

북극 해빙 생태계를 위한 기획 연구
Plans for Sea ice ecosystem on the Arctic



한국해양과학기술원
부설 극지연구소

제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “북극 해빙 생태계를 위한 기획 연구”과제의 최종보고서로 제출합니다.



연구 책임자 : 하 선 용

참여 연구원 : 박 지 수, 김 태 완, 나 형 술

“ : 주 형 민, 이 보 연, 심 초 림

보고서 초록

과제관리번호	PE17240	해당단계 연구기간	2017.01.01.-01. 31	단계 구분	(1단계) / (1단계)
연구사업명	중 사업명	북극 해빙 생태계를 위한 기획연구			
	세부사업명				
연구과제명	중 과제명				
	세부(단위)과제명				
연구책임자	하 선 용	해당단계 참여연구원수	총 : 7 명 내부 : 7 명 외부 : 명	해당단계 연구비	정부: 천원 기업: 천원 계: 천원
연구기관명 및 소속부서명	극지연구소 극지해양과학연구부		참여기업명		
국제공동연구	상대국명 :	상대국연구기관명 :			
위탁연구	연구기관명 :	연구책임자 :			
요약 (연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)				보고서 면수	73
<p>■ 기획연구 목표</p> <ul style="list-style-type: none"> - ‘북극 다산기지 기반 해빙 생태계의 탄소흡수율 및 피드백효과’ 사업 설계 및 추진 방향 제시 - 사업 추진을 위한 세부 연구 방법론 제시 - 사업 추진을 위한 세부 목표 설정 및 단계별 성과 목표 수립 - 사업 추진에 필요한 인력 및 재원에 대한 사전 조사 <p>■ 국내외 환경분석 결과</p> <ul style="list-style-type: none"> - (국내) 극지 해양 생태계에 대한 연구는 기존 극지해양연구관련 사업에서 일부 수행되었으나 해빙 생태계만을 위한 국내 연구는 현재까지 전무 - (국외) 극지 연안국 중심으로 해빙 미세조류 및 해빙-해양생태계를 이해하기 위한 다양한 연구가 활발히 진행 - (시사점) 우리나라의 극지역량 강화를 위하여 장기적인 관점에서 해빙 생태계 중심의 깊이 있고 장기적인 연구 수행이 필요 <p>■ 사업설계</p> <ul style="list-style-type: none"> - (과제명) 북극 다산기지 기반 해빙 생태계의 탄소흡수율 및 피드백 연구 - (최종목표)급격한 북극 해빙 상태 변화로 인한 해빙 생태계의 탄소 흡수율 기여도 파악 - 세부내용 <ul style="list-style-type: none"> · 해빙 생태계의 탄소 흡수율 연구 · 해빙 후퇴에 따른 해빙 생태계의 광적응 생리 기작 연구 · 해빙 생태계 재현 빙해 수조 연구 - (연구지역)북극 다산기지(노르웨이), 캐나다 등 해빙결빙 지역 - (산학연) 2개 대학, 1개 산업체와 위탁연구를 수행 - (국제공동연구) 영국 및 캐나다 극지연구기관과 국제공동연구 수행 - (소요예산)3년간 15억 원(연 5억 원) <p>■ 사업성과물 활용방안 및 기대효과</p> <ul style="list-style-type: none"> - 극지역을 활용한 기후변화 연구에 기초자료로 제공 - 해빙 미세조류의 일차생산 기여도를 재산정 할 수 있는 자료로 활용 - 북극해 연구역량 강화 및 연구저변 확대를 통한 국가과학기술분야 경쟁력 강화 - 해빙 생태계 연구성과 도출을 통한 극지연구 선진국과의 격차 해소 					
색인어 (각 5개 이상)	한 글	북극, 해빙 생태계, 탄소 흡수율, 빙해 수조, 다산기지			
	영 어	Arctic, Sea-ice ecosystem, carbon uptake rate, Sea-ice chamber, Dasan station			

요 약 문

I. 제 목

북극 해빙 생태계 연구를 위한 기획 연구

II. 사업 추진 배경 및 필요성

1. 사업 추진 배경

- (극한 환경) 해빙이 분포하는 극해역은 낮은 온도와 해빙 분포, 광도의 극심한 변화로 인해 독특한 생태계가 형성
- (연구관심 고조) 극한환경의 특성으로 인하여 일차생산성이 낮은 곳으로 여겨왔으나 최근 연구결과를 통해 북극해 해빙 생태계가 다른 해역과 마찬가지로 매우 활발한 것으로 밝혀졌으며 극지권 국가들을 위주로 해빙생태계 연구가 집중되고 있음
- 해빙 생태계 연구의 과학적, 경제/산업적, 기술적, 사회/문화적 수요 증가
- (국제협력관계) 우리나라는 북극 연안국가를 중심으로 한 다양한 해빙 생태계 연구에 참여 기회를 부여받고 국제 협력 네트워크를 형성 협의 중

2. 사업 추진의 필요성

- 북극 해빙분포의 급격한 감소로 인하여 북극해 환경은 빠르게 변화하고 있으며 이에 따라 해빙 생태계 연구의 필요성 증대
- 해빙 미세조류의 기초생산력의 기여도가 증가함에 따라 미세조류 연구의 중요성 부각
- 급격한 극지환경의 변화로 인한 해빙 서식 생물들의 적응기작 이해 필요
- 해빙 생태계를 연구 대상으로 하는 생지화학적인 통합 비교 연구 수행이 필요

III. 기획연구 목표

- 본 기획연구를 통하여 아래의 연구목표를 제시하여 결과를 도출하고자 함

[연구목표 1] ‘북극 다산기지 기반 해빙 생태계의 탄소흡수율 및 피드백효과’ 사업 설계 및 추진 방향 제시

[연구목표 2] 사업 추진을 위한 세부 연구 방법론 제시

[연구목표 3] 사업 추진을 위한 세부 목표 설정 및 단계별 성과 목표 수립

[연구목표 4] 사업 추진에 필요한 인력 및 재원에 대한 사전 조사

IV. 국내외 환경 분석

1. 해빙 생태계 국내 연구 동향

- 극지 해양 생태계에 대한 연구는 기존 극지해양연구관련 사업(‘양극해 환경변화 이해 및 활용연구’ 2011~2016, 해양수산부)에서 일부 수행되었으나 **해빙 생태계만을 위한 국내 연구는 현재까지 전무함**
 - 극지연구소에서 남극 및 북극 해양 종합관측연구가 다수 수행되었으며, 일부 과제에서는 해빙캠프 프로그램을 통하여 해빙 위 연구를 수행하였으나 연구기간 및 연구지역의 특수성으로 인하여 해빙 미세조류 대상의 심도 있는 연구는 이루어지지 않았음

2. 해빙 생태계 국외 연구 동향

- 극지 연안국 중심으로 해빙 미세조류 및 해빙-해양생태계를 이해하기 위한 다양한 연구가 활발히 진행

3. 시사점

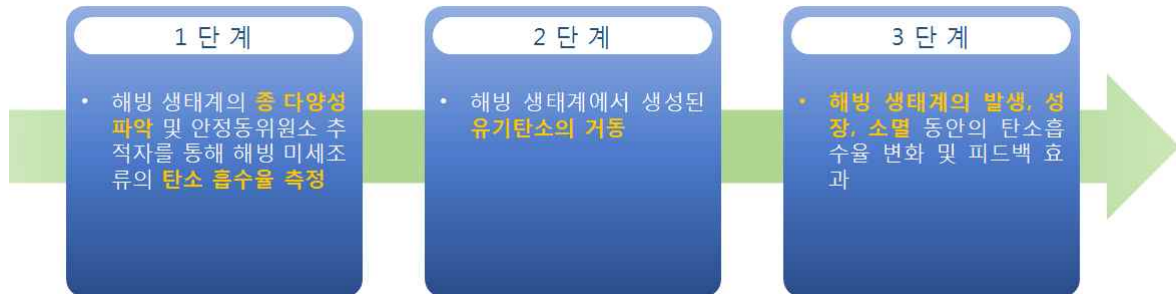
- 극지 선진국들은 해빙 생태계 연구의 중요성을 인식하고 장기적인 대형 연구프로젝트를 수행중이나, 이에 대응한 국내 연구활동 미약, 그동안 우리나라의 경우 지리적 접근성의 취약으로 인하여 해빙 생태계 활성화 시기에 **집중적인 연구가 진행되지 못함**
- 세계적인 극지연구의 성장성과 기회를 감안한다면 미래 국가 신성장동력으로 육성하고 세계적 경쟁력을 갖는 **극지연구 육성이 무엇보다 중요**
- 우리나라의 극지역량 강화를 위하여 장기적인 관점에서 **해빙 생태계 중심의 깊이 있고 장기적인 연구 수행이 필요**

V. 사업 설계

1. 사업 추진 방향

연구과제 개요

- 과 제 명** 북극 다산기지 기반 해빙 생태계의 탄소흡수율 및 피드백 연구
- 최 종 목 표** 급격한 북극 해빙 상태 변화로 인한 해빙 생태계의 탄소 흡수율 기여도 파악
- 성 과 목 표** 북극해 탄소 흡수율 및 생지화학 물질 순환 매커니즘에 해빙 생태계의 기여도 파악



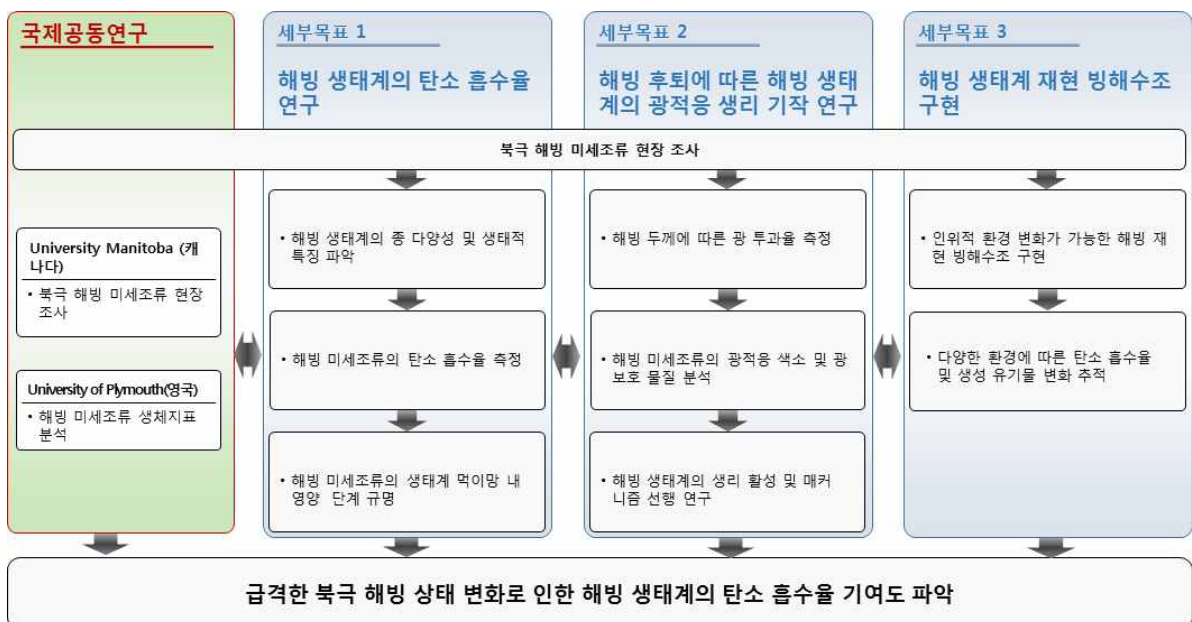
[그림] 사업 개요 및 추진방향

2. 사업 추진방향에 따른 세부 연구목표 수립

- 급격한 북극 해빙 상태 변화로 인한 해빙 생태계의 탄소 흡수율 기여도 파악
- 북극해 해빙 생태계의 탄소흡수율 변화 관측 및 활용방안 제시를 위한 추진전략 제시

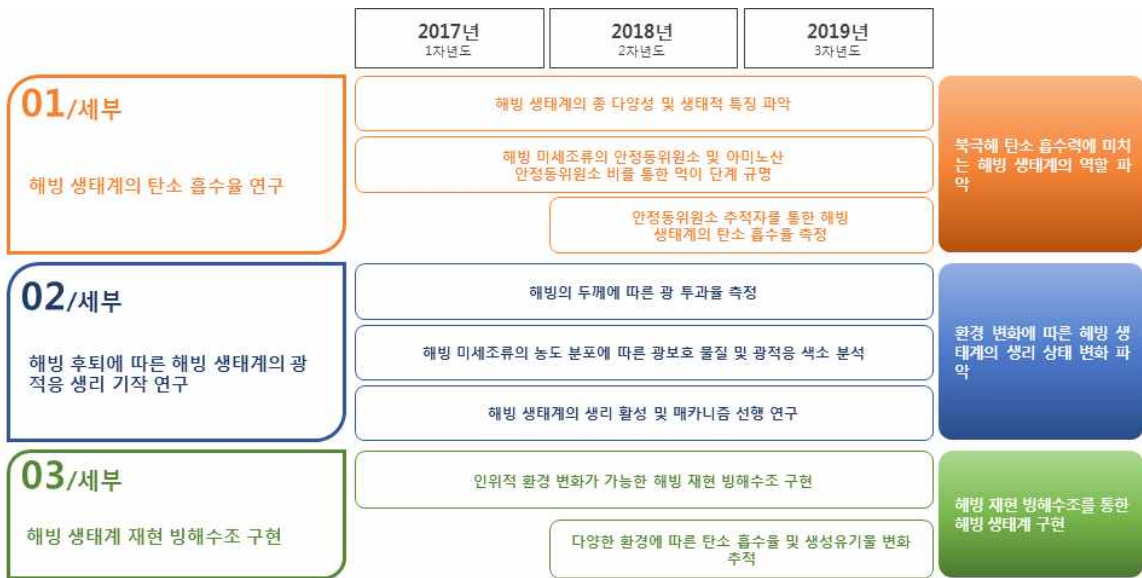
3. 사업 추진내용

- 사업 범위
 - 북극해 연안을 중심으로 노르웨이 스발바르(북극 다산기지), 캐나다 캠브리지 베이 지역에서 연구 수행
- 단계별 세부 목표 및 국제공동연구

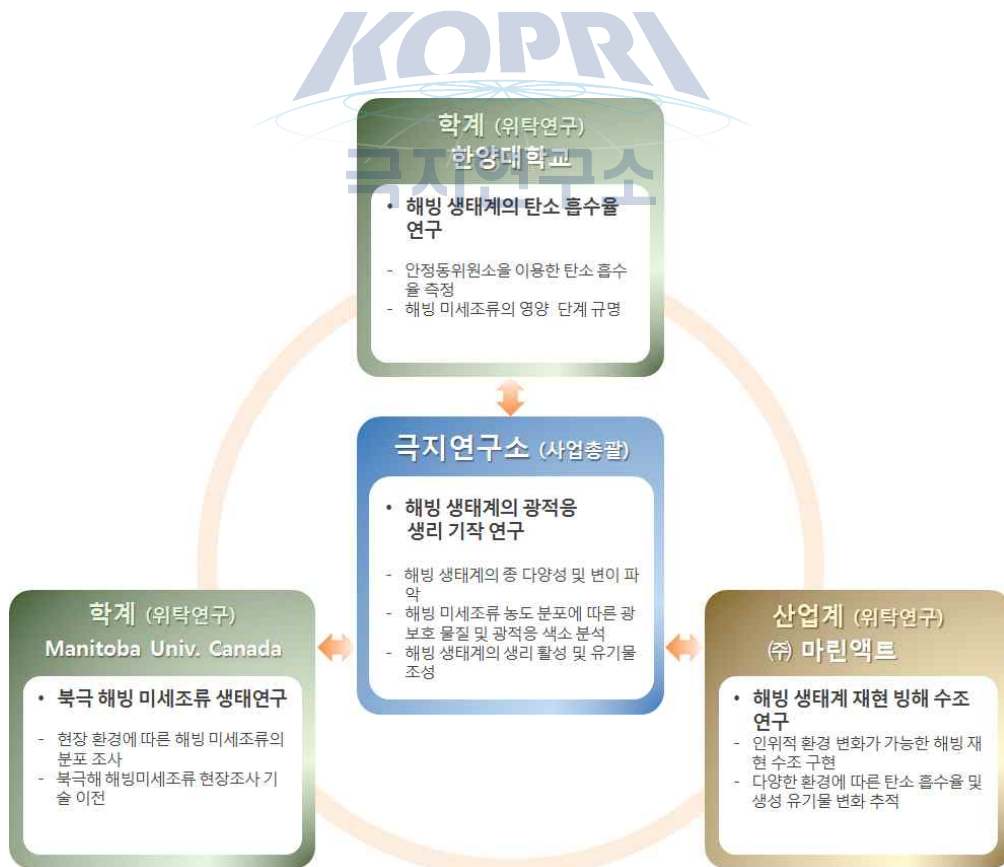


[그림] 단계별 세부 목표 및 국제공동연구

□ 총괄 로드맵 및 산학연 연계도

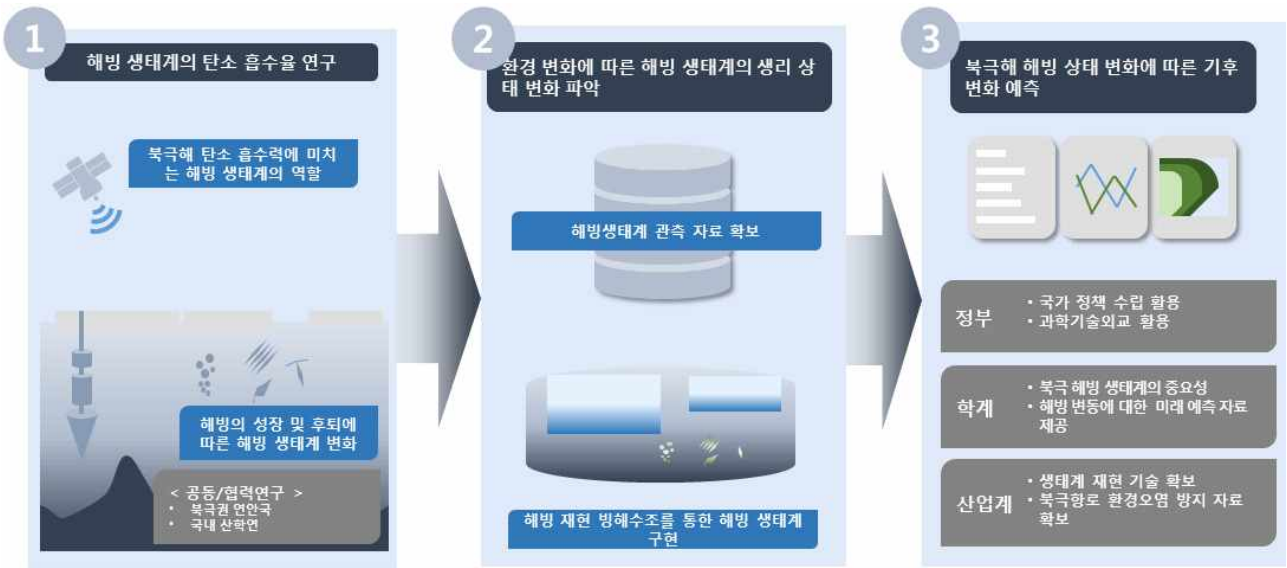


[그림] 사업 총괄로드맵



[그림] 주관기관과 위탁기관과의 산학연 연계도

□ 연구개발 모식도



[그림] 연구개발 모식도

□ 사업 세부내용

[세부목표 1] 해빙 생태계의 탄소 흡수율 연구

- 해빙 생태계의 종 다양성 파악 및 안정동위원소 추적자를 통해 해빙 미세조류의 탄소 흡수율 측정

[세부목표 2] 해빙 후퇴에 따른 해빙 생태계의 광적용 생리 기작 연구

- 해빙 분포 감소에 따른 해빙서식 생물의 광적용 생리기작 규명

[세부목표 3] 해빙 생태계 재현 빙해 수조 연구

- 해빙 생태계 재현 빙해수조 구현

□ 사업 소요예산

- 본 사업의 총 투자금액(2017~2019년, 3년간)은 15억 원으로, 북극 현장조사 비용을 포함한 4개의 주요 내용으로 기획함

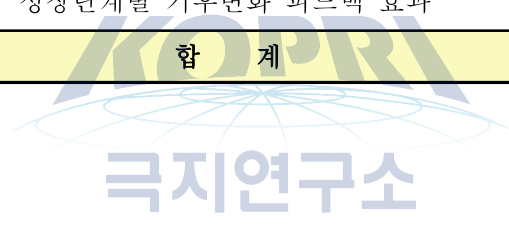
<표> 세부과제별 소요예산

세부과제	년도			
	2017	2018	2019	합계
• 북극 해빙생태계의 현장 탄소흡수율 측정 연구	8,000	8,000	8,000	24,000
• 해빙 생태계의 광적용 생리 기작 연구	8,000	8,000	8,000	24,000
• 해빙 생태계 변화로 인한 기후 변화 피드백 순환고리	8,000	8,000	8,000	24,000
• 해빙 생태계 재현 빙해수조 연구	10,000	5,000	5,000	20,000
• 북극 과학기지 기반 해빙생태계 현장조사	16,000	21,000	21,000	58,000
합 계	50,000	50,000	50,000	150,000

<표 4-3> 연차별 소요예산 세부내역

(단위 : 백만원)

구분	세부내역	소요예산	
'17	• 북극(캠브리지 베이) 해빙 생태계의 현장 탄소흡수율 측정	100	500
	• 북극 다산 기지 해빙 미세조류의 종 조성 및 다양성 조사	140	
	• 해빙 생태계 재현 빙해 수조 구축	100	
	• 북극 해빙 생태계(북극 다산기지 및 캠브리지 베이)의 생성 유기물 조사	160	
'18	• 북극(캠브리지 베이) 해빙 생태계의 현장 탄소흡수율 측정 (현장조사 2차)	100	500
	• 북극 다산기지 해빙생태계의 현장 탄소흡수율 측정 (현장조사 1차)	150	
	• 해빙 생태계 구성원 채취 및 아미노산 안정동위원소 분석	100	
	• 해빙 생태계 재현 빙해 수조 정비 및 보완	50	
	• 해빙 생태계 생성 유기물 거동 및 기후 변화 피드백 효과	100	
'19	• 북극 해빙 미세조류의 발생, 성장, 소멸 시 탄소흡수율 장기 관측	200	500
	• 북극 해빙 생태계 내 이산화탄소 분압의 변화 관측	100	
	• 해빙 생태계 재현 빙해 수조 정비 및 보완	50	
	• 해빙 생태계의 성장단계별 기후변화 피드백 효과	150	
합 계		1,500	



VI. 세부목표 별 연구방법론

1. 해빙 미세조류 종다양성 파악 및 광적응기작 연구
2. 인공위성자료를 활용한 북극해 일차생산력 변화 및 해빙 변화 파악
3. 북극 해빙 생태계의 탄소흡수율 측정 연구
4. 북극 해빙의 열적 특성 및 빛 투과율 연구
5. 북극 해빙 생태계 내 pCO₂ 변화 연구
6. 북극 해빙 생태계 변화로 인한 기후 변화 피드백 순환고리
7. 해빙 생태계 재현 빙해 수조 구현

VII. 사업 성과물 활용방안 및 기대효과

1. 성과 활용방안
 - 극지역을 활용한 기후변화 연구에 기초자료로 제공

- 기후변화 모델의 현장관측 자료로 활용
- 해빙 미세조류의 일차생산 기여도를 재산정 할 수 있는 자료로 활용
- 북극 연안국 중심의 배타적 독점 체제를 유지하고 있는 북극권에서 협력관계를 구축하기 위한 수단으로 해빙 생태계 연구 활용

2. 사업 기대효과

- 북극해 연구역량 강화 및 연구저변 확대를 통한 국가과학기술분야 경쟁력 강화
- 해빙생태계 연구성과 도출을 통한 극지연구 선진국과의 격차 해소
- 국제연구협력 기반 구축
- 우리나라 정부 북극정책에 능동적 대처

VIII. 사업수행을 위한 국제협력

- 동과제 수행을 위하여 국제협력의 일환으로 해빙 미세조류의 생체지표 분석을 위한 영국 폴리머스 대학과 Letter of Understanding 체결
- 국제공동 해빙 미세조류 생태연구를 위하여 캐나다 Polar Continental Shelf Program (PCSP) 프로그램 Arctic-ICE camp를 운영 중인 캐나다 매니토바 대학과 공동연구를 수행하기로 하였으며('17년 5월 경) 세부 일정 논의 중
- 또한 미국, 러시아, 노르웨이의 극지관련 전문기관과 국제공동연구를 협의 중에 있음

S U M M A R Y

I. Title

Plan for Sea ice ecosystem on the Arctic

II. Purpose and Necessity of R&D

1. Background of the Project

- (Extreme environment)** The Polar region(sea) where sea ice is distributed has a unique ecosystem formed due to the low temperature and limited light.
- (Interest in research)** Due to the extreme environmental characteristics, primary productivity has been considered to be low. Recent studies have shown that the Arctic sea ecosystem is very active, and studies on sea ecosystem are concentrated on polar countries.
- Increase in scientific, economic / industrial, technological and social / cultural demand of sea-ice ecosystem research
- (International cooperation)** Korea has been given the opportunity to participate in various sea ice ecosystem researches with Arctic coastal countries, and forming an international cooperation network.

