

후기 제 4기 서북극권 고해양환경변화복원연구

A study on the late Quaternary paleoenvironmental changes in  
western Arctic



2017. 02. 28

한 국 해 양 과 학 기 술 원  
부 설 극 지 연 구 소

# 제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “후기 제 4기 서북극권 고해양환경변화복원연구”과제의 최종보고서로 제출합니다.

2017. 2.



: 남 승 일

: 김 소 영, 황 청 연,  
김 정 현, 이 미 정,  
진 영 근, 최 은 정,  
아 사 히, 미 하 엘,  
손 영 주, 이 보 림,  
이 민 아, 김 수 관,  
주 영 지, 김 형 준,  
박 광 규, 조 영 진,

위탁연구기관명 : 서울대학교

위탁연구책임자 : 허 영 숙

위탁연구기관명 : 제주대학교

위탁연구책임자 : 윤 석 훈

보고서 초록

과제관리번호		해당단계 연구기간	2014.1.1-2016.12.31	단계 구분	(1) / (1)
연구사업명	중 사업명	기관목적사업			
	세부사업명				
연구과제명	중 과제명	서북극권 에너지자원 및 고환경 변화연구			
	세부(단위)과제명	후기 제4기 서북극권 고해양환경변화 복원연구			
연구책임자	남 승 일	해당단계 참여연구원수	총 : 23 명 내부 : 16 명 외부 : 7 명	해당단계 연구비	정부: 1,556,000 천원 기업: 천원 계: 1,556,000 천원
연구기관명 및 소속부서명	극지연구소 극지고환경연구부		참여기업명		
국제공동연구	상대국명 : 독일, 미국, 일본		상대국연구기관명 : AWI, BPCRC, 홋카이도대학교		
위탁연구	연구기관명 : 제주대학교		연구책임자 : 윤석훈		
	연구기관명 : 서울대학교		연구책임자 : 허영숙		
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자이내)				보고서 면수	131
<p>본 사업에서 수행한 연구를 통하여 다음과 같은 연구결과를 달성하였음 :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 2014년 북극해 로모노소프 해령과 북극해 중앙결빙해역의 독일 AWI 쇄빙선 ‘폴라스턴’ 국제공동탐사 참여하여 거대빙하 흔적 탐사자료 및 시추코어 퇴적물 획득하였음.</li> <li>○ 중생대 이후 북극해 진화역사와 기후변화 규명과 마지막 최대 빙하기 이후 아북극권 피오르드에서 고해상 기후변화 복원을 위한 심부시추 추진을 위한 IODP에 시추제안서 2편 공동 제출하였음.</li> <li>○ 2015 ‘아라온’ 국제공동탐사를 서북극 척치 Borderland/동시베리아 주변해역에서 수행하여 거대빙하 흔적 탐사자료 확보 및 JPC(Jumbo Piston Corer)를 이용하여 교란되지 않은 롱코어(&gt;10 m) 퇴적물 코어를 획득하여 예비 층서를 설정하였음.</li> <li>○ 척치 주변해-북부 알래스카 대륙붕 해역에서 빙하기에 존재했던 대규모 빙상 기록 및 규모 파악하고 후기 제 4기 서북극해 빙하역사복원 하였음.</li> <li>○ 서북극권 및 로모노소프 해령 해역 고해양/고기후변화 복원 적용 프록시를 국제공동연구를 통해 개발하였음. <ul style="list-style-type: none"> <li>- 후기 제4기 정밀층서정립(기존 퇴적층서 자료 대비, MSCL, XRF 코어 스캐닝 분석, 고지자기 정밀자료 활용) 하였음.</li> <li>- 로모노소프 횡단 표층 퇴적층 자료 및 신제 3기 고기 퇴적층 미화석 자료 분석 하였음.</li> <li>- 홀로세 해빙분포 복원 등 기후변화 복원 프록시 공동연구(미화석, 생체지표, Bulk/점토 광물, 유기물 동위원소 등) 및 고해양환경 및 육상기후변화를 정밀 복원하였음.</li> </ul> </li> <li>○ 척치해 주변에서 홀로세 이후 기후변화 기록정밀복원(예, 북극진동 패턴 등) 하였음.</li> <li>○ 대사체 연구를 통해 기후변화상관 미생물군집 분석 및 박테리아/진균 분리하였음. <ul style="list-style-type: none"> <li>- 서북극해 퇴적물 미생물 분리, 군집분석연구를 수행하였음.</li> <li>- 서북극해 퇴적물에서 박테리아/진균분리 및 신종 대사체 추출하였음.</li> </ul> </li> </ul>					
색인어 (각 5개 이상)	한 글	북극해, 빙하역사, 고해양환경변화, 다중 프록시, 국제공동해저시추프로그램			
	영 어	Arctic Ocean, Glacial history, Paleoceanographic changes, Multi-proxies, IODP			

# 요 약 문

## I. 제 목 후기 제 4기 서북극권 고해양환경변화 복원연구

### II. 연구개발의 목적 및 필요성

- 서북극해 후기 제 4기 빙하기록 및 고해상의 고기후/고해양환경변화 정밀복원
- 북극해 중앙 결빙해역 로모노소프 해령 종단 ‘플라스턴’ 국제공동탐사 참여를 통한 2018년 8월 추진 될 로모노소프해령 국제공동해저시추프로그램(IODP)에 참여 추진
- 서북극해 대륙주변부 국제공동해저시추프로그램(IODP) 시추제안서 공동제출
- 북극 심해 퇴적물 환경에 서식하는 미생물과 박테리아의 다양성과 환경 적응 특성 이해

### III. 연구개발의 내용 및 범위

- 서북극해 국제공동해저시추제안서 제출에 필요한 해저지형 및 천부지층 탄성과 탐사 자료 확보
- JPC 시추코어 퇴적물을 획득하여 중기 및 후기 제4기 빙하작용 기록과 빙하기-간빙기 고기후/고해양 환경변화 정밀복원
- 서북극 척치해 주변해역에서 고기후환경변화복원 적용 프록시 공동개발

### IV. 연구개발결과

- 북극해 로모노소프 해령을 포함한 북극해 중앙결빙해역의 독일 AWI 쇠빙선 2014 ‘플라스턴’ 국제공동탐사 참여하여 거대빙하 흔적 기록 및 시추코어 퇴적물 획득
- 중생대 온실하우스 이후 북극해 진화역사와 기후변화 규명 및 아북극권 피오르드에서 마지막 최대 빙하기 이후 고해상의 기후환경변화 기록을 복원하기 위한 심부시추 추진을 위한 IODP에 시추제안서 2편을 국제공동 제출함

- 서북극 척치 Borderland/동시베리아 주변해역 해저지질 국제공동(한-독-일-미-프)탐사 「아라온」에 장착된 JPC(Jumbo Piston Corer) 이용 롱코어(>10 m) 퇴적물 코어 획득을 통한 제 4기 중기 빙하기-간빙기 예비 층서정립
- 척치 주변해-북부 알래스카 대륙붕 해역의 대규모 빙상 기록 및 규모 파악을 통한 후기 제 4기 서북극해 빙하역사복원
- 서북극해 및 로모노소프 해령 해역 고해양/고기후변화 복원 적용 프록시 공동개발
  - 후기 제4기 정밀층서정립(기존 퇴적층서 자료 대비, MSCL, XRF 코어 스캐닝 분석, 고지자기 정밀자료 활용)
  - 로모노소프 횡단 표층 퇴적층 자료 및 신제 3기 고기 퇴적층 미화석 자료 분석
  - 홀로세 기후변화 복원 프록시 개발 (생체지표, Bulk/점토 광물, 유기물 동위원소 등) 및 해빙분포 기록 및 육상기후변화 복원
- 척치해 주변에서 홀로세 이후 기후변화 기록정밀복원(예, 북극진동 패턴 등)
- 기후변화상관 미생물군집 분석 및 박테리아/진균 분리 등 대사체 연구
  - 서북극해 퇴적물에서 박테리아/진균분리 및 신종 대사체 추출
  - 서북극해 퇴적물 미생물 분리, 군집분석연구

#### V. 연구개발결과의 활용계획

- 북극항로와 국내 산업체의 북극권 개발 진출에 필요한 기본 자료 제공
- 북극권 연안 국가와 R&D 국제협력 네트워크 구축
- 정부 부처 북극탐사연구 관련 대형연구개발(R&D) 사업 개발
- 서북극해 국제공동시추프로그램 (IODP) 추진에 필요한 주요 자료 제공
- 북극 선도연구기관과의 국제공동탐사를 통한 세계수준의 연구성과 도출
- 북극해 연안국 EEZ 탐사, 중앙 결빙해역 및 북극점 해역탐사 추진
- 제 2쇄빙선 아라온 탑재가능 MeBo 시추기 이용한 심부시추기술기반구축

# S U M M A R Y

## (영 문 요약 문)

I. Title Late Quaternary Reconstruction of paleoenvironmental changes in the western Arctic

### II. Purpose and Necessity of R&D

- High-resolution reconstruction on glacial records and paleoclimatic/paleoceanographic changes in the western Arctic Ocean during the late Quaternary glacial-interglacial cycles
- Join the international survey of the “RV Polarstern” on the perennially ice-covered central Arctic Ocean crossing the Lomonosov Ridge for Promoting participation in the International Ocean Discovery Program (IODP) for drilling the Lomonosov Ridge during August 2018
- International joint submission of drilling proposal to IODP for drilling on the continental margins in the western Arctic Ocean/sub-Arctic
- Understanding diversities of culturable strains and their adaptations to deep-sea sediment environments in Arctic Ocean through isolation and characterization of microorganisms in sediments

### III. Contents and Extent of R&D

- Data securing on the glacially-influenced sea-floor morphology and shallow sub-bottom seismic profiles (SBP) to submit the IODP proposal for drilling the western Arctic Ocean
- High-resolution reconstruction on the late Quaternary glacial history and paleoclimatic /paleoceanographic changes recorded in undisturbed long sediments retrieved using the Jumbo Piston Corer (JPC)
- Cooperative development of the applicable proxy for reconstructing the paleoenvironmental change around the Chukchi Sea and adjacent seas in the western Arctic Ocean

### IV. R&D Results

- International joint to develop multi-proxies to reconstruct high-resolution climate changes from the western Arctic and on the Lomonosov Ridge in the central Arctic
  - Establishing precise stratigraphy of late Quaternary based on correlation with previously published data sets, MSCL, XRF-core scanning analysis and paleomagnetism, etc.
  - Microfossil analysis on surface sediments and Neogene sediments retrieved along the Lomonosov Ridge in the central Arctic
  - Proxy development for the climate change reconstruction during the Holocene (biomarker, bulk/clay mineral, organic elemental isotopes) and reconstructions for the sea ice extent and the climatic change on the land
- Reconstruction of Holocene climate changes with high-resolution records (e.g., Arctic oscillation)
- Microbiological assemblage analysis related to climate changes and research on metabolome analysis such as bacteria and/or mycete isolation
  - Isolation and characterization of microorganisms to understand diversities of culturable strains and their adaptations to deep-sea sediment environments in Arctic Ocean
  - Fifty bacterial strains were isolated from Arctic deep-sea sediments
  - distribution of bacterial assemblages and physicochemical properties in surface sediments changed gradually from the Arctic continental shelf to deep-sea basin

KOPRI  
극지연구소

#### V. Application Plans of R&D Results

- Production of world-class research results with international collaborating institutions
- Launching and conducting governmental big R&D projects
- Providing basic dataset for Arctic deep-sea drilling in terms of IODP
- Joint submission of science proposal drilling for the western Arctic Ocean to IODP
- Araon Expedition into the Arctic countries' waters (EEZ), and the Central Arctic Ocean covered with perennial pack-ice
- Deep sea-floor drilling using MeBo operating onboard new icebreaker ARAON

# C O N T E N T S

<b>Chapter 1 Introduction</b> .....	9
Paragraph 1 Tertiary global climatic changes.....	9
Paragraph 2 Quaternary glacial–interglacial climatic changes.....	11
Paragraph 3 Glacial history of the Quaternary Arctic Ocean.....	13
1. Distribution, thickness, transport and cycle of the Sea–ice.....	13
2. Recent sea–ice changes and prediction .....	15
3. Reduced sea–ice and its effect on climate system .....	17
4. Glacial history of the Quaternary Arctic Ocean.....	18
Paragraph 4 Purpose and necessity of the R&D.....	22
<b>Chapter 2 Current R&amp;D status in Korea and Other Nations</b> .....	26
Paragraph 1 National and international research activities in the western Arctic ...	26
Paragraph 2 Status of survey and coring technique .....	34
<b>Chapter 3 R&amp;D Implementation Contents and Results</b> .....	36
Paragraph 1 Contents and Preliminary Results.....	37
1. Preliminary results of the 2014 28/4 ‘RV Polarstern’ Arctic expedition (ARK–28/4) .....	37
2. Preliminary results of the 2015 ‘RV Araon’ western Arctic expedition (ARK–28/4)(ARA06C) .....	55
Paragraph 2 Reconstruction of late Quaternary glacial history and paleoceanography .....	64
1. Terrestrial and aquatic palynomorphs in Holocene sediments from the Chukchi–Alaskan margin, western Arctic Ocean .....	64
2. Research on paleoenvironmental changes in the Chukchi basin during late Quaternary based on sedimentological proxies.....	72
3. Reconstruction on Mid Pleistocene paleoenvironmental changes in the Makarov Basin of the central Arctic.....	87
4. Study on microbiology in western Arctic deep–sea sediments.....	100
5. Study on micro–bioecology in western Arctic surface sediments .....	105
<b>Chapter 4 Degree of R&amp;D Goal Achievement and Degree of Contribution to Outside Research Insitute</b> .....	109
<b>Chapter 5 Application Plans of R&amp;D Results</b> .....	114
<b>Chapter 6 Scientific and technical intelligence collected from R&amp;D</b> .....	116
<b>Chapter 7 References</b> .....	119

# 목 차

<b>제 1 장 서 론</b> .....	9
제1절 제 3기 전 지구적 기후변화.....	9
제2절 제 4기 빙하기-간빙기 기후변화.....	11
제3절 제 4기 북극해 해빙 및 빙하역사.....	13
1. 해빙분포, 두께, 이동 및 주기.....	13
2. 최근 해빙변화 및 미래 예측.....	15
3. 해빙감소가 기후 시스템에 미치는 영향.....	17
4. 제 4기 북극해 빙하역사.....	18
제4절 연구개발의 목적 및 필요성.....	22
<b>제 2 장 국내외 기술개발 현황</b> .....	26
제1절 서북극해 국내·외 탐사연구 현황.....	26
제2절 국내·외 탐사 및 시추기술 수준 비교.....	34
<b>제 3 장 연구개발 수행 내용 및 결과</b> .....	36
제1절 연구내용 및 결과: 탐사 예비결과.....	37
1. 2014 제 28/4차 ‘폴라스턴’ 북극해 중앙 로모노소프 해령탐사 예비결과.....	37
2. 2015 ‘아라온’ 서북극 척치해-동시베리아 탐사(ARA06C) 예비결과.....	55
제2절 후기 제 4기 서북극권 빙하역사 및 고해양환경변화 복원.....	64
1. 척치-알래스카 대륙붕 퇴적물의 유기질미화석 분석을 통한 육상-해양 고환경복원 연구.....	64
2. 퇴적학적 프록시를 이용한 서 북극 척치 분지에 대한 제4기 후기 고환경 복원 연구.....	72
3. 북극해 중앙해역 마카로프 분지(Makarov Basin)의 플라이스토세 중기 이후 고환경 복원.....	87
4. 북극 심해 퇴적물에 서식하는 미생물 연구.....	100
5. 서북극해 표층퇴적물의 미생물생태 연구.....	105
<b>제 4 장 연구개발 목표 달성도 및 대외기여도</b> .....	109
<b>제 5 장 연구개발결과의 활용계획</b> .....	114
<b>제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보</b> .....	116
<b>제 7 장 참고문헌</b> .....	119

# 제 1 장 서론

## 1절 제 3기 전 지구적 기후변화

지구역사에서 기후는 그 원인이 이미 알려지거나 알려지지 않은 채 끊임없이 급격하게 변해왔다. 지난 3백 만년 동안 이산화탄소(CO<sub>2</sub>)를 포함한 대기의 온실기체 농도는 최근의 값과 비교할 때 크게 증가하지 않았다. 그러나 19세기 중반 산업혁명 이후 배출된 온실가스의 급격한 증가에 따라 최근 지구온난화가 가속화 되면서 대기과 해양의 수온이 상승하면서 북극해의 해빙이 급격히 감소하고 있다. 또한 북극해 주변에 위치한 그린란드 대륙빙하뿐 아니라 스발바르군도나 아이슬란드에 존재하는 빙하도 빠르게 녹으면서 해수면 상승을 야기하고 있다. 대기의 이산화탄소가 해수에 빠르게 녹아들면서 북극해의 산성화도 빠르게 진행되고 있다. 전 지구적인 규모로 지구온난화가 진행되면서 대륙의 다양한 지역에서 강수의 변화에 따른 한발과 홍수 및 폭설 등 자연재해가 과거에 비해 더욱 급격하고 돌발적으로 빈번하게 발생함에 따라 생태계뿐만 아니라 인류의 생활과 생존에도 막대한 영향을 미치고 있다. 그러나 약 46억년의 지구 역사에서 기구를 통해 강우나 온도를 측정된 자료는 겨우 지난 1세기가 조금 넘었을 뿐이다. 따라서 지질학적인 과거의 기후변화가 잘 보존되어 있는 호수나 해양퇴적층 또는 빙하에서 기록을 정밀하게 복원함으로써 최근에 일어나고 있는 기후변화를 정확하게 판단하고 평가할 수 있는 기초자료를 제공할 수 있다. 또한 과거에 일어났던 기후변화를 정확하게 복원된 자료는 미래에 일어날 수 있는 기후변화의 패턴과 영향을 보다 정확하게 이해하고 예측 할 수 있는 자료로 활용될 수 있다.

지질학적으로 제 3기에 해당되는 지난 6천 5백 만년 동안 북극의 기후는 전 지구적인 기후 변화의 주기와 그 궤적을 같이하고 있다. 제 3기 동안 지구는 따뜻했던 'greenhouse' 기후(ca. 60~40 Ma)에서 차가운 'icehouse' (ca. 34 Ma~) 기후로 바뀌었다. 따라서 제 3기의 'greenhouse' 기간 동안 북극해는 매우 따뜻한 기후가 우세하였다. 이러한 지질학적 기록은 지난 2004년 북극해 중앙을 가로지르는 로모노소프 해령을 '국제공동해저시추프로그램'에서 시추했던 퇴적층에서 밝혀진 사실이다(ACEX, 2004). Backman et al. (2006)과 Moran et al. (2006)은 시추했던 퇴적물을 분석하여 'greenhouse' 기후가 우세하였던 약 55~45 Ma 동안 북극해의 기온이 약 18~23°C 정도였던 것으로 보고하였다. 특히 온도가 가장 높았던 시기는 약 55.9 Ma 전인 PETM(Paleocene-Eocene Thermal Maximum)으로 대규모의 탄소가 해양과-대기시스템으로 방출되었던 것으로 알려졌다(Sluijs et al., 2006). 이와 반대로, 시추코어 퇴적물에서 규조류 화석이 약 47 Ma 경에 처음으로 출현하며 육상에서 유래된 빙산이 존재하였던 것으로 추정하였다(Stickley et al., 2009). 그러나 IOSDP 시추프로그램에서 밝혀진 또 하나의 사실은

ACEX 코어 퇴적층에는 약 44 Ma부터 18.5 Ma까지 약 16 Ma 동안 결층이 존재한다는 것이 었다. 또한 지난 18 Ma 기간 중에서 17 Ma에서 12 Ma까지 북극해는 지속적으로 해빙으로 덮 여 있었던 반면, 플라이오세인 약 4.5~2.8 Ma 동안 최소한 여름철에는 해빙이 녹아 없었다고 보고되었다(Cronin et al., 1993, Matthiessen et al., 2009). 그러나 북극해에서 해빙과 빙하형성 시기의 규명 등 제 3기 동안 일어난 보다 정확한 기후변화를 복원하기 위해서는 또 다른 심부 해저의 퇴적층의 시추가 필요하다.

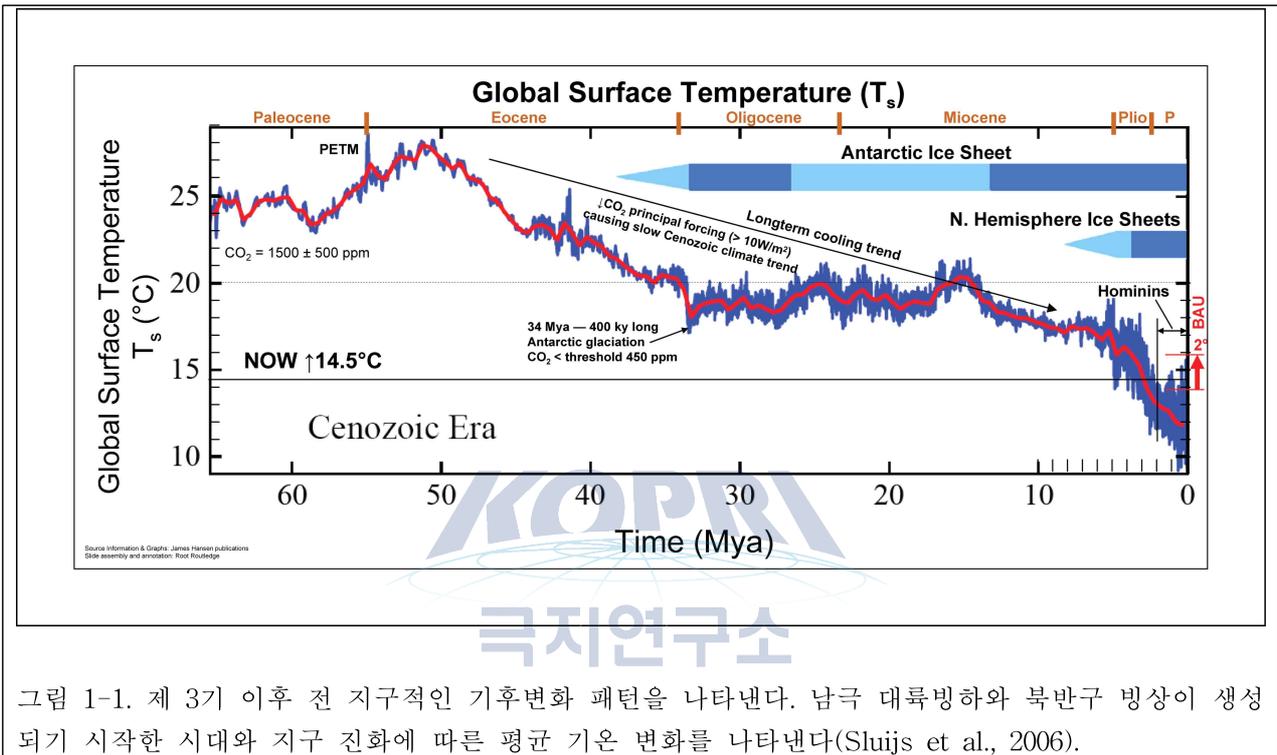


그림 1-1. 제 3기 이후 전 지구적인 기후변화 패턴을 나타낸다. 남극 대륙빙하와 북반구 빙상이 생성 되기 시작한 시대와 지구 진화에 따른 평균 기온 변화를 나타낸다(Sluijs et al., 2006).

## 2절 제 4기 빙하기-간빙기 기후변화

제 3기 동안 비교적 온난했던 기후변화가 우세했던 때와 다르게 제 4기(2.6 Ma 이후 현재) 동안 지구의 기후는 매우 혹독한 빙하기가 우세하여 북극해는 대부분 빙하의 영향을 받았다. 지구의 역사에서 제 4기를 일반적으로 빙하기(Ice Age)라 부른다. 제 4기 동안 지구의 북극과 남극의 넓은 지역이 수 km 두께의 대륙빙하로 덮여있었다. 플라이스토세의 한랭한 기후는 PETM 이후 약 55 Ma 동안 기온이 지속적으로 감소된 결과이다(그림 1-2). 특히 빙하기는 비교적 오랜 기간 지속된 반면, 빙하기 사이에 상대적으로 짧은 기간의 간빙기가 주기적으로 반복되었다. 플라이스토세에 일어난 빙하기-간빙기 동안 빙하의 형성과 확장 그리고 소멸이 최소한 20여 차례 지속되었다. 오랜 기간 지속되는 빙하기 때 지구 전체의 30 %가 하얀 얼음과 눈으로 덮여있었기 때문에 알베도(albedo)가 급격히 증가하여 태양복사에너지(solar radiation)가 대기로 반사되어 방출됨으로써 지구는 더욱더 냉각된다. 대륙에 거대한 빙하가 형성되어 확장되면서 전 대양의 해수면은 최대 120~130 m까지 낮아지고 대륙은 건조하여 먼지폭풍이 빈번해 졌으며 지구적인 평균 기온도 현재보다 약 5~10°C 정도 낮았다. 제 4기 동안 일어난 마지막 빙하기는 약 11.7 ka BP에 끝나고 ‘홀로세(Holocene)’인 간빙기의 온난한 기후가 현재 유지되고 있다. 이렇게 지난 100 Ma 동안 일어난 전 지구적인 기후변화는 지구궤도인: 1) 자전축(axial tilt, obliquity), 2) 세차운동(precession, wobble), 3) 이심률(eccentricity)의 변화에 따른 빙하기-간빙기 주기에 의해 조절되었다.

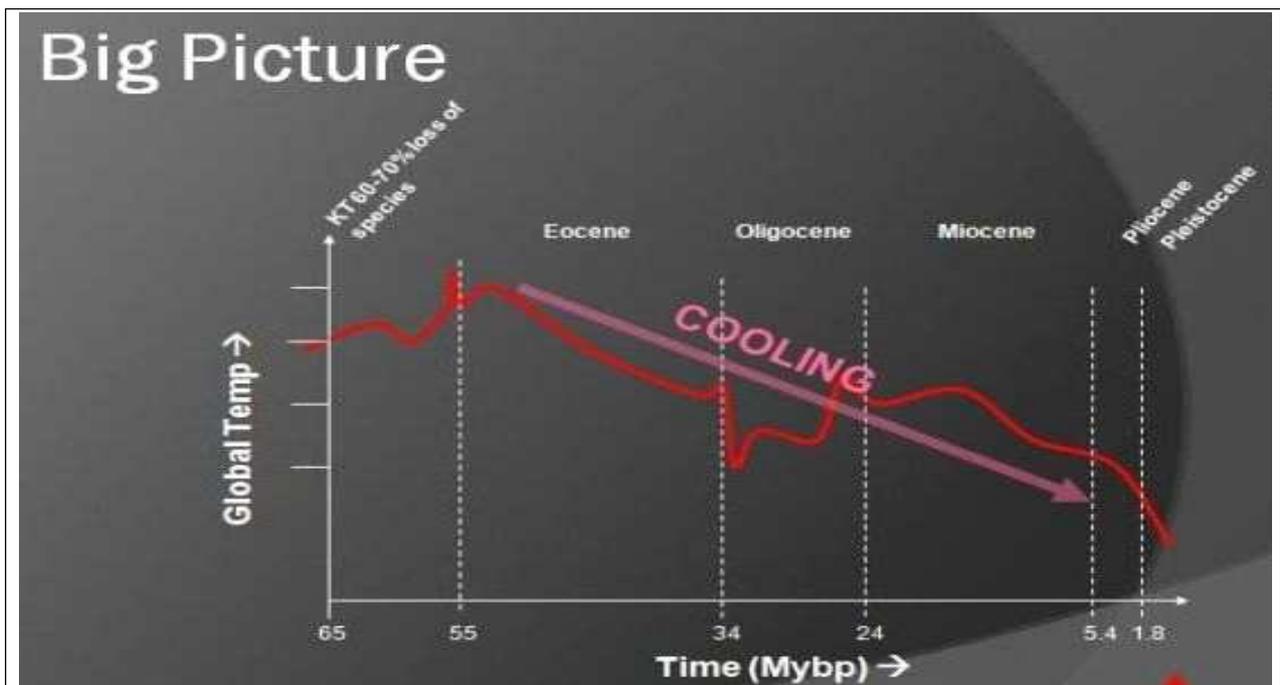


그림 1-2. 제 3기 PETM 이후 지구의 기후는 지속적으로 추워지고 있는 패턴을 보인다.

북극에서 대규모의 대륙빙하가 발달하기 광범위하게 덮이기 시작한 시기는 중기 플라이스토세 전이기(MPT, Mid-Pleistocene Transition)로 알려진 1.2~0.5 Ma까지다. 플라이스토세 이후 약 120만 년전 까지 기후는 자전축 기울기와 관련된 41 ka 주기가 우세하였으며, 약 100만 년 전부터는 이심율의 영향을 받는 10만년 주기의 기후가 우세하게 나타난다(그림 1-3, 1-4). 특히 MPT 이후 궤도변화(orbital changes)에 의해 기후의 주기는 강력해진 빙하기-간빙기 극상 기후(climatic extremes)의 패턴을 유지하고 있다. 이러한 빙하기-간빙기의 기후변화가 일어나는 동안 북극해의 중앙해역은 연중 해빙으로 덮여있었다(Cronin et al., 2008; O'Regan et al., 2008). 그러나 홀로세를 포함한 마지막 최대 간빙기 동안 북극해 해빙이 덮인 면적은 주기적으로 변화였다.

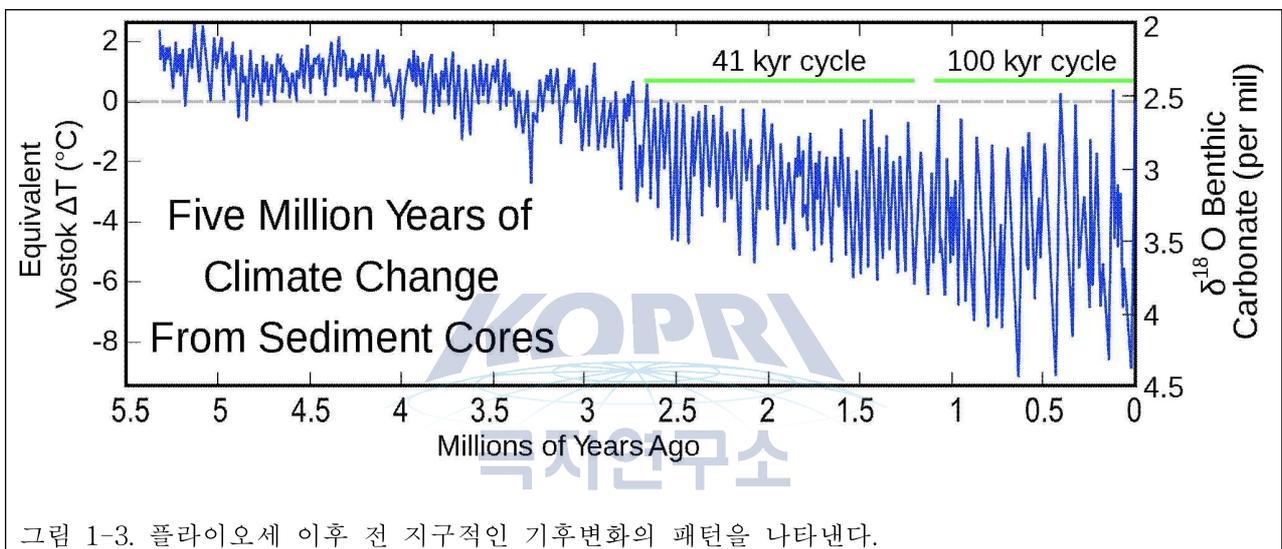


그림 1-3. 플라이오세 이후 전 지구적인 기후변화의 패턴을 나타낸다.

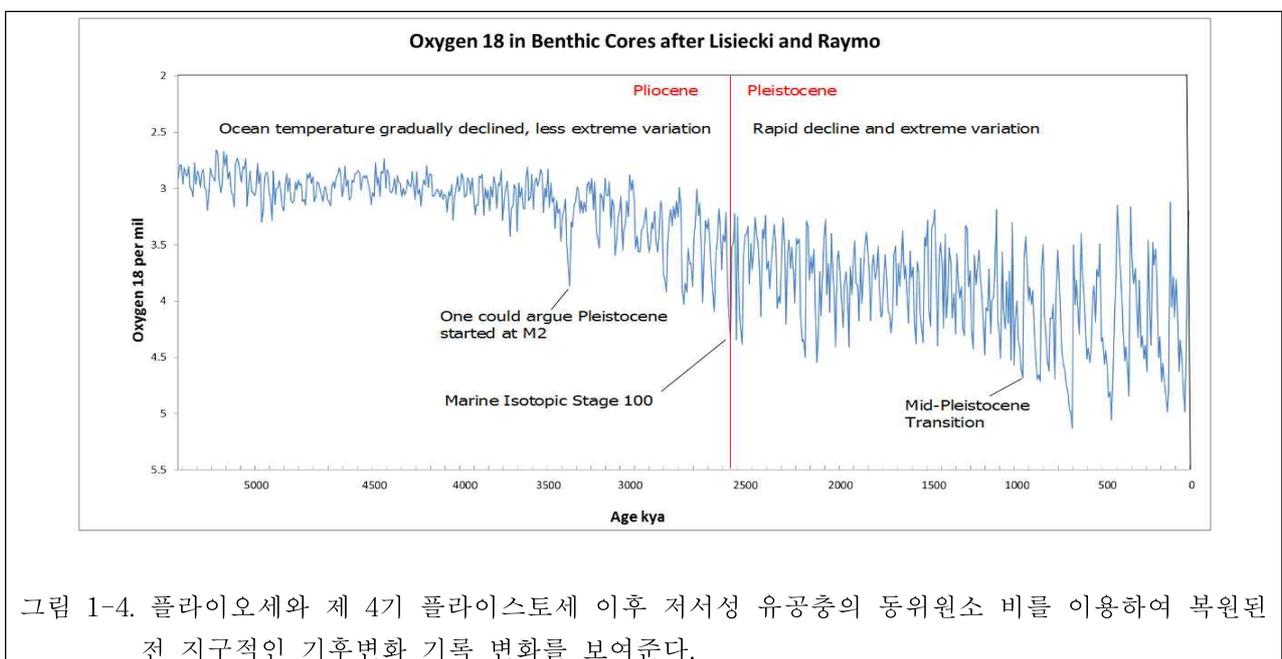
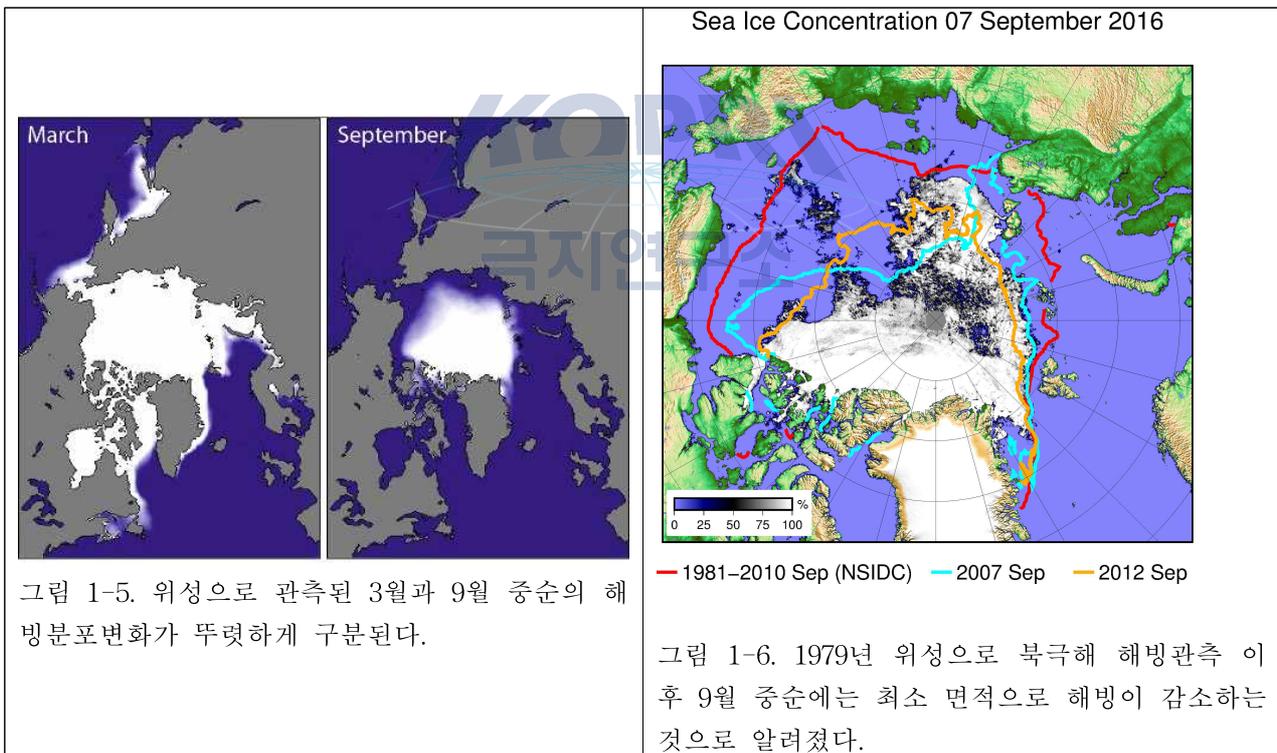


그림 1-4. 플라이오세와 제 4기 플라이스토세 이후 저서성 유공충의 동위원소 비를 이용하여 복원된 전 지구적인 기후변화 기록 변화를 보여준다.

### 3절 제 4기 북극해 해빙 및 빙하역사

#### 1. 해빙분포, 두께, 이동 및 주기

북반구의 최북단에 위치한 북극해와 그 주변해는 현재 대부분 해빙(海氷)으로 덮여있다. 북극해를 덮고 있는 해빙은 계절에 따라 그 분포범위가 뚜렷하게 변화한다. 또한 매년 결빙(結氷)되고 해빙(解氷)되는 면적뿐 아니라 해빙(海氷)의 두께도 변화하며 중·장기적으로 이러한 변화가 나타난다. 이렇게 해빙의 분포면적이나 두께가 변하는 것은 기후변화와 밀접하게 관련되어 있는 동시에 해빙 변화에 따라 고위도 해역에서 대기 및 수괴(수문)의 조건에도 영향을 미친다. 지난 1979년 북극해의 해빙분포가 위성으로 처음 관측하기 시작한 이후 북극해의 해빙은 매우 빠르게 녹고 있으며 그 두께도 얇아지고 있다. 기후모델에 의하면 북극해는 역 2040년보다 이전에 계절적으로 여름철에 해빙이 없는 대양이 될 수 있다(Wand and Overland, 2009).



북극해 해빙의 감소는 해빙-알베도 되먹임 기작(ice-albedo feedback mechanism)을 통해 온난화가 가속화 될 것이며 북극을 넘어 기상시스템에 영향을 미칠 것으로 예측되고 있다. 이러한 해빙의 변화와 북극해에서 유출되는 담수는 북대서양 순환시스템에도 영향을 미치며, 특히 유럽과 북미대륙의 기후에 막대한 영향을 미치고 있다. 최근 일어나고 있는 지속적이고 급격한 해빙 감소는 북극해의 먹이망(food web) 변화에 따른 연안생태계에도 영향을 미치고 있다.

일반적으로 북극해의 해빙은 3월까지 확장되면서 결빙되고 봄을 거쳐 여름이 되면서 급격히 녹기 시작하여 9월 중순에 최소 면적으로 줄어든다(그림 1-5). 북극해의 해빙은 1979년 3월에는 최대  $16.44 \times 10^6 \text{ km}^2$ 까지 확장되고 2016년 9월 10에 역대 두 번째로 해빙이  $4.14 \times 10^6 \text{ km}^2$ 으로 감소하였다. 2016년 9월의 북극해의 최소 해빙면적은 2007년 9월 18일에 기록된 최소 면적과 거의 동일하다. 또한 1979년 이후 역대 최소 해빙면적으로 감소하였던 2012년 9월 18일보다 약  $0.7 \times 10^6 \text{ km}^2$  넓은 면적으로 기록되었다(그림 1-6, 1-7). 해빙은 일반적으로 북극해의 중앙해역과 같이 연중 덮여있는 해역과 계절적으로 결빙과 해빙(解氷)이 반복되는 대륙붕 같은 지역으로 나뉜다. 그러나 북극해의 대부분 지역은 일년생과 다년생 해빙으로 덮여있다. 일반적으로 중앙해역은 겨울철에 거의 97% 이상 결빙되고 여름철에는 약 85~95%가 결빙된다. 일반적으로 염분도가 비교적 낮은 표층수는 대륙붕해역에서 가을철인 10월 초부터 결빙되기 시작하고 해류를 따라 중앙해역으로 이동하면서 얼음 아래에서 점차 두꺼워지면서 1.5~2 m 두께의 일년생 얼음으로 결빙된다. 다년생은 겨울에 계속해서 수년간 성장하면서 두껍고 단단한 해빙으로 성장한다. 이들 얼음은 해류를 따라 이동하면서 다른 얼음과 부딪치면서 약 20~30m 두께의 불규칙한 언덕을 이루기도 한다. 또한 해빙의 두께도 지역과 시간(계절)에 따라 변하며 평균 두께는 약 3 m에 달하지만 최근 들어 급격히 얇아지고 있다(그림 1-9, 1-10, 1-11).

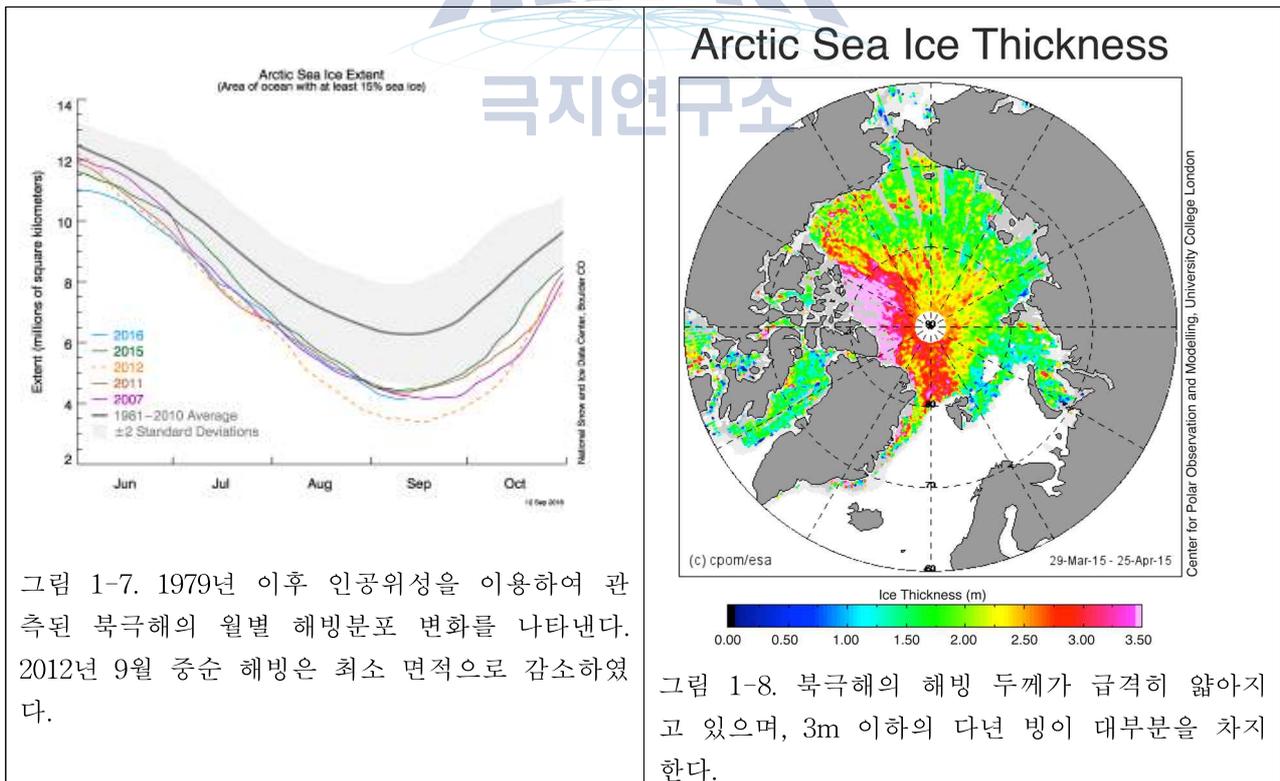


그림 1-7. 1979년 이후 인공위성을 이용하여 관측된 북극해의 월별 해빙분포 변화를 나타낸다. 2012년 9월 중순 해빙은 최소 면적으로 감소하였다.

그림 1-8. 북극해의 해빙 두께가 급격히 얇아지고 있으며, 3m 이하의 다년생 빙이 대부분을 차지한다.

바람과 해류의 영향으로 북극해 해빙은 거의 일정하게 움직인다. 대규모의 해빙 순환 시스템은 서북극해에서 평균 1~3 cm/sec 속도로 시계방향으로 순환하는 보퍼트 환류(BG,

Beaufort Gyre)와 시베리아 연안에서부터 북극점을 지나 프람해협(Fram Strait)을 통해 북대서양으로 빠져나가면서 해빙을 이동시키는 북극횡단해류(TPD, Transpolar Drift)로 되어있다. TPD에 의해 운반되는 해빙은 프람해협 쪽으로 향하면서 평균 5~20 cm/sec 속도로 증가한다(Thorndike, 1986; Gow and Tucker, 1987). 북극해 해빙의 총 20%가 매년 프람해협을 통해 북대서양으로 유출되며 이 중 대부분은 다년 빙이다. 북극해에서 유출된 해빙은 북대서양의 북부해역에서 녹기 때문에 해수에 비해 염분도가 매우 낮은 해빙이 녹으면서 이 해역에 저염수가 증가한다.

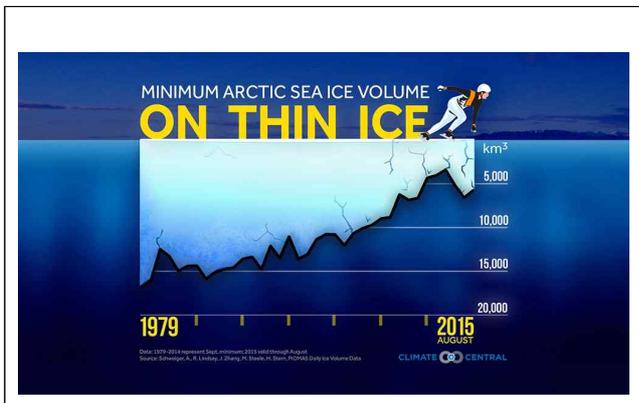


그림 1-9. 북극해 해빙의 두께는 지구온난화에 의해 얇아지고 있다.

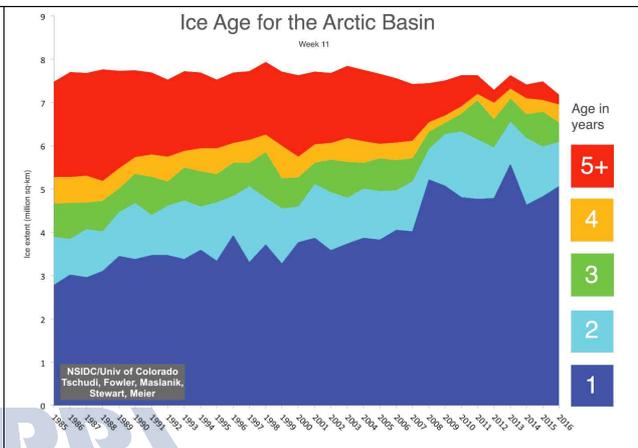


그림 1-10. 북극해에서 2008년 이후 2년 생 이상의 다년 빙이 급격히 감소하고 있다.

## 2. 최근 해빙변화 및 미래 예측

북극해 해빙분포의 역사적인 기록을 종합한 자료에 의하면 약 1900년부터 계절적으로 해빙이 감소하는 경향을 보여준다(그림 1-11a, b). 또한 지난 50여 년간 위성관측 자료에 의하면 계절이나 연간 해빙이 감소하는 속도가 빨라지는 것을 알 수 있다(Kinnard et al., 2008). 가장 신뢰할 수 있는 과거의 해빙관련 관측 자료는 1979년 이후 위성을 이용해 관측된 자료와 일치한다. 북극해에서 해빙 분포의 가장자리(sea-ice margin/edge)가 후퇴하는 패턴은 시기와 해역에 따라 다르지만, 전반적으로 해빙 가장자리가 후퇴하는 패턴은 십년 주기(decadal-scale) 변화보다 더 뚜렷하며, 이는 20세기 해빙분포와 해수의 관측자료 및 모델링 자료와 잘 일치한다(Steele et al., 2008). 그림 1-4와 1-11b에서와 같이 위성자료에 의하면 북극해 해빙은 전반적으로 감소하는 경향을 보이고 있으며 특히 9월 중순에 가장 많이 감소한다. 미국 콜로라도 Boulder에 위치한 미국국가설빙자료센터(U.S. National Snow and Ice Data Center)에 의하면, 지난 30년간 변화의 곡선에 의하면 매 10년 동안 약 11%의 해빙이 감소하고 있다. 1979년 위

성관측이 시작된 이후 2007년 9월  $4.28 \times 10^6 \text{ km}^2$ 로 급격히 해빙이 감소하였으며 2012년 9월 역대 최소 면적인  $3.43 \times 10^6 \text{ km}^2$ 로 감소하였다. 앞에서 언급한바와 같이 2016년에도 2007년과 비슷한 면적인 역대 2번째 면적인  $4.14 \times 10^6 \text{ km}^2$ 으로 감소하였다.

북극해 해빙이 감소하는 원인은 여러 가지로 추론되고 있다. 가장 큰 원인들 중 북극지역의 온난화(Rothrock and Zhang, 2005), 길어진 여름철 해빙시즌(Stroeve et al., 2006)과 북부의 고리모드(Northern Annular Mode)와 양극 이상(Dipole Anomaly)과 같은 대규모 스케일(large-scale)의 대기 패턴이 변화하는 단계(changing phase)의 영향(Wang et al., 2009)으로 추정하고 있다. 이러한 대기 강제력(atmospheric forcings)이 북극해의 다년빙을 프람해협을 통해 유출시키고 여름에 대부분이 쉽게 녹아버리는 일년생 해빙만 대부분 남게 하였으며(Maslanik et al., 2007a), 태양의 열 수송을 변화시켰고(Polyakov et al., 2005; Shimada et al., 2006), 최근 봄철에 증가하는 운량(cloud cover)이 표층으로 유입되는 장파 복사 플럭스(long-wave radiation flux)를 증가시킨다(Francis and Hunter et al., 2006). 실제로 위성자료와 부표자료(buoy data)에 의하면 오래되고 두꺼운 다년빙의 양이 뚜렷하게 감소하고 있는 것으로 나타났다(Maslanik et al., 2007b) (그림 1-8, 1-10). 실제로 1982년과 2007년 사이에 5년 이상의 다년 빙이 56 %정도 감소하였으며, 1987년 3월 평균 얼음두께가 2.6 m에서 2007년에 2 m로 감소하였다(Maslanik et al., 2007b).

Zhang & Walsh (2006)의 연구결과에 의하면 관측된 해빙분포 지역에 온실가스 강제력이 미치는 역할은 강력한 것으로 확인되었다. 현재의 지구온난화가 지속적으로 가속화 될 경우 북극해 여름철 해빙은 약 2040년경  $1 \times 10^6 \text{ km}^2$  이하의 면적으로 거의 녹아 사라지는 것으로 예측하고 있다(Arzel et al., 2006). 그러나 이들은 21세기 동안 겨울철 해빙은 20세기보다 얇아지겠지만 지속적으로 존재할 것으로 예측하였다.

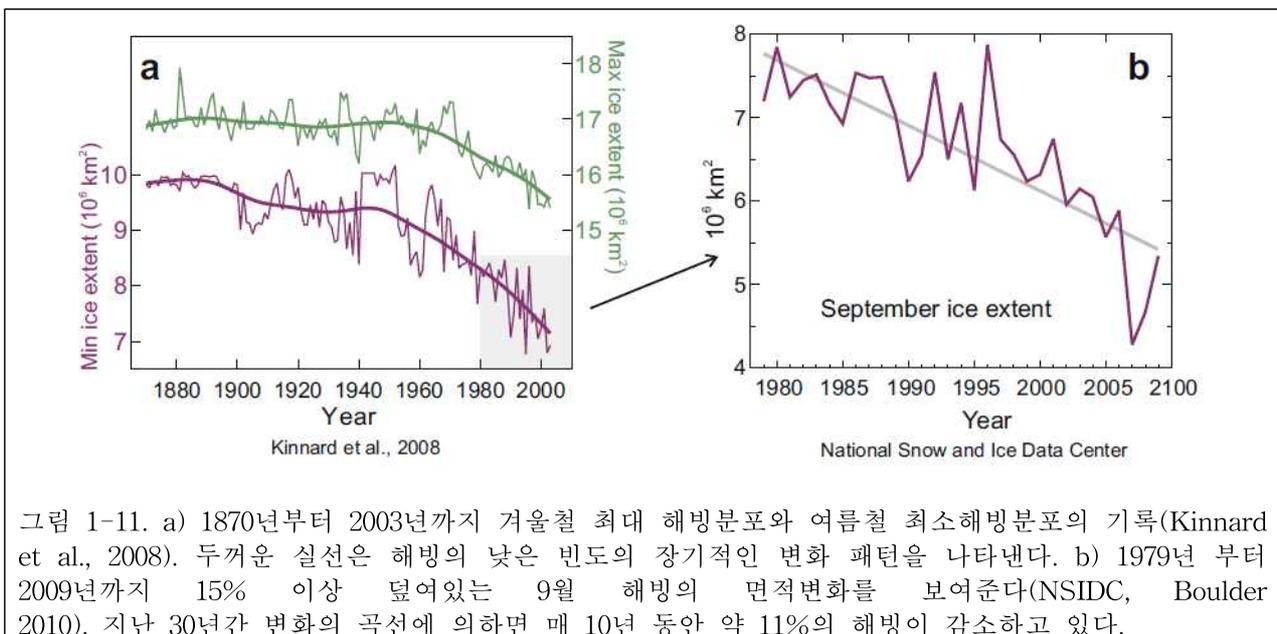


그림 1-11. a) 1870년부터 2003년까지 겨울철 최대 해빙분포와 여름철 최소해빙분포의 기록(Kinnard et al., 2008). 두꺼운 실선은 해빙의 낮은 빈도의 장기적인 변화 패턴을 나타낸다. b) 1979년 부터 2009년까지 15% 이상 덮여있는 9월 해빙의 면적변화를 보여준다(NSIDC, Boulder 2010). 지난 30년간 변화의 곡선에 의하면 매 10년 동안 약 11%의 해빙이 감소하고 있다.

### 3. 해빙감소가 기후 시스템에 미치는 영향

해빙작용과 관련되어 지표에 실제(net)로 유입되는 열(net surface heat flux)의 계절적 변화는 대기의 에너지 수송과 교환을 조절한다. 해빙에 신선한 눈이 덮여 있을 때 알베도(albedo)는 약 80% 정도이며 여름동안 해빙이 녹을 때는 약 50%로 감소하고 얼음위에 작은 연못이 있는 곳은 더욱 감소한다(Perovich et al., 2002). 이렇게 높은 반사율은 알베도가 10% 이하인 검푸른 대양 표층과 대비된다. 북극해빙의 높은 알베도와 넓은 면적은 해빙을 녹이고 대양의 현열(sensible heat) 양을 증가시키는 여름철에 태양 에너지와 관련된 북극의 대기를 냉각시키는 역할을 한다. 이렇게 냉각된 극지의 대기는 저위도로부터 극지 쪽으로 열 수송을 지속적으로 유지시켜 북극에 도달하도록 돕는 것이다. 가을과 겨울철에 극지에서는 태양으로부터 유입되는 태양복사열은 미미하거나 거의 없다. 그러나 표층으로부터 손실되는 에너지는 대기로 더해지면서 대기의 열이 극지로 향하면서 북극으로 수송에 요구되는 충족여건이 감소된다(Serreze et al., 2007b). 일련의 실험모델은 지역적 또는 대규모 스케일의 관점에서 북극해의 해빙의 감소에 따라 야기되는 대기 순환의 잠재적 변화를 다뤘었다. 여러 가지 모델은 대기 중의 이산화탄소 수치(CO<sub>2</sub> level)가 증가에 따른 북극 표층의 온난화가 지속적으로 증폭되는 것을 모의실험을 하였다(e.g., Manabe and Stouffer, 1980; Holland and Bitz, 2003). 이러한 북극의 증폭(Arctic amplification)을 야기시키는 여러 가지 프로세스 중에서 여러 가지 시그널 중에서 해빙의 감소와 표층 알베도의 변화에 의한 것으로 볼 수 있다. 해빙의 주변이 감소하면서 검푸르고 알베도가 낮은 대양은 태양 에너지를 쉽게 흡수하기 때문에 여름철 대양의 혼합 층에 태양 에너지가 증가하게 된다. 이러한 경우 가을에 시작되는 결빙도 늦춰지고 겨울도 역시 늦춰지기 때문에 대양에서 대기로 대규모의 열 수송이 일어나게 된다(Serreze et al., 2009). 그러나 북극 증폭의 규모는 기후모델에 따라 상당히 차이가 있다. 비교적 초기의 얇은 결빙을 적용한 모델은 높은 북극 증폭을 발휘한다(Holland and Bitz, 2003). 최근의 관측에 의하면 Serreze et al. (2009)에 의하면 증폭된 온난화 신호가 많은 기후 모델에서 예측된 것과 매우 유사하게 북극에 나타나고 있다.

기후 모델들은 북극해의 해빙(解氷)과 북대서양으로 유출되는 해빙(海氷)의 변화 대규모 스케일의 대양순환에 영향을 미칠 수 있다(Holland et al., 2001). 특히 북극해 해빙이 녹으면서 염분도가 낮은 해수가 대규모로 북극해를 빠져나가 북대서양으로 유입되면서 표층 수괴에 더해져 지속적으로 증가된다. 이렇게 되면서 대류순환이 약해지면서 북대서양 심층수(NADW) 형성이 감소하면서 대서양 역전순환 덩어리/셀(AMOC, Atlantic meridional overturning circulation cell)이 약화된다. 대서양 순환시스템이 약화되면서 기후에 지대한 영향을 미치는 결말에 이르게 된다(Clark et al., 2002). 1960년대 이후 북대서양에 유입되는 담수의 기원이 북극해인 것으로 알려져 있다(Peterson et al., 2006). 북극해에서 북대서양으로 유출되는 담수의

양은 21세기를 통해 증가될 것으로 예측되고 있다. 또한 해빙 유출의 감소는 북극권 빙하의 용빙이나 증가된 강수량 및 강에서 유입되는 증가된 액상의 담수의 유출에 의해 대부분 균형을 이룰 것이다. 그러나 대서양에서 일어나는 수괴 역전을 야기 시키는 담수의 힘(forcing)의 다양한 변화에 관한 실제적인 영향은 아직도 의문으로 남아 있다.

#### 4. 제 4기 북극해 빙하역사

제 4기 빙하기-간빙기 주기를 통하여 5 대양 중 북극해만큼 지형적으로나 환경적으로 극적인 변화의 경험을 겪지 않았다. 실제로 플라이스토세 빙하기 동안 북극 주변대륙에 거대한 빙상이 존재하였던 대규모의 증거들이 남아있다. 그러나 비교적 최근에 일어났던 빙하기록을 제외하고는 기하학(geometry)이나 연륜연대(chronology) 문제가 여전히 남아있다. 따라서 북극해와 주변 대륙에는 마지막 최대 빙하기(LGM)에 일어났던 빙하기록이 가장 잘 보존되어 남아 있다(그림 1-12). 후기 Weichselian 빙하기에서 LGM 때 북미에서 확장되던 로렌타이드 빙상(Laurentide ice sheet)과 이누이시안 빙상(Innuitian ice sheet)이 서로 합쳐지면서 거대한 대륙빙상으로 커지면서 북극해의 대륙붕까지 확장하였다(Dyke et al., 2002). 중기 플라이스토세 때 북부 유라시아 대륙에도 북미에 존재했던 대륙빙상과 비교되는 크기의 빙상이 바렌츠와 카라해의 대륙붕에 존재했었다. 또한 그 이후에도 여전히 비교적 대규모의 빙상이 존재했었다(Svendsen et al., 2004a, b). 대규모 빙하기 동안 북극해 주변의 약 2/3 이상이 빙상으로 대부분 함께 덮여있었지만, 북동 시베리아와 알래스카 대륙붕 지역은 해수면이 낮았던 빙하기에 대부분 노출되어 있었다. 북극해의 약 53%를 차지하는 북극해의 대륙붕은 빙하기 동안 빙하형성과 해수면 하강에 따른 복합적인 요인에 의해 전체 해양 면적의 50% 이하로 크기가 감소된 북극해의 수리적인 관점뿐 아니라 퇴적 및 생물 프로세스에 중대한 영향을 미쳤다.

