 및 이를 위한 기초 자료 제공

KOPRI 극지연구소

제 2 장 국내외 기술개발 현황

제1절. 국내 기술개발 현황

1. 쇄빙연구선 아라온호 도입으로 2010년부터 독자적인 남극연구가 시작되었음
2. 남극 세종과학기지, 장보고과학기지와 더불어 장기적인 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 연구 중
5. 연구의 주된 내용은 남극해 탄소 flux 중 생물 펌프의 주요생물로서의 플랑크톤 연구
6. 식물플랑크톤의 광합성, 일차생산량 조절 환경요인 연구
7. 크기에 따른 식물플랑크톤의 탄소, 질소 섭취율 비교 연구
8. 장기적인 관점에서 주요 식물플랑크톤 우점종이 바뀜에 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

제2절. 국외 기술개발 현황

1. KOPRI Amundsen project, iSTAR, ASPIRE, DynaLiFe 등 다양한 국제 연구 프로그램이 아문젠해를 연구하고 있음
2. 극지 해양생태계의 구조와 기능에 대한 연구는 세계 주요 극지연구 프로그램의 대표사업 중 하나로 운영되고 있음
3. 대부분 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 주 목표 해역 중의 하나로 남극해역을 정함
5. 영국 남극연구소 British Antarctic Survey는 남조지아섬 해역에서 약 5년 단위의 장기 프로그램을 통해 남극해양생태계 변동 과정 연구를 지난 수 십년 동안 지속해오고 있음
6. 독일의 Alfred Wegener Institute of Polar and Marine Research는 남극 순환 해류를 통과하는 해역에서 세계 최대의 쇄빙연구소 Polarstern을 이용하여 표층 해양 생태계 구조와 기능 연구를 거의 매해 수행하고 있음
7. 일본의 극지연구소는 매년 해양생태계 연구를 정기적으로 수행하고 있음

8. 중국의 극지연구소는 2년 주기로 장성기지와 중산 기지 사이의 환남극 해역에서 종합 해양생태계 조사를 수행하고 있음
9. 미국은 쇄빙연구선 Palmer호를 통해 남극생태계 연구가 진행 중임
10. 호주 극지연구소는 Tasmania의 Hobart에 항구와 크릴 연구를 위한 연구기관을 건설할 예정임

KOPRI 극지연구소

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

요 약

최근 변화하고 있는 해양 환경 속에서 작은 식물플랑크톤은 식물플랑크톤 군집 내에서 더 중요해질 것이라 기대되고 있다. 하지만 최근 아문젠해에서 총 식물플랑크톤 생산량에 대한 작은 크기의 식물플랑크톤의 기여도에 관한 정도는 거의 알려진 바가 없다. 총 생체량과 일차생산량에 대한 작은 식물플랑크톤의 기여도를 알아보기 위해 2016년 여름동안 아문젠해에서 12개의 정점에서 전체 식물플랑크톤과 작은 식물플랑크톤의 탄소와 질소 섭취율을 측정하였다. 본 연구에서 non-polynya 지역과 polynya 지역의 전체 식물플랑크톤의 평균 일일 탄소 섭취율은 각각 0.42 g C m^{-2} d^{-1} (S.D. = ± 0.30 g C m^{-2} d^{-1})와 0.84 g C m^{-2} d^{-1} (S.D. = ± 0.18 g C m^{-2} d^{-1})이었으나, 전체 식물플랑크톤의 일일 질소 (질산염, 암모늄) 섭취율은 각각 0.12 g N m^{-2} d^{-1}(S.D. = ± 0.09 g N m^{-2} d^{-1}) and 0.21 g N m^{-2} d^{-1} (S.D. = ± 0.11 g N m^{-2} d^{-1})이었고, 이전 연구결과의 범위 내에 포함되었다. 작은 식물플랑크톤은 본 연구의 총 탄소와 질소 섭취율에 대해 각각 26.9 %와 27.7 %만큼 기여했고, 작은 식물플랑크톤의 엽록소 a (chl-a) 기여도 (19.4%)보다 높았다. 다른 정점들과 비교하였을 때, non-polynya 지역에서 평균된 chlorophyll-a 농도와 일차생산량에 대한 작은 식물플랑크톤의 기여도는 각각 42.4 %와 50.8 %이었고, polynya 지역 (각각 7.9 %, 14.9 %)보다 상당히 높았다. 본 연구에서 작은 식물플랑크톤의 기여도와 식물플랑크톤에 의한 총 일일 일차생산량 사이에서 강한 음의 상관관계 (r^2 = 0.790, $p < 0.05$)를 볼 수 있었다. 이 결과는 작은 식물플랑크톤의 기여도가 증가할수록 일일 일차생산량은 감소한다는 것을 의미했고, 이는 주로 크기가 큰 식물플랑크톤에 비해 작은 크기의 식물플랑크톤의 탄소 섭취율이 더 낮기 때문이다. 지구 온난화에 의해 환경변화가 지속된다면 잠재적인 총 일차생산량의 감소가 아문젠해에서 작은 식물플랑크톤의 기여도를 증가시킬 지도 모른다.

제1절. 서론

아문젠해는 로스해와 벨링스하우젠해 사이의 서남극에 위치해있고, 남극해에서 생물학적으로 연구가 가장 덜 이루어진 지역 중의 하나이다. 최근 몇몇의 국제 연구 프로그램 (KOPRI Amundsen project, iSTAR, ASPIRE, DynaLiFe)들이 아문젠해 지역을 연구하기 위해 시작되었다. 현장관측 데이터는 아문젠해 polynya 지역 (해빙으로 둘러싸인 계절적인 개빙수역)의 220 g C m^{-2} y^{-1} 에 이르는 연간 일차생산량은 남극해에서 가장 높은 일차생산량을 보이는 지역 중 하나로 알려진 로스해 polynya 지역 (200 g C m^{-2} y^{-1})만큼이나 높다는 것을 밝혀냈다 (Lee et al., 2012). chlorophyll-a (chl-a)가 측정된 모든 정점에서 평균한 chl-a 농도는 일차생산량의 측정이 이루어진 정점에서 평균된 chl-a 농도에 비해 2배가량 높았다는 사실로 미루어 볼 때, Lee et al., (2012)에서는 로스해 polynya 지역보다 아문젠해 polynya 지역에서 연간 일차생산량이 2배가량 높을 수 있다고 언급하였다.

지난 몇 십년간 급격한 기후변화가 감지되어왔고, 이로 인한 서남극 반도의 해양 생태계에서 물리적인 변화가 발생되어왔다 (Rückamp et al., 2011; Ducklow et al., 2007). 최근 연구들은 Pine Island Bay의 Thwaites 빙하가 빠르게 후퇴하고 있고 Getz Ice Shelf 주위 얼음의 부피 감소가 가속화되고 있다는 것을 밝혔다 (Joughin et al., 2014; Paolo et al. 2015). 빙붕 아래에서 기저 부분이 녹는 것에 의한 빙상의 질량 감소는 주로 얕은 곳으로 올라오는 따뜻한 순환 심층수 (shoaling warm Circumpolar Deep Water)에 의해 유발된다고 여겨진다 (Yager et al., 2012; Schmidtko et al., 2014). 지난 30년 동안 서남극 반도의 cold-dry polar type에서 warm-humid sub-Antarctic-type으로의 기후 변화는 해양 생물 생산성의 차후의 변화를 일으킨다 (Montes-Hugo et al., 2009).