2. Necessity of the Project promotion

- Due to the rapid decline of the Arctic sea ice distribution, the Arctic sea environment is changing rapidly.
- Importance of sea ice algae research as contribution of basic productivity of sea ice algae increases
- Understanding the adaptive mechanism of sea ice algae due to rapid changes in the polar environment
- A comparative study of biogeochemical integration of sea ice ecosystem

III. Objective of project research

- The purpose of this research is to present the following research goals and to derive the results.

[Research Goal 1] The design and direction of ‘Carbon uptake and feedback effect of sea ice ecosystem based on Arctic Dasan station’

[Research Goal 2] Present research methodology for project

[Research Goal 3] Establishing goals and performance goals for each sub-project

[Research Goal 4] Preliminary investigation of the manpower and financial resources necessary for project

IV. Environmental analysis on the domestic and international research

1. Research trends in the sea ice ecosystem (Korea)

- The research on polar marine ecosystems has been carried out in a part of the existing polar marine research project(‘Korea-Polar Ocean in Rapid Transition’ 2011-2016, Ministry of Oceans and Fisheries), until now domestic studies for sea ice ecosystem have not been conducted.
 - In the Korea Polar Research Institute, observations of the Antarctic and Arctic marine observations were conducted, and in some of the projects, studies were conducted through the ice camp program. However, study of sea ice algae was not performed due to the period of study and the specificity of the study area.

2. Research trends in the sea ice ecosystem (international)

- Various researches have been actively conducted to understand the microalgae and sea ice-marine ecosystem in the Arctic coastal countries.

3. Implication

- The polar advanced countries are aware of the importance of ocean ecosystem studies and are conducting long-term and large-scale research projects. In response to our weak activity, intensive research on the period of sea ice ecosystem activation is not proceeded due to the lack of geographical accessibility in Korea.
- Given the potential growth and opportunities of global polar research, it is

important to develop polar research that has global competitiveness by development as a future new growth engine.

- In order to strengthen the polar capabilities of Korea, it is necessary to conduct long-term research focusing on the sea ice ecosystem from a long-term perspective.

V. Project design

1. Direction of project

연구과제 개요

과 제 명	북극 다산기지 기반 해빙 생태계의 탄소흡수율 및 피드백 연구
최 종 목 표	급격한 북극 해빙 상태 변화로 인한 해빙 생태계의 탄소 흡수율 기여도 파악
성 과 목 표	북극해 탄소 흡수율 및 생지화학 물질 순환 매커니즘에 해빙 생태계의 기여도 파악



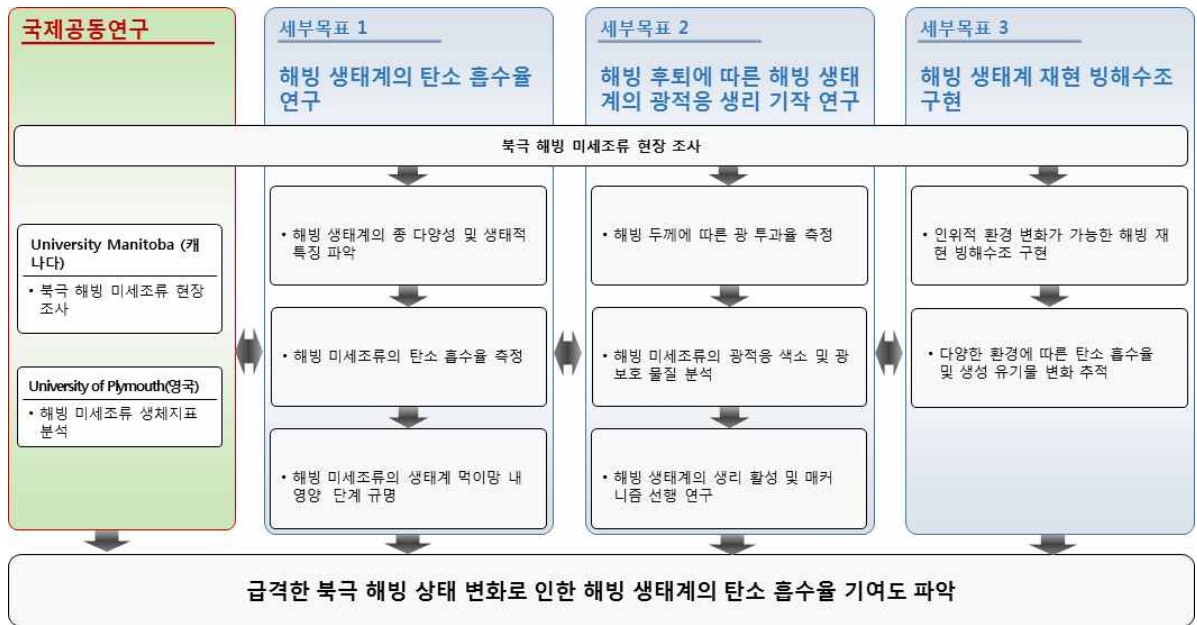
[Figure] Project overview and direction

2. Establish sub-project targets according to project direction

- Understanding the contribution of the carbon uptake rate of sea ecosystem due to rapid changes in Arctic sea ice conditions
- Proposal of a strategy for observing changes in carbon uptake rate of Arctic sea ice ecosystem and suggest the utilization plan

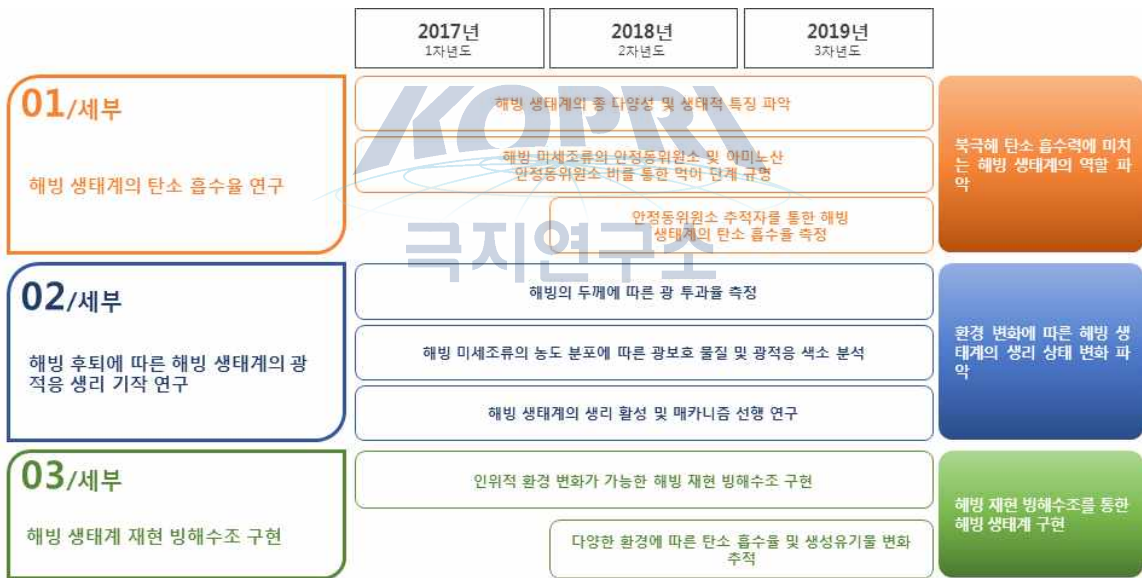
3. Content of project promotion

- Project scope
 - Focusing on the Arctic coastal area(Svalbard(Dasan station) in Norway and the Cambridge Bay in Canada)
- Step-by-step goals and international joint research

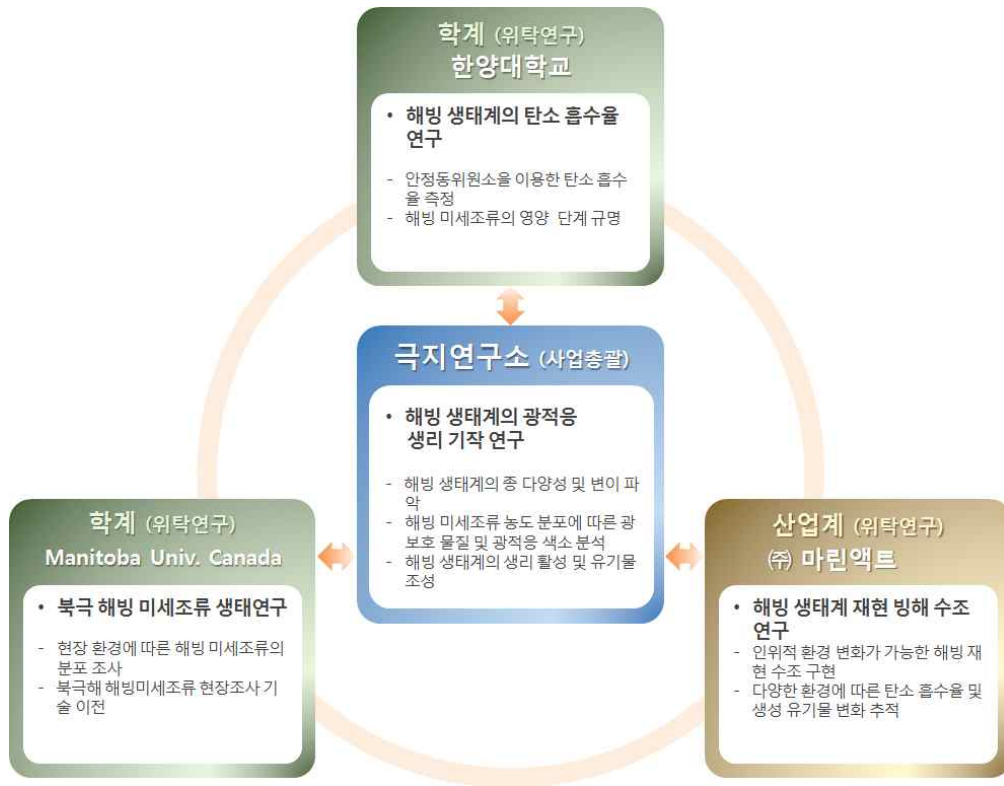


[Figure] Detailed goals and international joint research

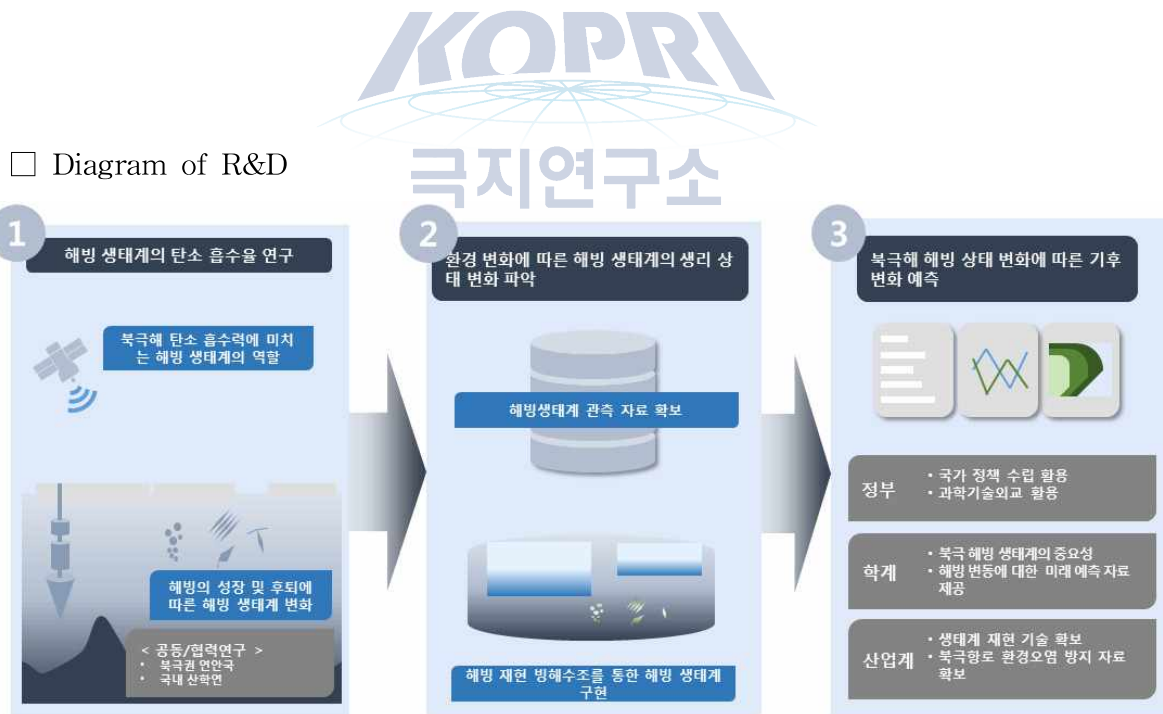
□ General road map and industry-university-institute linkage diagram



[Figure] Overview road map



[Figure] Linkage between industry-academia-government relations



[[Figure] Diagram of R&D

Details content of project

[sub-goal 1] Study of carbon uptake rate of sea ecosystem

- Identification of species diversity of sea ice algae and measurement of carbon uptake rate of sea ice algae using stable isotope

[sub-goal 2] Study on photo adaptation physiology of sea ice ecosystem by sea ice retreat

- Identification of photo-adaptive physiological mechanisms of sea ice organisms

[sub-goal 3] Sea ice ecosystem chamber

- Implementation of sea ice chamber to reproduce the sea ice ecosystem

Budget required for project

- The total investment amount of this project(2017-2019, three years) is 1.5 billion won and it is planned with 4 main contents including the cost of field survey in Arctic

VI. Research Methodology

1. Sea ice algae species diversity and photo-adaptive mechanisms of sea ice algae
2. Productivity and sea ice condition using satellite data
3. Study of carbon uptake rate of Arctic sea ice ecosystem
4. Study on thermal properties and light transmittance of Arctic sea ice
5. Study of pCO₂ changes in the Arctic sea ice ecosystem
6. Feedback climate loop by Arctic sea ice ecosystem
7. Implementation of sea ice chamber to recreate the sea ice ecosystem

VII. Utilization plan and expectation effect

1. Performance achievements

- Provide as basic data on climate change research using polar regions
- Utilizing the climate change model as field data
- Utilizing the contribution of primary production of sea ice algae
- Using of sea ice ecosystem research as a means of establishing cooperative relations in the Arctic Circle, which maintains the exclusivity system on the Arctic coastal countries

2. Expectation effect of project

- Strengthening the competitiveness of the national science and technology by the capacity of the Arctic Sea and expanding the research base.
- Eliminate the gap with developed countries through the polar research by deriving oceanic ecosystem research results
- Establishment of international research cooperation
- Actively coping with the Korean Arctic Policies

VIII. International cooperation for project

- As part of international cooperation, we concluded Letter of Understanding (LOU) with Plymouth University in order to analyze biomarker of sea ice algae.
- In order to study the sea ice algae ecology of the international, we will conduct a joint study with Canadian University of Manitoba(Arctic-ICE camp), Canada's Polar Continental Shelf Program(PCSP) program.
- In addition, international collaboration with USA, Russia, and Norway is under discussion.

C O N T E N T S

Chapter 1 Introduction	19
Section 1 Background of the Project	19
Section 2 Necessity of the Project promotion	20
Section 3 Objective of project research	24
Chapter 2 Environmental analysis on the domestic and international research	25
Section 1 Research trends in the sea ice ecosystem (Korea)	25
Section 2 Research trends in the sea ice ecosystem (international)	27
Section 3 Implication	29
Chapter 3 Project design	30
Section 1 Direction of project	30
Section 2 Establish sub-project targets according to project direction	31
Section 3 Content of project promotion	32
Section 4 Project promotion system and budget	38
Chapter 4 Research Methodology	40
Section 1 Sea ice algae diversity and photo-adaptive mechanisms of sea ice algae	40
Section 2 Primary productivity and sea ice condition using satellite data	44
Section 3 Study of carbon uptake rate of Arctic sea ice ecosystem	47
Section 4 Study on thermal properties and light transmittance of Arctic sea ice	51
Section 5 Study of pCO ₂ changes in the Arctic sea ice ecosystem	53
Section 6 Feedback climate loop by Arctic sea ice ecosystem	57
Section 7 Implementation of sea ice chamber to recreate the sea ice ecosystem	63
Chapter 5 Utilization plan and expectation effect	65
Section 1 Utilization plan	65
Section 2 expectation effect	66
Chapter 6 International cooperation for project	67
Chapter 7 References	68

목 차

제 1 장 서론	19
1절 사업 추진 배경	19
2절 사업 추진의 필요성	20
3절 기획 연구 목표	24
제 2 장 국내외 환경분석	25
1절 해빙생태계 국내 연구 동향	25
2절 해빙생태계 국외 연구 동향	27
3절 시사점	29
제 3 장 사업 설계	30
1절 사업 추진방향	30
2절 사업 추진방향에 따른 세부 연구목표 수립	31
3절 사업 추진내용	32
4절 사업 추진체계 및 소요예산	38
제 4 장 세부목표 별 연구방법론	40
1절 해빙 미세조류 종다양성 파악 및 광적응기작 연구	40
2절 인공위성자료를 활용한 북극해 일차생산력 변화 및 해빙 변화 파악	44
3절 북극 해빙 생태계의 탄소흡수율 측정 연구	47
4절 북극 해빙의 열적 특성 및 빛 투과율 연구	51
5절 북극 해빙 생태계 내 pCO ₂ 변화 연구	53
6절 북극 해빙 생태계 변화로 인한 기후 변화 피드백 순환고리	57
7절 해빙 생태계 재현 빙해 수조 구현	63
제 5 장 사업 성과물 활용방안 및 기대효과	65
1절 성과 활용방안	65
2절 사업 기대효과	66
제 6 장 사업수행을 위한 국제협력	67
제 7 장 참고문헌	68

제 1 장 서론

1절 사업 추진 배경

1. 해빙 생태계 연구 배경

- (극한 환경) 해빙이 분포하는 극해역은 낮은 온도와 해빙 분포, 광도의 극심한 변화로 인해 독특한 생태계가 형성
- (연구관심 고조) 극한환경의 특성으로 인하여 일차생산성이 낮은 곳으로 여겨왔으나 최근 연구결과를 통해 북극해 해빙 생태계가 다른 해역과 마찬가지로 매우 활발한 것으로 밝혀졌으며 극지권 국가들을 위주로 해빙생태계 연구가 집중되고 있음
- 해빙 생태계 연구의 과학적, 경제/산업적, 기술적, 사회/문화적 수요 증가
 - (과학적 측면) 다양한 해역에서의 해빙 생태계 탄소 흡수율 및 생성유기물의 변화 추적은 북극해 전체 생지화학물질 순환을 이해하는데 필수적 요건
 - (경제·산업적 측면) 해빙 재현 빙해수조 구현 기술을 통한 생태계 재현 기술 확보 및 북극 항로 진출 시 해빙 생태계에 대한 환경오염 방지 자료 요구
 - (기술적 측면) 해빙 생태계에 대한 생태적 지위 규명을 위한 새로운 분석 기법의 접목을 시도함으로써 선도적 국제 지위 획득
 - (사회·문화적 측면) 북극해의 과학·경제적 활용(환경, 북극항로 등)을 위한 국가 정책 자료 제공 및 국민적 관심이 증대하고 있는 북극해 기후변화, 북극항로, 해빙 생태계 등에 대한 과학적 정보 제공
- (국제협력관계) 우리나라는 북극 연안국가를 중심으로 한 다양한 해빙 생태계 연구에 참여 기회를 부여받고 국제 협력 네트워크를 형성 협의 중
 - (캐나다) Polar Continental Shelf Program(PCSP) 프로그램 Arctic-ICE camp에 캐나다 매니토바 대학과 공동연구 협의 중
 - (노르웨이) Norwegian young sea ICE(N-ICE2015) expedition 프로그램 이후 차기 프로그램 참여를 위한 연구자 간 협의 중
 - (미국) IARC-International Arctic Research Center와 알래스카 페어뱅크스 대학을 통한 해빙 관련 공동연구 협의 중
 - (러시아) 볼셰비키섬 해안가에 위치한 Baranova 기지 주변 해빙 연구를 위한 연구 협력 작업 준비 중
 - (영국) 해빙 미세조류의 생체지표 분석 기법을 위한 플리머스 대학과 LOU(Letter of Understanding) 협의

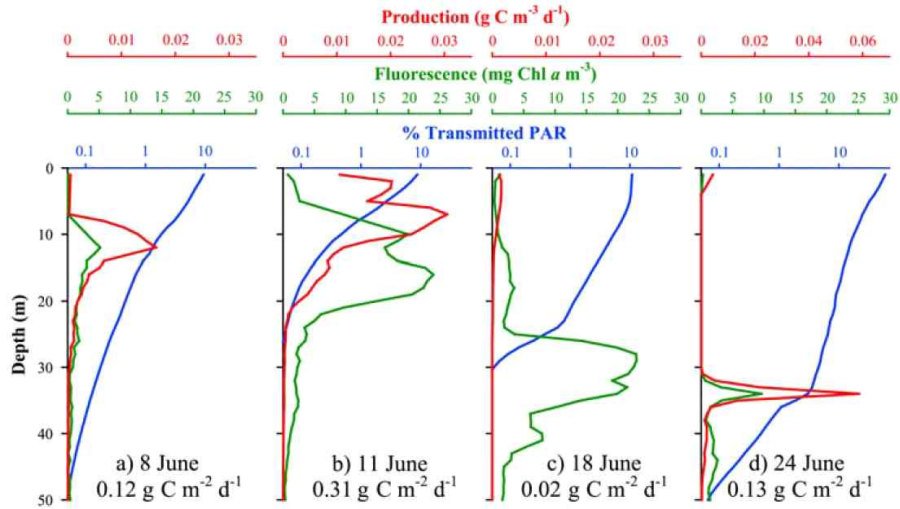
2절 사업 추진의 필요성

- 북극 다산 기지 기반 해빙 생태계의 탄소 흡수율 및 피드백 연구 사업 추진 방향 설정 필요
- 해빙 재현 실험실 구현을 통한 다양한 환경 재현 실험에 대한 연구 기반 구축과 성과 제시 필요
- 북극해 해빙 조건에 따른 환경 변화 및 해빙 미세조류의 광적응 생리 기작 파악을 위한 방향 설정 필요

1. 해빙 생태계 연구의 중요성

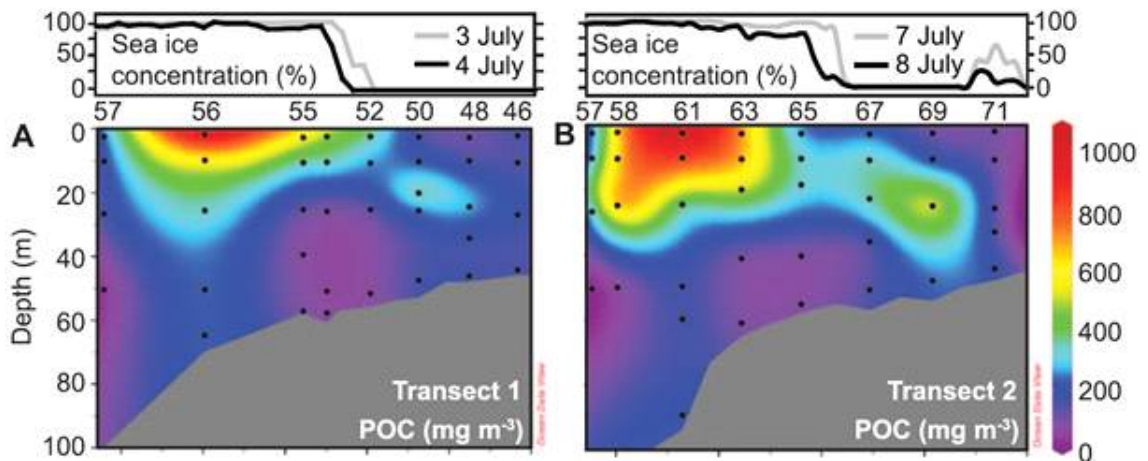
- 북극 해빙분포의 급격한 감소로 인하여 북극해 환경은 빠르게 변화하고 있음
 - 북극해 해빙은 매년 최저치 기록을 갱신하고 있으며, 여름철 다년생 해빙으로 덮여 있던 해역이 해빙의 유실로 인하여 초년생 해빙의 상대적 비중이 높아짐
 - 해빙의 두께가 감소함으로써 투과된 광량은 해빙 생태계를 자극함으로써 이전에 비해 높은 해빙 생태계의 활성을 보임
 - 2008년 보고에 의하면, 북극해 전체 일차생산력의 약 15 ~ 20%를 해빙 미세조류의 일차생산력이 차지하고 있음(Arrigo et al. 2008).
 - 해빙 미세조류의 생산력 변화는 초년생 해빙의 증가와 더불어 증가될 것으로 예상되며, 새롭게 평가될 필요성 강조
 - 지구 온난화에 의한 해빙의 급격한 변화는 북극 탄소 흡수의 변화를 초래하며 특히 기존 해빙 생태계에 대한 탄소 흡수에 대한 기여도가 상대적으로 저평가되었던 부분을 재평가할 필요성이 있음
 - 해빙의 후퇴뿐만 아니라 초년생 해빙의 증가는 해빙에 서식하는 미세조류의 활성을 높일 가능성이 높아지며 이에 대한 탄소 흡수율에 대한 기여도를 파악하는 것이 우선적으로 선행되어야 함
 - 또한 북극해 단년생 해빙의 증가는 해빙내부 단과복사량의 투과도를 높여 해빙내부 및 기저의 생태계변화에 영향을 미치고 있으며 이에 따른 해빙의 열적특성과 내부 단과복사량 투과도의 변화를 추정하고 생태계 변화와의 관계 파악이 필요

