

2015-2016년
양극해 급속 용빙해역 환경 모니터링
구축에 관한 연구

Bi-polar monitoring of rapid melting sea ice zone



위탁연구기관/부산대학교



제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “양극해 환경변화 이해 및 활용연구” 과제의 위탁연구 “양극해 급속 융빙해역 환경 모니터링 구축에 관한 연구” 과제의 5차년도의 최종보고서로 제출합니다.



2016. 6.

총괄연구책임자	: 강 성 호
위탁연구기관명	: 부산대학교
위탁연구책임자	: 이 상 현
위탁참여연구원	: 강 재 중, 김 수 민
“	: 김 예 원, 송 호 정
“	: 안 소 현, 이 다 숨
“	: 이 재 형, 이 호 원
“	: 조 나 은

보고서 초록

위탁연구과제명	양극해 급속 용빙해역 환경 모니터링 구축				
위탁연구책임자	이 상 현	해당단계 참여연구원수	10명	해당단계 연구비	150,000,000
연구기관명 및 소속부서명	한국해양과학기술진흥원 / 극지연구소		참여기업명	부산대학교 해양연구소	
국제공동연구	상대국명 : 상대국연구기관명 :				
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)				보고서 면수	36
<p>○ 연구개발결과</p> <p>1) 북극해 Melting pond 및 surface ice의 carbon production 과 new production 조사</p> <ul style="list-style-type: none"> - 북극해에 위치한 북 척치해에서 melt pond 내 식물플랑크톤의 탄소 흡수율은 camp 1에서 평균 0.025 mg C m⁻³h⁻¹(표준편차 = ± 0.024 mg C m⁻³h⁻¹)였고 camp 2에서는 평균 0.077 mg C m⁻³h⁻¹(표준편차 = ± 0.006 mg C m⁻³h⁻¹)로 나타남 - 질소흡수율은 camp 1과 camp 2에서 각각 평균 0.0111 mg N m⁻³h⁻¹(표준편차 = ± 0.0103 mg C m⁻³h⁻¹)와 0.0095 mg N m⁻³h⁻¹(표준편차 = ± 0.0057 mg C m⁻³h⁻¹)로 나타났으며, Melt pond에서 엽록소 a 농도는 camp 1에서 평균 0.12 mg m⁻³(표준편차 = ± 0.012 mg m⁻³)이고 camp 2에서 0.16 mg m⁻³(표준편차 = ± 0.008 mg m⁻³)였으며, 전체적으로 중간 크기의 식물플랑크톤(2-20 µm)이 우점하였음 <p>2) 북극해 sea ice 미세조류의 carbon production 과 new production 조사</p> <ul style="list-style-type: none"> - 척치해에서 sea ice 내 미세조류의 탄소흡수율은 sea ice 1에서 0.020 mg C m⁻³h⁻¹(표준편차 = ± 0.007 mg C m⁻³h⁻¹), sea ice 2에서 0.010 mg C m⁻³h⁻¹(표준편차 = ± 0.004 mg C m⁻³h⁻¹), sea ice 3에서 0.042 mg C m⁻³h⁻¹(표준편차 = ± 0.026 mg C m⁻³h⁻¹)으로 나타남 - 질소흡수율의 경우 sea ice 1, 2, 3에서 각각 평균 0.0026 mg N m⁻³h⁻¹(표준편차 = ± 0.026 mg N m⁻³h⁻¹), 0.0024 mg N m⁻³h⁻¹(표준편차 = ± 0.0011 mg N m⁻³h⁻¹), 0.0104 mg N m⁻³h⁻¹(표준편차 = ± 0.0025 mg N m⁻³h⁻¹)로 나타남 <p>3) 전체적인 ice floe(surface ice, melt pond, sea ice)의 일차생산 기여도 측정</p> <ul style="list-style-type: none"> - 본 연구에서 총 POC 농도에 대한 ice floe의 기여도는 sea ice camp 1에서 7.3 % (surface ice+ melt pond+sea ice = 23.4+21.7+222.5 mg C m⁻²)였고 sea ice camp 2에서는 1.7 % (melt pond+sea ice = 19.4+21.7+123.4 mg C m⁻²)로 나타남 - 총 일차생산에 대한 ice floe의 기여도는 sea ice camp 1에서 6.0 % (melt pond+sea ice = 0.008+0.031 mg C m⁻²h⁻¹)이었고 sea ice camp 2에서 10.7 % (melt pond+sea ice = 0.023+0.093 mg C m⁻²h⁻¹)이였음 					
색 인 어 (각 5개 이상)	한 글	척치해, 탄소생산, 신생산, 식물플랑크톤, 용융연못			
	영 어	Chukchi Sea, carbon production, new production, phytoplankton, melting pond			

요 약 문

I. 제 목

양극해 급속 융빙해역 환경 모니터링 구축

II. 연구개발의 목적 및 필요성

1) 목적

- 남북극해 급속 융빙해역에서의 해빙의 분포 변동 특성에 따른 해빙/해양생태계 탄소순환도 작성을 위한 모니터링 구축
 - 5차년도 연구개발 목표: 북극 척치해 1-4, 북극 동시베리아해 1-2, 북극 베링해 1-2 해역 해양환경특성 조사 및 환경도 작성

• 세부 연구 목표:

- ① 조사 해역 carbon production 및 new production 비교 분석
- ② 해역 carrying capacity 비교 분석
- ③ 해역 food quality 비교 분석

2) 필요성

- 전 지구 온난화 및 기후변화의 영향으로 자연적인 변동성을 넘어서서 양극해(북극/남극)의 해양 환경이 변하고 있음
- 여러 환경변화 중 양극해 해빙/빙하의 시·공간적 분포 변화가 두드러지게 나타나고 있음
- 최근 21세기에 들어 그 변화 정도가 더 가속화되어 최소해빙면적이 관찰된 바가 있고 빙하의 녹는 속도가 최대가 되는 현상들이 관찰됨
- 양극해는 전 세계적 기후체계에 아주 중요한 요인으로 작용하기 때문에 이러한 변화들은 전 세계적 인 규모로 영향을 줌
- 뿐만 아니라, 양극해 급속융빙해역의 환경에 따라 극지생태계에도 변화가 예상되며 해양먹이망의 기초가 되는 식물플랑크톤을 연구함으로써 향후 양극해 환경변화 영향 파악 및 예측에 중요한 과학적 근거 제시할 수 있음

III. 연구개발의 내용 및 범위

1) 조사 해역 carbon production 및 new production 비교 분석

- 조사 해역의 안정동위원소 C-13을 이용한 carbon production 비교 분석
- 조사 해역의 안정동위원소 N-15를 이용한 new production 비교 분석

2) 해역 carrying capacity 비교 분석

- 조사 해역의 carbon production과 new production을 통한 carrying capacity 비교 분석

3) 해역 food quality 비교 분석

- 조사 해역의 carbon production과 new production을 통한 food quality 비교분석

IV. 연구개발결과

1) 북극해 Melting pond 및 surface ice의 carbon production 과 new production 조사

- 북극해에 위치한 북 척치해에서 melt pond 내 식물플랑크톤의 탄소 흡수율은 camp 1에서 평균 $0.025 \text{ mg C m}^{-3}\text{h}^{-1}$ (표준편차 = $\pm 0.024 \text{ mg C m}^{-3}\text{h}^{-1}$)였고 camp 2에서는 평균 $0.077 \text{ mg C m}^{-3}\text{h}^{-1}$ (표준편차 = $\pm 0.006 \text{ mg C m}^{-3}\text{h}^{-1}$)로 나타났다. 질소흡수율은 camp 1과 camp 2에서 각각 평균 $0.0111 \text{ mg N m}^{-3}\text{h}^{-1}$ (표준편차 = $\pm 0.0103 \text{ mg C m}^{-3}\text{h}^{-1}$)와 $0.0095 \text{ mg N m}^{-3}\text{h}^{-1}$ (표준편차 = $\pm 0.0057 \text{ mg C m}^{-3}\text{h}^{-1}$)로 나타났다. Melt pond에서 엽록소 a 농도는 camp 1에서 평균 0.12 mg m^{-3} (표준편차 = $\pm 0.012 \text{ mg m}^{-3}$)이고 camp 2에서 0.16 mg m^{-3} (표준편차 = $\pm 0.008 \text{ mg m}^{-3}$)였으며 전체적으로 중간 크기의 식물플랑크톤($2\text{-}20 \text{ }\mu\text{m}$)이 우점하였다.

2) 북극해 sea ice 미세조류의 carbon production 과 new production 조사

- 척치해에서 sea ice 내 미세조류의 탄소흡수율은 sea ice 1에서 $0.020 \text{ mg C m}^{-3}\text{h}^{-1}$ (표준편차 = $\pm 0.007 \text{ mg C m}^{-3}\text{h}^{-1}$), sea ice 2에서 $0.010 \text{ mg C m}^{-3}\text{h}^{-1}$ (표준편차 = $\pm 0.004 \text{ mg C m}^{-3}\text{h}^{-1}$), sea ice 3에서 $0.042 \text{ mg C m}^{-3}\text{h}^{-1}$ (표준편차 = $\pm 0.026 \text{ mg C m}^{-3}\text{h}^{-1}$)으로 나타났다. 질소흡수율의 경우 sea ice 1, 2, 3에서 각각 평균 $0.0026 \text{ mg N m}^{-3}\text{h}^{-1}$ (표준편차 = $\pm 0.026 \text{ mg N m}^{-3}\text{h}^{-1}$), $0.0024 \text{ mg N m}^{-3}\text{h}^{-1}$ (표준편차 = $\pm 0.0011 \text{ mg N m}^{-3}\text{h}^{-1}$), $0.0104 \text{ mg N m}^{-3}\text{h}^{-1}$ (표준편차 = $\pm 0.0025 \text{ mg N m}^{-3}\text{h}^{-1}$)로 나타났다.

3) 전체적인 ice floe(surface ice, melt pond, sea ice)의 일차생산 기여도 측정

- 본 연구에서 총 POC 농도에 대한 ice floe의 기여도는 sea ice camp 1에서 7.3 % (surface ice+melt pond+sea ice = $23.4+21.7+222.5 \text{ mg C m}^{-2}$)였고 sea ice camp 2에서는 1.7 % (melt pond+sea ice = $19.4+21.7+123.4 \text{ mg C m}^{-2}$)로 나타났다. 총 일차생산에 대한 ice floe의 기여도는 sea ice camp 1에서 6.0 % (melt pond+sea ice = $0.008+0.031 \text{ mg C m}^{-2}\text{h}^{-1}$)이었고 sea ice camp 2에서 10.7 % (melt pond+sea ice = $0.023+0.093 \text{ mg C m}^{-2}\text{h}^{-1}$) 이었다.

V. 연구개발결과의 활용계획

- 남북극해 melt pond 및 해빙, 해빙 밑 수괴의 일차생산성 자료를 통하여 향후 해빙 변동에 따른 해빙/해양 생태계의 총 탄소 버짓의 변화 예측 가능
- 전 지구적 환경변화에 대한 남북극해 해양생태계 보존과 관리를 위한 기반기술 확보하고 종합적인 대응방안 수립을 위한 기술역량 강화방안을 제시
- 장기간 기후변화에 의한 해양생태계의 반응을 관측함으로써 극지뿐 만 아니라 다른 해양생태계의 반응을 예측 및 대책을 수립할 수 있음

Summary

I. Title

Bi-polar monitoring of rapid melting sea ice zone

II. Purpose

1. Monitoring of carbon cycles in sea-ice/marine ecosystems in response to sea-ice dynamics under a rapid sea-ice melting regions in the Arctic and Antarctic Oceans

III. Contents

1. Comparative analysis of carbon production and new production in study area
2. Comparative analysis of carrying capacity in study area
3. Comparative analysis of food quality in study area

IV. Results

1. Measurements of carbon production and new production in melting pond and surface ice
 - In the northern Chukchi sea, carbon uptake rate of phytoplankton in melt pond was average $0.025 \text{ mg C m}^{-3}\text{h}^{-1}$ (S.D. = $\pm 0.024 \text{ mg C m}^{-3}\text{h}^{-1}$) in camp 1 and $0.077 \text{ mg C m}^{-3}\text{h}^{-1}$ (S.D. = $\pm 0.006 \text{ mg C m}^{-3}\text{h}^{-1}$) in camp 2. The nitrogen uptake was $0.0111 \text{ mg N m}^{-3}\text{h}^{-1}$ (S.D. = $\pm 0.0103 \text{ mg C m}^{-3}\text{h}^{-1}$) and $0.0095 \text{ mg N m}^{-3}\text{h}^{-1}$ (S.D. = $\pm 0.0057 \text{ mg C m}^{-3}\text{h}^{-1}$) in camp 1 and camp 2. The chlorophyll a concentrations in melt pond was average 0.12 mg m^{-3} (S.D. = $\pm 0.012 \text{ mg m}^{-3}$) in camp 1 and 0.16 mg m^{-3} (S.D. = $\pm 0.008 \text{ mg m}^{-3}$) in camp 2. Overall, medium-size phytoplankton (2-20 μm) was dominated in the study sites.
2. Measurements of carbon production and new production of microalgae in sea ice
 - In the Chukchi Sea, carbon uptake rates of microalgae in sea was $0.020 \text{ mg C m}^{-3}\text{h}^{-1}$ (S.D. = $\pm 0.007 \text{ mg C m}^{-3}\text{h}^{-1}$) in sea ice 1 and $0.010 \text{ mg C m}^{-3}\text{h}^{-1}$ (S.D. = $\pm 0.004 \text{ mg C m}^{-3}\text{h}^{-1}$) in sea ice 2. In sea ice 3, average value was $0.042 \text{ mg C m}^{-3}\text{h}^{-1}$ (S.D. = $\pm 0.026 \text{ mg C m}^{-3}\text{h}^{-1}$). The nitrogen uptake rates were $0.0026 \text{ mg N m}^{-3}\text{h}^{-1}$ (S.D. = $\pm 0.026 \text{ mg N m}^{-3}\text{h}^{-1}$), $0.0024 \text{ mg N m}^{-3}\text{h}^{-1}$ (S.D. = $\pm 0.0011 \text{ mg N m}^{-3}\text{h}^{-1}$), $0.0104 \text{ mg N m}^{-3}\text{h}^{-1}$ (S.D. = $\pm 0.0025 \text{ mg N m}^{-3}\text{h}^{-1}$) in sea ice 1, 2 and 3, respectively.
3. Measurements of overall contribution of ice floe (surface ice, melt pond, sea ice) to total primary production
 - The contribution of ice floe to total POC concentrations were 7.3 % (surface ice + melt pond + sea ice = $23.4 + 21.7 + 222.5 \text{ mg C m}^{-2}$) in sea ice camp 1 and 1.7 % (melt pond + sea ice = $19.4 + 21.7 + 123.4 \text{ mg C m}^{-2}$) in sea ice camp 2. The contribution of ice floe to overall primary production were 6.0 % (melt pond + sea ice = $0.008 + 0.031 \text{ mg C m}^{-2}\text{h}^{-1}$) in sea ice camp 1 and 10.7 % (melt pond + sea ice = $0.023 + 0.093 \text{ mg C m}^{-2}\text{h}^{-1}$) in sea ice camp 2.