해양 먹이그물의 기본이 되는 식물플랑크톤은 최근 기후 변화에 반응하는 해양 생태계 변화의 지시자가 될 수 있다 (Moline et al., 2004; Wassman et al., 2011; Arrigo et al., 2015). 해양환경이 온난화될 것이란 예상 속에서 작은 크기의 식물플랑크톤은 총 식물플랑크톤 군집에서 더 많은 기여를 함으로서 해양 생태계에서 더 큰 역할을 할 것이라 기대되고 있다 (Morán et al., 2010; Li et al., 2009; Lee et al., 2013). 이와 마찬가지로, Li et al. (2009)은 북극의 Canada basin 지역에서 상층부 수괴에서 성층화가 강화되고 영양영 공급이 감소됨에 따라 담수화되는 표층수에 의해 작은 식물플랑크톤이 증가하는 것을 발견하였다. 더욱이 Moline et al. (2004)은 남극해에서 지역적으로 온난해지는 경향에 따라 남극 반도 주변의 연안수에서 해빙수 (glacial melt water)와 관련된 크기가 큰 규조류에서 크기가 작은 지중식물 (cryptophyte)로의 일관된 변화를 발견했다. 우점하는 식물플랑크톤 군집이 크기가 큰 것에서 작은 것으로 변하는 것은 상위 영양단계에서의 변화와 이와 관련된 먹이그물에서 변화를 일으킬 것이다 (Moline et al., 2004). 하지만 일차생산량에 대한 작은 식물플랑크톤의 기여도에 대한 정보는 남극에서 거의 알려진 바가 없고

(Saggiomo et al. 1998), 특히 빙붕이 빠른 속도로 녹고 있는 아문젠해에서의 정보는 거의 없는 실정이다 (Yager et al. 2012; Schmidtko et al. 2014). 그러므로 본 연구의 주 목적은 환경조건이 지속적으로 변함에 따라 해양 생태계의 변화의 미래 모니터링을 위한 기초자료를 제공하기 위해 아문젠해에서의 전반적인 총 생체량과 일차생산에 작은 식물플랑크톤이 얼마나 기여를 하는지를 알아보는 것이다.

제2절. 재료 및 방법

1. 연구지역

아문젠 해에서 2014년 1월 1일부터 15일까지 KOPRI Amundsen cruise를 통해 한국 쇄빙연구선 아라온호를 이용하여 식물플랑크톤의 탄소와 질소 섭취율을 측정하기 위해 해수 시료를 채수하였다. 해양조사 정점 중에서 낮 시간동안 갑판에서 배양이 가능할 때, 2번의 revisited-stations (정점 3-1, 19-1)을 포함하여 식물플랑크톤의 탄소와 질소 섭취율 실험은 dual stable isotope technique (Lee et al., 2012; Kim et al., 2015)을 이용하여 12개의 정점에서 수행되었다. National Snow & Ice Data Center을 통해 얻어진 해빙 자료를 바탕으로 본 연구지역에서 크루즈 기간 동안의 해빙 분포와 농도를 통해 polynya 지역과 non-polynya 지역으로 구분하였다 (Fig. 1). 12개의 정점 중 4개의 정점 (정점 1, 2, 3, 3-1)은 non-polynya 지역에 속하고, 나머지 정점들은 polynya 지역에 속한다.

LI-COR underwater 4π light sensor을 통해 6개의 수심 (100, 50, 30, 12, 5, 1% 광깊이, PAR)에서 섭취율과 생물학적, 화학적 성질 분석을 위해 24 10-L Niskin bottles이 장착된 CTD rosette 채취기를 이용하여 해수시료를 채수하였다.

2. 총 Chlorophyll-a와 크기별 Chlorophyll-a 농도

식물플랑크톤의 총 chl-a 농도와 크기별 chl-a 농도를 위한 해수 시료는 일차생산량을 측정한 12개의 정점에서 채수되었다. 총 chl-a 농도는 6개의 수심 (100, 50, 30, 12, 5, 1% 광깊이, PAR), 크기별 chl-a 농도를 위한 해수 시료는 3개의 수심 (100, 30, 1% 광깊이)에서 채취되었다. 총 chl-a 농도는 Whatman glass fiber 여과지 (GF/F; ∅ = 25mm)를 이용해 해수 시료 (0.3-0.5 L)를 여과하였다. 크기별 chl-a 농도를 위한 해수 시료 (0.7-1 L)는 Nucleopore 여과지(20, 5 μm; ∅ = 47mm)로 여과한 후, GF/F 여과지 (0.7 μm; ∅ = 47mm)로 여과하였다. Kim et al, (2015)에 제시된 방법을 이용해 여과지를 추출한 후, 모든 chl-a 농도는 Trilogy fluorometer (Turner Designs, USA)를 이용하여 승선 중에 분석되었다. 위 방법과 계산은 Parsons et al. (1984)에 기초하였다.

3. 탄소와 질소 섭취율 실험

식물플랑크톤의 탄소와 질소 섭취율 실험은 이전에 아문젠해에서 실시되었던 (Lee et al., 2012; Kim et al., 2015) ^{13}C-^{15}N dual isotope tracer technique을 이용해 실시되었다. 본 연구에서는 Lee et al. (2012)과 동일한 과정을 따랐다. 간단하게 요약하자면, LI-COR underwater 4π light sensor을 통해 6개의 수심 (100, 50, 30, 12, 5, 1% 광깊이, PAR)을 결정한 후 CTD rosette 채취기로 채수하였다. 채취된 각 수심별 해수 시료는 각 광깊이에 일치하게 포장된 폴리카보네이트 배양병 (1 L)에 각각 옮겨담았다. 해수 시료를 담은 배양병에 탄소 ($NaH^{13}C$)와 질산염 ($K^{15}NO_3$), 암모늄 ($^{15}NH_4Cl$) 시약을 넣은 후, 갑판 위 자연광 하에서 폴리카보네이트 배양기에 표층수를 흐르게 하면서 배양시켰다. 4-5시간 정도 배양 후, 배양된 해수 시료는 잘 섞어 전체 식물플랑크톤 (> 0.7 μm)과 작은 크기의 식물플랑크톤 (< 5 μm)의 탄소, 질소 섭취율을 알아보기 위해 2개로 나누어 여과시켰다. 전체 식물플랑크톤의 섭취율을 알아보기 위해 배양된 해수 시료 (0.3 L)는 pre-combusted GF/F 여과지 (24mm diameter)를 통해 여과시키고, 작은 크기의 식물플랑크톤의 섭취율을 알아보기 위한 해수 시료 (0.5 L)는 큰 크기의 식물플랑크톤 (>5 μm)를 제거하기 위해 5 μm Nuclepore 여과지 (47 mm)를 이용하여 거른 후 GF/F 여과지 (24 mm)를 통해 여과시켰다 (Lee et al., 2013). 본 연구에서 큰 크기의 식물플랑크톤의 값은 전체와 작은 크기의 식물플랑크톤의 값의 차이를 이용하여 구하였다 (Lee et al., 2013). 여과지는 질량 분석 전까지 -80℃에서 즉시 보관하였다. 탄산염을 제거하기 위해 하루 동안 산을 이용해 fume을 한 후, 입자성 유기탄소 (POC)와 입자성 유기질소 (PON)의 농도와 ^{13}C, ^{15}N의 양은 미국 Alaska Stable Isotope Facility의 Finnigan Delta+XL mass spectrometer를 이용하여 분석되었다.

본 연구에서 작은 식물플랑크톤 기여도의 모든 결과는 사다리꼴 공식에 기초해 각 정점에서 100 %부터 1 % 광깊이까지 수직적분하여 전체 식물플랑크톤에 대해 작은 식물플랑크톤을 비교하여 나타낸 것이다. 식물플랑크톤의 일일 탄소, 질소 섭취율은 본 연구에서 측정된 시간당 섭취율과 아문젠 해에서의 여름동안 하루 24시간 광주기에 기초한 것이다 (Lee et al., 2012).