- 최근 해빙 미세조류의 기초 생산력이 북극해 기초 생산력에 대한 기여도가 매우 높은 것으로 보고되어진 바 있으며(Mundy et al., 2009) 최근 다양한 연구 결과로서 미세조류의 중요성이 부각되고 있음



[그림 1-1] 해빙 미세조류의 기초 생산력과 부유 식물플랑크톤의 기초 생산력 비교

- 기후변화에 의한 해빙의 후퇴 및 단년생 해빙의 증가는 해빙 저서 미세조류의 활성을 높일 가능성이 크기 때문에 해빙 미세조류의 탄소 흡수율에 대한 기여도 파악은 향후 기후변화에 의한 북극해 해빙 생태계 변화 연구에 우선적으로 수행되어야 함
- 해빙미세조류는 부유 생태계뿐만 아니라 저서 생태계에서도 먹이원으로써의 기여도가 매우 큰 것으로 알려져 있으며(McMahon et al., 2006), 따라서 해빙 미세조류 기원 유기탄소의 거동을 확인하는 것은 해빙 생태계를 이해하기 위해 필수적임
- 따라서 현재의 반응 상태를 파악하여 북극 기후 피드백 순환고리를 구성하여 향후 전 지구적 기후 변화의 연관성을 고찰할 필요성 제기

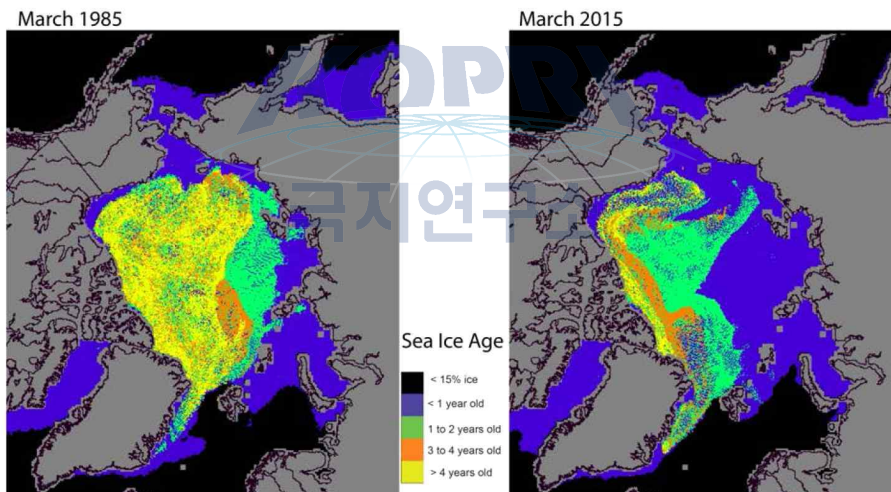
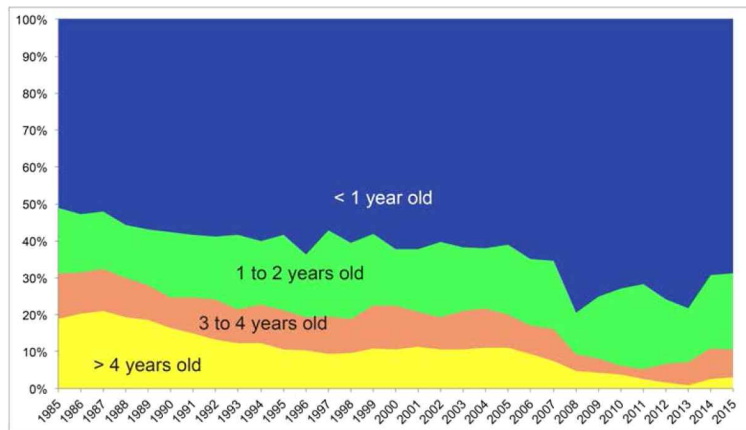


[그림 1-2] 해빙 미세조류의 입자성 유기탄소 농도 분포

- 인공위성을 활용한 북극해 전반의 해빙 생태계 변화를 감지할 수 있는 기술이 필요
 - 마이크로파 센서를 활용한 원격탐사는 극지역 해빙의 분포와 특성을 파악하는데

필수적이며, 해양생태계의 기초생산을 담당하는 식물플랑크톤의 생물량 및 분포 특성을 파악하는 데는 해색위성 센서(ocean color)를 활용한 원격탐사가 매우 중요하며, 그 활용성과 요구가 점점 더 증가하는 추세임

- 원격탐사 기법을 통해 얻어진 자료는 통상적인 해양관측만으로는 불가능한 일간 주기의 연속적인 관측을 광역에 걸쳐 한 번에 수행할 수 있어 대양 및 극지 연구에 필수적임



[그림 1-3] 시간에 따른 해빙 미세조류의 분포 (윗그림) 1985년 3월 (왼쪽 아래) 부터 2015년 3월 (오른쪽 아래)

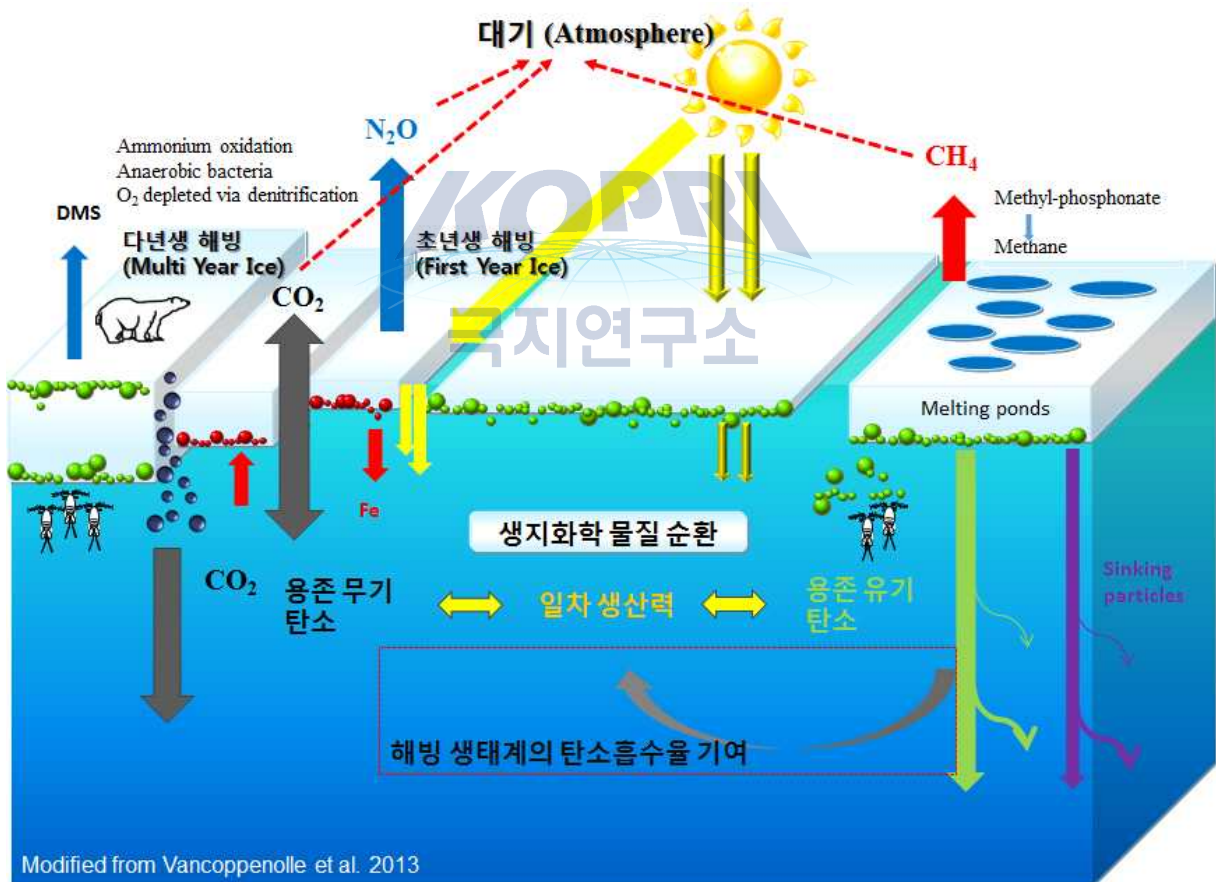
□ 급격한 극지환경의 변화로 인한 해빙 서식 생물들의 적응기작 이해 필요

- 상대적인 환경제약(영양염류 제한) 및 광제약(광투과율 및 자외선 투과율)에 대한 해빙 생태계의 성장 조건 및 광적응 기작 파악으로 극한 환경에 대한 하위 생물의 생존 전략을 파악함으로써 생물 진화에 대한 이해 고취
- 해빙 생태계 재현 빙해수조를 통하여 다양한 환경에 따른 해빙 생태계의 탄소 흡수율 및 생성 유기물의 변화를 추적
- 해빙 생태계 모의실험으로 해빙 미세조류의 생리 활성 변화 및 bio-gas 생성

메커니즘 자료를 통하여 미래 예측 기후 변화 모델에 중요한 자료를 제공

□ 해빙 생태계를 연구 대상으로 하는 생지화학적인 통합 비교 연구를 수행 필요

- 우리나라 최초로 국내 과학기지(북극 다산기지) 및 국제 공동연구(북극 연안국 과학기지) 인프라를 활용한 해빙생태계의 다학제적 조사를 통해 북극 해빙의 급격한 환경변화 현상 이해와 미래 활용 기반 확립
- 겨울 ~ 여름에 이르는 시기 해빙 - 해양 생태계 내에서의 탄소의 순환을 이해하기 위해서 pCO₂의 변동을 관측하는 것은 필수적
- 북극 해빙 생태계 연구는 해빙 생태계의 탄소 흡수율 기여에만 국한된 것이 아니라 해빙 생태계의 발생과 성장, 소멸시기에 탄소흡수율 뿐만 아니라 기후 변화 인자의 생성 기작을 병행함으로써 전 지구적인 기후 변화에 대한 이해도를 높임



[그림 1-4] 해빙 생태계의 탄소흡수율 기여에 따른 기후 변화 피드백 효과

3절 기획 연구 목표

□ 본 기획연구를 통하여 아래의 연구목표를 제시하여 결과를 도출하고자 함

[연구목표 1] ‘북극 다산기지 기반 해빙 생태계의 탄소흡수율 및 피드백효과’ 사업 설계 및 추진 방향 제시

[연구목표 2] 사업 추진을 위한 세부 연구 방법론 제시

- 인공위성을 활용한 북극해 일차생산 및 해빙(초년생) 상태 파악 (북극해 전체 일차생산력 산출)
- 해빙 내 빛 투과율 측정 (해빙 생태계 내 활성을 위한 빛 투과도 측정 방법 제시 및 내부 해빙 열역학)
- 해빙 미세조류 탄소흡수율 측정 방법 제시 (해빙 생태계 내 탄소 흡수율 및 유기탄소 거동에 대한 고찰)
- 해빙 미세조류에 대한 생태학적 접근 (해빙 미세조류의 종 다양성 및 생태, 광적응기작에 대한 방법론 제시)
- 해빙 생태계에 의한 이산화탄소 분압의 변화 예측 (해빙 생태계 내 생성된 이산화탄소 거동 및 분석 방법 고찰)
- 북극 해빙 생태계 활성으로 인한 기후변화 기체에 대한 측정 방법 및 기후 변화 피드백 효과에 대한 접근 방법 제시)
- 해빙 생태계 재현 빙해 수조 구현에 대한 기술적 접근 (인위적 환경변화 조절이 가능한 빙해 수조 설계 및 타당성 검토)

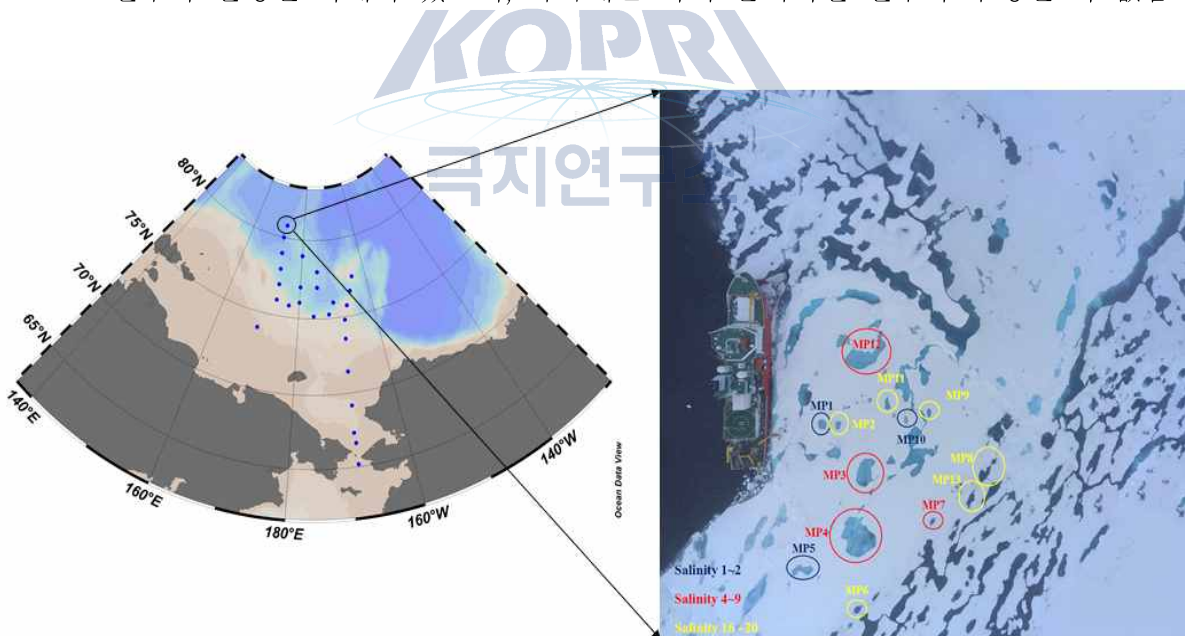
[연구목표 3] 사업 추진을 위한 세부 목표 설정 및 단계별 성과 목표 수립

[연구목표 4] 사업 추진에 필요한 인력 및 재원에 대한 사전 조사

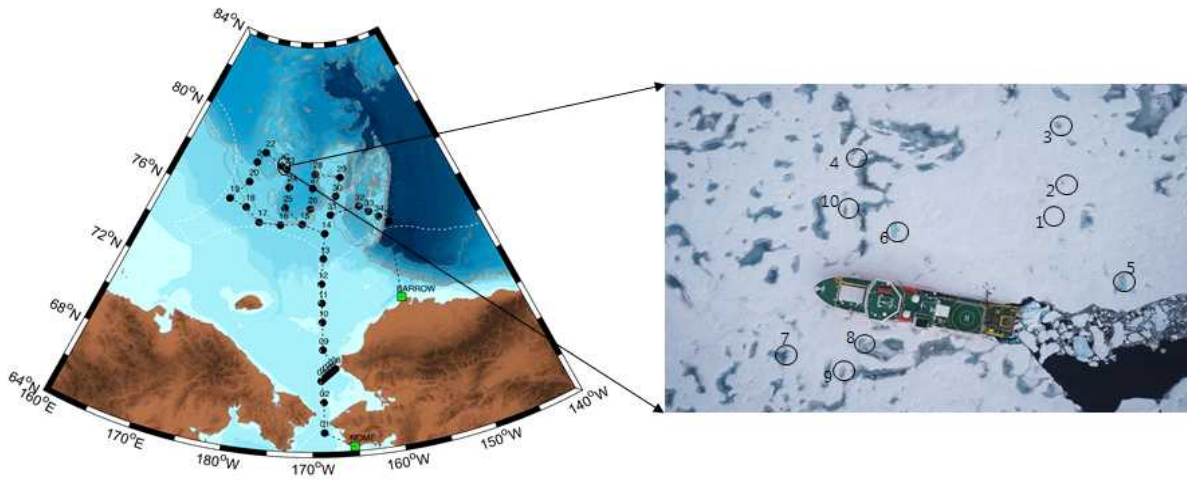
제 2 장 국내외 환경분석

1절 해빙 생태계 국내 연구 동향

- 극지 해양 생태계에 대한 연구는 기존 극지해양연구관련 사업(‘양극해 환경변화 이해 및 활용연구’ 2011~2016, 해양수산부)에서 일부 수행되었으나 해빙 생태계만을 위한 국내 연구는 현재까지 전무함
 - 이제까지 극지연구소에서는 남극 및 북극 해양 종합관측연구가 다수 수행되었으며, 일부 과제에서는 해빙캠프 프로그램을 통하여 해빙 위 연구를 수행하였음
 - 그러나 연구기간 및 연구지역의 특수성으로 인하여 해빙 미세조류 대상의 심도 있는 연구는 이루어지지 않았음
 - 인공위성을 활용한 해빙연구의 경우 한국과학기술원의 원격탐사센터에서 한반도 주변 및 동아시아 지역 관측을 수행할 수 있는 정지궤도 위성 활용 등의 연구가 이루어져 왔으나, 원격탐사 기반 극지연구는 국내에서 체계적으로 수행된 사례가 거의 없으며 최근에 들어서야 극지연구소 주요사업의 일환으로 남극해에 대한 연구가 진행된 사례가 있으며, 북극해는 아직 본격적인 연구가 수행된 바 없음



[그림 2-1] ‘양극해 환경변화 이해 및 활용연구’과제에서 수행된 Sea Ice Camp 조사 지역 및 Melting Ponds 연구지역 (2015년)

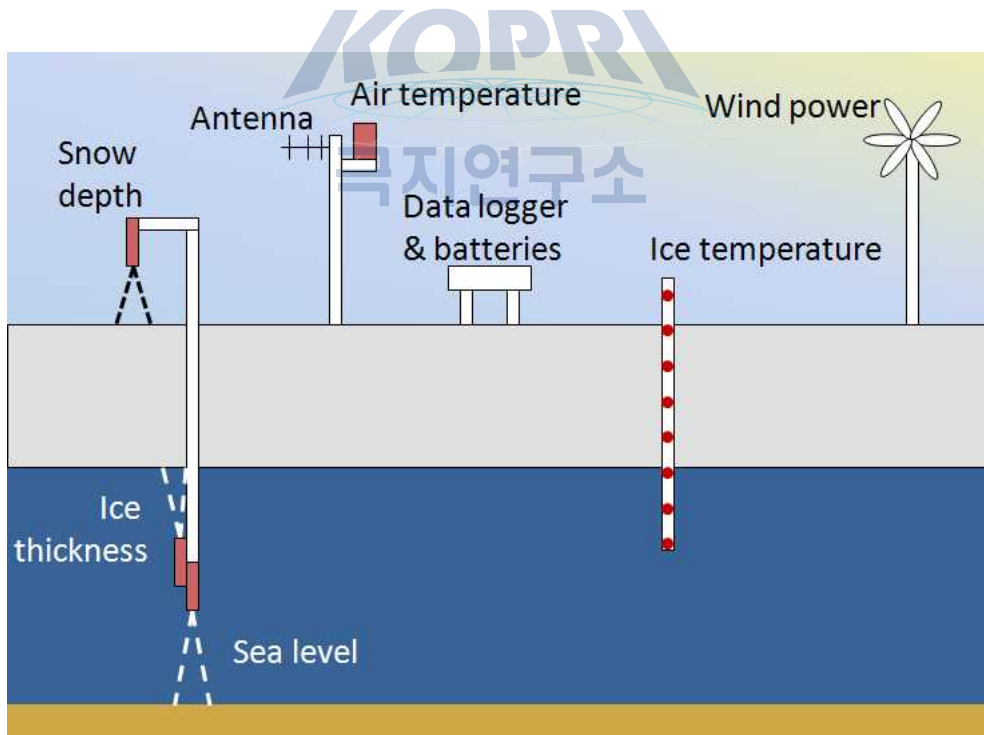


[그림 2-2] '양극해 환경변화 이해 및 활용연구'과제에서 수행된 Sea Ice Camp 조사 지역 및 Melting Ponds 연구지역 (2016년)



2절 해빙생태계 국외 연구 동향

- 극지 연안국 중심으로 해빙 미세조류에 대한 연구가 활발히 진행
 - (캐나다) Polar Continental Shelf Program(PCSP) 프로그램 Arctic-ICE camp를 통해서 다양한 분야에서 연구가 진행
 - (미국) NASA에서는 Impacts of Climate on the Eco-Systems and Chemistry of the Arctic Pacific Environment(ICESCAPE) 프로그램을 2010부터 실시. 또한 1979년 Coastal Zone Color Scanner(CZCS) 해색센서를 시작으로 1997년 Sea-Viewing Wide Field-of-View Sensor(SeaWiFS) 센서를 활용해 본격적으로 해양 표층 식물 플랑크톤 관측에 위성자료가 광범위하게 쓰여짐
 - (미국) University of Alaska Fairbanks(UAF)에서는 북극해 해빙변동성 관측을 위해 2005년부터 현재까지 Barrow Sea(71° 22' 25.36" N, 156° 32' 30.91" W)에서 해빙 두께변동 및 온도와 기상자료를 관측하고 있으나 정확도가 상대적으로 낮아서 해빙 열적특성 연구에는 제한적임
 - (노르웨이) Norwegian young sea ICE(N-ICE2015) expedition 프로그램을 통해 북극 sea ice regime 에 대한 연구 진행

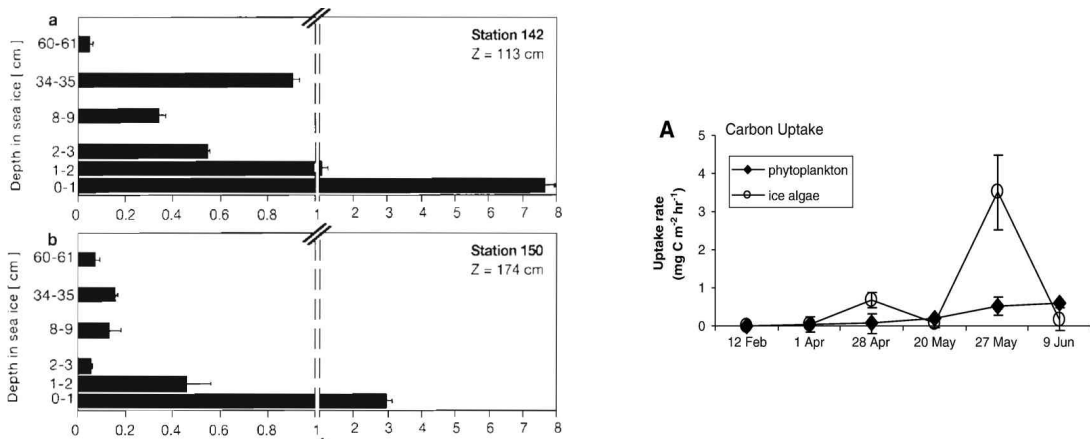


[그림 2-3] UAF에서 운영 중인 Barrow Sea Ice Mass Balance Site.