환북극권에 형성된 거대한 규모의 빙하들은 북극해의 중앙분지로 대규모의 얼음이 쏟아져 들어가게 한다. 최근의 탐사를 통해 북극해 내에 존재하는 언덕이나 대지 등이 1000m 이상의 깊은 수심에 대규모의 빙하에 의해 해저에 영향을 미쳤던 사실이 발견되었다(Jakobsson et al., 2005, 2014, 2016; Darby et al., 2006; Niessen et al., 2013; Stein et al., 2016) (그림 1-14). 북극해 중앙해역을 가로지르는 로모노소프 해령은 바렌츠-카라 대륙붕에서 떨어져 나온 빙봉이나 수많은 거대한 빙산에 의해 침식된 것으로 추정하고 있다(Jakobsson et al., 1999; Polyak et al., 2001). 이와 반대로 알래스카 북부에 위치한 척치해 접경해역(Chukchi Borderland)은 로렌타이드 빙상에서 떨어져 나온 대규모의 기저빙하(grounded ice)에 의해 반복적으로 덮여있었다(Polyak et al., 2001; Jakobsson et al., 2005). 거대한 규모의 해저기반 빙상과 빙봉의 붕괴는 빙산과 용빙수 유입과 관련된 북극의 중요한 기후변화 사건을 유발시킨다(Darby et al., 2002,

2006). 마지막 최대 빙하기 이후 북극권에 확장되었던 빙하가 후퇴하던 약 18 ka BP부터 12 ka BP 동안 북극해로 대규모의 빙산이 유입된 여러 번의 뚜렷한 증거가 해저퇴적물에 기록되어 있다(Polyak et al., 1997; Darby et al., 2002; Knies et al., 2003). 북극해에 기록된 이러한 기후변화 사건은 북미의 빙하호수(proglacial lakes)로부터 맥킨지 강 유역(Mackinzie River drainage)을 통해 북극해로 유입되는 거대한 양의 용빙수가 동반된다(Lemmen et al., 1994). 또한 플라이스토세 전기의 해빙기와 최근에 일어난 해빙기 동안 빙하에 의해 댐과 같은 유라시아 강(glacially-dammed Eurasian rivers)이 붕괴되면서 대규모의 용빙수가 북극해로 유입되었다(Polyak et al., 2002; Stein et al., 2002; Mangerud et al., 2004). 이렇게 갑자기 대규모의 용빙수나 담수가 북극해에 유입되면서 북극해 중앙분지의 수괴와 표층 생산력에 커다란 영향을 미치며 마지막 최대 빙하기 이후 약 10 ka BP경부터 해수면이 상승하면서 대륙붕에 해침이 일어나면서 영향을 미친다.

북극해 빙하역사의 기록을 살펴보면 대륙붕에서 해저에 기반을 두고 존재했던 빙상의 성장과 쇠퇴(build-up and decay of marine-based ice sheets on the continental shelves), 빙붕의 발달과 붕괴(development and disintegration of ice shelves), 해양순환 체제의 급격한 변화 및 결빙 등을 포함한다(Jakobsson et al., 2014). 북극해와 그 주변의 고위도 대륙에서 빙하기 동안 일어난 빙하의 증거들이 발견되어 인지되기 시작한 것은 약 100년 전의 일이었지만, 야외현장에서 관측된 증거나 자료가 불충분하였기 때문에 북극해에서 빙하기-간빙기 기후변화에 관련된 논란의 여지가 많은 여러 가지의 가상적인 이론이 제기되었다(e.g., Hughes et al., 1977). 1988년부터 1994년까지 유럽과학재단(ESF)의 지원으로 수행된 'PONAM' (The Late Cenozoic Evolution of the Polar North Atlantic Margins (Elverhoi et al., 1988a))와 'QUEEN' (the Quaternary Environment of the Eurasian North, 1996-2002 (Thiede et al., 2004)) 유럽 국제 공동연구프로그램 후속으로 '북극 고기후 및 극한(APEX, Arctic Paleoclimate and its Extremes)' 프로그램이 2007년부터 새롭게 시작되었다. APEX 프로그램을 통해 북극해 탐사를 위한 다양한 캠페인이 추진되었다(Jakobsson et al., 2010a). 이를 통해 북극해 중앙해역을 둘러싸고 있는 대륙붕에 대규모의 빙상이 존재했던 사실이 밝혀지고 어떻게 빙상이 빙붕으로 합쳐지면서 중앙분지의 해역을 덮게 되었는지 알려졌다. Jakobsson et al. (2014)은 최근의 북극해 탐사연구를 통해 북극해 빙하역사에 관한 전반적으로 자세히 기술하였다.

특히 거대한 해저기반 빙하나 대륙빙상에서 떨어져 나온 거대한 빙산은 대륙붕 해역뿐 아니라 해류를 따라 중앙해역으로 이동하면서 해저에 흔적을 남겨놓는다. 최근 동시베리아 대륙붕해역이나 수심 1 km 깊이 로모노소프 및 멘델레프 해령의 해저에서 거대한 빙산이나 빙하가 이동하면서 남겨놓은 깊게 파놓은 기록이 해저지형탐사를 통해 확인되었다(Niessen et al., 2013; Jakobsson et al., 2016; Stein et al., 2016). Jakobsson et al.(2016)은 빙하기의 지형조사 자료와 퇴적물 코어 자료를 통해 빙하기인 MIS(marine isotope stage) 6 시기(190~130 ka

BP) 중 가장 빙하가 최대 확장되었던 약 140 ka 전에 대부분의 북극해가 1km 이상의 두꺼운 빙붕으로 덮여 있었다고 제안하였다. 이렇게 해저에 기록된 흔적을 통해 과거 오래된 빙하기뿐만 아니라 최근의 빙하기에도 거대 빙하나 빙산뿐 아니라 대륙붕에 대규모의 빙붕(ice shelves)이 북극해의 중앙해역에 존재한 것으로 추정하고 있다(Polyak et al., 2007; Jakobsson et al., 2016). 따라서 북극해 주변의 대륙붕뿐 아니라 북극해에 발달하고 있는 대규모 해령 및 중앙해역에서 획득된 퇴적물 코어에 남겨진 흔적을 통해 빙하기-간빙기 기후변화동안 일어난 빙하역사를 보다 정확하게 복원할 수 있다. 이를 위해 오래 전에 북극해에서 일어난 빙하역사보다는 마지막 최대 빙하기를 포함한 후기 제 4기 빙하활동과 그에 의한 북극해에서 일어난 고해양환경변화뿐 아니라 전 지구적으로 미친 기후변화를 복원하는 연구목표가 대부분 맞춰져 있다. 따라서 북극해에서 멀티빔을 이용한 해저지형탐사자료와 함께 chirp이나 SBP 천부지층 탐사자료 그리고 시추 코어퇴적물을 이용하여 과거 제 4기 빙하기에 존재했던 빙상의 규모, 빙하가 흐른 빙하류(ice streams), 빙붕(ice shelves) 및 이에 관련되어 북극해에서 일어났던 해양학적인 변화 등에 관해 규명하고자 하는 탐사연구가 활발하게 추진되고 있다(e.g., Jakobsson et al., 2014).

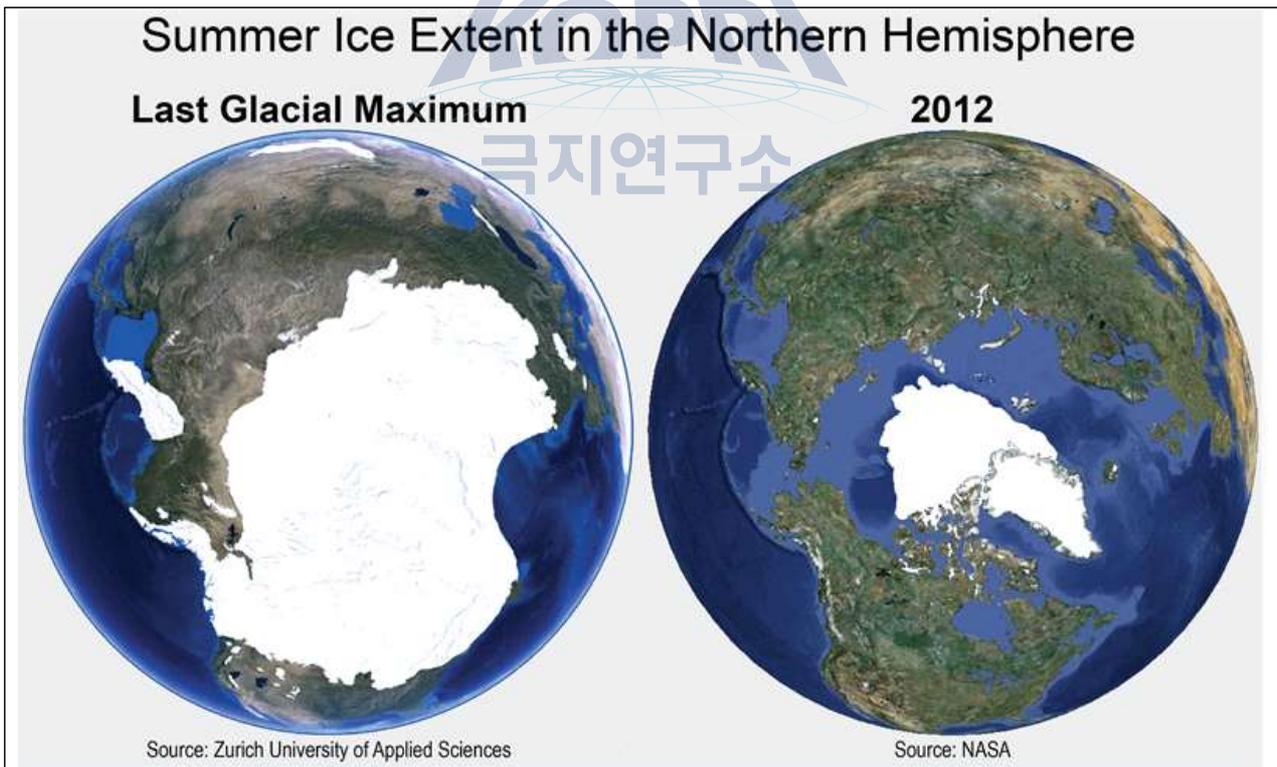


그림 1-12. 마지막 최대 빙하기 여름철에 북반구 고위도 지역에 덮여있던 대규모의 대륙빙상과 2012년 여름철 북극해 해빙이 최소면적으로 줄어들었다(2017.02.06., <http://sites.gsu.edu/geog1112/global-surface-temperature/>).

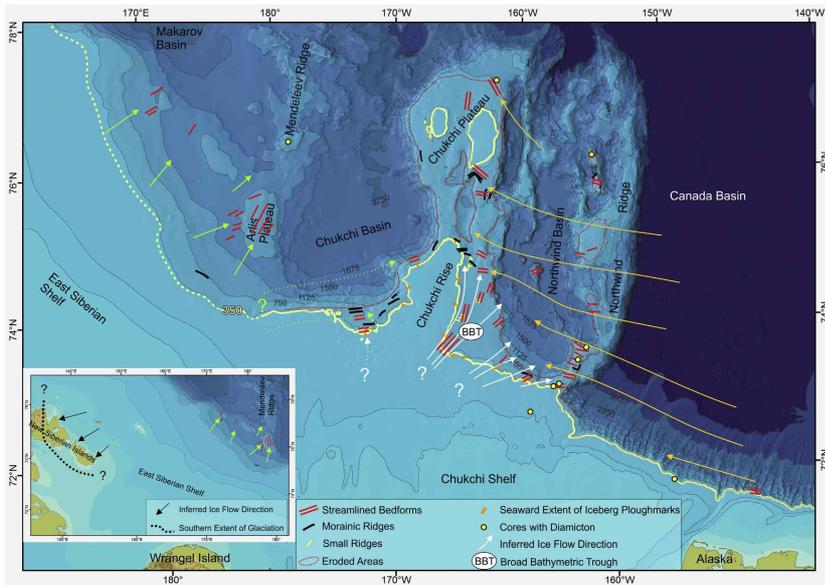


그림 1-13. 척치해와 동시베리아에서 해저지형탐사를 통해 관찰된 과거 빙하 활동의 증거가 발견되었다(Jakobsson et al., 2008b, 2014; Niessen et al., 2013; Dove et al., 2014).

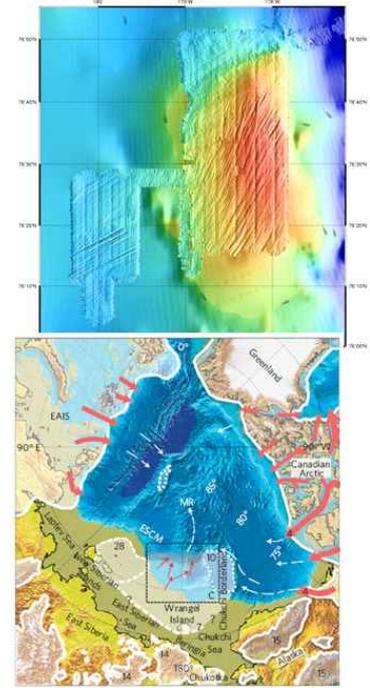


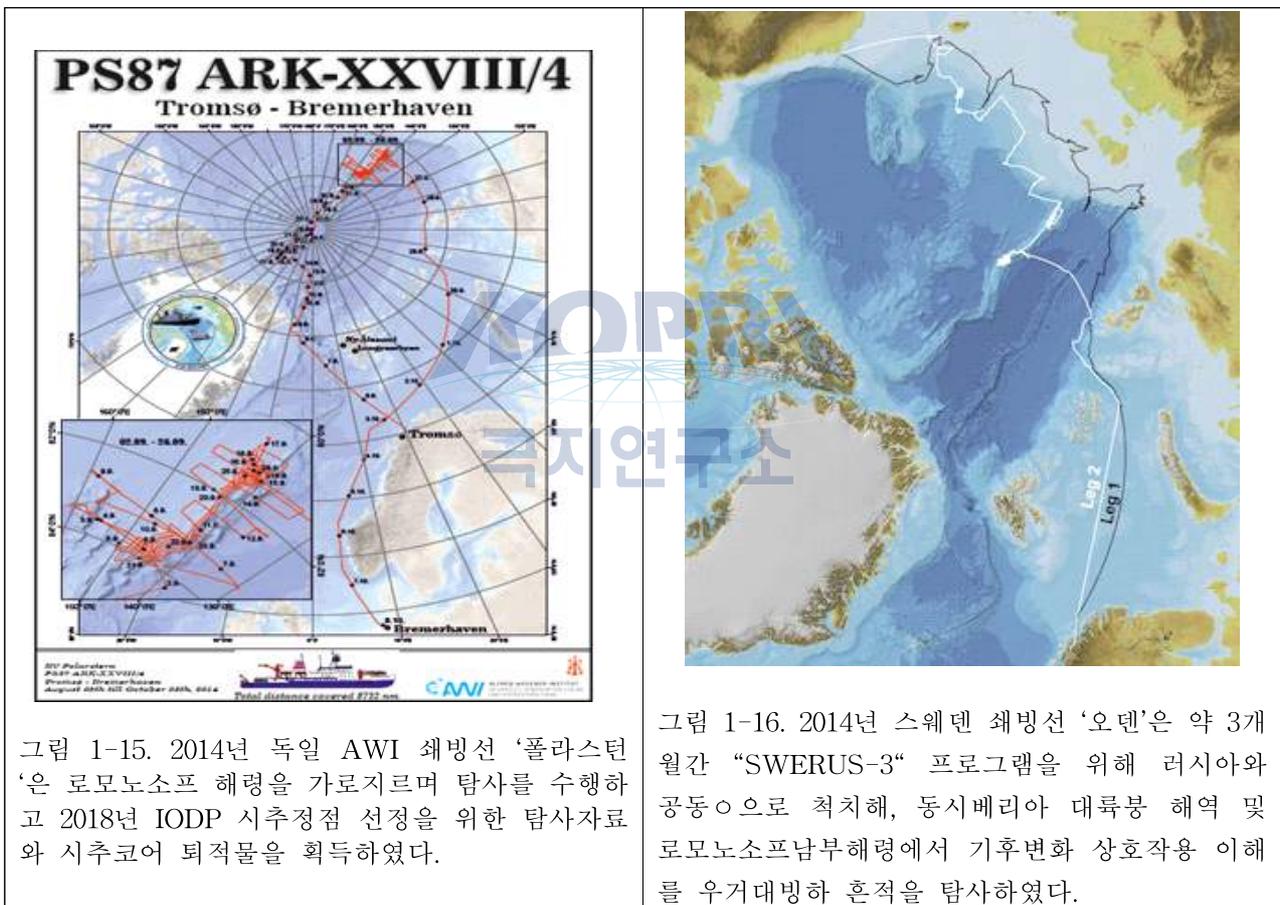
그림 1-14. Niessen et al. (2013)은 동시베리아 대륙붕 해역에 위치한 엘리스대지에서 후기 제 4기 빙하기에 존재했던 거대 빙하의 흔적을 발견하였다.

## 4절 연구개발의 목적 및 필요성

21세기 들어 지구온난화가 가속화 되면서 여름철의 북극해 해빙이 급격하고 빠르게 감소하고 있다. 지난 10년(2007-2016) 동안 1979년 인공위성을 이용해 북극해 해빙을 관측한 이후 여름철(9월 중순) 해빙이 가장 넓은 면적으로 감소하였다. 특히 수심이 낮고 협소한 베링해협을 통해 염분도가 상대적으로 낮고 영양염류가 풍부한 북태평양의 표층해류가 유입되는 서북극해는 여름철 해빙이 가장 빠르고 광범위하게 감소한다. 지난 20세기에는 대부분의 서북극 해역은 두꺼운 다년빙으로 덮여있거나 캐나다분지를 시계방향으로 순환하고 있는 보퍼트환류(Beaufort Gyre)에 의해 이동되는 대규모의 다년빙 유빙에 의해 쇄빙선의 접근이 쉽게 허락되지 않았다. 따라서 쇄빙선을 이용한 탐사가 매우 제한적으로 이루어졌다. 서북극해와 연결된 북태평양 연안국(PAG)인 미국과 중국 및 독일과 스웨덴 국가들은 자국의 쇄빙선을 이용하여 해빙이 녹아 탐사가 가능해진 해역에서 해저지질탐사를 수행하고 있다. 특히 지난 2014년 독일 AWI는 로모노소프 해령을 따라 그린란드 북부에서부터 러시아 대륙붕해역의 EEZ 밖까지 ‘폴라스틴’ 탐사를 추진하여 해저지형자료와 천부지층 및 심부지층탄성과 탐사자료를 획득하였다(그림 1-15). 탐사 기간동안 해저지형 및 천부지층자료를 바탕으로 제 4기 빙하기-간빙기 동안 북극해 주변 대륙과 대륙붕에 존재한 것으로 알려진 대륙빙하와 해저기저빙하 흔적 등 빙하역사의 기록을 복원하고자 다량의 시추코어 퇴적물을 획득하였다. 특히 러시아 대륙붕해역에 인접한 로모노소프 해령에서 2018년 국제공동해저시추프로그램(IODP)에서 추진 될 예정인 시추정점을 선정하기 위한 탐사자료를 확보하는데 또 다른 목적이 있었다. 또한 같은 시기에 스웨덴, 미국 및 러시아 과학자들은 쇄빙선 ‘오덴’을 이용하여 척치해, 동시베리아 및 랍테프 해 대륙붕해역에서 녹고 있는 빙권(thawing cryosphere), 탄소시스템(carbon system)과 기후시스템(climate system)의 상호작용을 연구하고자 약 100일 동안 탐사를 수행하였다(그림 1-16).

극지연구소는 2010년 ‘아라온’의 첫 서북극해 시험항해를 마치고, 2011년 7월 본격적인 해저지질탐사를 시작하였다. K-Polar 사업의 일환으로 2011년 3월부터 2013년 12월까지 추진 한 서북극해 탐사를 통해 척치해 주변해역과, 멘델레프 해령 남부해역을 포함한 동시베리아 대륙붕해역 및 북부 알래스카 대륙붕과 캐나다 북부의 보퍼트 해역에서 멀티빔을 이용한 해저지형자료 및 천부탄성과탐사자료 등을 획득하였다. 특히 서북극해 탐사에 필요한 초기의 기초자료를 획득하기 위하여 독일 AWI측의 도움을 통해 기존에 ‘폴라스틴’ 획득한 탐사자료를 이용하였다. AWI가 제공한 ‘Parasound’ 천부지층탐사자료를 이용하여 추가적인 탐사라인을 선정하고 서북극해에서 후기 제 4기 빙하기기록을 추적하고 빙하기-간빙기 동안 일어난 기후변화와 해양환경변화 복원에 필요한 시추정점을 선정하여 박스와 멀티 코어를 이용하여 표층 퇴적물을 획득한 동시에 중력 코어를 이용하여 최대 6 m 길이의 빙·해양퇴적물 코어를 획득하는데 주력하였다. 약 3년에 걸친 ‘아라온’호를 이용한 서북극해 해저지질탐사는 우리나라가 북극해에서

독자적으로 탐사를 추진하여 결빙해역에서 최초로 탐사자료를 획득하는 기술을 습득하는 계기가 되었다. 3년 연속 ‘아라온’호 탐사를 수행하면서 북극해에서 빙하역사를 포함한 과거의 기후변화를 연구하는데 필요한 탐사자료와 시추코어 퇴적물을 획득하였다. 특히 2012년에는 동시베리아 대륙붕 해역에 위치한 엘리스 대지(Arlis Palteau)에서 후기 제 4기 빙하기에 존재하는 것으로 추정되는 거대빙상의 흔적을 세계 최초로 발견하여 독일 AWI와 공동으로 2013년 10월 ‘Nature Geoscience’에 게재한 바 있다(그림 1-14). 그러나 동시베리아 대륙붕에 거대 빙하가 존재했다는 새로운 발견에도 불구하고 제한된 해저지형 및 천부지층 탐사자료 그리고 빙하 존재가 할 당시 퇴적된 퇴적물 코어가 충분히 확보되지 않아 그 연대를 정확히 밝힐 수 없었다(Niessen et al., 2013).



따라서 본 사업에서는 지난 2011년부터 2013년까지 획득한 해저지형 및 천부지층탐사자료를 이용하여 서북극해에서 빙하기에 존재한 것으로 추정되는 빙하활동의 증거를 확보하고 해석하여 보다 정확한 서북극해 빙하역사를 복원하고자 하였다. 또한 2015년 ‘아라온’호 탐사를 통해 보다 정확한 빙하흔적이 퇴적된 퇴적층을 시추하고자 기존의 탐사자료를 분석하여 4개의 정점을 선정하였다. 선정된 4개의 정점에서 ‘아라온’호에 탑재된 점보 시스템 롱코어러(JPC)를 이용하여 기존에 시추하지 못한 10 m 이상의 빙·해양퇴적물을 시추하여 보다 정확한 층서를

정립하고 제 4기 중기/후기 빙하기에 일어난 빙하활동 증거를 복원하고 빙하기-간빙기에 서북극해에서 일어난 고기후·고해양환경변화를 정밀하게 복원하고자 하였다. 또한 본 사업을 통하여 2014년 독일 AWI ‘폴라스턴’에 승선하여 로모노소프 해령탐사에 참여하여 북극해 중앙결빙해역에서 거대 빙하흔적을 파악할 수 있는 자료를 공동으로 획득하고 다량의 시추코어 퇴적물을 획득하였다. 2014년부터 2016년까지 3년 동안 ‘아라온’호를 이용하여 서북극해에서 수행한 탐사와 시추코어 퇴적물을 이용한 ‘후기 제 4기 서북극권 고해양환경복원연구’의 최종 목표와 연차별 수행된 목표 및 내용은 다음과 같다.

**본 연구사업의 최종 목표는 다음과 같다 :**

- 2014년 독일 ‘폴라스턴’ 북극 중앙 결빙해역 및 로모노소프 해령 중단 국제공동탐사 참여 및 2015 ‘아라온’ 서북극해 탐사를 통한 ‘JPC’ 시추코어 퇴적물 최초 획득
- 서북극해 후기 제 4기 빙하기 및 고해상의 고기후/고해양환경변화 정밀복원
- 서북극해 대륙주변부 국제공동해저시추프로그램(IODP) 시추제안서 공동제출

**2014년 연구목표 :**

- 북부 그린란드의 링컨해(Lincoln Sea)에서 북극점을 지나 러시아 대륙붕해역까지 북극해를 가로지르는 로모노소프 해령을 포함한 북극해 중앙결빙해역의 독일 AWI 쇄빙선 ‘폴라스턴’ 국제공동탐사 참여 및 시추코어 퇴적물 획득
- 척치 주변해-북부 알래스카 대륙붕 해역의 대규모 빙상 기록 및 규모 파악을 통한 후기 제 4기 서북극해 빙하역사복원
- 척치해 주변에서 온난한 시기(마지막 최대 간빙기와/홀로세)와 빙하기의 기후변화 기록을 정밀복원(예, 북극진동 패턴 등)

**2015 연구목표 :**

- 서북극 척치 Borderland/동시베리아 주변해역 해저지질 국제공동(한-독-일-미-프)탐사 「아라온」에 장착된 JPC(Jumbo Piston Corer) 이용 롱코어(>10 m) 퇴적물 코어 획득
- 서북극해 후기 제 4기 빙하기-간빙기 기후변화 기록 정밀 복원
  - 후기 제 4기 서북극해 빙하활동기록 연대 복원
  - 후기 제4기 정밀층서정립(기존 퇴적층서 자료 대비, MSCL, XRF 코어 스캐닝 분석, 고지자기 정밀자료 활용)
- 서북극해 및 로모노소프 해령 해역 고해양/고기후변화 복원 적용 프록시 공동개발
  - 로모노소프 횡단 표층 퇴적층 자료 분석
  - 후기 제 4기 및 신제 3기 고기 퇴적층 유기질 미화석 자료 분석

- 기후변화 적응 프록시 개발(생체지표, Bulk/점토 광물, 유기물 동위원소 등)
- 기후변화상관 미생물군집 분석 및 박테리아/진균 분리 등 대사체 연구
  - 서북극해 퇴적물 미생물 분리, 군집분석연구
  - 서북극해 퇴적물에서 박테리아/진균분리 및 신종 대사체 추출

**2016 연구목표 :**

- JPC 코어 퇴적물에 기록된 중기/후기 제4기 서북극해 빙하기·간빙기빙하 기록 복원
- 서북극 척치 주변해 홀로세 해빙분포 기록 및 육상기후변화 복원
  - 퇴적물 미생물 분리, 군집분석연구
  - 스발바르 피오르드 국제공동해저시추 제안서 공동작성



## 제 2 장 국내외 기술개발 현황

### 1절 서북극해 국내·외 탐사연구 현황

21세기 들어 서북극해의 해빙이 급격히 감소하면서 지난 10여 년간 가장 주목할 만한 탐사는 2005년 여름 미국과 스웨덴의 쇄빙연구선인 R.V. Healy와 R.V. Oden이 베링해협에서부터 북극점의 북극해 중앙을 가로질러 동쪽의 프람해협까지 공동으로 해양지구물리·지질탐사를 수행한 것이 HOTRAX(Helay-Oden Trans-Arctic Expedition) 북극해 횡단(서-동) 탐사다(그림 2-1). HOTRAX 서-동 횡단 북극해 탐사는 1994년 USCGC Polar Sea와 CCGS Louis S. St. Laurent의 북극해 공동탐사에 이은 2번째 탐사였다. HOTRAX 서-동 북극해 횡단 탐사의 목적은: 1) 시추퇴적물을 이용한 고기후변화연구; 2) 해양퇴적물의 물성을 이용한 해빙변화와 기원지 및 두께 및 해빙에 의해 운반된 퇴적물의 기원규명; 3) 지구물리 탐사자료를 이용한 심해분지의 구조와 층서규명; 4) 중앙 북극해를 가로질러 심층수와 중층수의 물리, 화학적인 특성을 밝히는 것이었다.

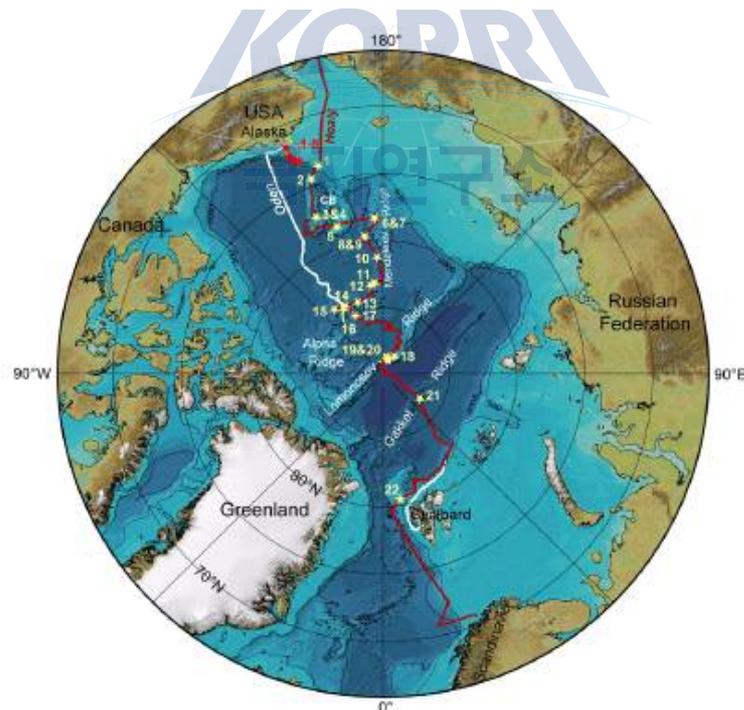


그림 2-1. 2005년 미국 쇄빙선 'R.V. Healy'와 스웨덴 쇄빙선 'R.V. Oden'이 공동으로 서-동 북극해를 횡단한 HOTRAX 탐사라인(붉은 색선)과 시추정점(노란색별표) (Darby et al., 2009).

또한 독일 극지해양연구소(AWI)는 2008년 8월 12일부터 10월 중순까지 약 70일간 독일, 러시아, 한국 등 8개국의 과학자들을 초청하여 자국 쇄빙선인 'R.V. Polarstern'을 이용하여 최초로 서북극해에 대한 해양지구물리·해양지질, 해양물리, 해양화학 및 생물 등 종합해양탐사를

수행하였다. 2008년 당시 23년째 수행한 독일 북극탐사역사 중 최초로 서북극해역인 '캐나다 분지-척치해-멘델레프 해령-마카로프 분지'까지 탐사를 수행하였다. 특히 서북극해 주변 해역에서 해저지형탐사자료와 천부와 심부지구물리탐사자료를 획득한 동시에 총 20여 정점에서 새로운 시추코어퇴적물을 획득하였다. 특히 'R.V. Polarstern'은 쇄빙연구선 최초로 북서항로와 북동항로를 통과하면서 서북극해 탐사를 성공적으로 수행하고 약 20,000 km를 항해하는 역사적인 기록을 세웠다(그림 2-2a, b).

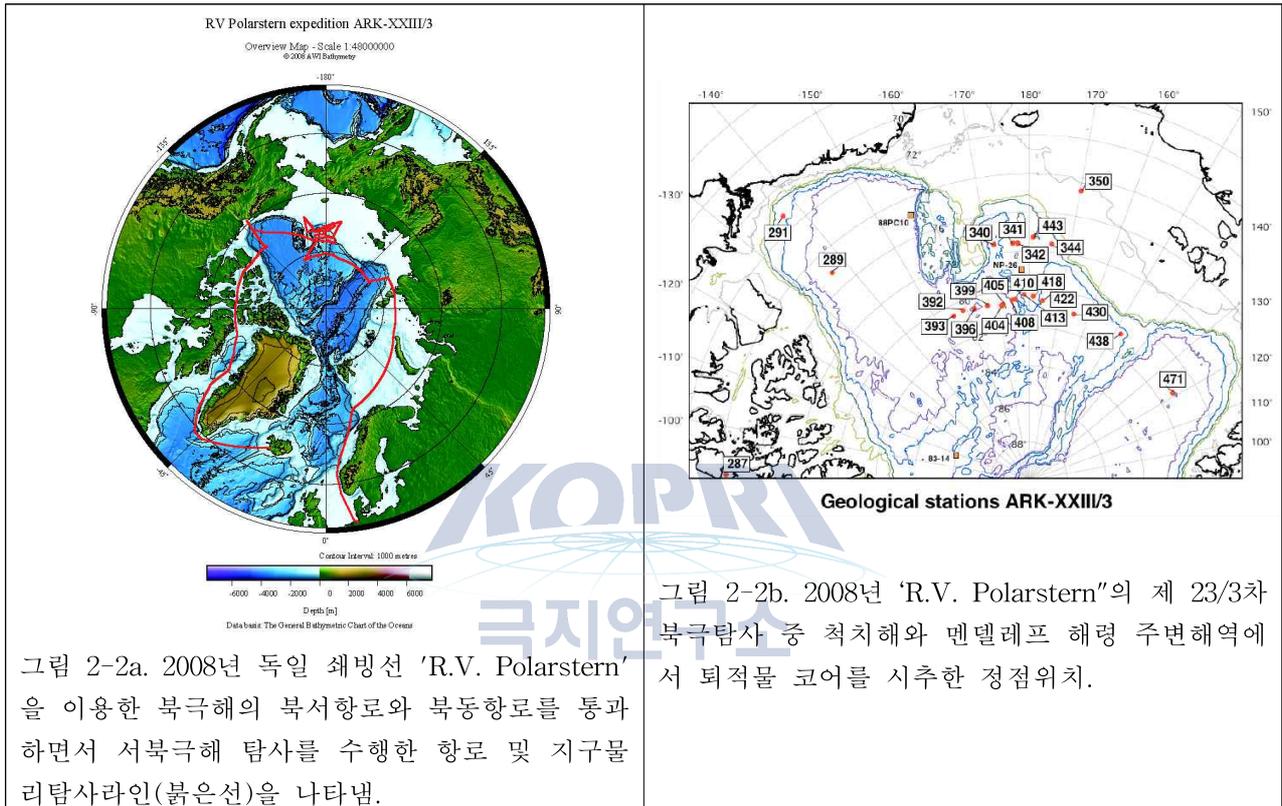


그림 2-2a. 2008년 독일 쇄빙선 'R.V. Polarstern'을 이용한 북극해의 북서항로와 북동항로를 통과하면서 서북극해 탐사를 수행한 항로 및 지구물리탐사라인(붉은선)을 나타냄.

그림 2-2b. 2008년 'R.V. Polarstern'의 제 23/3차 북극탐사 중 척치해와 멘델레프 해령 주변해역에서 퇴적물 코어를 시추한 정점위치.

제 23/3차 'R.V. Polarstern'의 북극해 탐사동안 시추 위치는 침식과 퇴적물의 퇴적 지역을 피하기 위해 구체적인 Hydrosweep 지형지도제작과 해저지형탐사 시스템을 이용하여 선정하였다. 퇴적물 시추는 박스형 시추코어(Kastenlot, KAL), 중력코어(SL), 거대박스코어(GKG), 멀티코어(MUC)를 이용하여 수행하였다. 제 23/3차 'R.V. Polarstern' 탐사를 수행하는 동안 취득한 시추코어 자료를 이용하여 제 4기 서북극해에서 획득한 새로운 퇴적물 코어를 이용하여 층서정립을 통해 빙하역사와 고해양환경 복원연구에 주요 목표에 중점을 두어 추진하는데 목적이 있었다(Jokat, 2009). 또한 심부지구물리탐사자료와 시추코어에서 획득한 기후변화 다중 프록시를 이용하여 향후 멘델레프 해령 주변해역에서 후기 중생대 온실시대 이후 북극해 지구조 진화와 고해양환경 진화를 규명하기 위한 국제공동해저지각시추(IODP)를 수행하기 위한 시추제안서 작성을 추진할 계획이다.

제 1장 4절에서도 언급한 것처럼 2014년 독일 AWI는 제 28/4차 북극 중앙결빙해역 국제공

동탐사를 추진하였다. 탐사의 주된 목적은 2008년도 서북극해 탐사와 유사하며, 1) 후기 제 4기 고해상의 고기후, 고해양순환, 고생산력 및 해빙분포 변화를 복원하며, 2) 중생대와 제 3기 북극해의 장기적인 기후변화역사와 특히 따뜻했던 온실하우스(greenhouse)에서 해빙으로 덮인 결빙하우스(icehouse)로 변한 북극해 환경변화진화 역사를 복원하는데 있었다. 이러한 탐사 목적을 위하여 그린란드 북부 대륙붕해역부터 북극점을 지나 러시아 대륙붕까지 뻗어있는 북극 중앙결빙해역인 로모노소프 해령을 탐사하여 해저지형, 천부지층 및 심부지층탐사자료를 획득하고 다량의 퇴적물 코어를 시추하였다(그림 2-3, 2-4). 특히 러시아 대륙붕에 인접된 로모노소프 해령에서 해저지형 및 천부/심부 탄성과 탐사를 집중적으로 수행하여 거대한 빙산 또는 대륙붕에서 떨어져 나온 빙봉에 의해 침식된 것으로 추정되는 고기퇴적층이 1000m 깊이의 해저에서 발견되었다(Stein et al., 2016) (그림 2-5). 2016년 ‘Nature Communications’에 발표된 논문은 고기 퇴적층은 마이오세 층으로 밝혀졌으며 IP<sub>25</sub>를 이용하여 봄철에는 북극해가 대부분 해빙으로 덮여있었던 반면, 알케논 분석을 통해 여름철에는 표층 수온이 4℃ 이상으로 대부분 해역이 얼음으로 덮여있지 않았던 것으로 해석하였다(Stein et al., 2016) (그림 2-6).

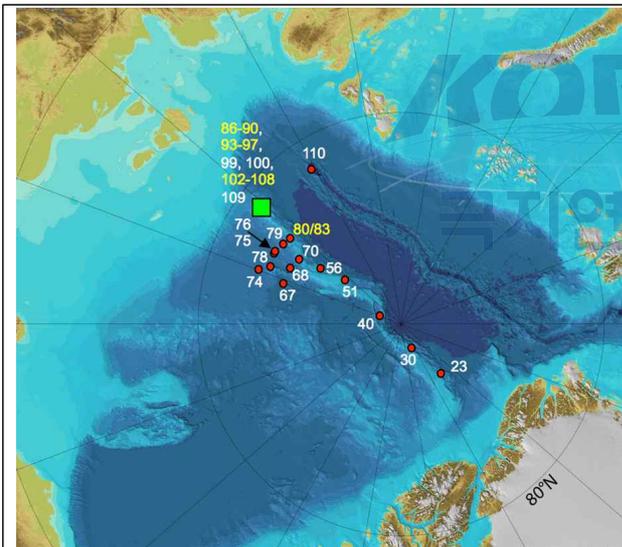


그림 2-3. 2014 ‘폴라스텐’ 제 24/4차 북극 중앙해역 로모노소프 해령 횡단 탐사에서 시추된 시추점으로 러시아 대륙붕 해역에 인접한 로모노소프 해령의 탐사지역(녹색)은 2018 IODP 시추지역으로 정밀탐사 및 다량의 시추코어를 획득하였다(Stein et al., 2016).

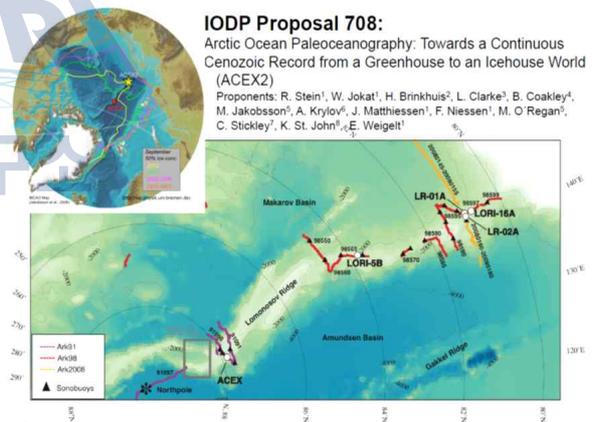


그림 2-4. 2018년 8월 하순부터 10월 초까지 약 6주간 러시아 대륙붕에 인접한 로모노소프 해령에서 “Arctic Ocean Paleooceanography: Towards a continuous Cenozoic record from a greenhouse to an icehouse world (ACEX 2)” 주제로 IODP 심부시추가 추진 될 예정이다.

2014년 ‘폴라스텐’이 로모노소프 해령을 탐사하고 있던 시기에 스웨덴 스톡홀름대학의 마틴 야콥슨(Martin Jakobsson) 교수팀은 미국, 러시아 과학자들과 함께 자국의 쇠빙선 ‘오덴(RV Oden)’을 이끌고 북부 알래스카 배로우를 출발하여 서북극의 척치해-동시베리아해-랍테프 해

대륙붕 해역 탐사를 추진하였다(그림 4). 스웨덴-러시아-미국 3개국이 수행하는 탐사프로그램 “SWERUS-C3(Cryosphere, Carbon, Climate)”의 주요 탐사해역은 ‘빙권-탄소-기후’ 시스템이 상호작용하는 동시베리아 대륙붕해역으로 지구온난화에 의한 기후변화가 가장 빠르게 일어나는 해역으로서 방대한 양의 탄소가 저장된 취약한 곳으로 현재와 과거에 일어난 C3 프로세스를 연구하는데 목적이 있다. 전 세계 동토에 저장된 약 80 %의 탄소와 메탄이 이 해역의 대륙붕과 대륙사면 퇴적층과 예도마(Yedoma) 연안 동토층에 저장되어 있는 곳이지만 매우 제한적으로 탐사조사가 수행되었다(그림 2-7, 2-8). 특히 이 거대한 탄소 저장고가 기후변화에 의해 해리되어 이동 되어 온실기체로 대기 중으로 방출될 수 있는 잠재적인 위험이 내포된 해역이다. 특히“SWERUS-C3” 프로그램의 연구목적 중 본 사업과 같이 북극해의 기후변화에 관련된 내용 중 하나는 “북극해 해빙 역사와 탄소 플럭스에 미친 영향”으로 “빙하기 이후 연중 해빙으로 북극해가 덮여 있었는지 ?, 반대로 과거 여름철에 해빙으로 덮여있지 않았었는지?” 밝히는 것이다.

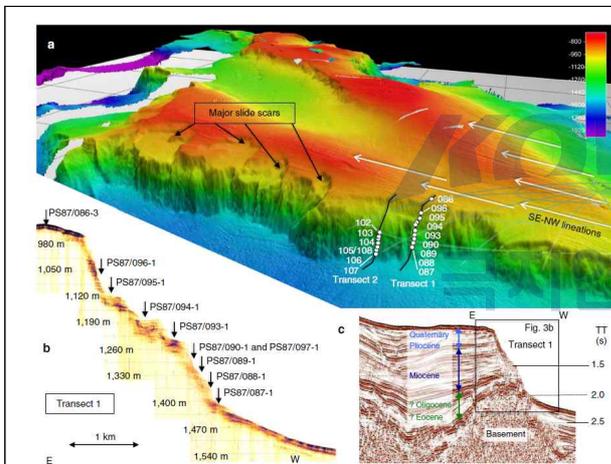


그림 2-5. 2014년 제 28/4차 ‘폴라스턴’ 북극탐사 동안 러시아 대륙붕에 인접한 로모노소프 해령에서 발견된 거대 빙하작용에 의해 생성된 빙하흔적 및 사면 사태 침식 자료, 제 3기 퇴적층의 심부탄성파탐사자료 및 침식된 사면에서 획득된 고기퇴적층의 시추정점 위치(Stein et al., 2016).

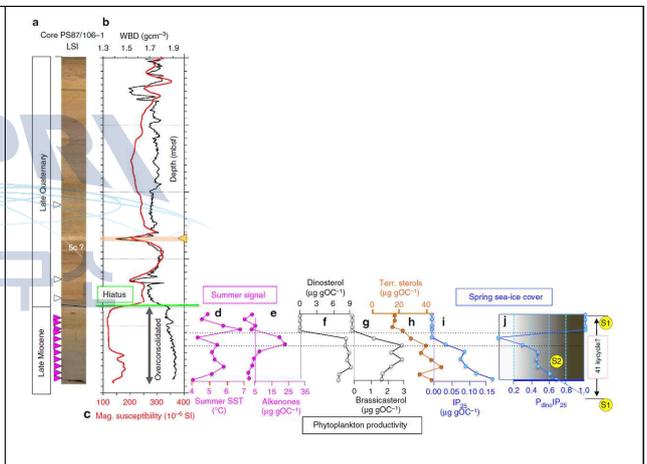


그림 2-6. 2014년 제 28/4차 ‘폴라스턴’ 북극탐사 동안 러시아 대륙붕에 인접한 로모노소프 해령에서 시추된 후기 마이오세 고기 퇴적층에서 유기생체 지화학분석을 통해 획득한 자료를 이용해 후기 마이오세의 여름철에 북극해 해빙이 얼지 않았다는 연구결과가 Nature Communications에 처음으로 보고되었음(Stein et al., 2016).

우리나라의 북극해 연구는 ‘R.V. Araon’을 2009년 11월 8일 극지연구소에 인도되면서 본격적으로 시작되었다. 2010년 7월 16일부터 8월 14일까지 약 1개월 동안 「아라온」의 첫 서북극해의 독자적인 시험항해를 수행하였으며 쇄빙 능력시험 및 ‘아라온’에 장착된 일부 탐사·분석장비를 활용하여 북극해에서 처음으로 시료를 채취하고 그 성능을 테스트 하였다(그림 2-8). 시험항해 이후 2011년부터 2013년까지 극지연구소의 “K-Polar” 연구 사업을 통해 서북극 ‘척치해-동시베리아-북부 알래스카 대륙붕-캐나다 북극 보퍼트대륙붕 해역’에서 탐사를 통해 빙하

의 흔적이 남아있는 해저지형자료와 천부해저지층자료 및 최대 6 m 이내의 시추코어 퇴적물을 획득하였다. '아라온'을 활용한 "K-Polar" 프로그램으로 수행된 서북극해 탐사를 통해 일부 결빙해역을 포함한 EEZ 밖의 대륙붕과 대륙사면을 비롯한 2,000 m 이상의 심해분지에서 탐사 자료를 획득하고 중력코어러를 이용한 퇴적물 시추를 성공적으로 수행하여 우리나라가 독자적으로 북극해를 탐사할 수 있는 탐사기술과 노하우를 습득하고 축적하여 북극 해저지질탐사연구 기반을 구축하였다.

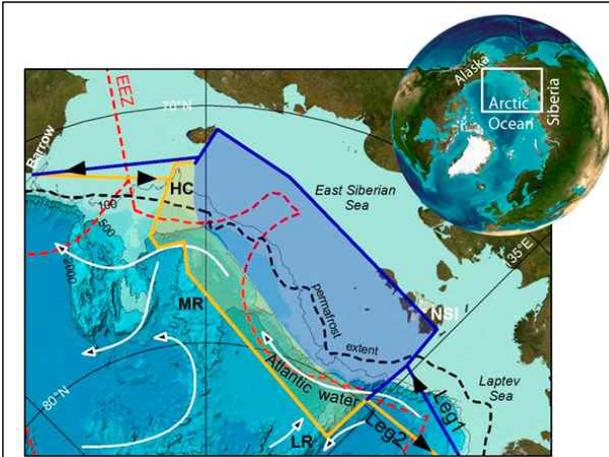


그림 2-7. "SWERUS-C3" 주요 탐사해역은 동시베리아 대륙붕의 해저 동토층(<http://www.swerus-c3.geo.su.se/index.php/78-swerus/71-swerus-c3-program>) 지역을 나타낸다.

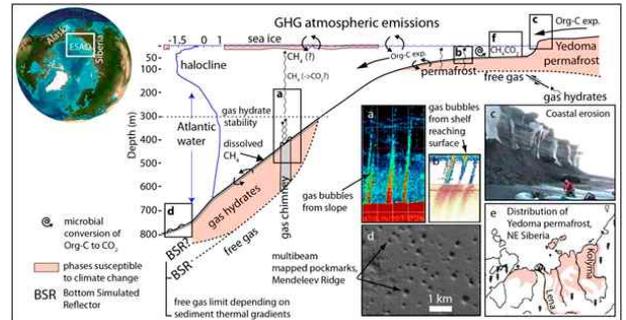
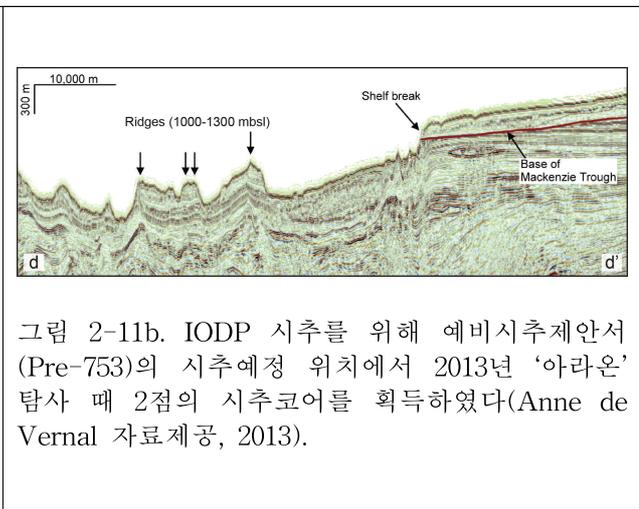
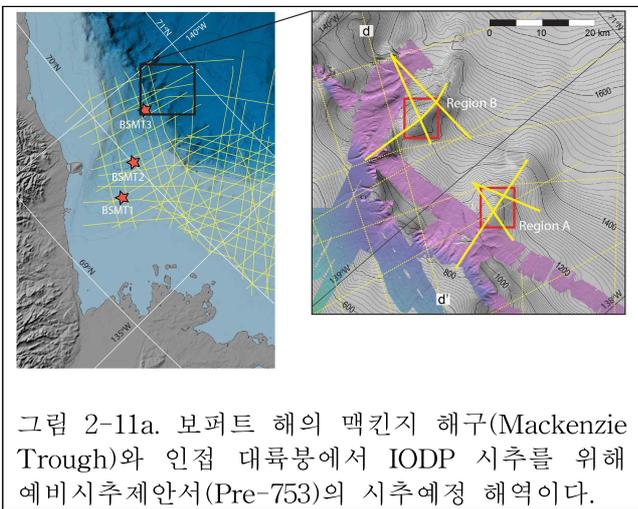
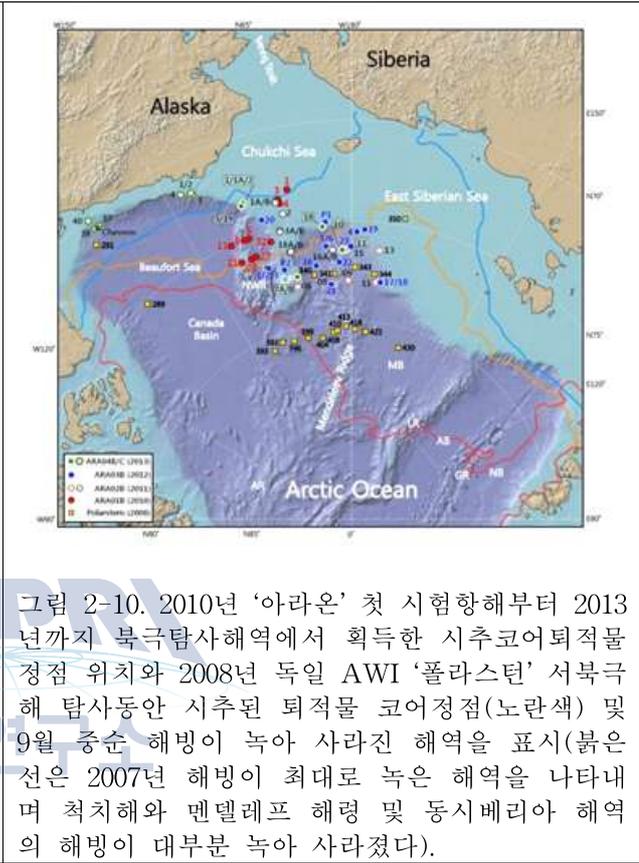


그림 2-8. "SWERUS-C3" 프로그램에서 동시베리아 대륙붕의 해저 동토층 탐사를 통해 규명하고자 하는 북극해의 기후-빙권-탄소 시스템의 주요 요인을 간략하게 설명한 도식자료(<http://www.swerus-c3.geo.su.se/index.php/78-swerus/71-swerus-c3-program>)를 나타낸다.

'아라온' 북극탐사를 수행했던 3년(2011-2013) 동안 북극해에서 획득한 탐사자료와 함께 퇴적물 코어를 분석하여 서북극해에서 탐사연구의 후발 주자였던 우리나라는 독일, 미국, 캐나다, 일본 등과 국제공동탐사연구 시스템을 구축하였다. 이를 통해 독일 AWI와 미국 오하이오 대학교의 Byrd 극지·기후연구센터의 북극해 탐사연구 전문가를 '아라온' 북극탐사에 초청하여 주요한 연구해역으로 평가되는 곳에서 탐사자료 및 시추코어를 획득하였다(그림 2-9, 2-10). 또한 2013년 제 4차 '아라온' 북극탐사(ARA04B) 동안 우리나라 최초로 미국 EEZ 해역인 척치해 주변해역과 알래스카 북부 대륙붕 해역을 정밀 탐사하여 척치 대륙붕해역에서 그동안 발견되지 않은 거대빙하가 이동하여 남겨놓은 흔적을 발견하였고 그 시대를 규명하기 위해 시추코어를 획득하는 성과를 달성하였다. 또한 캐나다 보퍼트 해 대륙붕해역에서 IODP 시추제안서 작성을 위해 캐나다 몬트리올 대학 GEOTOP의 Anne de Vernal 교수가 제공한 시추예정 지역에서 SBP 천부탄성과 탐사자료와 함께 수심 약 1200 m 깊이의 해저에 솟아있는 언덕(ridges)에서 약 6 m 길이의 시추 퇴적물 코어 2점을 획득 하였다(그림 2-11a, b). 특히 2012년 '아라온' 북극탐사(ARA03B) 때는 동시베리아 대륙붕의 엘리스 대지에서 제 4기 후기 빙하기 때 거

대한 빙하가 존재한 것으로 보이는 흔적을 해저 1200 m 깊이에서 발견하여 2013년 10월 독일 AWI의 프랑크 니젠 박사가 주도하여 극지연구소 연구원을 포함하여 독·한 공동논문을 처음으로 “Nature Geoscience”에 게재하였다. 동시베리아 대륙붕에서 발견된 거대빙하의 흔적은 그동안 알려지지 않았던 새로운 발견으로 학계의 커다란 주목을 받았다.



K-Polar 사업을 통해 「아라온」 호의 성공적인 북극탐사 이후, 2014년부터 2016년까지 주요과제 “후기 제 4기 서북극권 고해양환경변화연구” 수행을 위해 2015년 8월 처음으로 ‘아라

온'에 장착된 롱코어러 시스템(JPC)을 이용하여 길이 10 m 이상의 시추코어를 획득하기 위해 그동안 탐사를 통해 획득한 탐사자료와 시추코어 분석을 통해 얻어진 자료를 바탕으로 4개의 시추 정점을 사전에 선정하여 탐사를 추진하였다(그림 2-12). 8월 25일 알래스카 최북단에 위치한 배로우(Barrow)를 출발하여 9월 9일까지 한국, 독일, 프랑스, 미국, 일본을 비롯한 6개국의 과학자가 공동으로 제 6차 서북극해 탐사(ARA06B)를 수행하였다. 제 6차 '아라온' 북극탐사는 해빙감소가 급격히 일어나고 있는 서북극 척치해 대륙붕과 수심 2000 m 이상의 심해분지 그리고 2012년 거대 빙하의 흔적이 발견되었던 동시베리아 대륙붕해역에서 해저지형 및 천부지층탐사를 수행하고 선정된 정점에서 JPC 코어퇴적물을 획득하였다(그림 2-12, 2-13). 탐사의 주요 목적은 그 동안 '아라온' 탐사를 통해 밝혀진 서북극해의 거대빙하가 존재하였던 시기에 쌓인 퇴적층 기록을 획득하여 연대측정과 다중 프록시를 이용하여 그 시기를 정확하게 밝히는데 있었다. 또한 JPC 시추기를 이용하여 제 4기 중기 빙하기-간빙기 기후변화 기록이 보존된 퇴적층을 획득하여 최근에 일어났던 과거의 빙하기기록을 복원하기 위해 해저분지에서 정점을 선정하여 최초로 14 m 길이의 시추코어 퇴적물을 획득하는데 성공하였다(그림 2-13). JPC 코어 이외에 기존의 코어러(박스, 멀티, 중력)를 이용하여 주로 척치해 대륙붕에서 빙·해양시추퇴적물을 획득하였다. 또한 총 3497 km 탐사라인에서 SBP와 멀티빔 자료를 획득하였다. 2015년 시추된 4점의 JPC 코어 퇴적물은 선상에서 MSCL 장비를 이용하여 퇴적물의 물성(밀도, 속도, 대자율 등)을 측정하여 예비층서를 정립하였다. 4점의 코어 중 JPC-03과 04는 선상에서 절개하여 퇴적물의 특성을 기재하고 X-ray 슬랩을 채취하여 X-radiography 자료를 획득하고 한국지질자원연구에서 Avaatech XRF 코어 스캐너를 이용하여 고해상의 지화학 분석을 수행하였다. 일차적인 분석자료에 의하면 JPC-03의 퇴적물에는 동시베리아 대륙붕에서 발견된 거대빙하의 증거가 잘 보존되어 향후 시대 규명이 가능해질 것으로 보인다. 또한 JPC-04의 퇴적물은 약 50만 년 전 이후에 일어나 과거의 대규모 빙하활동 기록이 매우 잘 보존되어 있기 때문에 향후 서북극해에서 알려진 기존의 빙하활동 이전의 기록을 복원할 수 있을 것으로 기대하고 있다. 특히 JPC 시추코어 퇴적물에서 향후 연대측정 및 유공층의 산소 및 탄소 안정동위원소 자료 등 다중 프록시를 분석하여 보다 정확한 퇴적 층서를 확립하고 중기/후기 제 4기 빙하기-간빙기 동안에 일어난 서북극해의 빙하역사와 고해상의 고해양환경변화를 정밀하게 복원하는 연구를 추진할 계획이다. 특히 '아라온'을 통해 획득한 해저지형 및 천부지층 탄성파탐사자료 및 JPC 시추코어 자료 등은 향후 서북극해 해역의 빙하역사와 최근 지구온난화에 의해 급격히 해빙이 감소하고 있는 해양환경변화를 이해하고 미래의 기후변화 패턴과 그 영향을 보다 더 정확하게 예측할 수 있는 자료로 활용될 수 있다. 무엇보다도 2018년 로모노소프 해령에서 수행될 IODP 심부시추 프로그램의 주요 연구 이슈 중 하나인 "동시베리아 대륙붕 해역을 포함한 서북극해에 제 4기 동안 빙하활동이 반복적으로 일어났는지 그 증거를 밝히는 것"에 대한 1차 해답을 제공할 수 있을 것으로 기대하고 있다.

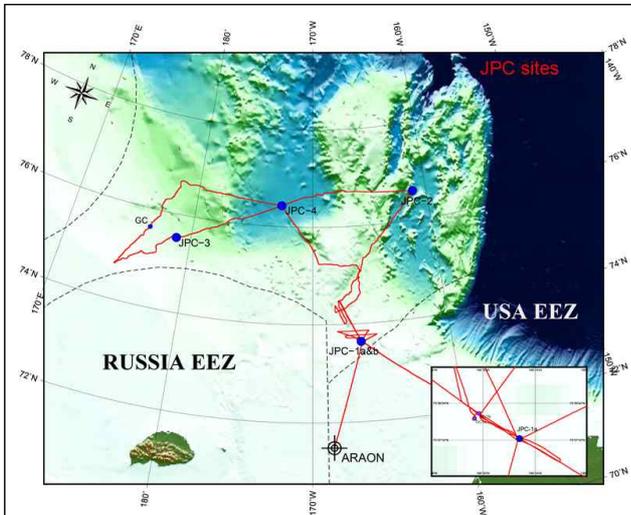


그림 2-12. 2015년 제 6차 ‘아라온’ 서북극해 탐사(ARA06C) 라인 및 JPC 시추정점을 나타낸다.