제3절. 결과

1. 작은 식물플랑크톤의 Chlorophyll-a, POC, PON 기여도

본 연구에서 6개의 다른 광깊이에서 수직적분한 전체 식물플랑크톤의 chl-a 농도는 11.1 – 80.3 mg chl-a m^{-2} (평균 ± S.D. = 57.4 ± 25.2 mg chl-a m^{-2})의 범위에 속했고, 작은 (< 5 μm) chl-a 농도는 3.9 – 9.4 mg chl-a m^{-2} (평균 ± S.D. =

KOPRI 극지연구소

5.7 ± 1.7 mg chl-a m^{-2}) 범위에 속했다 (Fig. 2). 전체 클로로필 농도에 대한 작은 식물플랑크톤의 기여도의 평균은 19.4 % (S.D. = ± 26.0 %) 였고, 4.9 – 76.5 %의 범위에 속했다. 사이즈에 따른 chl-a 농도에 기초하여 볼 때, 2014년의 연구기간 동안에는 아문젠 해에서 크기가 큰 (> 5 μm) 식물플랑크톤이 일반적으로 (약 80 %) 우점하였다. 지역적인 비교를 해보았을 때, 전체 chl-a 농도에 대한 작은 식물플랑크톤의 평균 기여도는 non-polynya 지역에서 42.4 % (S.D. = ± 37.2 %) 였고, polynya 지역에서는 7.9 % (S.D. = ± 3.5 %) 였다. 작은 식물플랑크톤의 chl-a 기여도는 polynya 지역보다 non-polynya 지역에서 더 컸지만, 그 차이는 크게 다르지 않았다 (t-test, $p = 0.16$).

수직적분한 식물플랑크톤의 POC 농도는 4.72 – 9.22 mg C m^{-2} 의 범위에 속했으며 큰 공간적 차이를 보이지는 않았다 (Fig. 3). 이와 비교해보면, 수직적분한 식물플랑크톤의 PON 농도는 0.76 – 1.74 mg C m^{-2} 의 범위를 보였다. 아문젠해에서 작은 식물플랑크톤의 POC 기여도는 30.7 – 65.5 % (평균 ± S.D. = 41.1 ± 10.6 %) 사이였고, PON의 기여도는 유사하게 30.8 – 67.2 % (평균 ± S.D. = 41.3 ± 11.5 %)의 범위에 속했다 (Fig. 3). 모든 polynya 지역에서 평균한 작은 식물플랑크톤의 POC와 PON의 기여도는 각각 36.9 % (S.D. = ± 4.6 %), 37.0 % (S.D. = ± 6.9 %) 였다. non-polynya 지역에서 평균한 작은 식물플랑크톤의 POC와 PON의 기여도는 각각 49.5 % (S.D. = ± 14.4%), 50.0 % (S.D. = ± 15.1 %) 였다.

2. 작은 식물플랑크톤의 탄소 섭취율 기여도

6개의 광깊이에서 수직적분한 전체 식물플랑크톤의 일일 탄소 섭취율의 범위는 150.4 – 1213.4 mg C m^{-2} d^{-1} 였고, 평균은 696.5 mg C m^{-2} d^{-1} (S.D. = ± 298.4 mg C m^{-2} d^{-1}) 였다 (Fig. 4). 반면에 작은 식물플랑크톤의 섭취율의 범위는 58.6 – 266.4 mg C m^{-2} d^{-1} 였고, 평균은 124.9 mg C m^{-2} d^{-1} (S.D. = ± 62.4 mg C m^{-2} d^{-1}) 였다. 전체 식물플랑크톤의 총 일일 탄소 섭취율에 대해 작은 식물플랑크톤은 26.9 % (S.D. = ± 29.3 %) 만큼 기여했다.

특히 non-polynya 지역에서 식물플랑크톤의 총 일일 탄소 섭취율은 150.4 – 796.4 mg C m^{-2} d^{-1} 의 범위 내에 있었고 평균은 415.0 mg C m^{-2} d^{-1} (S.D. = ± 298.2 mg C m^{-2} d^{-1})인 반면에, polynya 지역에서는 654.8 – 1213.4 mg C m^{-2} d^{-1} 의 범위이고 평균은 837.3 mg C m^{-2} d^{-1} (S.D. = ± 184.1 mg C m^{-2} d^{-1})을 보였다. 식물플랑크톤의 총 일일 탄소 섭취율은 non-polynya 지역에 비해 polynya 지역에서 더 높았다 (t-test, $p < 0.05$). 작은 식물플랑크톤의 섭취율의 경우에는 non-polynya 지역에서 58.6 – 193.6 mg C m^{-2} d^{-1} 의 범위 내에 있었고 평균은 126.5 mg C m^{-2} d^{-1} (S.D. = ± 55.2 mg C m^{-2} d^{-1}) 였고, polynya 지역에서는 62.2 – 266.4 mg C m^{-2} d^{-1} 의 범위 내에 있었고 평균은 124.1 mg C m^{-2} d^{-1} (S.D. = ± 69.3 mg C m^{-2} d^{-1}) 였다. 작은 식물플랑크톤의 일일 탄소 섭취율은 polynya 지역과 non-polynya 지역에서 크게 다르지 않았다 (t-test, $p > 0.05$). 전체 일일 탄소 섭취율에 대한 작은 식물플랑크톤의 평균 기여도는 non-polynya 지역과 polynya 지역에서 각각 50.8 % (S.D. = ± 42.8 %), 14.9 % (S.D. = ± 8.4 %) 였다. polynya 지역과 non-polynya 지역에서 평균 기여도는 크게 달랐지만, 통계학적으로 큰 차이를 보이지는 않았다 (t-test, $p > 0.05$).

3. 작은 식물플랑크톤의 질소 섭취율 기여도

본 연구기간 동안 전체 식물플랑크톤의 총 일일 질산염 섭취율의 범위는 34.0 – 174.2 mg N m^{-2} d^{-1} 이고 평균은 93.7 mg N m^{-2} d^{-1} (S.D. = ± 43.2 mg N m^{-2} d^{-1})인 반면, 작은 식물플랑크톤의 섭취율은 6.1 – 40.9 mg N m^{-2} d^{-1} 의 범위이고 평균은 19.0 mg N m^{-2} d^{-1} (S.D. = ± 11.3 mg N m^{-2} d^{-1}) 이다 (Fig. 5). 전체 일일 질산염 섭취율에 대해 작은 식물플랑크톤의 기여도는 21.5 % (S.D. = ± 11.1 %) 였다. 이와 비교해보면, 식물플랑크톤의 총 일일 암모늄 섭취율은 12.4 – 173.8 mg N m^{-2} d^{-1} 의 범위 내에 있었고 평균은 86.7 mg N m^{-2} d^{-1} (S.D. = ± 75.9 mg N m^{-2} d^{-1})인 반면에, 작은 식물플랑크톤의 섭취율은 9.1 – 81.1 mg N m^{-2} d^{-1} 의 범위 내에 있었고 평균은 25.7 mg N m^{-2} d^{-1} (S.D. = ± 21.1 mg N m^{-2} d^{-1}) 이었다 (Fig. 6). 총 일일 암모늄 섭취율에 대해 작은 식물플랑크톤은 38.7 % (S.D. = ± 24.9 %) 만큼 기여했다. 작은 식물플랑크톤의 기여도는 질산염 섭취율보다 암모늄 섭취율에서 더 높았다 (t-test, $p < 0.05$).

특히 지역 간의 차이를 위주로 살펴보면, 식물플랑크톤의 총 일일 질산염 섭취율은 non-polynya 지역에서 34.0 – 142.1 mg N m^{-2} d^{-1} 의 범위 내에 있었고 71.9 mg N m^{-2} d^{-1} (S.D. = ± 48.4 mg N m^{-2} d^{-1}) 의 평균값을 보인 반면, polynya 지역에서는 44.2 – 174.2 mg N m^{-2} d^{-1} 의 범위 내에서 104.6 mg N m^{-2} d^{-1} (S.D. = ± 39.0 mg N m^{-2} d^{-1}) 의 평균값을 보였다. 이와 비교해보면, 작은 식물플랑크톤의 일일 질산염 섭취율은 non-polynya 지역과 polynya 지역에서 각각 7.5 – 26.6 mg N m^{-2} d^{-1} 의 범위 내에서 16.7 mg N m^{-2} d^{-1} (S.D. = ± 7.8 mg N m^{-2} d^{-1})의 평균값, 6.1 – 40.9 mg N m^{-2} d^{-1} 의 범위에서 20.1 mg N m^{-2} d^{-1} (S.D. = ± 13.1 mg N m^{-2} d^{-1}) 의 평균값을 보였다. 총 일일 질산염 섭취율에 대한 작은 식물플랑크톤의 기여도는 non-polynya 지역에서는 28.2 5 (S.D. = ± 15.9 %), polynya 지역에서는 18.1 % (S.D. = ± 6.8 %) 의 값을 보였다. 전체 식물플랑크톤의 총 일일 암모늄 섭취율은 non-polynya 지역에서 12.3 – 106.1 mg N m^{-2} d^{-1} (평균 ± S.D. = 49.7 ± 41.2 mg N m^{-2} d^{-1})의 범위를 보였고, polynya 지역에서 18.1 – 269.3 mg N m^{-2} d^{-1} (평균 ± S.D. = 105.2 ± 84.6 mg N m^{-2} d^{-1})의 범위를 보였다. 이와 비교해보면, 작은 식물플랑크톤의 섭취율의 범위는 non-polynya 지역에서 9.1 – 22.4 mg N m^{-2} d^{-1} (평균 ± S.D. = 15.8 ± 6.4 mg N m^{-2} d^{-1}) 사이였고, polynya 지역에서는 9.9 – 81.1 mg N m^{-2} d^{-1} (평균 ± S.D. = 30.7 ± 24.5 mg N m^{-2} d^{-1}) 사이였다.