- 해빙 및 해양 생태계를 이해하기 위한 다양한 연구 진행
 - 탄소 안정동위원소비를 활용한 해빙 미세조류의 생산력 측정연구가 우리나라에서는 매우 제한적으로 진행되고 있는 반면(Lee et al., 2008) 극지 선진국에서는 매우

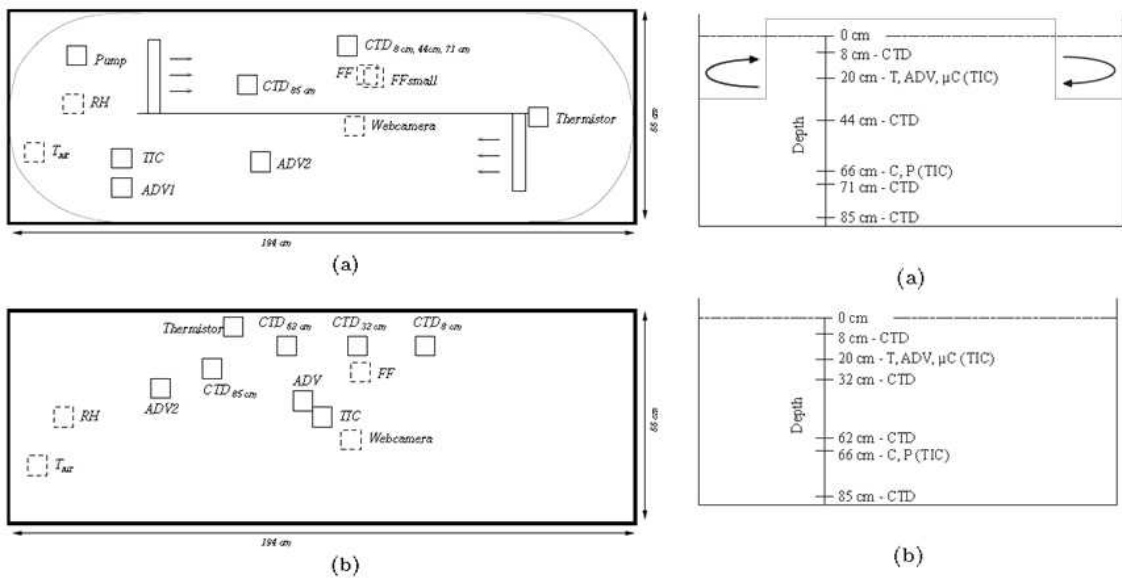
다양하게 보고되고 있음(Mock & Gradinger, 1999)

- 특히 안정동위원소 및 지방산 조성을 활용하여 동물플랑크톤에 대한 해빙 미세조류의 먹이기여도 및 저서 생태계에 대한 해빙 미세조류의 기여도에 대한 보고가 되었으며, 최근에는 분자단위 생체지표(아미노산)의 질소 안정동위원소비를 활용한 해양생물의 영양단계 규명 연구에 대한 장점에 대하여 보고된 바 있음(Chikaraishi et al., 2009)



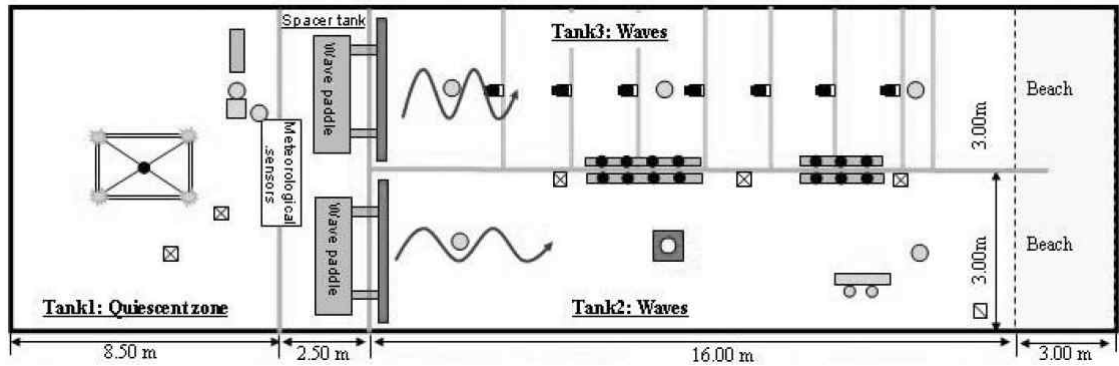
[그림 2-4] 탄소 안정동위원소를 활용한 해빙 미세조류 기초생산력 측정 선행 연구사례
국외(좌)와 국내(우)

- 노르웨이 University of Bergen과 독일 Max Planck Institute for Meteorology는 해류의 흐름에 따른 결빙에 관한 연구를 위해 Ice Tank의 제작유속에 따른 결빙 연구를 진행하여 결빙 시 온도 및 염분도 변화를 확인



[그림 2-5] University of Bergen Ice Tank (좌)평면도 (우)수직도 (a)해류형 (b)고정형

- 영국 Scottish Association for Marine Science(SAMS)에서도 유사한 연구를 진행하여 유속에 따른 결빙 연구를 진행하여 결빙 시 온도 및 염분도 변화를 확인



[그림 2-6] SAMS Ice Tank 평면도 (좌)고정형 (우)해류형

3절 시사점

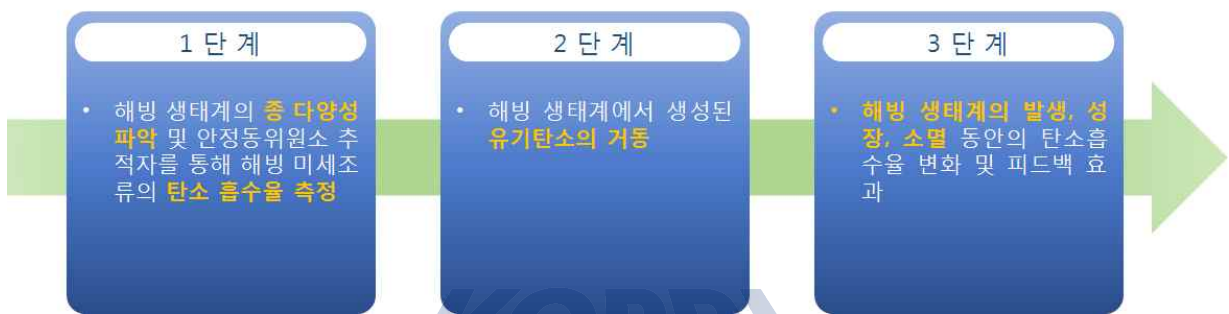
- 극지 선진국들은 해빙 생태계 연구의 중요성을 인식하고 장기적인 대형 연구프로젝트를 수행중이나, 이에 대응한 국내 연구활동 미약, 그동안 우리나라의 경우 지리적 접근성의 취약으로 인하여 해빙 생태계 활성화 시기에 집중적인 연구가 진행되지 못함
- 세계적인 극지연구의 성장성과 기회를 감안한다면 미래 국가 신성장동력으로 육성하고 세계적 경쟁력을 갖는 극지연구 육성이 무엇보다 중요
- 우리나라의 극지역량 강화를 위하여 장기적인 관점에서 해빙 생태계 중심의 깊이 있고 장기적인 연구 수행이 필요

제 3 장 사업 설계

1절 사업 추진방향

연구과제 개요

- 과 제 명** 북극 다산기지 기반 해빙 생태계의 탄소흡수율 및 피드백 연구
- 최 종 목 표** 급격한 북극 해빙 상태 변화로 인한 해빙 생태계의 탄소 흡수율 기여도 파악
- 성 과 목 표** 북극해 탄소 흡수율 및 생지화학 물질 순환 매커니즘에 해빙 생태계의 기여도 파악

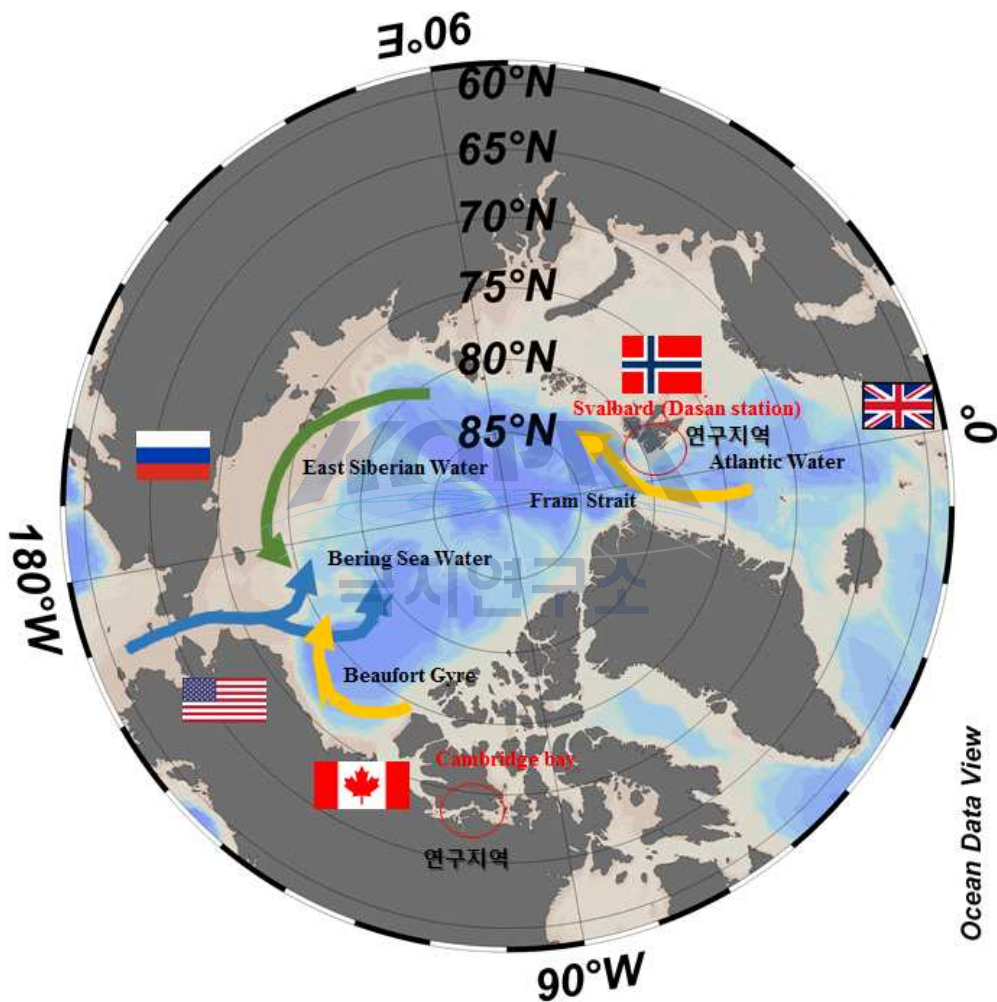


[그림 3-1] 사업 개요 및 추진방향

- **1단계** : 봄철 해빙 생태계가 활성화 되기 시작하는 시점의 해역별(대서양 북극(북극 다산기지)와 태평양 북극(캠브리지 베이, 캐나다))의 landfast ice에 형성된 해빙 생태계에 대한 환경 및 기초 자료 획득
- **2단계** : 각 해빙 생태계 내 유기탄소 생성 및 해빙 생태계 내 유기탄소 거동(동물 플랑크톤 중심의 유기탄소 소비 및 재사용에 대한 추적)
- **3단계** : 중점 거점(북극 다산기지)의 해빙 생태계 발생, 성장, 소멸에 대한 시간적인 탄소흡수율 및 수계 내 이산화탄소 분압 변동 추적. Polar sunrise 이전부터 이후 해빙의 소멸까지 장기적인 모니터링

2절 사업 추진방향에 따른 세부 연구목표 수립

- 급격한 북극 해빙 상태 변화로 인한 해빙 생태계의 탄소 흡수율 기여도 파악
 - 인공위성을 이용한 다년간 해빙 상태 변화 추적 및 일차생산력의 변화 추적
 - 해빙 생태계의 활성에 따른 탄소흡수율에 대한 새로운 측정 방법 정립
 - 저평가되었던 해빙 생태계의 탄소흡수력 재평가 및 북극해 일차생산력에 대한 기여도 파악
 - 해빙 생태계로 기인한 생물기원 기체가 기후에 변화에 미치는 효과 파악



[그림 3-2] 북극해 해빙 생태계의 연구 거점

- 북극해 해빙 생태계의 탄소흡수율 변화 관측 및 활용방안 제시를 위한 추진전략 제시
 - 다양한 해역(대서양 및 태평양 북극해)에 위치한 과학기지 기반으로 중점연구대상 선정
 - 해빙 생태계에 대한 다각적인 접근(해빙 물리, 위성관측, 생태, 생화학 분야의 통합

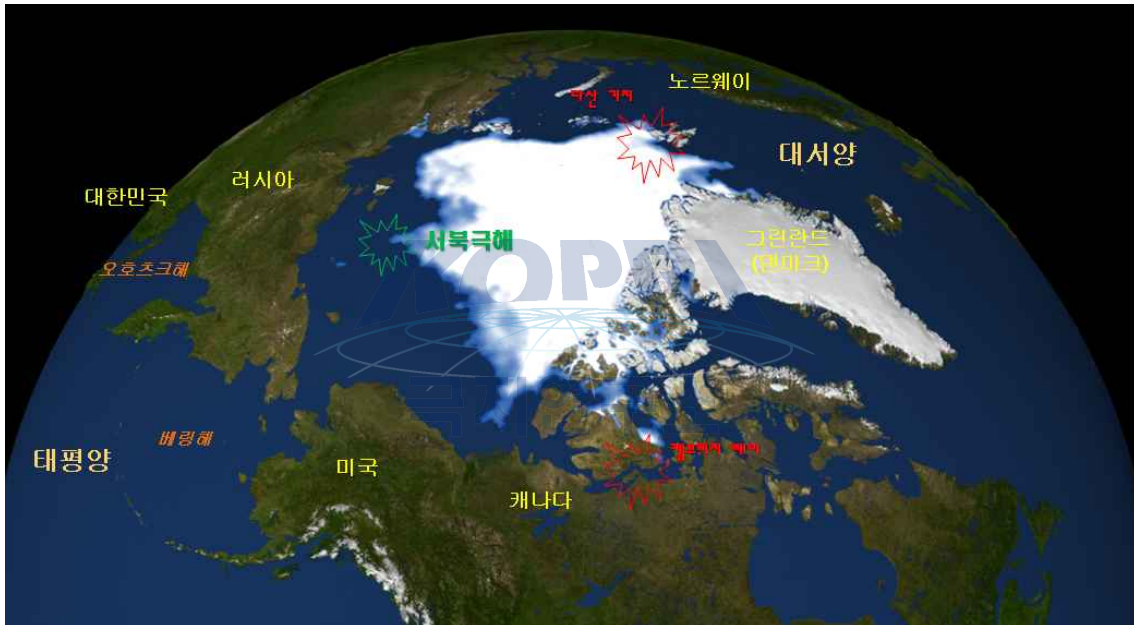
적인 관측)

- 극지연안국과 연계한 국제 공동연구를 통한 북극 연구성과 제고 및 협력 네트워크 확대

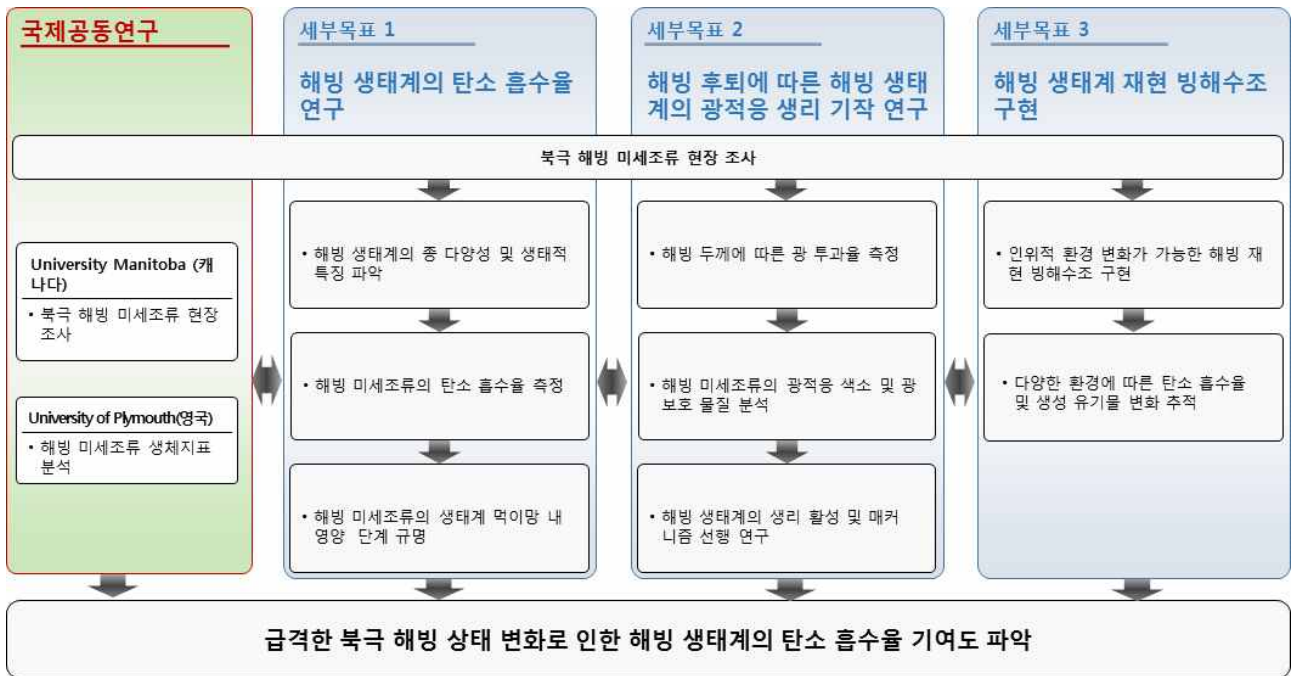
3절 사업 추진내용

□ 사업 범위

- 북극해 연안을 중심으로 노르웨이 �발바드(북극 다산기지), 캐나다 캠브리지 베이 지역에서 연구 수행

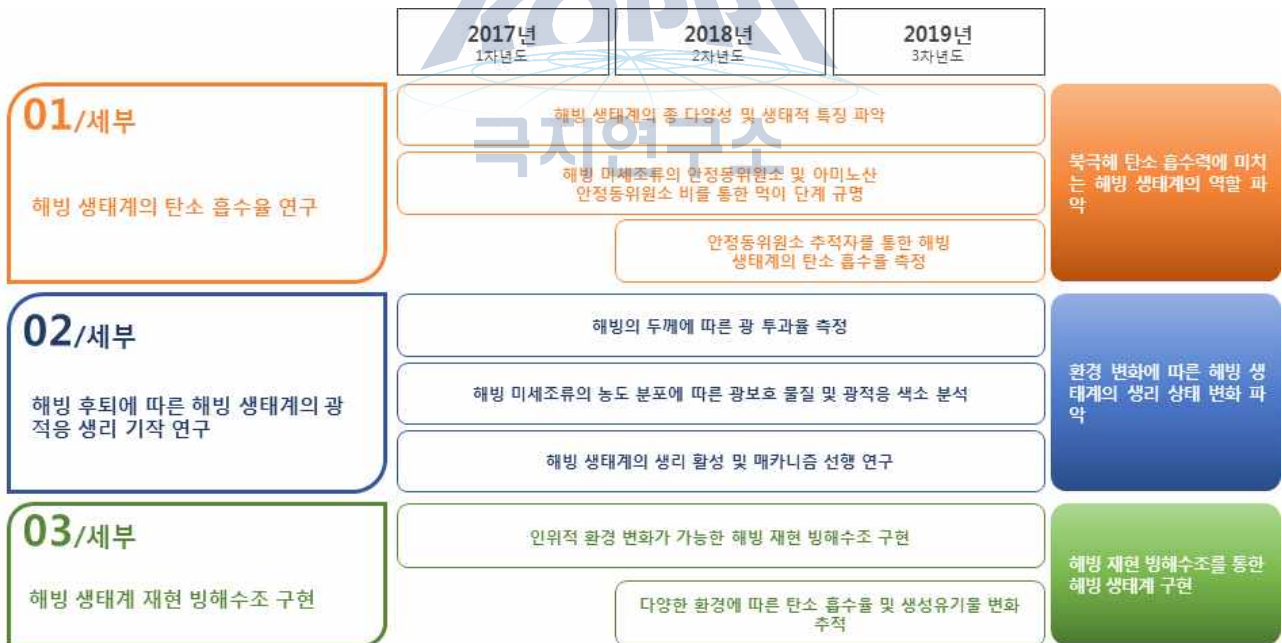


[그림 3-3] 북극 연안 중심의 연구 거점 (북극 다산 기지 및 캐나다 캠브리지 베이)

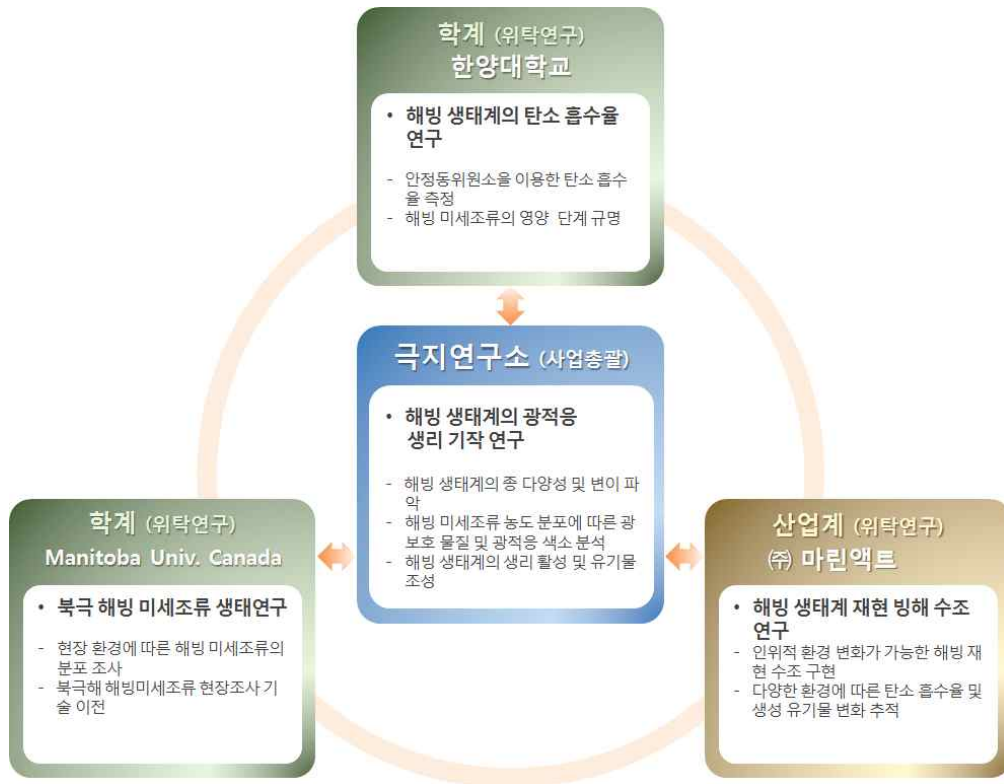


[그림 3-4] 단계별 세부 목표 및 국제공동연구

□ 총괄 로드맵 및 산학연 연계도



[그림 3-5] 사업 총괄로드맵



[그림 3-6] 주관기관과 위탁기관과의 산학연 연계도



□ 연구개발 모식도



[그림 3-7] 연구개발 모식도

1. 사업 세부내용

[세부목표 1] 해빙 생태계의 탄소 흡수율 연구

가. 목표

- 해빙 생태계의 종 다양성 파악 및 안정동위원소 추적자를 통해 해빙 미세조류의 탄소 흡수율 측정
 - 해빙 생태계의 종 다양성 및 생태적 특징 파악
 - 해빙 미세조류의 안정동위원소 및 아미노산 안정동위원소 비를 통한 먹이 단계 규명
 - 안정동위원소 추적자를 통한 해빙 생태계의 탄소 흡수율 측정

나. 추진내용

- 인공위성을 활용한 북극해 해빙 상태 변화 및 일차생산력의 변화 추이 조사
 - National Snow and Ice Data Center(NSIDC, <http://nsidc.org/>)에서 제공하는 Sea Ice Concentration 자료를 활용
 - 해상 위성으로 관측된 표층 엽록소 농도와 표층 광량 자료 획득
- 안정동위원소 추적자를 이용한 현장 탄소흡수율 측정
 - 탄소 안정동위원소 추적자를 활용하여 현장배양을 통해 북극 해빙 미세조류의 탄소 흡수율(생산력)을 측정
 - 해빙생태계에서 해빙 미세조류에 의해 흡수된 탄소의 거동을 파악
 - 탄소 및 질소 안정동위원소를 활용하여 해빙 생태계 먹이망 구조를 파악하고, 해빙 미세조류의 탄소원으로서의 기여도를 확인

다. 기대성과물

- 북극해 전체의 일차생산력 산출
- 인공위성을 이용한 일차생산력과 현장 측정치 간 비교 분석
 - 해빙 생태계의 북극해 전체에 대한 탄소흡수율 기여도 산출
- 해빙 미세조류의 생태학적 지위 규명 및 해빙 생태계 먹이망 구조 파악
 - 최신 분석 기술(아미노산 동위원소비)을 통한 국제적 선도
 - 해빙 생태계 내 유기물 순환 구조 파악

[세부목표 2] 해빙 후퇴에 따른 해빙 생태계의 광적용 생리 기작 연구

가. 목표

- 해빙 분포 감소에 따른 해빙서식 생물의 광적용 생리기작 규명
 - 해빙 두께에 따른 광 투과율 측정
 - 해빙 미세조류의 광적용 색소 및 광보호 물질 분석
 - 해빙 생태계의 생리 활성 및 메커니즘 연구

나. 추진내용

- 해빙 생태계의 생리 활성 및 유기물 조성
 - 해빙 미세조류의 자외선 투과율에 따른 자외선 흡수 물질 농도 분포 측정
 - 해빙 미세조류의 농도 분포에 따른 광적응 색소 분석
- 북극 해빙의 열적 특성 및 빛 투과율 측정
 - 해빙 내부 수직온도의 장기간 연속관측과 해빙열적 특성 산출을 통해 해빙내부 층별 단파복사량 산출
 - 해빙내부의 온도변화는 해빙의 상부, 하부 접합면에서 대기, 해양과의 열 교환을 관측함으로써 계산
- 북극 해빙 생태계 변화로 인한 기후 변화 피드백 순환고리
 - 북극환경변화(해빙 감소를 중심으로)와 관련하여 기후 변화 피드백 순환고리를 북극의 탄소 흡수 능력과 일차생산성 변화를 중심으로 구성
 - 해양환경에서 질소 순환은 제한 영양염으로 작동하면서 일차 생산성을 조절하는 중요한 인자 파악

다. 기대성과물

- 해빙 특성에 따른 빛 투과율 추정
 - 다년생 해빙과 초년생 해빙 특성에 따른 빛 투과율 비교
- 해빙 생태계 내 생성 유기물의 순환 추적
 - 해빙 미세조류 기원 유기물의 생태계 먹이망 내 전달 과정 파악
- 해빙 생태계 변화에 따른 기후 변화 모델에 자료 제공
 - 해빙 생태계에 의한 기후 변화 기체 생성 메커니즘
- 질소 순환의 고리 중 해빙 생태계의 역할 파악

[세부목표 3] 해빙 생태계 재현 빙해수조 연구

가. 목표

- 해빙 생태계 재현 빙해수조 구현
 - 인위적 환경 변화가 가능한 해빙 재현 빙해수조 구현
 - 다양한 환경에 따른 탄소 흡수율 및 생성 유기물 변화 추적
 - 모의실험 결과를 미래 예측 모델의 자료 제공