Sediment recovered with JPC corer



Recovery of sediments retrieved with JPC corer

Core	Water depth (cm)	Sediment recovery (cm)	Number of core sections
01A-JPC	100	1040	7
02-JPCg	2077	737.5	5
03-JPC	673.4	1132.5	8
04-JPC	2200	1386	10



그림 2-13. 2015년 제 6차 ‘아라온’ 서북극해 탐사(ARA06C)에서 최초로 4점의 JPC 시추 코어 퇴적물을 서북극해에서 획득하였다.



## 제 2절 국내·외 탐사 및 시추기술 수준 비교

- ‘R/V Polarstern’을 이용하여 지난 35년 동안 북극탐사를 수행 한 독일 AWI는 현재 ‘R/V Polarstern 2’를 2019년까지 건조하여 북극해 중앙결빙해역탐사에 투입할 예정임
  - 폴라스턴에서 장착되어 있는 시추장비 중 빙퇴적층으로 이루어진 북극해에서 다량의 시추 퇴적물을 획득하기 위하여 0.3m x 0.3m x 12m 크기의 “대형 박스형 시추기(Kasten Lot, KAL)”를 사용한다(그림 2-14a).
  - KAL 시추기의 장점은 중력코어에 비해 5~6배 이상의 많은 퇴적물을 획득하는 동시에 중력코어에 비해 얇은 강관으로 시추기를 제작하였기 때문에 빙·해양퇴적물에 비교적 저항을 받아 보다 깊게 들어갈 수 있기 때문에 길이가 긴 퇴적물 시추가 가능하다(그림 2-14b).
  - KAL 시추기를 이용하여 비교적 길이가 긴 시추코어 획득이 가능하지만 빙·해양퇴적물의 물성 때문에 북극해에서는 현재 대부분 9 m이내의 시추만 가능한 실정이다.



그림 2-14a. AWI ‘폴라스턴’에서 사용하고 있는 대형박스형 시추기(KAL)를 이용하여 2008년 서북극탐사에서 빙·해양퇴적물 코어를 시추하고 있다.



그림 2-14b. AWI ‘폴라스턴’에서 사용하고 있는 대형박스형 시추기(KAL)를 이용하여 2014년 북극 중앙해역 로모노소프 탐사에서 시추된 빙·해양퇴적물 코어가 시료를 채취하기 위해 지질실험실에 놓여있다.

- 2011년부터 독자적으로 서북극해에서 결빙되지 않은 해역에서 시추하기 위해 멀티, 박스 및 중력코어기를 ‘R.V. Araon’ 호에 장착하여 사용하고 있다. 중력코어로 북극해에서 시추된 코어의 길이는 약 60 cm에서 6 m이내다. 2014년 맥킨지 해구 지역에서 최장 6.4 m 길이의 홀로세 머드(Mud)층이 시추되었다.
- 그러나 2015년 6월 동해 시험항해에서 ‘아라온’에 새롭게 장착된 점보피스톤코어러(JPC)를 이용하여 최초로 36 m 길이의 시추코어 퇴적물 시추를 성공한 후, 8월 하순 수행된 제 6

차 ‘아라온’ 북극탐사(ARA06C)에서 총 4점의 JPC 시추코어를 서북극해역에서 시추하였다. JPC 시추코어 평균 길이는 7.4 m에서 13.9 m로 중력코어러에 비해 보다 2배 이상의 시추코어를 획득할 수 있는 기술을 갖추게 되었다.

- ‘R.V. Araon’에 장착된 JPC 코어러를 이용하여 길이가 긴 양질의 빙·해양 퇴적물을 이용하여 비교적 길고 양질의 시추코어를 획득할 수 있는 기술력을 보유하게 되었다.
- 2011년부터 수행한 탐사를 통해 결빙해역에서 탐사자료를 획득할 수 있는 노하우를 축적하고 있으나 잦은 승조원 교체에 의한 선상현장작업의 전문성 결여가 문제점으로 남아 있다.
- 멀티빔을 이용한 해저지형 및 천부지층탐사를 통해 자료를 획득하고 중력 코어를 시추 퇴적물을 획득할 수 있으나 아직 결빙해역에서 탐사자료 및 시추코어 획득 기술은 선진국 대비 60~70 % 정도에 미치고 있어 이에 대한 교육과 전문가 그룹양성이 필요하다.
- 향후 JPC 시추코어를 획득하여 고해상의 기후환경변화를 체계적으로 연구할 수 있는 노하우를 지닌 선진국 수준의 최첨단 분석장비 시스템을 구축하여 기후환경변화를 복원할 수 있는 적용 가능한 proxy 등의 연구개발이 필요하다.



### 제 3 장 연구개발 수행 내용 및 결과

후기 제 4기 서북극권 빙하역사 및 고해양환경 변화를 정밀 복원하기 위하여 가장 중요한 일은 탐사를 통해 탐사자료(해저지형, 천부지층특성 등)와 시추 퇴적물 코어를 획득하여 다중 프록시(multi-proxies) 분석이 필요하다(Stein, 2008) (그림 3-1). 따라서 본 장에서는 연구 수행을 위해 추진해 온 ‘2014 폴라스턴’ 중앙결빙해역인 로모노소프 해령 종단탐사의 예비결과와 ‘2015 아라온’ 서북극 척치해-동시베리아 대륙붕 해역 탐사를 통해 획득한 JPC 코어 퇴적물 의 예비분석을 통해 획득한 기초자료를 기술하였다. 또한 본 사업의 목표를 달성하기 위해 추진해 온 다양한 분석결과를 통해 밝혀진 예비 결과들을 분리하여 간략하게 서술하였다.

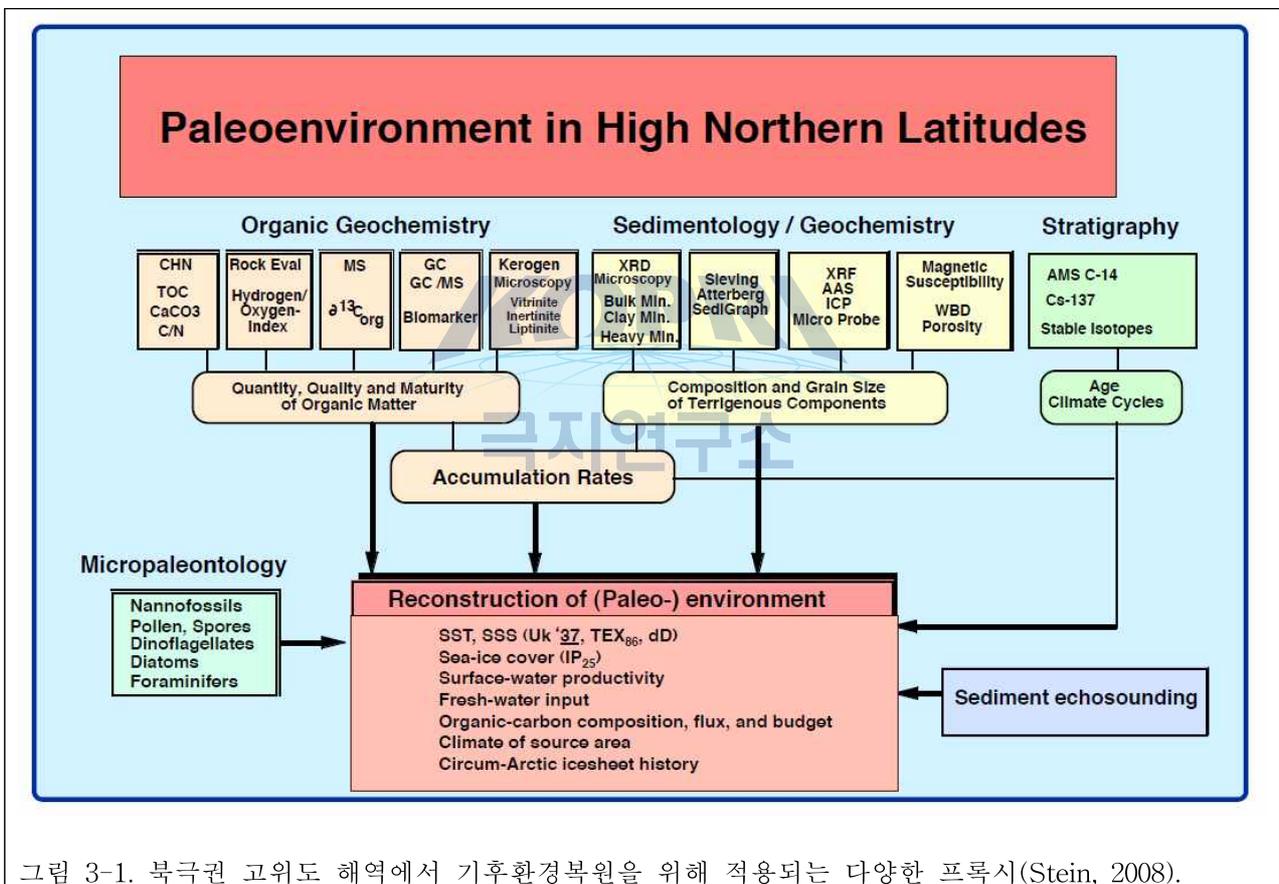


그림 3-1. 북극권 고위도 해역에서 기후환경복원을 위해 적용되는 다양한 프록시(Stein, 2008).

## 제 1절. 연구내용 및 결과 : 탐사 예비결과

### 1. 2014 제 28/4차 ‘폴라스틴’ 북극해 중앙 로모노소프해령탐사 예비결과

#### 가. 탐사개요

제 28/4차 ‘폴라스틴’ 북극탐사(ARK28/4, ALEX)의 조사해역은 캐나다 분지의 알파해령과 로모노소프 남부해령이다(그림 3-1). 중요 탐사 목적은 북극해의 장·단기 기후변화와 지구조 변화의 정밀한 복원을 위한 해저지형 및 천부퇴적층과 심부지층탐사자료 획득 및 새로운 시추코어 퇴적물을 중앙결빙해역에서 획득하는 것이었다. 그러나 두꺼운 다년빙에 가로막혀 알파해령 탐사가 불가능하여 선상에서 로모노소프 해령을 중단하는 탐사로 변경되었다(그림 3-1, 3-2, 3-3). 따라서 탐사의 주요 지역은 알파해령 해역을 제외한 그린란드 북부에서 북극점을 지나 러시아 랍테프(Laptev) 해역으로 뺀어나간 로모노소프 해령을 중단하면서 빙하침식 흔적을 발견하기 위한 해저지형탐사 및 천부해저지층탐사를 수행하고 새로운 시추코어 퇴적물을 획득하였다. 특히 2018년 8월부터 6주간 북극해 로모노소프 해령에서 추진될 예정인 IODP 시추해역에 대한 심부탄성파탐사를 정밀하게 수행하여 성공적인 시추를 위한 예비정점을 선정하기 위한 시추코어 획득을 추진하였다. 약 9주간 추진되었던 탐사에서는 다음과 같은 결과를 얻었다:

- 1) 총 3,084 km 탄성파 자료를 획득하였으며 그 중 2,058 km는 길이가 3,000 m인 스트리머(streamer)를 이용한 다중채널 탐사자료이며, 이는 IODP 시추정점을 선정하는데 활용될 예정이다.
- 2) 시추코어 퇴적물은 다양한 시추장비를 이용하여 다음과 같이 획득하였다: 대형 박스코어 퇴적물(BOX) 6정점, 멀티코어 퇴적물(MUC) 17정점, 중력코어 퇴적물(SL) 30정점 및 대형 박스시추코어(KAL) 20정점을 선정하여 총 83정점에서 표층 퇴적물과 빙·해양 퇴적물을 채취하였다(그림 3-4a, b). 특히 그린란드 북쪽에 위치한 로모노소프 해령에서는 처음으로 시추코어를 획득하였다. 또한 러시아 랍테프 해와 인접한 로모노소프 중앙해령에서 대형 빙산이나 빙붕에 의해 침식된 신생대층으로 추정되는 고기퇴적층을 발견하여 중력코어를 이용하여 16점의 시추코어퇴적물을 획득하여 제4기뿐만 아니라 신제3기의 북극해 기후환경변화를 복원할 수 있는 기회를 얻은 셈이다.
- 3) 또한 2014년 8월 6일부터 9월 28일까지 이동하는 시간동안 총 10,370 km 라인에서 해저지형(Hydrosweep) 자료와 파라사운드(Parasound)를 이용한 해저천부지층탐사 자료를 획득하여 로모노소프 해령에서 고해상의 해저지형을 밝힐 수 있었다(그림 3-5a, b).
- 4) 그 밖에 헬리콥터에 장착된 EM-bird를 이용한 해빙관측(sea-ice measurement)을 수행한

해빙물리학(sea-ice physic) 분야, X-CTD를 이용한 수괴특성 측정을 추진한 해양학(oceanography) 및 극지 조류와 포유류를 관찰하는 극지생태학(polar ecology) 분야의 현장 관측과 시료채취 등을 수행하였으며, 특히 해빙이나 바다에서 운항과 소규모의 탐사 활동이 가능한 ‘Hovercraft’를 이용한 “FRAM-2014/2015“ 프로그램 수행을 위해 노르웨이 베르겐 대학교의 전직 지구물리학 교수인 ‘Yngve Kristoffersen’과 북극탐험가인 ‘Audun Tholfsen’을 북극점 해역에 하선시켜 2015년 8월까지 약 1년간 북극해의 표층해류를 따라 프람해협으로 빠져나올 때까지 대기관측, 수괴 특성/해빙 관측 및 시료채취, 해저 지층탐사 및 퇴적물 시료 채취 작업을 추진하도록 하였다(그림 3-6a, b) (Stein, 2015).

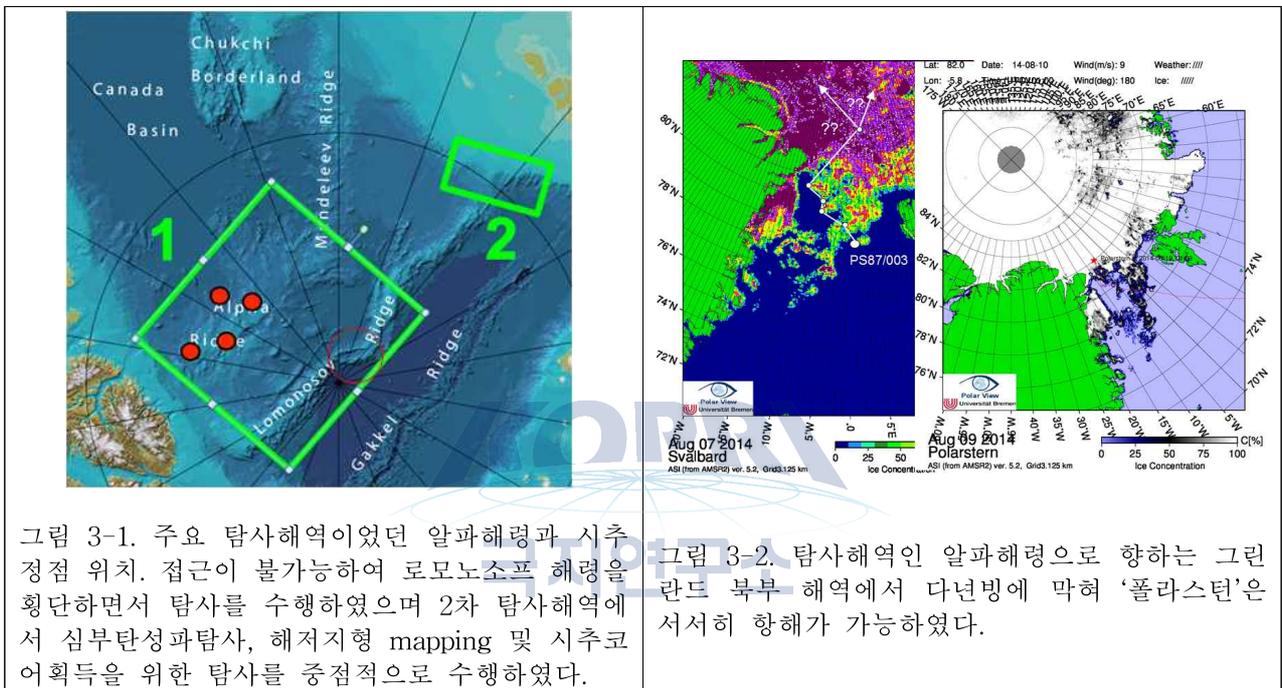


그림 3-1. 주요 탐사해역이었던 알파해령과 시추정점 위치. 접근이 불가능하여 로모노소프 해령을 횡단하면서 탐사를 수행하였으며 2차 탐사해역에서 심부탄성파탐사, 해저지형 mapping 및 시추코어 획득을 위한 탐사를 중점적으로 수행하였다.

그림 3-2. 탐사해역인 알파해령으로 향하는 그린란드 북부 해역에서 다년빙에 막혀 ‘폴라스타른’은 서서히 항해가 가능하였다.

전 지구적인 기후시스템에서 북극해의 중요성에도 불구하고 여름철을 제외한 대부분 시준 동안 해빙으로 두껍게 덮여있는 북극해는 다른 대양에 비하여 장·단기적인 지질시대 역사에서 여전히 적게 알려진 곳이다. 북극해 지질역사를 통해 진화된 기후변화에 대해 매우 제한적으로 알려졌다. 실제로 두껍게 덮인 해역에서 쇄빙선을 이용한 탐사가 제한적으로 추진될 수 있기 때문에 해빙이 녹은 해역에서 시추장비를 이용하여 비교적 오래된 지질시대를 기록한 양질의 퇴적물 코어를 시추하는데 어려움이 남아있다. 북극해 주변해역에 비하여 1990년대 전까지 중앙해역에서 시추된 퇴적물 코어는 매우 제한적이며 표류하는 대규모의 해빙 위에서 야영하면서 시추된 퇴적물 코어인 T-3 (Clark et al., 1989)와 CESAR (Jakson et al., 1985) 자료가 전부다. 1990년대부터 전 세계적으로 북극탐사를 추진할 수 있는 쇄빙선이 건조되면서 해빙이 녹아 탐사가 가능한 해역부터 탐사자료와 시추코어를 획득하여 북극해 기후환경변화를 이해할 수 있는 자료가 축적되었다. 또한 독일, 스웨덴, 미국 등은 자국의 쇄빙선을 이용하여 북극해의 중앙결빙해역에 대한 국제공동탐사를 본격적으로 추진하였다. 그러나 대부분 중력코어 또

는 피스톤 코어 시추기를 이용하여 약 15 m 내외의 퇴적물을 획득하는데 머물렀기 때문에 대부분 후기 플라이오세/플라이스토세 또는 후기 제 4기 빙하기-간빙기 동안 북극해에서 일어났던 고기후 및 고해양환경변화에 대한 연구를 추진할 수 있었다. 2004년 북극점에 인접한 로모노소프 해령에서 처음으로 약 430 m 길이의 퇴적층을 시추하기 전까지, 알파 해령에서 수행되었던 표류하는 해빙 위에서 30~40 cm 길이의 짧은 4점의 중력코어 시추 코어를 획득하였다. 이 코어는 신제3기 이전의 퇴적된 유기탄소 함량이 높은 머드퇴적물(mud)과 엽리가 발달된 규조류 퇴적물로 후기 백악기와 제 3기 전기에 일어났던 기후와 퇴적환경이 잘 기록되어 있다. 특히 이 퇴적물 코어에서 분석된 자료에 의하면 계절적으로 높은 생산력을 가진 용승 조건과 같이 북극해에는 해빙이 없는 따뜻한 조건이었던 것으로 추정하였다(Jackson et al., 1985; Jenkyns et al., 2004; Davies et al., 2011). 그러나 2004년 IODP에서 수행한 ACEX (Arctic Ocean Coring Expedition) 302 시추 프로그램 이전에는 제 3기 동안 전 지구적으로 일어난 기후변화 기록과 북극해에서 시추된 퇴적물 코어에 기록된 기후환경변화의 연속적인 자료가 없었다(Backman et al., 2006, 2008; Moran et al., 2006). ACEX 시추는 영구적으로 두꺼운 얼음으로 덮인 북극점 주변의 로모노소프 해령에서 추진되었으며 약 428 m 길이의 퇴적층을 시추하였으며 상부부터 제 4기층, 신제3기(Neogene), 구제3기(Paleogene)과 중생대 후기의 Campanian 시대(약 83.6~72.1 Ma)에 생성된 층이 획득되었다. ACEX 시추 퇴적물의 분석을 통해 그 동안 알려지지 않았던 북극해의 고해양환경변화에 관하여 연구된 과학적인 새로운 발견들이 보고되었다(Stein et al., 2014). 그러나 ACEX 시추 퇴적물 분석을 통해 얻어진 새로운 사실들은 유래 없는 결과였음에도 불구하고 제 3기 동안 기후가 온실하우스(greenhouse)에서 빙하하우스(icehouse)로 변화하는 코스가 기록된 북극해의 기후변화의 열쇠가 되는 과학적 의문이 풀리지 않은 채 여전히 남아있다. 이는 ACEX 시추 퇴적물의 회수가 완전하지 못하였으며, 또한 중생대 중기의 기록이 결층(hiatus)로 남아있기 때문이다(Backman et al., 2006, 2008; Moran et al., 2006; Stein et al., 2014). 따라서 단 한점의 시추코어에서 밝혀낸 북극해의 기후변화는 불완전한 상태로 중생대 이후 북극해의 지구조 진화역사와 이에 의한 연속적인 기후변화의 기록이 여전히 퍼즐을 맞추지 못한채 남아있는 셈이다(Stein et al., 2014). 이러한 문제점을 해결하기 위해 IODP에서는 북극해의 주요해역에서 시추를 통해 아직도 알려지지 않은 북극해의 기후변화 역사를 밝히기 위해 노력하고 있다. 이에 따라 2018년 8월 러시아 EEZ 해역에 인접한 로모노소프 남부 해령에서 제2의 ACEX 시추가 추진 될 계획이다. 이를 위하여 보다 정확한 시추위치 선정에 대한 필요성이 제기되어 2014년 8월 5일부터 제 28/4차 ‘폴라스틴’ 북극탐사를 추진하였으며, 앞에서 언급된 것처럼 해저지형탐사, 천부지층 및 심부지층 탐사 그리고 새로운 퇴적물 코어를 시추하는 작업을 약 9주간 수행하였다. 총 46 정점에서 대형박스코어(GKG), 멀티코어(MUC), 중력코어(SL) 및 대형박스형시추코어(KAL) 장비를 이용하여 표층퇴적물과 시추코어 퇴적물을 획득하였다(그림 3-4a, b).

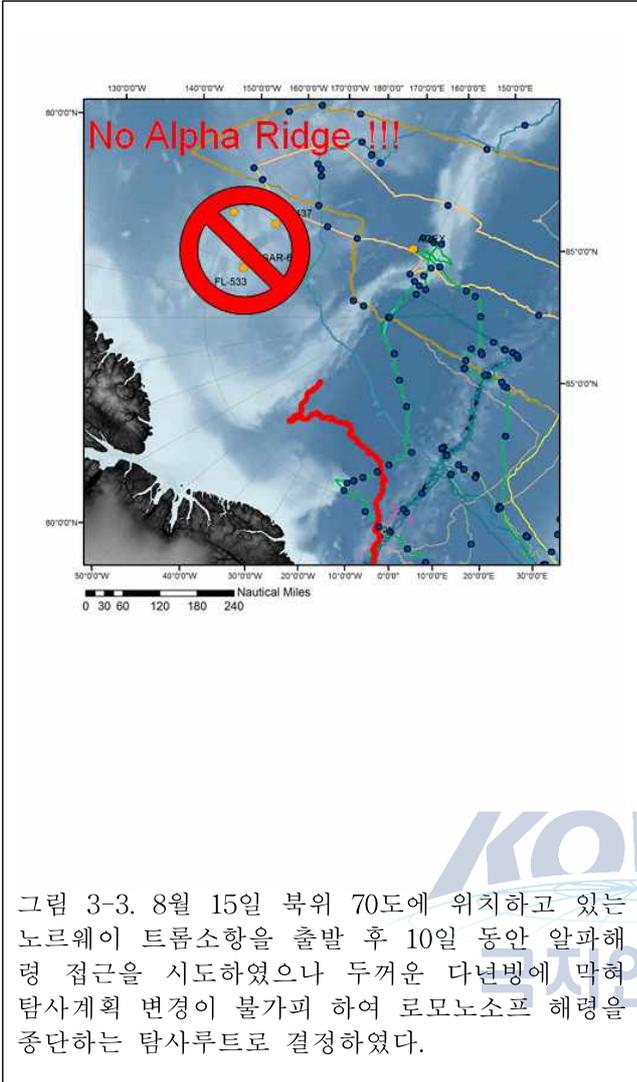


그림 3-4a. 대형박스시추코어(KAL)를 이용하여 약 8m의 시추코어를 획득하였다.



그림 3-4b. 대형박스시추코어로 획득한 퇴적물은 실험실에서 절개하여 연구목적에 따라 시료를 채취하는 모습이다.

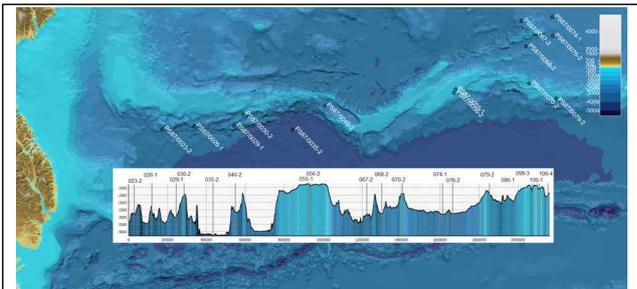


그림 3-5a. 그린란드 북부에서 북극점 해역을 지나 러시아 대륙붕 해역까지 길게 뻗은 로모노소프 해령을 중단하면서 탄성과탐사자료와 함께 약 83점의 시추코어퇴적물을 획득하였다(Stein, 2015).

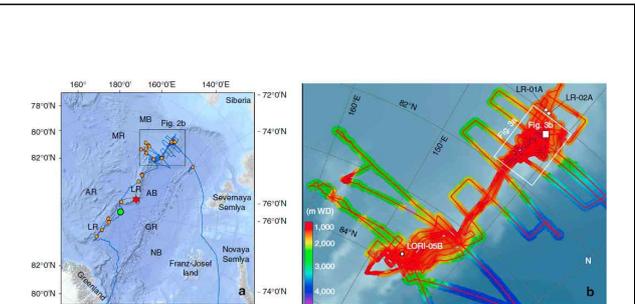
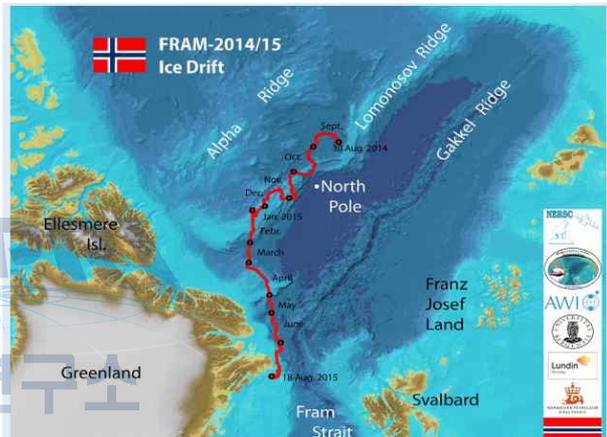


그림 3-5b. 로모노소프 남부 해령에서 2018년 IODP 시추정점 선정을 위해 다중채널을 이용한 탄성과탐사를 정밀하게 추진하였다(Stein, 2015).

나. 탐사목적 퇴적물 분석추진계획

제 28/4차 ‘폴라스틴’ 북극탐사(ARK28/4, ALEX) 동안 해양지질 프로그램의 주요 목적은 1) 북극해 중앙결빙해역과 대륙붕 주변에서 후기 제 4기 동안 일어난 고기후, 고해양순환, 고생산력 및 해빙분포 변화를 보다 정확하게 연구하기 위한 새로운 퇴적물 코어를 획득하고, 2) 중생대와 제 3기 지질시대 기록을 보존하고 있는 고기 퇴적층을 알파 해령과 로모노소프 해령에서 획득하는 것이었다. 그러나 두꺼운 다년빙으로 덮여있는 알파해령은 접근이 불가능하여 로모노소프 해령탐사에 주력하였다(Stein, 2015). 제 28/4차 ‘폴라스틴’ 북극해 중앙해역탐사에서 추진 된 해양지질분야에서 탐사자료와 시추코어 퇴적물을 활용하여 수행 될 주요 연구 분야는 다음과 같다:

 <p><b>Geophysics</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 0.3 l airgun</li> <li>- 6 ch. 50 m streamer</li> <li>- 37, 12 and 3.5 kHz echosounders</li> <li>- EM ice thickness probe</li> </ul> <p><b>Geology</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- hydr. static corer, 6 m</li> <li>- winch, 3000 m kevlar</li> <li>- rock dredge</li> </ul> <p><b>Oceanography &amp; Ice</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- CTD</li> <li>- current meter</li> </ul>   	
<p>그림 3-6a. 2014년 8월 30일 AWI ‘폴라스틴’에서 하선하여 약 12개월 동안 해빙과 해류에 표류하는 “FRAM-2014/2015 Ice Drift” 프로그램을 수행하는 약 10톤급 ‘Hoverkraft’ 고무보트와 표류하는 동안 수행할 지구물리, 해양지질 및 해류특성 및 해빙관측을 위한 다양한 장비를 장착하였다.</p>	<p>그림 3-6b. 2014년 8월 30일 AWI ‘폴라스틴’에서 하선하여 약 12개월 동안 총 1,900 km를 해빙과 해류에 의해 표류되어 떠내려 나온 온 후 2015년 8월 18일 북위 81도에서 ‘Havsel’ 선박에 의해 구조되어 “FRAM-2014/2015 Ice Drift” 프로그램을 성공적으로 마쳤다.</p>

(1) 퇴적층군의 층서학적 분석

보다 더 정확한 고환경 변화에 대한 모든 복원을 위한 기본 자료로서, 가장 정확한 층서학적 틀이 정해지도록 추진 될 예정이다. ‘폴라스틴’의 선상에는 이미 얻은 암층서학(lithostratigraphy)과 물성검층(MSCL) 기록을 바탕으로, 자기층서학(magnetostratigraphy), 산소와 탄소 동위원소, 절대연대측정, 생층서학, 자연방사성 핵종(natural radionuclides, <sup>10</sup>Be, <sup>234</sup>Th), 대자율(magnetic susceptibility), 주기층서학(cyclostratigraphy, 망간 주기(cyclic manganese layer), 물리적 특성, XRF 스캔)을 포함한 기존의 다른 북극해 기록들과의 대비를 포함하여 실험실 연구가 추진 될 계획이다.

## (2) 육성 퇴적물의 유입, 퇴적 프로세스 및 빙하역사

북극해로 유입되는 육성 퇴적물 주로 강에 의한 운반(river-discharge), 해류, 해빙(sea-ice와 빙산)의 이동(transport), 사면이동(down-slope transport), 풍성 유입에 의해 조절된다. 대부분의 이러한 기작들은 또한 수괴와 해저면에서 생물학적 작용(processes)에 영향을 준다(*i.e.*, 표층해수 생산성, 수괴를 통한 입자들의 이동(fluxes), 해저면에서의 저서 활동, 유기 탄소 유출(export)과 집적 기작 및 과정을 파악한다. 주로 본 주제에 관한 연구조사는 로모노소프 해령 및 인접한 대륙주변부 지역으로 유출(discharge)되는 육성 퇴적물의 정량(quantification), 특성과 변화에 중점을 두어 추진 될 예정이다. 이 연구에서는 화학적·퇴적학적인 총량의 산출, 주요 기원(source)지와 주 이동과정의 확인 및 해류의 복원 연구가 수행될 것이다. 주요 관심사는 표층 퇴적물과 퇴적물 코어의 구체적인 퇴적학적, 지화학적, 광물학적, 미고생물학적인 연구를 수행하는 것이다. 연구방법(methods)은 입자크기, 점토광물, 중광물, 주·부원소 및 미량원소와 회토류 원소의 측정과 유기탄소 입자, 물리적 특성을 포함할 것이다. 퇴적물의 반향형식(echotype)의 분포지도제작은 공간적 상형(facies pattern)내의 코어자료로부터 주요 정보의 외삽법에 의해 수행될 예정이다.

이용되는 분석기술에는 X선 회절분석(XRD), X선 형광분석(XRF), 유도결합 플라즈마 질량 분석(ICP-MS), 조립질 입자의 현미경 관찰이 있다. 더욱이 MSCL-검층과 XRF-코어 스캔이 이용될 것이다(그림 3-7a, b).

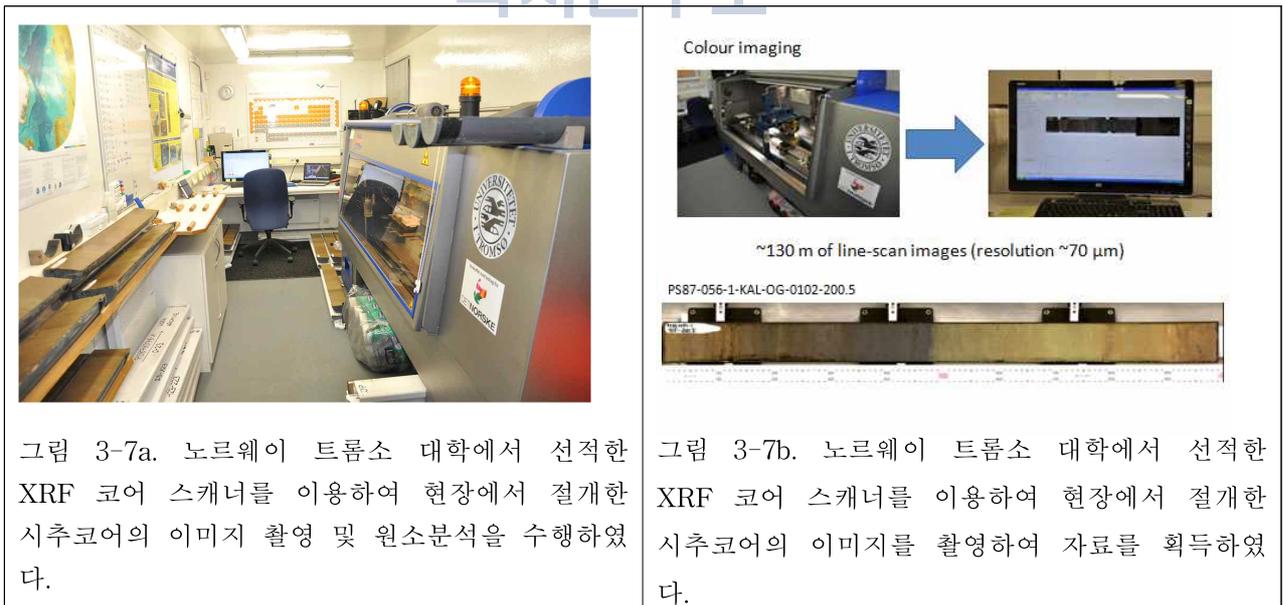


그림 3-7a. 노르웨이 트롬소 대학에서 선적인 XRF 코어 스캐너를 이용하여 현장에서 절개한 시추코어의 이미지를 촬영 및 원소분석을 수행하였다.

그림 3-7b. 노르웨이 트롬소 대학에서 선적인 XRF 코어 스캐너를 이용하여 현장에서 절개한 시추코어의 이미지를 촬영하여 자료를 획득하였다.

## (3) 유기탄소 flux와 표층수괴 특성: 해빙, 수온, 염분도 등

주요한 목표 중의 하나는 제 4기 동안 유기탄소의 flux를 정량화하고 유기탄소 퇴적을 조절하는 기작과 그들의 변화를 확인하는 것이다. 수괴의 산소, 표층해수 생산성, 해수면 온도, 해

빙(sea-ice) 분포, 육성 물질의 유입이 특정 관심사이다. 시추코어 퇴적물 분석을 위한 적용 분석은 LECO/IR Mass (CaCO<sub>3</sub>, TOC, C/N), 유정분석(Rock-Eval pyrolysis), 가스 크로마토기 분석(GC), 가스 색층분석/질량 분석(GC/MS), 고성능 액체 색층 분석/질량 분석(HPLC/MS), XRF, ICP-MS, XRF 스캔과 현미경 관찰을 통해 수행한다.

주요관심사는 아래와 같다:

- 유기탄소 입자의 성숙도와 성분 및 정량 확인; 유기지화학 bulk parameters(TOC, C/N, HI 값), 바이오마커(*e.g.*, n-alkanes, sterols, GDGTs, BIT index), maceral assemblage, 유기탄소의 안정 동위원소를 이용한 재동된 화석 물질, (sub-)현재 해성·육성의 유기탄소)
- 해성·육성의 유기탄소 (집적물)의 flux와 공간과 시간에 따른 변화, 해빙 분포와 고기후의 변화와의 관계의 정량분석 추진.
- 다양한 생산성 지시자들을 통한 (고)생산성의 측정; 해양 유기탄소 flux, 바이오마커 성분 (*e.g.*, n-alkanes, sterols, fatty acids, alkenones 등), 유기물질의 탄소와 질소 안정 동위원소, Ba, 생물기원 오팔, 규조류와 와편모 조류의 종조성 파악.
- 바이오마커 성분(alkenones, TEX<sub>86</sub>; HBIs, IP<sub>25</sub>)을 이용한 해빙분포와 해수면 온도의 복원
- 탄소/황, 유기탄소/철/황의 관계, 산화환원에 민감한 미량원소(*e.g.*, Mo, B, U, Ag, Cd, Zn, Re), 특정 바이오마커(isorenieratane)를 이용한 수괴의 산소(oxygenation) 복원 추진.
- 동부 중앙 북극해 로모노소프 해령에서 획득한 자료와 유라시아 대륙주변부 지역의 유사한 자료. 동 시베리아 대륙주변부와 Mendeleev-Ridge에서 획득된 시추코어 퇴적물에서 분석된 기록들의 비교 추진.

#### (4) 유공충과 안정 동위원소

부유성과 저서성 유공충의 분포와 다양성 및 이들 유공충의 안정동위원소 신호는 지질시대 빙하기-간빙기 동안 수괴 특성과 표층해수 생산성 등과 같은 고환경의 변화를 복원하기 위해 분석이 추진 될 것이다.

#### (5) 화분학적 지시자

유기질 미화석 (와편모 조류 포낭 (cyst), acritarchs, 담수 조류)의 시간적 분포는 제 3기 및 중생대뿐 아니라 제 4기 빙하기-간빙기 때 형성된 퇴적물의 생층서 정립과 지질시대 동안 해양환경 조건에 관한 정보를 얻는데 이용될 것이다.

#### (6) 공극수와 퇴적물의 무기 지화학 분석

해양퇴적물의 공극수는 생지화학 작용과 관련된 유기체의 초기 속성기원 분해(degradation)에 관련한 가치 있는 정보를 준다. 이런 작용은 잠재적으로 퇴적물의 지화학과 지구물리학적

성질을 바꾸고 미세한 미화석의 보존에 영향을 미치기 때문에, 이 연구는 넓은 분야에서 관심 있는 영역이다. 특히, 북극해 퇴적물에 포함된 것으로 알려진 제 4기의 망간 주기(manganese cycles)의 세밀한 조사를 위해 혼합된 고체상과 공극수 분석을 통해 상부 퇴적물의 column의 산화-환원 분포의 해석이 필요하다. 따라서 이 연구 분야에서는 퇴적물과 퇴적물의 공극수에서 생지화학 기작(biogeochemical processes)의 기록을 통해 유기물의 분해와 퇴적물에서 초기 속성작용(diagenesis)에 관련된 무기화합물(inorganic compounds)의 특성을 밝히는 것이다.

## 다. 시추퇴적물 획득 결과

### (1) 표층 퇴적물의 채취

표층과 표층근처 퇴적물 채취는 거대박스 코어(giant box corer)와 멀티코어(multicorer)를 이용하여 수행하였다. 거대박스 코어(독일 Henstedt-Ulzburg, Fa. Wuttke에서 제작, 무게; ca. 500 kg, 부피; 50\*50\*60 cm)는 성공적으로 20 지점에서 19회에 걸쳐 성공적으로 사용되었다. 그 중 마지막 정점에서는 기술적 문제로 인하여 퇴적물을 채취하지 못하였다. 퇴적학과 광물학, 미고생물학 및 보관용으로 표면 퇴적물과 두 퇴적물 코어(지름 12 cm)를 박스코어를 이용하여 획득하였다(그림 3-8). 보통 이 두 코어는 MSCL을 이용하여 검층한다. 다음의 시료들은 표면퇴적물로부터 얻은 것이다:

- 10×10 cm<sup>2</sup> (100 cm<sup>3</sup>) Foraminifera/Stable isotope (IFM-GEOMAR/KOPRI)
- 10×10 cm<sup>2</sup> (100 cm<sup>3</sup>) Benthic Foraminifera (Kaminski/AWI)
- 10×10 cm<sup>2</sup> (100 cm<sup>3</sup>) Sedimentology/Mineralogy (AWI)
- 5×10 cm<sup>2</sup> (50 cm<sup>3</sup>) Org. Geochemistry (AWI)
- 5×10 cm<sup>2</sup> (50 cm<sup>3</sup>) Palynomorphs (AWI/GEOTOP)
- Sampling of drops tones (Bazhenova)
- X-ray slabs from the side sediment

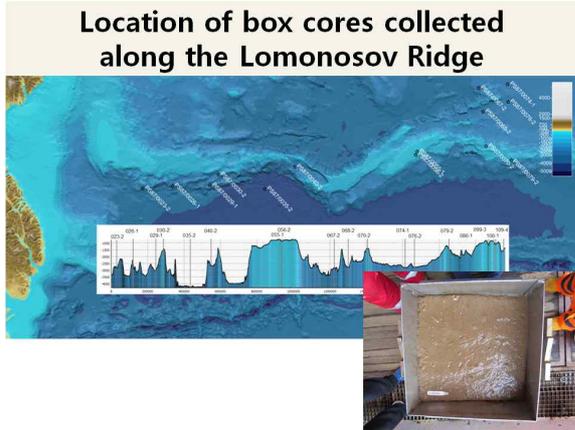


그림 3-8. 로모노소프 해령을 횡단하여 획득한 박스코어 및 해령의 지형도를 나타낸다.



그림 3-9. 로모노소프 해령을 횡단하여 멀티코어를 이용하여 약 23~43 cm 길이의 표층 퇴적물을 획득하여 1cm 간격으로 시료를 채취한다.

내부 지름이 10 cm인 8개의 아크릴 튜브로 이루어진 멀티코어 스탠다드(8-tubes-version multicorer; 독일 Henstedt-Ulzburg, Fa. Wuttke에서 제작)를 이용하였다. 퇴적물 획득을 위해 해저에 투입하는 중량은 항상 250 kg이다. 멀티코어는 성공적으로 12 지점에서 14번 이용하였으며, 상부는 저층수로 채워져 있는 비교란 된 표면 퇴적물을 얻었다. 일반적으로 멀티코어를 이용한 퇴적물은 전체 코어를 따라 1 cm 간격의 슬라이스 내에서 다음과 같은 연구를 통해 얻어졌다(그림 3-9):

- 1 core Sedimentology (AWI)
- 1 core Archive (AWI)
- 1 core Radioactive Isotopes (GEOTOP, Montréal, Canada)
- 2 cores Inorganic Geochemistry (ICBM oldenburg)
- 2 cores Micropaleontology (GEOTOP/AWI/KOPRI)

미생물학적 연구를 위한 표층수와 표층퇴적물 시료(50ml, 15cm<sup>3</sup>)는 보관용이나 무기 지화학 튜브를 이용한 바 있다.

## (2) 시추 퇴적물 시료의 채취

비교적 긴 시추퇴적물 시료의 채취는 중력코어(GC “Schwerelot”, SL)와 대형 상자코어(Kastenlot)를 이용하였다. 중력코어는 1.5 t의 무게를 이용하여 퇴적물을 획득하였다. 이는 성공적으로 31 정점에서 3, 5, 10 m의 다양한 barrel length에 이용하였다. 중력코어의 회수는 0.88에서 7.12 m로 다양하다(그림 3-10).

30×30 cm의 직각 대각선 구역에서 Kastenlot (Kögler, 1963), 중력코어는 크기 30×30×575 cm인 코어박스 segment와 3.5 t의 수용중량(penetration weight)을 갖는다(Hydrowerkstätten Kiel에서 제작). 이용된 Kasternlot 박스의 길이는 11.75 m에 코어 캐처의 30 cm를 더한다. 이

Kastenlot의 가장 큰 이점은 벽 두께가 단지 0.2 cm라는 것이다. 이러한 900 cm<sup>2</sup>인 단면적과 벽의 얇은 두께로, 코어의 질이 대체적으로 우수하다. Kastenlot은 7 지점에서 성공적으로 이용되었다. Kastenlot 코어의 회수는 2.34에서 7.70 m까지 다양하다(그림 3-10). 모든 Kastenlot 퇴적물은 다음의 연구를 위해 플라스틱 용기에 보관하였다:

- Series I        Archive
- Series II       MSCL-logging (physical properties)
- Series III      Sedimentology I
- Series IV       Organic Geochemistry
- Series V       Mineralogy/Geochemistry
- Series VI       GEOMAR

모든 중력코어와 Kastenlot 코어는 선상에서 검층(MSCL) 하였다. 이후에 모든 코어는 개봉 및 기재하였다. 시추코어 퇴적물은 유기생체지표 분석과 Bulk parameter(*i.e.*, TC, TOC, CaCO<sub>3</sub>, Stable isotopes, Rock-Eval parameter)를 위해 시료를 채취하였다. 또한 무기 지화학, 조립입자 분석, 입자크기, 방사성 동위원소 분석을 위해 채취하였다. 퇴적물 슬랩은 X선 사진 촬영을 위해 절개된 모든 코어에서 얻는다.



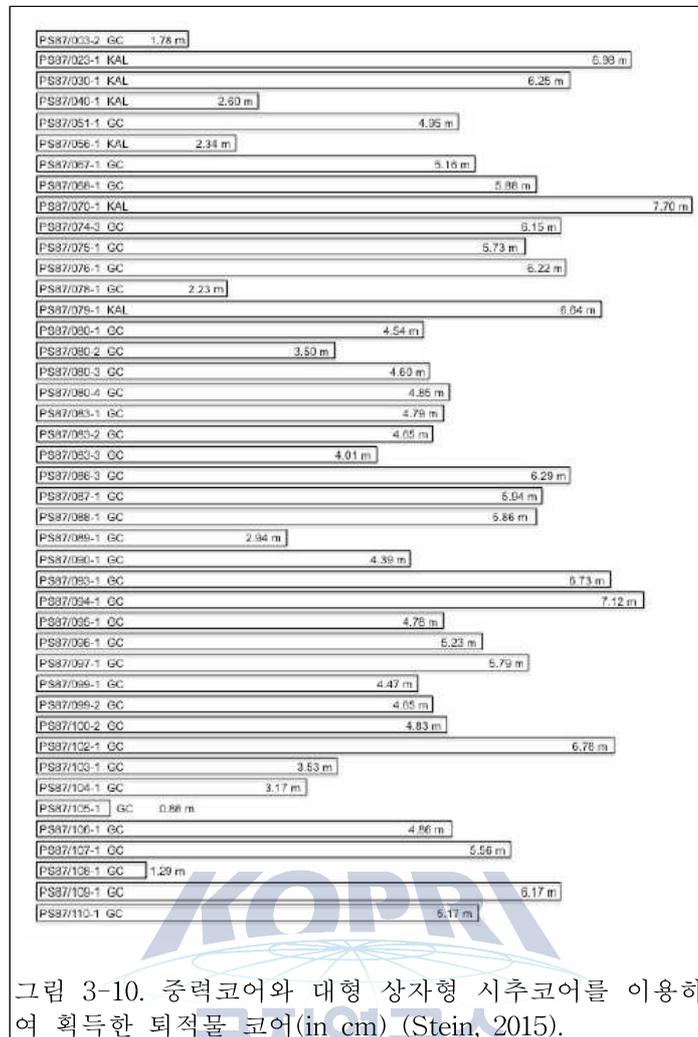


그림 3-10. 중력코어와 대형 상자형 시추코어를 이용하여 획득한 퇴적물 코어(in cm) (Stein, 2015).

## 라. 시추퇴적물 예비결과

### (1) 표층 퇴적물의 특징

ARK-28/4 (PS87) 탐사 동안 표층퇴적물은 선정된 총 20 정점에서 730 m와 3,339 m 사이의 수심에서 거대박스코어(GKG)를 이용하여 획득하였다. GKG 코어를 이용하여 23 cm에서 43 cm 길이의 퇴적물을 획득하였다. 코어 PS87/023-2와 PS87/076-2는 물이 포화된 퇴적물이 심하게 교란된 반면, 다른 18개의 박스코어에서 얻은 퇴적물은 대부분 비교란 상태로 양호한 상태였다(그림 3-11).

모든 GKG의 표층 퇴적물 상태를 사진 촬영하였다. 표층 퇴적물 특성은 시료를 채취하기 전에 모두 기재하였다(표 3-1). 표면퇴적물(0-1 cm)과 코어의 색은 Munsell Colour Chart (1954)를 이용하여 기재하였다. 습식 bulk 밀도, P파 속도, 대자율의 측정은 절개하지 않은 부시료를 1 cm 간격으로 GEOTEK MSCL-14 (Multi Sensor Core Logger)를 이용하여 수행하였다. X-radiography 분석을 위해 슬랩(1x1x25 cm)을 제작하여 선상에서 X 선 촬영을 수행하

여 퇴적구조를 특성을 파악하고 빙산이나 유빙에 의해 운반된 쇄설성 퇴적물(IRD) 함량을 파악하였다.

표 3-1. 제 28/4차 ‘플라스틴’ 중앙 북극해 결빙해역탐사에서 획득한 표층퇴적물 특성 및 시추코어 정보 (Stein, 2015).

Description of O/GK surface sediments						
Station	Depth [m]	Location	Recovery [cm]	Colour	Lithologie	Remarks
PS87/003-1	1170	Noygaard Ridge	34	dark greyish brown (10 YR 4/2)	silty clay, gravel	polychaetes, ophiurid
PS87/023-2	2439	Lomonosov Ridge (Amundsen Basin)	36	dark brown (10 YR 3/3)	silty clay, sand admixture, dropstones up to 12 cm Ø	bivalve shells, organisms living on stones, surface disturbed
PS87/026-1	3339	Lomonosov Ridge (Amundsen Basin)	40	very dark greyish brown (10 YR 3/2)	silty clay	Water-saturated, bivalve shells
PS87/029-1	2901	Lomonosov Ridge (Amundsen Basin)	41	dark brown (10 YR 3/2)	silty clay, sand admixture	fragment of calcareous shell
PS87/030-2	1276	Lomonosov Ridge (Amundsen Basin)	36	dark brown (10 YR 3/3)	silty clay, sand admixture	water-saturated polychaets, bivalva shells, gastropod shells, dropstones with remains of organisms on the surface, dropstones up to 6 cm Ø, clasts of biogenic ooze?
PS87/035-2	-	Lomonosov Ridge (Amundsen Basin)	-	-	-	-
PS87/040-2	2618	Lomonosov Ridge (Lirnebasi)	37	dark brown (10 YR 3/3)	silty clay, some sand	water-saturated, fragments of shells
PS87/055-1	730	Lomonosov Ridge (central)	39	dark brown (10 YR 3/3)	silty clay	polychaets, bivalve brachiopod shells
PS87/056-2	836	Lomonosov Ridge (central)	40	dark brown (10 YR 3/3)	silty clay with some sand	rich fauna: polychaets, bivalve, gastropod scaphopod and brachiopod shells
PS87/067-2	2657	Lomonosov Ridge (Makatov Basin)	37	dark brown (10 YR 3/3)	silty clay, some sand	very soft, bivalve shells, foraminifers, bioturbated (worm traces, clast)
PS87/068-2	2711	Lomonosov Ridge (Makatov Basin)	23	dark brown (10 YR 3/3)	silty clay, some sand	mud clasts, bivalve shells up to 1.5 cm Ø, polychaets
PS87/070-2	1340	Lomonosov Ridge (central)	42	dark brown (10 YR 3/3)	silty clay, some sand	water-saturated, sea cucumber, shell half
PS87/074-1	2616	Lomonosov Ridge (Makatov Basin)	36	dark brown (10 YR 3/3)	silty clay, sand admixture	water-saturated, mud clasts, sponges, gastropod shells, foraminifers
PS87/076-2	2763	Lomonosov Ridge (Makatov Basin)	37	dark greyish brown (10 YR 3/2)	silty clay, some sand	mud clasts, shells, surface and sediment core disturbed by coring
PS87/079-2	1350	Lomonosov Ridge (central)	43	dark brown (10 YR 3/3)	silty clay, some sand	mud clasts, shells, bivalve shells, polychaets, foraminifers, copepods, fragments of other shells up to 2 cm Ø
PS87/086-1	901	Lomonosov Ridge (central)	36	dark brown (10 YR 3/3)	silty clay, very small amount of sand	water-saturated, polychaets, Bivalva (shell halves)
PS87/089-3	741	Lomonosov Ridge (Makatov Basin)	36.5	dark brown (10 YR 3/3)	silty clay, some sand	water-saturated, polychaets, shell fragments
PS87/100-1	951	Lomonosov Ridge (Makatov Basin)	39	dark brown (10 YR 3/3)	silty clay, some sand	Water-saturated, polychaets, shell up to 4 cm Ø
PS87/109-4	1303	Lomonosov Ridge (central)	37	dark brown (10 YR 3/2)	silty clay, some sand	Water-saturated, polychaets, shell halves

표면 퇴적물의 채취에는 100 ml 박스를 이용하였다. 조립입자(> 63 μm)는 습식 채질의 방법을 이용하여 분리하였다. 예비조사에서 조립입자 분석의 결과는 그림 3.11에 요약하였다. 표면 시료의 모래입자(>63 μm)의 구성성분은 그림 3-11에 도시하였다. 비 생물기원의 입자는 대부분 로모노소프 해령 해역에는 나타나지 않는다. 광물의 가장 높은 함량은 아마도 대륙붕으로부터 많은 육상물질의 유입을 반영하는 북부 그린란드나 러시아 해역에 인접한 정점에서 주로 관찰되며 석영이나 암석 파편은 사면에서 가장 풍부하게 나타난다(그림 3-11). 생물기원 입자는 대다수 정점에서 우세하게 나타나며 주로 부유성이나 저서성 유공충으로 구성되어 있다(그림 3-11). 선상에서 수행된 모든 예비결과는 독일 AWI의 PANGAEA database에 저장하였다.

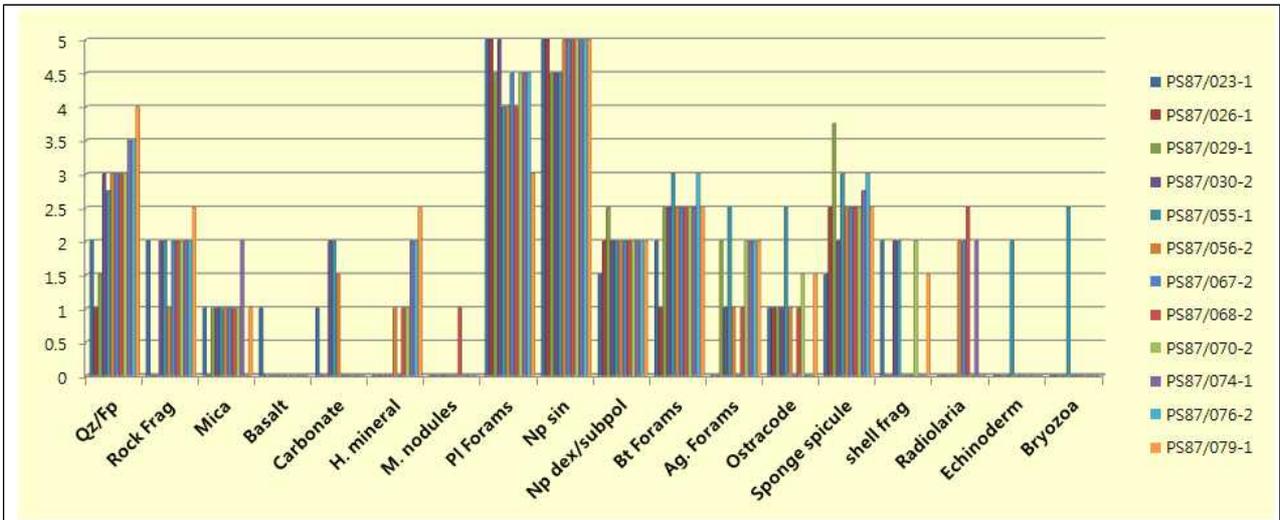


그림 3-11. 로모노소프 해령을 횡단하여 획득한 박스코어의 표층퇴적물을 습식 체질하여 현미경으로 사질입자의 구성성분을 관찰하여 얻은 정성적 자료로써, 로모노소프 해령 표층퇴적물에는 부유성 유공충이 우점하게 산출되는 양상을 보인다.

## (2) 제 28/4차 시추 코어 퇴적물의 주요한 퇴적물 특성과 예비 암층서

제 28/4차 북극해 탐사(PS87) 동안, 총 43점의 퇴적물 코어를 획득하였다. 일부 코어는 선상에서 MSCL 분석 후 절개하여 퇴적물의 주요 암질을 기재하고 XRF 코어 스캐닝 분석을 추진한 후 부시료를 채취하였다(그림 3-12). 본 보고서에서는 선상에서 수행된 두 점의 시추코어 ( PS87/023-1과 PS87/030-1)에 대한 예비결과를 아래에 소개하였다(Stein, 2015).

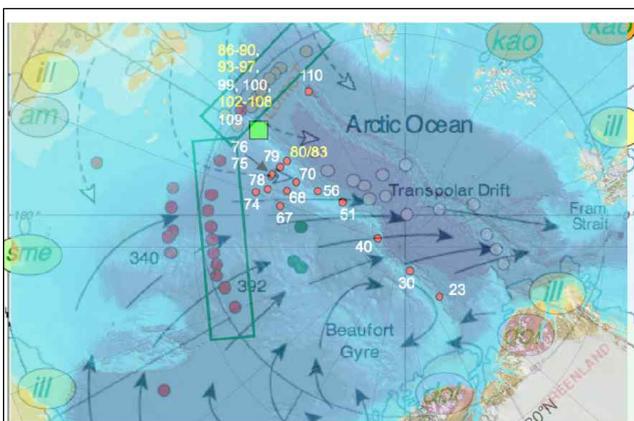


그림 3-12. MSCL을 이용하여 현장에서 분석한 습윤밀도와 대자율 값을 XRF 코어스캐너를 이용해 얻은 색상 이미지뿐 아니라 퇴적물의 사질 퇴적물입자 구성 성분과 잘 대비된다. 하늘색은 빙하기를 나타낸다.

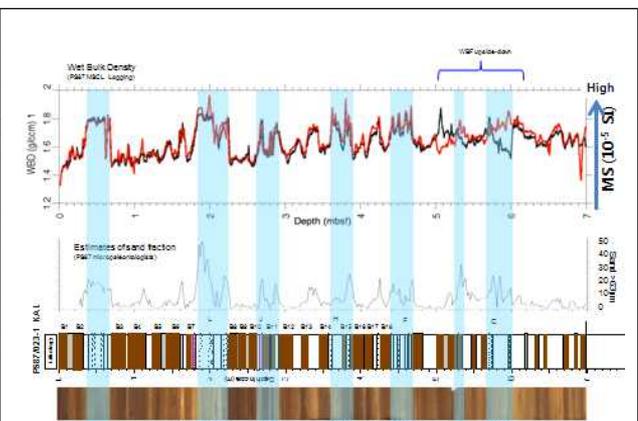


그림 3-13. MSCL을 이용하여 현장에서 분석한 습윤밀도와 대자율 값을 XRF 코어스캐너를 이용해 얻은 색상 이미지뿐 아니라 퇴적물의 사질 퇴적물입자 구성 성분과 잘 대비된다. 하늘색은 빙하기를 나타낸다.