V. Application

- Possible to predict total carbon budgets in sea ice/marine ecosystem under ongoing sea ice variations based on monitoring primary production of melt pond, sea ice and sea ice underwater in the Arctic and Antarctic
- Developing of infratechnology for marine ecology preservation and management against global environmental change and Suggesting improved technology capability plan for setting reaction plan
- Construct countermeasure and prediction of reaction of other marine ecology by monitoring reaction of marine ecology induced by long-term climate change



CONTENTS

Construction of carbon maps in marine ecosystems in the Chukchi sea, Arctic	1
1. Introduction	2
A. Research purpose and necessity	2
1) Research necessity	2
2) Research purpose	2
2. Overview of previous research	3
3. Details on research	4
A. Materials and methods	4
1) Study area	4
2) Analysis of concentrations of chlorophyll-a, nutrient, and POC concentrations	5
3) Carbon and nitrogen productivity	5
B. Results and Discussion	7
1) Environmental conditions in sea ice and water column	7
2) Total and size chlorophyll-a and POC concentrations in the sea ice	10
3) Primary productivity of phytoplankton in sea ice	11
4) Primary productivity of phytoplankton in water column under sea ice	13
4. Achievement and external contribution	20
A. Achievement	20
B. External contribution	20
5. Application	21
6. References	22

목 차

북극 척치해 생태계 탄소순환 조사	1
제 1 장. 서론	2
제 1 절. 연구개발의 목적 및 필요성	2
1. 연구의 필요성	2
2. 연구개발 목표	2
제 2 장 국내외 기술개발 현황	3
제 1 절. 국외연구 및 기술동향	3
제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과	4
제 1 절. 연구수행 내용 및 결과	4
1. 연구방법	4
가. 연구지역	4
나. 엽록소 a, 영양염, POC 농도 분석	5
다. 탄소와 질소 생산	5
2. 연구결과 및 토의	7
가. 해빙과 수괴의 환경적 요소	7
나. 해빙의 엽록소 a와 POC 농도	10
다. 해빙의 식물플랑크톤 일차생산력	11
라. 해빙 및 수괴의 일차생산력	13
제 4장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도	20
제 1절 연구개발목표 달성도	20
1. 연구개발 목표의 달성도	20
2. 연구결과의 대외기여도	20
제 5 장 연구개발결과의 활용계획	21
제 1절 연구개발결과 활용방안	21
제 6 장 참고문헌	22

북극 척치해 생태계 탄소순환



제 1 장 서론

제 1 절 연구개발 목적 및 필요성

1. 연구의 필요성

여름동안 북극해빙에서 흔히 발견되는 특징인 Melt pond는 눈이 녹거나 표층 얼음이 녹아 형성된다 (Rösel and Kaleschke, 2012; Lee et al., 2015). 이전 연구에서 두꺼운 다년빙이 존재할 때 여름에 형성된 melt pond는 단지 해빙표층에 생성된 얇은 담수 웅덩이였고 이러한 melt pond는 그 밑에 놓인 해수와 연결되지 않았다 (Lee et al., 2012). Melt pond는 담수 환경이기 때문에 해산 후생동물이 발견되지 않는다 (Kramber and Kiko, 2011). 해빙이 얇아짐에 따라 melt pond는 폐쇄된 상태에서 개방된 형태로 바뀌어 ice floe아래에 위치한 해수와 연결된다 (Lee et al., 2011; Lee et al., 2015). Kramber and Kiko (2011)은 개방된 melt pond는 기수인 성질과 얼음의 유공성에 의한 접근성 때문에 해산 후생동물에게 새로운 서식지를 제공한다 하였다. 가을이 되면, 새로운 해빙이 melt pond의 표층에 형성되고 재결빙된 개방된 melt pond에 축적된 얼음조류는 유광층에서 보다 먹이 가용성이 더 효율적이기 때문에 (Lee et al., 2012; Lee et al., 2015) 상위영양단계 동물에게 먹이를 제공 한다 (Lee et al., 2011).

해빙의 내부와 바닥에 존재하는 얼음조류의 대변성은 원양의 대변성보다 약 두 달 이른 시기인 초봄 (4월)에 시작하고 겨울을 나는 동물플랑크톤에게 먹이로써 제공되기 때문에 중요한 먹이원이 된다 (Michel et al., 1996; Lee et al., 2008; Lee et al., 2011; Fernández-Méndez et al., 2014). 게다가, Fernández-Méndez et al. (2014)은 늦은 가을에 그들의 먹이원이 희박할 때 도 얼음조류가 섭식자의 먹이원이 된다고 언급하였다. 특히, 얼음조류의 생산성은 대륙붕에서 그 기여도가 1 %미만인 것에 비해 해빙이 덮인 북극해 중앙부에서 총 생산성의 약 60 %까지 기여할 수 있어 더 중요하다 (Gosselin et al., 1997; Rysgaard et al., 2011; Lee et al., 2015).

Lee et al., (2012)는 melt pond의 년 간 일차생산의 기여도는 전체 북극해에 1 %정도 미만이라고 서술하였다. 비록 이러한 기여도가 중요하지 않을지 라고 melt pond에서의 생산은 농축된 효과를 고려하였을 때 중요한 먹이원이다. 게다가 Lee et al. (2015)은 유광층에 대한 ice floe (surface ice+melt pond+sea ice)의 POC 기여도는 북극해에서 3-5 %사이라고 보고하였다. 하지만, 해빙과 연관된 일차생산에 대한 연구는 중앙 북극해에서 거의 드물게 진행되었고 특히, melt pond는 더 희소하다 (Gradinger, 2002; Lee et al., 2015).

2. 연구개발의 목표

본 연구는 2014년 여름동안 북극 척치해에서 한국 연구 쇄빙선 ARAON에서 진행되었다. 본 연구의 목적은 현장에서의 조류의 탄소와 질소 섭취율을 이용하여 melt pond의 식물플랑크톤과 해빙의 얼음조류의 일차생산을 측정하고 북극해에서의 ice floe의 일차생산 기여도를 측정하는 것이다.

제 2 장 국내외 기술개발 현황

제 1 절 국외연구 및 기술동향

- 지난 50년간의 극지연구 여건이 변화되면서 21세기 극지연구는 전 세계적으로 새로운 패러다임에 입각해 추진되고 있음
 - 극지연구를 통한 세계 공헌이 국익을 확보하는 기본요소로 변화
 - 지구환경변화의 척도로서 양극해의 중요성 강화
 - 에너지와 자원문제 해결을 위한 양극해의 활용 필요성 증가
 - 첨단 과학기술발전에 따른 양극해 개발의 가능성 증대
 - 양극해에 대한 선진국들의 기득권 확보 노력 강화
- 최근에 양극해(Bi-polar ocean)를 동시에 비교 연구하고자 하는 세계적인 연구추세가 확산되어 최근 국제 북극과학위원회(IASC)와 남극과학위원회(SCAR)가 양극과학협력위원회(BipAG, Bipolar Action Group)을 창설
- 극지연구 선도국가들은 극지의 자연 환경적 특수성, 과학적 가치 및 지정학적 요인에 따라 전략적 투자를 통해 극지에 대한 연구 및 활동을 점차 강화
- 극지분야의 중요성을 감안해 대부분 국가들이 정부가 설립한 국립연구기관이 극지연구를 담당하거나 정부기관이 극지연구를 관할하는 형태를 취함
- 북극연구에 있어서도 최근 지구온난화로 인해 북극 지역에 대한 접근성이 높아짐에 따라 러시아, 미국 등 북극권 국가들은 북극에 대한 자국의 영향력 확대를 위해 북극 관련 정책 및 지침 수립
- 非북극권 국가들은 북극이사회(Arctic Council) 옵저버 가입 추진, 유럽극지위원회(EPB)와 같은 다자간 협력연구체제를 기반으로 북극연구에 진출하고자 노력
- 선진극지연구국가들은 중·장기 대규모 연구 로드맵을 수립하여 연구 프로그램을 수행
- 또한 중장기 연구 프로그램 로드맵에 국제공동연구 프로그램을 반영하여, 국내·외 연구기관 및 대학들이 공동 참여할 수 있도록 지원하는 허브 역할을 수행
- 극지는 자연 환경적 특성상 대기권·지권·수권·빙권·생물권을 포함한 천연의 바이오엄 과학 실험장이자 기후변화 연구의 최적지라는 점을 감안하여 극지역 환경변화 연구를 지속적으로 수행
- 특히 최근 급속한 기후변화에 있어 극지의 역할 규명이 큰 이슈로 부각되는 가운데, 기후변화 연구, 장기적 환경 모니터링 등에 보다 중점을 둔 연구 활동을 추진
- 북극과학위원회(IASC)와 남극과학위원회(SCAR)는 양극과학협력위원회 IASC/SCAR Bi-Polar Action Group II(BigAG II)을 구성하여 SCAR와 IASC가 함께 효율적으로 연구할 수 있는 양극연구 방안을 모색하고, IPY(국제극지의해) 기간 동안 SASC와 IASC가 함께 효율적으로 연구할 수 있는 양극연구 방안을 모색하고, IPY(국제극지의해) 기간 동안 IASC와 SCAR에서 수행했던 연구들을 양극연구 도출을 통해 지속적이고 의미 있는 연구 수행 방안 도출 추진 중
- BipAG II에서는 양극해 연구 활성화를 위한 권고 연구 분야로는 해양산성화, 해양-대기 이산화탄소, 해양지질학 분야, 극지해양 관측시스템 구축을 포함한 14개 연구 분야를 추천하였음

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제 1 절 연구수행 내용 및 결과

1. 연구방법

가. 연구지역

현장에서의 자료는 한국 쇄빙선 Araon에서 승선하여 척치해 북부에서 두 ice camp에서 채취하였다 (그림 1). 2014년 8월 9일부터 12일 까지 ice camp 1 (146.17 °W, 77.38 °N)에서, 8월 22일부터 24일 동안 ice camp 2 (169.79 °W, 76.52 °N)에서 샘플을 채취하였다. 해빙의 두께는 ice camp 1에서 대략 1.1 m에서 > 3.5 m, ice camp 2에서 0.8 m에서 < 2.5 m까지 다양하였다.

Ice camp 1에서 22개의 melt pond 샘플을 채취하였고 ice camp 2에서 11개의 melt pond 샘플을 얻었다. Melt pond의 염분과 수온은 ice camp에서 YSI 모델 85 (YSI incorporated, Yellow Spring, Ohio)로 측정하였고 분석 정확도는 염분의 경우 $\pm 2\%$ 였고 수온의 경우 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 였다. 샘플링 기간 동안 Melt pond의 표층은 대부분은 약간 결빙되었다.

8-cm 직경의 해빙코어 (Mark coring system, Kovacs, USA)를 이용하여 melt pond내에서 몇몇 해빙코어가 두 해빙코어 정점에서 추출되었다. Ice camp 1에서 다른 두께의 해빙이 두 개 (sea ice 1과 sea ice 2)가 추출 되었고 ice camp 2에서 sea ice 3를 얻었다. 해빙코어내에서 퇴적물 혹은 얼음조류는 시각적으로 보이지 않았다. 해빙코어의 하층, 중층, 상층으로부터 10 cm 조각을 얻었고 이것은 일차생산 배양을 위해 절단되었고 그 이후 엽록소 a (chl-a), 영양염, 입자성 유기탄소 (POC)의 농도를 측정하기 위해서 실험실에서 해동되었다.