나. 추진내용

- 해빙 생태계 재현을 통해 다양한 환경에 따른 탄소 흡수율 및 생성 유기물 변화 추적
 - 해양환경 변화에 따른 해빙 미세조류의 생리 활성 변화 및 bio-gas 생성 기작에 대한 기초 자료 획득

<표 3-1> 해빙 수조 환경 조건

온도	+ 30 °C to - 55 °C
해빙 두께	~ 30 cm
광원	LED's and UV (UVA and UVB)
센서	Micro CTD (conductivity, temperature and depth) sensor
Underwater camera system	with LED light
circulation pumps and wave generator	
Atmospheric gas measurements	NO, NO ₂ , NO _y , O ₃ , CH ₄ , CO ₂

다. 기대성과물

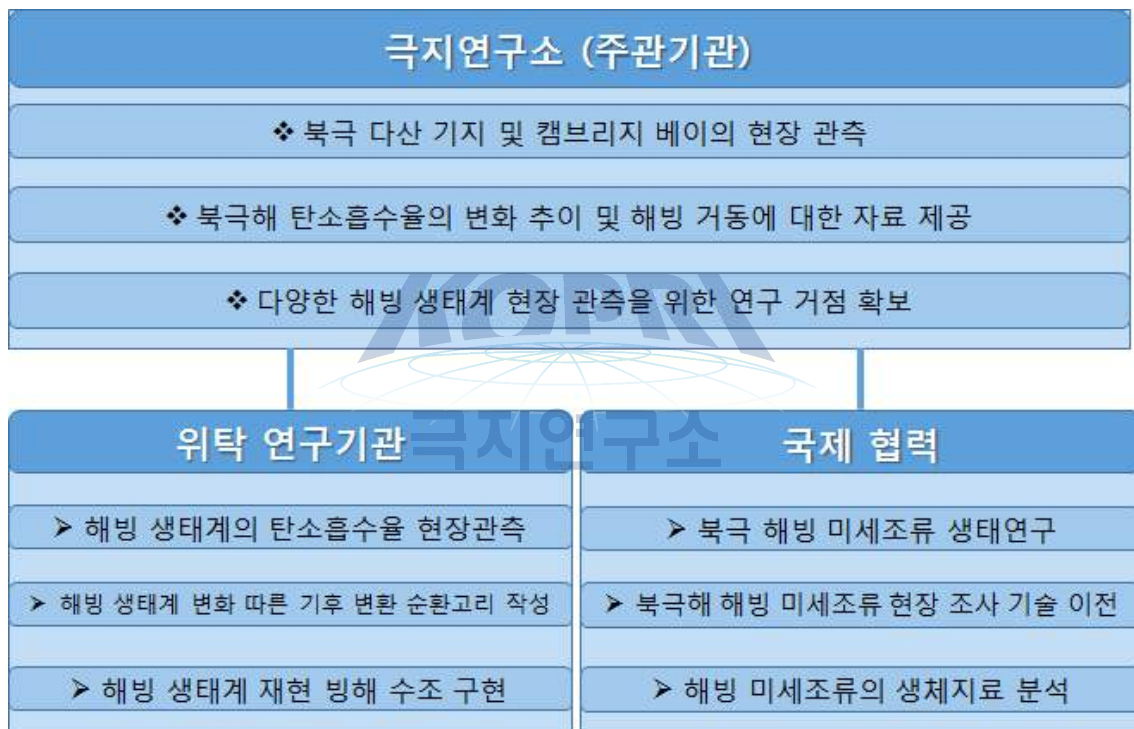
- 다양한 환경변이 조절이 가능한 빙해 수조 구현
- 모의실험을 통한 기후 변환 모델 자료 제공



4절 사업 추진체계 및 소요예산

1. 사업 추진체계

- 사업의 성공적인 목표달성을 위한 각 주체들이 상호 협력하여 추진
 - (극지연구소) 주관연구기관으로서 해빙 생태계의 통합적인 연구 수행 및 해외 유관 기관과의 협력체계 구축
 - (위탁연구기관) 효과적인 북극 해빙생태계의 환경 변화 연구 추진을 위한 위탁 연구기관을 지정하여 운영 · 협력
 - (국제공동연구기관) 상호보완적인 협력관계로 해빙 생태계에 대한 연구 추진, 성과물 획득



[그림 3-8] 사업 추진체계

2. 사업 소요예산

- 본 사업의 총 투자금액(2017~2019년, 3년간)은 15억 원으로, 북극 현장조사 비용을 포함한 4개의 주요 내용으로 기획함

<표 3-2> 세부과제별 소요예산

세부과제	년도			
	2017	2018	2019	합계
• 북극 해빙생태계의 현장 탄소흡수율 측정 연구	8,000	8,000	8,000	24,000
• 해빙 생태계의 광적응 생리 기작 연구	8,000	8,000	8,000	24,000
• 해빙 생태계 변화로 인한 기후 변화 피드백 순환고리	8,000	8,000	8,000	24,000
• 해빙 생태계 재현 빙해수조 연구	10,000	5,000	5,000	20,000
• 북극 과학기지 기반 해빙생태계 현장조사	16,000	21,000	21,000	58,000
합 계	50,000	50,000	50,000	150,000

□ 연차별 소요예산 세부내역

<표 3-3> 연차별 소요예산 세부내역

(단위 : 백만원)

구분	세부내역	소요예산	
'17	• 북극(캠브리지 베이) 해빙 생태계의 현장 탄소흡수율 측정	100	500
	• 북극 다산 기지 해빙 미세조류의 종 조성 및 다양성 조사	140	
	• 해빙 생태계 재현 빙해 수조 구축	100	
	• 북극 해빙 생태계(북극 다산기지 및 캠브리지 베이)의 생성 유기물 조사	160	
'18	• 북극(캠브리지 베이) 해빙 생태계의 현장 탄소흡수율 측정 (현장조사 2차)	100	500
	• 북극 다산기지 해빙생태계의 현장 탄소흡수율 측정 (현장조사 1차)	150	
	• 해빙 생태계 구성원 채취 및 아미노산 안정동위원소 분석	100	
	• 해빙 생태계 재현 빙해 수조 정비 및 보완	50	
	• 해빙 생태계 생성 유기물 거동 및 기후 변화 피드백 효과	100	
'19	• 북극 해빙 미세조류의 발생, 성장, 소멸 시 탄소흡수율 장기 관측	200	500
	• 북극 해빙 생태계 내 이산화탄소 분압의 변화 관측	100	
	• 해빙 생태계 재현 빙해 수조 정비 및 보완	50	
	• 해빙 생태계의 성장단계별 기후변화 피드백 효과	150	
합 계		1,500	

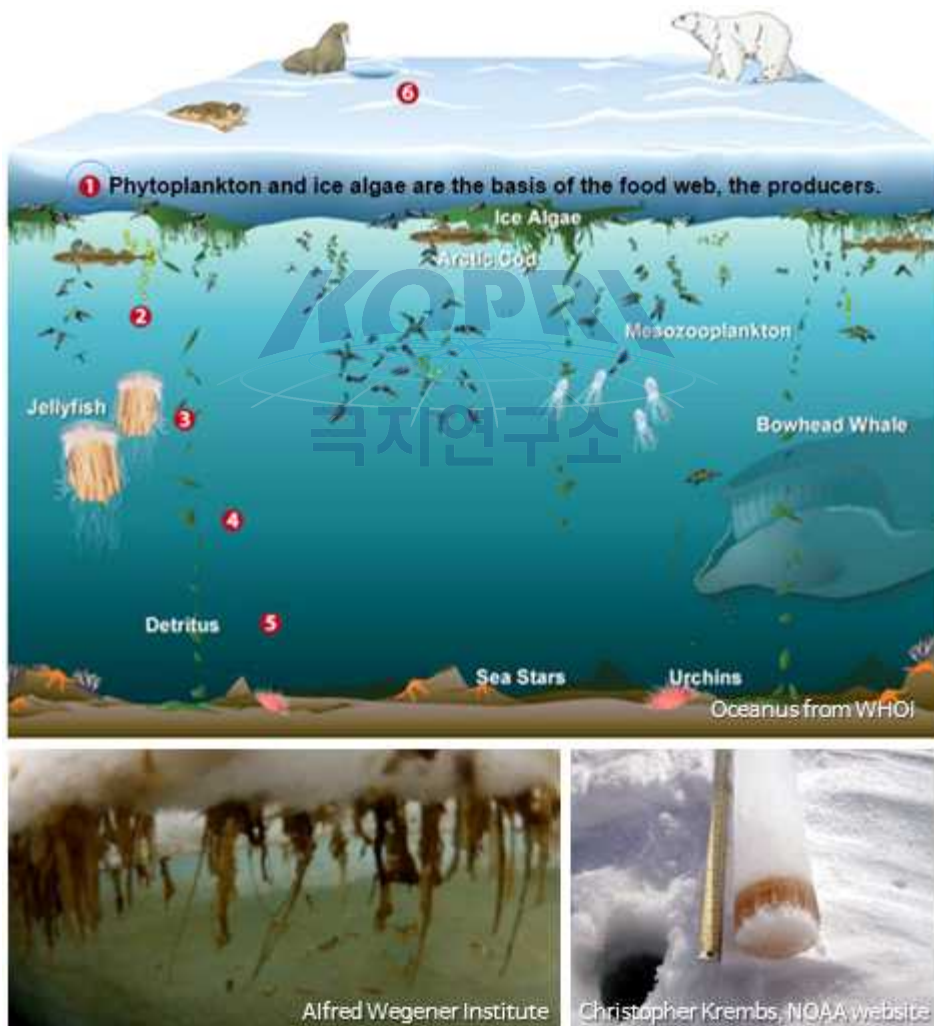
제 4 장 세부목표 별 연구방법론

1절 해빙 미세조류 종다양성 파악 및 광적응기작 연구

1. 해빙 미세조류 종다양성 파악

가. 해빙 미세조류의 특성

해빙 미세조류는 북극 및 남극 해빙에서 서식하고 있는 미세조류를 통칭하는 용어이며 해빙 위, 해빙 안, 해빙 밑에 서식하는 모든 미세조류를 포함한다. 일반적으로 일년생 빙에 서식하는 것으로 보고되어 있으나 일부는 다년생 빙에서도 관찰이 되고 있다.



[그림 4-1] 해빙 미세조류의 생태모식도(위) 및 해빙 밑, 해빙 안 서식 미세조류 이미지

이러한 해빙 미세조류는 서식지의 특성상 아래와 같은 극한 환경적 스트레스에 적응하며 생존해가고 있다.

염분 : 해빙 위 및 밑에 서식하는 미세조류는 저염 환경, 해빙 안에서는 고염의 환경이며 이에 따라 탈수 및 삼투압 스트레스를 받게 된다. 대부분의 해빙 미세조류는 이러한 염분 스트레스에 적응하는 기작이 발달되어 있다고 보고된다.

온도 : 일부 미세조류는 -20°C 환경에서도 서식을 할 수 있다. 극한 온도 환경 하에서 미세조류는 cyst 형태로 변환하거나 세포 외로 지질을 합성하여 생존해 나간다.

빛 : 대부분의 해빙 미세조류는 낮은 빛에서 서식할 수 있도록 높은 광합성율을 갖고 있다. 특히 푸코산틴과 같은 보조색소의 구성 비율이 일반 미세조류보다 높다고 보고되고 있다.

이러한 해빙 미세조류는 겨울철에는 해빙 내에 갇혀 있는 형태로 겨울기간을 보내게 되며 봄철이 되어 빛을 흡수하는 환경이 되면 봄철 대발생을 일으킨다. 일부 지역에서는 봄철 대발생시 해빙 안에 육안으로 구분이 될 수 있을 정도로 색을 띠게 되며 해빙 아래에서도 짙은 녹색 빛을 띠게 된다.



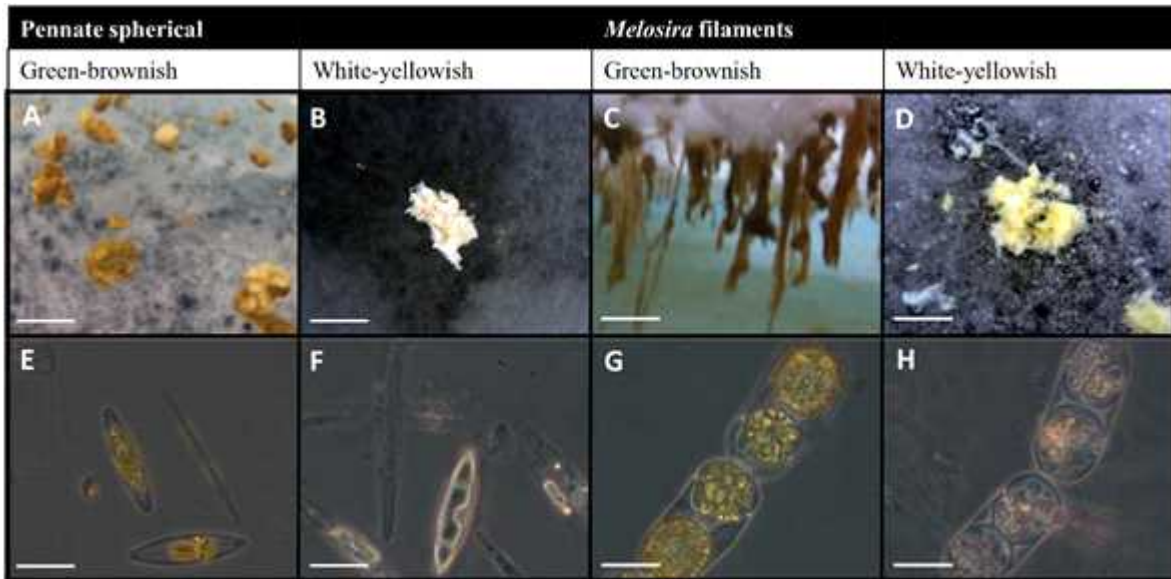
[그림 4-2] 봄철 대발생시 육안으로 확인되는 해빙미세조류

나. 해빙 미세조류 종다양성 분석

해빙 미세조류의 종다양성을 분석하기 위하여 현장조사를 실시할 계획이다. 연구지역은 다산기지, 캐나다 등에서 해빙미세조류가 대발생을 일으키는 봄철에 샘플링을 실시할 예정이다. 분석방법은 기본적으로 광학 및 형광현미경을 사용하여 분석을 계획하고 있다. 크기가 작은 미세조류의 경우 주사전자현미경으로 동정을 실시하며, 미세조류의 엽록소 a를 이용한 색소분석(HPLC)을 통하여 종군집 구조를 파악할 예정이다.

상기 방법으로 얻어진 미세조류의 종다양성 결과와 환경요인과의 상관관계를 파악하여 해빙 미세조류가 극한환경에서 어떻게 생존할 수 있는지에 대한 기초연구를 수행할 예정이다.

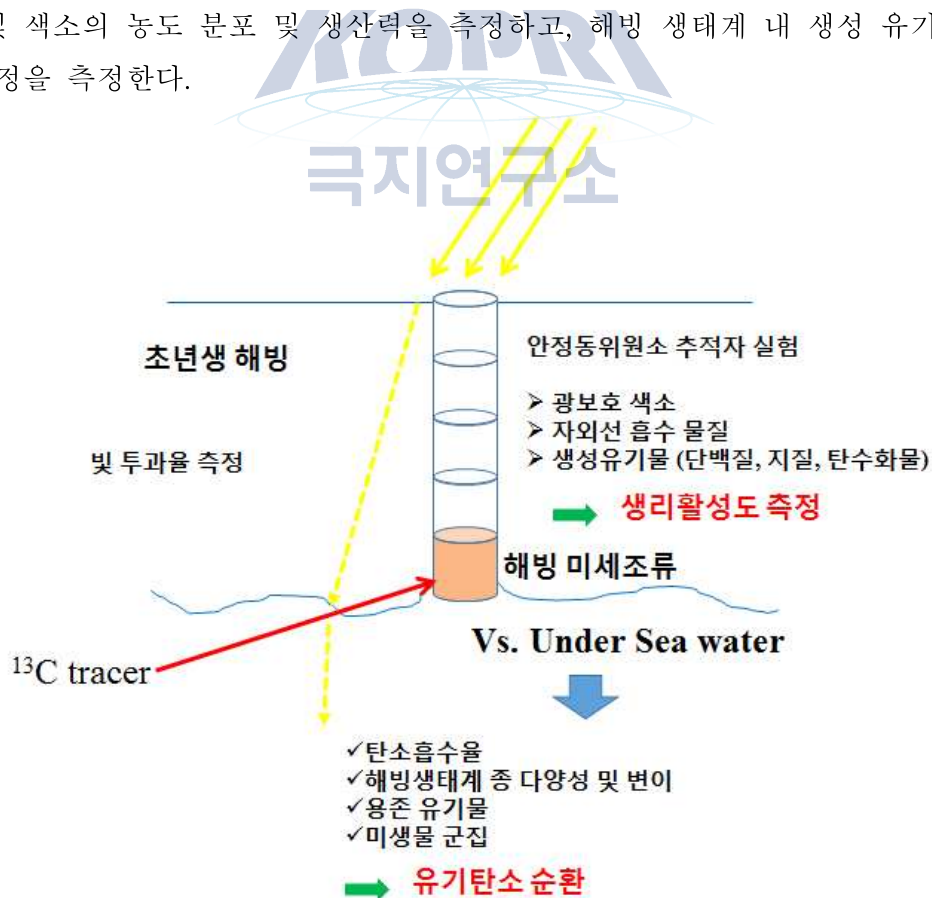
또한 해빙 미세조류의 기원을 파악하기 위해 해빙 미세조류와 주변 해역에서의 미세조류 간 종군집 구조를 상호 비교할 예정이다.



[그림 4-3] 해빙 서식 위치에 따른 해빙 미세조류의 다양성 (Fernandez-Mendez et al, 2014)

2. 북극 해빙 미세조류의 광적응 기작 연구

탄소 안정동위원소 추적자를 활용하여 현장배양을 통해 북극 해빙 미세조류의 광보호 물질 및 색소의 농도 분포 및 생산력을 측정하고, 해빙 생태계 내 생성 유기물의 생성 및 전달과정을 측정한다.



[그림 4-4] 해빙 미세조류 광적응기작 연구 모식도

해빙 내 서식하는 미세조류의 광적응 기작을 측정하기 위하여 해빙 코어의 하단부 부터

1cm 간격으로 절취한 후 4℃냉장상태에서 해빙을 녹인다. 이후 GF/F로 여과한 후 여과지를 -80℃에서 광보호 색소 및 자외선 흡수물질 측정 전까지 보관한다. 보관된 여과지를 통하여 해빙 미세조류의 광보호 색소 및 자외선 흡수물질 그리고 생성유기물 (단백질, 지질 그리고 탄수화물)을 분석 조건에 맞게 측정한다.

해빙 미세조류의 생성 유기물 생산력 측정을 위해 해빙 미세조류가 포함된 해빙코어 하단부 부터 1cm를 절취한 후 암냉소에서 GF/F로 여과된 해수와 탄소 추적자 ($\text{NaH}^{13}\text{CO}_3$)가 첨가된 PC병에 삽입한다. 시료가 포함된 PC병은 해빙코어를 실시한 구멍을 통하여 현장배양을 실시한 후(약 4시간), 회수하여 빛이 차단된 환경에서 녹인 후 GF/F를 이용하여 여과한 후 HPLC를 통하여 각 이차산물에 대한 분리 분취를 한 후, EA-IRMS로 동위원소비를 측정한다. 다음과 같은 식을 활용하여 각 이차 산물에 대한 생산력을 산출한다.

해빙 미세조류 뿐만 아니라 해빙 밑에 서식하는 식물플랑크톤은 수중 펌프를 이용하여 시료를 채취한 후 각 항목에 맞게 보관, 측정한 후 해빙 생태계에 대한 종합적인 비교를 검토한다.



2절 인공위성자료를 활용한 북극해 일차생산력 변화 및 해빙 변화 파악

1. 서론

최근 지구 온난화가 가속됨에 따라 북극해의 해빙면적이 크게 감소하고 있으며 모델 예측에 의하면 향후 수십 년 안에 여름철 해빙이 완전히 사라질 수 있음이 보고되고 있다. 비단 해빙 면적뿐 아니라 그 두께 또한 얇아지고 있고, 다년생 해빙 (multi year ice)이 지속적으로 감소하고 단년생 해빙 (first year ice)이 차지하는 비중이 증가하고 있음도 보고되고 있다. 연구결과에 의하면 1985년엔 4년생 이상의 해빙이 차지하는 비중이 약 16% 수준이었음에 반해 2016년 3월엔 1.2% 정도밖에 안 남았었다(Perovich et al., 2016). 이러한 북극해 해빙면적과 다년생 해빙 감소의 원인으로 지구 온난화에 의한 대기 기온의 상승(Screen and Simmonds, 2010; Jeffries et al., 2013), 상대적으로 따듯한 해수의 유입량 증가 등이 보고되고 있으며(Shimada et al., 2006; Rippeth et al., 2015), 태양빛이 지표면에서 반사되는 정도를 나타내는 알베도도 북극해 해빙 감소에 따라 감소하고 있음이 보고되었다(Perovich and Polashenski, 2012). 이들 알베도 감소에 따른 해수 표층에 도달하는 태양광의 증가는 겨울철 해빙이 형성되는 것을 저해시켜 이러한 순환을 더욱 가속시키는 피드백 효과도 가져올 수 있다(Holland and Bitz, 2003; Perovich et al., 2007). 북극해의 여름철 해빙면적 및 두께의 변화는 직, 간접적으로 북극해 해양생태계의 기초생산자에 의한 일차생산력의 변화를 가져올 수 있는데, 해빙 두께가 얇아짐에 따라 해빙 밑바닥에 전달되는 빛의 양이 증가하여 해빙 미세조류 및 해빙하부 식물플랑크톤의 광합성이 증가할 수 있다. 최근 연구결과도 이러한 해빙 하부 해양 상층부에서의 식물플랑크톤 대번성을 보고하고 있는데(Arrigo et al., 2012), 척치해 해빙 하부 약 20 미터 수층의 식물플랑크톤 대번성에 따른 탄소 합성률이 $3.7 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 에 이를 정도로 막대한 양임이 밝혀졌다(Arrigo et al., 2014). 반면, 해빙면적의 감소는 해빙 미세조류 서식지의 감소와 함께 여름철 부유성 식물플랑크톤 서식지의 증가를 야기할 수 있으며, 이에 따라 식물플랑크톤에 의한 여름철 북극해 일차생산력의 증가도 예상이 된다.

본 연구를 통해, 과거 수십 년에 걸친 북극해 해빙의 변화가 북극해 일차생산력에 어떤 영향을 주었는지 파악하고, 향후 이러한 변화가 해양생태계에 어떤 피드백을 줄 수 있는지에 대해 북극해 전체 규모로 살펴보기 위해 과거와 현존하는 해빙관측(sea ice) 및 해색(ocean color) 위성자료들을 활용하여 해빙의 변화와 함께 북극해 일차생산력 변화 추세를 진단해 보고자 한다.

2. 재료 및 방법

우선, 해빙자료는 National Snow and Ice Data Center(NSIDC, <http://nsidc.org/>)에서 제공하는 Sea Ice Concentration 자료를 활용할 예정이다. 본 자료는 Scanning

Multichannel Microwave Radiometer(SMMR), Special Sensor Microwave/Imager (SSM/I), Special Sensor Microwave Imager/Sounder(SSMIS)의 세 가지 위성센서 자료를 NASA 알고리즘을 활용하여 병합한 장기 해빙자료로서, 1979년부터 2015년까지의 기간에 걸친 자료를 포함하고 있다. 해빙자료의 해상도는 픽셀당 약 25km 수준이다.

다음으로, 해색위성으로 관측된 표층 엽록소 농도와 표층 광량 자료는 최근 여러 위성에서 얻어진 자료를 하나의 알고리즘을 사용해 병합한 자료를 이용할 예정이다. 이 자료는 유럽 우주국(European Space Agency, ESA)에서 추진한 GlobColour 프로젝트를 통하여 생성되었으며(<http://hermes.acri.fr/>), 해색자료의 시·공간적인 한계를 증진시키기 위한 목적으로 진행되어졌다. 병합된 자료의 다양한 해색센서로는 MEdium Resolution Imaging Spectrometer(MERIS; 2002. 04.~2012. 04.), Moderate resolution imaging spectroradiometer(MODIS AQUA; 2002. 07.~2015. 06.), SeaWIFS(1997. 09.~2010. 12.), Visible Infrared Imaging Radiometer Suites(VIIRS; 2012. 01~현재)가 있다. 여기서, GSM model(Maritorena and Siegel, 2005)을 이용하여 여러 센서의 자료를 병합하여 장기 자료가 생성되었다. 본 연구에서는 1998년부터 2016년까지 총 19년 기간의 GlobColour 자료를 활용할 예정이다.