KOPRI 극지연구소

작은 식물플랑크톤은 총 일일 암모늄 섭취율에 대해 non-polynya 지역과 polynya 지역에서 각각 52.8 % (S.D. = ± 40.5 %), 31.6 % (S.D. = ± 10.1 %) 의 기여도를 보였고, 이는 크게 다르지 않았다 (t-test, p = 0.37).

본 연구에서 식물플랑크톤의 총 일일 질소 (질산염 + 암모늄) 섭취율의 총 합은 46.4 – 443.5 mg N m^{-2} d^{-1} (평균 ± S,D, = ± 180.4 ± 106.7 mg N m^{-2} d^{-1}) 사이의 범위를 보였다. non-polynya 지역과 polynya 지역에서는 각각 46.4 – 248.1 mg N m^{-2} d^{-1} (평균 ± S.D. = 121.6 ± 89.3 mg N m^{-2} d^{-1}), 91.7 – 443.5 mg N m^{-2} d^{-1} (평균 ± S.D. 209.8 ± 107.3 mg N m^{-2} d^{-1}) 의 범위를 보였다. 이와 비교해보면, 작은 식물플랑크톤의 총 일일 질소 섭취율의 총 합은 non-polynya 지역과 polynya 지역에서 각각 16.6 – 46.6 mg N m^{-2} d^{-1} (평균 ± S.D. = 32.5 ± 13.2 mg N m^{-2} d^{-1}), 17.6 – 122.0 mg N m^{-2} d^{-1} (평균 ± S.D. = ± 50.8 ± 32.4 mg N m^{-2} d^{-1}) 범위 내에 있었다. 총 일일 질소 섭취율의 총 합에 대해 작은 식물플랑크톤은 non-polynya 지역에서는 36.2 % (S.D. = ± 23.0 %), polynya 지역에서는 23.5 % (S.D. = ± 6.0 %) 의 기여도를 보였다. 일일 질소 섭취율과 작은 식물플랑크톤의 기여도는 non-polynya 지역과 polynya 지역에서 통계학적으로 차이를 보이지 않았다.

Table 1. Contributions (%) of chlorophyll-a, POC, PON, and carbon and nitrogen uptake rates of small phytoplankton.

	Chlorophyll-a	POC	PON	Daily carbon uptake rate	Daily nitrate uptake rate	Daily ammonium uptake rate	Total nitrogen uptake rate
All stations	19.4 ± 26.0	41.1 ± 10.6	41.3 ± 11.5	26.9 ± 29.3	21.5 ± 11.1	38.7 ± 24.9	27.7 ± 14.4
Non-polynya	42.4 ± 37.2	49.5 ± 14.4	50.0 ± 15.1	50.8 ± 42.8	28.2 ± 15.9	52.8 ± 40.5	36.2 ± 23.0
Polynya	7.9 ± 3.5	36.9 ± 4.6	37.0 ± 6.9	14.9 ± 8.4	18.1 ± 6.8	31.6 ± 10.1	23.5 ± 6.0

KOPRI 극지연구소

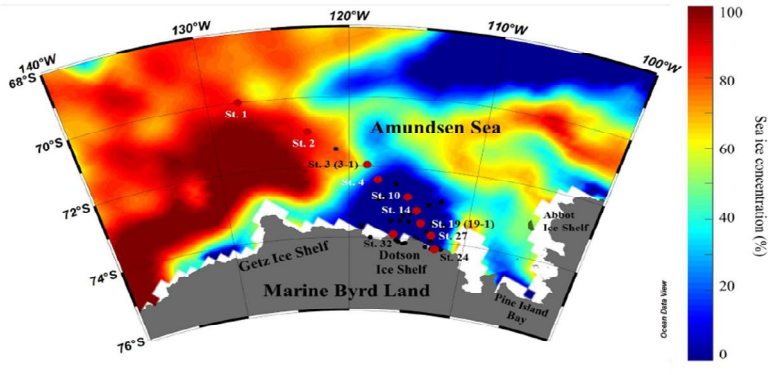

Figure 1. Sampling locations in the Amundsen Sea. Red closed circles represent productivity stations. Sea ice concentration data during the cruise period from Nimbus-7 SMMR and DMSP SSM/ISSMIS Passive Microwave data provided by National Snow & Ice Data Center.

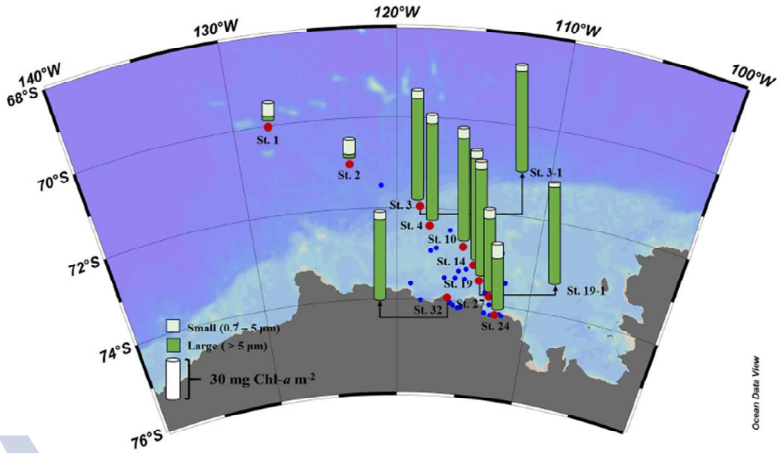

Figure 2. Water column-integrated chlorophyll-a concentration at the productivity stations in the Amundsen Sea.

KOPRI
극지연구소

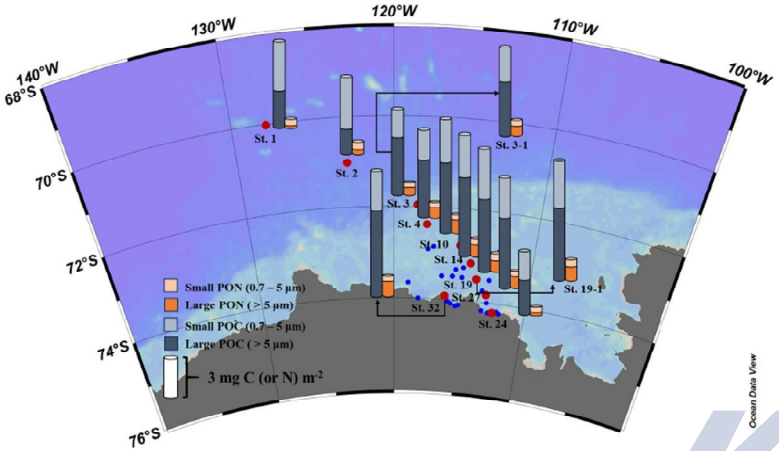

Figure 3. Water column-integrated concentrations of POC and PON of small and large phytoplankton.