해빙코어 정점 아래에서 얻은 해수 샘플은 ice auger ($\text{Ø} = 24\text{ cm}$)로 뚫은 구멍을 통해 10L Niskin bottle를 이용하여 ice floe 아래에서부터 60 m 까지 즉, 6가지 수심 (0 m, 10 m, 20 m, 30 m, 40 m, 60 m)에서 얻었다. 샘플링 이후에 해빙 아래의 해수 샘플의 염분과 온도는 즉시 YSI 모델 85 (YSI incorporated, Yellow Spring, Ohio)를 이용하여 측정하였다.

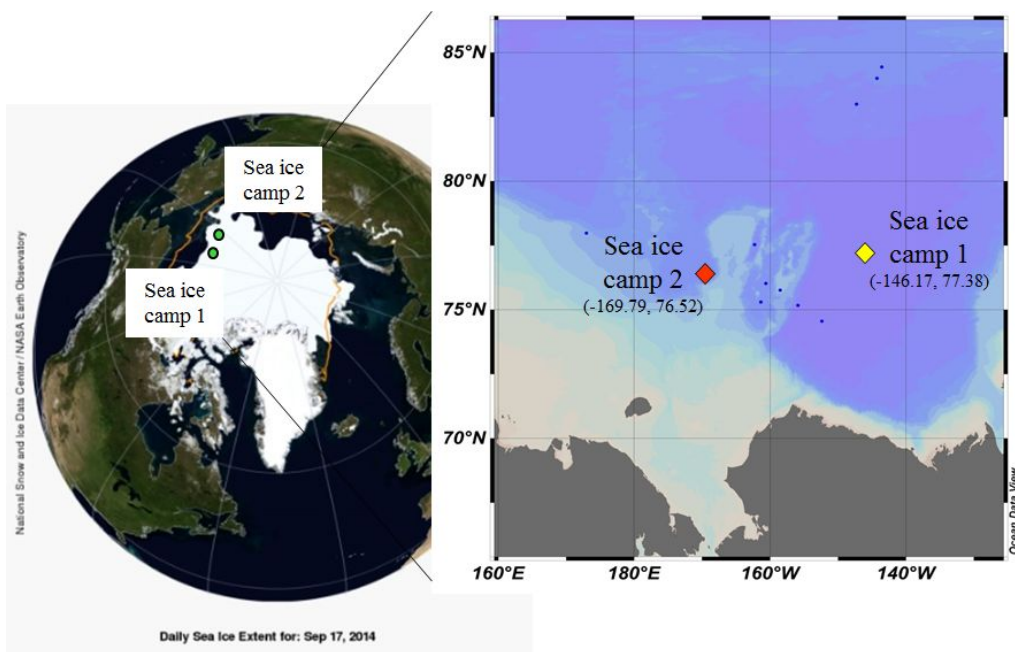


그림 1. 2014년 척치해의 ice camp 정점 위치

나. 엽록소 a, 영양염, POC 농도 분석

조사 기간 동안 엽록소 a와 POC 농도 분석을 위한 해수 샘플 (0.5 L)은 공극크기가 0.7 μm 인 Whatman 유리섬유 필터지 (GF/F; 24 mm)를 이용하여 여과되었다. 크기가 다른 엽록소 a 농도를 측정하기 위해서 해수 (1 L)를 연속적으로 20 μm 와 5 μm Nuclepore 필터지(47 mm) 그리고 0.7 μm Whatman GF/F 필터지(47 mm)로 여과하였다. 필터지는 이후의 분석 전까지 냉동되었다. 24시간 동안 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 에서 90 % 아세톤으로 추출된 이후에, 총 그리고 크기별 엽록소 a의 농도는 Trilogy fluorometer (Turner Designs, Inc., USA)을 통해 측정되었다. POC 농도 분석을 위한 필터지는 $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 냉동고에 즉시 냉동되었고 미국의 알래스카 대학에서 mass spectrometric analysis를 위해 보관되었다.

Melt pond, 해빙코어, 해빙 밑의 여러 수층의 영양염 샘플 (인산염, 아질산염+질산염, 암모니아, 규산염)은 선상에서 자동 영양염 분석기기 (Quattro; Bran+Luebbe, Germany)를 이용하여 광학적으로 분석되었다. 아질산염+질산염과 암모니아 농도는 식물플랑크톤과 얼음조류의 질산염과 암모늄 섭취율을 계산하기 위해 사용되었다.

다. 탄소와 질소 생산

Melt pond에서의 생산성 실험은 Lee et al (2012; 2015)에 서술된 과정에 따라 북극해에서 ^{13}C - ^{15}N dural isotope tracer 기술에 따라 진행되었다. 탄소와 질소 섭취율을 알기위해서 해수가 채워져 있는 깨끗한 Nalgene polycarbonate bottle (1 L)에 무거운 isotope-enriched (98-99 %) H^{13}CO_3 와 K^{15}NO_3 용액을 각각 첨가하였다. Melt pond water이 채워진 다른 한 쌍의 깨끗한 polycarbonate bottle (1 L)에 H^{13}CO_3 와 K^{15}NO_3 용액을 첨가하였다. 측정된 dark 섭취율은 박테리아 과정 (Gosselin et al., 1997)이라 추정하기 때문에 Light 탄소 섭취율을 보정하기 위한 dark 탄소 섭취율의 경우, H^{13}CO_3 isotope 용액만 dark bottle에 투여하였다. 무거운 isotope-enriched (98-99 %) H^{13}CO_3 와 K^{15}NO_3 와 $^{15}\text{NH}_4\text{Cl}$ 용액은 $\sim 0.2\text{ }\mu\text{M}$ ($^{13}\text{CO}_2$), $\sim 0.2\text{ }\mu\text{M}$ ($^{15}\text{NO}_3$), $\sim 0.1\text{ }\mu\text{M}$ ($^{15}\text{NH}_4$) 농도로 각 샘플에 투여하였다 (Lee et al., 2012; Lee et al., 2015). 동위원소가 주입된 샘플을 배양한 후에 bottle은 현장에서의 온도와 빛 조건에 따라 4-5시간 동안 pond에 보관하였다.

해빙코어의 얼음조류의 섭취율을 측정하기 위해서, Lee et al. (2008)과 동일한 방법을 따랐다. 전체적인 해빙코어는 조심스럽게 추출되었고 낮은 광도에서 해빙코어의 하층, 중층, 표층으로부터 10 cm로 (전체적인 해빙 두께에 따라) 3개 혹은 4개의 조각으로 나누었다. 각각의 10 cm 조각은 여러 조각으로 더 나뉘어졌고 깨끗한 wide-neck Nalgene polycarbonate bottle (1 L)에 넣었다. 각각의 병은 측정된 부피의 차가운 여과된 (GF/F) 해수로 더 보충되었고 H^{13}CO_3 와 K^{15}NO_3 와 $^{15}\text{NH}_4\text{Cl}$ isotope 용액이 주입되었다. Core의 나머지 부분과 다른 부분의 10 cm의 얼음이 들어있는 3개 혹은 4개의 배양 bottle은 wire barrel로 원래의 위치에 놓여졌다. 해빙코어와 배양 bottle과 전체적인 wire barrel은 원래의 코어 hole로 다시 제자리에 갖다 놓았다 (그림 2). 배양 hole의 상부는 배양하는 동안 hole을 통해 인위적인 빛 투과를 감소시키기 위해 눈으로 덮었다. 현장에서 4-5 시간 동안 배양한 후에, 각각의 wire barrel은 배양한 장소에서 수거되었고 선상으로 가져가 빛 투과를 방지하기 위해 dark ice box에서 보관하였다. 배양 bottle의 10 cm의 해빙코어는 dark 상온의 dark 조건에서 3-4 시간동안 해동되었고 그 이후 여과하였다. 해동시킨 후에 배양 bottle의 최종 부피는 여과된 해수를 첨가하기 전에 얼음조류의 섭취율을 보정하기 위해 기록되었다.

해빙 아래의 식물플랑크톤의 탄소와 질소 섭취율의 현장 측정은 3 가지 다른 ice 정점

(sea ice 1, ice 2, ice 3)에서 수행되었고 ice의 평균 두께는 1.27 m로 평균 25 cm의 눈이 덮혀 있었다. 식물플랑크톤의 탄소와 질소 섭취율은 해빙 아래와 해빙 배양 hole 주변에서 6개의 수심 (0 m, 10 m, 20 m, 30 m, 40 m, 60 m)에서 측정되었다. 해수를 채수하고 isotope 용액을 첨가한 후에, 배양 bottle (1 L)은 바닥에 있는 추와 함께 닻줄에 묶였고 해빙 아래의 현장 수온과 빛 조건의 그들의 원래 장소로 놓여졌다 (그림 2). 해빙 아래에 배양을 위해 뚫은 작은 구멍 ($\varnothing = \sim 10$ cm)은 해빙 코어로 채워졌고 배양 하는 동안 인공적인 빛 투과를 감소시키기 위해 눈으로 덮여졌다.

모든 배양 병은 4-5 시간 배양 한 후에 회수되었고 pre-combusted GF/F 필터지 (24 mm)를 통해 여과되었다. 필터지는 즉시 -80 °C에 냉동되었고 UAF의 안정동위원소분석 전까지 보존되었다. POC/PON의 농도와 $^{13}\text{C}/^{15}\text{N}$ 의 풍부도는 탄산염을 제거하기 위해 하룻밤 동안 HCl fuming을 한 후에 Finnigan Delta+XL mass spectrometer로 분석하였다.

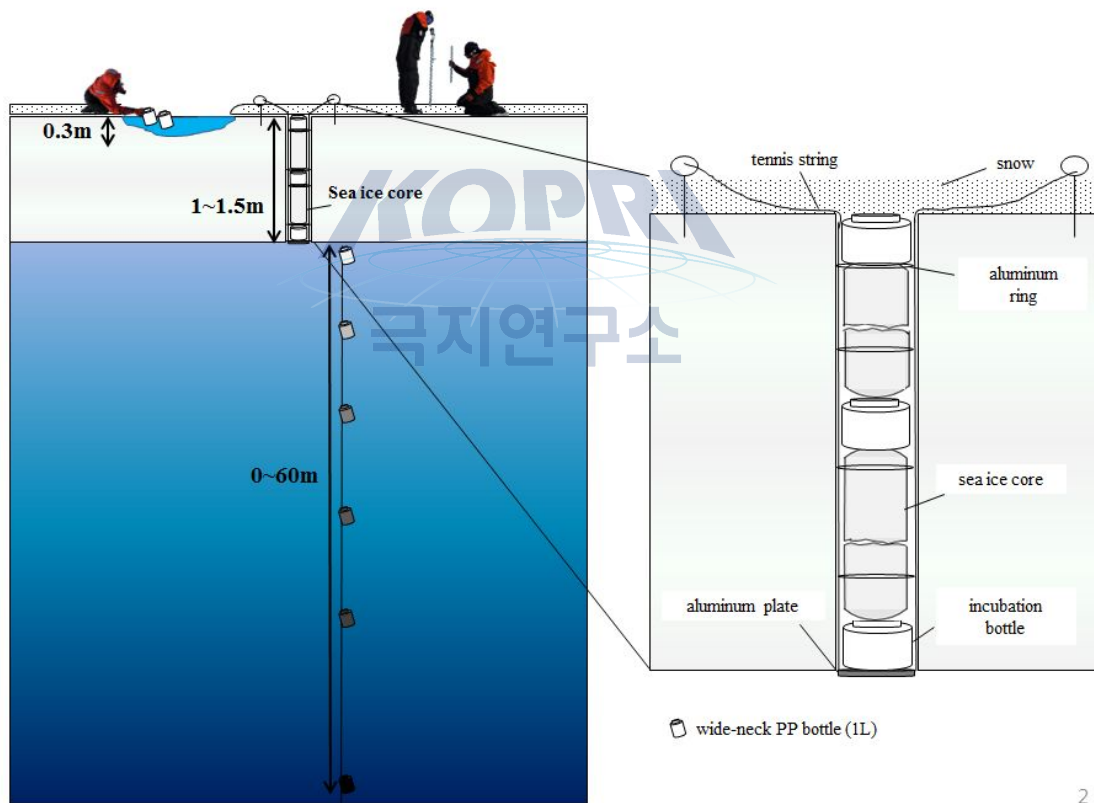


그림 2. 2014년 sea ice camp에서 melt pond, 해빙 코어의 현장 배양과 그 밑의 수층의 기본 디자인

2. 연구결과 및 토의

가. 해빙과 수괴의 환경적 요소

Melt pond의 환경적 요소에 대한 조사는 camp 1과 camp 2에서 각각 22개와 11개의 ponds에서 수행되었다. 대부분의 melt pond는 수심이 약 0.3 m인 closed ponds 타입으로 나타났다 (표 1). Melt ponds의 수온범위는 camp 1 (1.3 ~ 0.8 °C)과 camp 2 (-1.5 ~ 0.4 °C) 간에 큰 변동성을 보이지 않았다. 염분의 경우에는 camp 1과 camp 2에서 각각 0.1 ~ 26.8 psu (평균 ± 표준편차 = 16.7 ± 10.8 psu) 와 0 ~ 26.9 psu (평균 ± 표준편차 = 12.3 ± 11.6 psu)의 범위로 나타났다. 본 연구에서 해빙 코어의 두께는 camp 1에서 sea ice 1은 1.0 m, sea ice 2는 1.2 m로 나타났다. Camp 2에서 sea ice 3의 두께는 1.4 m로 나타났다 (표 1). 해빙 코어의 수온은 camp 1에서는 sea ice 1과 sea ice 2 각각 -1.1 ~ -1.8 °C, -1.2 ~ -1.8 °C로 나타났고, camp 2에서 sea ice 3은 -1.3 ~ -0.9 °C로 나타났다. Melt pond의 염분과 다르게, 해빙코어는 camp 1에서 sea ice 1과 2에서 각각 0.0 ~ 1.6 psu와 0.2 ~ 1.4 psu로 낮은 변동성을 보였고 sea ice 3에서는 1.6 ~ 2.4 psu의 범위로 camp 1 보다는 다소 낮게 나타났다. 해빙 밑의 수괴 (표층부터 수심 60 m까지)에서 수온과 염분은 camp 1에서는 -1.4 ~ 0.2 °C와 27.0 ~ 30.9 psu로 나타났고, camp 2에서는 -0.9 ~ 0.4 °C와 27.7 ~ 31.7 psu로 나타났다 (표 1).