마지막으로, 일차생산 계산에 필요한 표층수온 자료는 National Oceanic and Atmospheric Administration(NOAA)에서 제공하는 Optimal Interpolation Sea Surface Temperature Version 2(OI SST V2) 자료를 활용할 예정이다. 본 자료는 약 1/4도 해상도의 자료로서 1981년 9월부터 현재까지의 장기 자료가 활용 가능하다. 현재 National Climate Data Center(NCDC, <https://climatedataguide.ucar.edu/>)에서 자료를 배포하고 있으며, 본 연구에서는 엽록소 자료와 같은 시기의 1998년부터 현재까지의 자료를 활용할 수 있다. OI SST V2는 다양한 관측자료를 포함하여 최적 내삽법(Optimal Interpolation)을 통하여 만들어진 재생산자료이다. 재생산자료에 사용된 관측자료에는 Advanced Very High Resolution Radiometer Pathfinder version 5.0/5.1(AVHRR), Advanced Microwave Scanning Radiometer version 5(AMSR)의 위성자료와 International Comprehensive Ocean and Atmosphere Dataset 2.4(ICOADS)에서 제공하는 배와 부이에서 측정된 자료가 포함된다.

3. 결과 및 고찰

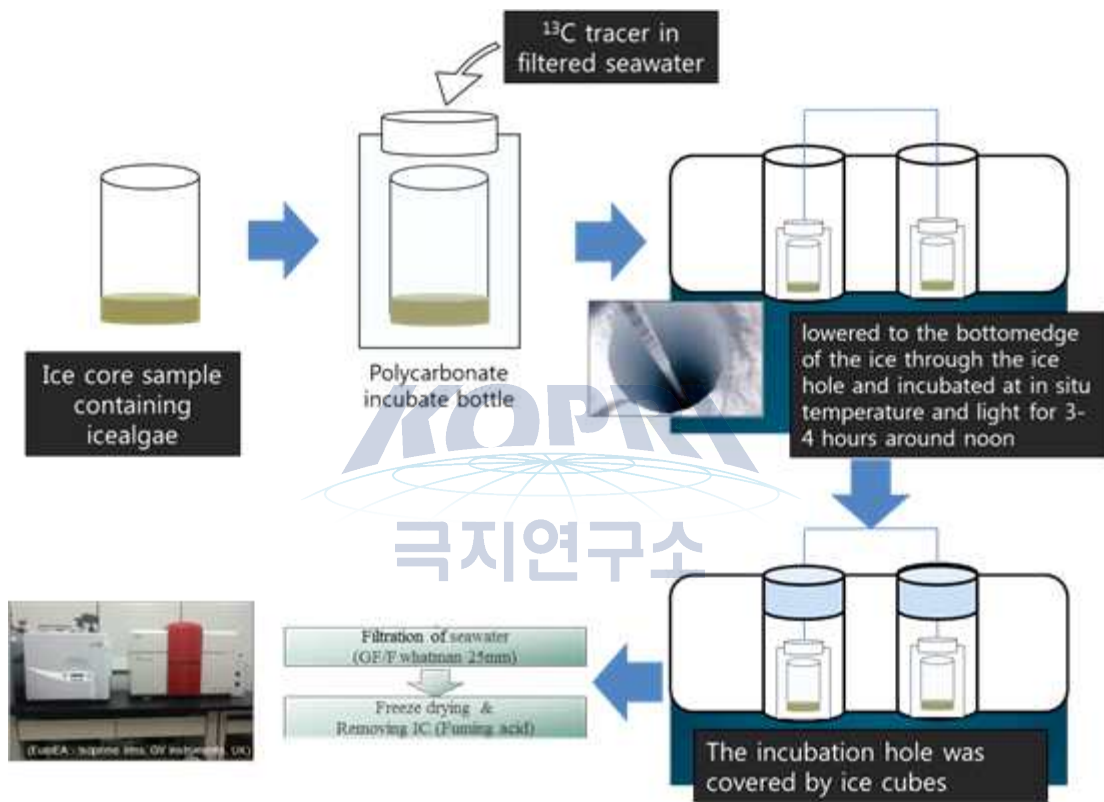
최근 북극해 해빙면적의 급격한 감소가 해양생태계 일차생산에 직접적인 영향을 준다는 많은 연구결과가 있다(Arrigo and van Dijken, 2011; Arrigo and van Dijken, 2015; Frey et al., 2016). 특히, Arrigo and van Dijken (2015)은 북극해 식물플랑크톤의 일차생산은 1998년부터 2012년까지의 기간 동안 약 30%로 수준 증가했다고 보고하였다. 이는 해빙면적의 감소로 개방기간이 증가하여 식물플랑크톤의 성장 가능한 기간이 증가하였기

때문이다. 단, 지역적으로 모든 해역에서 식물플랑크톤이 증가하는 것은 아니며 영양염이 충분히 공급이 되는 지역에서만 증가하는 경향을 보였다. 반면, Coupel et al. (2015)의 연구결과에 따르면 해빙면적의 감소는 식물플랑크톤의 일차생산에 긍정적인 효과만 주는 것은 아닐 수 있다. 해빙의 감소로 북극해 표층에 해빙용해수의 유입이 증가하게 되면 해양 표층에 많은 양의 저염분수가 쌓이고 이에 따라 해수 표층의 성층화가 강화된다. 강한 성층화는 저층으로부터의 영양염 공급을 제한하며, 이러한 영향으로 식물플랑크톤 일차생산이 감소될 수 있다. 특히, 많은 양의 해빙용해수가 유입되는 캐나다 분지에서 이러한 현상이 나타난다고 보고되었다. 캐나다 분지뿐만 아니라 보퍼트해와 척치해 사이의 주변 해역에서도 이와 같은 연구결과가 보고된 바 있다. 이와 달리, 해빙용해수의 효과가 적은 지역인 Chukchi shelf와 Chukchi Borderland에서는 높은 일차생산력과 식물플랑크톤 생물량의 증가가 보고되었다(Pabi et al., 2008). 이와 조금 상반되는 결과로, 척치해는 전반적으로 일차생산이 점진적으로 줄어드는 현상을 보이고, 이는 식물플랑크톤 성장에 필요한 영양염과 관련이 있다고 설명하는 연구도 있었는데, 영양염은 저염분수와 연관되어 있어 지속적으로 저염분수가 유입이 되면 식물플랑크톤 일차생산이 감소할 수 있다고 보고하였다(Yun et al., 2016). 이렇듯 북극해의 해빙감소로 해양생태계의 변화가 직·간접적으로 다양한 영향을 받고 있다는 것은 선행연구로 잘 알려져 있다. 북극해 식물플랑크톤 계절 변동에 관한 연구로는, 해빙면적의 감소로 개방기간이 증가하고 해양 표층에 부는 바람의 영향으로 혼합이 활발한 지역에서 식물플랑크톤의 가을 번성이 점차 빈번해짐을 밝힌 연구가 있으며(Ardyna et al., 2014), 해빙 후퇴의 시기가 식물플랑크톤 번성의 시기를 변화시킬 수 있음도 보고되었다(Ji et al., 2013). 극지방에서는 온대해역과는 달리 일반적으로 식물플랑크톤이 여름철 한 번의 번성시기를 갖는데, 최근 북극해의 급격한 해빙감소로 인해서 식물플랑크톤의 두 번째 번성이 나타난다고 보고되고 있다. 두 번째 번성뿐만 아니라 봄철 번성시기가 빨라진다는 연구결과도 있다. Kahru et al. (2010)은 식물플랑크톤의 최대 번성시기가 점점 빨라지는 해역으로 카라해 주변 해역을 들며, 이 해역에서 여름철 해빙면적의 감소하는 경향 증가를 식물플랑크톤의 생물량 및 일차생산 변화의 원인으로 밝힌 바 있다.

3절 북극 해빙 생태계의 탄소흡수율 측정 연구

1. 북극 해빙 미세조류의 탄소 흡수율 측정

탄소 안정동위원소 추적자를 활용하여 현장배양을 통해 북극 해빙 미세조류의 탄소 흡수율(생산력)을 측정하고, 이를 주변 해역의 부유성 식물플랑크톤의 탄소 흡수율과 비교함으로써, 해빙 생태계에서 해빙 미세조류의 탄소 흡수 기여율을 파악할 수 있다.



[그림 4-5] 해빙 미세조류 탄소흡수율 실험법

해빙 미세조류 측정을 위해 해빙 미세조류가 포함된 해빙코어 하단부 3cm를 절취한 후 암냉소에서 GF/F로 여과된 해수와 탄소 추적자($\text{NaH}^{13}\text{CO}_3$)가 첨가된 PC병에 삽입한다. 시료가 포함된 PC병은 해빙코어를 실시한 구멍을 통하여 현장배양을 실시한 후(약 4시간), 회수하여 빛이 차단된 환경에서 녹인 후 GF/F를 이용하여 여과한 후 EA-IRMS로 동위원소비를 측정하고, 다음과 같은 식을 활용하여 기초생산력을 산출한다.

$$\text{Production rate} = \Delta\text{POC}(t) / t = (a_{is} - a_{ns}) / (a_{ic} - a_{ns}) * (\text{POC}(t) / t)$$

a_{is} : 배양이 끝난 후 유기물의 ^{13}C atom %

a_{ns} : 자연상태의 ^{13}C atom %
 a_{ic} : PC병내 DIC의 ^{13}C atom %
 t : 배양시간
POC(t) : 배양이 끝난 후 POC의 농도

부유성 식물플랑크톤의 기초 생산력은 각 광량에 따른 깊이에서 채수한 해수에 탄소 추적자($\text{NaH}^{13}\text{CO}_3$)를 첨가한 후 채수한 깊이에서 약 4시간동안 배양 후 GF/F로 여과하여 분석을 실시한다.

2. 북극 해빙 생태계 유기탄소 거동

해빙 생태계에서 해빙 미세조류에 의해 흡수된 탄소의 거동을 파악하기 위하여 탄소 및 질소 안정동위원소를 활용하여 해빙 생태계 먹이망 구조를 파악하고, 해빙 미세조류의 탄소원으로써의 기여도를 확인하고자 한다.

해빙 미세조류의 탄소 안정동위원소비는 주변해역의 부유성 식물플랑크톤의 탄소 안정동위원소비 보다 무거운 것으로 알려져 있다. 섭식자의 탄소 안정동위원소비는 먹이원과 작은 차이(1% 이내, DeNiro and Epstein 1978)를 보이는 것으로 알려져 있기 때문에, 해빙미세조류의 먹이원으로써의 기여도를 탄소 안정동위원소비로 확인할 수 있다.

또한 질소 안정동위원소비는 해양 생태계에서 영양학적 정보(Trophic information)을 제공하는 것으로 알려져 있어, 해빙 미세조류 기원 탄소의 거동을 확인 할 수 있을 것으로 기대된다. 최근에는 분자단위 생체지표의 안정동위원소가 해양 생태계 내에서 유기물의 거동 파악 연구에 활용되어지고 있으며, 특히 아미노산의 질소 안정동위원소비는 생물의 영양학적 정보에 대한 정확성을 높여주는 것으로 확인되었다.

따라서 해빙 미세조류 및 주변 생태계의 섭식자(동물플랑크톤 및 어류)의 안정동위원소비 분석을 통하여 해빙 미세조류 기원 유기탄소의 해빙 생태계 내 거동을 파악할 수 있을 것으로 예상된다.

해빙 미세 조류 및 주변 서식 생물의 탄소 안정동위원소비는 지질 및 무기탄소를 제거한 후 EA-IRMS를 활용하여 분석한다(그림 4-6).

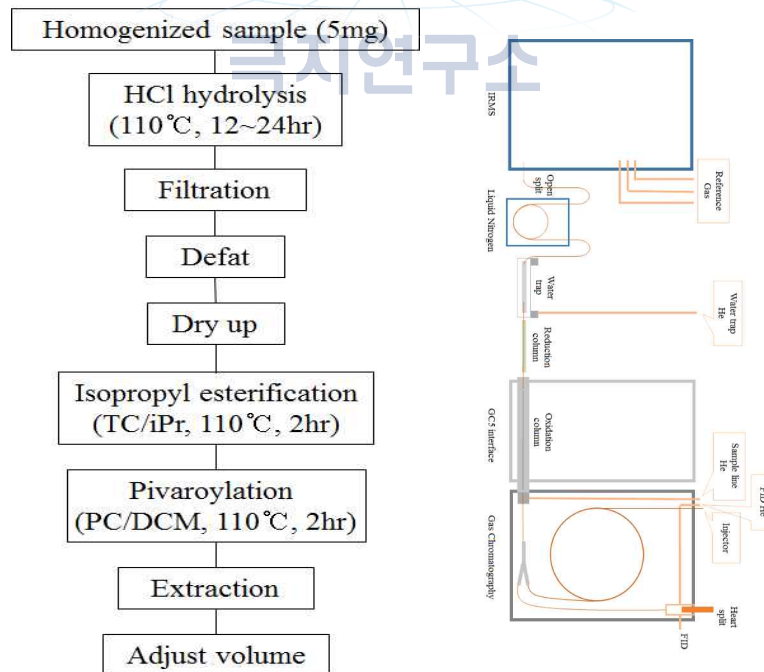


[그림 4-6] 탄소 안정동위원소 분석을 위한 시료의 전처리

질소 안정동위원소 시료 분석은 전처리 과정에서 나타날 수 있는 안정동위원소 분별 작용을 고려하여 무기탄소 및 지질 제거를 실시하지 않고 분석한다.

3. 아미노산의 질소 안정동위원소 분석

아미노산의 질소 안정동위원소 분석을 위한 시료는 12M의 염산을 이용하여 가수 분해 후 유도체화 과정을 거친 후 GC/C/IRMS를 이용하여 분석한다.



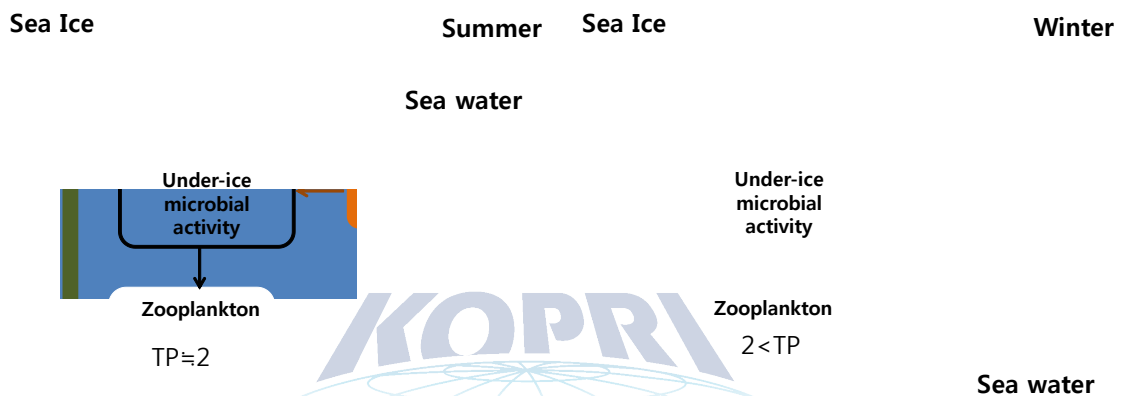
[그림 4-7] 아미노산 질소 안정동위원소 분석을 위한 전처리 과정 및 GC/C/IRMS의 모식도

아미노산의 질소 안정동위원소는 먹이원과 질소 안정동위원소비가 작은 source 아미노산과 먹이원과 비교하여 무거운 질소 안정동위원소비를 나타내는 trophic 아미노산으로

나누어지며, 이들의 대표적인 아미노산으로는 페닐알라닌(source 아미노산)과 글루타민산(trophic 아미노산)이 있다. 이들의 질소 안정동위원소비를 활용하여 다음과 같은 식을 활용하여 생물의 영양단계를 파악할 수 있다.

$$TP_{AAs} = [(\delta^{15}N_{Glu} - \delta^{15}N_{Phe} - 3.4) / 7.6] + 1$$

해빙 미세조류는 주변 동물플랑크톤 및 어류 등에 직접적인 먹이원으로 활용되어질 수 있고 또는 microbial food web을 통해 전달될 수 있으며, 전달 과정에 따라 상위 생물의 영양단계의 변화가 예상된다. 또한 해빙 미세조류의 부유 생태계로의 전달은 빙하의 해빙에 따라 변하기 때문에 주변 서식 생물의 계절적 영양단계의 변화를 확인 할 수 있을 것으로 기대된다.



[그림 4-8] 계절별 해빙 생태계 동물플랑크톤의 영양단계(TP)의 예상 변화 모식도

4절 북극 해빙의 열적 특성 및 빙 투과율 연구

1. 해빙 열수지

해빙 내부에서 열이 생성되거나 소멸되지 않으므로 해빙내부의 온도변화는 해빙의 상부, 하부 접합면에서 대기, 해양과의 열 교환을 관측함으로써 계산할 수 있다 (그림 4-9). 대기로부터 해빙으로 열이 유입되면 해빙표층 온도를 상승시키며 이중 일부의 열은 아래층과의 온도 차이에 의해 해빙내부로 전달된다. 반면 해빙기저에서 해양과의 열교환에 의해 유입되는 열량도 같은 방법으로 해빙내부로 전달되게 된다. 또한, 내부로 유입되는 태양 단파복사는 해빙 내부의 온도를 상승시키게 된다. 이러한 과정을 식 1과 같이 일차원 열확산 방정식으로 해빙내부 온도변화를 설명할 수 있다(Maykut and Untersteiner, 1971; Bitz and Lipscomb, 1999).

$$C \frac{\partial SiT}{\partial t} = \kappa \frac{\partial^2 SiT}{\partial z^2} + A_R. \quad (1)$$

위식에서 C 는 해빙 내 열용량을 κ 는 해빙의 열전도도를 나타내며, $\frac{\partial SiT}{\partial t}$ 는 시간에 따른 해빙 내 온도의 변화율을 $\frac{\partial^2 SiT}{\partial z^2}$ 는 수직적인 해빙내온도의 기울기를 나타낸다. A_R 은 해빙 내 태양복사에 의한 열 유입량을 나타내어 식 2와 같이 계산된다.

$$A_R = \kappa_i I_0 (1 - \alpha_{ice}) F_{SW} e^{-\kappa_i z}. \quad (2)$$

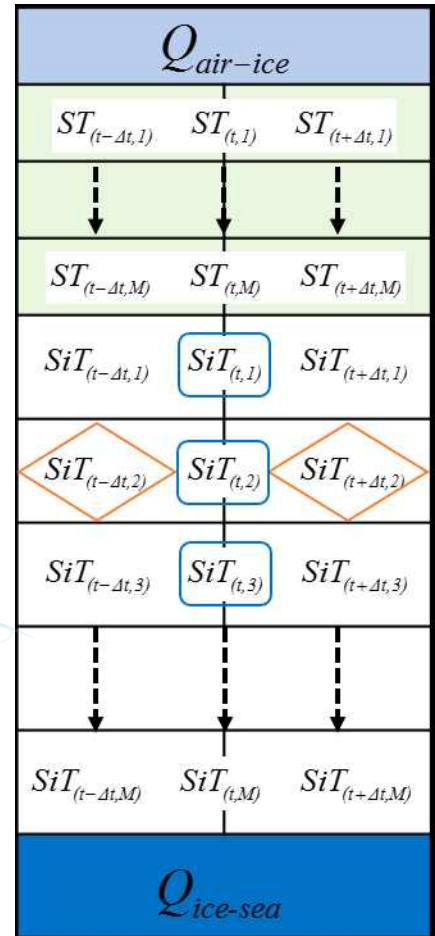
위식에서 κ_i 는 수직적인 태양복사의 감소계수이다(1.5 m⁻¹). I_0 는 태양복사의 해빙 내 유입 시 감소되는 비율로 0.4를 사용한다. α 와 F_{SW} 는 각각 해빙의 알베도와 해빙표면에서의 일사량을 나타낸다.

한편, 해빙 표층에서 대기와 해빙의 열교환($Q_{air-ice}$)은 다음과 같이 계산되어진다(Ebert and Curry, 1993).

$$Q_{air-ice} = (1 - \alpha_{ice}) F_{SW} - (F_{Lir} + F_{Si} + F_{Li}). \quad (3)$$

F_{Lir} 는 해빙표면에서 유입, 유출되는 장파복사를 나타내며, F_{Si} , F_{Li} 는 현열과 잠열을 각각 나타낸다. 해빙과 해수사이의 열교환($Q_{ice-sea}$)은 다음과 같이 해빙과 해수의 온도 차이에 의해 계산되어진다.

$$Q_{ice-sea} = \rho_w C_w c_h \| u_w \| (SiT_M - T_w). \quad (4)$$



[그림 4-9] 해빙표층과 저층에서 대기, 해양과의 열교환과 해빙내부 온도변화의 관계를 표현한 모식도

ρ_w , C_w 는 해수의 밀도와 비열, c_h 는 해수와 해빙사이의 열전도계수를 나타낸다. $\|u_w\|$ 는 해빙하부 해수 유속의 절대 값을 나타내며 $S_i T_M$, T_w 는 각각 해빙하단부의 온도와 해빙과 접하는 해수의 수온을 나타낸다.

2. 해빙열적 특성과 단파복사 투과율

해빙 내부 수직온도의 장기간 연속관측과 해빙열적 특성 산출을 통해 해빙 내부 층별 단파복사량을 식 1로부터 계산할 수 있다. 해빙 내부의 온도변화는 수직적인 온도 차이에 의한 열의 전도와 투과된 태양단파복사량의 흡수에 의한 것으로 시간에 따른 온도변화와 수직온도 기울기, 해빙의 열적특성(열용량, 열전도도)으로부터 각 층별 흡수되는 태양의 단파복사량을 아래 식 5와 계산할 수 있으며, 각층별 계산된 단파복사 흡수량의 적분을 통해 층별 투과되는 단파복사량을 추정할 수 있다.

$$A_{R(t,i)} = C_i \frac{S_i T_{(t+\Delta t,i)} - S_i T_{(t-\Delta t,i)}}{2\Delta t} - \kappa_i \frac{S_i T_{(t,i-1)} - 2S_i T_{(t,i)} + S_i T_{(t,i+1)}}{\Delta z^2}. \quad (5)$$

이를 위해 해빙의 열적 특성(해빙 열용량과 열전도도)에 대한 관측이 필요하다. 해빙의 열용량은 식 6과 같이 해빙을 구성하는 물질(얼음, 유입된 해수, 염분, 공기)들의 비열, 밀도, 비중의 곱의 합으로 계산되어진다.

$$C = m_{ice}c_{ice} + m_{brine}c_{brine} + m_{solidsalt}c_{solidsalt} + m_{air}c_{air} \\ = \rho_{ice}v_{ice}c_{ice} + \rho_{brine}v_{brine}c_{brine} + \rho_{solidsalt}v_{solidsalt}c_{solidsalt} + \rho_{air}v_{air}c_{air} \quad (6)$$

이중 공기와 염분의 해빙 열용량에 미치는 영향이 작아 이를 무시하고 식 7과 같이 해빙의 온도와 염분으로부터 산출된 해수 유입량의 관계식으로 산출할 수 있다(Yen, 1981; Pringle, 2005).

$$C = 2113 + 7.5 - 3.4S + 0.08ST + 18040 \frac{S}{T^2}. \quad (7)$$

이와 같은 계산에 의한 해빙열용량 산출의 정확성 및 신뢰성은 과거에 실험을 통해 검증되었다(Johnson, 1989; Trodahi et al., 2000). 또한, 해빙의 열전도도 역시 유사한 실험을 통해 식 8과 같은 해빙의 밀도와 온도, 염분으로 구성된 경험식을 산출하였다(Pringle, 2007).

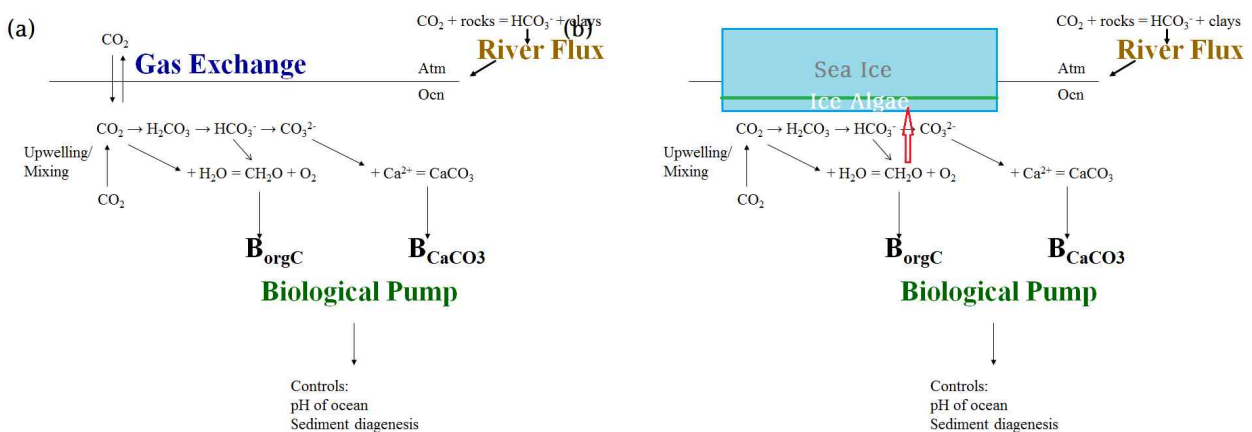
$$\kappa = \frac{\rho}{\rho_i} (2.11 - 0.011T + 0.09 \frac{S}{T}). \quad (8)$$

5절 북극 해빙 생태계 내 pCO₂ 변화 연구

1. 북극의 해빙 감소와 이에 따른 이산화탄소 흡수력 변동

인간의 활동에 의한 기후변동에 의해 북극은 급속하게 온난화가 진행되고 있다. 특히 온난화는 북극해빙의 감소에 직접적인 영향을 미치고 있다. 따라서 북극해는 지금까지 인간의 활동에 의한 이산화탄소의 흡수원으로 알려져 있었으나, 해빙의 감소는 북극해의 생물-물리-화학적 특성을 변동시키므로, 이러한 변화가 앞으로의 북극해의 탄소흡수와 관련하여 중요한 이슈로 떠오르고 있다. 예를 들어, Bates et al., 2006에서는 북극해의 해양-대기의 기체교환을 막고 있던 해빙의 감소로 인하여 북극해의 이산화탄소 흡수력은 향후 30년 내에 3배로 증가할 것으로 보고되었다. 반면, Cai et al., 2010에서는 북극해의 낮은 생산력으로 인하여 해빙의 감소가 이산화탄소 흡수력의 증가로 바로 이어지지 않을 것으로 내다보았고, Bates et al., 2011은 해빙 감소로 인한 북극해의 이산화탄소 흡수력의 증가는 일시적이고, 주변의 하천 등에서의 유입의 증가 등으로 오히려 다음 세기에는 북극해가 이산화탄소의 배출원으로 변할 것이라는 전망까지 하였다. 이러한 해빙과 이산화탄소의 변동은 복합적인 요인의 작용으로 예측하기 쉽지 않다. 하지만 이에 관한 연구는 미래의 기후변화를 이해하기 위해 필수적이다. 따라서 본 과제에서는 겨울-여름에 이르는 시기 해빙생태계에서의 이산화탄소의 거동을 관측하고 이해하여, 해빙의 감소에 따른 환경변화가 북극해의 이산화탄소 흡수력의 변동에 미치는 생물학적 요인에 대해 초점을 맞추어 관측을 하려고 한다.