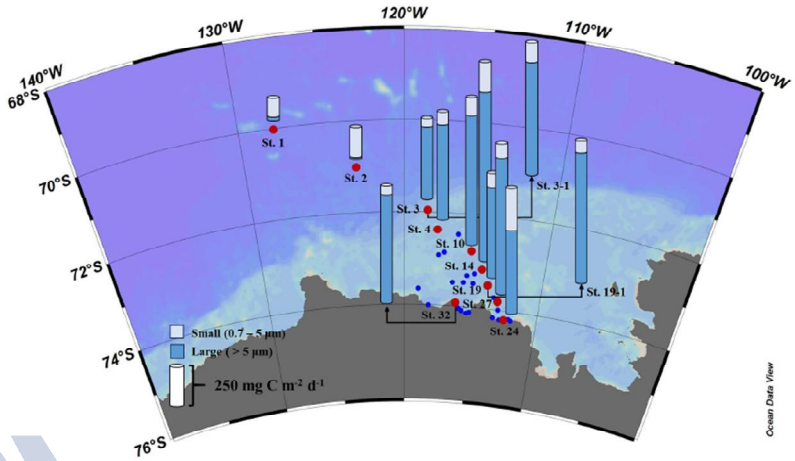

Figure 4. Water column-integrated daily carbon uptake rates of small and large phytoplankton.

KOPRI
극지연구소

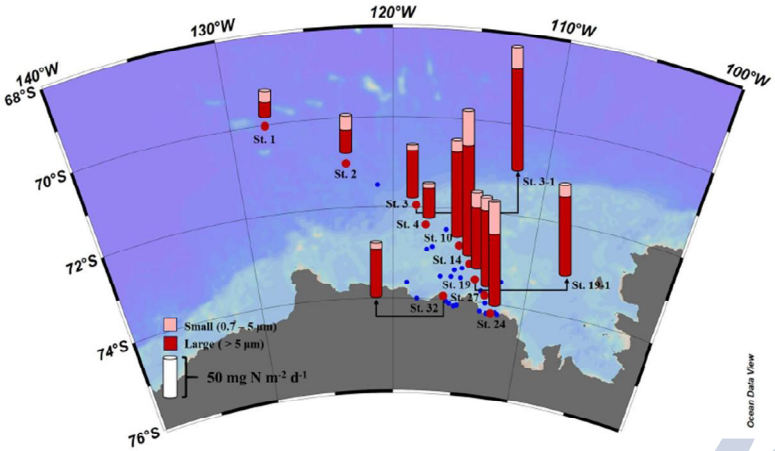

Figure 5. Water column-integrated daily nitrate uptake rates of small and large phytoplankton.

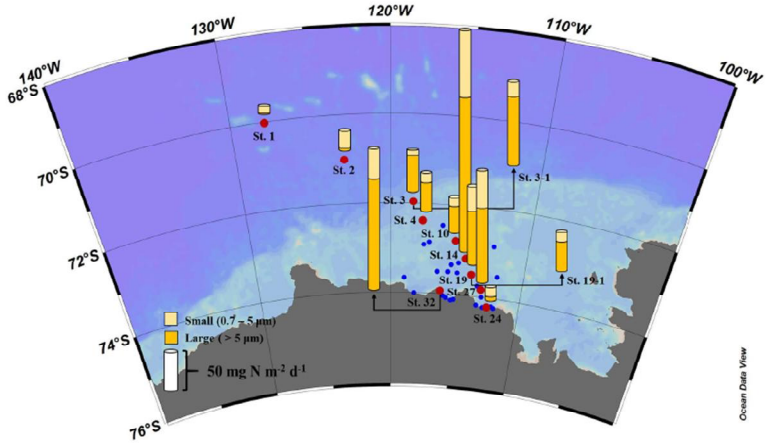

Figure 6. Water column-integrated daily ammonium uptake rates of small and large phytoplankton.

KOPRI
극지연구소

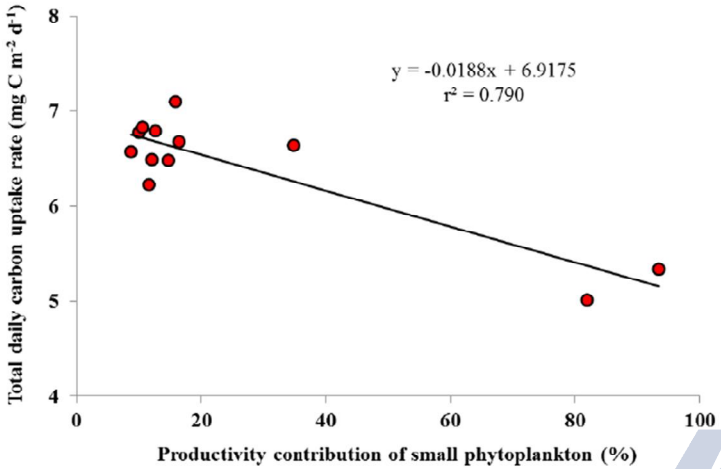

Figure 7. Relationship between productivity contributions of small phytoplankton and the total daily carbon uptake rates of phytoplankton (large + small). The total daily carbon uptake rates were transformed into natural logs for a linear regression.

제4절. 결론 및 고찰

본 연구에서 non-polynya 지역과 polynya 지역에서 유광층 내 수직적분한 식물플랑크톤의 일일 탄소 섭취율의 평균은 각각 0.42 g C m^{-2} d^{-1} (S.D. = ± 0.30 g C m^{-2} d^{-1}), 0.84 g C m^{-2} d^{-1} (S.D. = ± 0.18 g C m^{-2} d^{-1}) 이었다. 아문젠해에서의 이전 연구 결과에 따르면 (Lee et al., 2012; Kim et al., 2015), non-polynya 지역에서 총 일일 탄소 섭취율의 범위는 0.2 – 0.12 g C m^{-2} d^{-1} 이었다. non-polynya 지역에서 본 연구의 섭취율(0.42 g C m^{-2} d^{-1})은 이전 연구결과에 비해 다소 높지만, 통계학적으로는 다르지 않았다 (t-test, p = 0.77). 이와 비교했을 때, polynya 지역에서의 총 일일 탄소 섭취율의 본 연구결과 값(0.84 g C m^{-2} d^{-1})은 Lee et al. (2012; 2.2 g C m^{-2} d^{-1})와 Kim et al. (2015; 0.2 g C m^{-2} d^{-1})의 범위 내에 존재하였다. 아문젠 polynya 지역에서 식물플랑크톤의 총 일일 탄소 섭취율의 큰 계절적 변동성은 현장 관측으로 측정한 Kim et al. (2015)와 위성 데이터를 기반으로 한 Arrigo et al. (2012)에 의해 이미 보고되었다. 12월 말부터 1월 사이에 최고조를 이루고 2월 말에 끝나는 식물플랑크톤의 bloom 단계에 의해 아문젠 polynya 지역에서 식물플랑크톤의 총 일일 탄소 섭취율의 계절적 변동성이 크게 좌우된다 (Arrigo and van Dijken 2003; Arrigo et al., 2012; Kim et al., 2015). Lee et al. (2012)와 Kim et al. (2015)의 식물플랑크톤의 탄소 섭취율은 각각 2010년 12월 12일부터 2011년 1월 23일까지, 2012년 2월 11일부터 3월 14일까지 측정되었다. 본 연구는 2014년 1월 1-15일 동안 측정되었다.