Camp 1에서 melt pond의 영양염 (PO_4 , NO_2+NO_3 , NH_4 , SiO_2) 농도는 각각 0.02 ~ 0.51 μM (평균 ± 표준편차 = 0.21 ± 0.16 μM), 0.0 ~ 0.28 μM (평균 ± 표준편차 = 0.03 ± 0.07 μM), 0.0 ~ 0.53 μM (평균 ± 표준편차 = 0.12 ± 0.19 μM), and 0.0 ~ 1.72 μM (평균 ± 표준편차 = 0.47 ± 0.55 μM)로 나타났다 (그림 3). Camp 2에서는 PO_4 , NO_2+NO_3 , NH_4 , SiO_2 의 농도가 각각 0.0 ~ 0.24 μM (평균 ± 표준편차 = 0.07 ± 0.06 μM), 0.0 ~ 0.49 μM (평균 ± 표준편차 = 0.12 ± 0.16 μM), 0.0 ~ 0.25 μM (평균 ± 표준편차 = 0.08 ± 0.09 μM), 0.0 ~ 2.71 μM (평균 ± 표준편차 = 0.83 ± 1.10 μM)로 나타났다. Camp 1과 camp 2간의 영양염 농도는 큰 차이를 나타내지 않았다 (그림 3). 해빙 코어의 경우, sea ice 1의 PO_4 와 NH_4 농도는 0.05 ~ 0.09 μM (평균 ± 표준편차 = 0.08 ± 0.03 μM)와 0.10 ~ 0.26 μM (평균 ± 표준편차 = 0.15 ± 0.09 μM)의 범위로 나타났고, sea ice 2는 0.01 ~ 0.06 (평균 ± 표준편차 = 0.04 ± 0.02)와 0 ~ 0.06 (평균 ± 표준편차 = 0.03 ± 0.03) μM 의 범위로 나타났다 (그림 3). Sea ice 3 (ice camp 2)에서 PO_4 와 NH_4 농도는 0.05 ~ 0.1 μM (평균 ± 표준편차 = 0.07 ± 0.02 μM)와 0.19 ~ 0.28 μM (평균 ± 표준편차 = 0.26 ± 0.04 μM)의 범위로 나타났다. 본 연구의 해빙 코어에서 NO_2+NO_3 와 SiO_2 농도는 모두 고갈되어 있었다 (그림 3). 해빙 밑 수괴의 경우에는 PO_4 , NO_2+NO_3 , SiO_2 농도는 under ice 1 정점에서 0.54 ~ 0.67 μM (평균 ± 표준편차 = 0.57 ± 0.05 μM), 0.0 ~ 0.02 μM (평균 ± 표준편차 = 0.01 ± 0.01 μM), 1.90 ~ 2.94 μM (평균 ± 표준편차 = 2.13 ± 0.40 μM)로 나타났고 under ice 2 정점에서는 0.52 ~ 0.77 μM (평균 ± 표준편차 = 0.58 ± 0.10 μM), 0.0 ~ 0.39 μM (평균 ± 표준편차 = 0.06 ± 0.16 μM), 1.75 ~ 4.42 μM (평균 ± 표준편차 = 2.25 ± 1.07 μM)로 나타났다 (그림 3). Camp 2의 under ice 3 정점에서 PO_4 , NO_2+NO_3 , SiO_2 농도는 각각 0.53 ~ 3.51 μM (평균 ± 표준편차 = 1.39 ± 1.0 μM), 0.0 ~ 6.48 μM (평균 ± 표준편차 = 1.52 ± 2.55 μM), 3.76 ~ 13.8 μM (평균 ± 표준편차 = 6.26 ± 3.88 μM)로 나타났다. NH_4 농도는 under ice 1과 under ice 2 정점에서는 고갈되었고, under ice 3정점에서 0 ~ 3.70 μM 의 범위로, 평균 0.77 μM 로 나타났다 (그림 3). 일반적으로 camp 2의 water 정점에서 camp 1의 다른 ice 정점보다 높은 수준의 영양염 농도를 보였다.

표 1. 해빙 캠프에서 melt pond, 해빙코어, 해빙 밑 수괴의 환경적 요인들. (a) ice camp 1 (b) ice camp 2.

(a)

Number	Width x length (m ²)	Depth (m)	Temperature (°C)	Salinity (psu)
Melt pond				
MP1	5.1*8.1	0.3	0.1	0.2
MP3	5.5*6	0.3	0.1	0.5
MP4	7.3*4.9	0.3	0.4	0.4
MP5	18.*10	0.3	0.8	24.8
MP6	23.*15	0.3	-1	22.7
MP7	5.8*7.8	open	-1.3	26.3
MP8	6.4*6.7	0.3	-0.9	23.2
MP9	45*8	open	-1.3	26
MP10	5.1*7.3	open	-1.2	26.3
MP11	25.*20	open	-1.3	26.8
MP12	35*15	open	-1.3	26.7
MP13	4.6*7.1	0.3	0.3	0.9
MP14	6.9*3.9	open	-1	25.7
MP15	7.1*3.3	0.3	-1	22.2
MP16	9.14.5	0.3	0.3	1.5
MP17	12.4*6.2	0.3	-0.5	22.2
MP18	8.9*9.9	0.3	-0.8	21
MP19	8*2.3	0.3	-0.8	19.9
MP20	0.4*0.8	0.3	-0.7	15.2
MP21	4.2*3.3	0.3	-0.8	17.6
MP22	4.6*2.9	0.3	0.1	0.1
average	-	0.3	-0.6	16.7
S.D.	-	-	0.7	10.8
Sea ice core				
length (m)				
ice core 1	1	-	-1.1	1.6
ice core 2	1.3	-	-1.2	1.4
Water column				
st.19	-	-	-0.9	28.4

(b)

Number	Width x ₂ length (m)	Depth (m)	Temperature (°C)	Salinity (psu)
Melt pond				
MP23	8*15.7	0.4	0.4	0
MP24	5.3*8	0.3	0.2	0.1
MP25	10.5*4	0.3	0.1	0.5
MP26	3*7.3	0.2	0	1.8
MP28	11.8*5	0.3	-1.2	26.6
MP29	25.7*8.7	0.4	-1.5	26.9
MP30	3.3*4.6	0.3	-1.3	25.1
MP31	5.8*3.5	0.3	-1.3	23.3
MP32	18.2*10	0.3	-0.9	17.5
MP36	2.6*3.9	0.3	-0.5	8.8
MP37	7.5*2.9	0.2	-0.1	4.9
average	-	0.3	-0.6	12.3
S.D.	-	-	0.7	11.6
Sea ice core				
ice core 3	length (m)	-	-0.9	2.4
Water column				
st.32	-	-	-0.9	29.7

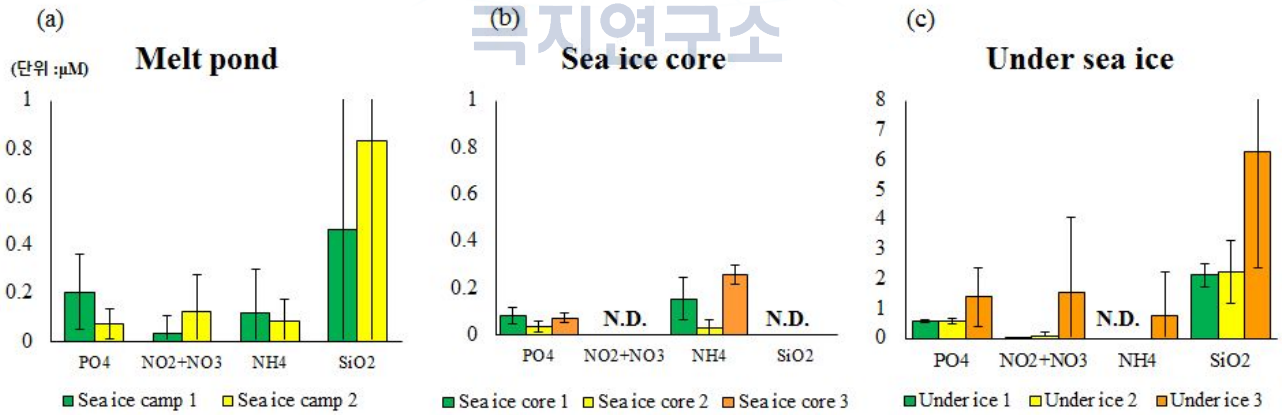


그림 3. 해빙 캠프에서 주요 무기 영양염 농도 (μM) (a) melt pond (b) 해빙 코어 (c) 해빙 밑 수괴.

나. 해빙의 엽록소 *a*와 POC 농도

Melt pond의 chl-*a* 농도는 camp 1에서 평균 $0.12 \text{ mg chl-}a \text{ m}^{-3}$ (표준편차 = $\pm 0.12 \text{ mg chl-}a \text{ m}^{-3}$)로 $0.02 \sim 0.56 \text{ mg chl-}a \text{ m}^{-3}$ 범위로 나타났다 (그림 4). Camp 2에서 chl-*a* 농도는 평균 $0.16 \text{ mg chl-}a \text{ m}^{-3}$ (표준편차 = $\pm 0.08 \text{ mg chl-}a \text{ m}^{-3}$)로 camp 1 보다 약간 높았고 $0.08 \sim 0.30 \text{ mg chl-}a \text{ m}^{-3}$ 범위로 나타났다. 하지만, camp 1과 camp 2간의 농도는 큰 차이를 보이지 않았다 (*t*-test, $p > 0.05$). 가장 높은 chl-*a* 농도는 MP9에서 $0.56 \text{ mg chl-}a \text{ m}^{-3}$ 로 나타났고, 가장 낮은 농도는 MP16에서 $0.05 \text{ mg chl-}a \text{ m}^{-3}$ 로 나타났다. Melt pond의 사이즈 조성은 camp 1에서 nanoplankton ($2\text{-}20\mu\text{m}$; 78 %)이 가장 우세하게 나타났고, 그 다음 micro-plankton ($>20 \mu\text{m}$; 18 %), 마지막으로 picoplankton ($0.7\text{-}2 \mu\text{m}$; 4 %)이 우세하게 나타났다 (그림 5). 이와 유사하게, camp 2에서 사이즈 조성 또한 nanoplankton, micro-plankton, picoplankton 크기별로 각각 63 % ($\pm 12 \%$), 29 % ($\pm 11 \%$), 8 % ($\pm 7 \%$)의 비율을 차지했다. 비록 pond의 식물플랑크톤 군집에 micro-plankton의 기여도는 camp 1 (18 %)에서 보다 camp 2 (29 %)에서 더 높았으나 nanoplankton는 본 연구에서 가장 우세한 구성이었다. Melt pond의 surface ice의 평균 POC 농도는 camp 1에서 $270.7 \text{ mg C m}^{-3}$ (표준편차 = $\pm 61.4 \text{ mg C m}^{-3}$)로 나타났고, melt pond는 78.0 mg C m^{-3} (표준편차 = $\pm 19.1 \text{ mg C m}^{-3}$)로 나타났다. Camp 2에서 melt pond의 평균 POC 농도는 62.9 mg C m^{-3} (표준편차 = $\pm 11.7 \text{ mg C m}^{-3}$)로 나타났다 (surface ice 자료 없음). 해빙 코어의 chl-*a* 농도는 sea ice 1과 sea ice 2의 경우 각각 $0.03 \sim 0.08 \text{ mg chl-}a \text{ m}^{-3}$ (평균 \pm 표준편차 = $0.05 \pm 0.03 \text{ mg chl-}a \text{ m}^{-3}$), $0.03 \sim 0.10 \text{ mg chl-}a \text{ m}^{-3}$ (평균 \pm 표준편차 = $0.06 \pm 0.03 \text{ mg chl-}a \text{ m}^{-3}$)의 범위로 나타났다 (그림 6). Sea ice 3의 chl-*a* 농도는 $0.02 \sim 0.15 \text{ mg chl-}a \text{ m}^{-3}$ (평균 \pm 표준편차 = $0.06 \pm 0.06 \text{ mg chl-}a \text{ m}^{-3}$)로 나타났다. 일반적으로 해빙에서의 chl-*a*의 농도는 표층에서부터 중간 부분 (바닥으로부터 $0.4\text{-}0.6$)까지 감소하였고 하부층에서 가장 높은 값을 보였다. Ice algae의 평균 POC 농도는 camp 1과 camp 2에서 각각 $219.7 \text{ mg C m}^{-3}$ (S.D.= $\pm 47.7 \text{ mg C m}^{-3}$), 96.6 mg C m^{-3} (S.D.= $\pm 48.2 \text{ mg C m}^{-3}$)로 나타났다.