코어 PS87/023-1과 PS87/030-1은 그린란드와 캐나다 측의 로모노소프 해령에서 획득하였기

때문에 보퍼드환류(Beaufort Gyre)의 영향을 받는 해역이다(그림 3-12). 따라서 코어 퇴적물은 브라운색과 짙은 브라운색 및 베이지 색을 띠는 실트질 니질 퇴적물로 구성되어 있으면 부분적으로 몇 개의 뚜렷한 사질층이 사이에 나타난다(그림 3-13). 특히 사질퇴적층이 나타나는 구간은 전밀도(bulk density) 값이 증가하는 구간과 잘 일치하며 주로 빙하기 때 퇴적된 것으로 보인다(그림 3-13, 3-14a, b). 또한 북극 캐나다 군도에 위치한 뱅크섬(Banks Island) 지역에서 빙산에 의해 보퍼트 환류를 따라 운반되어 퇴적된 핑크/베이지 색의 층이 간헐적으로 나타난다(Clark et al., 1980; Stein et al., 2010a, b; Stein, 2015) (그림 3-14a, b). 특히 코어 PS87/023-1과 PS87/030-1의 연대는 북극해 시추코어 퇴적물 층서대비에 주로 활용하고 있는 MSCL 자료와 망간함량이 높은 브라운 층 및 돌로마이트/탄산염 빙퇴적물의 산출 시기 등을 이용하여 설정하였다(그림 3-14a, b). 두 코어의 연대는 대략 MIS 19인 약 790 ka 이후 북극해에서 일어난 빙하기-간빙기의 기후변화 기록이 비교적 잘 보존되어 퇴적된 것으로 추정된다(Stein, 2015).

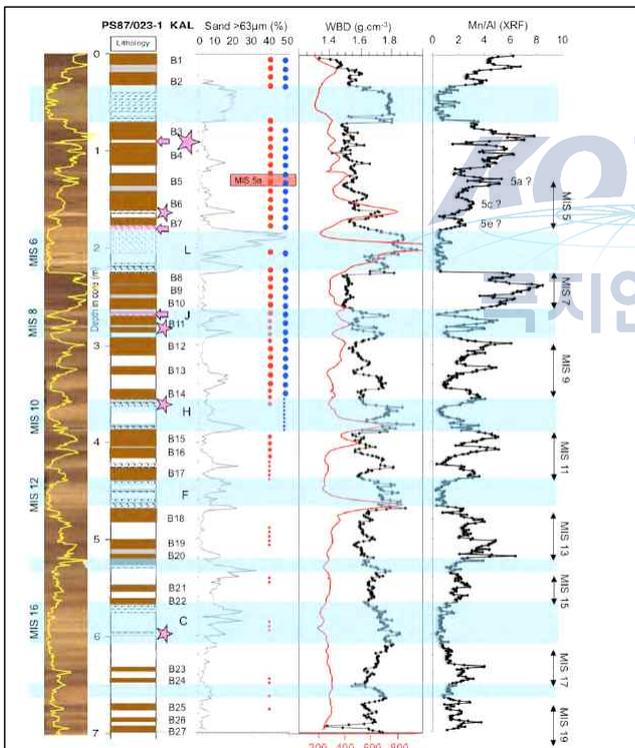


그림 3-14a. 그린란드/캐나다에 인접한 로모노소프 해령에서 획득한 대형박스코어(KAL)의 퇴적물 코어 PS87/023-1(약 7 m)은 베이지 색이나 회백색을 띠는 빙하기 층(옅은 하늘색)과 브라운색을 띠는 간빙기에 퇴적된 층이 뚜렷하게 구분된다. 캐나다군도에서 운반되어 퇴적층 핑크색의 탄산염질의 빙하퇴적물이 간헐적으로 나타난다. 전밀도 값과 대자율 값이 높게 나타나는 층은 빙하기 때 쌓인 빙하퇴적물이 우세하다.

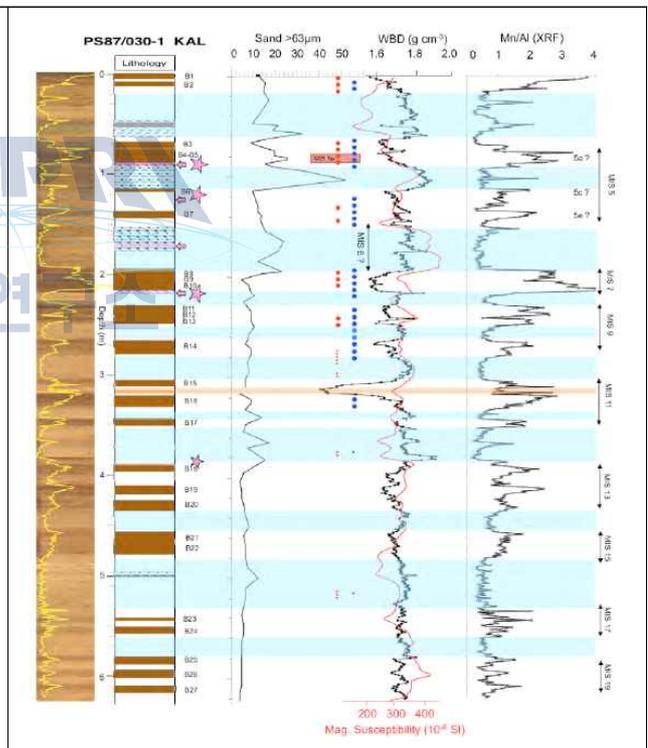


그림 3-14b. 그린란드/캐나다에 인접한 로모노소프 해령에서 획득한 대형박스코어(KAL)의 퇴적물 코어 PS87/030-1(약 6.3 m)은 베이지 색이나 회백색을 띠는 빙하기 층(옅은 하늘색)과 브라운색을 띠는 간빙기에 퇴적된 층이 뚜렷하게 구분된다. 캐나다군도에서 운반되어 퇴적층 핑크색의 탄산염질의 빙하퇴적물이 간헐적으로 나타난다. 전밀도 값과 대자율 값이 높게 나타나는 층은 빙하기 때 쌓인 빙하퇴적물이 우세하다.

### (3) 시추 코어 퇴적물의 주요 특성성분

북극해 퇴적물을 구성하고 있는 성분은 주로 표층생산성, 빙산이나 유빙에 의해 운반되어 퇴적되는 빙퇴적물(IRD), 주변의 수심이 낮은 대륙붕에서 빙산, 유빙 또는 해류에 운반되어 퇴적되는 재동된 퇴적물 유입과 밀접하게 관련된다(Stein, 2008). 해수면이 현재보다 낮았던 빙하기 때에는 주로 주변 대륙에 존재했던 대규모 대륙빙상에서 떨어져 나온 빙산이나 유빙에 의해 운반되어 퇴적된 육상기원 빙하퇴적물이 우세하게 퇴적된다. 또한 빙하기 동안 두꺼운 해빙으로 덮여있던 북극해의 표층생산력이 낮고 대륙붕 주변해역에서 계절적으로 해빙이 감소하는 시기에 매우 제한적으로 생산 활동이 일어나기 때문에 생물기원 퇴적물 유입이 매우 낮게 나타난다(Stein, 2008). 반대로 해수면이 상승하는 간빙기에는 여름철에 해빙이 감소하여 해양에 투과되는 빛이 증가하기 때문에 표층에서 1차 생산 활동이 일어난 결과 상대적으로 생물기원의 탄산염질 패각으로 이루어지 부유성 유공충의 생산력이 증가하여 많은 양이 퇴적물에 산출된다.

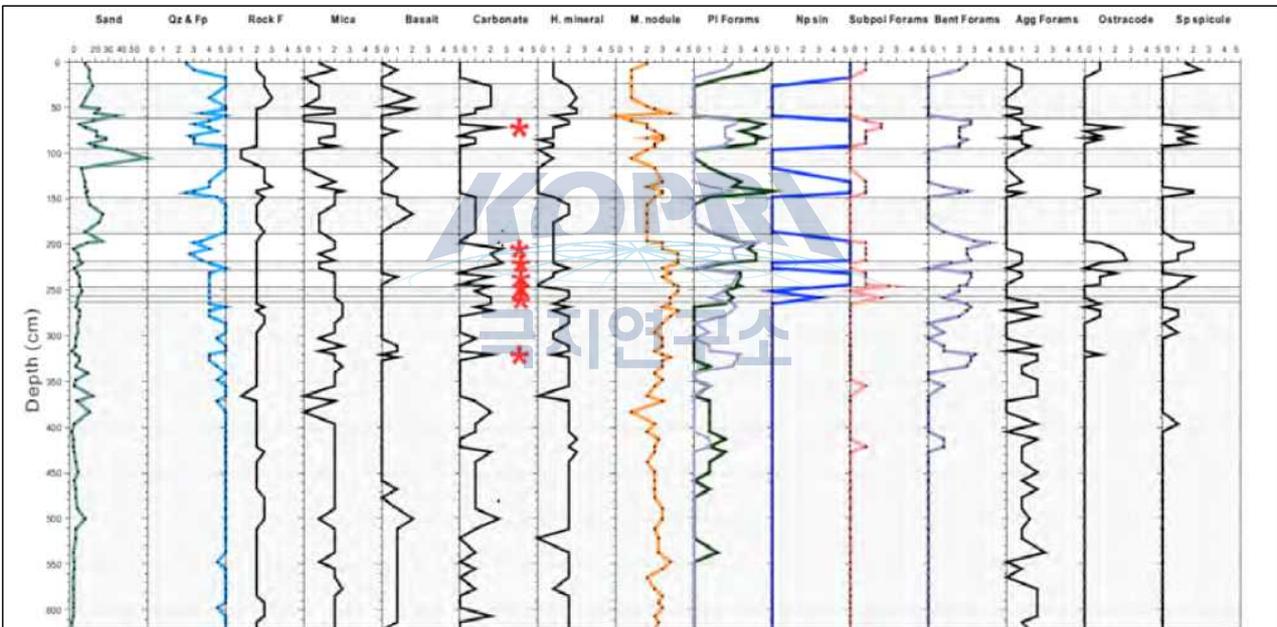


그림 3-16. 그린란드와 캐나다에 인접한 로모노소프 해령을 횡단하여 획득한 대형박스코어의 퇴적물 코어(약 6.2 m) PS87/030-1을 습식 체질하여 현미경으로 사질입자의 구성성분을 관찰하여 얻은 정성적 자료이며, 로모노소프 해령 퇴적물에는 약 2.7 m 깊이까지 부유성 유공충이 풍부하게 산출되는 양상을 보인다.

북극해 퇴적물을 구성하고 있는 생물기원 입자는 주로 탄산염질, 규질 및 유기질 미화석이다. 그 중에서 퇴적층에 산출되는 생물기원 탄산염 패각으로 이루어진 미화석은 유공충, 개형충, 조개류 및 인편모충 등이 있다. 일반적으로 북극해의 생물기원 퇴적물은 수괴 특성, 해빙 여부 및 표층생산력과 밀접한 관계가 있다(Polyak et al., 2013). 또한 수심, 퇴적율, 매물(preservation) 및 용해도 등도 생물기원 퇴적물의 보존에 중요한 변수가 된다. 중앙 결빙해역에

퇴적되는 육상기원의 빙퇴적물은 주로 빙산이나 유빙에 의해 운반되어 퇴적되며 대륙붕 주변 해역에는 대규모 강에 의해 운반되어 유입된 육상기원 퇴적물이 주로 집적된다. 북극해 퇴적물에 특징적으로 나타나는 브라운 층에는 자생기원의 입자가 작은 망간 노듈이 간빙기나 아간빙기 또는 빙하기에서 간빙기로 전이되는 해빙기에 주로 나타난다(Maerz et al., 2011). 탐사기간 동안 시추된 일부 퇴적물 코어를 선정하여 >63 $\mu$ m 체를 이용하여 습식 체질 후 건조하여 현미경을 이용하여 퇴적물 구성입자를 관찰하였다.

그린란드와 캐나다에 인접한 로모노소프 해령에서 시추된 코어 PS87/030-1의 사질 퇴적물은 육상기원의 규질쇄설성(siliciclastic), 생물기원 및 자생기원 퇴적물로 구성되어 있다. 육상기원 퇴적물은 주로 석영/장석, 암편, 운모, 탄산염광물, 현무암질과 중광물류로 구성되어 있다(그림 3.16). 생물기원 사질 입자는 탄산염 패각으로 이루어진 부유성 및 저서성 유공충, 교질 저서성 유공충, 개형충, 이매패류, 방산충과 해면동물 골격으로 이루어진 생물기원 오팔(biogenic opal)로 이루어졌다. 자생기원 퇴적물은 망간이 주를 이루며 부분적으로 자생기원 탄산염 입자가 관찰되었다(그림 3-16).

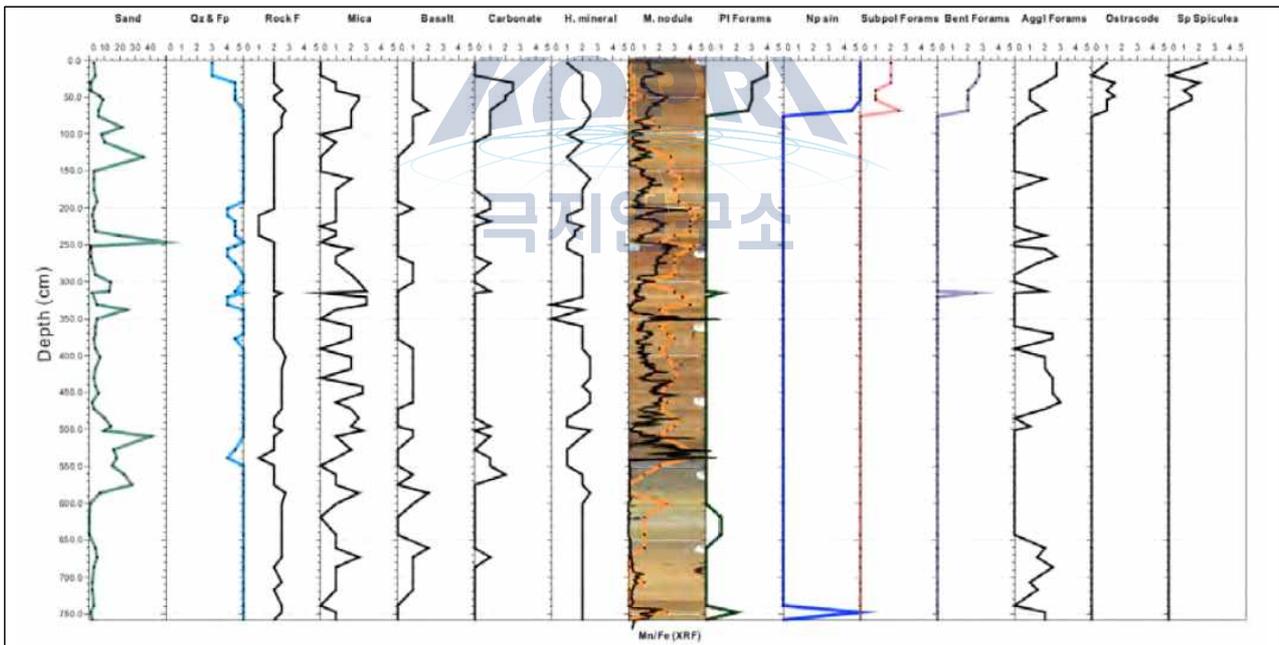


그림 3-17. 러시아 해역에 인접한 로모노소프 해령을 횡단하여 획득한 대형박스코어의 퇴적물코어 (약 7.6 m) PS87/070-1을 습식 체질하여 현미경으로 사질입자의 구성성분을 관찰하여 얻은 정성적 자료로서 러시아 해역에 인접한 로모노소프 해령 퇴적물에는 약 0.7 m 깊이까지 부유성 유공충이 소량 산출되고 그 이하에서는 거의 산출되지 않으며 육상기원의 석영/장석류 퇴적물이 매우 우세하게 퇴적되어 있다.

러시아 해역에 인접한 로모노소프 해령에서 시추된 코어 PS87/070-1의 사질 퇴적물 성분은 그린란드와 캐나다에 인접한 로모노소프 해령에서 시추된 퇴적물과는 전혀 다른 양상을 보인다

(그림 3-17). 특히 표층에서 상부 70 cm 깊이까지 매우 적은 양의 부유성 유공충이 산출되는 반면, 대부분 석영/장석, 운모류 및 암편이 우세하게 산출된다. 교질 성분의 저서성 유공충은 일부 구간에서 산출된다. 특히 작은 크기의 망간입자가 큰 폭의 변화를 보이며 산출되고 XRF 코어 스캐닝 분석을 통해 얻은 Mn/Fe 값과 잘 일치한다(그림 3-17).

#### (4) 제 3기 퇴적물 시추 코어의 특성

앞에서도 언급한 것처럼 제 28/4차 ‘폴라스틴’ 북극해 중앙해역 및 로모노소프 해령 중단 탐사의 주요 목적 중 하나는 오랜 지질시대를 통해 진행되고 있는 북극해 기후변화가 기록된 고기퇴적층인 중생대와 제 3기층을 발견하여 시추하여 따뜻했던 그린하우스 조건에서 한랭한 빙하하위 기후환경 조건으로 변화하는 진화 역사를 규명하는 것이었다. 이미 4점의 비교적 짧은 고기퇴적층이 획득된 알파 해령 탐사를 계획하였으나 두꺼운 다년빙에 막혀 계획을 수정하여 2018년 IODP 시추가 계획된 러시아 해역으로 뻗어있는 로모노소프 해령에서 고기퇴적층을 탐사를 중점적으로 추진하였다. 특히 북극점을 지나 유라시아 대륙 방향으로 뻗은 해령을 정밀하게 탐사하는 동안 해령의 사면에서 대규모로 일어난 사면사태(large-scale slide scars & mega-slides)가 일어나 두 지역을 발견하였다(그림 3-18). 두 지역에서 제 4기 이전에 퇴적된 것으로 추정되는 고기퇴적층을 획득하기 위하여 중력 코어를 이용하였다. 시추 정점은 심부 탄성파탐사 자료와 parasound 천부지층탐사 자료를 이용하여 선정하였으며, 특히 고기퇴적층으로 판단되는 지층은 로모노소프 해령의 가파른 경사면에 노출되어 있어 보다 정확한 시추정점에서 시추를 위해 특별한 음향 핑거(acoustic pinger)인 “Posidonia” 시스템을 이용하였다(그림 3-19).

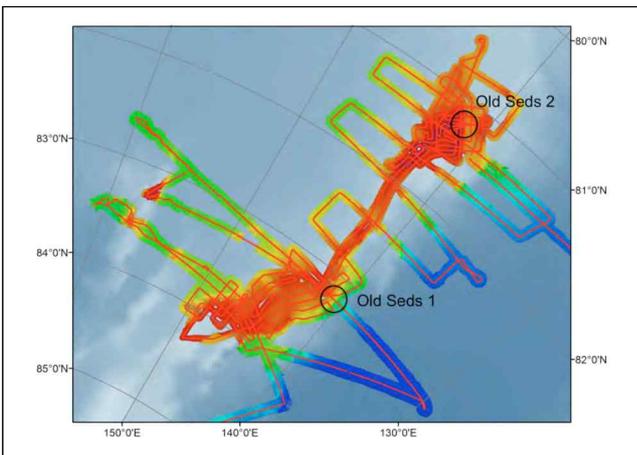


그림 3-18. 북극점을 지나 유라시아 대륙을 향해 뻗어있는 로모노소프 남부해령에서 심부지층탐사 라인과 제 3기 고기퇴적층을 발견한 두 지역을 나타낸다(Stein, 2015).

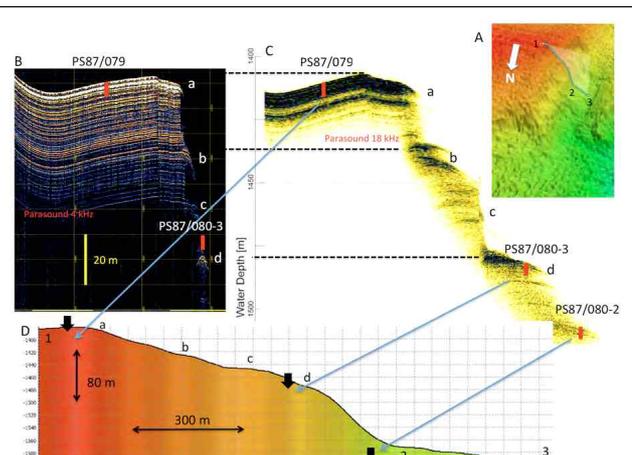


그림 3-19. 로모노소프 남부해령에서 제 3기 퇴적층을 발견한 정점에서 중력코어를 이용하여 총 16점의 시추코어를 획득하였다(Stein, 2015).

Parasound 자료에 의해 고기퇴적층(old sediments 1)으로 파악되는 해역(83°12.25'N, 141°E)에서 총 4개의 시추코어(PS87/080-1 to PS87/080-4)를 획득하였다(Stein, 2015) (그림 3-19). 로모노소프 정상에서 시추하여 기준(reference)으로 이용한 코어 PS87/079-1은 MIS 6/7?에서 홀로세인 MIS 1의 퇴적층이 연속적인 기록을 보인다. 그러나 코어 PS87/080-3의 2 m 하부는 암상의 특성을 관찰해 보면 일부 미세한 단층면과 여러 개의 부정합면(H?)이 나타나고 비교적 고화된 특징을 보이는 고기 퇴적층으로 추정된다(그림 3-20). 2m 상부에 나타나는 부정합면은 MIS 5d로 추정되며 그 당시 존재하였던 거대한 동시베리아 빙하에 의해 형성된 것으로 추정된다(Niessen et al., 2013; Stein, 2015) (그림 3-20). 그러나 고기퇴적층이라고 추정되는 시추코어는 다양한 분석방법을 통해 연대 설정을 통해 보다 정확한 시대를 바탕으로 퇴적당시 북극해에서 일어난 환경변화와 빙하작용을 복원할 수 있을 것이다.

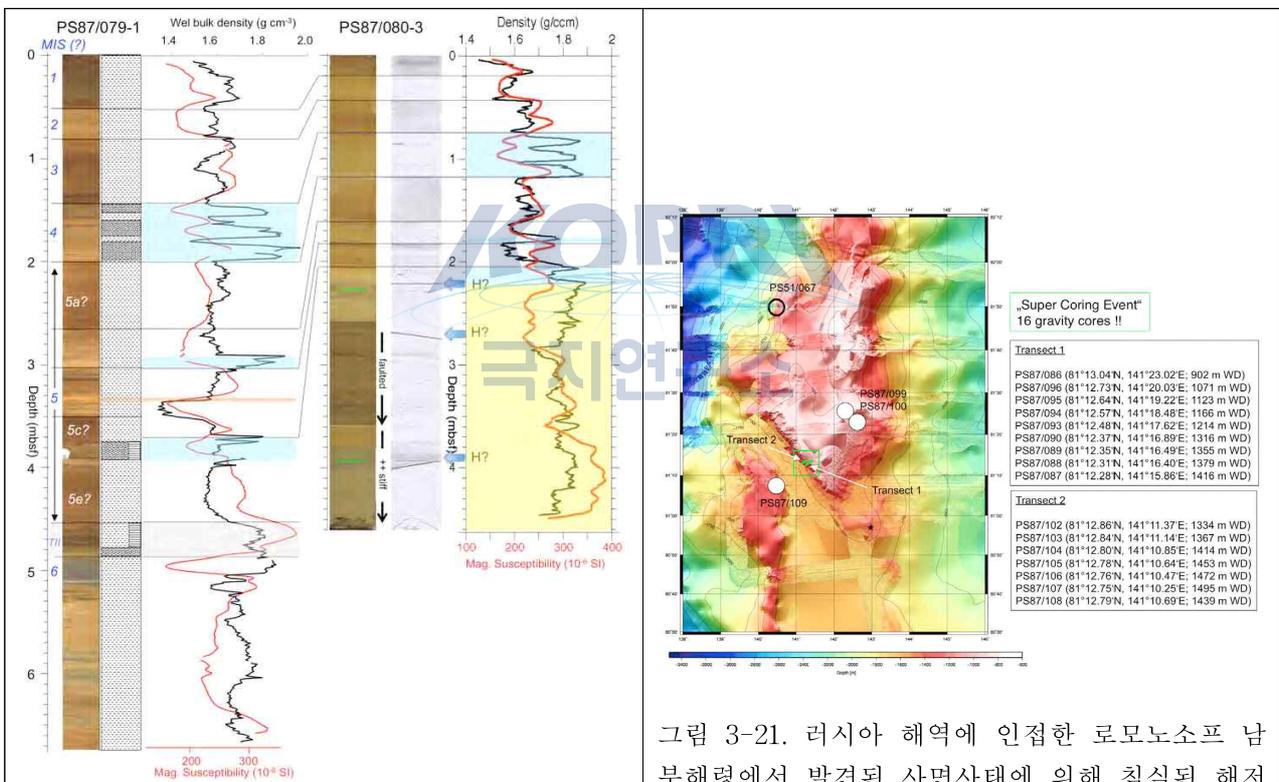
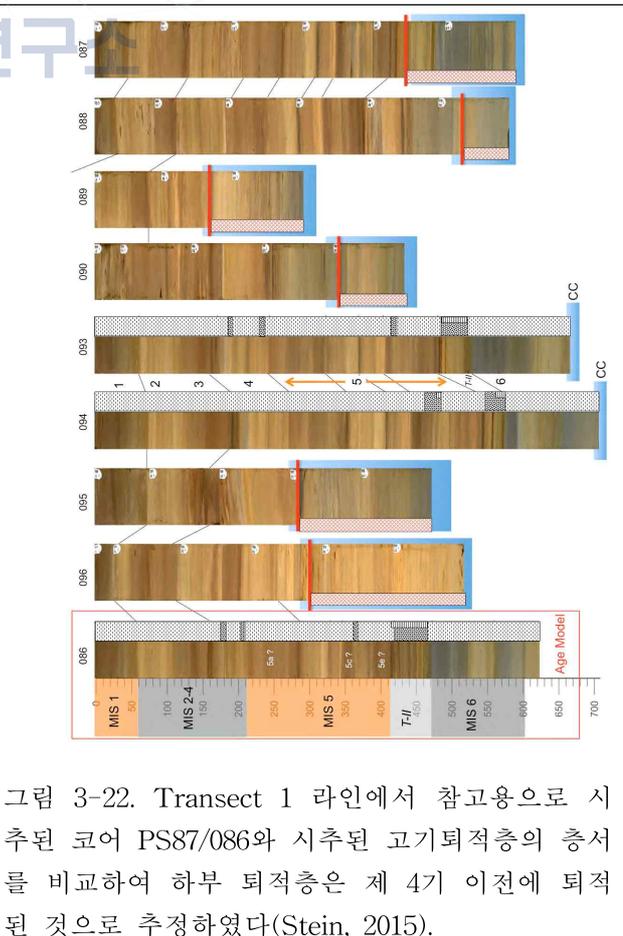
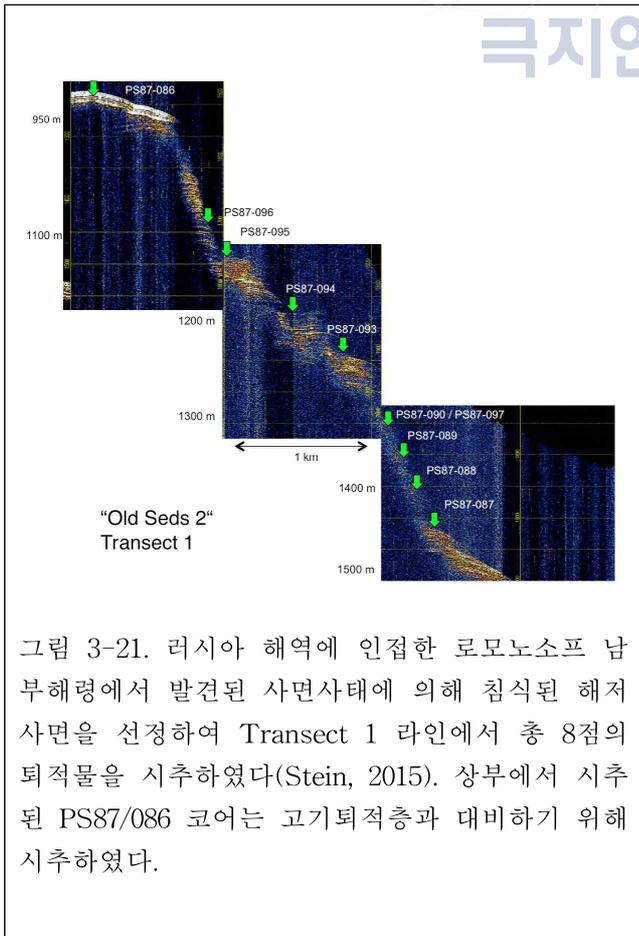


그림 3-20. 로모노소프 남부해령에서 제 3기 퇴적층을 발견한 정점에서 중력코어(PS87/080-3)와 인접해역에서 기준(reference)이 되는 자료로 사용하기 위해 시추된 코어(PS87/079-1)의 XRF 라인 스캔 이미지와 코어 기재 및 전밀도와 대자율 값을 이용하여 대비하여 코어(PS87/080-3)의 2 m 이하 하부 층이 고기퇴적층으로 추정되었다. 코어 PS87/080-3의 2 m 이하 하부에 표시된 녹색 띠는 부분적으로 고화된 층으로 나타난다(Stein, 2015).

그림 3-21. 러시아 해역에 인접한 로모노소프 남부해령에서 발견된 사면사태에 의해 침식된 해저 지형 특징과 고기퇴적층으로 추정되는 지역(녹색 상자)으로 제 3기 퇴적층을 획득하기 위해 두 개의 사면사태가 일어난 라인에서 총 16점의 퇴적물을 시추하였다. PS51/067 코어는 제14/1a차 ‘플라스토인’ 북극탐사에서 시추된 퇴적물 위치를 나타낸다(Jokat et al., 1999; Stein, 2015).

수심 900 m에서 1400 m 이상의 해령 사면에서 빙하에 의해 침식작용으로 추정되는 사면사퇴에 의해 고기퇴적층이 노출 된 것으로 판단되는 두 번째 조사해역(old sediments 2) (81°25'N, 140°E와 81°05'N, 142°E)에서 정밀한 해저지형탐사를 수행한 후 시추 라인과 정점을 선정하여 수심이 1071~1416 m의 Transect 1 라인에서 총 8점(PS87/086 to PS87/096)을 시추한 반면, 수심 1334~1439 m인 Transect 2 라인에서는 총 7점(PS87/102 to PS87/108)의 고기퇴적층을 시추하였다(그림 3-21). Transect 1에서에 참고용으로 이용 될 원양성 퇴적물(pelagic sediment)의 특징을 보이는 교란되지 않은 코어 PS87/086을 로모노소프 해령 정상(수심 902 m)에서 시추하였다(그림 3-21). 암상과 퇴적물성 자료에 의하면 참고용 코어 PS87/086은 MIS 6이후 홀로세까지 연속적으로 퇴적된 것으로 보이는 반면, 경사가 급격한 사면에서 시추된 고기퇴적층의 하부 층에서 대부분 연속적이지 않은 고결된 층이 관찰된다(그림 3-22). 이렇게 나타나는 불연속적인 층은 주로 MIS 6이나 5d에 형성된 부정합면 판단된다. 부정합면은 암상뿐 아니라 물성 자료에도 잘 나타난다. 또한 고기퇴적층이 획득 된 것으로 판단되는 코어 PS87/093과 PS87/094의 최하부인 코어 캐처(core catcher)의 퇴적물에서 후기 마이오세(late Miocene)로 추정되는 교질의 저서성 유공충이 부분적으로 산출되었다(Stein, 2015). 그러나 보다 정확한 층서정립과 퇴적물에서 다양한 분석방법을 통해 향후 추진 될 계획이다.



## 2. 2015 ‘아라온’ 서북극 척치해-동시베리아 탐사(ARA06C) 예비결과

### 가. 탐사목적

2015년 쇄빙연구선 ‘아라온’ 서북극해 탐사 목적은 거대빙하가 존재 하였던 것으로 추정되는 동시베리아 대륙붕 해역과 척치해 주변해역에서 최초로 JPC코어를 이용하여 교란되지 않고 길이가 비교적 긴 10 m 이상의 시추코어를 획득하는데 있었다.

### 나. 탐사해역 및 방법

탐사해역은 척치해 대륙붕해역, 척치 심해분지, 노스윈드 분지 및 동시베리아 대륙붕 해역으로 멀티빔을 이용한 해저지형 탐사를 수행하였으며 SBP를 이용한 천부지층 탐사 자료를 획득하였다. 또한 탐사에 참여한 한국지질자원연구원 강무희 박사팀은 스파커를 이용하여 동시베리아 대륙붕과 척치해 대륙붕해역에서 천부지층탐사자료를 취득하였다. 탐사 동안 적용된 방법은 아래와 같다:

- 쇄빙연구선 ‘아라온’에 선상에서 멀티, 박스, 중력, JPC 코어 기기를 이용한 해저시추코어 획득 및 실험실에서 퇴적물 시료 채취/처리
- 멀티빔을 이용한 해저지형자료획득 및 SBP와 Sparker를 이용한 천부탄성파탐사자료 획득
- CTD 이용한 JPC 시추코어 정점에서 선정된 수심별 해수채취

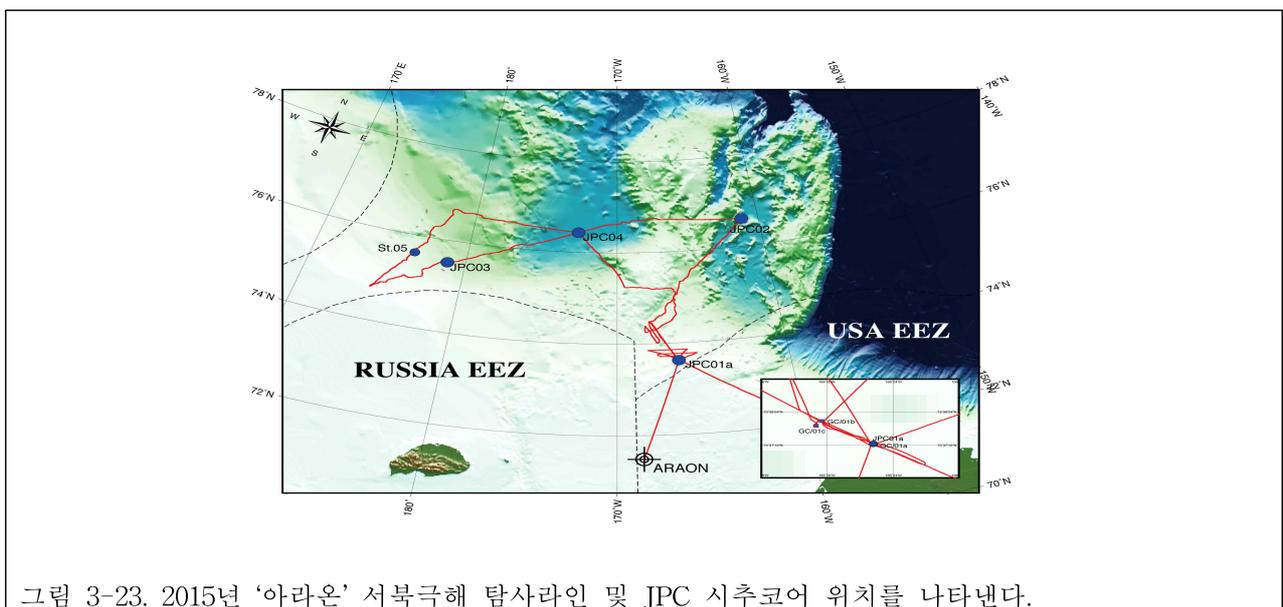


그림 3-23. 2015년 ‘아라온’ 서북극해 탐사라인 및 JPC 시추코어 위치를 나타낸다.

#### 다. 탐사 예비결과

약 2주간 수행된 2015 ‘아라온’ 서북극해 탐사에서 수행한 예비결과는 아래와 같다:

- 총 2,467 nm (3,947 km) 탐사를 통해 Multibeam을 이용한 천부지형과 SBP를 이용하여 천부지층탐사자료획득(그림 3-23)
- 한국지질자원과 공동으로 동시베리아 대륙붕과 척치해 대륙붕 해역에서 약 400 km Sparker 탐사 : 그 동안 알려지지 않은 빙하존재 증거 확보(그림 3-24a, b)
- 총 4 정점에서 CTD/XCTD 자료획득
- 총 42.96 m 길이의 JPC 퇴적물 코어를 4정점에서 획득하여 서북극해에서 80만년 이후 빙하역사 및 고기후환경변화 복원 연구를 위해 총 4정점을 선정하여 수심 약 100 ~ 2200 m에서 빙·해양 퇴적물 코어를 최초로 확보함
- 척치해 천부 대륙붕 해역에서 총 16.37 m의 퇴적물 코어를 3정점에서 획득 (표 3-4)
- 총 7 점의 박스(BOX) 코어(표 3-2)와 6 점의 멀티코어(MUC) (표 3-3)를 획득

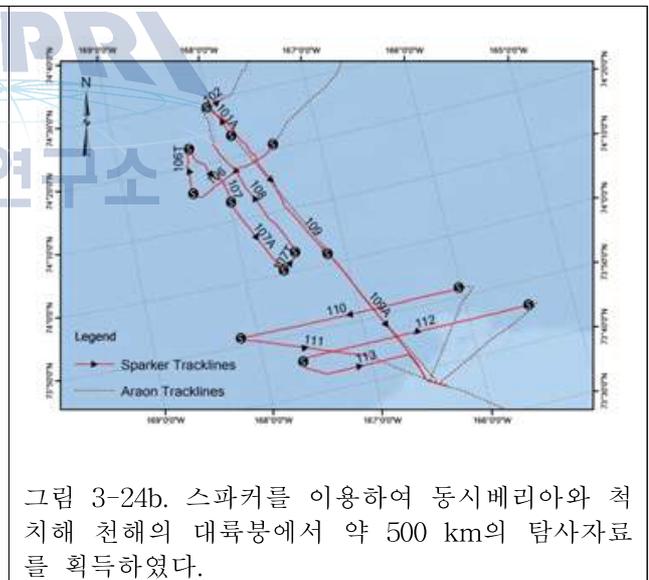
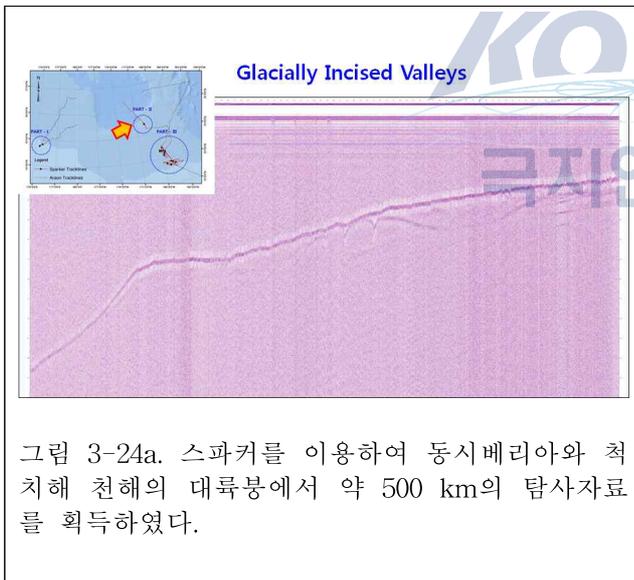




그림 3-25. 박스코어를 이용하여 약 28~45 cm 길이의 표층퇴적물을 채취하였다.

표 3-2. 2015 '아라온' 서북극해 탐사 동안 획득한 박스코어 시료

Stations	Water depth (m)	Recovery (cm)	Number of sediment cores
01A-BOX	99.5	39	3
01B-BOX	104	44	3
01C-BOX	104	45	3
02-BOX	2077	30	2
03-BOX	715	29	2
04-BOX	2200	33	3
05-BOX	346	28	3

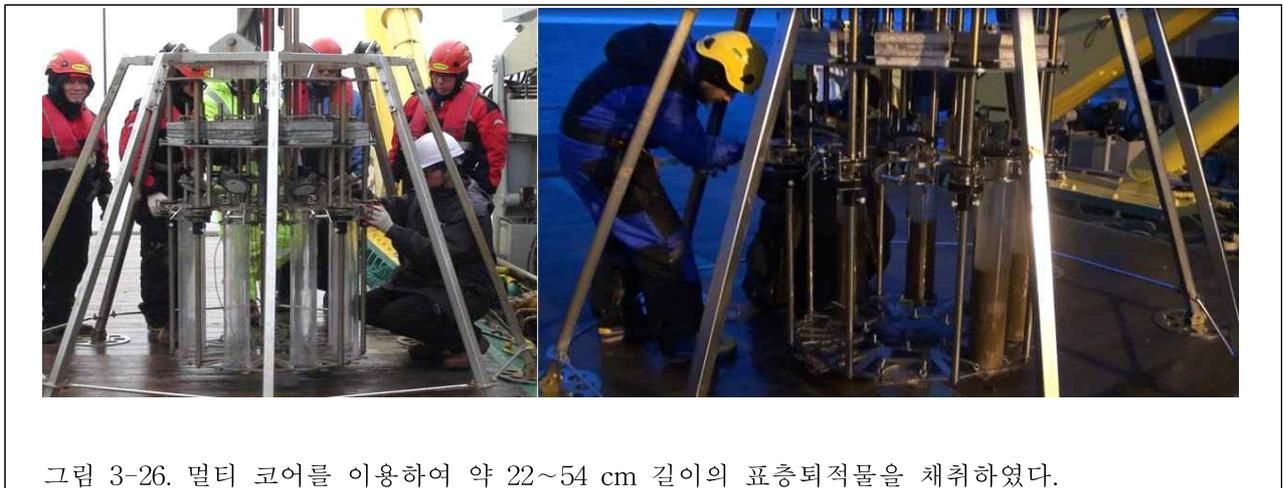


그림 3-26. 멀티 코어를 이용하여 약 22~54 cm 길이의 표층퇴적물을 채취하였다.

표 3-3. 2015 ‘아라온’ 서북극해 탐사 동안 획득한 멀티코어 시료

Station	Water depth (m)	Recovery (cm)	Number of sediment cores
01A-MUC	99.5	25	8
01Aa-MUC	100	54	4
01B-MUC	104	33	8
02-MUC	2077	42	8
03-MUC	715	34	8
04-MUC	2200	22	8



그림 3-26. 중력 코어를 이용하여 척치해 대륙붕에서 약 5.5 m 길이의 퇴적물 코어를 3점 시추하였다.

표 3-4. 2015 ‘아라온’ 서북극해 탐사 동안 척치해 대륙붕에서 획득한 3점의 중력코어 퇴적물

Station	Water depth (m)	Recovery (cm)	Number of core sections
01Aa-GC	100	547	4
01Bb-GC	104	538.5	4
01C-GC	104	552	4

표 3-5. 2015 ‘아라온’ 서북극해 탐사 동안 척치해 대륙붕과 심해분지 및 동시베리아 대륙붕에서 획득한 4점의 JPC 시추코어 퇴적물

Station	Water depth (m)	Recovery (cm)	Number of core sections
01A-JPC	100	1040	7
02-JPCg	2077	737.5	5
03-JPC	673.4	1132.5	8
04-JPC	2200	1386	10





그림 3-27. 2015 '아라온' 서북극해 탐사에서 획득한 시추코어 퇴적물의 일부는 지질실험실에서 연구목적에 따라 퇴적물 시료를 채취하였다.



그림 3-28. 2015 '아라온' 서북극해 탐사에서 획득한 시추코어 퇴적물의 일부는 지질실험실에서 연구목적에 따라 절개 한 후 자세히 퇴적물의 특징을 기재하였다.

## 라. JPC 시추코어 예비 층서결과

2015년 수행된 ‘아라온 서북극해 탐사(ARA06C)’에서 획득한 JPC 시추코어 퇴적물은 선상에서 MSCL(코어 로깅) 분석을 통해 서북극해 주변 해역에서 획득된 다른 코어와 대비하여 예비 층서를 설정하였다. 동시베리아 대륙붕에서 획득한 ARA06C/03-JPC 코어는 2012년 ‘아라온 북극탐사(ARA03B) 동안 시추된 코어 ARA03B/27GC-03 등 여러 코어와 비교하였다(그림 3.29). 서로 인접한 해역에서 시추된 두 코어의 대자율(magnetic susceptibility)과 습윤 전밀도(wet bulk density) 분석 값의 대비를 통해 ARA06C/03-JPC 코어는 MIS 5.2? 또는 MIS 4 이후에 퇴적된 것으로 추정하였다. 특히 습윤전밀도 값과 대자율 값이 매우 높은 9 m 이하의 하부 층은 현장에서 절개하여 관찰한 결과 빙하작용에 의해 퇴적된 암회색의 빙퇴적층으로 밝혀졌다(그림 3.27a). 따라서 이 하부의 빙퇴적층은 Niessen et al. (2013)이 주장하였던 동시베리아 대륙붕해역에 존재하였던 거대빙하의 용빙작용에 의해 형성된 것으로 추정되며 시대는 MIS 4로 추정된다.

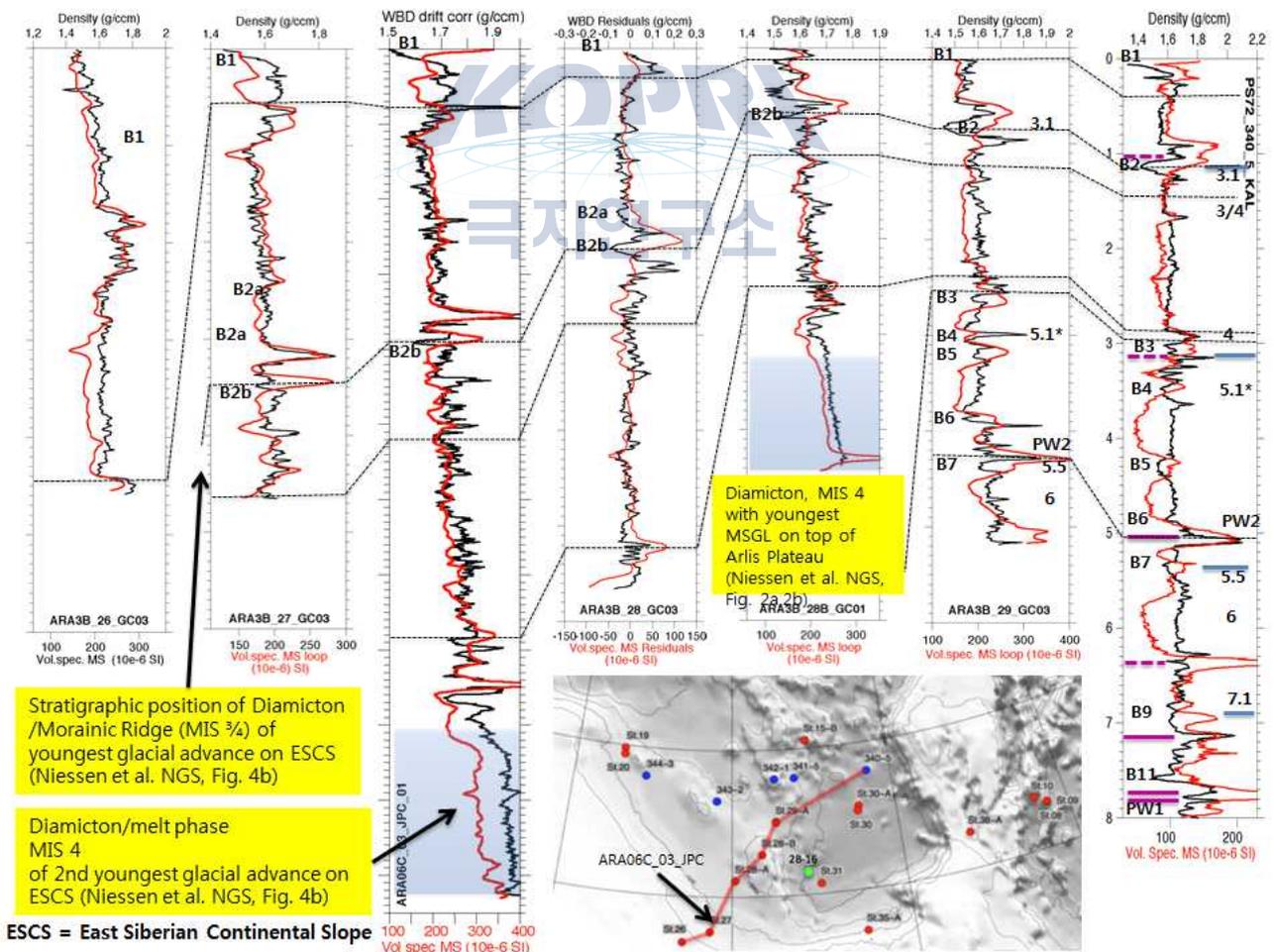


그림 3.29. ‘아라온’ 탐사 동안 장착하여 사용한 독일 AWI의 MSCL 장비를 이용하여 선상에서 퇴적물의 물성 분석을 통해 기존의 시추코어와 대비하여 예비 층서를 설정하였다.

수심 약 2200 m인 척치해 심해분지에서 획득한 JPC-04 시추 코어는 길이가 약 13.86 m로 지금까지 북극해 심해분지에서 획득한 최장의 빙·해양퇴적물 코어다. 선상에서 분석된 대자율과 습윤진 밀도 값을 이용하여 주변에서 획득된 기존의 시추코어 자료와 비교한 결과 약 50~60 만년 전 이후부터 퇴적된 것으로 추정된다(그림 3.30). 그러나 보다 정확한 연대는 유공충의 안정동위원소 비나 암상대비 및 다중 프록시를 이용하여 설정 되어야 한다.

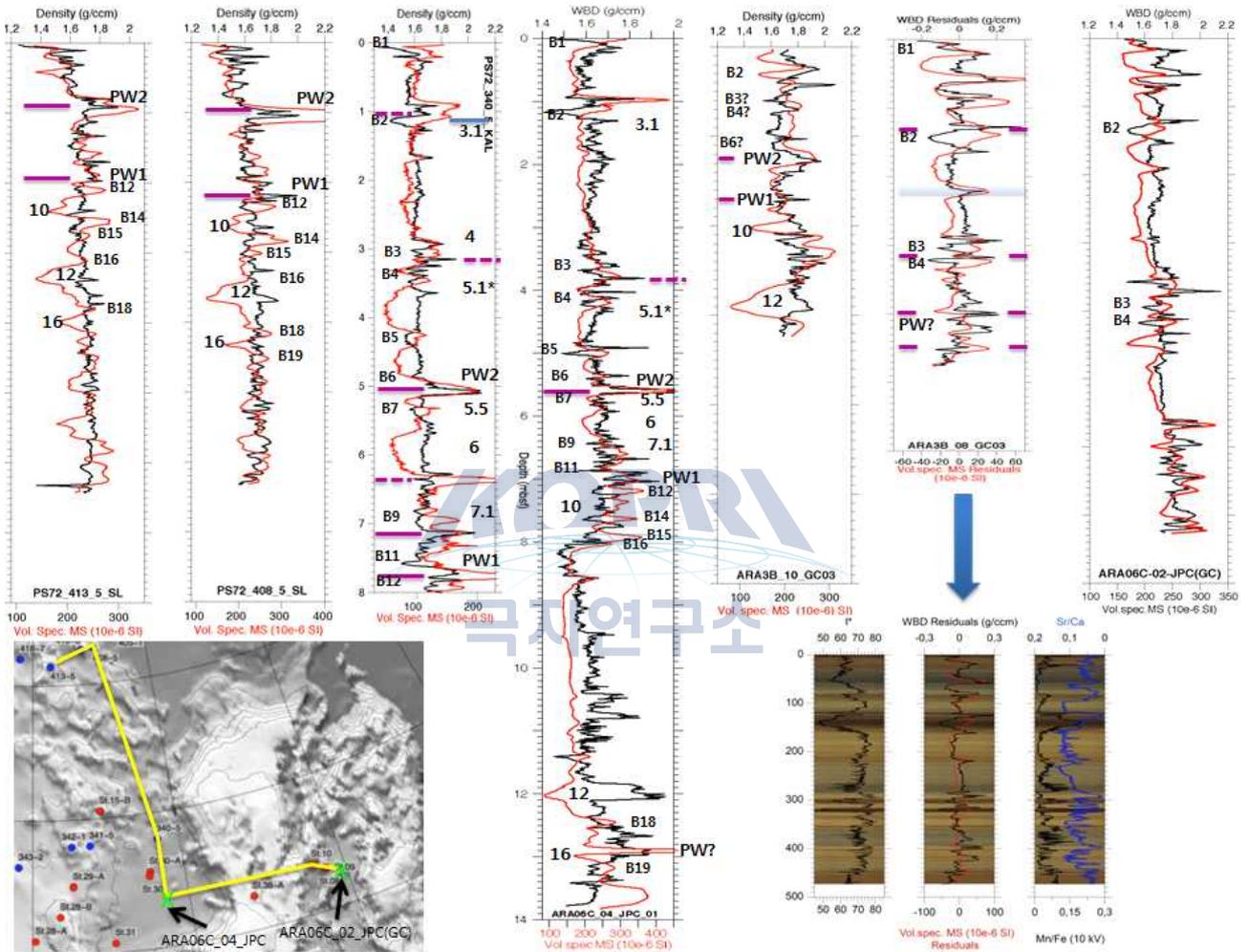


그림 3.30. ‘아라온’ 탐사 동안 장착하여 사용한 독일 AWI의 MSCL 장비를 이용하여 선상에서 퇴적물의 물성 분석을 통해 코어 ARA06C/04-JPC는 기존의 시추코어와 대비하여 예비 층서를 설정하였다.

## 2절. 후기 제4기 서북극권 빙하역사 및 고해양환경변화 복원

### 1. 척치-알라스카 대륙붕 퇴적물의 유기질미화석 분석을 통한 육상-해양 고환경복원 연구

#### 가. 연구배경 및 목적

북극을 비롯한 북반구 고위도 지역과 중·저위도 지역 간, 그리고 각 지역 내 육상-해양-대기 시스템 간의 복잡한 상호작용은 전 지구 기후 변화의 핵심 축을 이룬다(IPCC, 2007; Anderson et al., 2008; Hu et al., 2012). 특히, 북반구 고위도 주변 대륙으로부터 북극해로 유입되는 담수량의 변화는 전지구 열염순환의 변동을 야기하는 주요 요인으로 알려져 있으며, 대륙 주변에 형성된 빙하와 해빙은 주변 해역의 염분 환경에 직접적인 영향을 줌으로써, 외해역과의 해수교환 및 해류운동을 조절하는 요인으로 작용한다(Aagaard and Carmack, 1994; Stein, 2008). 따라서 북극 기후변화 연구를 통해 도출되는 자료는 북반구 고위도 지역은 물론, 전 지구적 기후변화 기작을 밝히는데 중요하다.

반폐쇄적 대륙주변부 환경의 척치해는 빙하와 해빙의 발달과 쇠퇴, 주변 대륙에서 유입되는 담수와 베링해협을 통해 유입되는 북태평양 수괴와 영양염류 변화에 매우 민감하게 반응하는 해역이다(Aagaard and Carmack, 1989; Hilmer et al., 1998; Marshall and Schott, 1999; Stein, 2008; Darby et al., 2012). 특히, 척치해는 과거 서북극 해역의 표층수 및 심층수 환경을 복원하고, 북극해의 중·심층수 순환 시스템에 미치는 영향을 연구할 수 있는 중요한 연구해역이다 (Woodgate et al., 2005, 2010; Hu et al., 2010, 2012). 따라서 서북극해(척치-알라스카 대륙붕 주변 해역)의 과거 해양표층환경과 해수순환 및 기후환경 변화 기록 복원 작업은 전 지구 기후 변화 기작을 이해하는데 중요한 정보를 제공할 수 있다.

해양 퇴적물에는 과거부터 현재까지 연속적이고 상세한 기록이 잘 보존되어 있으므로, 해양 퇴적물 속의 다양한 성분들을 분석함으로써 주변 환경에 대한 정보를 얻을 수 있다. 특히, 퇴적물 내 화분 (pollen)이나 와편모조류 시스트(dinoflagellate cyst)와 같은 유기질 미화석은 각각 해양과 육상의 환경 변화에 대한 생물학적 환경 지시종으로 (Marret et al., 2008; Mertens et al., 2009), 북극 기후 및 주변 육상 환경뿐만 아니라, 해빙 분포 및 표층 수온이나 염분과 같은 해양환경의 변화 역사를 고해상도로 복원하고 분석하는데 유용하다 (de Vernal and Hillaire-Marcel, 2000; Ager and Phillips, 2008; Rudenko et al., 2014).

이 연구에서는 서북극 주변 대륙붕 지역의 고해양·환경 변화 역사를 복원하고 서북극해 해양-대기-육상 환경 변화 간의 역학적 상관관계를 알아보기 위해, 서북극 척치-알라스카 대륙붕 해역에서 시추한 코어 퇴적물의 유기질 미화석을 분석 연구하였다.

## 나. 연구 해역

연구 해역은 서북극 척치해 대륙붕 경계와 알라스카해의 북서쪽 사이에 위치하고 있다 (Fig. 3-29). 척치해는 전반적으로 수심이 100m 이하로 얕으며, 베링해협으로부터 비교적 따뜻하고 염분이 낮은 태평양수가 유입되면서 복잡한 해류시스템을 이룬다(Weingartner et al., 1998, 2005; Winsor and Chapman, 2004; Woodgate et al., 2005). 베링해협을 통해 서북극해로 유입되는 해류는 척치해를 지나 3개의 지류로 나뉘지며, 척치해 대륙붕 경계에서 뷰포트 환류와 만나 상호작용을 한다.

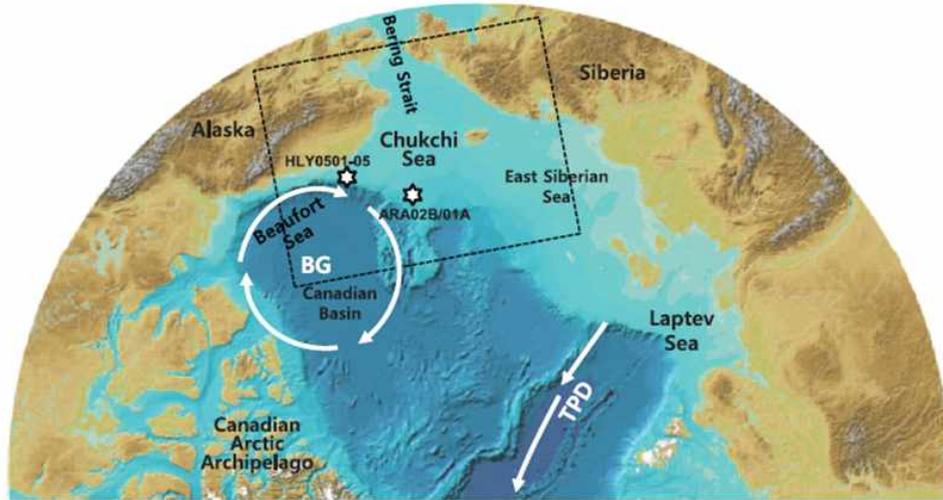
서북극해 주변 대륙으로부터 유입되는 강수와 상대적으로 염분이 낮은 태평양수의 공급은 척치해의 해빙의 형성과 분포에 중요한 역할을 한다 (Aagaard and Carmack, 1989; Carmack, 2000). 척치해 대륙붕에 분포하는 계절성 해빙의 지속 기간은 6개월에서 12개월이며, 주로 대기-해양 순환에 의해 그 규모와 두께가 결정된다 (Cavaliere and Martin, 1994; Roach et al., 1995). 최근에는 베링해협을 통한 태평양수의 유입이 증가함에 따라, 척치해의 여름철 해빙 면적이 현저하게 북쪽으로 후퇴한 것으로 보고되었다 (Woodgate et al., 2010).

연구해역의 퇴적물은 주로 유콘강 (Yukon River)과 아나다강 (Anadyr River), 그리고 연안침식 작용 기원의 미세한 퇴적입자들이 해류에 의해 베링해 북쪽으로부터 척치해 대륙붕으로 운반되어 형성된다 (e.g. Barnes and Reimnitz, 1974; Viscosi-Shirley et al., 2003). 한편, 알라스카 연안에서 해빙에 의해 연구해역까지 운반되는 퇴적물도 상당량을 차지하는 것으로 알려져 있다 (Darby, 2003; Eicken et al., 2005). 미립자 퇴적물은 저층 침식작용 등에 의해 해저 침하지 (depression)와 대륙사면에 높은 분급도의 실트질 점토로 재분포된다 (Barnes and Reimnitz, 1974; Darby et al., 2009; Wang et al., 2015).