본 연구에서 식물플랑크톤의 총 일일 질소 섭취율은 non-polynya 지역과 polynya 지역에서 각각 0.12 g N m^{-2} d^{-1} (S.D. = ± 0.09 g N m^{-2} d^{-1}), 0.21 g N m^{-2} d^{-1} (S.D. = ± 0.11 g N m^{-2} d^{-1})의 값을 보였다. 아문젠해의 총 일일 질소 섭취율에 대한 이전 연구에서는 non-polynya 지역에서 2010/2011 년도에 수행된 연구에서 0.24 g N m^{-2} d^{-1}, 2012년도에 수행된 연구에서는 0.04 g N m^{-2} d^{-1} 의 값을 보인 반면, polynya 지역에서는 2010/2011 년도 연구에서 0.93 g N m^{-2} d^{-1}, 2012 년도의 연구에서 0.06 g N m^{-2} d^{-1} 의 값을 보였다. 식물플랑크톤의 총 일일 질소 섭취율에 대한 non-polynya 지역과 polynya 지역에서의 본 연구의 결과는 두 개의 이전 연구의 결과값 사이에 존재했다 (Lee et al., 2012; Kim et al., 2015). 본 연구의 질산염과 암모늄 섭취율을 기반으로 한 f-ratio (질산염 섭취율/질산염+암모늄 섭취율)를 non-polynya 지역과 polynya 지역에서 각각 평균한 결과 0.62 (S.D. = ± 0.08), 0.54 (S.D. = ± 0.20)의 값을 보였다. 이 비 또한 이전 두 연구 결과의 범위 내에 존재하였다. 공간적 변동성이 크기 때문에 두 비 사이의 차이가 크지는 않았지만, polynya 지역보다 non-polynya 지역에서 더 높은 f-ratio 값은 이전 연구의 결과와 일치하였다 (Lee et al., 2012; Kim et al., 2015). 현재 non-polynya 지역에서 더 높은 f-ratio 값이 나타나는 기작에 대한 정확한 설명은 없지만 이에 대한 연구가 필요하다고 여겨진다.

KOPRI 극지연구소

chl-a, POC/PON, 일일 탄소/질소 섭취율에 대한 작은 식물플랑크톤의 기여도는 Table 1 에 제시되어 있다. 일차생산량이 측정된 모든 정점에서의 총 chl-a 농도에 대한 작은 식물플랑크톤의 전반적인 기여도는 19.4 % (S.D. = ± 26.0 %) 였는데, 이는 POC 기여도 (41.1 ± 10.6 %) 보다 확연하게 낮았다 (t-test, $p < 0.05$). 이는 Lee et al. (2013) 에 기재된 북극의 Chukchi 해에서의 결과와 일치했다. 작은 식물플랑크톤 당 chl-a에 비해 POC 함유량이 높은 것이 작은 식물플랑크톤의 높은 POC 기여도를 야기시킬 수 있다 (Lee et al., 2013). 본 연구에서의 POC와 PON를 분석하기 위해 여과된 시료들의 C/N ratio (평균 ± S.D. = ± 6.6 ± 0.6) 와 $\delta^{13}C$ (평균 ± S.D. = ± -25.9 ± 1.0 %)의 값을 바탕으로 하면, 여과된 시료들은 주로 식물플랑크톤에 의해 기원된 POC와 PON라고 여겨진다 (Kim et al., 2016). 따라서 식물플랑크톤이 아닌 물질에 의해 과대평가된 POC 기여도일 것이란 가능성은 작은 식물플랑크톤의 경우 chl-a 기여도보다 POC 기여도가 더 높기 때문에 배제되어질 수 있다. 그러므로 chl-a 농도의 통상적인 분석에 기초한 작은 식물플랑크톤의 기여도는 작은 식물플랑크톤이 얼마나 기여하는 지에 대해 과소평가를 일으킬 수도 있다 (Lee et al., 2013). 실제로, 몇몇 저자들은 chl-a가 영양염, 빛 조건, 식물플랑크톤의 우점 그룹과 생리 상태와 같은 환경요소들에 크게 좌우되기 때문에 chl-a의 농도는 식물플랑크톤의 생체량의 좋은 지표가 아니라고 주장하였다 (Desortová 1981; Behrenfeld et al., 2005; Kruskopf and Flynn 2006; Behrenfeld and Boss 2006). 하지만 아래 언급하듯이 세포외 탄소 점액질과 같은 식물플랑크톤이 아닌 탄소 물질들의 영향 또한 POC에 기여할 것임을 완전히 배제할 수는 없다.

본 연구에서 일차생산에 대한 조사가 행해진 모든 정점에서 작은 식물플랑크톤의 탄소와 질소 (질산염, 암모늄) 섭취율에 대한 전반적인 기여도는 각각 26.9 % 와 27.7 % 로 비슷하였다. 위 결과는 작은 식물플랑크톤의 chl-a 기여도보다 상대적으로 높았지만, 통계학적으로 다르지 않았다 (t-test, $p > 0.05$). 일반적으로, 본 연구기간동안의 모든 정점에서 작은 식물플랑크톤의 일일 암모늄 섭취율의 기여도는 작은 식물플랑크톤의 일일 질산염 섭취율의 기여도보다 높았다 (t-test, $p < 0.05$). 다양한 지역에서 작은 식물플랑크톤의 암모늄 선호현상은 널리 알려져 있다 (Koike et al., 1986; Tremblay et al., 2000; Lee et al., 2008; Lee et al., 2013).

다른 지역에서의 기여도를 살펴볼 경우, chl-a, POC/PON, 탄소와 질소 섭취율에 대한 작은 식물플랑크톤의 기여도 모두 polynya 지역보다 non-polynya 지역에서 높았다 (Table 1). 더욱이 polynya 지역에서 작은 식물플랑크톤의 chl-a 기여도 (평균 ± S.D. = ± 7.9 ± 3.5 %) 는 POC의 기여도 (평균 ± S.D.= ± 36.9 ± 4.6 %) 보다 더 낮았지만, non-polynya 지역에서는 통계적으로 차이를 보이지 않았다 (Table 1). 이는 polynya 지역에서 작은 식물플랑크톤이 chl-a 농도보다 총 POC에 더 많이 기여한다는 것을 지시한다. 본 연구에서 식물플랑크톤의 종조성에 대한 조사는 진행되지 않았지만, 이전 연구에 따르면 아문젠해 polynya 지역에서는 *Phaeocystis* 종이 우점하고 non-polynya 지역에서는 상대적으로 규조류가 우점한다고 하였다

(Lee et al., 2012). 일반적으로 *Phaeocystis* 종은 군체를 형성하는 세포외 탄소 점액질로 많은 부분(46 % 까지)을 배출한다 (Matrai et al., 1995). 본 연구기간동안 polynya 지역에서 chl-a를 제외한 식물플랑크톤이 아닌 탄소 물질이 더 높은 작은 식물플랑크톤의 POC 기여도에 영향을 일으켰을 수도 있다. 실제로 polynya 지역에서 작은 식물플랑크톤의 일일 탄소 섭취율에 대한 기여도(14.9 ± 8.4 %)는 POC 기여도(36.9 ± 4.6 %)만큼 높지 않았다. 본 연구기간 동안 작은 식물플랑크톤의 chl-a 기여도는 작은 식물플랑크톤의 일일 탄소 섭취율 기여도보다 낮았고, 이는 남반구의 봄과 여름동안 남극의 로스해의 polynya 지역과 marginal ice zone 지역의 결과와 일치하였다 (Saggiomo et al., 1998). 위 결과는 또한 피코식물플랑크톤(< 2 μm)의 chl-a와 일차생산량의 기여도가 각각 polynya 지역에서 29 %, 40% 이고, marginal ice zone 지역에서 17 %, 32 % 라고 보고하였다. 본 연구의 작은 식물플랑크톤의 크기(< 5 μm)보다 다소 작은 피코식물플랑크톤의 크기임에도 불구하고, polynya 지역에서 본 연구의 결과보다 위 연구에서 작은 식물플랑크톤이 chl-a와 일차생산량에 더 큰 기여를 하고 있다는 것을 살펴볼 수 있다.

본 연구를 통해 아문젠해에서 작은 식물플랑크톤의 일차생산량 기여도와 식물플랑크톤의 총 일일 탄소 섭취율 사이에 강한 음의 상관관계($r^2 = 0.790$, $p < 0.05$)가 존재한다는 것을 발견했는데, 이는 작은 식물플랑크톤의 기여도가 증가할수록 일일 일차생산량은 감소한다는 것을 의미한다. 이에 대해 Lee et al. (2013)은 북극에서의 Chukchi해에서 크기가 큰 식물플랑크톤보다 작은 식물플랑크톤의 탄소 섭취율이 상대적으로 더 낮은 것에 의해 주로 기인한 것이라 보고하였다. Moline et al. (2004)는 점점 상승하는 기온이 해빙수의 유입을 증가시킬 것이고, 이는 차후에 크기가 큰 식물플랑크톤 군집에서 작은 식물플랑크톤의 기여도를 증가시킬 것이라고 주장하였다 (Moline et al., 2004). 만약 지속적으로 더 빙하가 녹는 조건이 되어 작은 식물플랑크톤이 우점하게 된다면, 작은 식물플랑크톤 기여도의 증가는 본 연구의 Figure 7에서 볼 수 있듯이 아문젠해에서의 식물플랑크톤의 총 일차생산량 감소를 일으킬지도 모른다.