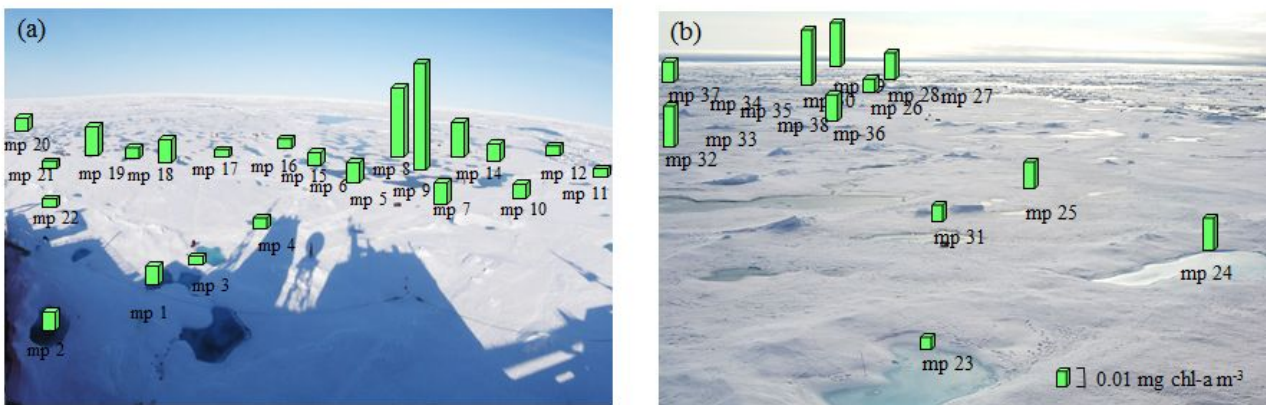


그림 4. Melt pond의 chl-*a* 농도 ($\text{mg chl-}a \text{ m}^{-3}$). (a) ice camp 1 (b) ice camp 2.

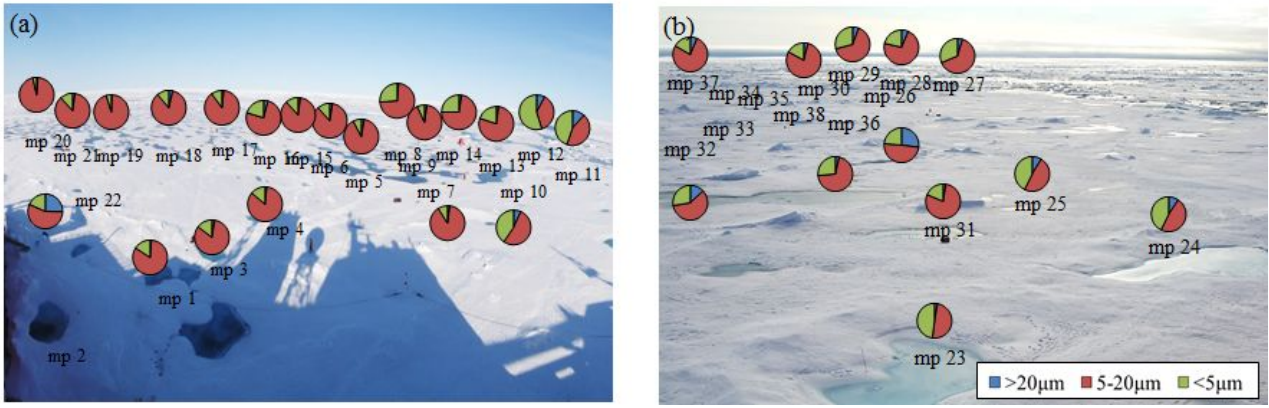


그림 5. Melt pond의 chl-a 농도의 사이즈 조성. (a) ice camp 1 (b) ice camp 2.

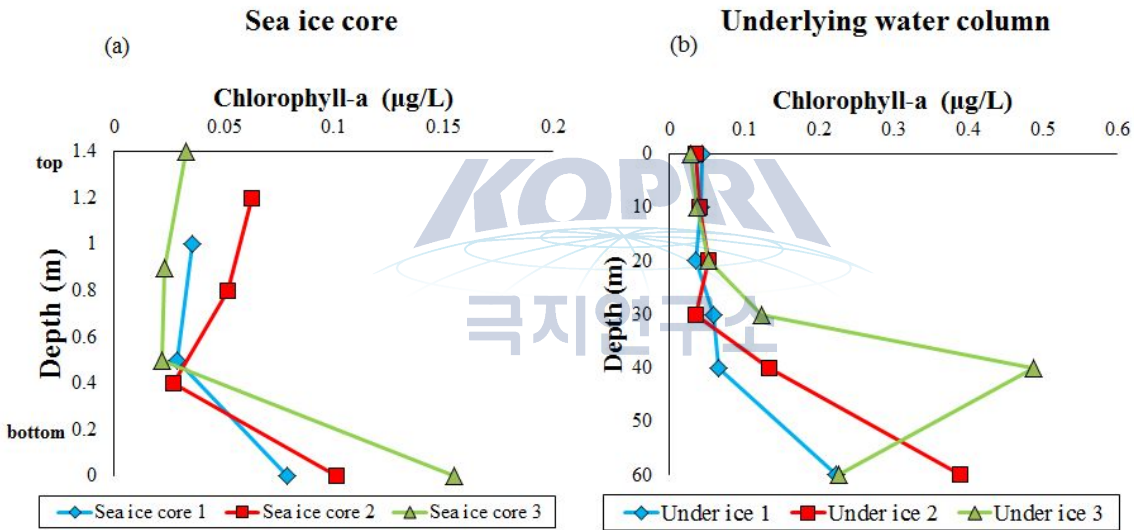


그림 6. 해빙 캠프에서 chl-a 농도 (mg chl-a m^{-3})의 수직적 프로파일. (a) sea 해빙코어 (b) underlying water column.

다. 해빙의 식물플랑크톤 일차생산력

Melt pond에서 식물플랑크톤의 탄소흡수율은 camp 1에서 $0.001 \sim 0.080 \text{ mg C m}^{-3} \text{ h}^{-1}$ (평균 \pm 표준편차 = $0.025 \pm 0.024 \text{ mg C m}^{-3} \text{ h}^{-1}$)의 범위로 나타났고, camp 2에서는 $0.022 \sim 0.21 \text{ mg C m}^{-3} \text{ h}^{-1}$ (평균 \pm 표준편차 = $0.077 \pm 0.006 \text{ mg C m}^{-3} \text{ h}^{-1}$)로 나타났다 (그림 7). 질소흡수율 ($\text{NO}_3 + \text{NO}_2$ 와 NH_4)은 camp 1과 camp 2에서 각각 $0.0009 \sim 0.0296 \text{ mg N m}^{-3} \text{ h}^{-1}$ (평균 \pm 표준편차 = $0.0111 \pm 0.0103 \text{ mg N m}^{-3} \text{ h}^{-1}$)와 $0.0024 \sim 0.0222 \text{ mg N m}^{-3} \text{ h}^{-1}$ (평균 \pm 표준편차 = $0.0095 \pm 0.0057 \text{ mg N m}^{-3} \text{ h}^{-1}$)로 나타났다 (그림 7). 탄소흡수율의 경우에는 camp 1보다 camp 2에서 3배 정도 높게 나타났고, 질소흡수율의 경우에는 비슷한 값을 나타냈다 (t-test, $p > 0.05$). Sea ice 1와 sea ice 2의 탄소흡수율 범위는 각각 $0.013 \sim 0.027 \text{ mg}$

C m⁻³ h⁻¹ (평균 ± 표준편차 = 0.020 ± 0.007 mg C m⁻³ h⁻¹), 0.005 ~ 0.015 mg C m⁻³ h⁻¹ (평균 ± 표준편차 = 0.010 ± 0.004 mg C m⁻³ h⁻¹)로 나타났다 (그림 8). Sea ice 3의 경우에는 0.023 ~ 0.080 mg C m⁻³ h⁻¹ (평균 ± 표준편차 = 0.042 ± 0.026 mg C m⁻³ h⁻¹)의 범위로 나타났다. 일반적으로, 해빙 코어에서 탄소흡수율은 생물량 증가로 인해 표층에서 바닥으로 갈수록 증가하는 패턴을 나타냈다. 질소의 경우, sea ice 1와 sea ice 2에서 각각 0.0006 ~ 0.0056 mg N m⁻³ h⁻¹ (평균 ± 표준편차 = 0.0026 ± 0.0026 mg N m⁻³ h⁻¹), 0.0015 ~ 0.0038 mg N m⁻³ h⁻¹ (평균 ± 표준편차 = 0.0024 ± 0.0011 mg N m⁻³ h⁻¹)로 나타났고, sea ice 3의 경우에는 0.0072 ~ 0.0132 mg N m⁻³ h⁻¹ (평균 ± 표준편차 = 0.0104 ± 0.0025 mg N m⁻³ h⁻¹)로 나타났다. 일반적으로 NH₄ 농도가 NO₃+NO₂ 농도보다 높은 값을 나타냈다.

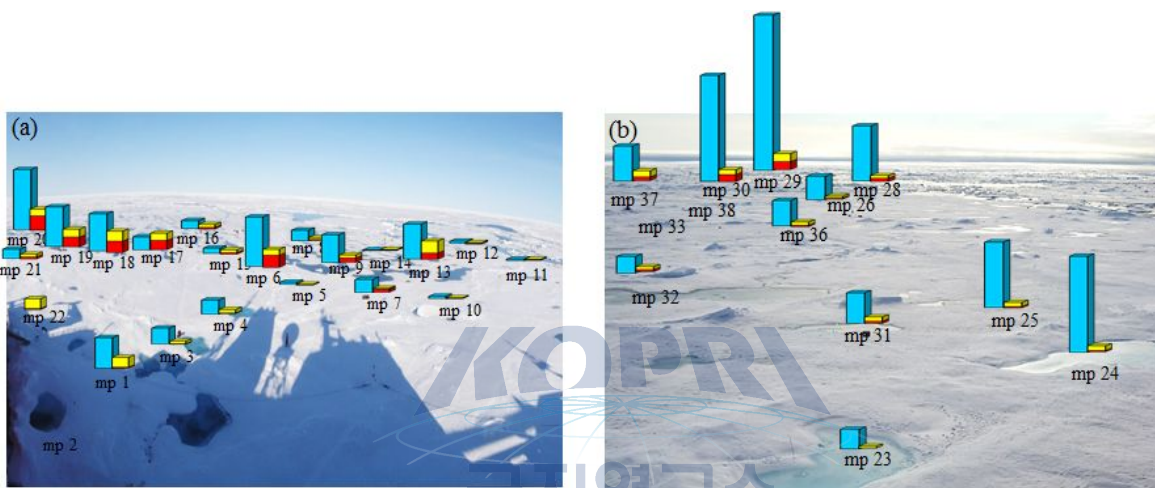


그림 7. Melt pond내 식물플랑크톤의 탄소와 질소흡수율(mg m⁻³ h⁻¹)의 공간적인 분포. (a) ice camp 1 (b) ice camp 2.

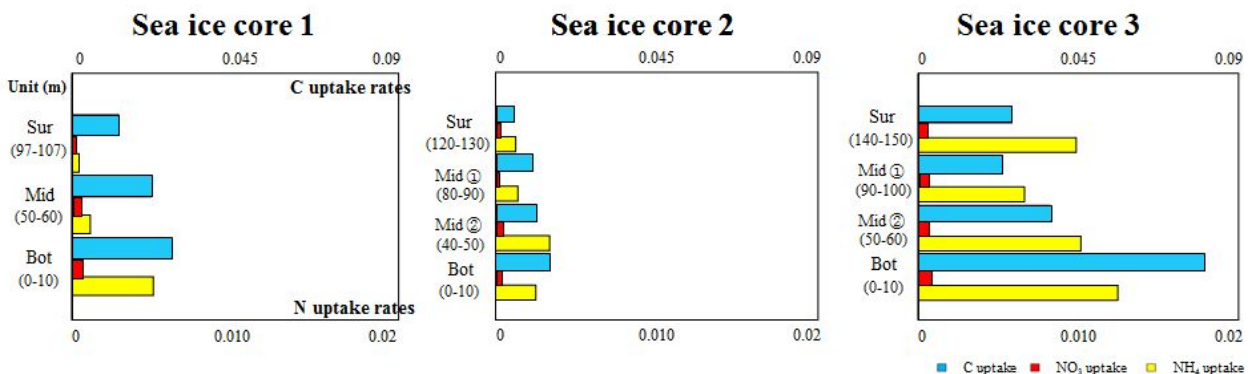


그림 8. Ice algae의 탄소와 질소흡수율(mg m⁻³ h⁻¹)의 수직적 프로파일

라. 해빙 밑 수괴의 일차생산력

Under ice 1과 under ice 2의 탄소흡수율은 $0.004 \sim 0.011 \text{ mg C m}^{-3} \text{ h}^{-1}$ (평균 \pm 표준편차 = $0.007 \pm 0.003 \text{ mg C m}^{-3} \text{ h}^{-1}$), $0.002 \sim 0.018 \text{ mg C m}^{-3} \text{ h}^{-1}$ (평균 \pm 표준편차 = $0.011 \pm 0.006 \text{ mg C m}^{-3} \text{ h}^{-1}$)로 나타났다 (그림 9). Under ice 3의 경우에는 $0.000 \sim 0.032 \text{ mg C m}^{-3} \text{ h}^{-1}$ (평균 \pm 표준편차 = $0.015 \pm 0.010 \text{ mg C m}^{-3} \text{ h}^{-1}$)의 범위로 나타났다. Under ice 1와 under ice 2의 질소흡수율 범위는 $0.0011 \sim 0.0020 \text{ mg N m}^{-3} \text{ h}^{-1}$ (평균 \pm 표준편차 = $0.0017 \pm 0.0003 \text{ mg N m}^{-3} \text{ h}^{-1}$), $0.0005 \sim 0.0014 \text{ mg N m}^{-3} \text{ h}^{-1}$ (평균 \pm 표준편차 = $0.0008 \pm 0.0004 \text{ mg N m}^{-3} \text{ h}^{-1}$)의 범위로 나타났다. Under ice 3의 경우에는 $0.0003 \sim 0.0191 \text{ mg N m}^{-3} \text{ h}^{-1}$ (평균 \pm 표준편차 = $0.0056 \pm 0.0081 \text{ mg N m}^{-3} \text{ h}^{-1}$)로 비슷한 범위를 나타냈다. 해빙 밑 수괴에서 탄소와 질소흡수율은 깊이에 따라 특정한 분포를 보이지 않았다.