시베리아 북동부와 북아메리카 북서부의 알라스카 및 유콘 지역은 일반적으로 극심한 대륙성 기후를 보이며, 가장 낮은 기온을 보이는 달의 평균온도가  $-30\sim-40^{\circ}\text{C}$ , 가장 높은 기온을 보이는 달의 평균온도가  $4\sim9^{\circ}\text{C}$ 에 달한다 (Lozhkin and Anderson, 1995; New et al., 2002; Tarasov et al., 2013). 여름 최대 강수량은 일사량 증가와 따뜻한 고기압의 영향으로 7월 ( $50\sim100\text{mm}$ )에 발생하며, 겨울철에는 일사량 감소와 고기압의 영향으로 차갑고 건조한 대기 상태를 나타낸다 (Lozhkin and Anderson, 1995; Mock et al., 1998).

시베리아 북동부 및 북아메리카 북서부 지역의 식생은 일반적으로 북방수림, 관목 툰드라가 우점하는 것이 특징이다 (Bigelow et al., 2003). 시베리아 북동부는 주로 툰드라와 낙엽송이 우점하는 침엽수림이 혼재하여 분포하며, 하층 군락은 눈잣나무 (*Pinus pumila*), 자작나무 (*Betula exilis*, *B. middendorffii*), 버드나무 등의 관목 종류의 식생이 우점한다. 연안 지역에서는 벚과-사초과-쑥과 식물 툰드라와 버드나무 및 자작나무가 우점한다 (Anderson and Lozhkin, 2015; Edwards et al., 2000). 북아메리카 북서부의 식생은 가문비 나무 (*Picea*

*mariana*, *P. glauca*)가 크게 우점하며, 낙엽송이 제한적으로 분포하는 특징을 보인다. 특히, 산사면 지역에는 오리나무 (*Alnus crispa*)가 밀집되어 분포하는 반면, 북아메리카 북서부의 북쪽과 서쪽 지역에는 툰드라 식생이 넓게 분포한다 (Lozhkin and Anderson, 1995).



**Figure 3-29.** Map of the western Arctic Ocean, showing the location of sites ARA02B/01A and HLY0501-05. Arrows show major circulation features: Beaufort Gyre (BG), Transpolar Drift (TPD), and Atlantic water inflow (dashed arrows for subsurface current).

극지연구소

#### 다. 연구 재료 및 방법

##### (1) 코어 시료 채취

본 연구를 위하여 척치해 대륙붕 북부(ARA02B/01A)와 알래스카 북부 연안 (HLY0501-05)에서 코어 퇴적물 시료를 채취하였다 (Fig. 3-30). ARA02B/01A 코어 시료는 2011년 극지연구소 쇄빙선 ARAON 탐사를 통해 수심 111m 정점 (73°37.9' N, 166°31.0' W)에서 획득하였으며, 퇴적물 시료의 길이는 545cm 이다 (Fig. 3-31). HLY0501-05 코어 시료는 2005년 USCGC Healy 탐사를 통해 수심 415m에서 채취되었으며 (72.69°N, 157.52°W), 공동연구기관인 미국 오하이오 주립대학 Byrd Polar Research Center로부터 제공받아 총 16.7m 길이의 퇴적물 중상부 13m 구간의 유기질 미화석 기록을 분석하였다 (Fig. 3-30).

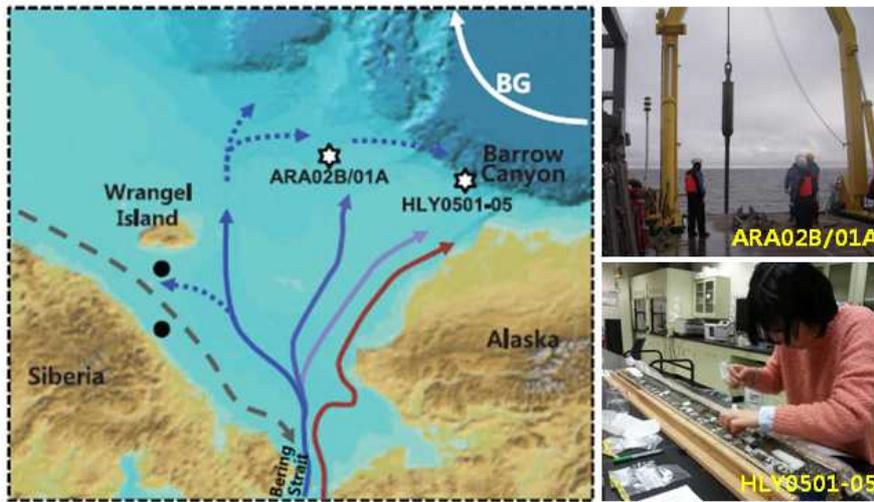


Figure 3-30. Map of the western Arctic Ocean, showing circulations in the Chukchi Sea along with the location of the study sites (ARA02B/01A and HLY0501-05).

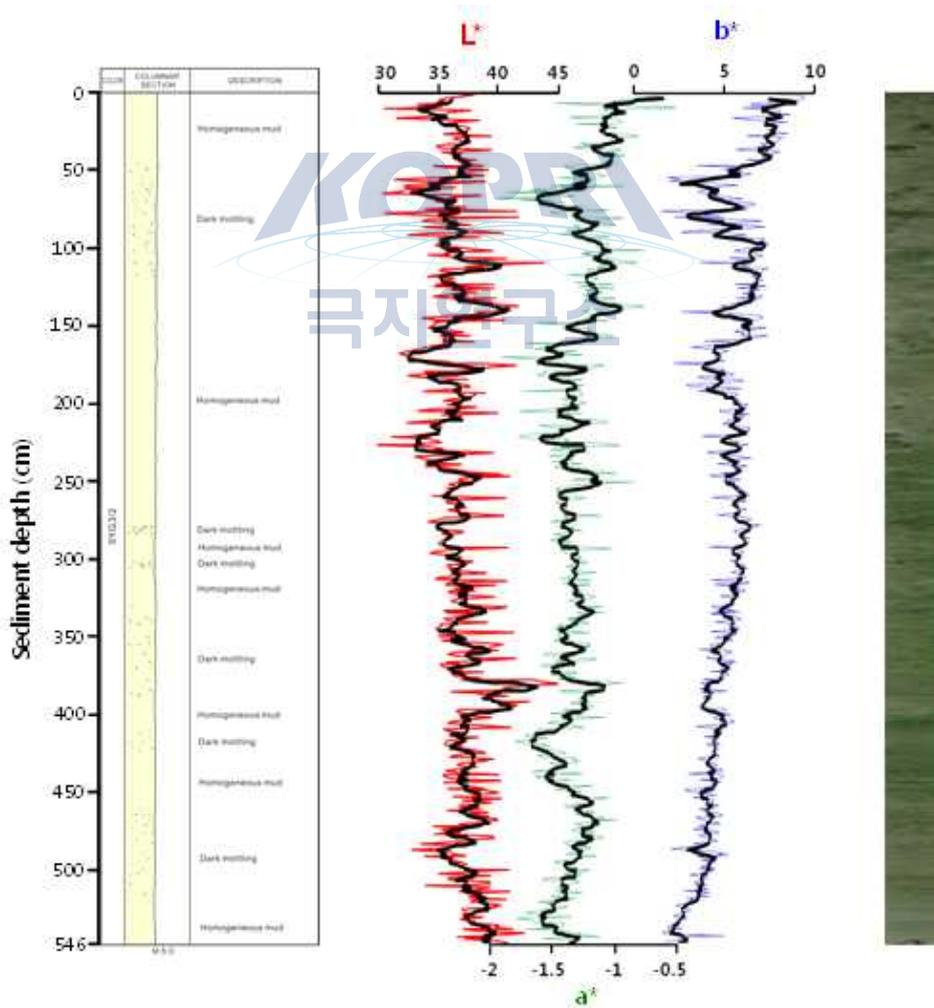


Figure 3-31. Depth profile of sediment texture, color reflectance and photography of core ARA02B/01A.

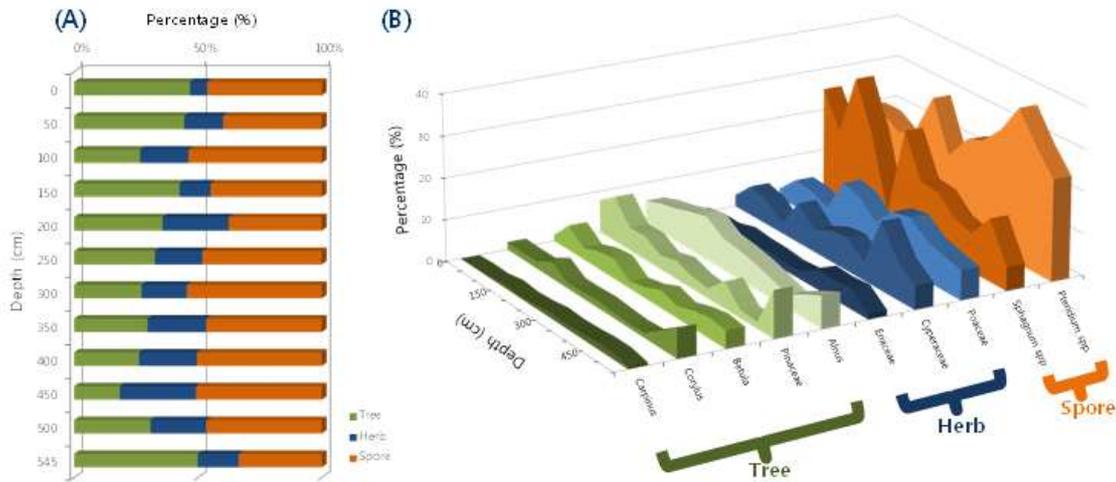
## (2) 미화석 분석

유기질 미화석 분석을 위해 ARA02B/01A 코어 시료와 HLY0501-05 코어 시료에서 각각 약 20~30cm와 30~100cm 간격으로 부시료를 채취하였다. 약 5~15g 무게의 건조한 부시료에 탄산질(calcium carbonate)을 제거하기 위해 10% 염산(HCl)으로 처리하였다. 탄산질이 녹아있는 시료를 이온교환수로 세척하여 중성화시킨 다음, 규산질을 제거하기 위해 40% 불산(HF)을 넣어 24 시간 동안 처리하였다. 이 시료를 다시 이온교환수로 세척하여 중성화시킨 다음, 10 μm 크기의 그물체(mesh sieve)로 걸러내었다. 이온교환수를 이용하여 체에 남아 있는 입자를 플라스틱 튜브에 옮겨 담은 후, 2~3 방울의 페놀을 첨가하였다. 각 현미경 시료를 잘 섞이게 한 다음, 일부를 취하여 glycerine jelly와 paraffin wax를 이용하여 현미경 슬라이드를 만들어 현미경으로 분석하였다. 그리고 Nikon (Eclipse 55i) 현미경을 이용하여 250과 400 배율 하에서 유기질 미화석 (육상 화분 및 포자, 담수조류, 와편모조류 시스트 등)을 분석하였다 (Fig. 3-32). 분석한 퇴적물 시료 속 와편모조류 시스트의 농도(cysts/g, 건조 퇴적물 1g 당 시스트 개체수)는 Stockmarr (1971)의 표지-입자 방법(Marker-grain method)을 따라, *Lycopodium clavatum* 정체를 각 시료에 한 알씩 첨가하여 현미경 관찰 시 와편모조류 시스트와 함께 계수한 후, 결과값의 상대적 비율을 이용하여 계산하였다.



**Figure 3-32.** Major pollen and spores identified in the western Arctic sediments (scale bar = 10μm).

분석한 화분화석 자료는 세 개의 주요 생태 그룹 (tree/shrubs, herbaceous plants, spore vegetation)으로 나누어 대표 식생군집으로 구별하였다 (Fig. 3-33). 화분 및 포자는 일반적 화분포자 동정 키 (key)에 따라 속 단위 (generic level)까지 분석하였다 (e.g. Hesse et al., 2009; Moore et al., 1991; Punt and Hoen, 2009; Punt et al., 2007).



**Figure 3-33.** Diagrams of percentage for Tree-Herb-Spore (A) and the main taxa (B) for the cores.

#### (라) 연구결과 및 토론

ARA02B/01A 코어와 HLY0501-05 코어의 화분포자는 약 3000~4000 grains g<sup>-1</sup>의 농도 분포를 보였다. 화분포자 군집 조성 및 기타 유기질미화석 농도 분포를 기준으로 3개의 미화석 Zone을 구별하였다 (Fig. 3-34).

Zone 1은 코어 홀로세 초 후반기에 해당하는 퇴적물의 하부 구간으로, ARA02B/01A 코어는 약 7900~8400 yr BP, HLY0501-05 코어는 약 8300~8600 yr BP의 연대를 보였다. 화분포자 농도의 평균 농도는 1000 - 1900 grains g<sup>-1</sup>으로 비교적 낮은 값을 보였다. 교목·관목류 (tree/shrub) 화분은 두 코어에서 모두 50~60% 이상을 차지하며 높은 값을 보였다. 특히, HLY0501-05 코어에서는 약 30~40%를 차지하는 *Picea*와 *Pinus* 화분이 가장 우점하였다 (Fig. 3-35). *Betula*와 *Alnus* 화분도 비교적 높은 빈도로 관찰되었다. 포자 그룹에서는 이끼류인 *Sphagnum*과 양치식물인 *Pteridium*이 비슷한 산출비율로 우점하였다. Zone 1의 가장 기저 구간은 재동된 미화석 (reworked palynomorphs)의 산출량이 높게 나타났으며, 상부 구간으로 갈수록 급격하게 감소하는 경향을 보였다 (Fig. 3-34). 담수조류 미화석은 매우 산출량을 보이는 반면, 외편모조류 시스트는 상부 구간으로 갈수록 증가하는 경향을 나타냈다.

Zone 2는 Zone 1의 최상부층에서 약 3600~3700 yr BP 까지 구간에 해당한다. 화분포자 농도는 ARA02B/01A 코어와 HLY0501-05 코어에서 각각 평균 3000와 5000 grains g<sup>-1</sup>으로, Zone 1에 비해 크게 증가하였다 (Fig. 3-34). 가장 높은 농도를 보이는 구간은 HLY0501-05 코어의 7m 깊이 (약 5000 - 6000 yr BP)이며, 약 8000 grains g<sup>-1</sup>까지 증가하였다. 이와 같은 산출량 증가 양상은 거의 모든 화분포자 그룹에서 관찰되었으며, 특히 벧과 식물 (grass)의 산출

비율이 20~30%까지 크게 증가하는 경향을 나타냈다 (Fig. 3-35). 이 구간에서는 *Alnus*와 *Betula* 교목류 화분이 두 코어에서 모두 가장 우점하였으며, HLY0501-05 코어에서는 *Pinus*와 *Picea* 화분도 다소 증가하는 양상을 보였다. 초본 균집 화분 (herb pollen)은 Poaceae와 Cyperaceae 화분이 높은 산출비율 (20~30% 이상)로 관찰되는 특징을 보였다. Zone 2에서는 재동된 미화석은 ARA02B/01A 코어와 HLY0501-05 코어에서 각각 ~150 grains g<sup>-1</sup>와 ~300 grains g<sup>-1</sup>까지 급격하게 감소하는 특징을 보였다. 한편 담수조류 미화석 농도는 크게 증가하는 경향을 보였으며, ARA02B/01A 코어와 HLY0501-05 코어에서 각각 평균 >5000와 >14,000 grains g<sup>-1</sup>으로 산출되었다.

Zone 3은 Zone 2의 최상부층에서 코어 표층까지 구간으로, 지난 3600 yr BP 기간을 나타낸다. 화분포자 농도는 ARA02B/01A 코어와 HLY0501-05 코어에서 각각 평균 ~3100와 ~3200 grains g<sup>-1</sup>으로, Zone 2에 비해 감소하는 경향을 보였다 (Fig. 3-34). 특히 초본균집 화분의 감소가 뚜렷하게 나타났으며, 육상 미화석 균집 조성의 변화는 상대적으로 크게 나타나지 않았다 (Fig. 3-35). ARA02B/01A 코어에서는 *Alnus*와 *Betula*가 가장 우점하였고, HLY0501-05 코어에서는 *Alnus*, *Picea*, *Pinus* 화분이 가장 우점하였다. 재동된 미화석은 낮은 산출량을 보였으며, 코어 최상부층에서 가장 낮은 농도를 보였다. 담수조류 미화석과 와편모조류 시스트 역시 현저하게 낮은 산출량을 나타냈다.

유기질미화석 Zone 1에서 현생 미화석 (contemporaneous palynomorphs)의 산출량이 매우 낮은 반면, 재동된 미화석의 산출량이 높게 관찰되는 현상은 해수면 상승이나 Laurentide ice sheet 후퇴와 연관이 있을 가능성을 제시한다. 반면, 유기질미화석 Zone 2는 육상-해양 미화석의 산출량은 퇴적율과 함께 급격하게 증가하여, 5000~6000 yr BP 시기에 가장 높은 농도를 보인다. 이러한 퇴적율의 급격한 증가는 베링해협을 통한 태평양수 유입이 강화된 결과로, 기존에 보고된 광물 기원 연구 결과와 일치한다 (Ortiz et al., 2009, 2012). 또한 이 시기에는 초본균집 화분의 산출비율이 크게 증가하는 양상은 홀로세 중기에 들어 양호된 기후환경이 식생의 성장에 영향을 미친 결과로 해석된다 (Kaufman et al., 2016). 홀로세 후기의 육상 화분포자 균집은 오늘날 북극 연안의 관목성 툰드라 식생환경과 유사한 양상을 보인다.

ARA02B/01A와 HLY0501-05 코어의 유기질 미화석 균집 조성은 전반적으로 서로 매우 유사한 분포 양상을 보였으며, 이는 강한 퇴적물 혼합작용의 영향을 받은 것으로 해석된다. 특히, 해양-육상 유기질 미화석 균집 변화 기록은 척치-알래스카 지역의 기후변동의 영향뿐만 아니라 (Kaufman et al., 2016), 베링해에서 대륙붕을 가로지르는 해류에 의한 퇴적물 이동 및 재분포 작용의 영향을 크게 받은 것으로 판단된다 (Ortiz et al., 2009, 2012).

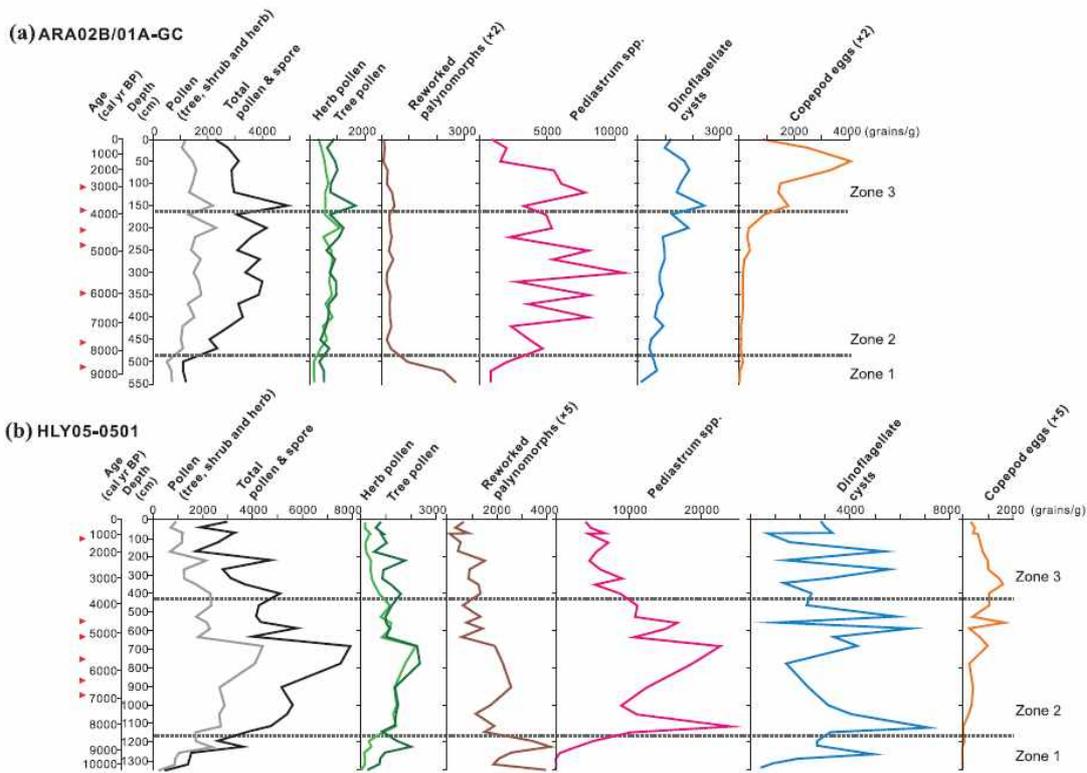


Figure 3-34. Concentrations of terrestrial and aquatic palynomorphs and copepod eggs in cores (a) ARA02B/01A and (b) HLY0501-05.

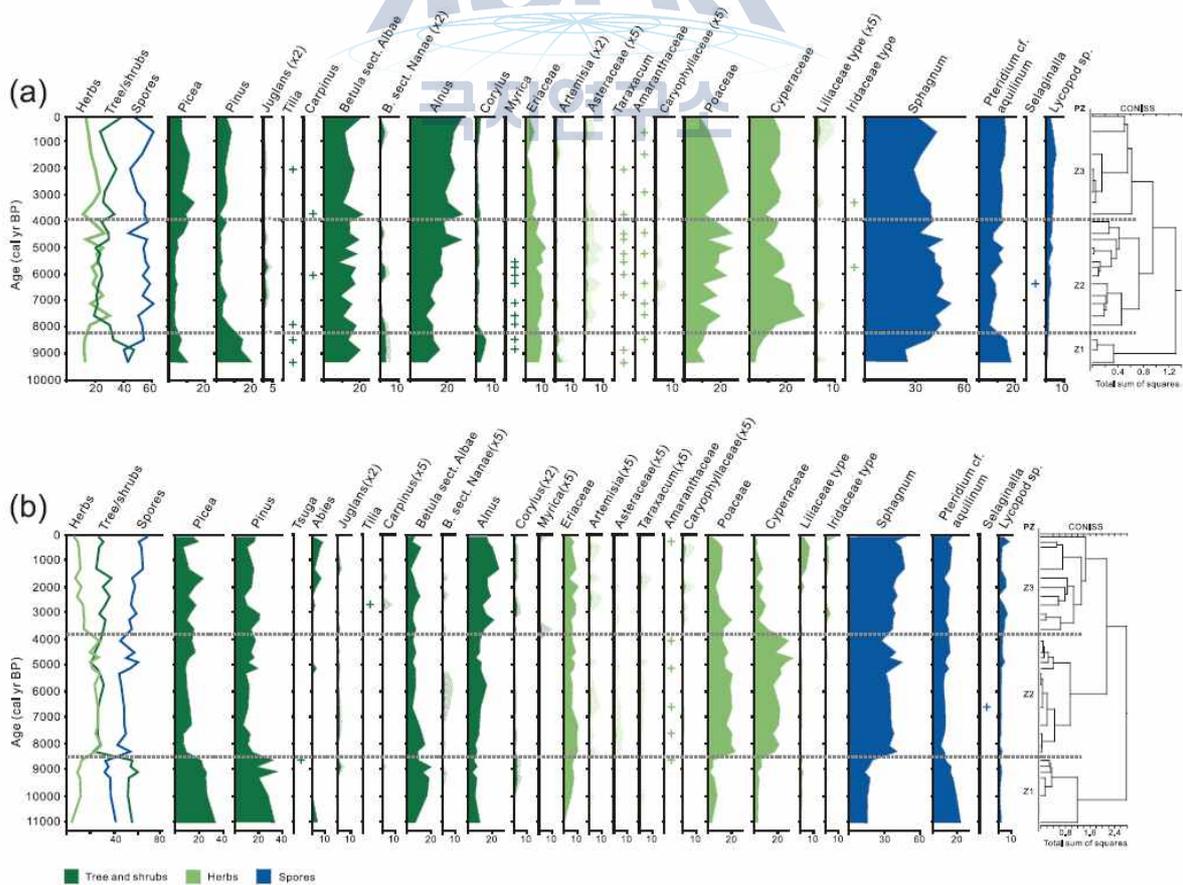


Figure 3-35. Pollen and spore percentage diagram for cores (a) ARA02B/01A and (b) HLY0501-05.

## 2. 퇴적학적 프록시를 이용한 서 북극 척치 분지에 대한 제4기 후기 고환경 복원 연구

### 가. 서론 및 연구내용

최근 제4기 후기동안 서 북극해 척치와 동 시베리아 주변부 지역에서 직접적인 기저빙하의 침식흔적이 보고되고 있다(Polyak et al., 2007; Jakobsson et al., 2008; Niessen et al., 2013; Dove et al., 2014). 척치 주변부의 기저빙하 침식은 LGM(Last Glacial Maximum)을 포함한 MIS 2 동안 국부적으로 발달된 척치 빙하의 영향을 받은 것으로 추정되며, 노스윈드 해령(Northwind Ridge)의 침식흔적은 보다 이전 빙하작용을 포함하여 MIS 4를 마지막으로 알래스카 근원의 로렌타이드 빙상(Laurentide Ice Sheet)의 영향을 받았던 것으로 해석되었다(Polyak et al., 2007; Dove et al., 2014; Jakobsson et al., 2014). 척치 주변부에 대한 연구와 달리, Niessen et al. (2013) 연구에서 보고된 엘리스 대지(Arlis Plateau)를 포함한 동 시베리아 지역의 빙하침식 구조 및 빙퇴석 구릉의 발달 시기는 LGM 이전에 발달되었다는 추측과 함께 명확한 발달 시기가 규명되지 않은 상황이다.

서 북극해의 기저빙하 침식사건 및 층서의 연대 설정에 대한 문제점은 1) 대륙붕을 포함한

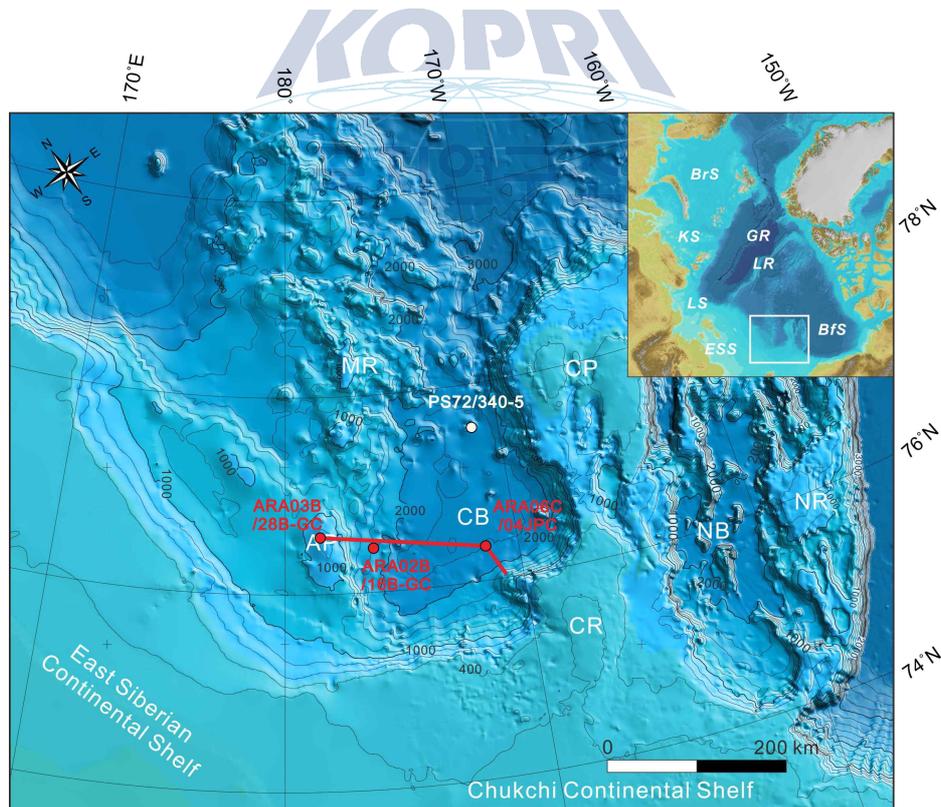


Fig. 3-36. Physiographic map showing locations of ARA02B/16B-GC, ARA03B/28B-GC, ARA06C/04-JPC and PS72/340-5 (from Matthiessen et al. 2010; Stein et al., 2010b) sediment cores. AP, Arlis Plateau; CB, Chukchi Basin or abyssal plain; CP, Chukchi Plateau; CR, Chukchi Rise; MR, Mendeleev Ridge NB, Northwind Basin; NR, Northwind Ridge. Bathymetric contour interval is 200 m.

천해 환경이 후빙기 및 간빙기에 형성된 유빙에 의한 침식작용으로 인해 층서기록이 보존되지 않는 경우가 빈번하며(Dove et al., 2014), 2) 시추 코어 퇴적물에 대한 연대를 설정할 지시자(proxy) 연구가 모든 지역에 적용되지 않는다는 점이다. 위와 같은 문제점을 보완하기 위해서, 빙산과 퇴적물 중력류에 의한 침식으로부터 영향을 받지 않는 심해저 퇴적물 코어에 대한 분석이 이루어지고 있다(Darby et al., 2001; Polyak et al., 2004, 2009; Stein et al., 2010b; März et al., 2011). 그럼에도 불구하고, 북극해 심해저 퇴적물 코어는 주로 갈색층(B, brown layer), 분홍색 쇠설성 탄산염층(PW) 등의 퇴적학적 특징들을 이용한 코어 대비를 통해 동위원소 단계(MIS, marine isotope stage)를 구분하고 있지만(Polyak et al. 2004, 2009; Matthiessen et al., 2010; Stein et al., 2010b), Stein et al. (2010b)에서 보고한 바와 같이 연대모델에 대한 부정확성, 특정 동위원소 단계 설정 등에 대한 문제점이 남아있다.

본 연구에서는 척치 및 동 시베리아 주변부에 대한 제4기 후기 빙하작용 역사를 복원하기 위해, 2011, 2012 및 2015년도 아라온 북극탐사 동안 척치 분지(Chukchi Basin) 주변지역에서 획득된 3개의 퇴적물 코어(ARA02B/16B-GC, ARA03C/28B-GC 그리고 ARA06C/04-JPC)에 대한 잠정적인 동위원소 단계를 설정하고 퇴적물 분석을 수행하였다. 코어분석은 1) 층서대비에 활용되는 갈색층(Mn/Al)과 쇠설성 탄산염층(Ca/Sr)을 구분하기 위한 XRF 분석, 2) 퇴적층의 색상변화를 확인하기 위한 Linescanning, 3) 퇴적층의 내부구조를 파악하기 위한 X-radiography, 4) X-선 사진에서 구분되는 조립암편(IRD)의 개수 측정 및 퇴적상 분석이 수행되었다.

## 나. 연구 자료 및 방법

### (1) 시추코어 퇴적물 자료

본 연구에서 분석된 3개의 퇴적물 시추코어는 2011, 2012 및 2015년도 아라온 북극탐사 동안 멘델리프 해령(Mendeleev Ridge) 남동부에 위치한 엘리스 대지의 동쪽 사면하부(ARA02B/16B-GC), 엘리스 대지의 최상부(ARA03C/28B-GC) 그리고 척치 분지 혹은 심해저 평원(Chukchi Abyssal Plain)의 해저(ARA06C/04-JPC)에서 획득되었다(그림 3-36).

ARA02B/16B-GC 퇴적물 코어는 엘리스 대지 동쪽에 위치한 사면하부 약 북위 76도 24분, 서경 175도 58분 정점에서 약 378 cm가 획득되었다(그림 3-36). 코어 정점은 SBP 자료상에서 음향학적으로 평행하고 평탄하게 성층화된 특징을 보인다. 정점 주변지역은 음향학적으로 투명한 렌즈 형태를 보이는 암설류 퇴적체가 수차례 중첩되어 나타나며, 각 암설류 퇴적체는 분명한 경계를 보이거나 음향학적으로 성층화된 반원양성 퇴적체에 의해 피복됨으로써 비교적 쉽게 구분된다(그림 3-37).

ARA03C/28B-GC 퇴적물 코어는 멘델리프 해령 남부에 위치한 엘리스 대지의 최상부 약 북

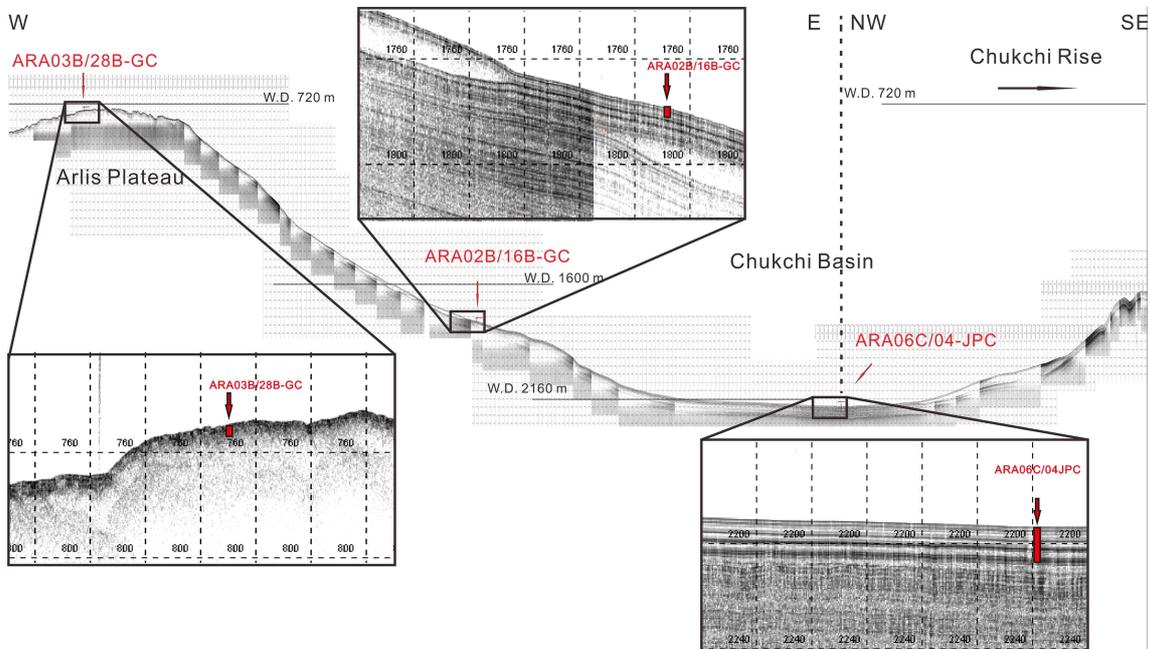


Fig. 3-37. SBP profile from the Arlis Plateau to the Chukchi Rise with coring sites. For core locations, see Fig. 1. Red boxes show approximate penetration depth for coring sites.

위 76도 34분, 서경 178도 15분 정점에서 448 cm가 획득되었다(그림 3-36). SBP 자료상에서 코어 정점은 크고 작은 지형기복과 함께 음향학적으로 “fuzzy”한 특징을 보이는 하부구간과 다소 성층화되어 보이는 얇은 퇴적층에 의해 피복된 특징을 보인다(그림 3-37). 이 지역은 Niessen et al. (2013) 연구에서 기저빙하의 침식작용으로 인하여 북동방향으로 발달된 MSGLs(Mega Scale Glacial Lineations)이 분포하는 지역이다.

ARA06C/04-JPC 퇴적물 코어는 척치 분지 내에 약 북위 76도 25분, 서경 172도 40분 정점에서 1,385 cm가 획득되었다(그림 3-36). 이 정점은 엘리스 대지에 비하여 척치 대륙주변부에 더욱 가깝게 위치하며, SBP 자료상에서 평탄하고 매끈한 해저면과 함께 음향학적으로 평행한 층리가 발달된 특징을 보여준다(그림 3-37). 다만 본 연구에서 04-JPC 코어 퇴적물은 나머지 코어 퇴적물과의 비교를 위해 약 560 cm 심도까지의 자료만을 이용하였다.

## 다. 연구 결과

### (1) 퇴적학적 특징

서 북극해 심해저 퇴적물은 빙하기/간빙기 순환에 따라 그 특징이 달리 나타난다. 간빙기 혹은 아간빙기에는 동 시베리아와 유라시아 기원의 망간 유입 및 산화작용에 따라 갈색층(B, brown layer)이 발달되며, 이러한 갈색층은 소-중량의 모래함량을 포함하여 비교적 유공층이

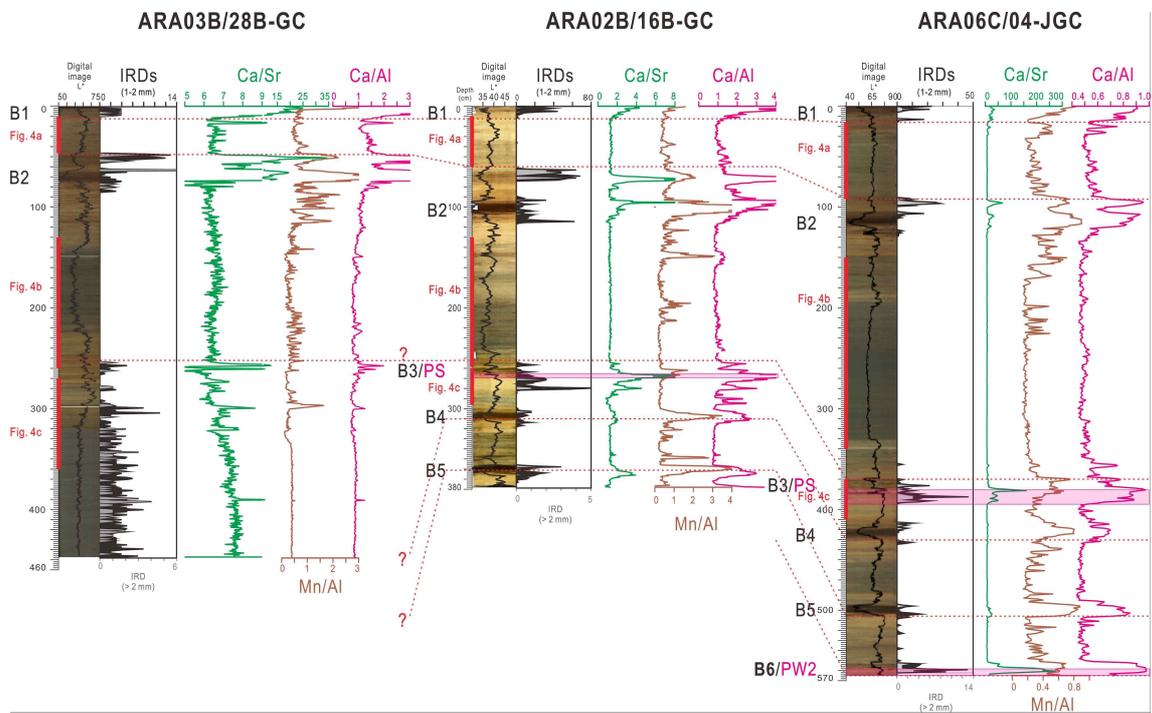


Fig. 3-38. “Araon” sediment core information including sediment colour, IRD content and ratio of Ca/Sr, Mn/Al and Ca/Al. Ratio of Ca/Sr shows very similar variation to IRD content. Dashed red lines show tentative core correlation based on sediment colour, XRF data and IRD content. For core locations, see Fig. 1.

풍부한 퇴적층으로 보고된다(Phillip and Grantz, 1997; Jakobsson et al., 2000; Matthiessen et al., 2010; Stein et al., 2010b; März et al., 2011). 빙하기/아빙하기 혹은 후빙기에는 대체로 회색, 올리브색 내지 노란색 계열의 퇴적층이 집적되며, 유공층이 거의 관찰되지 않는 세립질 퇴적물로 구성되는 것으로 보고된다(Phillip and Grantz, 1997; Polyak et al., 2009; Matthiessen et al., 2010; Stein et al., 2010b; Wang et al., 2010). 또한, 알래스카 로렌타이드 빙하작용과 그 이후의 후빙기에 형성되는 분홍색의 빙운 쇄설물(IRD, ice-raft debris) 및 쇄설성 탄산염 층(PW, pinkish or whitish layer)이 서 북극해 심해저 퇴적층에서 간헐적으로 협재되어 나타난다(Clark et al., 1980; Phillips and Grantz, 2001; Polyak et al., 2009; Stein et al., 2010a, b; Polyak and Jakobsson, 2011).

#### (가) ARA02B/16B-GC

16B-GC 퇴적물 코어는 총 5개의 갈색층(B1-5)이 관찰된다: 표층(B1), 107 cm (B2), 263 cm(B3), 308 cm (B4) 그리고 361 cm (B5). 각 갈색층은 대부분 생교란이 집중된 특징을 보인다. IRD는 주로 이러한 갈색층 내에 일부 소량으로 나타나는 반면, 대체로 갈색층의 기저나 상부 경계에서 세립질의 IRD가 높게 산출되는 특징을 보인다(그림 3-38). 각 갈색층은 L\* 값의 낮은 피크, Mn/Al 비와 Ca/Al 비에서 비교적 높은 피크를 보인다. 특히, 갈색층 B2와 5 층에서 제일 높은 Mn/Al 비의 피크를 보이며 B3 층에서 가장 낮은 Mn/Al 비의 피크가 관찰된다.

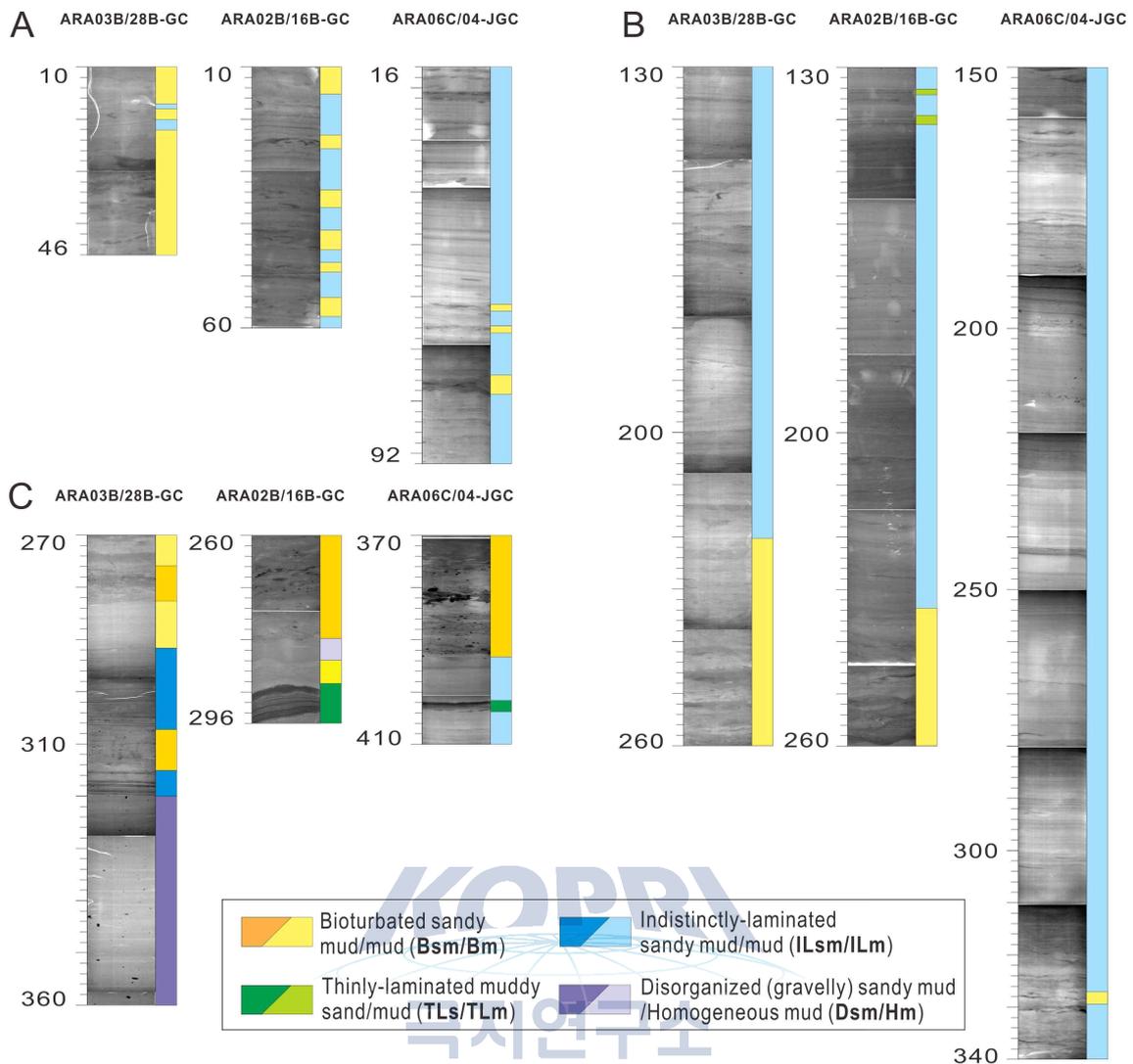


Fig. 3-39. Distribution of sedimentary facies on X-radiographs.

IRD가 집적된 층은 코어 전반에 걸쳐 B1과 2층 사이에 위치한 퇴적구간의 하부에 발달된 IRD 층을 포함하여 각 갈색층까지 총 여섯 구간에 걸쳐 나타난다. 육안으로 관찰되는 분홍색의 쇄설성 탄산염 층은 B3 층 기저(코어 심도 265 cm)에서만 관찰된다(그림 3-38). 그러나, 쇄설성 탄산염을 지시자로 보고된 Ca/Sr 비의 경향성(Hodell et al., 2008)은 IRD가 집적되는 구간과 상당히 잘 일치하지만, 예외적으로 B3 하부(약 270-280 cm) 구간은 IRD가 집중되는데 비해 Ca/Sr 피크가 비교적 낮게 나타난다(그림 3-38, 3-39c).

회색, 올리브색 내지 노란색 계열의 퇴적층은 각 갈색층 사이에서 발달되며, 총 4-5 구간에 걸쳐 나타난다(그림 3). 이 퇴적층은 대부분 IRD가 없는 세립질 퇴적물로 구성되는 반면, B3 층 하부에 발달된 노란색 내지 올리브색 퇴적구간 중 상부 십 수 cm 구간에 걸쳐 다량의 세립질 IRD가 관찰되며(그림 3-38, 3-39c), 그 하부에는 약 9 cm 두께의 사질 층리와 사질 엽리 층리로 구성된 퇴적층이 발달되어 있다(그림 3-39c). 이러한 구간 중 비교적 뚜렷한 회색 내지 올리브색을 띠는 구간은 약 196-250 cm(B2-B3)구간의 기저는 2-3 cm 두께로 실트가 집중된

밴드와 점토질이 집중된 밴드를 보이는 생교란 구조가 발달되며 상부로 가면서 희미한 엽리층리가 발달된다(그림 3-39b). 약 324-356 cm 구간(B4-B5)은 대체로 일부 생교란을 포함하여 엽리층리가 우세하다.

#### (나) ARA03B/28B-GC

28B-GC 퇴적물 코어는 총 2개의 갈색층이 뚜렷하게 인지된다(그림 3-38): 표층(B1)와 70 cm (B2). 또한, 갈색층 B1과 B2는 낮아진  $L^*$  값, Mn/Al 및 Ca/Al 비의 피크를 통해 구분이 가능하며, 16B-GC 코어와 유사하게 소량의 IRD를 포함하며 생교란이 집중된 특징을 보인다. 약 220-318 cm 구간에서 뚜렷한 갈색층이 구분되지는 않지만, 노란색 내지 녹색갈색계열의 퇴적층 구간이 발달되어 있다(그림 3-38). 비록 220-318 cm 구간의 퇴적층이 전형적인 갈색층의 특징을 보이지는 않지만, 코어 심도 약 250 cm 구간에서 B3 층 기저에 나타나는 특징과 유사하게 IRD와 함께 쇄설성 탄산염을 지시하는 Ca/Sr 비의 피크를 확인할 수 있다(그림 3-38). 220-318 cm 구간의 하부구간은(292-319 cm) 세립질 IRD를 포함한 엽리층리가 발달되고 상부로 가면서 일차 퇴적구조없이 생교란구조만 관찰된다(그림 3-39c).

IRD가 집적된 층은 16B-GC 코어와 유사하게 B1과 2층 사이에 위치한 퇴적구간의 하부에 IRD가 집중된 층을 포함하여 각 갈색층 내에서 소량의 IRD가 관찰된다(그림 3-38). 16B-GC 코어와의 다른 양상으로는 292-318 cm 구간을 포함하여 약 318 cm 코어 심도를 기준으로 코어기저까지 두껍게 발달된 회색층에서 비교적 많은 IRD가 지속적으로 관찰된다(그림 3-38, 3-39c). 16B-GC 코어와 달리, 육안으로 관찰되는 분홍색의 쇄설성 탄산염 층은 28B-GC 코어에서 관찰되지 않는다. 그러나, Ca/Sr 비(쇄설성 탄산염 지시자)는 250 cm 갈색 퇴적층 구간 중부에서 16B-GC 코어의 B3 하부에 발달된 쇄설성 탄산염층과 유사한 피크를 보인다(그림 3-38).

회색, 올리브색 내지 노란색 계열의 퇴적층은 총 3 구간에 걸쳐 나타난다(그림 3-38): 약 10-46 cm(B1과 B2 사이), 약 140-220 cm, 약 318-448 cm(코어 기저까지). 최하부 구간에 발달된 회색층을 제외한, 나머지 이러한 퇴적층은 대부분 IRD가 없는 세립질 퇴적물로 구성된다(그림 3-38, 3-39b). 10-46 cm 구간은 16B-GC 코어와 달리 생교란이 우세한 특징을 보인다(그림 3-39a). 중부(130-225 cm)구간은 16B-GC 코어와 같이 그 기저에 1-2 cm의 밴드를 이루는 생교란 구조가 발달되고 상부로 가면서 엽리층리가 주로 발달된 특징을 보인다(그림 3-39b). 최하부(318-448 cm) 구간은 괴상(massive)의 조립 및 세립질 IRD가 불규칙적으로 산재하는 특징을 보인다(그림 3-39c).

#### (다) ARA06C/04-JPC (~560 cm)

코어 심도 0-560 cm까지의 04-JPC 퇴적물 코어는 총 6개의 갈색층이 뚜렷하게 인지된다(그림

3-38): 표층(B1), 약 110 cm (B2), 약 375 cm (B3), 약 422 cm (B4), 약 498 cm (B5) 그리고 554 cm (B6). 척치 분지에서 획득된 04-JPC와 16B-GC 퇴적물 코어에서 갈색층은 B5층까지 L\*, Mn/Al 및 Ca/Al 비에서 매우 비슷한 양상을 보여준다. 그러나, 04-JPC의 B2 층은 16B-GC의 B2 층에 비해 IRD 함량이 보다 적고 Ca/Sr 비율에서도 비교적 낮은 피크를 보인다(그림 3-38).

IRD가 집적된 층은 16B-GC 코어와 매우 유사하게 나타나며, Ca/Sr 비율 역시 매우 유사한 변화경향을 보여준다. 특히, B3 층 하부에 발달된 분홍색의 쇠설성 탄산염의 분포마저 이와 동일하게 발달되어 있다(그림 3-39c). 추가적으로 16B-GC 코어 퇴적물에서 획득되지 않은 B6 층과 PW2 층으로 알려진 그 하부에 발달된 분홍색 쇠설성 탄산염 층이 04-JPC에서 확인이 가능하다(그림 3-38).

회색, 올리브색 내지 노란색 계열의 퇴적층은 0-560 cm 구간에서 총 5 구간에 걸쳐 나타난다(그림 3-38): 약 10-104 cm(B1-B2), 약 124-370 cm(B2-B3), 약 386-418 cm(B3-B4), 약 430-494 cm(B4-B5) 그리고 약 506-552 cm (B5와 B6 사이)(그림 3-38). 이 구간 중 실제 회색 및 올리브색을 띠는 구간은 B2-B3와 B4-B5 사이 구간에서만 나타난다(그림 3-38). 대체로 이러한 퇴적층은 16B-GC 코어와 마찬가지로 IRD 없이 주로 세립질 퇴적물로 구성된다. 또한 150-340 cm(B2-B3) 구간은 16B-GC와 28B-GC 코어의 B2-B3 사이의 퇴적구간과 매우 유사한 구조적 특징을 보인다(그림 3-39b). 다만, 다른 코어 퇴적물에 비해 회색 및 올리브색 퇴적구간에서 비교적 생물교란이 거의 확인되지 않고 엽리층리가 보다 선명하게 발달된 특징을 보인다(그림 3-39). 마지막으로, 16B-GC 코어 퇴적물에서처럼 두껍지는 않지만, B3-B4 사이의 구간에서 1 cm 이내에 두께를 갖는 사질 엽리층리가 관찰되며(그림 3-39c), B4-B5 사이구간에서는 16B-GC의 B3-B4 사이에 발달된 사질 층과 유사한 사질 층 및 엽리층리가 비교적 두껍게 발달되어 나타난다.



## (2) 예비 층서대비

엘리스 대지에서 척치 분지까지 총 3개의 퇴적물 코어에 대한 대략적인 연대추정을 위하여, 본 연구에서는 PS72/340-5 퇴적물 코어를 갈색층, 분홍색 쇠설성 탄산염 층 그리고 IRD 함량 변화를 이용하여 대비하였고, 기존에 보고된 연대 및 동위원소단계(MIS) 추정결과를 포함하여 최근까지 동의되고 있는 연대모델을 적용하였다(Adler et al., 2009; Stein et al., 2010b; Jang et al., 2013; Polyak et al., 2013). 척치분지 내에 서로 인접한 지역에서 획득된 04-JPC와 PS72/340-5 두 코어는 약 130 km의 거리 차를 두고, 각각 수심 2349 m와 2200 m 해저에서 시추되었다. 따라서, 두 코어 정점은 매우 유사하거나 동일한 퇴적물 유입, 빙하 및 해양순환의 영향을 받아온 것으로 볼 수 있다. 두 코어에 대한 대비 결과를 살펴보면, 일부 퇴적물과 해상도의 차이를 보이지만, 매우 동일한 퇴적물의 색상(갈색층의 분포), 분홍색 쇠설성 탄산염층 및 IRD 함량을 보여주며 각 갈색층 및 쇠설성 탄산염 층과 일치하는 Mn/Al과 Ca/Al 비 피크의 유사함을 보여준다(그림 3-40).

홀로세 퇴적물을 지시하는 최상부 갈색 층(B1)과 그 하부에 발달된 녹회색 퇴적층을 포함하여 두 번째로 발달된 짙은 갈색 층(B2)의 기저(116 cm)와 그 상부에 발달된 IRD층은 기존 탄소동위원소 연대분석 결과를 통해 각각 45~50 ka와 약 40 ka 연대로 MIS 3에 발달된 층서로

보고된다(Adler et al. 2009; Polyak et al. 2009; Stein et al., 2010b; Jang et al., 2013). 이러한 시기는 북유럽에서 중기 Weichselian 빙하기가 끝난 시기와 잘 일치한다(Svendsen et al. 2004). 따라서 B2 층을 포함한 주변 퇴적층까지는 아간빙기인 MIS 3, LGM(Last Glacial Maximum)과 홀로세(0~12 cm)를 지시한다.

B3 층에 대한 연대모델은 Adler et al. (2009)와 Backman et al. (2009) 연구로부터 각각 75 ka(MIS 5. 1)와 60 ka(MIS 4/3)로 이견이 존재한다(Stein et al. 2010b). 그러나 최근 보고된 지화학적 지시자, 유공충 빈도, 생층서 연구 등의 결과에 근거하여, 최근 B3 층에 대한 시기는 Backman et al. (2009)의 연대 모델을 적용한 Matthiessen et al. (2010)의 기존 해석과 달리 약 75 ka (MIS 5.1)로 동의되고 있다(Adler et al. 2009; Jang et al. 2013; Polyak et al. 2013). 따라서, B2와 B3 층 사이에 발달된 퇴적층(123~252 cm)은 MIS 4를 포함한 빙하기와 후빙기의 기록이 보존된 것으로 추정되며, 이는 북유럽 중기 Weichselian의 초기에 발달된 빙하작용과 일치한다(Svendsen et al. 2004).

MIS 5.1에 대한 층서는 위에서 언급한 바와 같이 현재까지도 이견이 존재한다. 본 연구에서는 Adler et al. (2009), Jang et al. (2013)과 Polyak et al. (2013) 연구결과와 Stein (2008)에서 B6 층 기저에 발달된 PW2 층이 약 110 ka (MIS 5.4)로 제안한 결과를 적용하였다. 제안된 결과를 적용해보면, ARA06C/04-JPC 퇴적물 코어에서 B3 층-B6/PW2 층까지 MIS 5.1-5.4 동안

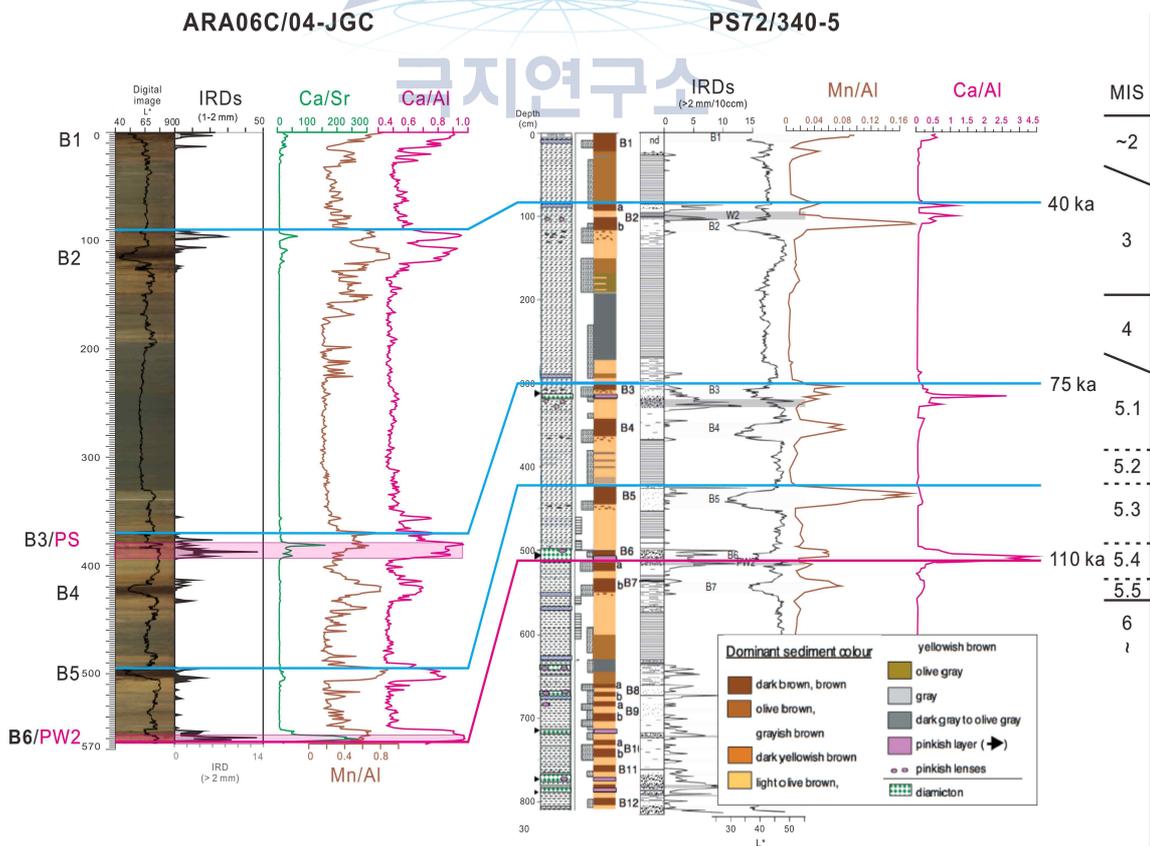


Fig. 3-40. Core correlation and tentative MIS (marine isotope stage). Age models or stratigraphy based on Adler et al.(2009), Stein et al.(2010b), Jang et al. (2013) and Polyak et al. (2013).

의 기록이 보존된 것으로 추측이 가능하다.