2차 소비자를 위한 기본적인 먹이가 식물플랑크톤의 food quality의 관점에서 작은 식물플랑크톤의 단백질, 지질, 탄수화물과 같은 광합성 최종 산물들의 거대분자 조성비는 지속적인 환경변화에 반응하는 해양 생태계의 이해를 돕기 위해 필요할 것이다 (Lee et al., 2013). Kang et al. (accepted)에 따르면, 작은 식물플랑크톤은 단위 chl-a 농도 당 더 많은 먹이 물질과 칼로리 함량을 동화하므로, 동해에서 다른 식물플랑크톤 군집보다 에너지적인 관점에서 더 많은 기여도를 제공한다고 언급하였다. 결과적으로 총 생체량에 대한 작은 식물플랑크톤의 기여도와 총 식물플랑크톤 군집의 일차생산량은 현재 진행 중인 다양한 기후 관련 환경변화에서 해양 생태계가 어떻게 변화할지를 감지하는데 귀중한 지시자로서 중요할 수 있다. 게다가 작은 식물플랑크톤의 거대분자 조성비에 대한 더 나아간 세부적인 연구는 온난화되는 해양에서 작은 크기가 우점할 것으로 기대되는 해양 생태계를 위해 필요할 것이다.

KOPRI 극지연구소

제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

제1절. 연구개발목표 및 달성도

성과목표	세부목표		달성 주요내용	달성도 (%)
1. 식물플랑크톤 일차생산성과 신생산의 조절 요인분석	1-1	일차생산성 측정결과 분석	- 서남극해 결빙해역에서의 식물플랑크톤 생체량과 해양환경 파악 - 서남극해 polynya 지역과 non-polynya 지역에서의 일차생산성 측정 결과 분석 - 해양환경과 일차생산성 사이의 상관관계 분석	100
	1-2	신생산성 측정결과 분석	- 서남극해 polynya 지역과 non-polynya 지역에서의 신생산성 측정 결과 분석 - 질산염, 암모늄 섭취율을 통한 f-ratio 분석 - 해양 환경과 신생산성 상관관계 분석	100
2. 식물플랑크톤 생산성의 연간변동성 측정	2-1	연간변동성 측정	- 이전 연구결과(2010/2011년, 2012년)와 2014년 결과자료를 이용하여 일차생산성의 연간변동성 추정	100
3. 작은 식물플랑크톤의 기여도 분석	3-1	작은 식물플랑크톤 기여도	- chlorophyll-a, POC/PON, 탄소/질소 섭취율 등 요소별 작은 식물플랑크톤의 기여도 차이를 알아보기 위한 측정 결과 분석 - polynya해역과 non-polynya해역에 따른 작은 식물플랑크톤의 기여도 차이 분석	100

제2절. 연구수행 세부 내용 및 결과(우수성)

1. 성과목표 1 : 식물플랑크톤 일차생산성과 신생산의 조절 요인 분석

가. 세부목표 1-1: 일차생산성 측정결과 분석

연 구 내 용	연 구 결 과(우수성)
서남극해 결빙해역에서의 식물플랑크톤 생체량과 해양환경 파악	서남극 아문젠해에서의 식물플랑크톤 생체량과 해양환경 연구 자료는 거의 없음
서남극해 polynya 지역과 non-polynya 지역에서의 일차생산성 측정 결과 분석	서남극 아문젠해역에서의 polynya 지역과 non-polynya 지역의 현장 조사 시기별 연구 자료는 거의 없음
해양환경과 일차생산성 사이의 상관관계 분석	서남극 아문젠해역에서의 상관관계 자료는 거의 없음

나. 세부목표 1-2: 신생산성 측정결과 분석

연 구 내 용	연 구 결 과(우수성)
서남극해 polynya 지역과 non-polynya 지역에서의 신생산성 측정 결과 분석	다른 해역과 조사 시기에 따른 차이 비교 분석 가능
질산염, 암모늄 섭취율을 통한 f-ratio 분석	서남극 아문젠해역에서의 f-ratio 자료는 거의 없음
해양 환경과 신생산성 상관관계 분석	서남극 아문젠해역에서의 상관관계 자료는 거의 없음

2. 성과목표 2: 식물플랑크톤 생산성의 연간변동성 측정

가. 세부목표 2-1: 연간변동성 측정

연 구 내 용	연 구 결 과(우수성)
이전 연구결과(2010/2011년, 2012년)와 2014년 결과자료를 이용하여 일차생산성의 연간변동성 추정	현장 배양을 통한 측정결과에 의한 연간변동성 값은 아문젠해역에서 비교 분석 결과가 거의 없음

3. 성과목표 3: 작은 식물플랑크톤의 기여도 분석

KOPRI 극지연구소

가. 세부목표 3-1: 작은 식물플랑크톤 기여도

연 구 내 용	연 구 결 과(우수성)
chlorophyll-a, POC/PON, 탄소/질소 섭취율 등 요소별 작은 식물플랑크톤의 기여도 차이를 알아보기 위한 측정 결과 분석	서남극 아문젠 해역에서 chlorophyll-a, POC/PON, 탄소/질소 섭취율에 대해 작은 식물플랑크톤의 기여도에 대한 현장관측은 이루어진 바가 없음
polynya해역과 non-polynya해역에 따른 작은 식물플랑크톤의 기여도 차이 분석	서남극 아문젠해역에서의 polynya 지역과 non-polynya 지역의 현장조사를 통한 작은 식물플랑크톤의 기여도 차이에 대한 자료는 거의 없음

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

제1절. 학술적 파급효과

1. 해양의 중요 일차 생산자인 해빙 미세조류의 탄소/질소 섭취율 연구는 앞으로의 남극 기후변동에 따라 탄소 저장고로서의 능력 평가의 기초가 되므로, 활용 방안이 다양함
2. 남극의 해양환경이 빠르게 변함에 따라 크기가 작은 식물플랑크톤의 기여도가 어떻게 바뀔 지를 예측함으로서 향후 환경변화에 따른 남극 해양 생태계 영향을 파악할 수 있음
3. 작은 식물플랑크톤의 기여도와 총 일차생산량 사이의 상관관계 연구를 통해 앞으로의 환경변화에 따른 해양의 일차생산량 변동 유추 가능
4. 식물플랑크톤의 능력을 크기에 따라 나누어 평가함으로서 식물플랑크톤을 환경변화 지시자로 활용함으로써, 앞으로의 활용방안이 아주 높을 것임
5. 급속 융빙해역에서의 일차생산성 측정으로 기후변화에 따른 영향 측정 가능

제2절. 경제적 파급효과

1. 해빙 주변 미세조류의 chlorophyll-a, POC/PON, 탄소/질소 섭취율의 계절적 변동에 대한 데이터베이스를 구축하여 관련 분야 연구에 기여할 수 있으며 다른 연구에 이용 가능성 제시
2. 급속 융빙해역에서 새로운 연구기법을 도입한 연구를 통해 유사분야의 연구를 활성화 시킬 수 있을 것으로 기대됨
3. 식물플랑크톤의 광합성의 조절요인 및 환경기작에 관한 연구를 통해 관련 분야 적용 가능성 확대 및 해양 산업 육성 가능
4. 남극해 장기해양연구수행에 대한 국제적 활동을 통해 장기적인 극지해 해양 생태 연구의 국제적 흐름에 동참하여 차세대 해양강국으로 도약 가능
5. 선박항로에 해빙 정보를 전달해줄 수 있다면, 선박의 안전 운항 및 항로 결정을 위한 보조 자료로 활용할 수 있음
6. 국제 기후변화협약과 관련한 과학적 기초자료 제공 및 대응방안 모색 가능
7. 지구온난화에 따른 남극해 해양변화 모니터링 및 예측에 활용할 데이터베이스 구축
8. 수치 모델에 활용 가능한 환경 변수들을 제공함으로 수치모델의 연구 활성화를 일으킬 수 있을 것으로 예측가능하며, 이는 급격한 기후변화에 대한 과학적인 대처를 가능하게 함으로 장기적인 관점에서 경제적 파급효과가 기대됨
9. 접근이 어려운 극지환경 특성 상 인공위성을 이용한다면 비용 절감 가능하므로 향후 인공위성의 잠재적 수요분야 창출

KOPRI 극지연구소

제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정도

제1절. 남극해 연구 현황

1. 서남극해 융빙해역에서 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 기후변동를 겪고 있는 서남극 반도의 기후가 cold-dry polar-type에서 warm-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.