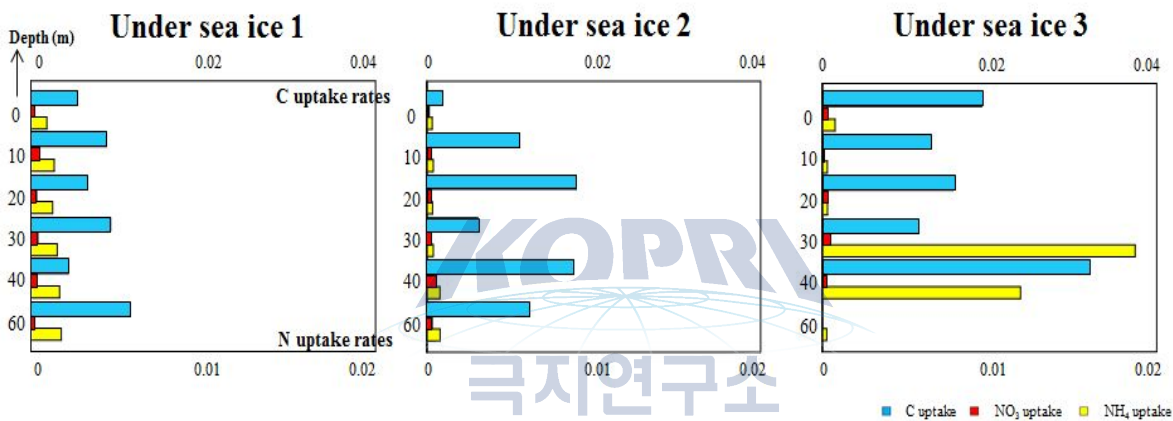


그림 9. 해빙 밑 수괴에서 식물플랑크톤의 탄소와 질소흡수율($\text{mg m}^{-3} \text{ h}^{-1}$)의 수직적 프로파일.

Camp 1에서 melt pond는 두 개의 다른 타입의 pond가 발견되었지만, camp 2에서는 open pond가 발견되지 않았다. 본 연구에서 melt pond의 평균 염분의 15.2 psu로 이전 연구에 비해 가장 높은 값을 나타냈는데 (표 2), 이는 이전 연구에 비해 발견된 open pond 수가 증가했기 때문이다. Melt pond의 평균 수온은 $-0.6 \text{ }^\circ\text{C}$ 로 Lee et al. (2012)과 Lee et al. (2015)에 의해 보고된 수온보다 다소 낮았다 (표 2). 본 연구에서 closed pond의 평균 수심은 0.3 m으로 이전에 보고된 수온보다 약간 낮게 나타났다 (표 2). 영양염의 농도는 이전 연구와 비교 시 비슷한 농도 범위에 속해있었다 (표 2). 본 연구에서 melt pond의 평균 chl-*a* 농도는 $0.14 \text{ mg chl-a m}^{-3}$ (표준편차 = $\pm 0.11 \text{ mg chl-a m}^{-3}$)로 이는 Lee et al. (2012) (2005년에 $0.60 \text{ mg chl-a m}^{-3}$, 2008년에 $0.20 \text{ mg chl-a m}^{-3}$)와 Lee et al. (2015) (2011년에 $0.32 \text{ mg chl-a m}^{-3}$)에 의해 보고된 농도보다 낮게 나타났는데 (표 2), 이는 melt pond의 surface ice때문인 것 같다. 이전 연구와 비교해 본 연구에서 상대적으로 낮았던 표준 수온($-0.6 \text{ }^\circ\text{C}$)으로 인해 샘플 당시 대부분의 melt pond에서 surface ice가 얼어있었다. Lee et al. (2015) surface ice의 POC 농도가 melt pond 내 농도보다 더 높다고 보고했다. 실제로 본 연구에서도

surface ice의 POC 농도는 70.7 mg C m^{-3} 로 melt pond (78.0 mg C m^{-3})와 해빙코어 ($174.9 \text{ mg C m}^{-3}$)의 값보다 높게 나타났다. 게다가, Lee et al (2015)에 의해 보고된 surface ice의 POC 농도 (평균 \pm 표준편차 = $148.0 \pm 86.0 \text{ mg C m}^{-3}$)보다도 높게 나타났다. 이것은 본 연구의 샘플링 당시 melt pond 내 식물플랑크톤의 상당량이 surface ice에 갇혀있음을 의미하고, 이로 인해 melt pond내 chl-*a* 농도가 낮은 값을 나타냈음을 암시한다. Closed pond의 낮은 수심 (0.3 m) 또한 낮은 chl-*a* 농도에 영향을 미쳤을 수도 있다. 본 연구에서 melt pond의 평균 탄소와 질소흡수율은 Lee et al. (2012)과 Lee et al. (2015)에 의해 보고된 값 중 가장 낮은 값을 나타냈다 (표 2). Lee et al. (2015)는 위도에 따른 빛의 변화가 melt pond의 탄소흡수율에 가장 큰 영향을 미치는 요소라고 보고했다. 그러나 본 연구에서 melt pond내 탄소흡수율은 $0.04 \text{ mg C m}^{-3} \text{ h}^{-1}$ 로 2014년에 보고된 값 ($0.47 \text{ mg C m}^{-3} \text{ h}^{-1}$)보다 약 한 단위정도 낮게 나타났다 (표 2). 게다가, 본 연구의 평균 빛 세기($204.94 \mu\text{mol photons m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)는 2011년도에 측정된 세기($197.94 \mu\text{mol photons m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)와 크게 다르지 않았는데 (2005년도와 2008년도는 자료 없음), 두 연도간의 탄소흡수율은 약 한 단위 정도 차이가 나타났다 (표 2). 그러므로 본 연구에서는 위도에 따른 빛 세기가 melt pond내 일차생산성에 영향을 미치는 주요요소가 아닌 것 같다 (Fernández-Méndez 2015). 그러나 본 연구에서 이전 연구에 비해 두꺼운 surface ice가 melt pond내로 투과되는 빛의 세기를 감소시킬 수도 있음을 고려해야 한다. 이와 비교하여, 샘플링 시기 또한 생산성과 밀접한 관계가 있을 수 있다. 본 연구에서 melt pond내 탄소흡수율은 2008년에 측정된 값(평균 = $0.09 \text{ mg C m}^{-3} \text{ h}^{-1}$)과 비슷하게 나타났는데, 본 연구와 2008년도의 연구지역은 위도 차이가 나타났지만, 연구 기간은 8월 초에서 8월 말로 비슷한 시기를 나타냈다 (표 2). 또한, 본 연구의 탄소흡수율은 연구 기간이 6월에서 7월 사이였던 2005년도에 측정된 값보다는 약 한 단위 낮게 나타났다 (표 2). 본 연구와 이전 연구의 값을 비교 시, melt pond 내 탄소흡수율은 시기에 따른 차이를 나타냈다. 뿐만 아니라, chl-*a* 농도 또한 시기적인 차이를 나타냈는데, 본 연구에서 chl-*a* 농도와 탄소흡수율은 높은 상관관계를 나타냈다 (그림 10). 이는 melt pond 내 탄소흡수율은 식물플랑크톤의 시기적인 변동성에 크게 영향받음을 의미한다. 실제로 북극 지역은 식물플랑크톤 생물량의 시기적 변동성이 매우 큰 지역으로 알려져 있다 (Wang et al., 2005). 질소흡수율 또한 탄소흡수율과 비슷한 패턴을 보였다. 가장 높은 질소흡수율은 2005년에 였고 가장 낮은 값은 본 연구로 나타났고, 이는 생물량의 패턴과 잘 맞게 떨어졌다 (표 2). 그러므로, 본 연구에서는 melt pond 내 식물플랑크톤의 시기적인 생물량 변동성이 생산성에 가장 큰 영향을 미치는 요소로 사료된다. 영양염의 농도 또한 melt pond 내 생산성에 영향을 미칠 수 있는데 이는 영양염이, 특히 질소 같은 경우 북극에서 탄소와 질소흡수율에 영향을 미치는 중요한 요소이기 때문이다 (Tremblay and Gagnon, 2009). 그러나 본 연구에서 영양염의 농도는 이전 연구와 비교 시 비슷한 범위 내에 속해있었기 때문에 melt pond의 생산성에 크게 영향을 미치지 않은 것으로 사료된다. Lee et al. (2015)는 melt pond 내 생산성에 있어 위도에 따른 빛의 세기가 가장 큰 영향을 미치는 요소라고 보고했지만, 본 연구에서는 빛 세기보다는 식물플랑크톤의 생물량이 가장 주요한 요소라고 사료된다. 최근에, 기후변화로 인해 melt pond는 급속하게 증가하고 있으며 이는 집중된 먹이원을 제공해줌으로써 상위영양단계자와 일차생산자에게 중요한 서식처를 제공해 줄 수 있다 (Lee et al., 2011; Lee et al., 2015). 그러므로 melt pond 내 식물플랑크톤을 조절하는 요소와 환경적인 조건들을 파악하는 연구가 변화하는 북극생태계를 이해하는데 중요한 역할을 할 것이다.

표 2. 본 연구와 이전 연구 간의 melt pond 내 식물플랑크톤의 생산성과 환경 요소의 비교.

YEAR	Latitude (N°)	Sampling period	T (°C)	S (psu)	Chl-a (mg m ⁻³)	PO ₄ (μM)	NO ₂ +NO ₃ (μM)	NH ₄ (μM)	SiO ₂ (μM)	C uptake ₁ (mg m ⁻³ h ⁻¹)	N uptake ₁ (mg m ⁻³ h ⁻¹)
Melt ponds											
2005	74°~76°	Late June~late July	0.6	3.8	0.6	0.12	0.13	0.16	0.52	0.47	0.27
2008	82°~84°	Early August~late August	-0.1	5.1	0.2	0.11	0.14	0.20	0.21	0.09	0.02
2011	77°~78°	Late July~mid-August	-0.2	13.5	0.32	0.19	0.24	0.52	1.03	0.36	0.04
2014 (In this study)	76°~78°	Early August~late August	-0.6	15.2	0.14	0.15	0.07	0.10	0.61	0.04	0.01



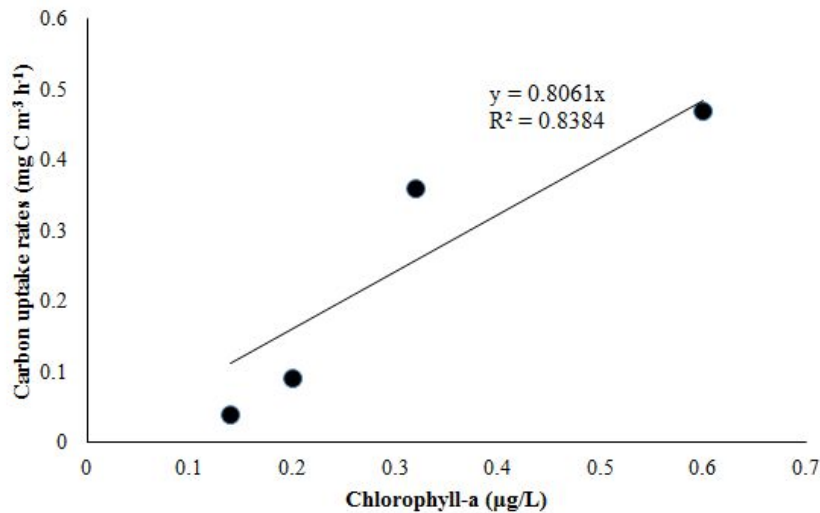


그림 10. Melt pond 내 탄소흡수율($\text{mg C m}^{-3} \text{h}^{-1}$)과 chl-a 농도($\mu\text{g/L}$)간의 상관관계