2. 해빙-해양-대기 상호작용



[그림 4-10] 기존의 해양에서의 이산화탄소의 순환 모형, (b) 해빙이 해양-대기의 기체교환을 차단하고 해빙조류가 생물학적 펌프에 기여하여 변경된 해양-대기-해빙 이산화탄소 순환 모형

해양-대기-해빙 간의 이산화탄소의 교환을 이해하는데 있어 해빙의 역할은 먼저 물리적으로 해양의 대기로부터의 이산화탄소 흡수를 제한한다. 그리고 주변 온난화로 인한 강으로 부터의 무기탄소의 유입량의 변화는 해양이산화탄소 시스템에 변화를 주게 된다. 또한 해빙에서 사는 해빙 조류의 번성과 이에 따른 해빙 조류생태의 변동은 생물학적인 측면에서 해빙에 의한 이산화탄소 시스템을 변동시킨다(그림 4-10). 이러한 변화를 관측하기 위해서는 해수 및 대기 중의 이산화탄소의 농도를 관측함으로써 해양과 대기간의 이산화탄소의 플럭스를 계산 할 수 있으며 다음과 같이 표현할 수 있다(그림 4-11).

k-transfer velocity

From Sc # & wind speed

S – Solubility

From SST & Salinity

$$F = k s (pCO_{2w} - pCO_{2a}) = K \Delta pCO_2$$

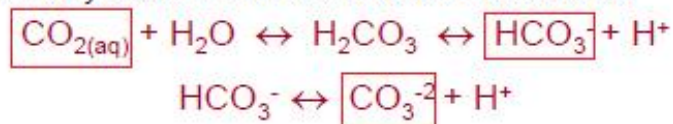
[그림 4-11] 해양과 대기간의 이산화탄소의 플럭스를 계산하기 위한 관측항목들 및 계산식

또한 해수 중에서 용존상태의 이산화탄소는 아래와 같이 $CO_2(aq)$, HCO_3^- , CO_3^{2-} 의 형태로 평형을 이루면서 존재하며 이러한 해수중의 이산화탄소 시스템의 이해를 위해서는 pCO_2 , DIC, TA, pH 중 적어도 두 가지 항목을 관측해야하며, 이를 통해 나머지 변수를 계산할 수 있다(그림 4-12).

The equilibrium of gaseous and aqueous CO_2 :



Subsequent hydration and dissociation reactions:



[그림 4-12] 해수 중 이산화탄소의 평형 시스템

또한, 겨울 - 여름철에 이르는 시기동안 해수 중의 이산화탄소의 거동을 이해하기 위해서는 해당기간동안의 장기간의 연속관측이 필수적이다. 하지만, 기존의 이산화탄소의 용존농도를 관측하는 방법은 해수를 평형기로 주입하여 평형된 기체를 비분산형 적외선

분광분석법을 통하여 관측하는 방법이 주를 이루었다(그림 4-13). 하지만 이는 연구선 또는 기지에서서의 관측은 가능하지만 설치 및 전원과 관리의 어려움으로 인하여 해빙에서의 장기관측에는 무리가 있다.



[그림 4-13] 해수평형기를 통한 비분산형적외선 분광분석 장비를 이용한 해양 및 대기 중 이산화탄소 관측 시스템

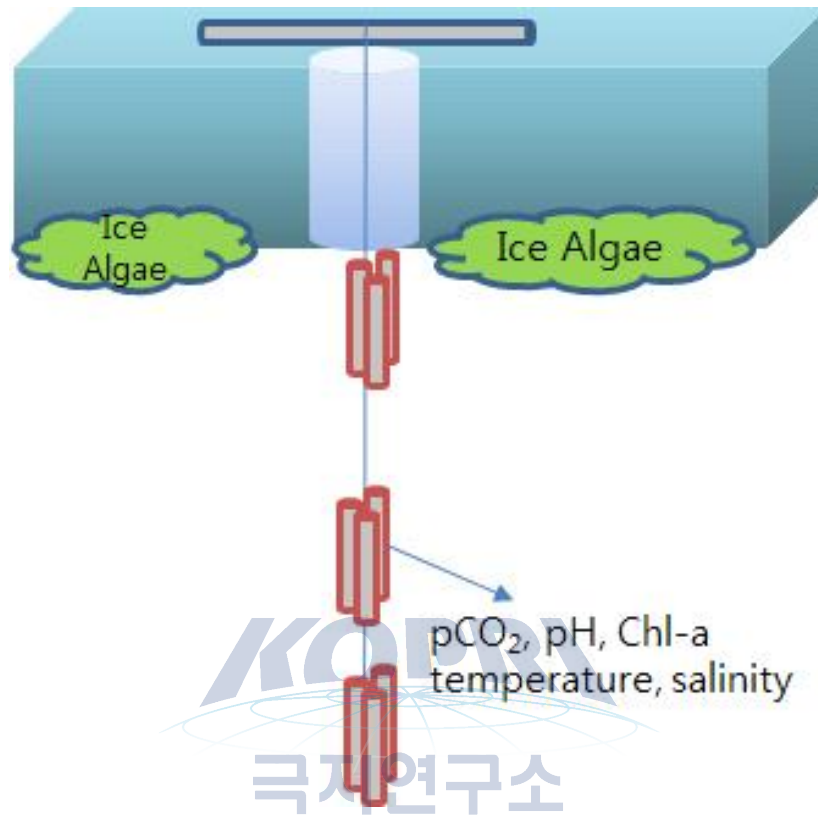
극지연구소

하지만, 근래에 해양에서의 이산화탄소의 관측을 위해 계류가 가능한 소형화 및 저전력의 센서들이 개발 되고 있으며, 각종 시험과정을 거쳐 판매가 되고 있다. 이러한 장비들은 평형기를 통한 용존기체의 평형대신 박막을 통해 해수 중 용존기체를 직접 분석기로 주입하는 방식을 취하고 있으며, 소형화된 비분산형적외선 분광분석기를 내장하여 측정하게 된다. (그림 4-14)



[그림 4-14] 소형화된 계류용 용존 이산화탄소 관측장비. (좌) Proceanus 사, (우) Contros 사 제품

따라서 pH센서와 함께, 이러한 소형화된 계류용 이산화탄소의 분석기를 통한 해수중의 이산화탄소의 관측을 통해 (그림 4-15) 해빙생태계의 해양내의 이산화탄소 변동에 관한 역할을 규명할 수 있을 것으로 본다.



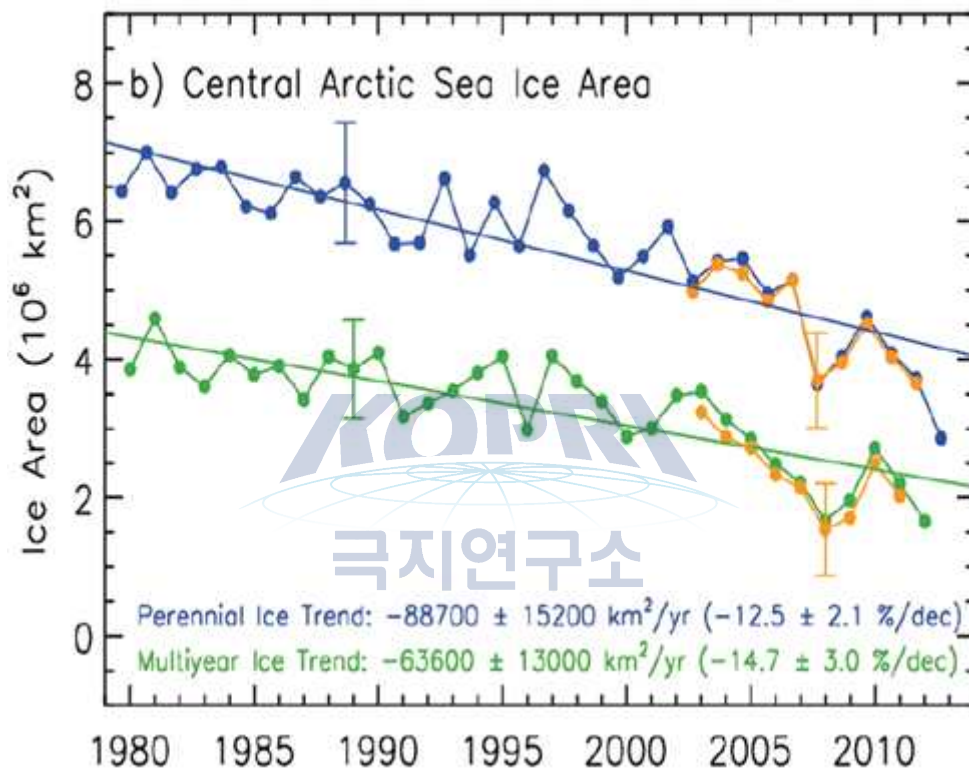
[그림 4-15] 해빙생태계에 의한 이산화탄소의 변동 관측을 위한 해빙 계류시스템

6절 북극 해빙 생태계 변화로 인한 기후 변화 피드백 순환고리

1. 급격하게 변화하는 북극환경

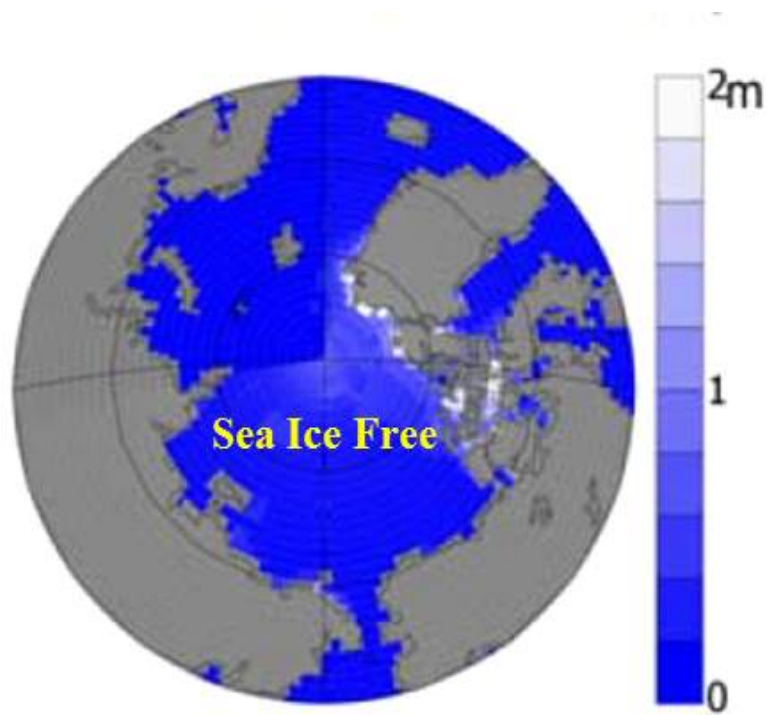
가. 해빙(Sea Ice) 변화

- (1) 현재 북극환경은 지구온난화 및 기후 변화에 가장 크게 영향을 받고 있고 반응을 보여주고 있음(IPCC, 2013). 가장 대표적인 예로 북극의 빙하 지역이 급격하게 감소하고 있음을 1979-2012년 동안 위성 영상 관측을 통해 밝혀지게 되었음(그림 4-16).



[그림 4-16] Arctic ice loss from 1979 to 2012 derived from satellite data (IPCC, 2013)

- (2) 2007/2008 9월에 해빙의 확장(sea ice extent)이 가장 최소로 관측되었고, 이 시기를 기점으로 21세기 해빙 변동 모델을 통해 2037년이 되면 북극에서 완전히 해빙이 사라질 수도 있는 결과를 제시하였고(그림 4-17), 현재의 북극환경변화가 아주 빠르게 일어나고 있음을 경고하였음(Wang and Overland, 2009).

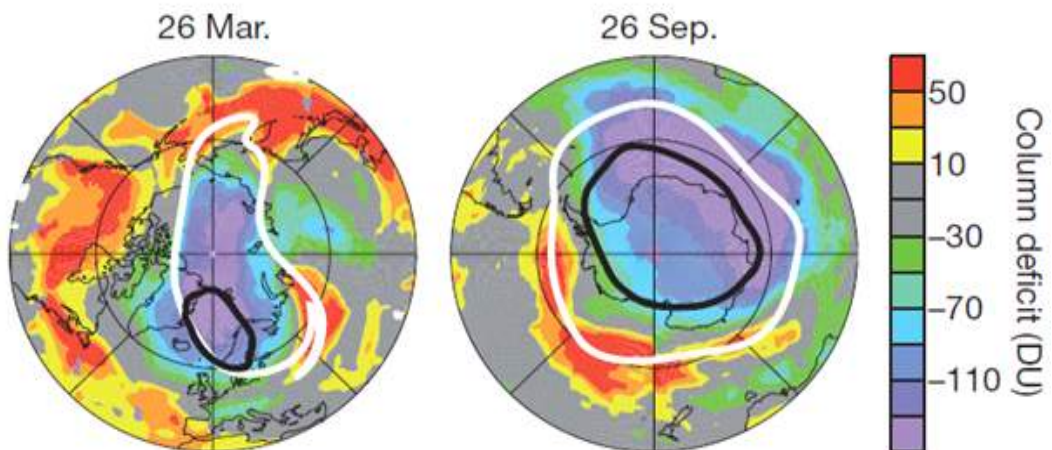


[그림 4-17] Arctic sea ice condition in 2037 simulated by models under A1B emission scenario (fig. 4-18 in Wand and Overland (2009)).



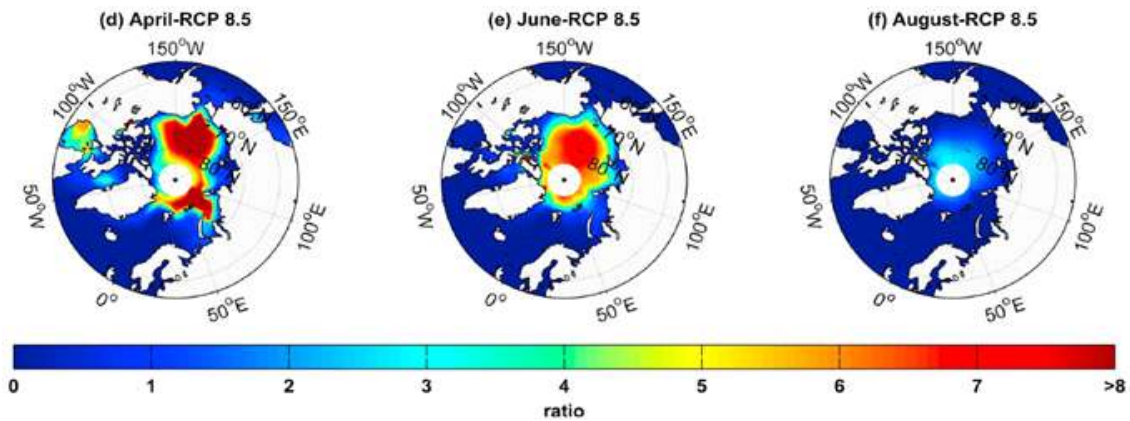
나. 자외선(Ultra-Violet radiation) 변화

- (1) 2011년 봄에 북극에서도 남극의 오존 구멍(ozone hole)과 맞먹을 정도의 오존 구멍을 직접 관측하였고(그림 4-18), 이에 따른 자외선(solar UV radiation) 유입이 증가하였음이 보고되었음(Manne et al., 2011).



[그림 4-18] Ozone hole observations in Arctic (left) and Antarctic (right) regions (Manney et al., 2011).

- (2) 북극 오존 구멍의 발견으로 특히 생물 활동에 심각한 영향을 미칠 수 있는 자외선-B(UV 280-320 nm)의 유입이 증가 될 것으로 예상되었고(Fountoulakis et al., 2010), 이에 따른 북극 생태계 변화 가능성에 대해서 심각하게 지속적으로 관찰이 필요한 연구 아젠다로 제시되고 있음. 모델 수행 결과에 따르면, 1950년대 비해서 2100년대에 UV-B radiation이 2-10배 정도 북극환경에서 증가할 것으로 예측되었음.

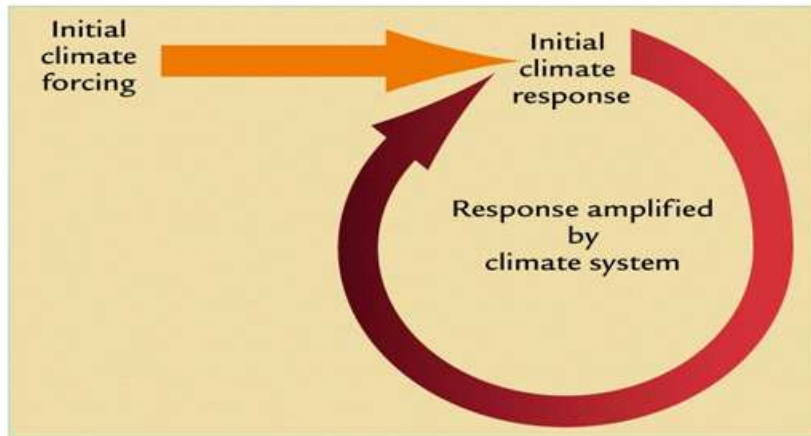


[그림 4-19] Ratio of UV-B radiation in future Arctic (2100's) relative to past Arctic (1950's) (Fountoulakis et al., 2010).

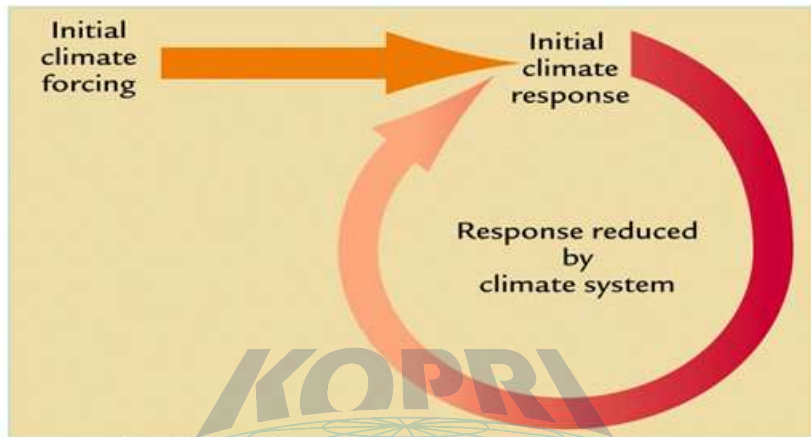
2. 해빙 생태계 변환에 따른 기후 변화 피드백 순환고리(climate feedback loop) 구성

가. 기후 변화 피드백 순환고리 개념

- (1) 현재에 발생하고 있는 기후 변화 현상을 중심으로 나타나고 있는 반응을 바탕으로 하여 향후 물리/생지화학적 변화가 지속적으로 기후 변화를 가중시킬지 또는 감소시킬지를 살펴보는 시나리오를 기후 변화 피드백 순환고리라고 함(Ruddiman, 2000). 기후 변화 피드백 순환고리는 'positive' 또는 'negative'로 구분 되고, 초기 힘(initial forcing)에 의해서 발생된 다양한 현상들이 순차적으로 진행되면서 최종적으로 초기 힘을 증가시키는 방향으로 순환고리가 형성이 되면 'positive' 기후 변화 순환고리, 반대로 초기 힘을 감소시키는 방향으로 순환고리가 형성이 되면 'negative' 기후 변화 순환고리로 정의됨(그림 4-20).
- (2) 예를 들면, 지구 온난화로 인해 대기 중으로 수증기가 증가하면 온실 효과를 가중시켜 지구 온난화를 가속시키는 'positive' 기후 변화 순환고리가 형성이 되지만, 기온 증가와 강수량 증가로 인해 산림이 증가하여 화학적 풍화를 가속 시키면서 대기 중 이산화탄소 농도를 낮추는 기작으로 인해 지구 온난화를 감소시키는 'negative' 기후 변화 순환고리가 형성이 됨(그림 4-21).

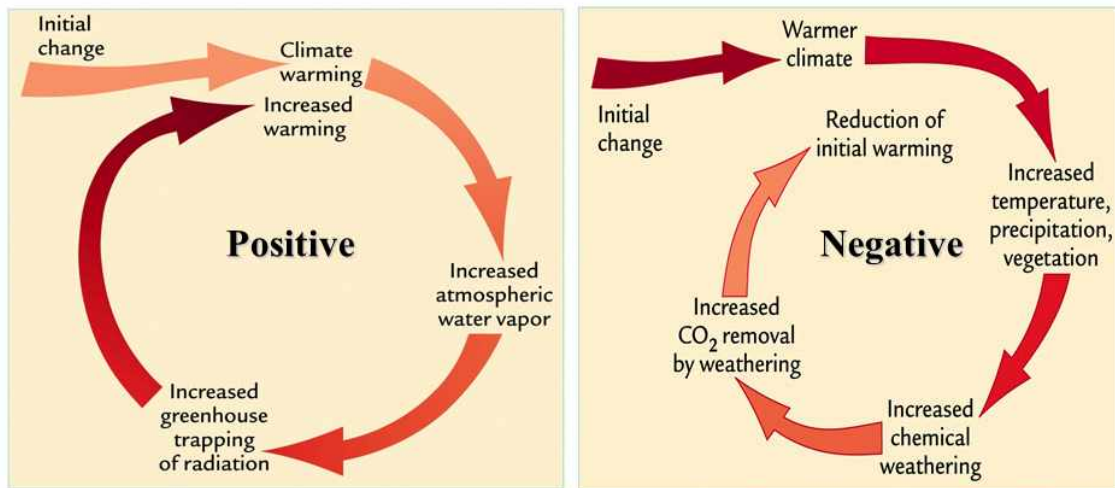


A Positive feedback



B Negative feedback

[그림 4-20] Conceptual diagrams of positive and negative feedback loops (Ruddiman, 2000).



[그림 4-21] Examples of positive and negative feedback loops (Ruddiman, 2000).

나. 북극환경변화 관련 기후 변화 피드백 순환고리 구성

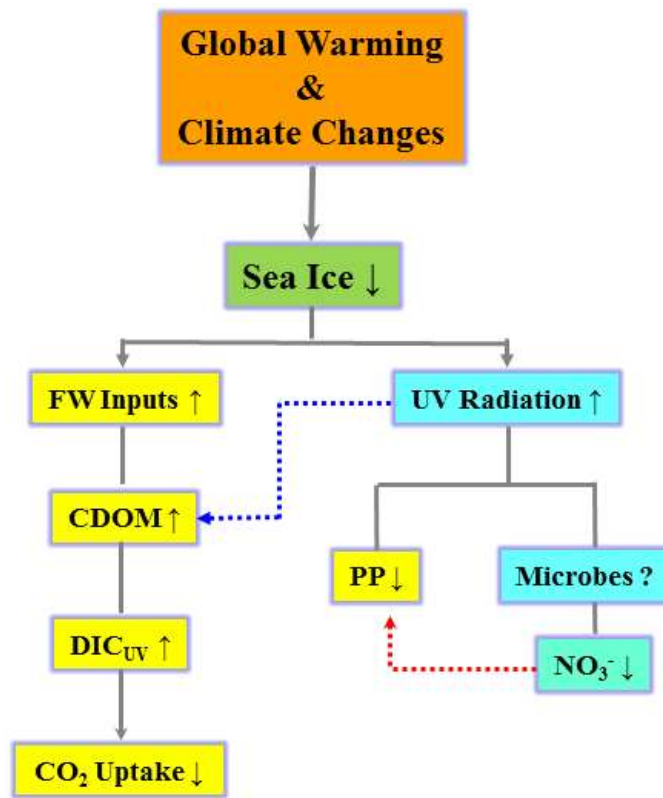
(1) 현재에 발생하고 북극환경변화(해빙 감소를 중심으로)와 관련하여 기후 변화 피드백 순환고리를 북극의 탄소 흡수 능력과 일차생산성 변화를 중심으로 구성하였음

(가) 탄소 흡수 능력 변화

지구 온난화로 인해 해빙이 지속적으로 감소하면 담수의 유입이 증가할 것으로 예상됨. 특히, 육상 생태계의 변화로 인해 대량의 담수 유입이 해양환경으로 유입 될 것으로 예상되고, 이는 chromophoric dissolved organic matter(CDOM)의 중요한 source가 될 것으로 예상됨. 해빙이 감소하면서 이에 따른 UV-B radiation에 노출되는 면적이 증가할 것으로 예상됨. CDOM은 중요한 UV-B absorbance 역할을 하면서 표층 해양 생태계의 중요한 보호막을 형성할 것으로 예상됨. 하지만, 북극 성층권의 오존 구멍이 지속적으로 커지게 되면 다량의 UV-B radiation이 증가하면서 CDOM을 광분해하여 해수 중 inorganic carbon pool을 증가시켜 해양의 탄소 흡수 능력을 감소시킬 수 있는 잠재성(potential)을 가질 수 있고(Erikson et al., 2015), 이는 최종적으로 'positive' 기후 변화 피드백 순환고리를 형성 할 수 있음(그림 4-22).