### (3) 퇴적상 분류

코어 퇴적물의 퇴적상은 X-선 사진에서 관찰되는 퇴적물의 조직특성과 층리 및 생교란 구조와 같은 주요 퇴적구조의 특성을 조합하여 다음과 같이 8개로 구분하였다(그림 3-39): 생교란 사질 니/니(Bioturbated sandy mud/mud, Bsm/Bm), 희미한 엽리층리 사질 니/니(Indistinctly laminated sandy mud/mud, ILSm/ILm), 박층리 니질 사/니(thinly laminated muddy sand/mud, TLs/TLm), 괴상의 (역)사질 니(disorganized gravelly sandy mud, Dsm) 그리고 균질 니(homogeneous mud, Hm).

생교란 사질 니는 뚜렷한 1차 퇴적구조가 나타나지 않고 전반적으로 광범위한 생물교란구조(burrow)를 포함하고 있다(그림 3-39c). 생교란 사질 니는 주로 점토 혹은 실트 입자로 구성되며 자갈과 모래 크기의 조립질 암편이 포함되어 있어 분급이 매우 불량하다. 이 퇴적상의 색상은 대체로 갈색 혹은 짙은 갈색을 띠며, 각 층의 두께는 다양하게 나타난다. 상부 경계면은 입도와 퇴적물 색깔 변화에 의해 구분되지만 대부분 점이적인 경계부를 이룬다. 생교란 니는 IRD와 같은 조립입자가 거의 없이 실트와 점토로 구성되며 보통 또는 불량한 분급을 보인다. 이 퇴적상은 주로 녹회색 계열을 띠며 층리가 일부 관찰되지만, 생교란 구조가 우세하다(그림 3-39a, b). 이 퇴적상은 대체로 갈색의 생교란 사질 니 퇴적상의 상·하부에 발달되며, 희미한 엽리층리 니(ILm) 퇴적상과 반복적으로 서로 교호한다.

희미한 엽리층리 사질 니는 엘리스 대지에서 획득된 28B-GC 코어의 하부에서만 관찰된다(그림 3-39c). 대체로 실트나 점토로 구성되지만, 조립질 암편(IRD)의 존재로부터 사질 니로 구분하였다. 이러한 퇴적상은 상부로가면 생교란 구조가 집중된 퇴적상으로 전이되고 하부는 괴상의 (역)사질 니가 발달되는 양상을 보인다(그림 3-39c). 희미한 엽리층리 니 퇴적상은 조립질 암편 없이 세립질 퇴적물로 구성된다. 대부분 점토질과 실트질 층리가 서로 교호하는 특징을 보이는데, 경계가 점이적이고 층 간격이나 두께의 수직적 변화도 불규칙적이다(그림 3-39b). 층리의 형태는 대부분 평평하고 비교적 평행하게 발달되어 나타난다. 퇴적상 전반에 걸쳐 다양한 생교란 흔적이 관찰되며 회색 내지 녹회색 계열의 색상이 우세하게 관찰된다.

박층리 퇴적상은 수 mm 이하의 얇은 실트질(또는 사질)과 점토질 층리로 구분되며 X-선 사진 상에서 뚜렷히 구분되는 조립질 암편은 확인되지 않는다. 층리 대체로 평평하고 규칙적인 두께 및 층간 간격과 선명한 경계가 관찰되며 균질 니 퇴적상과 교호한다(그림 3-39b, c). 생교란 흔적은 거의 나타나지 않거나 퇴적상의 상부에서 일부 나타난다. 특히, 박층리 니질 사 퇴적상은 04-JPC에서 일부 관찰되지만, 엘리스 대지 동쪽 사면하부 코어(16B-GC) 퇴적물의 하부 구간(289-296 cm) 구간에서 가장 선명하게 관찰된다.

괴상의 (역)사질 니 퇴적상은 위에서 언급한 바와 같이, 엘리스 대지의 코어 퇴적물 최하부

에서만 관찰된다. 전반적으로 기질지지(matrix-supported)하며 조립질 암편이 불규칙적으로 산재하는 특징을 보이고 그 상부는 희미한 엽리 층리 사질 니 퇴적상의 전이를 보인다(그림 3-39c). 균질 니 퇴적상은 내부 퇴적구조와 생물교란 구조가 거의 관찰되지 않는 퇴적상으로서, X-선 사진 상에서도 비교적 밝고 균질한 명암도를 보인다. 주로 박층리 퇴적상과 교호하는 양상을 보이고, 단일로 나타나는 경우는 2~3 cm로 얇게 나타난다(그림 3-39c).

#### 라. 토의 : MIS 단계별 퇴적환경 복원

본 연구에서 구분된 대략적인 MIS 단계는 PS72/340-5 퇴적물 코어와 ARA06C/04-JPC 퇴적물 코어와의 대비를 통해 MIS 5-1까지의 시기를 구분하였다(그림 3-40). 그림 3-38에서 16B-GC와 04-JPC 코어 퇴적물은 쇄설성 탄산염층과 갈색층을 포함하여 XRF 자료와 IRD 함량 변화에 근거하여 적절한 코어대비가 가능하다.

이러한 코어대비와 기존에 동의된 연대모델을 적용해보면(Adler et al., 2009; Stein et al., 2010b; Jang et al., 2013; Polyak et al., 2013), 앨리스 대지 사면하부에 위치한 16B-GC 코어 퇴적물은 MIS 5.4 (약 110 ka)에 발달된 것으로 알려진 PW2 층이 획득되지 않은 것으로 보아 MIS 5.3 시기의 일부 기록이 보존된 것으로 추정된다.

28B-GC 코어 퇴적물의 대비는 뚜렷하게 B3 층이 확인되지 않기 때문에, MIS 4/5 경계에 대하여 정확하게 대비하기가 곤란하다(그림 3-38). 28B-GC 코어 퇴적물에 대하여, MIS 5 시기에 대한 기록의 존재여부는 28B-GC 코어의 260-280 cm 구간에 대하여 MIS 5를 지시하는 지시종 *B. aculeata*, *N. incompta*, 유공층 및 생층서 분석 등을 통해 보다 정확하게 확인될 수 있다(Polyak, 1986, 2013; Adler et al., 2009; Stein et al., 2010b). 그러나, 코어 심도 약 250 cm에서 쇄설성 탄산염을 지시하는 뚜렷한 Ca/Sr 비의 피크와 IRD 함량 변화(그림 3-38)를 포함하여, MIS 4에 발달된 것으로 추정되는 각 코어 퇴적물의 회색층 구간에 대한 퇴적구조를 살펴보면(그림 3-39b), 서로 상당히 유사한 특징을 보이는 것을 확인할 수 있다. 따라서, 본 연구 결과에서는 28B-GC 코어에서 심도 약 250 cm에서 코어 기저까지 발달된 퇴적물은 MIS 5 시기 일부를 포함하는 것으로 추정하였다.

##### (1) MIS 5.2-5.1

본 연구에서 구분한 MIS 단계에 따라서, 28B-GC 코어 퇴적물은 MIS 5의 일부를 기록하는 것으로 추정하였다. 특히, 코어 심도 250 cm 이하에 나타나는 Dsm 퇴적상과 그 위를 피복하는 ILsm 퇴적상과 Bm 및 Bsm 퇴적상의 분포(그림 3-39c)는 기존에 보고된 기저빙하에 의한 침식 이후 후퇴에 따라 나타나는 빙퇴적층을 피복하는 빙·해양 및 반원양성 퇴적층으로 구성된 퇴적 시퀀스와 매우 유사하다(Polyak et al., 1997; Kleiber et al., 2000). 따라서, 28B-GC

코어 퇴적물 하부에 발달된 이러한 퇴적 시퀀스는 Niessen et al. (2013) 연구에서 보고된 엘리스 대지의 마지막 기저빙하 침식사건에 대한 퇴적학적 기록이 보존되었음을 지시한다. 따라서, 28B-GC 코어 퇴적물에 대한 MIS 단계 설정과 코어 대비는 최근 대두되고 있는 북극해 대규모 빙붕 발달에 대한 가설(Colleoni et al., 2016; Jakobsson et al., 2014, 2016)과 엘리스 대지의 침식사건(Niessen et al., 2013)의 시기를 연구하는데 있어 매우 중요한 정보를 제공할 것이다.

본 연구에서 구분한 MIS 단계에 따라서 이러한 퇴적 시퀀스는 MIS 5 단계에 포함된다. MIS 5 단계는 세부적으로 MIS 5.1-5.5로 구분되며, 이 중에서 비교적 한랭했던 아빙하기는 MIS 5.2와 5.4 단계이다(Svendsen et al., 2004). 비록 28B-GC 코어 퇴적물 기저에 발달된 빙 퇴적층(Dsm)에서 침식 시기를 알 수 있는 침식면에 대한 증거는 획득되지 않았다. 만약 이러한 침식이 MIS 5.4 동안에만 발생했다면, MIS 5.1을 지시할 뚜렷한 B3/PS 층이 확인되었을 것이다. 그러나, 그러한 층서가 28B-GC 코어 퇴적물에서 발견되지 않기 때문에, 엘리스 대지 위에 이러한 퇴적 시퀀스를 형성할 마지막 기저빙하 침식작용이 MIS 5.2에 일어났던 것으로 추정할 수 있다(그림 3-41). 본 연구의 코어대비에 따라서, 하부사면 코어 퇴적물(16B-GC)에서 MIS 5.2로 추정되는 퇴적구간은 타 구간에서 확인할 수 없는 TLs 퇴적상이 약 8 cm 두께로 두껍게 발달되는데(그림 3-38, 3-39c), 이러한 퇴적상은 사면하부에 발달되는 저탁류 퇴적체로 해석된다(Piper, 1978; Yoon et al., 1991; Ó Cofaigh et al., 2003b). 그림 3-37에서, 엘리스 대지 동쪽 사면하부의 SBP 단면을 살펴보면, 빙하기원 암설류 퇴적체(Dowdeswell et al., 1996; Niessen et al., 2013)가 발달된 것을 확인할 수 있고 16B-GC 코어 퇴적물의 대략적인 시추 심도를 비교해보면, 16B-GC 코어 퇴적물의 하부는 암설류 발생 이후 형성되는 저탁류에 영향을 받았을 가능성을 보여준다(그림 3-41). 척치 라이즈에 인접한 척치 분지 코어(04-JPC) 퇴적물

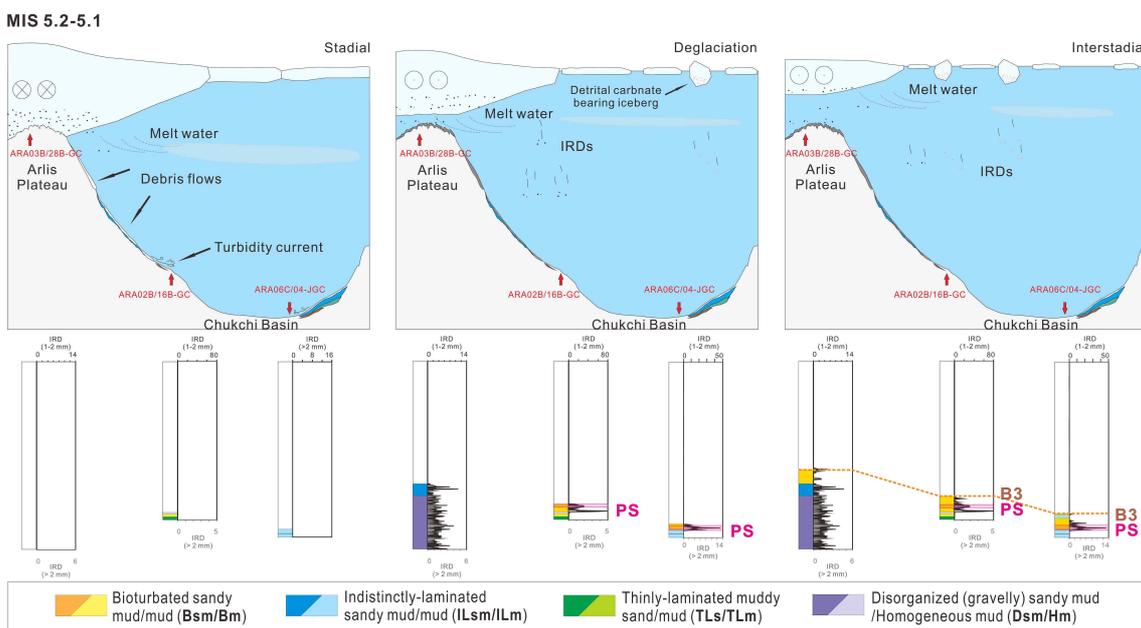


Fig. 3-41. Tentative depositional model for the Chukchi Basin during MIS 5.2-5.1.

에서 MIS 5.2로 구분된 퇴적층 구간은 주로 빙하기저선(grounding line)으로부터 반복적으로 발생하는 용빙수에 의한 ILm 퇴적상(Hesse et al., 1997, 1999; Matthiessen et al., 2010)이 주를 이루며 TLs 퇴적상이 얇은 두께로 협재되어 나타난다(그림 3-39c). 그러나, 이러한 사질 층리 혹은 엽리 층리는 엘리스 대지로부터의 거리를 고려할 때, 엘리스 대지의 기저빙하 침식과는 무관할 것이며 오히려 척치 주변부 쪽의 빙하작용과 연관될 것으로 추정된다.

16B-GC와 04-JPC 코어 퇴적물에서, MIS 5.1을 지시하는 퇴적층 구간은 Bsm 퇴적상으로 구성된 B3 층이 발달되고 그 기저에는 쇄설성 탄산염 입자(PS, pinkish spots)가 관찰된다. 생교란 사질 니의 발달과 쇄설성 탄산염의 분포는 온난화에 따른 서 북극해의 해빙감소 및 표층 순환류의 활성화, 척치 분지 해저의 산화환경 조성 그리고 로렌타이드 빙상으로부터 형성된 빙산의 퇴적작용을 지시한다(Polyak et al., 2004, 2009; Stein et al., 2010b). 특히, 16B-GC 코어 퇴적물에서, 쇄설성 탄산염 입자(PS)가 분포하는 퇴적층의 하부에서는 다양한 크기의 IRD가 집중되는데, 이는 PS 층과는 달리 Ca/Sr 비의 피크가 상당히 감소하는 것을 확인할 수 있다(그림 3-38, 3-39c). 이러한 결과는 로렌타이드 빙산에 의한 퇴적작용 이전에 다른 기원의 IRD가 발달된 사건이 존재했음을 지시하며, 아마도 엘리스 대지에 발달되었던 기저빙하의 기저부에 포획되었던 쇄설물이 후빙기로 전이되는 과정에 직접적으로 사면부까지 영향을 준 것으로 해석된다(그림 3-41). 이러한 맥락에서, 28B-GC 퇴적물 코어에서 뚜렷한 B3층과 쇄설성 탄산염 입자가 관찰되지 않는 이유로는 엘리스 대지위에 발달되었던 기저빙하가 MIS 5.1 동안 완전히 용빙되지 않고 일부 보존되었을 가능성을 고려할 수 있다. 엘리스 대지의 침식을 야기할 정도의 빙하는 그 두께가 약 1 km에 달할 것이며(Niessen et al. 2013), 홀로세보다는 비교적 한랭했던 MIS 5 아간빙기 시기에는 엘리스 대지에 발달된 두꺼운 빙하가 완전히 용빙되지 않고 일부 보존될 것이다. 그 결과, 엘리스 대지는 MIS 5.1 동안 두꺼운 용빙환경으로 인하여 망간 유입 및 산화환경이 덜 활성화되고 보퍼트 표층해류 순환이 척치분지 지역에 국한되어 엘리스 대지위에 뚜렷한 B3 층과 쇄설성 탄산염 입자(PS)가 형성되지 못한 것으로 추정된다(그림 3-41).

## (2) MIS 4-3

동 시베리아와 척치 주변부의 수심 약 650-750 m과 350-500 m 해저에는 기저빙하에 의한 침식흔적과 빙퇴석 구렁이 발달된 것으로 보고된다(Polyak et al., 2007; Jakobsson et al., 2008; Niessen et al., 2013; Dove et al., 2014). Polyak et al. (2007)과 Dove et al. (2014) 연구에 따르면, 척치해 주변부에 보고된 퇴적물 코어와 지구물리 자료(Chirp, MBES 등)는 비교적 천해환경에 위치하는 해저(약 350~500 m)에서 기저빙하 침식흔적이 LGM 시기에 발달되었으며, 척치 주변부에 국부적으로 발달한 기저빙하 혹은 빙모의 발달로 인한 것으로 추정된다. 동 시베리아 지역과 노스윈드 해령의 수심 650-750 m 해저에 발달된 빙퇴석 구렁과 기저빙하 침

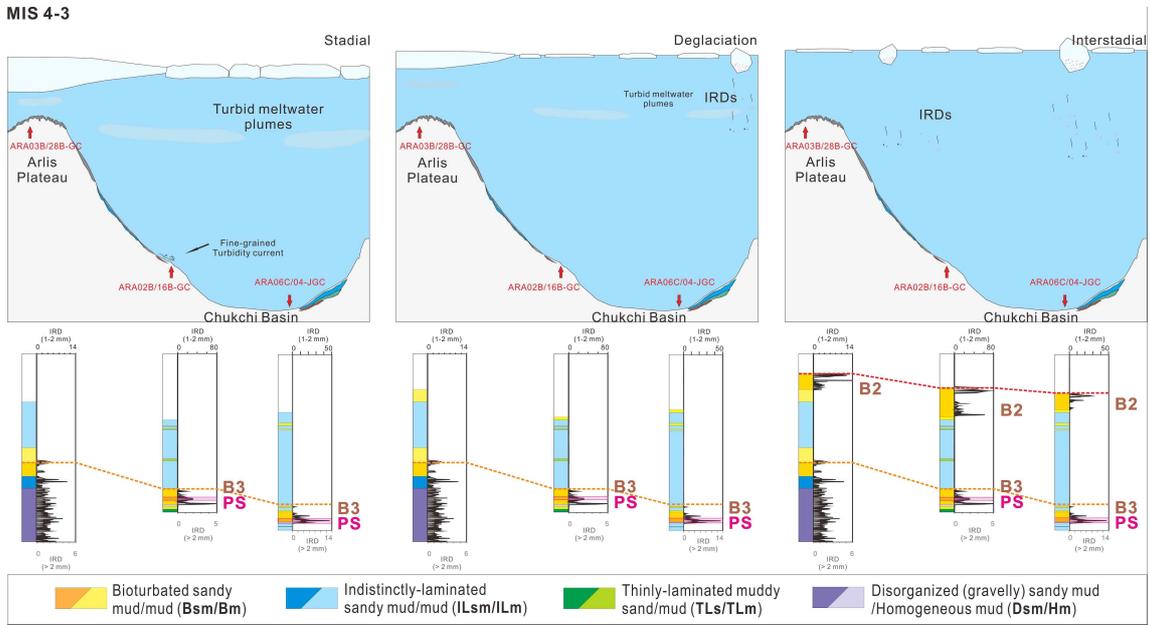


Fig. 3-42. Tentative depositional model for the Chukchi Basin during MIS 4-3.

식혼적은 MIS 4 동안 동 시베리아 기원의 빙모와 로렌타이드 빙상이 확장하면서 각 지역에 영향을 준 것으로 제안되었다(Niessen et al., 2013; Jakobsson et al., 2014). 척치 주변부는 LGM 당시에 발달된 기저빙하와 후빙기에 발달된 빙산의 침식작용으로 인하여 이전 빙하기에 대한 증거가 제거되었지만, 보다 이전 빙하기동안 척치 주변부를 중심으로 한 비교적 얇은 두께의 기저빙하 영향을 받았던 것으로 추정된다(Polyak et al., 2007; Dove et al., 2014; Jakobsson et al., 2014).

PS72/340-5 퇴적물 코어와의 대비를 통하여(그림 3-39), 구분된 MIS 4-3 구간은 B3 층의 상부에 발달되는 두꺼운 회색 퇴적층에서부터 B2 층 상부에 발달된 IRD층을 포함한다(그림 3-38, 3-42). 세 퇴적물 코어에서 MIS 4에 해당되는 퇴적구간은 대체로 빙하 말단부로부터 형성되는 반복적인 용빙수에 의한 ILm 퇴적상이 지배적이며(Hesse et al., 1997, 1999; Matthiessen et al., 2010), 타 구간과 비교하여 가장 두껍게 발달된다(그림 3-38, 3-39b, 3-42). 또한 엘리스 대지에서 MIS 4로 구분된 퇴적구간에서는 기저빙하의 침식을 지시할 뚜렷한 퇴적학적 증거가 확인되지 않았기 때문에, 비록 기후는 MIS 5.2보다 한랭했지만, 엘리스 대지의 마루를 침식할 만큼의 두꺼운 빙하는 형성되지 않은 것으로 추정된다. 그러나, 이렇게 두껍게 형성된 ILm 퇴적상의 분포는 척치 분지를 둘러싼 동 시베리아와 척치 주변부 모두에서 MIS 4 동안 국부적으로 발달된 기저빙하 혹은 빙모가 발달되었고, 두 기저빙하의 말단부로부터 공급되는 혼탁한 용빙수의 영향을 지속적으로 받은 것으로 추정된다.

ILm 퇴적상으로 구성된 회색 혹은 올리브색을 띠는 퇴적구간의 상부는 세 퇴적물 코어에서 동일하게 점이적으로 갈색질로 전이되고 생물교란 구조(Bm)가 집중되는 양상을 보이며, 최종적으로 소량의 IRD를 포함한 짙은 갈색의 B2층이 발달된다(그림 3-38, 3-42). 이러한 퇴적상

의 변화는 유라시아와 동 시베리아 육성기원 퇴적물 유입과 산화환경이 활성화되었음을 지시한다(Jakobsson et al., 2000; Polyak et al., 2004; Adler et al., 2009; März et al., 2011). 소량의 IRD를 포함한 B2 층 뿐만 아니라 그 상부에는 IRD가 집적된 층이 이차적으로 확인되는데(그림 3-38, 3-42), 이러한 두 차례에 걸친 IRD 층의 발달은 어느 정도의 시간차를 갖는 빙산 퇴적작용이 발생하였음을 암시한다. 이러한 IRD 층의 이차적인 발달에 대한 가능성에 대하여, MIS 4 동안 수심 약 650-750 m의 노스윈드 해령에 침식을 야기했던 로렌타이드 빙하작용을 고려할 필요가 있다(Jakobsson et al., 2005, 2014; Polyak et al., 2007). 노스윈드 해령과 척치 분지 사이에는 수심 약 300-400 m의 해저를 이루는 척치 대지와 척치 라이즈가 존재한다(그림 3-36). 노스윈드 해령을 침식한 두껍고 거대한 로렌타이드 빙하는 후빙기 혹은 온난기(MIS 3)에 접어들어 붕괴(혹은 용빙)가 시작 되더라도 그 규모 혹은 두께로 인하여 척치 라이즈와 대지를 넘어 곧바로 척치 분지로 이동하지 못했을 것이다. 따라서, MIS 3 초기의 이러한 거대 빙하는 척치 분지에 영향을 주지 못하고 비교적 일정 기간 동안 척치 라이즈와 척치 대지를 넘어갈 수 있는 크기로 용빙된 뒤에 이차적으로 척치 분지에 영향을 주었던 것으로 추정된다.

### (3) MIS 2-1

Niessen et al. (2013)에 따르면, LGM을 포함한 MIS 2 시기에 동 시베리아 지역은 전반적으로 기저빙하에 직접적인 영향을 받지 않았던 것으로 보고된다. 이러한 기존 연구결과에 더하여, 간빙기를 지시하는 갈색 층(B1)에서 IRD가 급격히 집중되는 양상은 후빙기 동안 동 시베리아 주변해역에서 기저빙하 또는 빙붕(ice shelf)이 존재하지 않았음을 암시한다. 위에서 언급한 바와 같이, 기존 척치해 주변부의 비교적 천해환경에 위치하는 해저(약 350~500 m)에 발달된 기저빙하 침식흔적은 LGM 시기에 발달된 것으로 보고되었다(Polyak et al. 2007; Dove et al. 2014). 이 같은 연구결과들을 종합해보면, LGM을 포함한 MIS 2 동안 동 시베리아와 척치 주변부를 포함하는 베링기아 지역은 오직 척치 지역에 국부적으로 발달된 기저빙하의 영향을 받았음을 지시한다.

그림 4a를 보면, 각 코어 퇴적물 간에 MIS 2 동안 집적된 퇴적구간의 구조적 특징을 확인할 수 있다. 대체로 각 코어의 빙하기 혹은 아빙하기에 발달된 퇴적층에서 반복적인 용빙수에 의해 형성되는 IIm 퇴적상이 지배적인 것을 확인할 수 있었다. 그러나, MIS 2 동안 발달된 퇴적층에서는 척치 분지에서 엘리스 대지로 가면서 퇴적상 분포의 차이를 보여준다. 척치 분지 코어(04-JPC)는 IIm 퇴적상이 주를 이루며, 하부사면(16B-GC)에서 엘리스 대지(28B-GC)로 가면서 Bm 퇴적상의 빈도가 우세해지는 것을 볼 수 있다(그림 3-39a). IIm 퇴적상과 교호하며 반복적으로 나타나는 Bm 퇴적상은 아마도 간헐적으로 용빙수에 의한 퇴적물 공급이 줄어드는 시기에 약한 저층류(bottom current)를 동반한 반원양성 퇴적작용이 우세해질 때 형성된 것으로 추정된다(Stow and Holdbrook, 1984; Matthiessen et al., 2010). 또한, 동쪽에서 서쪽으로

로 혹은 척치 분지에서 엘리스 대지로 가면서 ILm 퇴적상의 빈도가 Bm 퇴적상으로 전이되는 이러한 양상은 MIS 4와 달리 MIS 2 시기에는 오직 척치 주변부에서 발달된 기저빙하가 본 연구지역(척치분지-엘리스 대지)에 영향을 주었음을 암시한다(Polyak et al. 2007; Niessen et al., 2013; Dove et al. 2014). 마지막으로, 홀로세 동안 후빙기와 온난기에 접어들면서 서 북극 해는 오늘날과 유사한 환경으로 전이되어 기온 상승 및 해빙 감소에 따른 표층해류의 강화로 인하여 빙산에 의한 퇴적물 수송과 퇴적작용, 망간 유입 및 산화환경의 활성화로 소량의 IRD를 포함한 생교란된 B1 층이 형성되었을 것이다(그림 3-43)(Polyak et al., 2004, 2009; Matthiessen et al., 2010; Stein et al., 2010b; März et al., 2011).

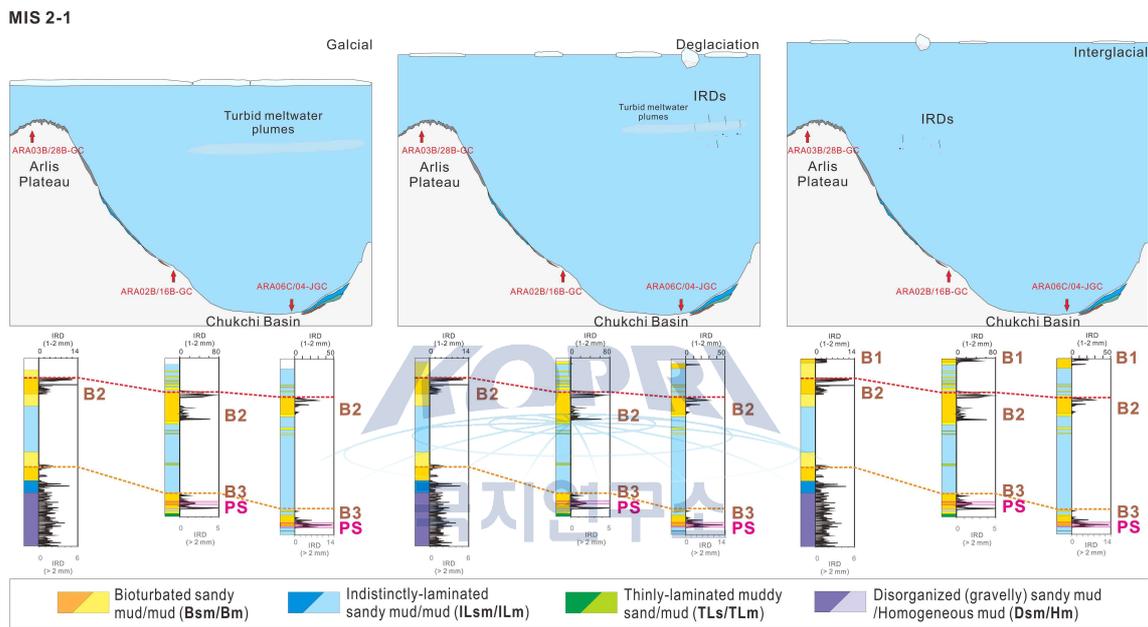


Fig. 3-43. Tentative depositional model for the Chukchi Basin during MIS 2-1.

### 3. 북극해 중앙해역 마카로프 분지(Makarov Basin)의 플라이스토세 중기 이후 고환경 복원

#### 가. 서론

제 4기는 전지구적으로 기후가 냉각되어 대륙에 빙상이 형성·발달하는 지구 역사의 비교적 최근 시기이다. 빙하기에 광범위하게 발달한 북반구 대륙 빙상은 그 큰 규모로 인해 빙상이 존재했던 육상뿐만 아니라 대륙주변부를 포함한 해양환경에도 영향을 주었기 때문에 전 지구의 기후에 미치는 영향이 크다고 할 수 있다. 육상에서의 연구에 의하면 플라이스토세 동안 북아메리카 대륙빙상이 점차 광범위하게 분포하게 되었다는 것을 확인하였다(그림 3-44; Ehlers and Gibbard, 2007). 하지만 이러한 육상에서의 빙상에 대한 연구는 제 4기 동안 반복적인 빙하 작용으로 인해 빙상이 정확히 언제 어떻게 분포하고 있었는지에 대한 정보가 부족하여 대략적인 시기만 알 수 있을 뿐이다.

거대한 대륙 빙상의 빙하기-간빙기 주기 변화에 따른 성장과 소멸의 반복은 북극해의 퇴적 환경에 큰 영향을 준다. 빙상의 성쇠와 직접적으로 관련되는 빙산과 용빙수의 유출 및 해수면의 변화와 더불어 영구 해빙, 하천수 유입량, 표층 생산성 등 퇴적 환경에 영향을 주는 많은 요인들이 빙하기-간빙기에 따라 변동하기 때문에 북극해 중앙해역 퇴적물은 북극 지역의 고환경적인 변화를 기록하고 있다(그림 3-45; Grobe et al., 2009). 특히 제 4기 후기 동안 암층서 및 지화학적인 특성들이 빙하기-간빙기 주기에 따라 변화하는 것이 특징이다. 따라서 북극해

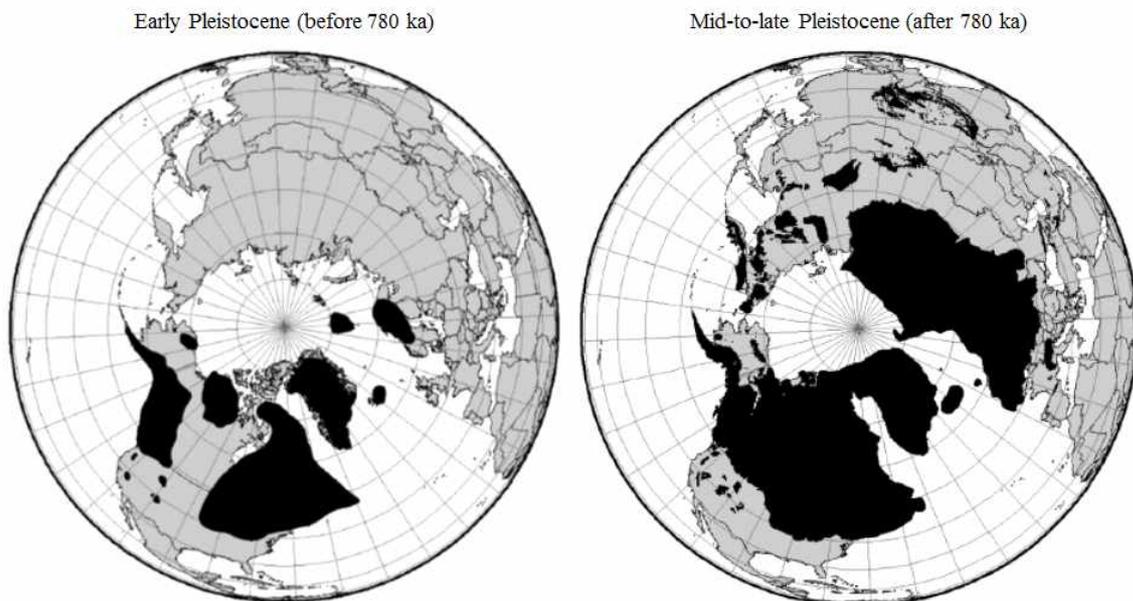


그림 3-44 Maximum extent of ice sheets in the northern hemisphere during the early and mid-to-late Pleistocene (Ehlers and Gibbard, 2007).

퇴적물을 이용한 연구를 통해 북극해 주변의 대륙 빙상의 거동, 유빙 및 해빙의 변화, 그리고 담수 유입 등과 같은 환경 변화를 복원할 수 있다.

북극해 퇴적물의 고환경적인 중요성에도 불구하고 지난 수십 년 동안 다른 대양의 퇴적물 연구에 비해 제한적이었다. 물리적으로는 북극해에 분포하는 다년산 해빙(multi-year sea ice)과 짧은 탐사 가능 기간 등으로 인한 제한된 접근성 때문에 퇴적물 채취가 어려웠다. 이외에도 낮은 퇴적률로 인한 낮은 해상도, 빙하 침식과 같은 퇴적물 교란, 그리고 연대 설정 문제로 인해 퇴적 기록에 대한 해석이 쉽지 않아 최근까지 북극해 퇴적물을 통한 북극해의 고환경변화는 극히 일부만이 알려져 있었다.

본 연구의 목적은 북극해 중앙해역에서 채취된 중력 코어 퇴적물의 암상 특성들과 지화학 및 광물학적인 다양한 지시자들을 이용하여 시층서를 정립하고 플라이스토세(Pleistocene) 중기 이후의 고환경적인 변화 및 이와 관계된 북극 빙하 역사를 복원하는 것이다.

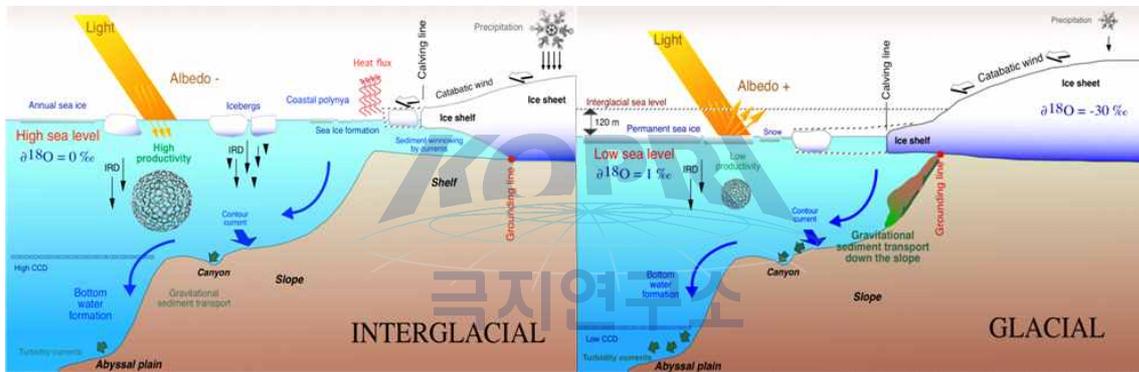


그림 3-45 Glaciomarine sedimentation at the margin of an ice-covered continent during interglacials and glacials (Grobe et al., 2009). During interglacials, sediment is eroded by the continental ice and rafted by icebergs. Sedimentation in the proximal areas of an ice-covered continent are dominated by ice-rafted debris (IRD), gravitational transport down the slope, supplemented by plankton shells and their hemipelagic sedimentation from the water column. A lower albedo during summer is due to a reduced sea-ice coverage which on the other hand allows a higher heat flux into the atmosphere and thus increased evaporation and precipitation. During glacials, gravitational sediment transport is dominant. A lower sea level provides suitable conditions for bulldozed de-posits from the shelf by the advancing ice sheet. Primary production is reduced due to missing light in surface waters under permanent sea-ice cover-age which also prevents icebergs to calve and distribute their sediment loads.

## 나. 연구지역 및 이전연구

연구지역인 북극해는 주변의 큰 대륙들에 둘러싸인 지중해라 지칭되는 반폐쇄성 대양으로 넓은 대륙붕과 해저 고원 및 해령으로 인해 평균 수심이 얇은 것이 다른 대양들과 구분된다(그림 3). 북극점을 경유하는 로모노소프 해령(Lomonosov Ridge)을 경계로 서북극해(또는 Amerasian Basin)와 동북극해(또는 Eurasian Basin)로 구분된다. 서북극해는 알파-멘델레프 해령 복합체(Alpha-Mendelev Ridge complex)를 경계로 캐나다 분지(Canada Basin)와 마카로프 분지(Makarov Basin)로 나누어진다. 길이 4.65m의 중력 코어 ARA03B-41GC02는 쇄빙연구선 아라온의 2012년 여름 탐사 기간 동안 멘델레프 해령에 인접한 마카로프 분지의 수심 약 2,700m에서 채취되었다(그림 3-46; 82°19'N, 171°33'E). 최대 수심 4,000m의 마카로프 분지의 넓이는 약 63,000km<sup>3</sup>이다. 이 지역은 북극해의 주요 표층 해류인 버포트 자이어와 트랜스폴라 드리프트의 영향을 동시에 받는 곳이며 대륙붕으로부터 멀리 떨어진 해역이기 때문에 북극해 중앙해역의 퇴적 및 수문학적인 환경을 잘 반영할 수 있는 지역이다.

빙하기-후빙기-간빙기에 따른 반복적인 기후 변화와 빙상의 성쇠 및 해수면의 변화는 빙산의 유출, 해빙의 이동 영역 그리고 해수 순환 등에 영향을 미치기 때문에 결과적으로 북극해의 퇴적 환경에 큰 영향을 미치게 된다. 따라서 북극해에서 시추된 코어 퇴적물의 암상 변화는 빙하기-간빙기로 해석되는 순환적인 반복을 보인다(Jakobsson et al., 2000; Polyak et al., 2004, 2009; Adler et al., 2009). 빙하기 퇴적물은 전형적으로 황록회색(olive gray)에서 노란색(yellow)을 띠며, 매우 적은 수의 생물 화석, 선명한 하부 경계와 생물에 의해 교란된 상부 경계, 높은 L\*값과 낮은 a\*값, 그리고 유공층  $\delta^{13}\text{C}$ 와  $\delta^{18}\text{O}$ 의 낮은 값을 가진다(Polyak and

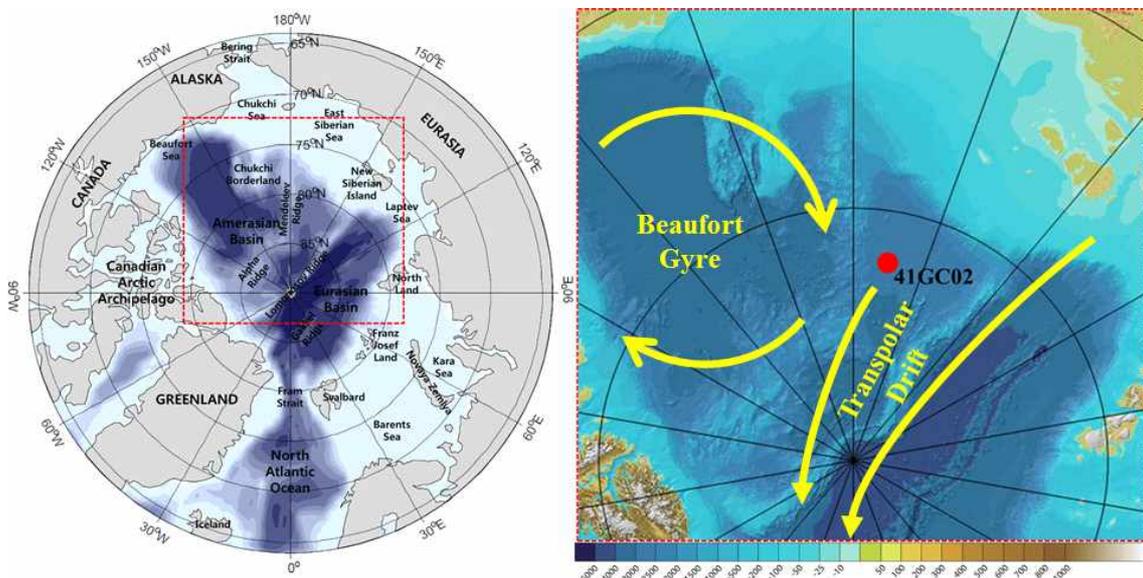


그림 3-46. Geographic map and location of gravity core ARA03B-41GC02. Red circle indicates the location of the core.

Jakobsson, 2011). 이러한 빙하기 퇴적층의 상부에 많은 양의 사질 입자와 같은 조립한 퇴적물로 이루어진 층이 존재할 수 있으며 이것은 후빙기를 지시하는 빙운쇄설물(IRD) 층이다. 반면에 간빙기 퇴적물은 망간 함량이 높고 암갈색(dark brown) 또는 갈색을 띠며, 풍부한 미화석, 높은 사질 입자 함량과 밀도가 낮고 낮은 L\*값과 높은 a\*값, 그리고 유공층의  $\delta^{13}\text{C}$ 와  $\delta^{18}\text{O}$ 의 값이 높은 것이 특징이다(Polyak and Jakobsson, 2011). 특히, 서북극해의 퇴적물 코어는 PW층(pink-white layers)이라 불리는 쇄설성 탄산염으로 이루어진 특별한 층서학적인 표지층을 포함하고 있다(Clark et al., 1980). 이 층들은 주로 캐나다 군도에서 기원된 것으로 추정되는 dolomite 입자가 풍부하고, 로렌타이드 빙상(Laurentide Ice Sheet)으로부터 빙산의 대량 유출을 지시하기 때문에 북대서양의 하인리히 사건(Heinrich events)과 유사하게 북극해 퇴적물의 층서학적인 지시자로 사용되었다(Bichof et al., 1996; Phillips and Grantz, 2001; Polyak et al., 2009). 이 PW층을 통해 서북극해의 여러 지역 간 퇴적물의 대비가 가능하고 플라이스토세 후기 퇴적물의 미화석 출현/보존으로 인해 최근 약 20만년에 해당되는 시층서는 이전에 비해 상대적으로 쉽게 이루어진다.

북극해 퇴적물의 연대 설정은 석회질 미화석의 낮은 보존성으로 인해 생층서 또는 동위원소를 이용한 연대 측정이 어렵다. 따라서 북극해 연대 모델은 고지자기 층서(e.g. Phillips and Grantz, 1997),  $^{10}\text{Be}$  연대(e.g. Aldahan et al., 1997), 아미노산 연대(e.g. Kaufman et al., 2008), 광여기발광 연대(optically stimulated luminescence; e.g. Jakobsson et al., 2003b), 암층서(e.g. Clark et al., 1980), 생층서(e.g. Cronin et al., 2014), 그리고 방사성 탄소 연대 측정 대비(e.g. Spielhagen et al., 1997) 등과 같이 다양한 방법으로 결정된다. 북극해의 연대 모델은 다양한 방법으로 결정되기 때문에 세분화된 층서 연결은 여전히 부정확하다(그림 3-47; Stein et al., 2010). 방사성 탄소 연대로 비교적 잘 알려진 연대 모델들에 의하면, 제 4기 후기 동안 일반적인 북극해의 평균 퇴적률은 분지 지역의 0.5~1.0 cm/ky 정도에서 대륙 주변부의 5~10 cm/ky 이상으로 다양하다(Darby et al., 1997, 2006; Polyak et al., 2004; Levitan and Stein, 2008).

#### 다. 연구재료 및 방법

중력 코어 ARA03B-41GC02(이하 41GC)는 선상에서 코어로깅(Multi-Sensor Core Logger; MSCL)을 통해 퇴적물 물성(P파, 습윤밀도(wet bulk density), 대자율(magnetic susceptibility; MS) 등)이 약 1cm 간격으로 측정되었다. 절개한 퇴적물 표면에서 Avaatech XRF(X-ray fluorescence) 코어 스캐너를 이용한 망간, 칼슘과 같은 원소 측정이 이루어졌다. 추가로 코어 퇴적물 슬랩의 연 X선 사진 촬영과 절개 코어 표면의 색도 값(L\* (lightness), a\* (redness), b\* (yellowness)) 측정을 실시하였고 퇴적상 및 퇴적구조를 기재하였다. 촬영된 연 X선 사진은

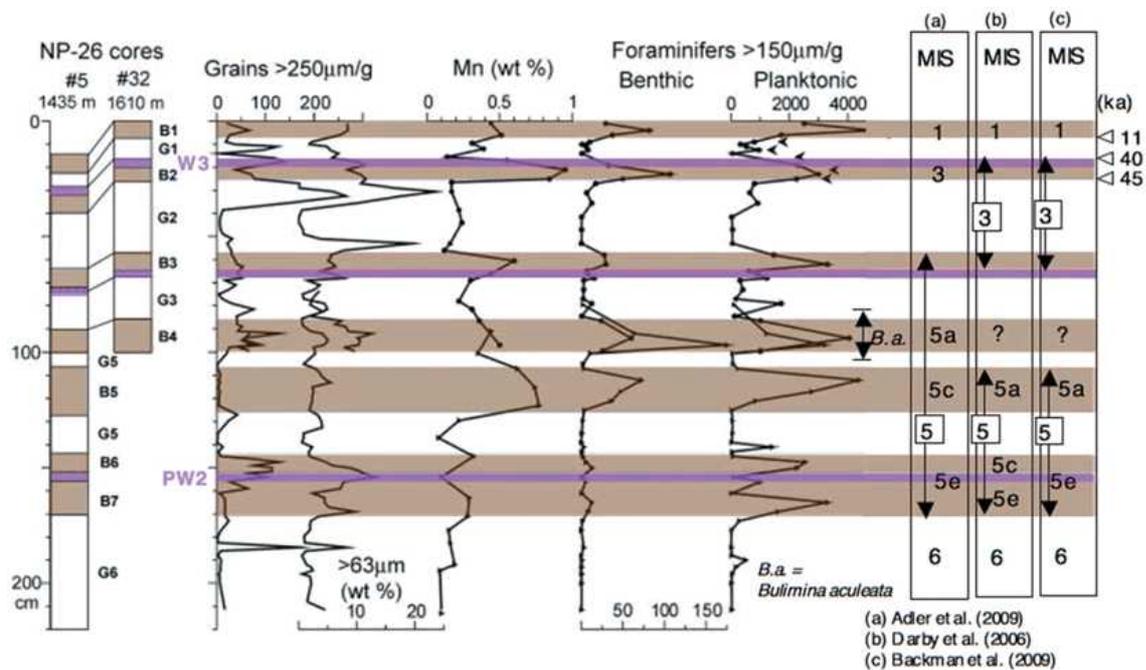


그림 3-47. Stratigraphy, amount of coarse fraction  $>250\ \mu\text{m}$  and  $>63\ \mu\text{m}$ , manganese content, and abundances of planktic and benthic foraminifers of bottom sediments from cores NP-26-5 and NP-26-32 (combined as NP-26 record) from the Mendeleev Ridge, western Arctic Ocean (from POLYAK et al. 2004, supplemented). Index numbers to the right of lithologic columns show lithologic units (B1-B7 = brown intervals, G1-G6 = gray intervals). Brown (interglacial) intervals are marked as brown bars, pink bars indicate pink-white detrital-carbonate layers used as stratigraphic markers. MIS stratigraphy of the interglacials proposed by (a) ADLER et al. (2009), (b) DARBY et al. (2006), and (c) BACKMAN et al. (2009) are shown at the right-hand side. The latter is based on nannofossil stratigraphy from Core HLY0503-8JPC and correlation to Core NP-26. For location of cores see Figure 3. Ages of 11, 40, and 45 ka are average AMS14C datings in calendar kiloyears BP (POLYAK et al. 2004, 2009).

로부터 크기가 1.5mm 이상인 입자(빙운쇄설물; ice-rafted debris; IRD)들의 수를 확인하였다. 절개된 코어에서 1cm 간격으로 465개의 부시료를 채취하여 시료 중 일부를 동결건조기를 이용하여 건조시켰다. 이때 건조 전후의 시료 무게( $\text{Weight}_{\text{wet}}$ ,  $\text{Weight}_{\text{dry}}$ )를 측정하여 함수율을 아래의 식을 이용하여 계산하였다.

$$\text{함수율 (\%)} = \{(\text{Weight}_{\text{wet}}) - (\text{Weight}_{\text{dry}})\} / (\text{Weight}_{\text{wet}}) \times 100 (\%)$$

건조된 시료를 2cm 간격으로 밀도측정기(gas pycnometer)를 이용하여 퇴적물의 건조 밀도(dry bulk density)를 측정하였다. 지화화적인 분석은 건조된 시료를 아게이트몰을 이용하여 분말화 및 균질화한 후 이루어졌다. 2cm 간격의 233개 시료를 EA-IRMS(FLASH 2000-DELTA

V)로 분석하여 총탄소 함량(total carbon contents; TC(%)), 총질소 함량(total nitrogen contents; TN(%)), 탄소 및 질소 동위원소비( $\delta^{13}\text{C}_{\text{bulk}}$  (‰),  $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$  (‰))를 획득하였다. 총유기탄소 함량(total organic carbon contents; TOC(%))을 획득하기 위해 분말화된 시료에 약 10%의 염산 용액을 24시간 이상 반응시켜 무기탄소를 제거한 후 증류수로 3번 이상 세척하여 중성화 시켰다. 건조시킨 산처리 시료를 다시 아게이트몰로 분말화 및 균질화시킨 후 EA-IRMS로 분석하여 산처리된 시료의 총유기탄소 함량(TOC')과 유기물의 탄소 동위원소비( $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  (‰))를 획득하였다. 총유기탄소 함량, 총무기탄소 함량(total inorganic carbon; TIC), 탄산염 함량( $\text{CaCO}_3$ )은 다음의 식들을 이용하여 계산하였다.

$$\text{TOC} (\%) = [100 - (8.333 \times \text{TC})] / [(100/\text{TOC}') - 8.333]$$

$$\text{TIC} (\%) = \text{TC} - \text{TOC}$$

$$\text{CaCO}_3 (\%) = \text{TIC} \times 8.333$$

약 10%의 과산화수소 용액으로 유기물을 제거시킨 시료에 대하여 습식 체질을 통해 크기 63 $\mu\text{m}$  이상의 입자들의 정량적인 함량을 구하였고 현미경 관찰을 실시하였다. 추가로 부유성 유공층 골격을 이용한 코어 상부 두 구간(6-7cm, 10-11cm)의 방사성 탄소연대 측정은 미국의 Beta Analytic Inc.에서 이루어졌다.

## 라. 예비결과

### (1) 암층서학적인 특성

코어 41GC는 암갈색 또는 갈색 층과 노란색 층이 교대로 나타나는 교호를 보였다(그림 3-48). 이러한 두 층의 교호는 앞서 설명한 빙하기-간빙기 환경 변화에 따른 것으로 노란색층과 갈색층은 각각 빙하기(또는 아빙하기)와 간빙기(또는 아간빙기)를 지시한다. 32개의 (암)갈색층들은 상부 경계면이 니질 또는 사질의 노란색층과 뚜렷이 구분되는 반면에 하부는 노란색층과의 경계가 희미하게 이루어져 있었다. 주로 니질로 이루어진 갈색층들은 대부분이 생물교란을 받은 흔적을 보인다. 갈색층들의 XRF\_Mn 농도(또는 Mn/Al 비)는 높고 L\*값은 낮은 반면에 노란색층들의 XRF Mn 농도는 낮고 L\*값은 높았다. 현미경 관찰에 의하면 41GC의 상부(2.5m 이내)의 갈색층에서는 다량의 석회질 미화석이 출현한 반면에, 노란색층에서는 미화석이 관찰되지 않았다. 갈색층 6(B6)과 7(B7)사이에 조립질의 빙운쇄설물이 다량 포함된 PW층이 뚜렷하게 나타났다. IRD는 노란색층 또는 갈색층과 노란색층의 경계부에서 높게 함량을 보였

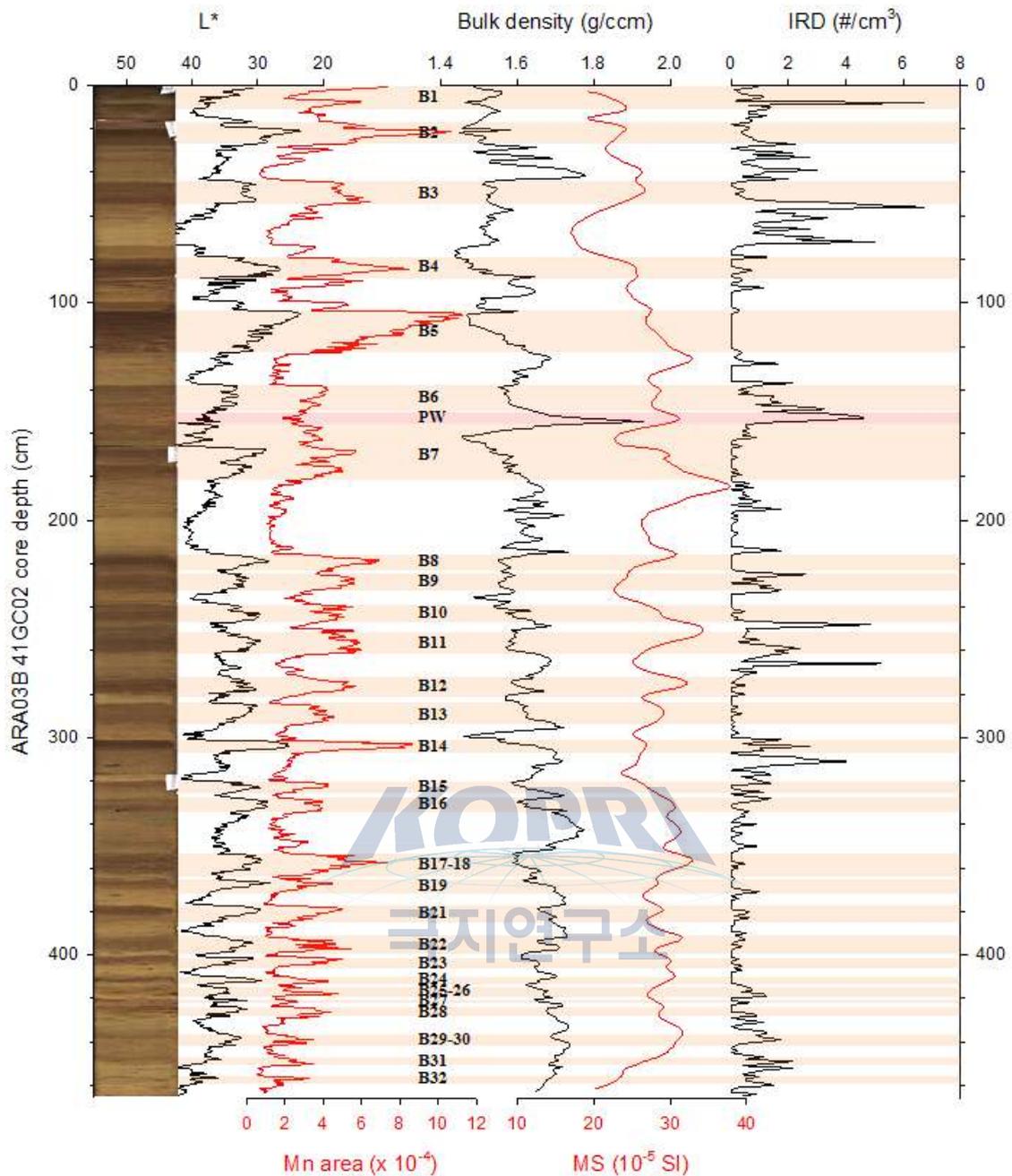


그림 3-48. downcore profiles of L\*, Mn concentration, bulk density, magnetic susceptibility (MS), and IRD content (> 1.5mm) of ARA03B-41GC02 with its core surface image. Shadings indicate brown layers and red shading indicates pink-white layer (PW2).

다.

## (2) 지화학 특성

41GC의 탄산염 함량은 0~37.65%(평균 2.37%), TOC/TN 비는 1.34~5.78(평균 2.62), 질소 동위원소비는 0.97~6.83%(평균 3.11‰), 탄소 동위원소비는 -27.36~-22.70‰(평균 -25.60‰)의 분포를 보였다(그림 3-49). 다른 지화학적 결과들은 갈색층과 노란색층 간의 뚜렷한 차이가 없었지만 탄산염 함량은 갈색층 또는 갈색층과 노란색층의 경계에서 높은 함량을 보였다. 특히

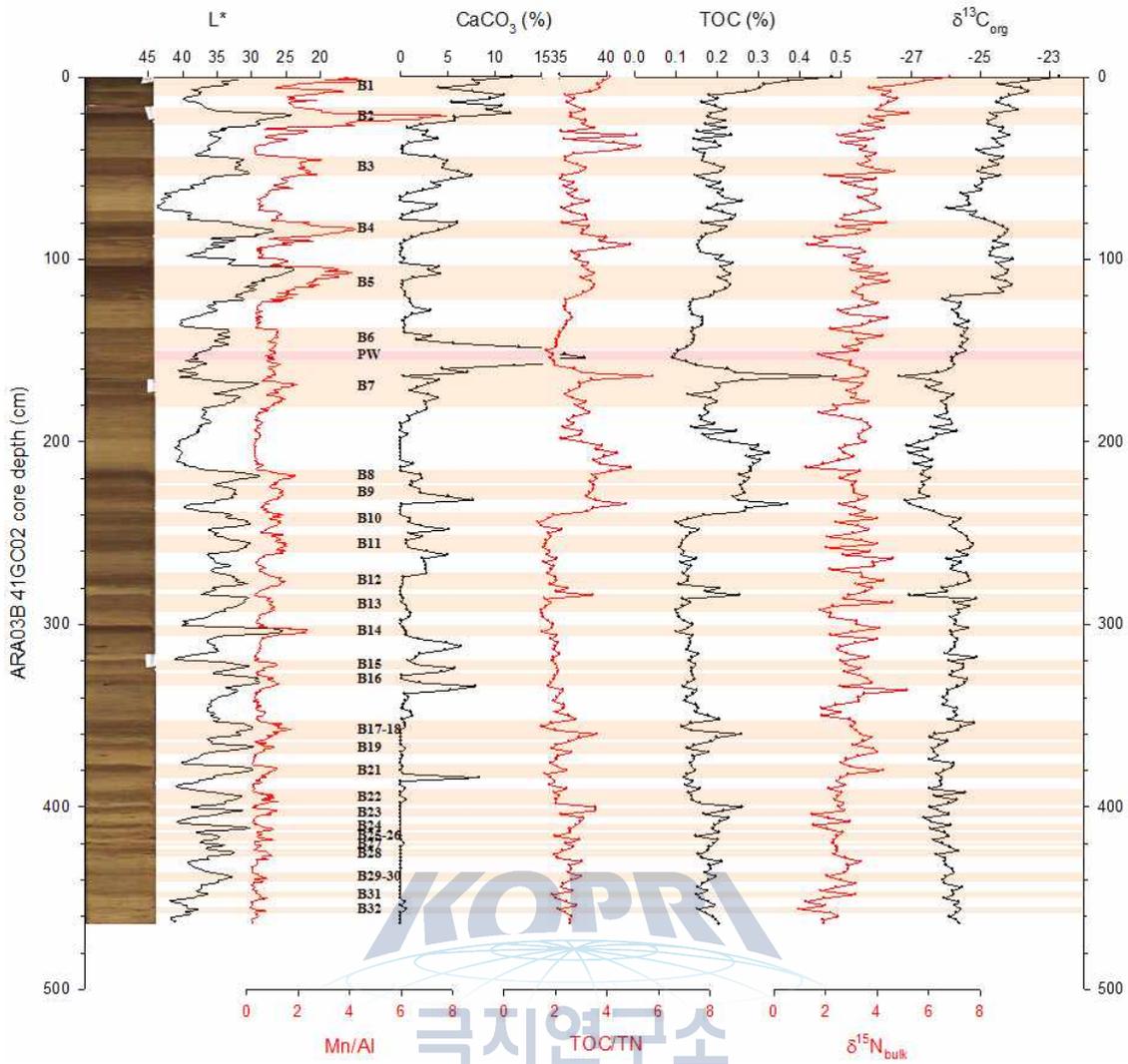


그림 3-49. Downcore profiles of L\*, XRF Mn/Al ratio, CaCO<sub>3</sub> content, TOC/TN ratio, TOC content, and δ<sup>13</sup>C<sub>org</sub> value of ARA03B-41GC02 with its surface image. Shadings indicate brown layers and red shading indicates pink-white layer (PW2).