본 연구에서 가장 높은 POC 농도는 해빙 코어에서 $172.9 \text{ mg C m}^{-2}$ 로 가장 높게 나타났고 (camp 1에서 $222.4 \pm 35.1 \text{ mg C m}^{-2}$ 로 나타났고 ice camp 2에서는 $123.4 \text{ mg C m}^{-2}$ 로 나타났다), 그 다음으로 melt pond에서 21.4 mg C m^{-2} 로 나타났다 (ice camp 1에서는 $23.4 \pm 5.7 \text{ mg C m}^{-2}$ 로 나타났고 ice camp 2 $19.4 \pm 3.1 \text{ mg C m}^{-2}$ 로 나타났다) (그림 11). Melt pond의 surface ice의 평균 POC 농도는 21.7 mg C m^{-2} (표준편차 = $\pm 4.9 \text{ mg C m}^{-2}$)로 melt pond와 다른 두께임에도 불구하고 비슷한 농도와 비슷한 값을 나타냈다 (surface ice: 0.08 cm, melt pond: 0.3 cm). 이 패턴은 Lee et al. (2015)에 의해 보고된 것과 비슷한데, Lee et al. (2015)는 surface ice가 가장 높은 평균 integrated POC 농도를 나타내었다고 보고했다. 해빙 밑 수괴의 평균 POC 농도는 camp 1에서는 $3649.7 \text{ mg C m}^{-2}$ (표준편차 = $\pm 930.4 \text{ mg C m}^{-2}$)였고 camp 2에서는 $8365.7 \text{ mg C m}^{-2}$ 로 나타났다. Surface ice를 포함한 melt pond의 POC 기여도는 camp 1과 camp 2에서 각각 1.2 %와 0.2 %로 나타났다 (그림 11). Camp 2에서 melt pond의 POC 기여도는 0.2 %로 camp 1에 비해 상대적으로 낮게 나타났는데, 이는 camp 2에서는 surface ice에 대한 자료가 없었기 때문으로 사료된다. 이는 camp 1에서 surface ice의 POC 기여도가 약 0.6 %로 높은 기여도를 나타냈기 때문이다. Lee et al. (2015)는 리터 당 POC 농도가 surface ice (평균 \pm 표준편차 = $148.0 \pm 86.0 \text{ mg C m}^{-3}$)에서 가장 높았다고 보고했다. 실제로 본 연구에서도 surface ice의 POC 농도 (평균 \pm 표준편차 = $270.7 \pm 61.4 \text{ mg C m}^{-3}$) 또한 가장 높게 나타났다. 아마도 camp 2에서의 낮은 POC 농도는 surface ice에 대한 자료 부족이 어느 정도 영향을 미쳤을 것이다. 총 POC 농도에 대한 해빙의 POC 기여도는 camp 1과 camp 2에서 각각 6.8 %와 1.7 %로 나타났다 (그림 11). 특히 camp 1에서 POC 기여도는 5.7 %로 Lee et al. (2015)에 의해 보고된 기여도(2.8–5.3%)보다 높게 나타났다. 이와 비교하여, camp 2에서 POC 농도 기여도는 약 1.7 %로 상대적으로 낮게 나타났다. 그러나 이것이 camp 2에서 해빙의 POC 농도($123.4 \text{ mg C m}^{-2}$)가 낮았음을 의미하진 않는다. 왜냐하면 camp 2에서 평균 POC 농도는 Lee et al. (2015)에 보고된 농도 범위($108.6\text{--}178.4 \text{ mg C m}^{-2}$)내에 속해 있기 때문이다. Camp 2에서의 상대적으로 낮은 POC 기여도는 아마 해빙 및 수괴의 POC 농도가 상대적으로 높았기 때문이라 사료된다. 해빙 밑 수괴의 POC 농도는 camp 1보다 camp 2에서 약 2배 정도 높게 나타났다 (그림 11).

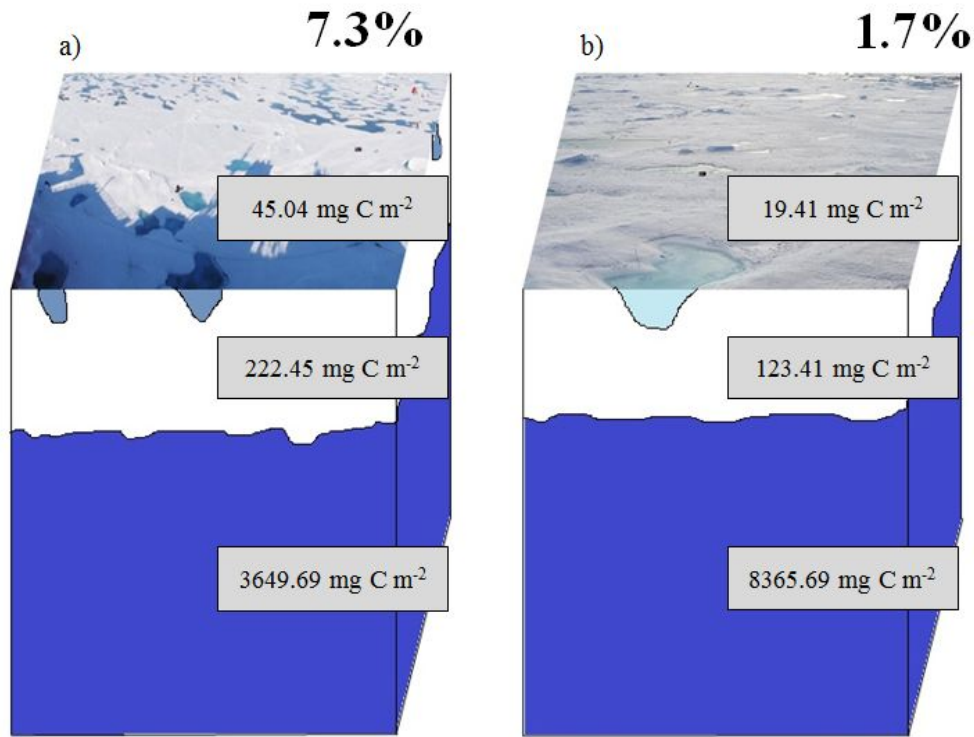
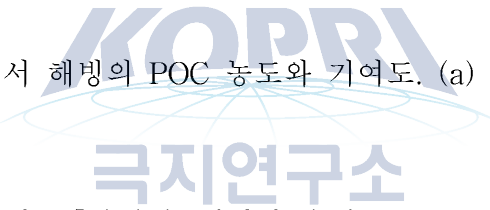


그림 11. 해빙 캠프에서 해빙의 POC 농도와 기여도. (a) sea ice camp 1 (b) sea ice camp 2



일반적으로, integrated 탄소흡수율은 해빙과 수괴 모두 camp 1보다 camp 2에서 높게 나타났다 (그림 12). Melt pond와 해빙 코어의 탄소흡수율은 camp 1에서 각각 $0.008 \text{ mg C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ (표준편차 = $\pm 0.007 \text{ mg C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$)와 $0.031 \text{ mg C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ (표준편차 = $\pm 0.011 \text{ mg C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$)로 나타났고, camp 2에서는 각각 $0.023 \text{ mg C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ (표준편차 = $\pm 0.018 \text{ mg C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$)와 $0.093 \text{ mg C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 로 나타났다. Camp 1에서 해빙 밑 수괴의 탄소흡수율은 $0.594 \text{ mg C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ (표준편차 = $\pm 0.214 \text{ mg C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$)로 camp 2에서의 농도 ($0.971 \text{ mg C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$)보다 약 반 정도의 값을 나타냈다. 본 연구에서 해빙의 탄소흡수율은 일반적으로 낮은 값을 나타냈다. 여름철 북극 지역에서 24시간 주기를 가정하면 (Subba Rao and Platt 1984; Lee and Whitley 2005; Lee et al., 2010), melt pond의 하루 동안(daily)의 탄소흡수율은 $0.01 \sim 1.97 \text{ mg C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 범위로 나타났는데 이는 이전 연구에 보고된 농도의 낮은 범위 ($0.01 \sim 4.30 \text{ mg C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)에 속해 있었다 (Lee et al., 2012; Lee et al., 2015; Fernández-Méndez et al., 2015). Ice algae의 탄소흡수율 ($0.55\text{--}2.23 \text{ mg C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) 또한 이전에 Barents Sea와 Greenland Sea ($0.76\text{--}9.67 \text{ mg C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$; Mock and Gradinger, 1999), 그리고 북극해 ($0.5\text{--}310 \text{ mg C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$; Gosselin et al., 1997)에서 측정된 농도의 낮은 범위에 속해있었다. Gradinger (2009) 또한 Chukchi Shelf에서 ice algae의 하루 동안의 탄소흡수율이 $20 \sim 30 \text{ mg C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 범위로 나타났다고 보고했다. 해빙 밑 수괴에서 식물플랑크톤의 탄소흡수율도 이전에 보고된 값에 비해 낮은 값에 속해있었다. 본 연구에서 탄소흡수율의 범위는 $0.63 \sim 23.30 \text{ mg C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (평균 = $17.28 \text{ mg C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)로 나타났는데 이는 Lee et al. (2010)에 의해 보고된 northern Chukchi Sea에서 측정된 값 ($20.4\text{--}178.3 \text{ mg C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)보다 낮게 나타났다. 그러나 Fernández-Méndez

et al. (2015)가 보고된 북극 중앙 지역에서 측정된 값 ($0.1-60.0 \text{ mg C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)의 낮은 범위에 속해있었다. 본 연구에서 탄소흡수율이 낮게 나타난 것은 낮은 chl-*a*와 영양염 농도때문으로 사료된다. Melt pond의 chl-*a* 농도는 Lee et al. (2012)와 Lee et al. (2015)에 의해 보고된 값 중 가장 낮은 농도를 나타냈다 (표 2). 특히, ice algae의 평균 chl-*a* 농도 ($0.05 \text{ mg chl-a m}^{-2}$)는 이전에 측정된 값보다 약 한 단위 또는 두 단위 정도 낮게 나타났다 ($0.1-14 \text{ mg chl-a m}^{-2}$; Mock and Gradinger, 1999; Gosselin et al., 1997). 해빙 코어에서 NO_2+NO_3 와 SiO_2 농도는 모두 고갈되어 있었는데, 이는 그 당시 식물플랑크톤의 성장을 위한 환경적 요소가 비우호적이었음을 의미한다. 해빙 밑 수괴에서 chl-*a* 농도 ($0.03-0.49 \text{ mg chl-a m}^{-3}$) 또한 Lee et al. (2010)에 측정된 값 ($<0.1-1.0 \text{ mg chl-a m}^{-3}$)보다 낮은 범위에 속해 있었다. 비록 본 연구에서는 해빙과 수괴 모두 탄소흡수율이 낮게 나타났을지라도, 탄소흡수율에 대한 기여도는 낮게 나타나지 않았다. 본 연구에서 총 일차생산력에 대한 해빙의 기여도는 약 6.0 %에서 10.7 %의 범위로 나타났다 (그림 12). 특히, 총 생산력에 대한 ice algae의 기여도는 약 4.8 ~ 8.6 %의 범위로 이는 Gosselin et al. (1997)에 의해 보고된 범위 (2 ~ 5 %)보다 높게 나타났다. 총 생산력에 대한 melt pond의 기여도의 범위는 약 1.2 ~ 2.1 %로 ice algae의 기여도에 비해서는 낮지만, melt pond와 해빙 코어의 두께를 감안하면 melt pond의 기여도가 낮지 않다 (표 2). 또한, 본 연구에서 camp 2에서는 surface ice에 대한 자료가 포함되지 않았기 때문에, 총 생산력에 대한 기여도는 과소평가되었음을 고려해야 한다. 본 연구에서 melt pond의 기여도는 이전에 측정된 범위에 속해있었다 ($<1 - 10 \%$, Arrigo, 2014; Lee et al., 2012; Fernández-Méndez et al., 2015). Lee et al. (2015)는 해빙이 상대적으로 분산되어 있는 수괴보다 집중된 먹이원을 제공해 줄 수 있다고 보고했다. 본 연구에서 총 생산력에 대한 해빙의 평균 기여도는 약 8 %로 Lee et al. (2015)에 의해 측정된 POC를 기반으로 한 범위 (2.8 - 5.3 %)보다 높게 나타났다. 이는 앞으로 북극생태계에 있어 해빙이 식물플랑크톤 섭식자에게 먹이이용성뿐 만 아니라 높은 효율성을 제공해 줄 것으로 사료된다.