제2절. 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 예상함.
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 7 장 참고문헌

Arrigo, K. R., Lowry, K. E. and van Dijken, G. L.: Annual changes in sea ice and phytoplankton in polynyas of the Amundsen Sea, Antarctica, Deep-Sea Res. Pt. II, 71, 5-15, 2012.

Arrigo, K. R. and van Dijken, G. L.: Continued increases in Arctic Ocean primary production, Prog.Oceanogr., 136, 60-70, 2015.

Arrigo, K. R. and Van Dijken, G. L.: Phytoplankton dynamics within 37 Antarctic coastal polynya systems, J. Geophys. Res., 108, NO. C8, 3271, doi:10.1029/2002JC001739, 2003.

Behrenfeld, M. J. and Boss, E.: Beam attenuation and chlorophyll concentration as alternative optical indices of phytoplankton biomass, J. Mar. Res., 64, 431-451, 2006.

Behrenfeld, M. J., Boss, E., Siegel, D. A. and Shea, D. M.: Carbon .based ocean productivity and phytoplankton physiology from space, Global Biogeochem. Cycles, 19, 2005.

Desortová, B.: Relationship between chlorophyll .a concentration and phytoplankton biomass in several reservoirs in Czechoslovakia, Internationale Revue der gesamten Hydrobiologie und Hydrographie, 66, 153-169, 1981.

Ducklow, H. W., Baker, K., Martinson, D. G., Quetin, L. B., Ross, R. M., Smith, R. C., Stammerjohn, S. E., Vernet, M. and Fraser, W.: Marine pelagic ecosystems: the west Antarctic Peninsula, Philos. Trans. R. Soc. Lond. B. Biol. Sci., 362, 67-94, 2007.

Joughin, I., Smith, B. E. and Medley, B.: Marine ice sheet collapse potentially under way for the Thwaites Glacier Basin, West Antarctica, Science, 344, 735-738, 2014.

Kim, B. K., Joo, H., Song, H. J., Yang, E. J., Lee, S. H., Hahm, D., Rhee, T. S. and Lee, S. H.: Large seasonal variation in phytoplankton production in the Amundsen Sea, Polar Biol., 38, 319-331, 2015.

Kim, B. K., Lee, J. H., Joo, H., Song, H. J., Yang, E. J., Lee, S. H. and Lee, S. H.: Macromolecular compositions of phytoplankton in the Amundsen Sea, Antarctica, Deep-Sea Res. Pt. II, 123, 42-49, 2016.

Koike, I., Holm-Hansen, O. and Biggs, D. C.: Inorganic nitrogen metabolism 348 by Antarctic phytoplankton with special reference to ammonium cycling, Mar. Ecol. Prog. Ser., 30, 105-116, 1986.

Kruskopf, M. and Flynn, K. J.: Chlorophyll content and fluorescence responses cannot be used to gauge reliably phytoplankton biomass, nutrient status or growth rate, New Phytol., 169, 525-536, 2006.

Lee, S. H., Whitledge, T. E. and Kang, S.: Spring time production of bottom ice algae in the landfast sea ice zone at Barrow, Alaska, J. Exp. Mar. Biol., 367,

204-212, 2008.
Lee, S. H., Kim, B. K., Yun, M. S., Joo, H., Yang, E. J., Kim, Y. N., Shin, H. C. and Lee, S.: Spatial distribution of phytoplankton productivity in the Amundsen Sea, Antarctica, Polar Biol., 35, 1721-1733, 2012.
Lee, S. H., Yun, M. S., Kim, B. K., Joo, H., Kang, S.-J., Kang, C. K., Whitledge, T. E.: Contribution of small phytoplankton to total primary production in the Chukchi Sea. Cont. Shelf Res., 68, 43-50, 2013.
Li, W. K., McLaughlin, F. A., Lovejoy, C. and Carmack, E. C.: Smallest algae thrive as the Arctic Ocean freshens, Science, 326, 539, 2009.
Matrai, P., Vernet, M., Hood, R., Jennings, A., Brody, E. and Saemundsdóttir, S.: Light-dependence of carbon and sulfur production by polar clones of the genus Phaeocystis, Mar. Biol., 124, 157-167, 1995.
Moline, M. A., Claustre, H., Frazer, T. K., Schofield, O. and Vernet, M.: Alteration of the food web along the Antarctic Peninsula in response to a regional warming trend, Global Change Biol., 10, 1973-1980, 2004.
Montes-Hugo, M., Doney, S. C., Ducklow, H. W., Fraser, W., Martinson, D., Stammerjohn, S. E. and Schofield, O.: Recent changes in phytoplankton communities associated with rapid regional climate change along the western Antarctic Peninsula, Science, 323, 1470-1473, 2009.
Morán, X. A. G., LÓPEZ .URRUTIA, Á., CALVO .DÍAZ, A. and Li, W. K.: Increasing importance of small phytoplankton in a warmer ocean, Global Change Biol., 16, 1137-1144, 2010.
Paolo, F. S., Fricker, H. A. and Padman, L.: Ice sheets. Volume loss from Antarctic 373 ice shelves is accelerating, Science, 348, 327-331, 2015.
Rückamp, M., Braun, M., Suckro, S. and Blindow, N.: Observed glacial changes on the King George Island ice cap, Antarctica, in the last decade, Global Planet. Change, 79, 99-109, 2011.
Saggiomo, V., Carrada, G., Mangoni, O., d'Alcala, M. R. and Russo, A.: Spatial and temporal variability of size-fractionated biomass and primary production in the Ross Sea (Antarctica) during austral spring and summer, J. Mar. Syst., 17, 115-127, 1998.
Schmidtko, S., Heywood, K. J., Thompson, A. F. and Aoki, S.: Multidecadal warming of Antarctic waters, Science, 346, 1227-1231, 2014.
Timothy, R. P., Yoshiaki, M. and Carol, M.: A manual of chemical and biological methods for seawater analysis, Pergamon Press.Inc, 395, 475-490, 1984.
Tremblay, J. É., Legendre, L., Klein, B. and Therriault, J.: Size-differential uptake of nitrogen and carbon in a marginal sea (Gulf of St. Lawrence, Canada): significance of diel periodicity and urea uptake, Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 47, 489-518, 2000.
Wassmann, P., Duarte, C. M., Agusti, S. and Sejr, M. K.: Footprints of climate change in the Arctic marine ecosystem, Global Change Biol., 17, 1235-1249, 2011.
Yager, P. L., Sherrell, L., Stammerjohn, S. E., Alderkamp, A., Schofield, O., Abrahamsen, E. P., Arrigo, K. R., Bertilsson, S., Garay, D. and Guerrero, R.: ASPIRE: the Amundsen Sea Polynya international research expedition, Oceanography, 25, 40-53, 2012.

KOPRI 극지연구소

주 의

1. 이 보고서는 극지연구소 위탁과제 연구결과보고서 입니다.

2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 극지연구소에서 위탁연구과제로 수행한 연구결과임을 밝혀야 합니다.

3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안됩니다.

KOPRI 극지연구소