코어 깊이 150cm 부근에서 나타나는 PW층에서 탄산염 함량이 38%에 이르는 것이 다른 구간들과 구별되는 특징이다. 현미경 관찰 결과에 의하면 이 구간은 다량의 백운석을 포함하고 있다. 코어 상부(2.5m 이내)의 갈색층들에서 높은 탄산염 함량을 보이는 구간은 석회질 미화석이 다량으로 출현하며 노란색층에서는 백운석을 포함하는 구간에서 높은 탄산염 함량이 나타난다. 코어 하부 구간에서는 석회질 미화석이 발견되지 않기 때문에 탄산염 함량이 높은 구간은 쇄설성 탄산염을 지시한다고 할 수 있다.

### (3) 코어 상부 연대 설정

코어 41GC의 상부 연대는 서북극해 멘델레프 해령에서 이루어진 이전 연구와의 대비를 통해 설정하였다(그림 3-50). 대비에 사용된 코어 HLY0503-08JPC(Adler et al., 2009; 이하

08JPC)의 연대는 고지자기 복각(Paleomagnetic inclination), 부유성 유공충, 방사성 탄소 연대, 아미노산 라세미화 연대(amino acid racemization), 그리고 저서성 유공충(*Bulimina aculeata*, *Epistominella exigua*)을 이용한 생층서 등으로 결정되었다(Adler et al., 2009; 그림 3-50). 41GC와 08JPC의 대비에는 갈색층의 출현, L\*값, 그리고 wet bulk density를 사용하였다. 연대 설정 결과 여섯 구간에 대한 연대 포인트를 획득하였고 41GC의 코어 깊이 247cm가 MIS (marine isotope stage) 8과7의 경계(244 ka)에 해당되었다(그림 3-50). 08JPC와의 대비를 통해 획득한 연대에 추가하여 방사성 탄소 연대, 부유성 유공충, 그리고 PW층과 갈색층을 통해 세부 연대를 설정하여 41GC 상부 약 2.5m에 대한 연대층서를 정립하였다(그림 3-51).

#### 마. 토의 : 제 4기 중기 이후 빙하기-간빙기 북극해 중앙해역의 고환경 변화

암층서학적인 특성은 기존에 연구된 빙하기-간빙기(또는 아빙하기-아간빙기) 주기에 따른 북극해의 퇴적 환경 변화를 잘 반영하였다(그림 3-48, 3-51). 오늘날 유라시아에서 기원하는 하천수는 망간이 풍부하다(Middag et al., 2011). 하구역에서 하천수 내의 용존, 콜로이드, 또는 유기 화합물 형태의 망간이 부분적으로 응집되어 수층으로부터 침전되는데 이러한 현상은 유라시아 대륙붕들에서 외해로 갈수록 활발하다(Schooster, 2005). 이 과정에서 퇴적된 망간이 환원과 재침전, 퇴적물 재부유, 그리고 해류 등에 의해 수층으로 재순환이 이루어진다. 해빙이 형성되는 동안 재순환된 망간이 해빙에 포집되고 북극해의 다른 지역으로 이동하며 다시 해빙이 녹으면 용존 또는 입자상의 망간이 수층에 공급되어 최종적으로 심해 분지에 공급된다. 따뜻한 시기 동안 유라시아에서 망간 공급이 활발해지고 해빙의 형성과 후퇴가 반복됨에 따라 이 시기에 형성된 심해 분지 퇴적물은 망간 농도가 높게 된다. 반대로 추운 시기 동안에는 대륙으로부터의 망간 공급의 제한과 함께 해수 순환이 약화되며 빈산소 환경에서 퇴적물은 망간이 부족하게 된다(März et al., 2011). 따라서 41GC의 망간 농도가 높은 갈색층은 간빙기(또는 아간빙기)를 지시하고 망간 농도가 낮은 노란색층은 빙하기(또는 아빙하기)를 지시한다(그림 3-48, 3-49, 3-51).

퇴적물의 색과 망간 농도 외에도 몇 가지 특징들이 빙하기-간빙기에 따른 환경 변화를 지시한다. 따뜻한 시기에 탄산염 함량이 높은 것은 석회질 미화석에 의한 것으로 볼 수 있다(그림 3-51). 반대로 비교적 차가운 시기들인 MIS 4, 5.2, 5.4, 6에는 석회질 미화석이 발견되지 않았으며 탄산염 함량이 높은 구간들은 쇠설성 탄산염에 의한 것으로 볼 수 있다(그림 3-51). 서북극해 퇴적물에서 나타나는 쇠설성 탄산염은 고생대 석회암층이 분포하는 캐나다 군도(Canadian Arctic Archipelago)로부터 기원한 것이다. 로렌타이드 대륙 빙상(Laurentide Ice Sheet)이 존재했던 캐나다 군도로부터 유출된 빙산이 서북극해의 주요 표층 해류인 버포트 환

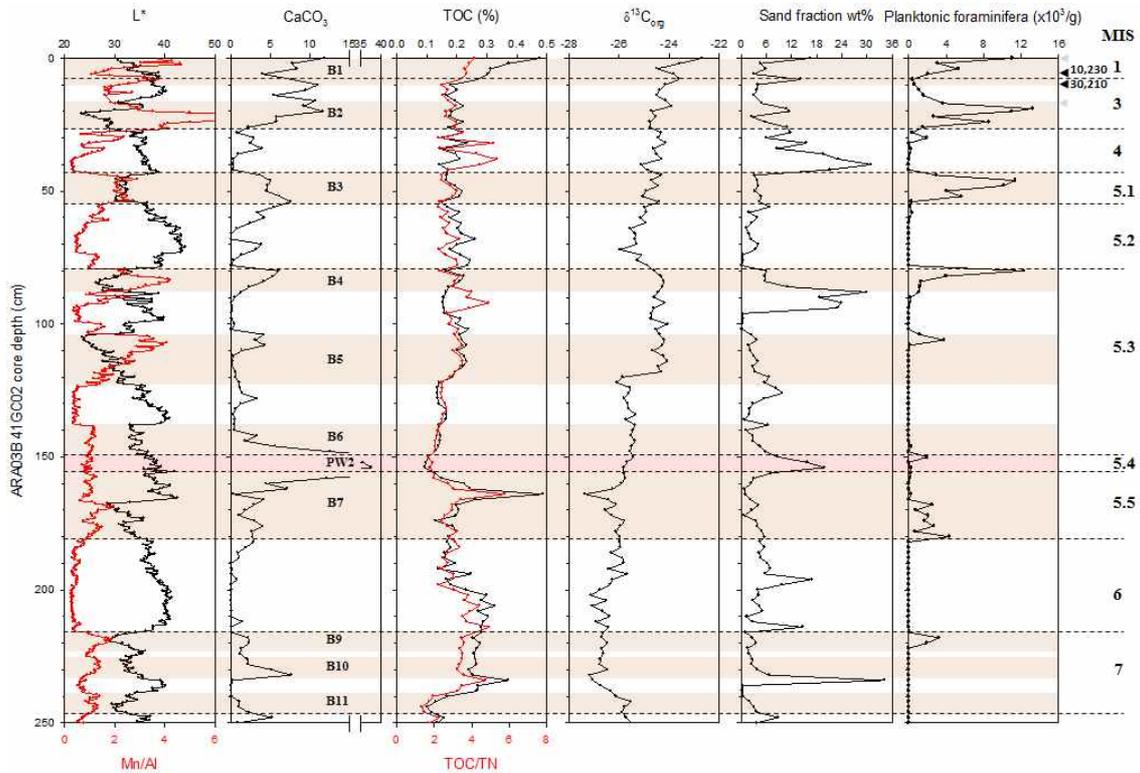


그림 3-51. Downcore profiles of L\* and XRF Mn/Al ratio, CaCO<sub>3</sub> content, TOC/TN ratio and TOC content,  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  value, sand fraction content (> 63  $\mu\text{m}$ ), and planktonic foraminifera (> 63  $\mu\text{m}$ ) content of ARA03B-41GC02 (upper 2.5 m). Head arrows with numbers indicate calibrated 14C age (no R applied). Dashed lines divide each MIS (and sub-MIS) stages. Brown shadings indicate brown layers and red shading indicates pink-white layer (PW2).

극지연구소

류(Beaufort Gyre)에 의해 북극해로 육상기원의 쇄설성 물질들을 공급했다. 따라서 41GC에서 나타나는 쇄설성 탄산염 함량이 높은 구간들은 로렌타이드 대륙 빙상으로부터 빙산 유출 사건을 지시한다. 이러한 구간들은 추운 시기가 끝나고 따뜻한 시기로 전환되는 후빙기, 또는 빙상이 최대 성장하여 빙산 유출이 활발한 최대빙하기에 해당된다. 현재 설정된 연대에 따르면 MIS 3/4, 5.1/5.2, 5.4, 5/6, 등이 로렌타이드 대륙 빙상의 후퇴 또는 최대 성장기를 지시한다.

부유성 유공충 함량의 변화는 빙하기-간빙기에 따른 북극해 중앙해역의 환경 변화를 잘 보여준다(그림 3-51). 따뜻한 시기 동안 (여름철) 해빙의 후퇴로 일차 생산성이 증가하여 부유성 유공충이 번성할 수 있는 환경이 조성되어 간빙기 구간에서 석회질 미화석이 풍부하게 나타나고 반대로 추운 시기 동안 두꺼운 해빙이 형성되어 유공충이 번성하지 못했을 것으로 여겨진다. 하지만 빙하기-간빙기에 따른 표층 생산성의 감소와 증가에 대한 증거가 지화학적인 고환경 지시자들인 총유기탄소함량, TOC/TN, 질소 동위원소, 그리고 유기물의 탄소 동위원소비에서는 나타나지 않았다(그림 3-51). 이것은 지화학적인 지시자들을 결정짓는 요인이 빙하기-간빙기에 따른 퇴적 환경의 차이보다는 속성작용과 같은 퇴적 후의 작용에 기인하기 때문인 것

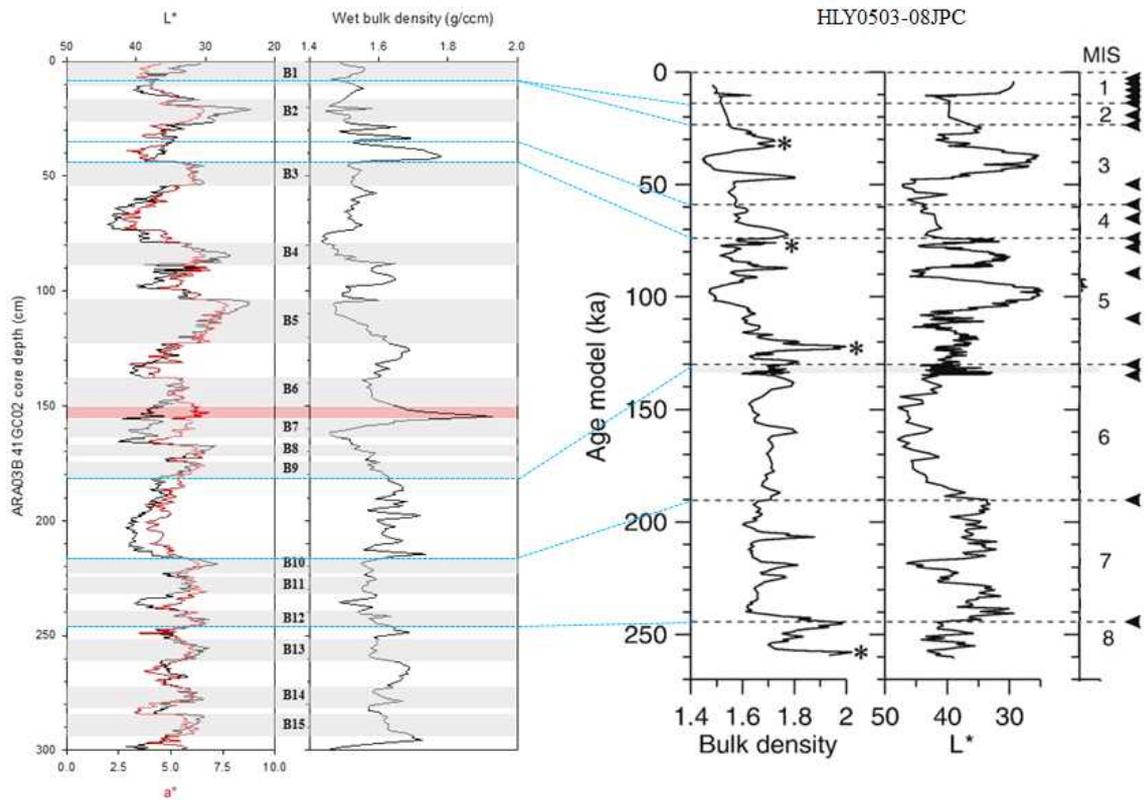


그림 3-50. Correlation between ARA03B-41GC02 (upper ~2.5m) and HLY0503-08JPC(Adler et al., 2009). Blue dotted lines indicate correlation points which were established based on variations of L\* and bulk density as well as occurrences of brown layers. Gray shadings on the left figures represent brown layers. Red shading on the left figures indicates pink-white layer (PW2).

으로 여겨진다. 질소의 경우를 살펴보면 41GC의 TOC/TN 비는 일반적인 해양 퇴적물의 C/N 비에 비해 매우 낮은 값을 보이는데 (그림 3-51), 이것은 북극해 퇴적물에서 높은 함량을 차지하는 점토 광물인 illite에 포획된 무기 질소에 의한 것으로 여겨진다(e.g. Shubert and Calvert, 2001). 이러한 이유로 퇴적물의 질소 동위원소비가 퇴적물 내 유기물의 질소 동위원소를 대표하지 못하며 그 결과 질소 동위원소비의 변화가 빙하기-간빙기에 따른 환경 변화를 반영하지 못한 것으로 판단된다. 퇴적 유기물의 탄소 동위원소비의 분포 범위에 의하면 41GC의 대부분의 구간에서 나타나는 유기탄소가 육상과 해양의 혼합 기원임을 지시한다. 하지만 이 또한 빙하기-간빙기에 따른 뚜렷한 특징을 확인할 수 없었다.

퇴적물의 색, 망간 농도, IRD와 같은 암층서적인 특징과 유공충 함량의 변화는 빙하기-간빙기에 따른 북극해의 환경 변화를 잘 반영했지만 대부분의 지화화학적 고환경 지시자들은 그렇지 못했다. 따라서 북극해 중앙해역의 고환경 복원하기 위해서는 육상기원의 쇄설성 입자에 대한 추가적인 연구가 필요하며 코어 퇴적물의 연대 설정을 위한 후속 연구가 진행되어야 한다.

바. 향후 연구 계획

현재까지 설정된 41GC의 연대를 더욱 정확하게 하기 위해 석회질 미화석의 산소동위원소와 생층서(biostratigraphy)를 적용시킬 예정이다. 또한 41GC의 하부 연대 설정을 위해 XRF 원소 자료를 이용한 orbital tuning을 적용할 예정이다. 현재까지 갈색층과 MIS 연대 대비 결과에 의하면 41GC의 하부 연대는 약 1백만 년 전에 해당될 것으로 예상된다. 예상 연대에 해당되는 플라이스토세 중기 변환기(Mid Pleistocene Transition; MPT) 이후의 전지구적인 기후 변화와 함께 빙하기-간빙기에 다른 북극해의 환경 변화를 복원할 예정이다. 특히 북극해에 영향을 주는 로렌타이드 빙상을 포함한 북반구 대륙 빙상의 발달을 확인하기 위해서는 퇴적물의

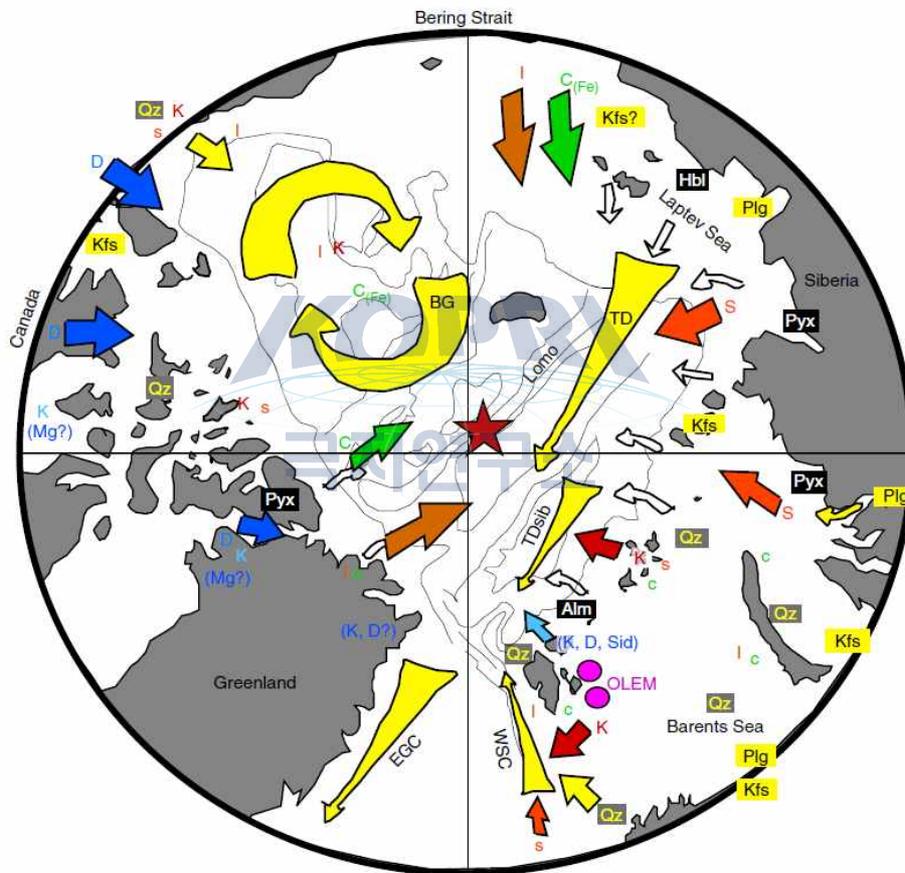


그림 3-52. Provenance of minerals and mineral groups based on ~2000 surface samples quantified with the same XRD measurements and subsequent QUAX determination after Vogt (1997) and Vogt et al. (2002). Qz = dominant, s = subdominant. Star = approximate ACEX site position. See the “Sites M0001-M0004” chapter for detailed core positions, bathymetry and oceanography. White arrows = downslope sediment transport mainly through troughs. Alm = almandin, C(Fe) = Fe-rich chlorite, D = dolomite, Hbl = hornblende/amphibole, I = illite/mica, blue K = calcite, red K = kaolinite, Kfs = K-feldspar, Mg = Mg-rich calcite, OLEM = mixed-layer clay, Plg = Plagioclase, Pyx = pyroxene, Qz = quartz, S = smectite, Sid = siderite. BG = Beaufort Gyre, EGC = East Greenland Current, Lomo = Lomonosov Ridge, TD = Transpolar Drift, Tdsib = Siberian branch, WSC = Westspitzbergen Current.

기원지 복원이 선행되어야 하기 때문에 광물학적인 지시자들인 점토 광물과 중광물에 대한 연구를 진행하고자 한다(그림 3-52). 퇴적물의 기원지 확정을 통해 과거 북미와 유라시아 빙상의 발달 및 북극해 주요 표층 해류의 변화를 복원할 수 있을 것으로 기대한다.



#### 4. 북극 심해 퇴적물에 서식하는 미생물 연구

##### 가. 서론

해양 미생물(박테리아, 바이러스)은 퇴적물에서 많은 개체수를 차지하고 있으며, 높은 다양성을 보이는 것으로 알려져 있다. 또한 해양 퇴적물의 생지화학적 순환에 미생물 군집 구조가 밀접하게 연관되어 있음이 알려졌다(Jorgensen *et al.* 2012). 본 과제에서는 북극 심해 퇴적물 환경에 서식하는 미생물의 다양성과 환경 적응 특성을 이해하기 위해 미생물을 배양·분리하고 생리적·유전학적 특성을 살펴보고자 하였다.

심해 퇴적물에서 해양 박테리아의 분리·배양에 대한 연구는 국내·외에서 알려진 바가 있다(Kim *et al.* 2007; da Silva *et al.* 2013). 하지만 서북극해 멘델레프 해령의 퇴적물에 서식하는 박테리아와 바이러스의 분리·배양에 대한 연구는 알려진 바가 없다.

##### 나. 재료 및 방법

###### (1) 연구 정점 및 시료

2013년 9월 아라온 탐사에서 획득한 심해 퇴적물 시료 중 7개의 표층 시료(그림 3-53)에 대해 미생물 분리를 위한 실험을 수행하였다.

###### (2) 퇴적물 박테리아 분리, 동정 및 특성 분석

평판 배지(marine agar)를 이용하여 박테리아를 배양·분리하였다. 모든 배양은 호기성,

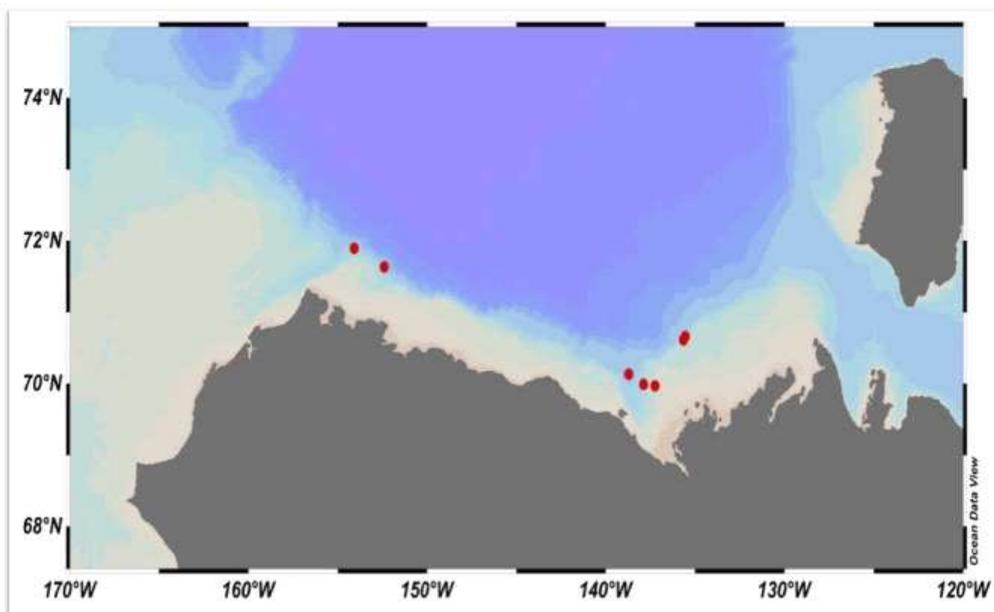


그림 3-53. 미생물 연구를 수행한 뷰포트해 시료들의 획득 정점 지도

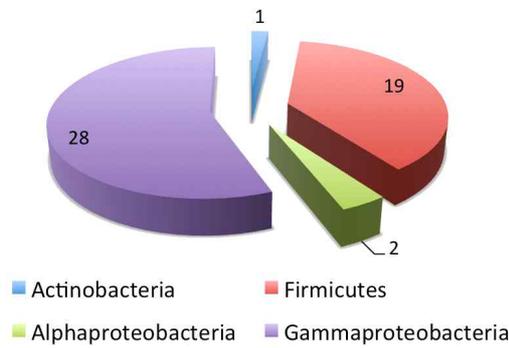


그림 3-54. 북극해 퇴적물에서 분리한 박테리아 그룹의 분포

4-20°C 조건에서 진행되었다. 박테리아의 순수 분리는 4회 이상의 콜로니 계대 배양을 실시하여 수행하였으며, 박테리아의 종 동정은 16S rRNA gene에 특이적인 universal primers (Lane 1991)를 이용한 PCR과 sequencing 방법을 이용하였다. 특이적인 미생물의 생리·생화학 특성 연구는 Hwang et al. (2008)의 방법을 이용하였다.

### (3) 박테리아 숙주 특이적 바이러스 분리

특이적인 바이러스의 검출은 spot test를 이용하였고, double-layer plaque assay 방법으로 순수 분리를 수행하였다. 바이러스의 형태는 gradient cesium chloride를 이용한 초고속 원심 분리 및 투과전자현미경 관찰을 이용하였다(Hardies *et al.* 2013).

### (4) 퇴적물 미생물의 전장 유전체 서열 분석

미생물의 전장 유전체 서열(whole genome sequence)은 차세대 염기서열 분석 기법(MiSeq; Illumina)을 이용하였다.

## 다. 결과 및 토의

### (1) 퇴적물 박테리아 연구

퇴적물 시료로부터 50개 균주를 확보하여 이에 대한 16S rRNA 유전자 서열 분석을 완료하였다. 배양 가능한 박테리아는 *Gammaproteobacteria*와 *Firmicutes* 그룹이 38-56%로 우점하였다(그림 3-54). 세부적으로는 총 24개 종과 관련이 있는 균주들이 분리되었다(표 3-1).

북극 심해 퇴적물에서 *Sediminicola* 박테리아 균주를 분리하였다. *Sediminicola* 박테리아와 유연 관계가 높은 균주/염기서열들은 대부분 해양 퇴적물에서 분리되고 있으나(표 3-2), 분류학적으로 공인된 박테리아는 일본연안 퇴적물에서 분리된 중저온성 *Sediminicola luteus*뿐이었다(Khan et al. 2006).

본 연구를 통해 *Sediminicola* 균주(PAMC 27266<sup>T</sup>; 그림 3)의 계통유전학(그림 3-56), 생리·생화학적 특성을 분석하여(표 3-3), 해당 균주가 친저온성이며 새로운 종(*Sediminicola*

표 3-1. 북극 심해 퇴적물에서 분리한 박테리아의 균주 리스트

근연종	유사도 (%)	균주 수	그룹
<i>Nocardioides terrigena</i> DS-17(T)	99.3	1	Actinobacteria
<i>Bacillus hwajinpoensis</i> SW-72(T)	99.4	2	Firmicutes
<i>Bacillus idriensis</i> SMC 4352-2(T)	99.5-99.7	2	Firmicutes
<i>Bacillus muralis</i> LMG 20238(T)	98.4-98.5	2	Firmicutes
<i>Bacillus psychrosaccharolyticus</i> ATCC 23296(T)	99.9-100	2	Firmicutes
<i>Bacillus pumilus</i> ATCC 7061(T)	99.8	1	Firmicutes
<i>Bacillus simplex</i> NBRC 15720(T)	98.3-99.8	6	Firmicutes
<i>Bacillus toyonensis</i> BCT-7112(T)	100	1	Firmicutes
<i>Lysinibacillus parviboronicapiens</i> BAM-582(T)	99.0	1	Firmicutes
<i>Paenisporosarcina macmurdoensis</i> CMS 21w(T)	99.0	1	Firmicutes
<i>Paenisporosarcina quisquiliarum</i> SK 55(T)	99.0	1	Firmicutes
<i>Loktanella salsilacus</i> LMG 21507(T)	99.9-100	2	Alphaproteobacteria
<i>Colwellia aestuarii</i> SMK-10(T)	97.9-99.8	4	Gammaproteobacteria
<i>Halomonas sulfidaeris</i> ATCC BAA-803(T)	99.7	1	Gammaproteobacteria
<i>Pseudoalteromonas arctica</i> A 37-1-2(T)	100	1	Gammaproteobacteria
<i>Pseudoalteromonas elyakovii</i> KMM 162(T)	99.8-100	4	Gammaproteobacteria
<i>Pseudoalteromonas espejiana</i> NCIMB 2127(T)	99.8	1	Gammaproteobacteria
<i>Pseudoalteromonas paragorgicola</i> KMM 3548(T)	99.6	1	Gammaproteobacteria
<i>Pseudoalteromonas prydzensis</i> MB8-11(T)	98.7	1	Gammaproteobacteria
<i>Shewanella arctica</i> IR12(T)	99.9-100	6	Gammaproteobacteria
<i>Shewanella vesiculosa</i> M7(T)	98.9-100	6	Gammaproteobacteria
<i>Vibrio tasmaniensis</i> LMG 21574(T)	99.9	1	Gammaproteobacteria
<i>Photobacterium frigidiphilum</i> SL13(T)	98.9	1	Gammaproteobacteria
<i>Pseudomonas guineae</i> M8(T)	99.7	1	Gammaproteobacteria

*arcticus*)에 해당된다는 결과를 얻었다(Hwang *et al.* 2015). 또한 해당 박테리아들의 생물지리적 분포가 저온의 극지 해양 퇴적물로 확대되어 있음을 보여주었다.

앞서 언급한 바와 같이 *Sediminicola* 박테리아 균주 또는 서열들의 출현이 해양 퇴적물에 국한되고 있는데, 이러한 분포 양상으로부터 해당 박테리아들이 해양 퇴적물 환경에 잘 적응할 수 있는 유전학적 특성을 갖고 있을 것이라는 가설을 세웠다. 이를 검증하기 위해 3개의 *Sediminicola* 균주들에 대한 전장 유전체 서열(whole genome sequence; WGS)을 얻었다. 균주들의 WGS 크기는 3.8-4.0 Mbp (그림 3-57)였으며, 2790-2882개의 유전자가 균주들 사이에 공통 출현하고 있었다(균주 당 79-87%에 해당됨). 이들 균주들은 motility, multi-drug resistance, transposable elements 관련 유전자들을 공통적으로 갖고 있었는데, 이러한 특징들은 퇴적물 환경에서 다른 미생물들과의 경쟁에서 유용할 것으로 여겨진다.

표 3-2. *Sediminicola* 박테리아와 유연 관계가 높은 GenBank 서열 정보

Type	Isolation source	Accession #	Identity (%)
<b>Strain NBRC 100966<sup>T</sup></b>	<b>Marine sediment (Sea of Japan)</b>	<b>NR_041301</b>	<b>100</b>
Strain	Marine sediment (North Sea)	JX854410	99.9
Clone	Intertidal surface sediment (China)	JX193362	99.8
Strain	Marine sediment (North Sea)	JX854367	99.8
Strain	Marine sediment (Sea of Japan)	NR_113965	99.7
Strain	Marine sediment	JX312335	99.7
Strain	Marine sediment (Sea of Japan)	AB206958	99.7
Strain	Marine sediment (Sea of Japan)	AB206956	99.7
Strain	Unknown	AB681443	99.7
Strain	Marine sediment	JX312336	99.5
Strain	Marine diatom	KC250894	99.5
Strain	Marine sediment (North Sea)	JX854350	99.5
Strain	Marine sediment (Sea of Japan)	AB681305	99.4
<b>Strain NBRC 100967</b>	<b>Marine sediment (Pacific Ocean)</b>	<b>AB681303</b>	<b>99.4</b>
Strain	Marine sediment (Pacific Ocean)	AB206959	99.4
Strain	Marine sediment (North Sea)	JX854412	99.4
Strain	Marine sediment (Sea of Japan)	AB681304	99.3
Strain	Marine sediment	JX312334	99.3
Strain	Marine sediment	JX312343	99.3
Clone	Marine sediment (Arctic)	JQ586290	99.2
Strain	Marine sediment (Arctic)	DQ514308	98.9
Strain	Unknown	DQ280371	98.9
<b>Strain PAMC 27266</b>	<b>Deep-sea sediment (Arctic)</b>		<b>98.5</b>
Strain	Marine sediment (North Sea)	JX854358	98.4
Strain	Marine sediment (Antarctic)	KC160750	93.6

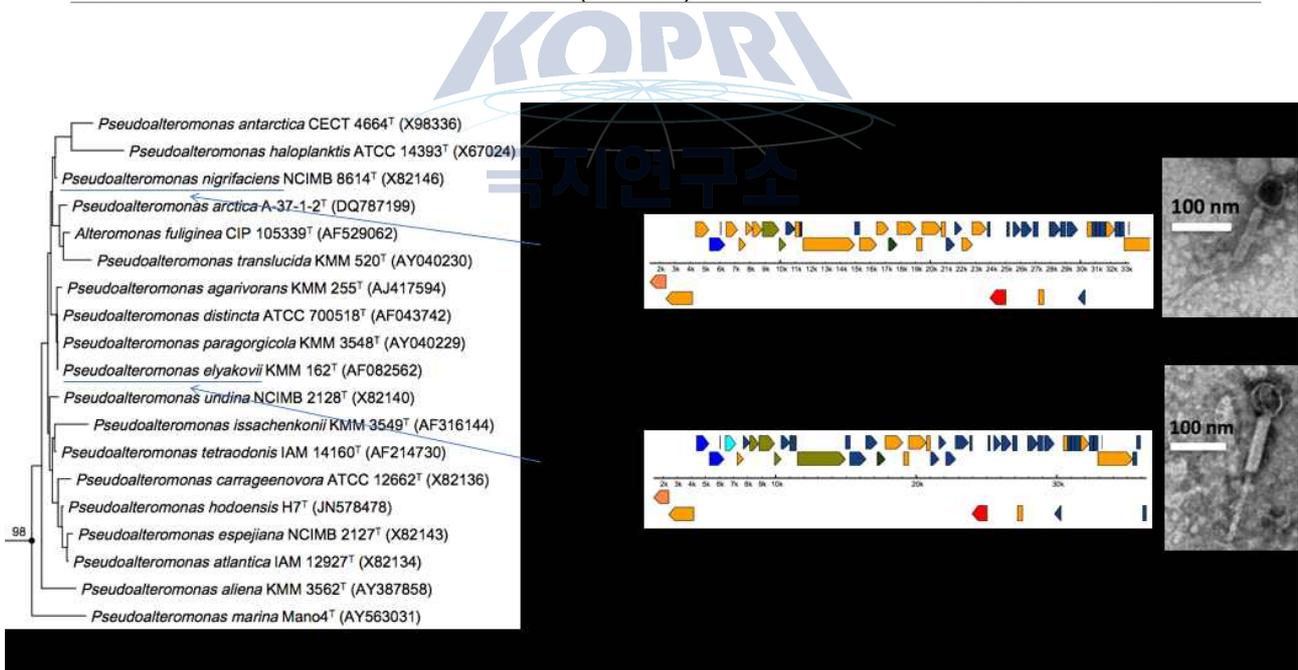


그림 3-58. 숙주 *Pseudoalteromonas* 세균들의 계통수(왼쪽), 바이러스의 유전자 배열 지도(중앙), 바이러스의 투과전자현미경 사진(오른쪽)

## (2) 퇴적물 바이러스 연구

2세트의 친저온성 바이러스-숙주 박테리아 시스템을 확보하였는데, 확보된 바이러스는 형태적 특성(그림 3-58)으로 볼 때 myovirus에 속하는 것으로 추정된다. 현재까지 *Pseudoalteromonas*에 속하는 친저온성 바이러스로는 최초의 발견으로, 심화 연구를 위해 바

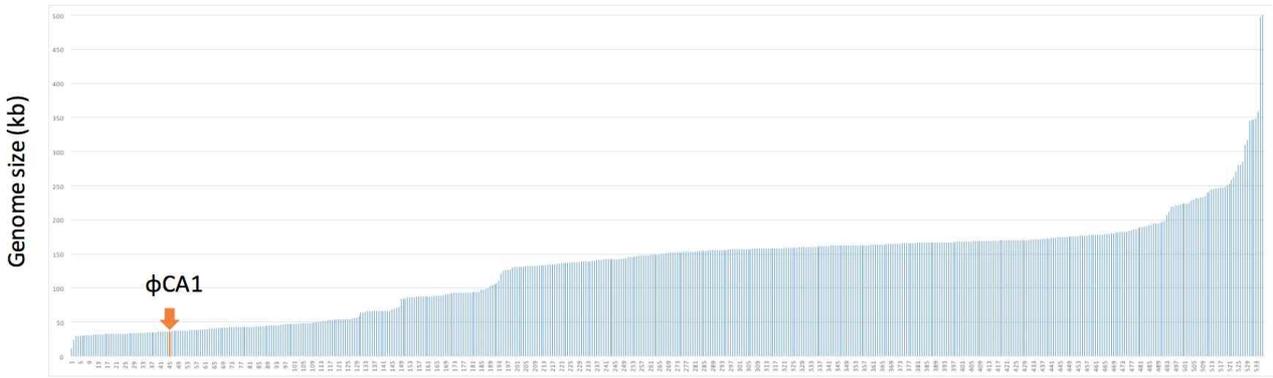


그림 3-59. 친저온성 바이러스  $\Phi$ CA1와 myovirus의 genome 크기 분포(NCBI Genome; 535개)

이러스의 전장 유전체 서열을 확보하였다(그림 3-58). 2017년 1월 현재 NCBI Genome 데이터 베이스에 등록된 myovirus의 genome 크기를 고려할 때, 분리된 친저온성 바이러스의 genome 크기(36.8 kb)는 작은 편에 속하였다(그림 3-59). 확보된 친저온성 바이러스( $\Phi$ CA1)는 *Aeromonas* phage phiO18P와 *Haemophilus* phage HP2의 바이러스 구조와 관련된 유전자의 유사성이 발견되었다(그림 3-60). 흥미롭게도  $\Phi$ CA1는 숙주의 genome에서도 발견되어 있었는데, 이는 해당 바이러스가 용균/용원성 감염 상태로 전환될 수 있음을 보여준다. 현재 숙주 세균과 바이러스의 분자·유전학적인 상호 관계에 대한 심화 연구를 수행하고 있다.

2013년 아라온 탐사를 통해 북극해 심해 퇴적물 시료를 확보하였고, 다수의 균주들을 분리하여 종 동정을 완료하였다. 북극해 심해 퇴적물로부터 *Sediminicola* 속(genus)에 해당하는 균주를 분리하였고 생리·생화학 특성, 계통분류학, 유전체 특성 연구를 수행하여 신종 세균 (*Sediminicola arcticus*)임을 논문으로 발표(Hwang *et al.* 2015)하였다. 북극 심해 퇴적물로부터 친저온성 숙주 세균(*Pseudoalteromonas* spp.)과 바이러스 시스템 2세트를 확보하였고, 유전체 서열에 대한 정보를 확보하였다.

본 과제에서 확보된 친저온성 바이러스-숙주 박테리아 시스템에 대한 연구 결과는 국제학술지에 투고할 예정이다. 또한 확보된 퇴적물 박테리아 균주들은 추후 관련 그룹들의 특성 연구 및 유용 물질 탐색 등에 활용될 예정이다.

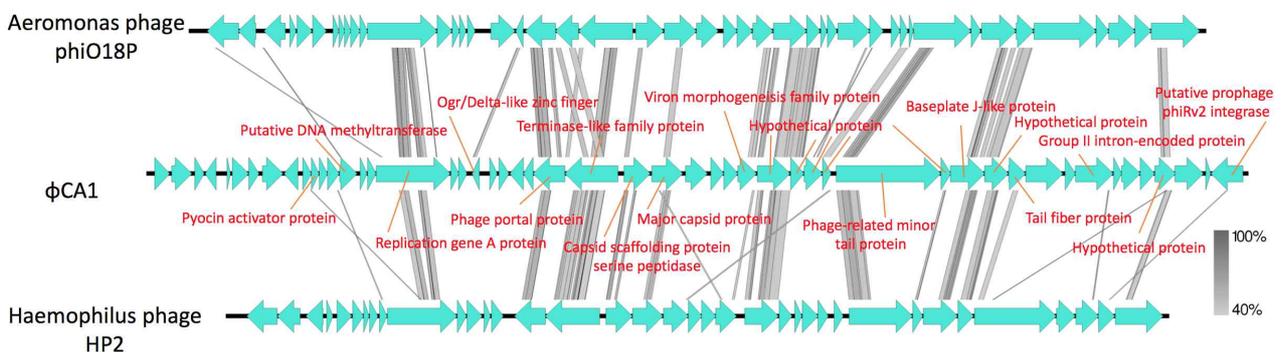


그림 3-60. 친저온성 바이러스  $\Phi$ CA1 및 관련 바이러스들의 genome 비교

## 5. 서북극해 표층퇴적물의 미생물생태 연구

### 가. 연구내용 요약 (2016년 Environmental Microbiology 저널 논문게제, IF: 6.2)

서북극해 해수환경에서 관찰된 미생물군집 및 다양성 변화가 표층퇴적물까지 연결되지는 알아보기 위해 척치해에서 22개의 퇴적물코어를 확보하여 각 코어의 표층 2cm를 채집하였다. 22개 표층퇴적물 시료와 동일 연구해역의 25개 해수 시료를 포함하여 총 47개의 해양시료를 분석한 결과, 미생물군집은 크게 해수와 퇴적물 그룹으로 나누어지며 해수의 시료들은 다시 세부적으로 태평양수(Pacific water, 7~90 m)와 북대서양 중층수와 북극 저층수(North Atlantic Intermediate & Arctic bottom water, 145~1800 m)들로 나누어 졌다.

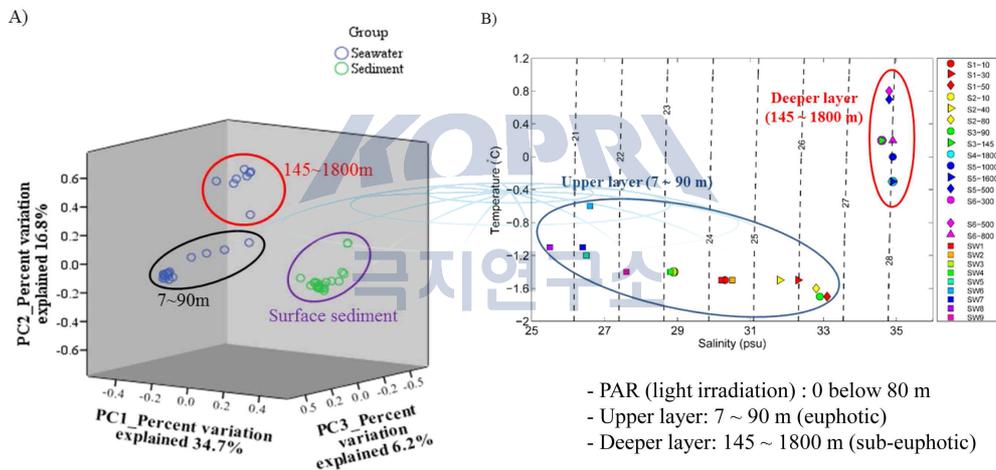


그림 3-62. 해수시료와 표층퇴적물 시료의 beta diversity pattern (A)과 해수시료의 T-S diagram

(B)

연구결과를 종합하면 해수의 미생물군집은 Alphaproteobacteria의 SAR11 group I 주로 우점하며, 표층해수에서 해빙(sea ice)까지 보여지는 SAR11 group I의 분포양상은 겨울철 해빙의 형성 시 동반되는 고밀도 염수의 침강 현상이 해수에 우점하는 미생물 분류군들에 영향을 주는 것으로 사료되었다. 또한, 이를 통해 해수와 표층퇴적물간 미생물 군집이 서로 연관성이 없음을 새롭게 확인하였다.

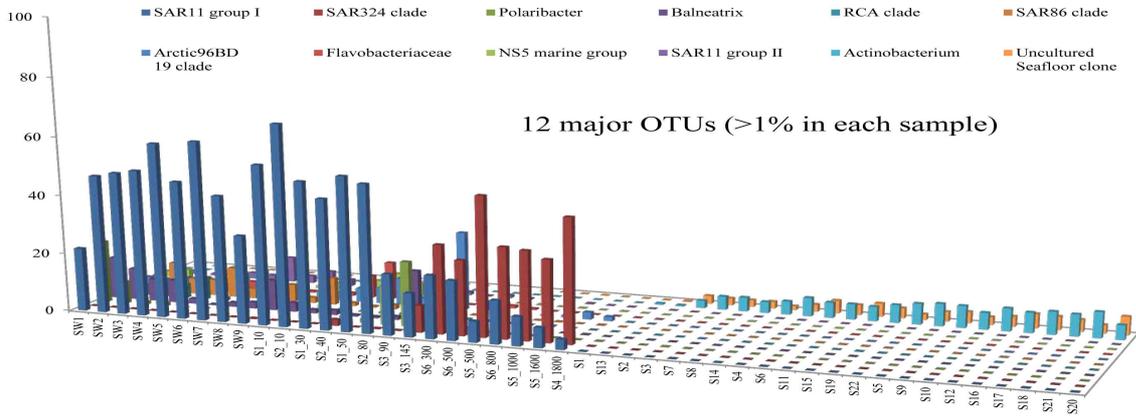


그림 3-63. 해수시료와 표층퇴적물 시료의 미생물군집구조

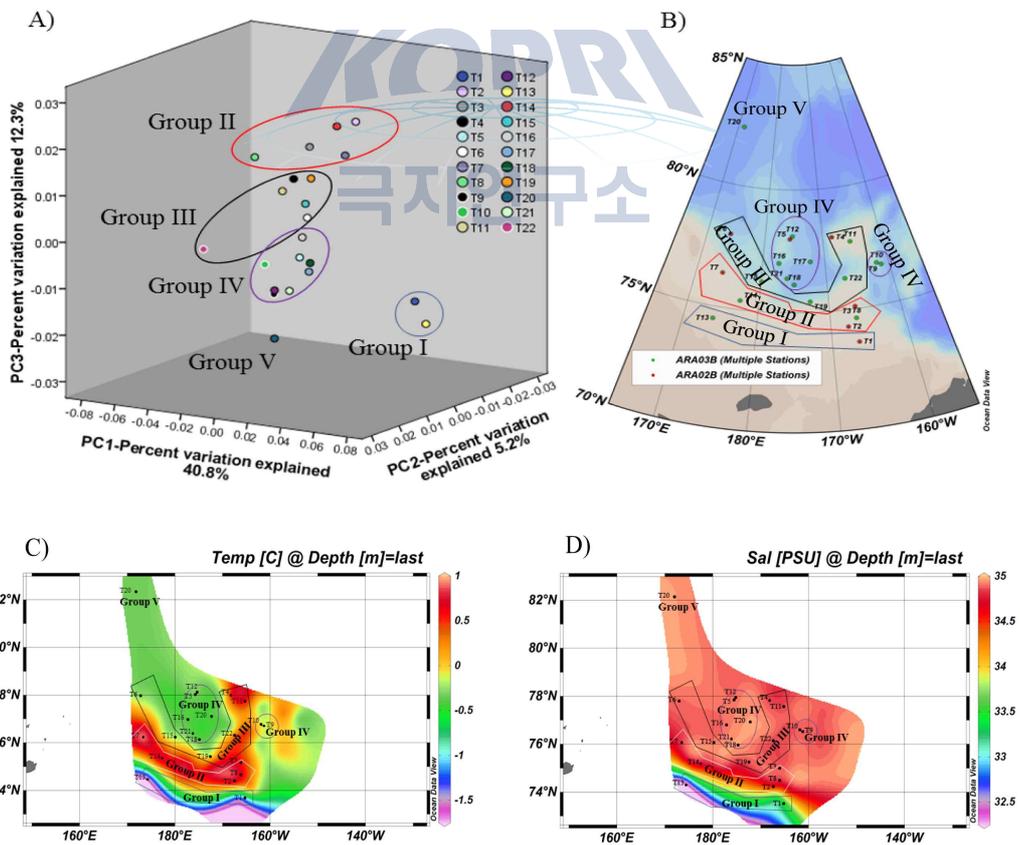


그림 3-64. Beta diversity pattern(A)과 연구정점에서 beta diversity pattern 투영(B). 연구해역 bottom water의 수온(C)과 염분(D) profile.

22개의 표층퇴적물 시료들을 연구해역의 지정학적 위치에 따라 분류한 뒤, 이들의 beta diversity 분석을 하였을 때 표층퇴적물의 미생물군집은 대륙붕에서 대륙사면 그리고 심해분지 까지 일정한 경향성을 나타내었다. 즉, 시료들을 Group I에서 Group V까지 5개 group으로 분류하였을 때 Group I은 다른 Group들과 다소 특이적으로 구분되지만 Group II에서 V까지는 PC3축을 기준으로 방향성을 가지면서 분류되었다. 이러한 경향성은 연구 해역내 T-S diagram 에 의한 bottom water의 water mass 분류패턴과 일치하며 이를 통해 연구해역내 해저지형특 성(bathymetric trend)에 의한 bacterial biogeographic pattern이 존재함을 확인할 수 있다.

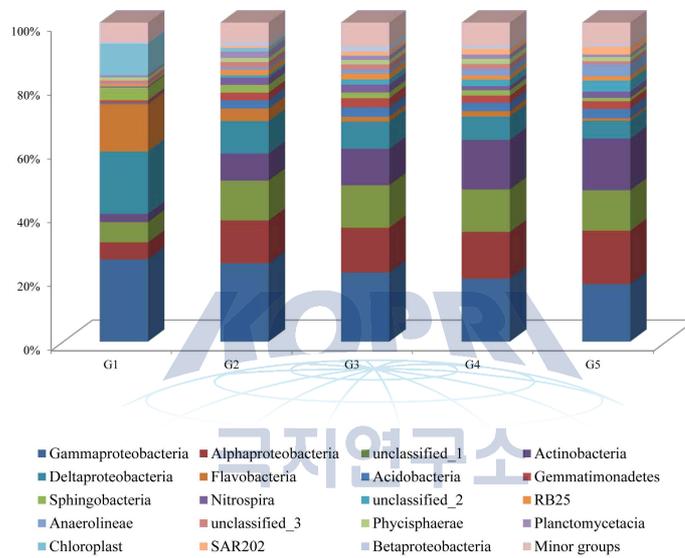


그림 3-65. 표층퇴적물에서의 미생물군집구조 (Class)

상기 표층퇴적물 시료들의 미생물군집 구조는 group별로 서로 유사한 형태를 보이지만 Group I에서 Group V까지 특정 우점 분류군들이 일정하게 감소하거나 증가하는 패턴을 보였다. 즉, Continental shelf에서 slope 그리고 deep-sea basin까지의 이러한 경향성은 미생물군집 내 특정 우점종의 population dynamics로 해석이 되며, 이 결과를 통해 연구해역의 표층퇴적물 에서는 미생물군집 내 우점분류군들이 일정한 dispersal limitation에 영향을 받는 것으로 판단 된다. 상기 연구결과는 서북극해 표층퇴적물의 미생물 생태는 해수 환경과는 구분되는 양상을 나타내며, 표층퇴적물의 bacterial biogeography에 영향을 주는 생태적 확산경계(dispersal limitation)는 연구해역 내 대륙붕에서 발생하는 저탁류(sediment gravity flow)가 주요한 요인 일 것으로 사료된다.

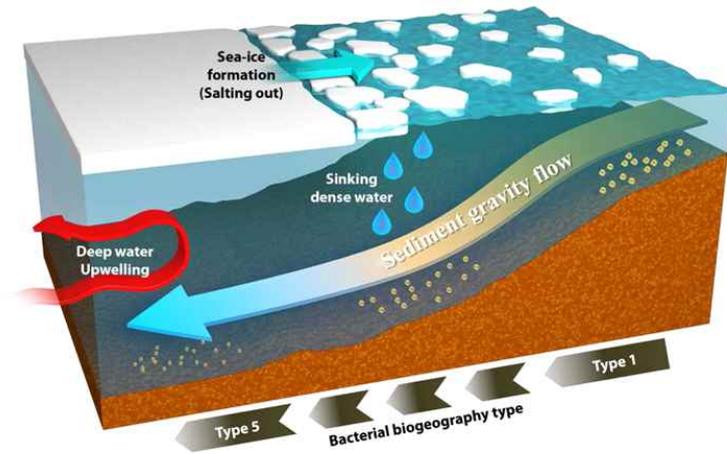


그림 3-66. 서북극해 해양환경특성에 의한 미생물생태변화

상기의 선행연구들을 통해 서북극해의 표층해수-심층해수-표층퇴적물내 미생물군집구조 및 다양성변화는 수문학적변화에 영향을 받는다는 것을 확인하였으며, 이를 통해 퇴적물코어의 표층아래 미생물군집구조 역시 과거의 해양환경조건으로 형성된 퇴적환경에 영향을 받을 것으로 판단하였다 .



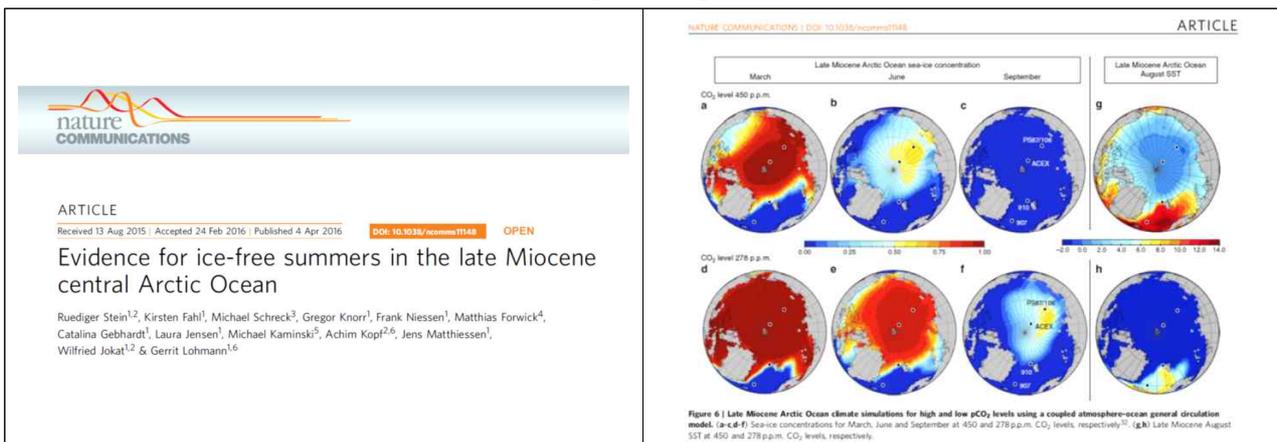
## 제 4장 연구개발 목표 달성도 및 대외기여도

지난 3년(2014. 1~2016. 12)간 주요과제 “후기 제 4기 서북극권 고해양환경변화 복원연구”를 수행하면서 다음과 같이 정성적 및 정량적 목표를 달성하였다. 2014년 ‘폴라스틴’ 북극중앙 결빙해역 탐사참여, 2015년 ‘아라온’ 서북극해 탐사를 통한 최초로 14m 길이의 비교란 빙·해양 퇴적물 시추, 동북극해 관문이 프랍해협 열린 시기 규명을 통한 북극해 지구조 및 기후변화 진화역사 규명을 위한 IODP 시추제안서 공동제출, 아북극권 피오르드 시스템에서 심부시추 추진을 위한 IODP 시추제안서 공동제출 등을 통해 극지연구소뿐 아니라 우리나라 극지 및 해양지질 분야의 탐사연구발전에 커다란 기여를 하였다. 또한 본 사업을 통해 국제공동연연구 추진을 통해 총 20편 이상의 SCI 논문을 공동으로 게재하여 극지 고기후/고해양환경분야 학문발전에 기여하였다.

1) 정성적 목표 중 하나인 탐사관련 목표는 아래와 같이 북극해 탐사 참여 및 추진을 통해 100 % 달성하였다:

가. 2014년 독일 쇄빙선 ‘폴라스틴’ 중앙북극해 및 로모노소프 해령 횡단 탐사에 참여하여 탐사 자료 및 시추코어 퇴적물 획득

※ 탐사결과는 2016년 4월 “Nature Communication“에 공동논문이 게재 됨



나. 2015년 ‘아라온’ 서북극해 탐사를 추진하여 탐사자료(멀티빔, SBP, Sparker)를 획득하고 국내 최초로 JPC 시추코어를 이용하여 4점의 비교란 빙·해양퇴적물 코어를 칩치 주변해역과 동시베리아 대륙붕 해역에서 획득

※ 탐사결과의 일부는 2016년 12월 Nature 자매지인 “Scientific Reports“에 공동논문이 게재 됨

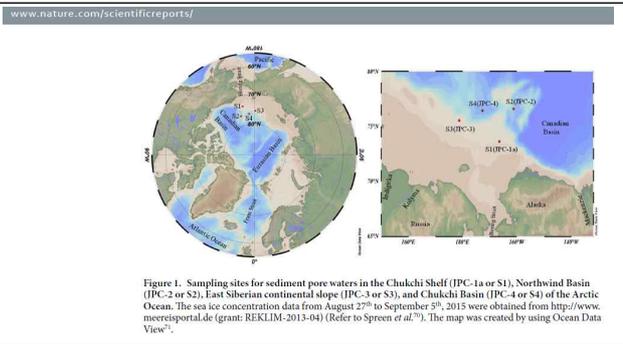
www.nature.com/scientificreports/

# SCIENTIFIC REPORTS

OPEN **Production of fluorescent dissolved organic matter in Arctic Ocean sediments**

Received: 27 July 2016  
 Accepted: 31 November 2016  
 Published: 16 December 2016

Meilian Chen<sup>1</sup>, Ji-Hoon Kim<sup>2</sup>, Seung-Il Nam<sup>3</sup>, Frank Niessen<sup>4</sup>, Wei-Li Hong<sup>5</sup>, Moo-Hee Kang<sup>3</sup> & Jin Hur<sup>1</sup>



2) 본 사업의 최종 목표 중 하나였던 IODP 시추제안서는 “북극-북대서양 opening 규명 (AAG-Drill)”을 위한 시추제안서를 2014년 3월 31일 제출하였으며, “아북극권 피오르드에서 마지막 최대 빙하기 이후 고해상의 기후환경변화 복원(FANA)”을 위하여 국제공동으로 총 2편의 시추제안서를 IODP에 제출하여 100% 이상 목표를 달성하였다.

IODP Proposal Cover Sheet

AAG-DRILL

854 Full

**Title**  
 THE OPENING OF THE ARCTIC-ATLANTIC GATEWAY: TECTONIC, OCEANOGRAPHIC AND CLIMATIC DYNAMICS (AAG-DRILL-ARCTIC-ATLANTIC GATEWAY DRILLING CAMPAIGN)

**Proponents**  
 W. Geissler, J. Knies, T. Nielsen, C. Gaina, J. Matthiessen, C. Gebhardt, V. Damm, M. Forwick, B. Hjelstuen, J. Hopper, K. Husum, J. Laberg, W. Kürschner, C. Mörgel, M. Schreck, A. Tripati, C. Vogt, M. Rebesco, S. Nam, A. Carlson, S. de Schepper, R. Lucchi, R. Matingsdal, W. Jokat, R. Stein,

**Keywords**  
 Arctic, Gateway, Cenozoic, Climate, Tectonic

**Area**  
 Arctic Ocean, Nordic Seas

**Contact Information**  
 Contact Person: Wolfram Hartmut Geissler  
 Department: Geophysics  
 Organization: Alfred-Wegener-Institut  
 Address: Am Alten Hafen 26, Bremerhaven, 27568  
 Tel.: +49 471 4831 1550, Fax: +49 471 4831 1926  
 E-mail: Wolfram.Geissler@awi.de

IODP Proposal Cover Sheet

1 - Pre a

Fjord sediment Archives in the northeastern North

**Title**  
 Fjord sediment Archives in the northeastern North Atlantic (FANA): high resolution reconstructions and mechanisms of recent climate changes and geohazards over the Euro-Arctic and Subarctic margin

**Proposers**  
 Jacques Gravelin, Mathias Forwick, Jochen Knies, Kathrin Husum, Seung-Il Nam, Jan Steen Laberg, Bert Dore Hjortsen

**Keywords**  
 Marine and continental paleoclimate, land-to-marine sediment-transfer, sea-levels, total-glaciers, ice-sheet

**Area**  
 Coastal Norway and Svalbard

**Proposer Information**  
 Proposer: Jacques Gravelin  
 Affiliation: CNRS - Univ. Bordeaux  
 Country: France

Permission is granted to print the coversheet table on [www.iodp.org](http://www.iodp.org)

**Abstract**  
 NW European fjords contain thick sediment packages deposited during the last deglaciation and Holocene. They hold exceptional potential, through the development of proxy records, to reconstruct regional marine and continental climate changes of global significance at subdecadal to subcentennial scale. These fjord systems communicate with the Norwegian Sea and Greenland Sea/Fram Strait respectively, and are viewed as extensions of the open ocean towards land. Changes in the fjords modern hydrology and sedimentary budget are related to changes in the circulation and physico-chemical signature of Atlantic and Arctic-derived water masses over the continental margin, to the seasonal development of sea-ice (Svalbard fjords), as well as to processes acting on the hinterland such as precipitation variations and the dynamics of the local glacier margins (when present). Both the fjords estuarine and nearby ocean circulations are strongly influenced by modes of atmospheric circulation of regional to global significance (e.g. the North Atlantic and Arctic Oscillations) which in turn modulates the amount and seasonality of snow and rain precipitation over the hinterland.