Camp 1에서 melt pond, 해빙 코어, 해빙 밑 수괴의 하루 동안의 질소흡수율은 각각 $0.080 \text{ mg N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, $0.064 \text{ mg N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, $1.929 \text{ mg N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 로 나타났다. 이와 비교하여, camp 2에서서의 질소흡수율은 각각 $0.068 \text{ mg N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, $0.336 \text{ mg N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, $9.351 \text{ mg N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 로 나타났다. 일반적으로, 해빙 코어와 수괴 모두 NO_2+NO_3 농도보다는 NH_4 농도가 높게 나타났다 (그림 7과 그림 8). 반면, melt pond에서는 NO_2+NO_3 와 NH_4 농도 둘 다 비슷한 값을 나타냈다 (그림 6). 이는 해빙 코어와 수괴에서는 신생산보다는 재생산이 더 우세함을 암시한다. 본 연구에서 평균 assimilated C/N 비는 해빙 코어에서 10.7 로 가장 높게 나타난 반면, melt pond 내 C/N 비는 약 6.1로 해빙 밑 수괴와 비슷한 비를 나타냈다. Redfield 비 (6.6)보다 높은 C/N 비는 그 당시 질소 제한이 크게 작용했음을 의미한다 (Redfield et al. 1963). 이는 melt pond나 해빙 밑 수괴보다 해빙 코어에서 질소 제한이 컸음을 암시한다 (Gosselin et al., 1997; Lee et al., 2010). 또한 해빙 코어의 f-ratio는 약 0.14로 melt pond나 해빙 밑 수괴에 비해 가장 낮은 값을 나타냈는데 이 또한 그 당시 해빙 코어가 질소가 제한된 환경임을 의미한다. 이와 반대로 가장 높은 f-ratio는 melt pond에서 약 0.38로 나타났는데 이는 melt pond 내 질소 환경이 식물플랑크톤의 성장에 있어 우호적이었음을 의미한다. Melt pond와 해빙 코어의 서로 다른 질소 환경은 동물플랑크톤에게 다른 질의 식물플랑크톤의 제공해 줄 수 있다. Lee et al. (2015)는 일반적으로 수괴보다 melt pond에서 식물플랑크톤이 더 많은 단백질 함량을 가지고 있다고 보고했다. 만약 이것이 본 연구에도 적용된다면, melt pond의 식물플랑크톤은 상대적으로 높은 단백질 함량을 상위영양단계자에게 제공해 줄 수 있을 것이다 (Lee et al., 2012). 게다가, 해빙 코어의 질소가 제한된 환경은 더 많은 지질을 생성함으로써 지질 위주인

북극생태계에 충분한 지질이 함유된 먹이를 제공할 것으로 사료된다 (Søreide et al., 2010).

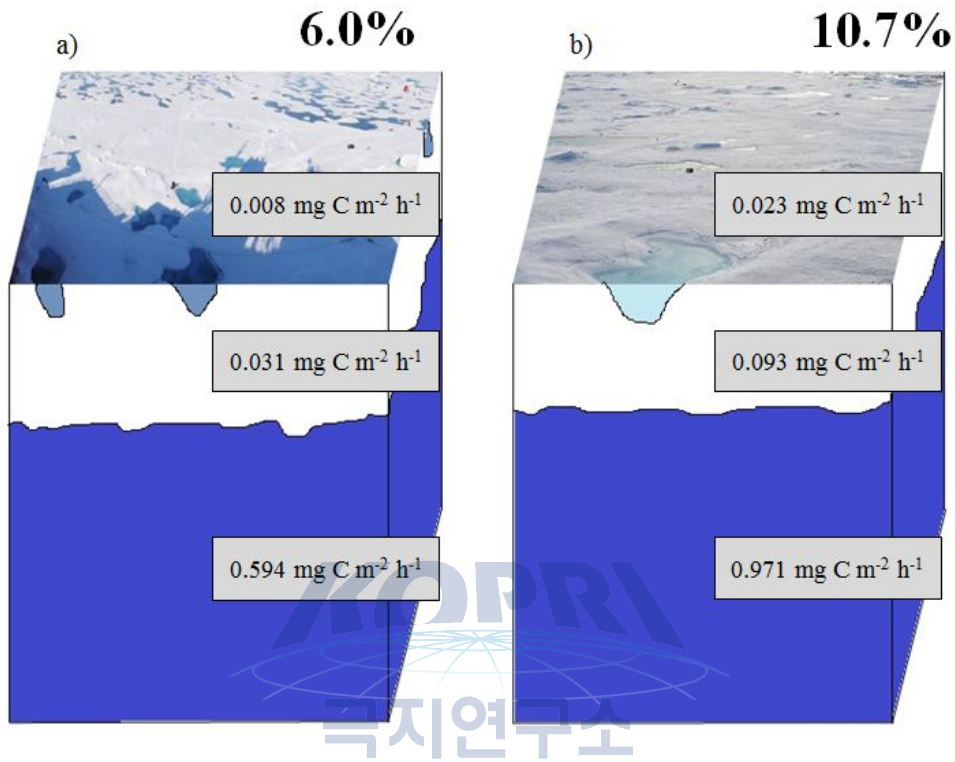


그림 12. 해빙의 integrated 탄소흡수율($\text{mg C m}^{-2} \text{h}^{-1}$)과 기여도 측정. (a) sea ice camp 1 (b) sea ice camp 2

제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

제 1 절 연구개발목표 달성도

1. 연구개발 목표의 달성도

연구내용	달성도 (%)											
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	
북극해 Melting pond 식물플랑크톤의 carbon and nitrogen uptake rates 조사	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
북극해 surface 및 sea ice 미세조류의 carbon and nitrogen uptake rates 조사	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
전체적인 ice floe(surface ice, melt pond, sea ice)의 일차생산 기여도 추정	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■

■ 당초계획

■ 실적

2. 연구결과의 대외기여도

목표	기여도 (%)	내용
해빙/해양생태계 탄소순환을 위한 모니터링 구축	100%	북극해 Melting pond 식물플랑크톤의 carbon and nitrogen uptake rates 조사
	100%	북극해 surface 및 sea ice 미세조류의 carbon and nitrogen uptake rates 조사
	100%	전체적인 ice floe(surface ice, melt pond, sea ice)의 일차생산 기여도 추정

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

제 1 절 연구개발결과 활용방안

- 남북극해에서 중요 일차 생산자인 해빙 미세조류뿐만 아니라 melt pond내 식물플랑크톤의 생태학적, 생리학적인 연구는 앞으로의 지구온난화와 같은 기후변동에 따라 해양 먹이망에 미치는 영양학적인 평가를 위한 새로운 시도로서, 앞으로의 활용 방안은 다양함
- 환경변화에 따른 극지방의 식물성플랑크톤의 environmental-induced physiological stress에 대한 환경 변화 indicator 개발
- 아라온(ARAON) 관측에 의해 파악된 척치해(Chukchi Sea) 및 주변 해역에 대한 해빙/해양 환경 정보 보완 및 관측 결과의 역학적 해석 가능
- 다양한 관측 자료와의 상호 비교를 통해 북극해 해양 순환 및 해빙의 이동/성장에 영향을 미치는 주요 요인 파악
- 급격한 기후 변화에 따른 북극해 해빙 면적 감소가 한반도 기후 변화에 미치는 영향 연구에 활용
- 향후 북극해 해빙 면적 감소로 더욱 활발해질 북극해 항로 개발 및 자원 개발에 필요한 해빙 분포 및 변동 정보 제공
- 급격한 기후 변화에 대한 과학적 대처방안 제공
- 장기적으로 보았을 때 북극해 이용성은 조선업, 플랜트 산업, 수산업 분야에서 주목받고 있으며, 이를 활용하기 위한 북극해 이해 과정에 있어 기본적으로 해양생태계에 대한 이해가 바탕

극지연구소

제 6 장 참고문헌

- Arrigo KR (2014) Sea ice ecosystem. *Annual Review of Marine Science* 6:439-467
- Boetius A, Albrecht S, Bakker K, Bienhold C, Felden J, Fernández-Méndez M, Hendricks S, Katlein C, Lalande C, Krumpfen T, Nicolaus M, Peecken I, Rabe B, Rogacheva A, Rybakova E, Somavilla R, Wenzhöfer F (2013) Export of algal biomass from the melting Arctic sea ice. *Science* 339:1430-1432
- Ehn JK, Mundy CJ, Barber DG, Hop H, Rossmagel A, Stewart J (2011) Impact of horizontal spreading on light propagation in melt pond covered seasonal sea ice in the Canadian Arctic. *J Geophys Res* 116:C00G02. doi:10.1029/2010JC006908
- Fernández-Méndez M, Wenzhöfer F, Peecken I, Sørensen HL, Glud RN, Boetius A (2014) Composition, buoyancy regulation and fate of ice algal aggregates in the Central Arctic Ocean. *PLoS ONE* 9(9): e107452. Doi:10.1371/journal.pone.0107452
- Fernández-Méndez M, Katlein C, Rabe B, Nicolaus M, Peecken I, Bakker K, Flores H, Boetius A (2015) Photosynthetic production in the Central Arctic during the record sea-ice minimum in 2012. *Biogeosciences Discuss* 12:2897-2945. doi:10.5194/bgd-12-2897-2015
- Hill V, Cota G, Stockwell D (2005) Spring and summer phytoplankton communities in the Chukchi and Eastern Beaufort Seas. *Deep Sea Res Part II* 52:3369-3385
- Gosselin M, Levasseur M, Wheeler PA, Horner RA, Booth BC (1997) New measurements of phytoplankton and ice algal production in the Arctic Ocean. *Deep Sea Res Part II* 8:1623-1644.
- Gradinger (2002) Sea ice microorganisms. Doi:10.1002/0471263397.env310
- Gradinger (2009) Sea-ice algae: Major contributors to primary production and algal biomass in the Chukchi and Beaufort Sea during May/June 2002. *Deep Sea Res Part II* 56:1201-1212
- Kramber M, Kiko R (2011) Brackish meltponds on Arctic sea ice—a new habitat for marine metazoans. *Polar Biol* 34:603-608
- Lee SH, Whitledge TE (2005) Primary and new production in the deep Canada basin during summer 2002. *Polar Biol* 28:190-197
- Lee SH, Whitledge TE, Kang S-H (2008) Spring time production of bottom ice algae in the landfast sea ice zone at Barrow, Alaska. *J Exp Mar Biol Ecol* 367: 204-212

- Lee SH, Stockwell D, Whitley TE (2010) Uptake rates of dissolved inorganic carbon and nitrogen by under-ice phytoplankton in the Canada Basin in summer 2005. *Polar Biol* 33:1027-1036
- Lee SH, McRoy CP, Joo HM, Gradinger R, Cui X, Yun MS, Chung KH, Kang S-H, Kang C-K, Choy EJ, Son S, Carmack E, Whitley TE (2011) Holes in progressively thinning arctic sea ice lead to new ice algae habitat. *Oceanography* 4:302-308
- Lee SH, Stockwell DA, Joo H-M, Son YB, Kang C-K, Whitley TE (2012) Phytoplankton production from melting ponds on Arctic sea ice. *J Geophys Res* 117:C0403.. doi10.1029/2010JC007717
- Lee SH, Kim BK, Joo H-T, Park JW, Lee JH, Joo H-M, Lee DB, Kang C-K, Kang S-H (2015) Carbon contribution of sea ice floes in the Arctic Ocean. *Deep Sea Res Part II* 120:35-42
- Michel C, Legendre L, Ingram RG, Gosselin M, Levasseur M, (1996) Carbon budget of sea-ice algae in spring: Evidence of a significant transfer to zooplankton grazers. *J Geophys Res* 101:18345-18360
- Mock T, Gradinger R (1999) Determination of Arctic ice algal production with a new in situ incubation technique. *Mar Ecol Prog Ser* 177:15-26
- Pautzke CG (1979) Phytoplankton primary production below Arctic Ocean pack ice: and ecosystems analysis. PhD thesis, University of Washington
- Perovich DK, Richter-M, Jacqueline A, Jones KF, Light B, Elder BC, Polashenski C, Laroche D, Markus T, Lindsay R (2011) Arctic sea-ice melt in 2008 and the role of solar heating. *Annals of Glaciology* 52: 355-359
- Questel JM, Clarke C, Hopcroft RR (2013) Seasonal and interannual variation in the planktonic communities of the northeastern Chukchi Sea during the summer and early fall. *Cont Shelf Res* 67:23-41
- Redfield AC, Ketchum BH, Richards FA (1963) The influence of organisms on the composition of sea-water. In: Hill MN (ed) *The sea. Ideas and observations on progress in the study of the seas, Vol 2. The composition of sea-water Comparative and descriptive oceanography.* Interscience Publishers, John Wiley&Sons, New York, p26-77
- Rösel A, Kaleschke L (2012) Exceptional melt pond occurrence in the years 2007 and 2011 on the Arctic sea ice revealed from MODIS satellite data. *J Geophys Res* 117:C05018.

doi10.1029/2010JC007869

- Rysgaard S, Kühl M, Blud RN, Hansen JW (2001) Biomass, production and horizontal patchiness of sea ice algae in a high-Arctic fjord (Yung Sound, NE Greenland). *Mar Ecol Prog Ser* 223:15-26
- Tremblay J-É, Gagnon J (2009) The effects of irradiance and nutrient supply on the productivity of Arctic waters: a perspective on climate change. 77-93. doi:10.1007/978-1-4020-9460-6_7
- Subba Rao DV, Plat T (1984) Primary production of Arctic waters. *Polar Biol* 3:191-201
- Søreide J, Leu E, Berge J, Graeve M, Falk-Petersen S (2010) Timing of blooms, algal food quality and *Calanus glacialis* reproduction and growth in a changing Arctic. *Glob Chang Biol*. doi:10.1111/j.1365-2486.2010.02175.x
- Wang J, Cota GF, Comiso JC (2005) Phytoplankton in the Beaufort and Chukchi Seas: Distribution, dynamics, and environmental forcing. *Deep Sea Res Part II* 52:3355-3368
- Yun MS, Whitley TE, Kong M, Lee SH (2014) Low primary production the Chukchi sea shelf, 2009. *Cont Shelf Res* 76:1-11
- Yun MS, Kim BK, Joo HT, Yang EJ, Nishino S, Chung KH, Kang S-H, Lee SH (2015) Regional productivity of phytoplankton in the Western Arctic Ocean during summer in 2010. *Deep Sea Res Part II* 120: 61-71

주 의

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