(나) 일차 생산성 감소

지속적으로 UV-B에 노출이 되면 식물 플랑크톤의 광합성 기능에 영향을 주는 DNA에 손상을 입혀서 일차 생산자로서 기능을 저해 시킨다는 연구 내용이 남극해에서 보고되었음(Pakulski et al., 2010). 이와 더불어 미생물 군집에서 영향을 미칠 것으로 생각이 되지만, 이에 대한 내용은 잘 알려져 있지 않음. 해양환경에서 질소 순환은 제한 영양염으로 작동하면서 일차 생산성을 조절하는 중요한 인자로 취급되고 있음. 특히, 질산화 과정 ($\text{NH}_4^+ \rightarrow \text{NO}_2^- \rightarrow \text{NO}_3^-$)은 식물 플랑크톤의 성장에 필수 영양염인 질산염(nitrate; NO_3^-)을 공급하는 중요 과정임. 대양에서 광저해작용(Photoinhibition), 즉 UV radiation에 의한 미생물 군집이 영향을 받아 질산화 과정을 완성하지 못 하게 되면 중간 산물인 아질산염(nitrite; NO_2^-)이 표층 부근에서 피크를 보이게 됨(Gruber, 2008). 향후, 북극의 오존 구멍의 증가로 UV-B radiation 증가를 하게 되면 광저해작용으로 인해 질산화 과정이 불완전하게 되고, 최종적으로는 질산염 공급에도 영향을 주면서 일차 생산성에도 영향을 미치게 되어 'positive' 기후 변화 피드백 순환고리를 형성 할 수 있음(그림. 4-22).



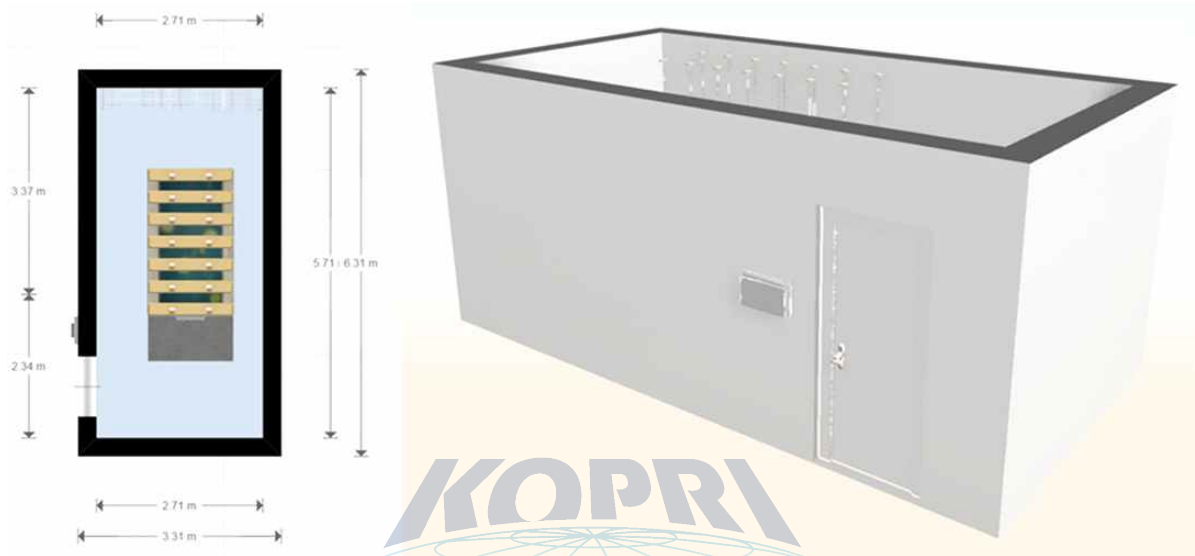
POSITIVE

[그림 4-22] Expected Arctic climate feedback loops, based on carbon uptake capacity and UV radiation scenarios.

7절 해빙 생태계 재현 빙해 수조 구현

1. 저온실의 설치

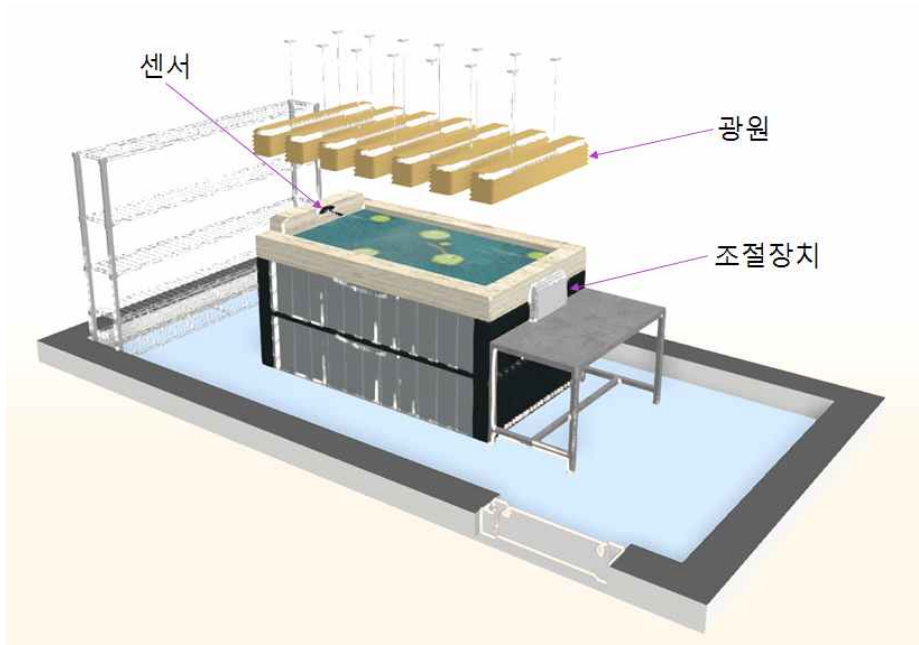
- 해빙 수조가 위치할 공간은 저온실 설치를 통해 방의 온도를 영하 10도 까지 유지할 수 있는 3mX6m(격벽 중앙부 기준) 크기로 설치한다.



[그림 4-23] 저온실의 평면도(좌) 조감도(우)

2. 해빙수조 제작

- 저온실에 설치될 해빙수조는 2.4mX1.4mX1.4의 단일 수조이며 수조 위에는 LED전구를 통한 가시광선과 UVA와 UVB의 등을 설치할 수 있는 조명이 위치하며 광량조절을 위해 조명의 높이를 조절할 수 있게 한다.
- 수조 내부의 해수 상황을 모니터링 할 수 있는 센서와 사진촬영을 위한 카메라가 위치할 수 있는 공간을 구획하여 실시간 측정이 가능하도록 한다. 실시간 측정된 데이터는 외부에서 확인할 수 있도록 하여 발생할 수 있는 문제점에 실시간 대응이 가능하도록 제작한다.
- 해빙의 두께는 최대 30cm 까지 결빙 될 수 있도록 목표하며 해빙수조 및 저온실 온도 유지를 통해 결빙 후 안정적인 실험 기간 동안 결빙이 유지 될 수 있도록 한다.



[그림 4-24] 저운수조 조감도



제 5 장 사업 성과물 활용방안 및 기대효과

1절 성과 활용방안

- 극지역을 활용한 기후변화 연구에 기초자료로 제공
 - 지구온난화에 따른 기후변화가 북극해 해양생태계와 해양환경 변화에 미치는 영향을 파악하는데 귀중한 자료로 사용 가능하며, 향후 미래 예측을 위한 모델 입력 자료로도 활용 가능
 - 극지해역 해빙의 열적특성과 내부 단과복사 투과량을 정량적으로 산출함으로써, 최근 기후변화에 따라 변화되고 있는 해빙 두께변화에 따른 북극해 유입 태양복사량의 변화 이에 따른 해양환경 및 생태계 변화연구에 활용
 - 빙해수조를 재현함으로써 실내에서 인위적으로 조성한 해빙생태계의 탄소 흡수율 및 피드백에 관한 연구를 지원하여 현장에서 확인된 결과를 재확인
 - 제작된 해빙수조를 향후 진행될 다양한 해빙 생태계 관련 연구에 활용

- 기후변화 모델의 현장관측 자료로 활용
 - 관측된 해빙의 열적특성 및 대기, 해빙, 해수의 열교환량은 추후 북극해 대기, 해빙, 해양 접합모델의 정확도 향상에 필요한 기초자료로 활용
 - 기후 변화 피드백 순환고리 구성은 향후 북극 기후 모델을 구성하는 시나리오가 될 수 있고, 기후 변화 보고서 (IPCC)에서 제공하는 미래 기후 변화 시나리오와 연동하여 보다 정확하고 사실적인 북극 기후 모델을 재현 할 수 있는 기초 자료로 제공

- 해빙 미세조류의 일차생산 기여도를 재산정 할 수 있는 자료로 활용
 - 해빙 미세조류의 탄소 흡수율 및 해빙 미세조류 기원 유기탄소의 거동은 지구 온난화에 의한 해빙의 후퇴 및 단년생 해빙의 증가 등 북극 환경의 변화에 의한 생태계 변화 모니터링을 위한 기초 자료로써 활용도가 높을 것으로 기대

- 북극 연안국 중심의 배타적 독점 체제를 유지하고 있는 북극권에서 협력관계를 구축하기 위한 수단으로 해빙생태계 연구 활용
 - 북극이사회에서 입지를 다지고, 옵서버 역할 수행과 자격 유지를 위한 협력 전략으로 해빙생태계 연구 결과 제공
 - 북극권 활동 다변화를 위한 전략적 수단으로 해빙생태계 연구결과 활용

2절 사업 기대효과

- 북극해 연구역량 강화 및 연구저변 확대를 통한 국가과학기술분야 경쟁력 강화
 - 극지 해빙지역의 탐사, 연구영역 확대, 연구정보를 공유함으로써 연구성과 재고 및 연구역량 강화에 기여

- 해빙생태계 연구성과 도출을 통한 극지연구 선진국과의 격차 해소
 - 급격하게 변화하는 북극환경에 대해서 기후 변화 피드백 순환고리 구성 파악 연구는 향후 북극 연구 방향을 제시하고 말 빠른 대응 시나리오를 구성할 수 있는 기본적인 정보를 제공 할 수 있을 것으로 기대
 - 동연구의 수행결과를 통하여 극지연구 선진국 연구역량 대비 60% 이상 기술 추격 가능 기대

- 국제연구협력 기반 구축
 - 캐나다, 미국, 러시아 등 북극권 국가 및 영국과 같은 극지연구 선진국과의 국제공동 연구를 통하여 국제협력연구 인프라 구축 기대

- 우리나라 정부 북극정책에 능동적 대처
 - 우리나라의 북극종합정책 추진계획('13) 및 해수부의 추진정책 등의 일환으로 연구를 진행함으로써 비극지권 국가의 과학적 역량 재고 및 북극 오피서버 국가로서의 국제 사회에서의 역할에 기여

제 6 장 사업수행을 위한 국제협력

- 동과제 수행을 위하여 국제협력의 일환으로 해빙 미세조류의 생체지표 분석을 위한 영국 플리머스 대학과 Letter of Understanding 체결



Letter of Understanding

The Korea Polar Research Institute (KOPRI) and the Plymouth University (PU) as the central research agencies for the national Arctic programs of their respective countries,

Agree

1. PU to provide KOPRI with calibrated datasets and associated information obtained during collaborative research programs between the two organizations.
2. KOPRI to provide PU with supporting auxiliary data obtained from the study area(s), as per requested by PU, when needed for publication and joint research.
3. KOPRI and PU to coordinate procedures and share production, analysis, and co-publication of the dataset(s) as agreed by the two PI's
 - Project Principal Investigators nominated for the partners
Dr. Sun-Yong Ha (KOPRI) & Prof. Simon Belt (PU)
4. KOPRI and PU to collaborate on further research activities in the Arctic marine environment with each resources in the following season. Sharing of the outcome from future collaborations shall follow the PI's coordination, as per said in this Clause.

KOPRI
극지연구소

For Korea Polar Research Institute	For Plymouth University
	

- 국제공동 해빙 미세조류 생태연구를 위하여 캐나다 Polar Continental Shelf Program (PCSP) 프로그램 Arctic-ICE camp을 운영 중인 캐나다 매니토바 대학과 공동연구를 수행하기로 하였으며('17년 5월 경) 세부 일정 논의 중
- 또한 미국, 러시아, 노르웨이의 극지관련 전문기관과 국제공동연구를 협의 중에 있음

제 7 장 참고문헌

- Ardyna, M., Babin, M., Gosselin, M., Devred, E., Rainville, L. and Tremblay, J. E. (2014) Recent Arctic Ocean sea ice loss triggers novel fall phytoplankton blooms. *Geophysical Research Letters*, 41, 6207–6212.
- Arrigo, K.R., Van Dijken, G. and Pabi, S. (2008) Impact of a shrinking Arctic ice cover on marine primary production. *Geophysical Research Letter*, 35, L19603.
- Arrigo, K. R. and Van Dijken, G. L. (2011) Secular trends in Arctic Ocean net primary production. *Journal of Geophysical Research*, 116, C09011.
- Arrigo, K. R., and others (2012) Massive phytoplankton blooms under Arctic sea ice. *Science*, 336, 1408.
- Arrigo, K. R., and others (2014) Phytoplankton blooms beneath the sea ice in the Chukchi Sea. *Deep Sea Research II*, 105, 1–16.
- Arrigo, K. R. and Van Dijken, G. L. (2015) Continued increases in Arctic Ocean primary production. *Progress in Oceanography*, 136, 60–70.
- Bates, N. R., S. B. Moran, D. A. Hansell, and J. T. Mathis (2006) An increasing CO₂ sink in the Arctic Ocean due to sea-ice loss. *Geophys. Res. Lett.*, 33, L23609, doi:10.1029/2006GL027028.
- Bates, N. R., W.-J. Cai, J.T. Mathis (2011) The ocean carbon cycle in the Western Arctic Ocean: distributions and air-sea fluxes of carbon dioxide. *Oceanography*, 24 (2011), 186–201
- Bitz, C. M., and Lipscomb, W. H. (1999) An energy-conserving thermodynamic model of sea ice. *J. Geophys. Res.* 104, 15,669– 15,677.
- Cai, W., et al. (2010) Decrease in the CO₂ uptake capacity in an ice-free Arctic Ocean basin. *Science*, 329(5991), 556 - 559, doi:10.1126/science.1189338
- Carmack, E. and Wassmann, P. (2006) Food webs and physical-biological coupling on pan-Arctic shelves: Unifying concepts and comprehensive perspectives. *Progress in Oceanography*, 71, 446–477.
- Chikaraishi, Y., Ogawa, N. O., Kashiyama, Y., Takano, Y., Suga, H., Tomitani, A., Miyashta, H., Kitazato, H. and Ohkouchi, N. (2009) Determination of aquatic food web structure based on compound specific nitrogen isotopic composition of amino acids. *Limnology and Oceanography: methods*, 7(11), 740–750.
- Coupel, P., Ruiz-Pino, D., Sicre, M. A., Chen, J. F., Lee, S. H., Schiffrine, N., Li, H. L. and Gascard, J. C. (2015) The impact of freshening on phytoplankton production in the Pacific Arctic Ocean. *Progress in Oceanography*, 131, 113–125.

- David J. Erickson III, Barbara Sulzberger, Richard G. Zepp and Amy T. Austin (2014) Effects of stratospheric ozone depletion, solar UV radiation, and climate change on biogeochemical cycling: interactions and feedbacks. *Photochem. Photobiol. Sci.*, 2015, 14, 127.
- Dean Pakulski, Jason P. Kase, Jarah A. Meador and Wade H. Jeffrey (2008) Effect of Stratospheric Ozone Depletion and Enhanced Ultraviolet Radiation on Marine Bacteria at Palmer Station, Antarctica in the Early Austral Spring. *Photochemistry and Photobiology*, 2008, 84: 215-221.
- DeNiro, M. J., and S. Epstein. (1978) Influence of diet on the distribution of carbon isotopes in animals. *Geochim. Cosmochim. Acta* 42: 495-506.
- Ebert, E. E., and J. A. Curry (1993) An intermediate one-dimensional thermodynamic sea-ice model for investigating ice-atmosphere interactions, *J. Geophys. Res.*, 98, 10,085-10,109.
- Fernandez-Mendez, M., F. Wenzhofer, I. Peeken, H. L. Sorensen, R. N. Glud, and A. Boetius (2014) Composition, Buoyancy Regulation and Fate of Ice Algal Aggregates in the Central Arctic Ocean, *PLOS ONE*, 2014, 9, e107452
- Fountoulakis, I., A. F. Bais, K. Tourpali, K. Fragkos, and S. Misiotis (2014) Projected changes in solar UV radiation in the Arctic and sub-Arctic Oceans: Effects from changes in reflectivity, ice transmittance, clouds, and ozone, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 119, 8073-8090, doi:10.1002/2014JD021918.
- Frey, K. E., Comiso, J. C., Cooper, L. W., Gradinger, R. R., Grebmeier, J. M., and Tremblay, J. E. (2016) Arctic ocean primary productivity. In: *Arctic Report Card 2016*.
- Gruber, N. (2008) The marine nitrogen cycle: Overview of distributions and processes, In: *Nitrogen in the marine environment*, 2nd edition, edited by D.G. Capone, D.A. Bronk, M.R. Mulholland, and E.J. Carpenter, Elsevier, Amsterdam, 1-50.
- Hill, V. J., Matrai, P. A., Olson, E., Suttles, S., Steele, M., Codispoti, L. A. and Zimmerman, R. C. (2013) Synthesis of integrated primary production in the Arctic Ocean: II. In situ and remotely sensed estimates. *Progress in Oceanography*, 110, 107-125.
- Holland, M. M. and Bitz, C. M. (2003) Polar amplification of climate change in coupled models. *Climate Dynamics*, 21, 221-232.
- IPCC, Climate Change 2013 (2013) The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change..
- Jeffries, M. O., Overland, J. E. and Perovich, D. K. (2013) THE ARCTIC shifts to a new normal. *Physics Today*, 66, 35-40.
- Ji, R., Jin, M., and Varpe, O. (2013) Sea ice phenology and timing of primary production pulses in the Arctic Ocean. *Global Change Biology*, 19, 734-741.

- Johnson, H. L. (1989) The specific heat of sea ice, B. Sc. honour's thesis, Victoria University of Wellington, New Zealand.
- Kahru, M., Brotas, V., Manzano-Sarabia, M. and Mitchell, B. G. (2011) Are phytoplankton blooms occurring earlier in the Arctic? *Global Change Biology*, 17, 1733-1739.
- Lee, S. H., Whitley, T. E., and Kang, S. H. (2008) Spring time production of bottom ice algae in the landfast sea ice zone at Barrow, Alaska. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 367(2), 204-212.
- Manney, G.L., M. L. Santee, M. Rex, N. J. Livesey, M. C. Pitts, P. Veefkind, E. R. Nash, I. Wohltmann, R. Lehmann, L. Froidevaux, L. R. Poole, M. R. Schoeberl, D. P. Haffner, J. Davies, V. Dorokhov, H. Gernandt, B. Johnson, R. Kivi, E. Kyro, N. Larsen, P. F. Levelt, A. Makshtas, C. T. McElroy, H. Nakajima, M. C. Parrondo, D. W. Tarasick, P. von der Gathen, K. A. Walker and N. S. Zinoviev (2011) Unprecedented Arctic ozone loss in 2011, *Nature*, 478, 469.U465.
- Maritorena, S., and Siegel, D. A. (2005) Consistent merging of satellite ocean color data sets using a bio-optical model. *Remote Sensing of Environment*, 94, 429-440.
- Maykut, G. A., and N. Untersteiner (1971) Some results from a time- dependent, thermodynamic model of sea ice, *J. Geophys. Res.*, 76, 1550 - 1575.
- McMahon, K. W., Ambrose Jr, W. G., Johnson, B. J., Sun, M. Y., Lopez, G. R., Clough, L. M., and Carroll, M. L. (2006) Benthic community response to ice algae and phytoplankton in Ny Ålesund, Svalbard. *Marine Ecology Progress Series* 310: 1-14.
- Mock, T., and Gradinger, R. (1999). Determination of Arctic ice algal production with a new in situ incubation technique. *Marine Ecology Progress Series*, 177, 15-26.
- Mundy, C. J., Gosselin, M., Ehn, J., Gratton, Y., Rossnagel, A., Barber, D. G., Martin, J., Tremblay, J., Palmer, M., Arrigo, K. R., Damis, G., Fortier, L., Else, B. and Papakyriakou, T. (2009) Contribution of under ice primary production to an ice edge upwelling phytoplankton bloom in the Canadian Beaufort Sea. *Geophysical Research Letters*, 36(17).
- Pabi, S., Van Dijken, G. L. and Arrigo, K. R. (2008) Primary production in the Arctic Ocean, 1998-2006. *Journal of Geophysical Research-Oceans*, 113.
- Perovich, D. K., Light, B., Eichen, H., Jones, K. F., Runciman, K. and Nghiem, S. V. (2007) Increasing solar heating of the Arctic Ocean and adjacent seas, 1979-2005: Attribution and role in the ice-albedo feedback. *Geophysical Research Letters*, 34.
- Perovich, D. K. and Polashenski, C. (2012) Albedo evolution of seasonal Arctic sea ice. *Geophysical Research Letters*, 39.
- Perovich, D., Meier, W., Tschudi, M., Farrell, S., Gerland, S., and Hendricks, S. (2016) Sea Ice. In: *Arctic Report Card 2015*. <http://www.arctic.noaa.gov/Report-Card>.
- Petrovich, D., Meier, W., Tschudi, M., Farrell, S., Gerland, S., Hendricks, S., Krumpfen, T.,

- and Haas, C. (2016) Sea Ice. In: Arctic Report Card 2016. <http://www.arctic.noaa.gov/Report-Card>.
- Rippeth, T. P., Lincoln, B. J., Lenn, Y. D., Green, J. a. M., Sundfjord, A. and Bacon, S. (2015) Tide-mediated warming of Arctic halocline by Atlantic heat fluxes over rough topography. *Nature Geoscience*, 8, 191–194.
- Ruddiman, W.F. (2000) *Earth's Climate: past and future*. W. H. Freeman, p 465.
- Pringle, D. J. (2005) Thermal conductivity of sea ice and Antarctic permafrost, Ph. D. thesis, Victoria University of Wellington, New Zealand.
- Pringle, D. J., Eicken, H., Trodahl, H. J., and Backstrom, L. G. E. (2007) Thermal conductivity of landfast Antarctic and Arctic sea ice. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 112(C4).
- Screen, J. A. and Simmonds, I. (2010) The central role of diminishing sea ice in recent Arctic temperature amplification. *Nature*, 464, 1334–1337.
- Shimada, K., Kamoshida, T., Itoh, M., Nishino, S., Carmack, E., Mclaughlin, F., Zimmermann, S. and Proshutinsky, A. (2006) Pacific Ocean inflow: Influence on catastrophic reduction of sea ice cover in the Arctic Ocean. *Geophysical Research Letters*, 33.
- Trodahl, H. J., McGuinness, M. J., Langhorne, P. J., Collins, K., Pantoja, A. E., Smith, I. J., and Haskell, T. G. (2000) Heat transport in McMurdo Sound first year fast ice. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 105(C5), 11347–11358.
- Wang, M., and J. E. Overland (2009) A sea ice free summer Arctic within 30 years?, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L07502, doi:10.1029/2009GL037820.
- Vancoppenolle, M., Meiners, K.M., Michel, C., Bopp, L., Brabant, F., Carnat, G., Delille, B., Lannuzel, D., Madec, G., Moreau, S., Tison, J. and van der Merwe, P. (2013) Role of sea ice in global biogeochemical cycles: emerging views and challenges. *Quaternary Science Reviews*, 79, 207–230.
- Yen, Y. C. (1981) Review of thermal properties of snow, ice and sea ice (No. CRREL-81-10). COLD REGIONS RESEARCH AND ENGINEERING LAB HANOVER NH.
- Yun, M. S., Whitledge, T. E., Stockwell, D., Son, S. H., Lee, J. H., Park, J. W., Lee, D. B., Park, J. and Lee, S. H. (2016) Primary production in the Chukchi Sea with potential effects of freshwater content. *Biogeosciences*, 13, 737–749.

주 의

1. 이 보고서는 극지연구소에서 수행한 기본연구사업의 연구결과보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 극지연구소에서 수행한 기본연구사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.