Fjords are the products of glacial erosion under the presence of ancient ice streams. Their deglacial deposits and sea-bed morphology reflect the post-glacial dynamics of ice sheets and associated terminal glaciers. Fjords are also the seat of frequent mass-movement deposition triggered by factors such as climatic deterioration or tectonic processes (post-glacial isostatic rebounds, local earthquakes). The understanding of these repeated failure events and their morphology are of vital importance to predict future slide events within fjords as well as over the nearby continental margin which may have catastrophic impacts on coastal infrastructures and human lives.

The importance of the above-described processes on the rate, nature, and history of sedimentation in NW European fjords are different according to the fjords physiography and their latitudinal position (i.e. glaciated vs. non-glaciated fjords). The FANA MSP-IODP initiative therefore targets 12 fjord systems along a latitudinal gradient (ca 2300 km long) from southern Norway to Svalbard, spanning the spread of the western sector of the last Scandinavian and Svalbard ice-sheets. The coring strategy aims at constructing high resolution (subdecadal to subcentennial) records spanning from the modern anthropogenic era to the earliest period of post-glacial retreat of the ice-sheet. It relies on the implementation of mostly two to exceptionally three coring sites per fjord system (inner and outer fjord) and the recovery of both short interface gravity cores and glaciolign piston cores at each proposed sites.

3) 정량적 목표는 다음과 같이 북극관련 SCI 논문 18편, 비 SCI 논문 1편, 북태평양 및 동해에서 기후변동 적용 프록시 개발 관련 SCI 논문 4편, 북극관련 국내논문 1편 등 총 24편의 논문 게재를 통해 100 % 이상 달성하였다.

가. 2014년 게재 논문 : 북극관련 SCI 논문 7편, 비극지 SCI 3편\* 및 북극관련 국내논문 1편\*\* 등 총 11편 논문게재

- 1) Park et al., 2014. Distribution, source and transportation of glycerol dialkyl glycerol tetraethers in surface sediments from the western Arctic Ocean and the northern Bering Sea. *Marine Chemistry*, 37(3), 240-242.
- 2) Moon et al., 2014. New Benzoxazine Secondary Metabolites from an Arctic Actinomycete. *Marine Drugs*, 12, 2526-2538; DOI:10.3390/md205226..
- 3) Knies et al., 2014. Effect of early Pliocene uplift on late Pliocene cooling in the Arctic-Atlantic gateway. *EPSL*, 387, 132-144.
- 4) Mackensen & Nam, 2014. Taxon-specific epibenthic foraminiferal  $\delta^{18}\text{O}$  in the Arctic Ocean: Relationship to water masses, deep circulation, and brine release. *Marine Micropaleontology*, 113, 34-43.
- 5) Schreck et al., 2014. *Batiacasphaera bergensis* and *Lavradosphaera elongatum* - New dinoflagellate cyst and acritarch species from the Miocene of the Iceland Sea (ODP Hole 907A). *Review of Palaeobotany and Palynology*, 211, 97-106.
- 6) Kim et al., 2014. Signatures of the late Holocene Neoglacial cold event and their marine/terrestrial linkage in the northwestern Pacific margin. *Progress in Oceanography*, 124, 54-65.
- 7) Kim and Nam, 2014. Holocene records of paleoclimatic and paleoceanographic changes in the western Arctic. *Geosciences Journal*, 18, 247-260.
- 8)\* Gorbarenko et al., 2014. High resolution climate and environmental changes of the northern Japan (East) Sea for the last 40 kyr inferred from sedimentary geochemical and pollen data. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 414, 260 - 272.
- 9)\* Kim and Lim, 2014. Signatures of the late Holocene Neoglacial cold event and their marine - terrestrial linkage in the northwestern Pacific margin. *Progress in Oceanography*, 124, 54 - 65.
- 10)\* Hyun et al., 2014. Carbon isotope variations in diploptene for methane hydrate dissociation during the last glacial episode in the Japan Sea/East Sea. *Geochemical*

Journal, 48, 287-297.

- 11)\*\* 허영숙 & 장광철, 2014. 과거 해수순환을 지시하는 해수기원 네오디뮴 동위원소 비 기록. 광물학회지.

**나. 2015/2016년 게재 논문 : 북극관련 SCI 논문 4편 및 비극지 1편\* 등 총 5편 SCI 논문 게재**

- 1) Hwang et al., 2015. *Sediminicola arcticus* sp. nov., a psychrophilic bacterium isolated from deep-sea sediment, and emended description of the genus *Sediminicola*. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 65, 1567 - 1571.
- 2) De Schepper et al., 2015. Early Pliocene onset of modern Nordic Seas circulation related to ocean gateway changes. *Nature Communications*, 6:8659, DOI: 10.1038/ncomms9659.
- 3) Asahi et al., 2015. Seasonal variability of  $\delta^{18}O$  and  $\delta^{13}C$  of planktic foraminifera in the Bering Sea and central subarctic Pacific during 1990 - 2000. *Paleoceanography*, 10.1002/2015PA002801.
- 4) Han et al., 2016. Bacterial biogeography influenced by shelf - basin exchange in the Arctic surface sediment at the Chukchi Borderland. *Environmental Microbiology*, 18, 668-678.
- 5)\* Hyun et al., 2015. Paleovegetation and paleoclimate changes based on terrestrial n-alkanes and their carbon isotopes in sediment from the Jeongok-ri Paleolithic Site, Korea. *Quaternary International*, 384, 4-12.

**다. 2016/2017년 게재 논문 : 북극관련 SCI 7편 및 비 SCI 논문 1편\* 등 총 8편 북극관련 논문 게재**

- 1) Stein et al., 2016. Evidence for ice-free summers in the late Miocene central Arctic Ocean. *Nature Communications*, 7:11148, DOI:10.1038/ncomms11148.
- 2) Kobayashi et al., 2016. Distribution of detrital minerals and sediment color in western Arctic Ocean and northern Bering Sea sediments: Changes in the provenance of western Arctic Ocean sediments since the last glacial period. *Polar Science*, 10, 519-531.
- 3) Chen et al., 2016. Production of fluorescent dissolved organic matter in Arctic Ocean sediments. *Scientific Reports*, 6, 39213, 1-10.
- 4) Kim et al., 2016. Terrestrial and aquatic palynomorphs in Holocene sediments from the

Chukchi-Alaskan margin, western Arctic Ocean: Implications for the history of marine circulation and climatic environments. The Holocene (Online in Press).

- 5) Tsutsui et al., 2016. Nineteen-year time-series sediment trap study of *Coccolithus pelagicus* and *Emiliana huxleyi* (calcareous nannoplankton) fluxes in the Bering Sea and subarctic Pacific Ocean. Deep Sea Research II: Topical Studies in Oceanography, 125-126, 227-239.
- 6) Jang et al., 2017. Authigenic Nd isotope record of North Pacific Intermediate Water formation and boundary exchange on the Bering Slope. Quaternary Science Reviews, 156, 150-163.
- 7) Stein et al., 2016/2017. Holocene variability in sea ice cover, primary production, and Pacific-Water inflow and climate change in the Chukchi and East Siberian Seas (Arctic Ocean). Journal of Quaternary Science, DOI: 10.1002/jqs.2929.
- 8)\* Okazaki et al., 2016. Data report: benthic foraminiferal stable isotope records at Site U1344, Integrated Ocean Drilling Program Expedition 323. Proceedings of the Integrated Ocean Drilling Program, V. 323, 1-10.



## 제 5 장 연구개발결과의 활용계획

본 사업을 통해 획득한 연구개발 결과는 아래와 같은 향후 후속연구를 위해 활용 될 계획이다.

1. 2015년 ‘아라온’의 서북극해 탐사를 통해 척치해와 동시베리아 대륙붕 주변해역에서 획득한 JPC 시추코어에 대한 예비분석(MSCL, XRF-core scanning, 코어 기재, 프록시 등)을 통해 시추코어의 예비 층서를 설정한 결과 제 4기 중기 및 후기 이후 빙하기-간빙기 기후변화 기록이 잘 기록되어 있는 것으로 밝혀졌다(그림 5-1). 따라서 기존 획득된 JPC 시추코어에서 분석된 다중 프록시 자료를 기초로 향후 ‘아라온’을 이용한 서북극해 해역에 대한 보충적인 탐사자료 및 시추코어 확보를 통해 서북극 척치해 주변해역과 동 시베리아해역에 후기 제 4기 빙하기 동안 존재했던 것으로 추정되는 대규모의 빙하(glaciers) 또는 해저기저빙하(marine-based glaciers)가 생성되어 확장(extend)되고 후퇴(retreat) 또는 소멸(decay)되는 정확한 시기를 규명하고 그 규모 파악을 파악하여 북극해 기후환경변화에 미친 영향을 위한 독일 AWI, 미국 오하이오대학교의 Byrd극지기후연구센터(BPCRC) 및 지자연과 공동추진연구 수행을 추진 할 계획이다.

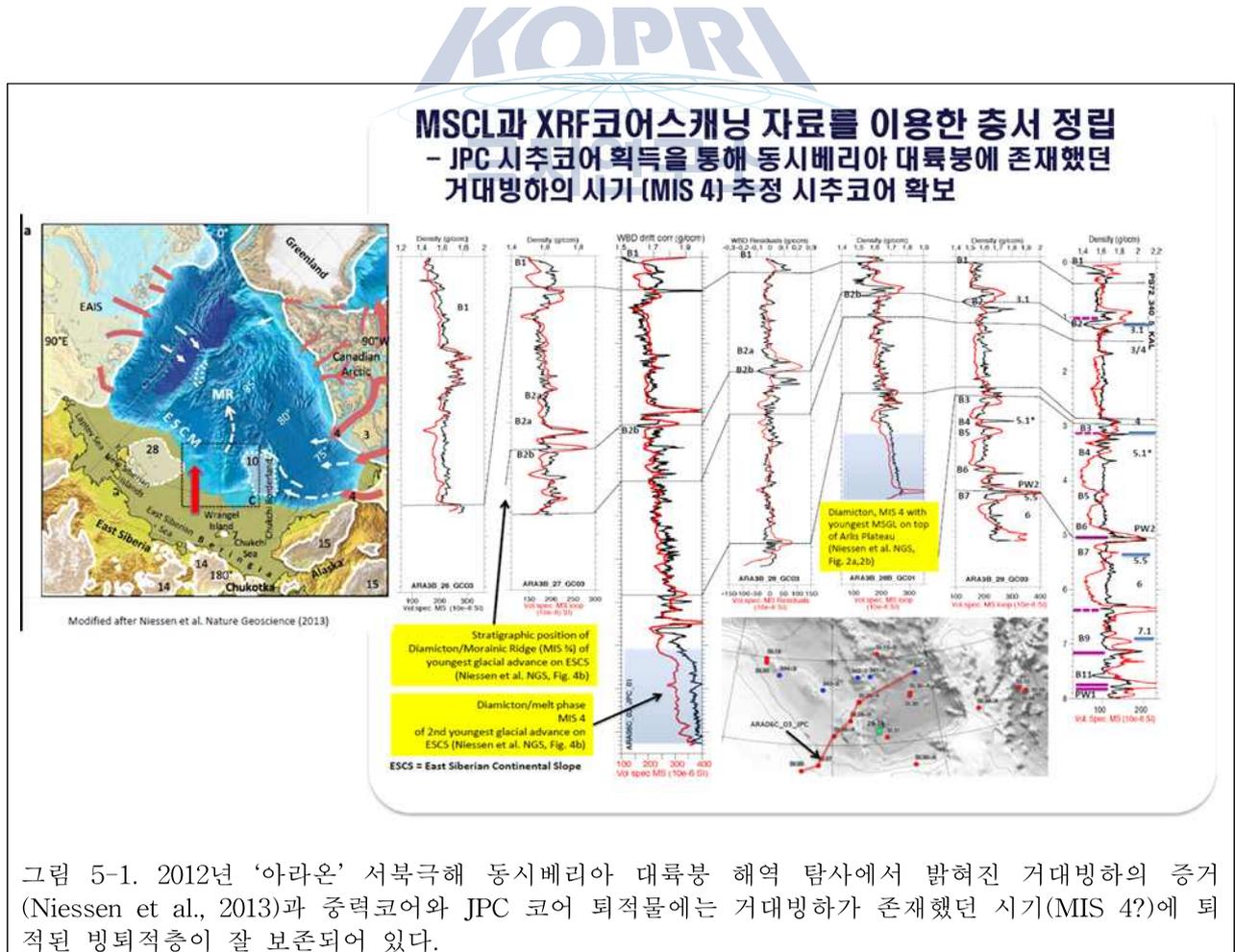


그림 5-1. 2012년 ‘아라온’ 서북극해 동시베리아 대륙붕 해역 탐사에서 밝혀진 거대빙하의 증거 (Niessen et al., 2013)과 중력코어와 JPC 코어 퇴적물에는 거대빙하가 존재했던 시기(MIS 4?)에 퇴적된 빙퇴적층이 잘 보존되어 있다.

2. 북부 알래스카 대륙붕에서 2013년 아라온 탐사(ARA/04C)시추코어 퇴적물의 다중 프록시를 이용 약 150년 전 이후 서북극해 해빙분포 및 고수온 최초로 정밀 복원을 위한 국제공동연구를 추진을 위해 미국 오하이오대학의 Byrd 극지연구센터, 캐나다 몬트리올 대학과 NSF에 연구계획서 공동제출(2016.10.17.)하였다(그림 5-2a, b). 만약 미국 NSF에서 연구 사업이 선정되어 연구비가 확보될 경우 2017년부터 4월부터 공동연구가 추진 될 예정이다.

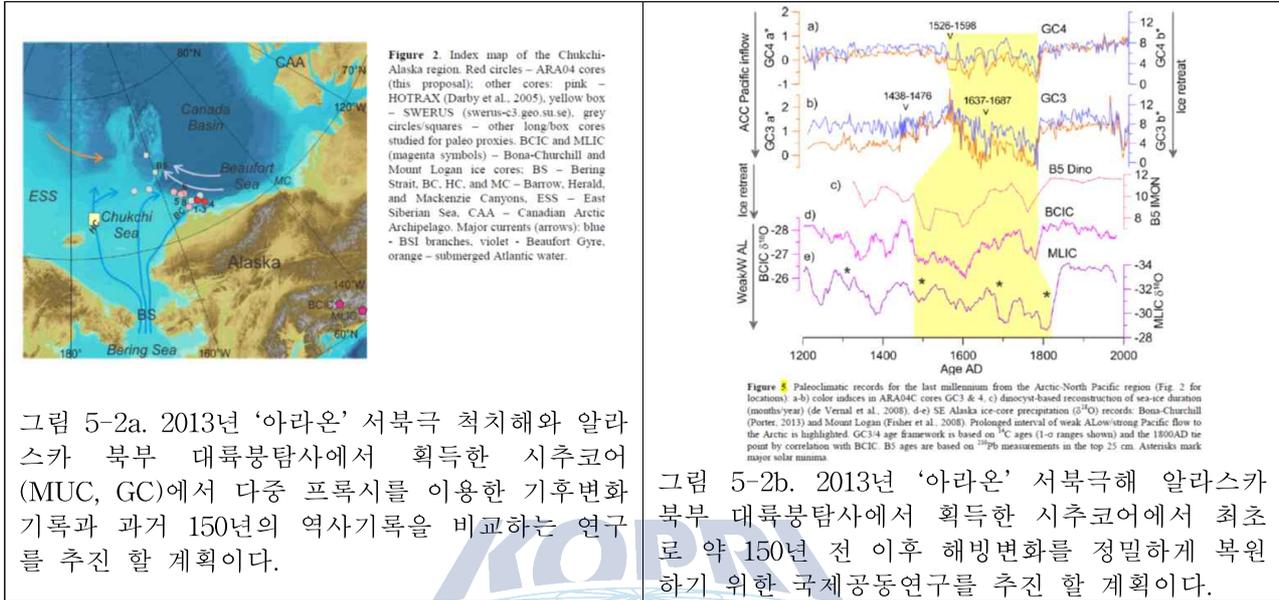


그림 5-2a. 2013년 ‘아라온’ 서북극 척치해와 알래스카 북부 대륙붕탐사에서 획득한 시추코어(MUC, GC)에서 다중 프록시를 이용한 기후변화 기록과 과거 150년의 역사기록을 비교하는 연구를 추진 할 계획이다.

그림 5-2b. 2013년 ‘아라온’ 서북극해 알래스카 북부 대륙붕탐사에서 획득한 시추코어에서 최초로 약 150년 전 이후 해빙변화를 정밀하게 복원하기 위한 국제공동연구를 추진 할 계획이다.

3. 2018년 로모노소프 해령 IODP 시추 프로그램에 참여 추진(아라온 공동참여 추진) 및 서북극해 북부 알래스카 대륙붕 및 보퍼트 맥켄지 해역 통합 시추제안서 제출추진

- 2018년 8월부터 6주간 러시아 해역에 인접한 로모노소프 남부 해령에서 추진 될 IODP 시추프로그램에 ‘아라온’ 공동참여 추진
- 스발바르 피오르드 시추제안서 수정본 공동제출을 통한 시추실현
- 동북극 Gateway 열개 및 진화역사 복원을 위한 수정본 공동제출
- 북부 알래스카 대륙붕 및 보퍼트 맥켄지 해역 통합 시추제안서 제출추진

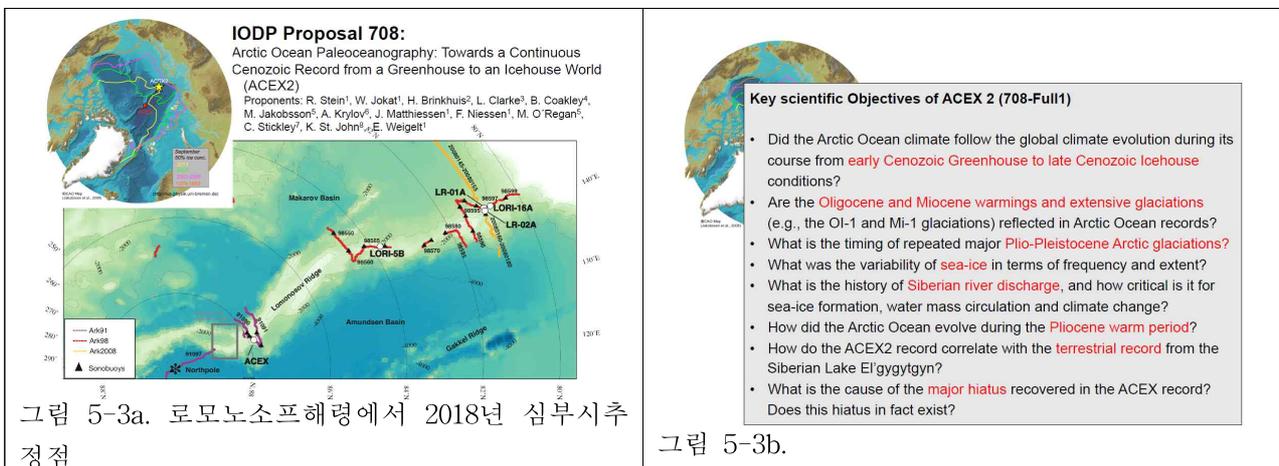


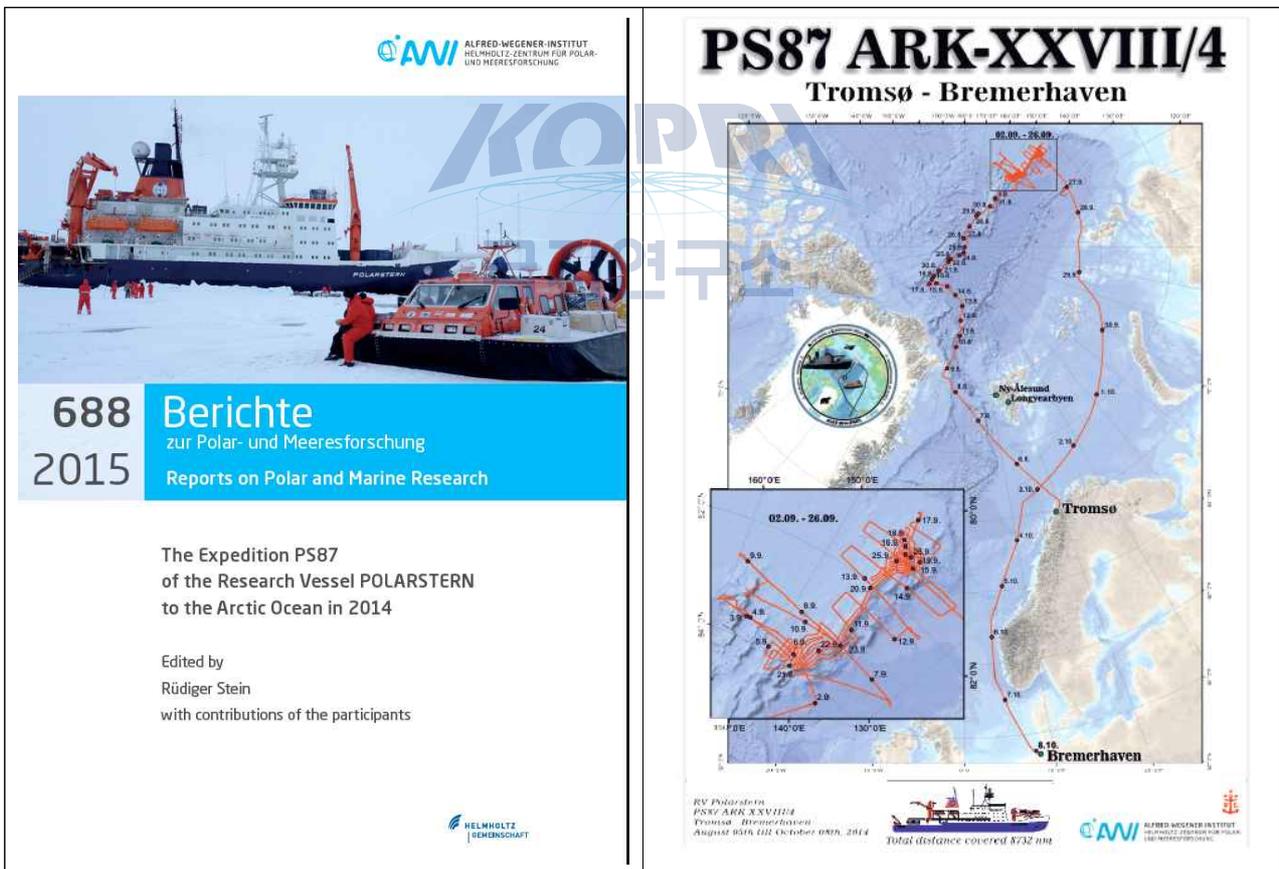
그림 5-3a. 로모노소프해령에서 2018년 심부시추 정점

그림 5-3b.

## 제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

본 사업을 추진하는 동안 3가지 중요한 해외과학기술 정보를 수집하였다. 첫 번째 자료는 2014년 독일 AWI 쇄빙선 ‘폴라스텐’에 승선하여 북극해 중앙해역인 로모노소프 해령 종단 탐사 동안 수행한 탐사보고서 이다(Stein, 2015). 두 번째 자료는 “북극해-북대서양 관문이 열리면서 지구조, 해양 및 기후변화”를 밝히기 위해 대한민국에서 극지연구소를 포함한 7개국 공동으로 2014년 3월 31일 IODP에 제출한 시추제안서(IODP-#845 Full)이며, 세 번째 자료는 북대서양의 아북극권(subarctic)에 위치한 노르웨이와 북극관문에 위치한 스발바르 군도 피오르드에서 마지막 최대 빙하기(LGM) 이후 일어난 고해상의 기후변화 기록과 지질재해 기작을 규명하기 위하여 2016년 3월 31일 IODP에 제출한 예비시추제안서(IODP-#1-Pre a)이며 수집한 정보는 다음과 같다:

1) 2014 ‘폴라스텐’ 북극탐사(ARK-28/4) 리포트: 독일 AWI 극지해양연구소, 279 p.



2) IODP 시추제안서 #854 - The Opening of the Arctic-Atlantic Gateway: Tectonic, Oceanographic and Climatic Dynamics (AAG-Drill “Arctic-Atlantic Gateway Drilling Campaign”), 79 p.

# IODP Proposal Cover Sheet

854 - Full

AAG-DRILL

Title	THE OPENING OF THE ARCTIC-ATLANTIC GATEWAY: TECTONIC, OCEANOGRAPHIC AND CLIMATIC DYNAMICS (AAG-DRILL-ARCTIC-ATLANTIC GATEWAY DRILLING CAMPAIGN)		
Proponents	W. Geissler, J. Knies, T. Nielsen, C. Gaina, J. Matthiessen, C. Gebhardt, V. Damm, M. Forwick, B. Hjelstuen, J. Hopper, K. Husum, J. Laberg, W. Kürschner, C. Morigi, M. Schreck, A. Tripathi, C. Vogt, M. Rebesco, S. Nam, A. Carlson, S. de Schepper, R. Lucchi, R. Matingsdal, W. Jokat, R. Stein,		
Keywords	Arctic, Gateway, Cenozoic, Climate, Tectonic	Area	Arctic Ocean, Nordic Seas

## Contact Information

Contact Person:	Wolfram Hartmut Geissler		
Department:	Geophysics		
Organization:	Alfred-Wegener-Institut		
Address:	Am Alten Hafen 26	Bremerhaven	27568
Tel.:	+49 471 4831 1550	Fax:	+49 471 4831 1926
E-mail:	Wolfram.Geissler@awi.de		

3) IODP 시추 예비제안서 # : Fjord sediment Archives in the northeastern North Atlantic (FANA) : high resolution reconstructions and mechanisms of recent climate changes and geohazards over the Euro-Arctic and Subarctic margin. 70 p.

# IODP Proposal Cover Sheet

1 - Pre a

Fjord sediment Archives in the northeastern North

Received for:

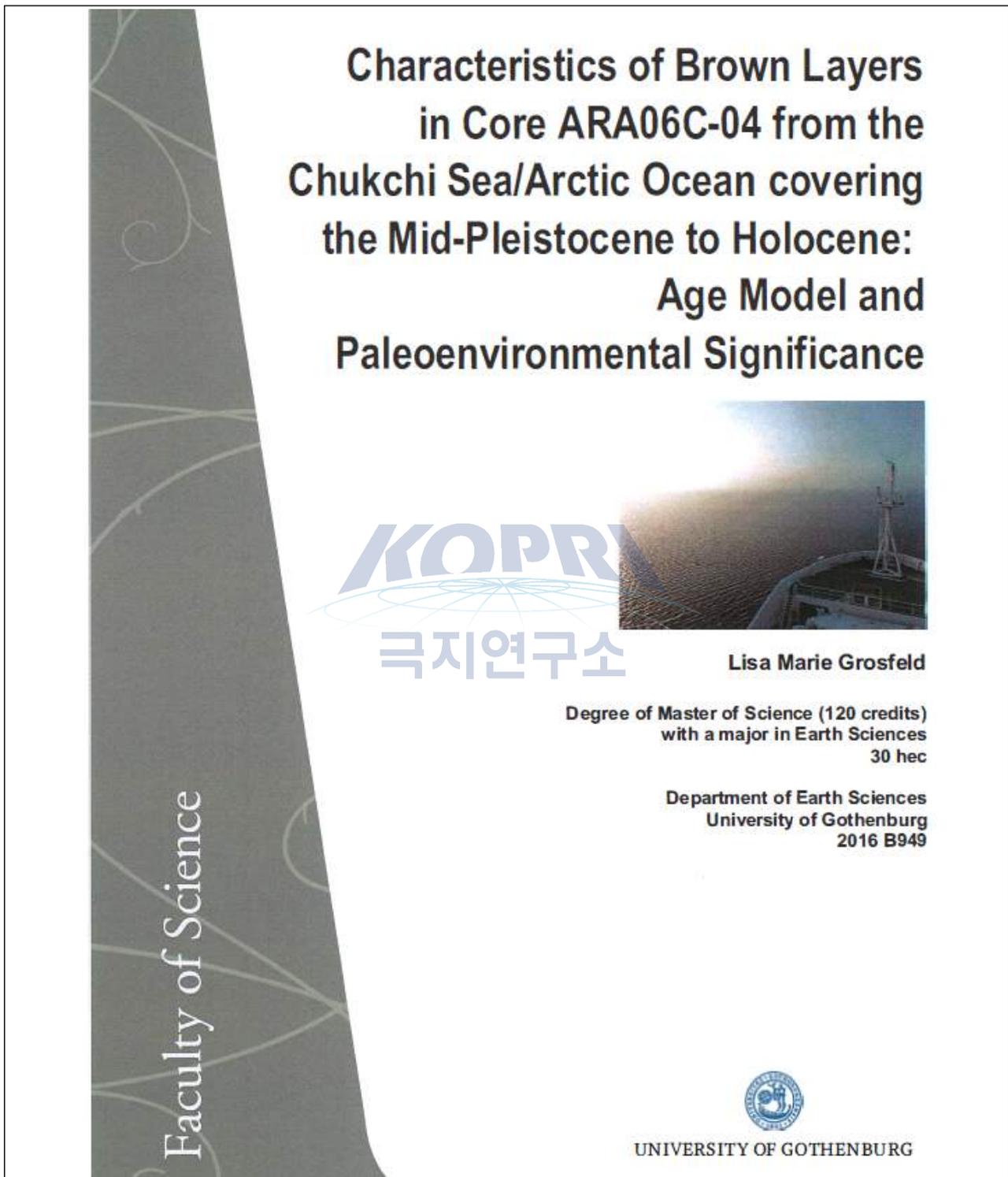
Title	Fjord sediment Archives in the northeastern North Atlantic (FANA) : high resolution reconstructions and mechanisms of recent climate changes and geohazards over the Euro-Arctic and Subarctic margin.		
Proponents	Jacques Giraudeau, Matthias Forwick, Jochen Knies, Katrine Husum, Seung-II Nam, Jan Sverre Laberg, Berit Oline Hjelstuen		
Keywords	Marine-and-continental-paleoclimates, land-to-marine-sediment-transfer, geo-hazards, tidal-glaciers, ice-sheet	Area	Coastal Norway and Svalbard

## Proponent Information

Proponent	Jacques Giraudeau
Affiliation	CNRS - Univ. Bordeaux
Country	France

Permission is granted to post the coversheet/site table on www.iodp.org

4) Lisa Marie Grosfeld 석사 학위논문(University of Gothenburg): Characteristics of Brown Layers in Core ARA06C-04 from the Chukchi Sea/Arctic Ocean covering the Mid-Pleistocene to Holocene: Age model and Paleoenvironmental Significance. p. 97



## 제 7장. 참고문헌

- Aagaard, K. and Carmack, E.C., 1989, The role of sea ice and other fresh water in the Arctic circulation. *Journal of Geophysical Research*, 94, 14485 - 14498.
- Aagaard, K. and Carmack, E.C., 1994, The Arctic Ocean and climate: a perspective. In: Johannessen, M.R., Muench, D., Overland, J.E. (eds.), *The polar oceans and their role in shaping the global environment*. Geophysical Monograph, 85, American Geophysical Union, Washington, D.C., p. 5-20.
- Adler, R.E., Polyak, L., Ortiz, J.D., Kaufman, D.S., Channell, J.E., Xuan, C., Grottoli, A.G., Sellén, E. and Crawford, K.A., 2009, Sediment record from the western Arctic Ocean with an improved Late Quaternary age resolution: HOTRAX core HLY0503-8JPC, Mendeleev Ridge. *Global and Planetary Change*, 68. 1:18-29.
- Ager TA and Phillips RL (2008) Pollen evidence for late pleistocene bering land bridge environments from Norton Sound, Northeastern Bering Sea, Alaska. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research* 40(3): 451 - 461.
- Aldahan, A. A., Ning, S., Possnert, G., Backman, J., & Boström, K., 1997. <sup>10</sup>Be records from sediments of the Arctic Ocean covering the past 350 ka. *Marine Geology*, 144(1-3), 147-162.
- Anderson PM and Lozhkin AV (2015) Late Quaternary vegetation of Chukotka (Northeast Russia), implications for Glacial and Holocene environments of Beringia. *Quaternary Science Reviews* 107: 112 - 128.
- Anderson, R.K., Miller, G.H., Briner, J.P., Lifton, N.A., and De Vogel, S.B., 2008, A millennial perspective on Arctic warming from <sup>14</sup>C in quartz and plants emerging from beneath ice caps. *Geophysical Research Letters*, 35, L01502.
- Anne de Vernal, Claude Hillaire-Marcel 2000. Sea-ice cover, sea-surface salinity and halo-/thermocline structure of the northwest North Atlantic: modern versus full glacial conditions. *Quaternary Science Reviews* 19 (2000) 65-85.
- Arzel, O., Fichfet, T., and Goosse, H., 2006. Sea ice evolution over the 20th and 21st centuries as simulated by current AOGCMs. *Ocean Modelling* 12(3), 401-415.
- Backman, J., Fornaciari, E. and Rio, D., 2009, Biochronology and paleoceanography of late Pleistocene and Holocene calcareous nannofossil abundances across the Arctic Basin. *Marine Micropaleontology*, 72. 1:86-98.
- Backman, J., Jakobsson, M., Frank, M., Sangiorgi, F., Brinkhuis, H., Stickley, C., O'Regan, M., Løvlie, R., P?like, H., Spofforth, D., Gattacecca, J., Moran, K., King, J., Heil, C., 2008. Age model and core-seismic integration for the Cenozoic Arctic Coring Expedition sediments from the Lomonosov Ridge. *Paleoceanography* 23, PA1S03. <http://dx.doi.org/10.1029/2007PA001476>.

- Backman, J., Moran, K., and Evans, D. 2004. ACEX Arctic Coring Expedition: paleoceanographic and tectonic evolution of the central Arctic Ocean.
- Backman, J., Moran, K., McInroy, D. B., Mayer, L. A., and the Expedition 302 Scientists, 2006. Proceedings IODP, 302, Edinburgh (Integrated Ocean Drilling Program Management International, Inc.). doi: 10.2204/iodp.proc.302.2006.
- Barnes PW and Reimnitz E (1974) Sedimentary processes on arctic shelves off the northern coast of Alaska. In: Reed JC and Sater JE (eds) *The Coast and Shelf of the Beaufort Sea*. Arlington, VA: Arctic Institute of North America, pp. 439 - 476.
- Bigelow NH, Brubaker LB, Edwards ME et al. (2003) Climate change and Arctic ecosystems: 1 - Vegetation changes north of 55° N between the last glacial maximum, mid-Holocene, and present. *Journal of Geophysical Research* 108(D19): 8170.
- Bischof, J., Clark, D.L., Vincent, J.S., 1996. Origin of ice-rafted debris: Pleistocene paleoceanography in the western Arctic Ocean. *Paleoceanography* 11, 743-756.
- Carmack EC (2000) The Arctic Ocean's freshwater budget: Sources, storage and export. In: Lewis EL, Jones EP, Lemke P, et al. (eds) *The Freshwater Budget of the Arctic Ocean*. New York: Springer, pp. 91 - 26.
- Cavalieri DJ and Martin S (1994) The contribution of Alaskan, Siberian and Canadian coastal polynyas to the halocline layer of the Arctic Ocean. *Journal of Geophysical Research* 99(C9): 18343 - 8362.
- Clark, P. U., Pisias, N. G., Stocker, T. F., and Weaver, A. J. 2002. The role of the thermohaline circulation in abrupt climate change. *Nature* 415, 863 - 869.
- Clark, D.L., Whitman, R.R., Morgan, K.A. and Mackey. S.D., 1980, Stratigraphy and glacial-marine sediments of the Amerasian Basin, Central Arctic Ocean. *Geological Society of America Special Papers*, 181:1-65.
- Cronin, T. M., DeNinno, L. H., Polyak, L., Caverly, E. K., Poore, R. Z., Brenner, A., ... & Marzen, R. E., 2014. Quaternary ostracode and foraminiferal biostratigraphy and paleoceanography in the western Arctic Ocean. *Marine Micropaleontology*, 111, 118-133.
- Cronin, T. M., Kitamura, A., Ikeya, N., Watanabe, M. and Kamiya, T. 1994. Late Pliocene climate change 3.4-2.3 Ma: paleoceanographic record from the Yabuta Formation, Sea of Japan. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 108(3-4), 437-455.
- Colleoni, F., Kirchner, N., Niessen, F. and Quiquet, A., 2016, An East Sibeiran ice shelf during the Late Pleistocene glaciations: Numerical reconstructions. *Quaternary Science Reviews*, 147:148-163.
- da Silva MAC et al. (2013) Phylogenetic identification of marine bacteria isolated from deep-sea sediments of the eastern South Atlantic Ocean. *Springerplus* 2: 127.

- Darby DA (2003) Sources of sediment found in sea ice from the western Arctic Ocean, new insights into processes of entrainment and drift patterns. *Journal of Geophysical Research* 108(C8): 3257.
- Darby, D.A., Bischof, J.F., Jones, G.A., 1997. Radiocarbon chronology of depositional regimes in the western Arctic Ocean. *Deep Sea Research II* 44, 1745-1757.
- Darby, D.A., Bischof, J.F., Cutter, G., Vernal, A., Hillaire-Marcel, C., Dwyer, G., McManus, J., Osterman, L., Polyak, L. and Poore, R., 2001, New record shows pronounced changes in Arctic Ocean circulation and climate. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 82. 49:601-607.
- Darby, D. A., Bischof, J. F., Spielhagen, R. F., Marshall, S. A., & Herman, S. W. 2002. Arctic ice export events and their potential impact on global climate during the late Pleistocene. *Paleoceanography* 17(2), doi: 10.1029/2001PA000639.
- Darby DA, Ortiz JD, Polyak L et al. (2009) The role of currents and sea ice in both slowly deposited central Arctic and rapidly deposited Chukchi - laskan margin sediments. *Global and Planetary Change* 68: 58 - 2.
- Darby, D.A., Ortiz, J.D., Grosch, C.E., and Lund, S.P., 2012, 1,500-year cycle in the Arctic Oscillation identified in Holocene Arctic sea-ice drift. *Nature geoscience*, 5, 897 - 900.
- Darby, D.A., Polyak, L., Bauch, H.A., 2006. Past glacial and interglacial conditions in the Arctic Ocean and marginal seas—a review. *Progress in Oceanography* 71, 129-144.
- Dowdeswell, J.A., Kenyon, N.H., Elverhøi, A., Laberg, J.S., Hollender, F.J., Mienert, J. and Siegert, M.J., 1996, Large-scale sedimentation on the glacier-influenced Polar North Atlantic margins: Long-range side-scan sonar evidence. *Geophysical Research Letters*, 23. 24:3535-3538.
- Dove, D., Polyak, L. and Coakley, B., 2014, Widespread, multi-source glacial erosion on the Chukchi margin, Arctic Ocean. *Quaternary Science Reviews*, 92:112-122.
- Dyke, A. S., Andrews, J. T., Clark, P. U., England, J. H., Miller, G. H., Shaw, J., and Veillette, J. J. 2002. The Laurentide and Innuitian ice sheets during the last glacial maximum. *Quaternary Science Reviews* 21(1), 9-31.
- Edwards ME, Anderson PM, Brubaker LB et al. (2000) Pollenbased biomes for Beringia 18,000, 6000 and 0 14C yr BP. *Journal of Biogeography* 27(3): 521 - 54.
- Ehlers, J., Gibbard, P.L., 2007. The extent and chronology of Cenozoic global glaciation. *Quaternary International* 164, 6-20.
- Eicken H, Dmitrenko I, Tyshko K et al. (2005) Zonation of the Laptev Sea landfast ice cover and its importance in a frozen estuary. *Global and Planetary Change* 48: 55 - 3.
- Elverhoi, A., Antonsen, P., Flood, S. B., Solheim, A., and VULLSTAD, A. 1988. The physical environment. *Western Barents Sea*, 1: 1 500 000. *Shallow Bedrock*

- Geology-Structure, Litho-and Biostratigraphy. Norsk Polarinstitut, Skrift D, 179.
- Francis, J. A., Hunter, E., Key, J. R., & Wang, X. 2005. Clues to variability in Arctic minimum sea ice extent. *Geophysical Research Letters* 32, L21501. doi: 10.1029/2005GL024376.
- Gow, A. G., and Tucker III, W. B. 1987. Physical properties of sea ice discharged from Fram Strait. *Science* 236, 436-440.
- Grobe, H., Diekmann, B., & Hillenbrand, C. D., 2009. The memory of the Polar Oceans. In: Hempel, G.(ed) *Biology of Polar Oceans*.
- Hardies SC, Hwang YJ, Hwang CY, Jang GI & Cho BC (2013) Morphology, physiological characteristics, and complete sequence of marine bacteriophage RIO-1 Infecting *Pseudoalteromonas marina*. *Journal of Virology* 87: 9189 - 9198.
- Hesse M, Halbritter H, Zetter R et al. (2009) *Pollen Terminology: An Illustrated Handbook*. Vienna: Springer.
- Hesse, R., Khodabakhsh, S., Klaucke, I. and Ryan, W.B.F., 1997, Asymmetrical turbid surface-plume deposition near ice-outlets of the Pleistocene Laurentide ice sheet in the Labrador Sea. *Geo-Marine Letters*, 17. 3:179-187.
- Hesse, R., Klaucke, I., Khodabakhsh, S. and Piper, D., 1999, Continental slope sedimentation adjacent to an ice margin. III. The upper Labrador Slope. *Marine Geology*, 155. 3:249-276.
- Hilmer, M., Harder, M., and Lemke, P., 1998, Sea ice transport: A highly variable link between Arctic and North Atlantic. *Geophysical Research Letters*, 25, 3359 - 3362.
- Hodell, D.A., Channell, J.E., Curtis, J.H., Romero, O.E. and Röhl, U., 2008, Onset of "Hudson Strait" Heinrich events in the eastern North Atlantic at the end of the middle Pleistocene transition (~640 ka)? *Paleoceanography*, 23. 4.
- Holland, M. M., Bitz, C. M., Eby, M., and Weaver, A. J. 2001. The role of ice-ocean interactions in the variability of the North Atlantic thermohaline circulation. *Journal of Climate* 14(5), 656-675.
- Holland, M. M., and Bitz, C. M. 2003. Polar amplification of climate change in coupled models. *Climate Dynamics* 21(3-4), 221-232.
- Hu, A., Meehl, G.A., Han, W., Timmermann, A., Otto-Bliesner, B., Liu, Z., Washington, W.M., Large, W., Abe-Ouchi, A., Kimoto, M., Lambeck, K., and Wu, B., 2012, Role of the Bering Strait on the hysteresis of the ocean conveyor belt circulation and glacial climate stability. *PNAS*, 109, 6417 - 6422.
- Hu, A., Meehl, G.A., Otto-Bliesner, B.L., Waelbroeck, C., Han, W., Loutre, M.F., Lambeck, K., Mitrovica, J.X., and Rosenbloom, N., 2010, Influence of Bering Strait flow and North Atlantic circulation on glacial sea-level changes. *Nature geosciences*, 3, 118 -

- Hwang CY, Cho BC (2008) *Cohaesibacter gelatinilyticus* gen. nov., sp. nov., a marine bacterium that forms a distinct branch in the order *Rhizobiales*, and proposal of *Cohaesibacteraceae* fam. nov. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 58: 267 - 277
- Hwang CY, Lee I, Cho Y, Lee YM, Jung YJ, Baek K, Nam SI, Lee HK (2015) *Sediminicola arcticus* sp. nov., a psychrophilic bacterium isolated from deep-sea sediment, and emended description of the genus *Sediminicola*. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 65: 1567 - 1571.
- Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007, The physical science basis. In: Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M., and Miller, H.L., (eds.), Summary for policymakers, Intergovernmental Panel on Climate Change. Fourth Assessment Report, Geneva, IPCC Secretariat, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, USA, 1-18.
- Jackson, H.R., Mudie, P.J., Blanco, S.M., 1985. Initial geological report on CESAR - The Canadian Expedition to study the Alpha Ridge, Arctic Ocean. Geological Survey of Canada, Paper 84-22, 177 pp.
- Jakobsson, M. 1999. First high-resolution chirp sonar profiles from the central Arctic Ocean reveal erosion of Lomonosov Ridge sediments. *Marine Geology* 158(1), 111-123.
- Jakobsson, M., Backman, J., Murray, A., & Løvlie, R., 2003. Optically Stimulated Luminescence dating supports central Arctic Ocean cm scale sedimentation rates. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 4(2).
- Jakobsson, M., Løvlie, R., Al-Hanbali, H., Arnold, E., Backman, J. and Mörth, M., 2000, Manganese and color cycles in Arctic Ocean sediments constrain Pleistocene chronology. *Geology*, 28. 1:23-26.
- Jakobsson, M., Gardner, J.V., Vogt, P.R., Mayer, L.A., Armstrong, A., Backman, J., Brennan, R., Calder, B., Hall, J.K. and Kraft, B., 2005, Multibeam bathymetric and sediment profiler evidence for ice grounding on the chukchi Borderland, Arctic Ocean. *Quaternary Research*, 63. 2:150-160.
- Jakobsson, M., Nilsson, J., O'Regan, M., Backman, J., Löwemark, L., Dowdeswell, J. A., Mayer, L., Polyak, L., Colleoni, F., Anderson, L. G., Björk G., Darby, D., Eriksson, D., Hell, B., Marcussen, C., Sellén, E and Wallin Å. 2010. An Arctic Ocean ice shelf during MIS 6 constrained by new geophysical and geological data. *Quaternary Science Reviews* 29(25), 3505-3517.
- Jakobsson, M., Polyak, L., Edwards, M., Kleman, J. and Coakley, B., 2008, Glacial geomorphology of the central Arctic Ocean: the Chukchi Borderland and the

- Lomonosov Ridge. *Earth Surface Processes and Landforms*, 33: 4526–545.
- Jakobsson, M., Andreassen, K., Bjarnadóttir, L. R., Dove, D., Dowdeswell, J. A., England, J. H., ... & Larsen, N. K. (2014). Arctic Ocean glacial history. *Quaternary Science Reviews*, 92, 40–67.
- Jakobsson, M., Nilsson, J., Anderson, L., Backman, J., Björk, G., Cronin, T. M., Kirchner, N., Koshurnikov, A., Mayer, L., Noormets, R., O’regan, M., Stranne, C., Ananiev, R., Macho, N. B., Chernykh, D., Coxall, H., Eriksson, B., Germery, L., Gustafsson, Ö., Jerram, K., Johansson, C., Khortov, A., Mohammad, R. and Semiletov, I. 2016. Evidence for an ice shelf covering the central Arctic Ocean during the penultimate glaciation. *Nature communications*, 7.
- Jang, K., Han, Y., Huh, Y., Nam, S.I., Stein, R. and Mackensen, A., 2013, Glacial freshwater discharge events recorded by authigenic neodymium isotopes in sediments from the Mendeleev Ridge, western Arctic Ocean. *Earth and Planetary Science Letters*, 396:148–157.
- Jokat, W. (Ed.), 1999. Arctic '98: The Expedition of the Research Vessel Polarstern to the Arctic in 2008, Rep. Pol. Res. 597, 221 pp.
- Jokat, W. 2009. The expedition of the research vessel “Pelagia” to the Natal Basin and the Mozambique Ridge in 2009 (Project AISTEK III). Alfred-Wegener-Institute for Polar and Marine Research, Bremerhaven, 67.
- Jorgensen SL *et al.* (2012) Correlating microbial community profiles with geochemical data in highly stratified sediments from the Arctic Mid-Ocean Ridge. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 109: E2846 - E2855.
- Kaufman, D. S., Polyak, L., Adler, R., Channell, J. E., & Xuan, C., 2008. Dating late Quaternary planktonic foraminifer *Neogloboquadrina pachyderma* from the Arctic Ocean using amino acid racemization. *Paleoceanography*, 23(3).
- Kaufman DS, Axford YL, Henderson ACG *et al.* (2016) Holocene climate changes in eastern Beringia (NW North America) - A systematic review of multi-proxy evidence. *Quaternary Science Reviews*. Epub ahead of print 19 January. DOI:10.1016/j.quascirev.2015.10.021.
- Khan ST, Nakagawa Y, Harayama S (2006) *Sediminicola luteus* gen. nov., sp. nov., a novel member of the family *Flavobacteriaceae*. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 56: 841 - 845.
- Kim YG, Choi DH, Hyun S, Cho BC (2007) *Oceanobacillus profundus* sp. nov., isolated from a deep-sea sediment core. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 57: 409 - 413.
- Kinnard, C., Zdanowicz, C. M., Koerner, R. M., & Fisher, D. A. 2008. A changing Arctic

- seasonal ice zone: Observations from 1870 - 2003 and possible oceanographic consequences. *Geophysical Research Letters*, 35(2).
- Kleiber, H.P., Knies, J. and Niessen, F., 2000, The Later Weichselian glaciation of the Franz Victoria Trough, northern Barentz Sea: ice sheet extent and timing. *Marine Geology*, 168. 1:25-44.
- Knies, J., Hald, M., Ebbesen, H., Mann, U., and Vogt, C. 2003. A deglacial-middle Holocene record of biogenic sedimentation and paleoproductivity changes from the northern Norwegian continental shelf. *Paleoceanography* 18, 1096. doi: 10.1029/2002PA000872.
- Lane DJ (1991) 16S/23S rRNA sequencing. In *Nucleic Acid Techniques in Bacterial Systematics*, pp. 115-175. Edited by E. Stackebrandt & M. Goodfellow. Chichester: Wiley.
- Lemmen, D. S., Duk-Rodkin, A. and Bednarski, J. M. 1994. Late glacial drainage systems along the northwestern margin of the Laurentide Ice Sheet. *Quaternary Science Reviews*, 13(9-10), 805-828.
- Levitan, M. A., & Stein, R. (2008). History of sedimentation rates in the sea-ice sedimentation zone during the last 130 ka. *Lithology and Mineral Resources*, 43(1), 65-75.
- Lozhkin AV and Anderson PM (1995) The last interglaciation in northeast Siberia. *Quaternary Research* 43: 147 - 58.
- Mangerud, J., Jakobsson, M., Alexanderson, H., Astakhov, V., Clarke, G. K., Henriksen, M., and Murray, A. 2004. Ice-dammed lakes and rerouting of the drainage of northern Eurasia during the Last Glaciation. *Quaternary Science Reviews*, 23(11), 1313-1332.
- Marret, F., Scourse, J.D., Kennedy, H., Ufkes, E., Jansen, J.H.F., 2008. Marine production in the Congo-influenced SE Atlantic over the past 30,000 years: a novel dinoflagellate cyst based transfer function approach. *Marine Micropaleontology* 68, 198 - 222.
- Marshall, J. and Schott, F., 1999, Open-ocean convection: Observations, theory, and models. *Reviews of Geophysics*, 37, 1 - 64.
- Matthiessen, J., Nissen, F., Stein, R. and Naafs, D.B., 2010, Pleistocene glacial marine sedimentary environments at the eastern Mendeleev Ridge, Arctic Ocean. *Polarforschung*, 79:123-137.
- Maslanik, J., Drobot, S., Fowler, C., Emery, W., and Barry, R. 2007. On the Arctic climate paradox and the continuing role of atmospheric circulation in affecting sea ice conditions. *Geophysical Research Letters*, 34(3).
- Maslanik, J. A., Fowler, C., Stroeve, J., Drobot, S., Zwally, J., Yi, D., and Emery, W. 2007. A younger, thinner Arctic ice cover: Increased potential for rapid, extensive sea ice loss. *Geophysical Research Letters*, 34(24).
- Mertens, K.N., González, C., Delusina, I., Louwe, S., 2009. 30000 years of productivity and salinity variations in the late

- Quaternary Cariaco Basin revealed by dinoflagellate cysts. *Boreas* 38, 647 - 662.
- Matthiessen, J., Knies, J., Vogt, C., and Stein, R. 2009. Pliocene palaeoceanography of the Arctic Ocean and subarctic seas. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 367(1886), 21-48.
- Middag R., de Baar H. J. W., Laan P. and Klunder M. B., 2011. Fluvial and hydrothermal input of manganese into the Arctic Ocean. *Geochim. Cosmochim. Acta.* 75, 2393-2408.
- Mock CJ, Bartlein PJ and Anderson PM (1998) Atmospheric circulation patterns and spatial climatic variations in Beringia. *International Journal of Climatology* 18: 1085 - 104.
- Moore PD, Webb JA and Collinson ME (1991) *Pollen Analysis*. London: Blackwell.
- März, C., Stratmann, A., Matthiessen, A.K., Eckert, S., Schnetger, B. and Brumsack, H.J., 2011, Manganese-rich brown layers in Arctic Ocean sediments: composition, formation mechanisms, and diagenetic overprint. *Geochimica et cosmochimica Acta*, 75. 23:7668-7687.
- Moran, K., Backman, J., Brinkhuis, H., Clemens, S. C., Cronin, T., Dickens, G. R., ... and Kaminski, M. 2006. The cenozoic palaeoenvironment of the arctic ocean. *Nature*, 441(7093), 601-605.
- New M, Lister D, Hulme M et al. (2002) A high-resolution data set of surface climate over global land areas. *Climate Research* 21: 1 - 5.
- Niessen, F., Hong, J.K., Hegewald, A., Matthiessen, J., Stein, R., Kim, H., Kim, S., Jensen, L., Jokat, W., Nam, S.I. and Kang, S.H., 2013, Repeated Pleistocene glaciation of the East Siberian continental margin. *Nature Geoscience*, 6. 10:842-846.
- Ortiz JD, Nof D, Polyak L et al. (2012) The Late Quaternary flow through the Bering Strait has been forced by the Southern Ocean Winds. *Journal of Physical Oceanography* 42(11): 2014 - 2029.
- Ortiz JD, Polyak L, Grebmeier JM et al. (2009) Provenance of Holocene sediment on the Chukchi-Alaskan margin based on combined diffuse spectral reflectance and quantitative X-ray diffraction analysis. *Global and Planetary Change* 68: 73 - 84.
- Ó Cofaigh, Taylor, J., Dowdeswell, J.A. and Pudsey, C.J., 2003b, Palaeo-ice streams, trough mouth fans and high-latitude continental slope sedimentation. *Boreas*, 32. 1:37-55.
- Perovich, D. K., Grenfell, T. C., Light, B., and Hobbs, P. V. 2002. Seasonal evolution of the albedo of multiyear Arctic sea ice. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 107(C10).
- Peterson, B. J., McClelland, J., Curry, R., Holmes, R. M., Walsh, J. E., and Aagaard, K. 2006. Trajectory shifts in the Arctic and subarctic freshwater cycle. *Science*, 313(5790), 1061-1066.
- Pillips, R. and Grantz, A., 1997, Quaternary history of sea ice and paleoclimate in the Amerasia basin, Arctic Ocean, as recorded in the cyclical

- strata of Northwind Ridge. *Geological Society of America Bulletin*, 109. 9:1101–1115.
- Phillips, R.L., Grantz, A., 2001. Regional variations in provenance and abundance of ice-rafted clasts in Arctic Ocean sediments: implications for the configuration of late Quaternary oceanic and atmospheric circulation in the Arctic. *Marine Geology* 172, 91–115.
- Piper, D.J.W., 1978, Turbidite muds and silts in deep-sea fans and abyssal plains. In: Stanley, D.J. and Kelling, G. (eds.), *Sedimentation in Submarine Fans, Canyons, and Trenches*. Dowden Hutchinson and Ross, Stroudsburg, Penn., pp 163–176.
- Polyak, L., 1986, New data on microfauna and stratigraphy of bottom sediments of the Mendeleev Ridge, Arctic Ocean: sedimentogenes I konkreioobrazovanie okeane (engl.: Sedimentogenesis and nodule-formation in the Ocean). *Sevmorgelogia*, Leningrad: 40–50.
- Polyak, L. and Jakobsson, M., 2011, Quaternary sedimentation in the Arctic Ocean: Recent advances and further challenges. *Oceanography*, 24. 3:52–64.
- Polyak, L., Edwards, M. H., Coakley, B. J., and Jakobsson, M. 2001. Ice shelves in the Pleistocene Arctic Ocean inferred from glaciogenic deep-sea bedforms. *Nature*, 410(6827), 453–457.
- Polyak, L., Forman, S.L., Herlihy, F.A., Ivanov, G. and Krinitsky, P., 1997, Late Weichselian deglacial history of the Svyataya (Saint) Anna Trough, northern Kara Sea, Arctic Russia. *Marine Geology*, 143. 1–4:169–188.
- Polyak, L., Curry, W.B., Darby, D.A., Bischof, J. and Cronin, T.M., 2004, Contrasting glacial/interglacial regimes in the western Arctic Ocean as exemplified by a sedimentary record from the Mendeleev Ridge. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 203. 1:73–93.
- Polyak, L., Darby, D.A., Bischof, J.F. and Jakobsson, M., 2007, Stratigraphic constraints on late Pleistocene glacial erosion and deglaciation of the Chukchi margin, Arctic Ocean. *Quaternary Research*, 67. 2:234–245.
- Polyak, L., Bischof, J., Ortiz, J.D., Darby, D.A., Channell, J.E.T., Xuan, C., Kaufman, D.S., Løvlie, R., Schneider, D.A., Eberl, D.D., Adler, R.E. and Council, E.A., 2009, Late Quaternary stratigraphy and sedimentation patterns in the western Arctic Ocean. *Global and Planetary Change*, 68. 1:5–17.
- Polyak, L., Best, K.M., Crawford, K.A., Council, E.A. and St-Onge, G., 2013, Quaternary history of sea ice in the western Arctic Ocean based on foraminifera. *Quaternary Science Reviews*, 79:145–156.
- Polyakov, I. V., Beszczynska, A., Carmack, E. C., Dmitrenko, I. A., Fahrbach, E., Frolov, I. E., ... and Johnson, M. A. 2005. One more step toward a warmer Arctic. *Geophysical*

Research Letters, 32(17).

- Punt W and Hoen PP (2009) The Northwest European Pollen Flora, 70. Asteraceae - Asteroideae. *Review of Palaeobotany and Palynology* 157: 22 - 183.
- Punt W, Hoen PP, Blackmore S et al. (2007) Glossary of pollen and spore terminology. *Review of Palaeobotany and Palynology* 143: 1 - 81.
- Schoster F., 2005. Terrigenous sediment supply and paleoenvironment in the Arctic Ocean during the late Quaternary: reconstructions from major and trace elements. *Rep. Pol. Mar. Res.* 498, 149.
- Roach AT, Aagaard K, Pease CH et al. (1995) Direct measurements of transport and water properties through Bering Strait. *Journal of Geophysical Research* 100: 18443 - 8457.
- Rothrock, D. A., and Zhang, J. 2005. Arctic Ocean sea ice volume: What explains its recent depletion?. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 110(C1).
- Rudenko O, Tarasov PE, Bauch HA et al. (2014) A Holocene palynological record from the northeastern Laptev Sea and its implications for palaeoenvironmental research. *Quaternary International* 348: 82 - 92.
- Schubert, C. J., & Calvert, S. E., 2001. Nitrogen and carbon isotopic composition of marine and terrestrial organic matter in Arctic Ocean sediments:: implications for nutrient utilization and organic matter composition. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 48(3), 789-810.
- Serreze, M. C., Barrett, A. P., Stroeve, J. C., Kindig, D. N., and Holland, M. M. 2009. The emergence of surface-based Arctic amplification. *The Cryosphere*, 3(1), 11.
- Serreze, M. C., Holland, M. M., and Stroeve, J. 2007. Perspectives on the Arctic's shrinking sea-ice cover. *science*, 315(5818), 1533-1536.
- Shimada, K., Kamoshida, T., Itoh, M., Nishino, S., Carmack, E., McLaughlin, F., ... and Proshutinsky, A. 2006. Pacific Ocean inflow: Influence on catastrophic reduction of sea ice cover in the Arctic Ocean. *Geophysical Research Letters*, 33(8).
- Sluijs, A., Schouten, S., Pagani, M., Woltering, M., Brinkhuis, H., Damsté, J. S. S., ... and Matthiessen, J. 2006. Subtropical Arctic Ocean temperatures during the Palaeocene/Eocene thermal maximum. *Nature*, 441(7093), 610-613.
- Spielhagen, R. F., Bonani, G., Eisenhauer, A., Frank, M., Frederichs, T., Kassens, H., ... & Schäper, S., 1997. A high-resolution sedimentology and age determination of core PS2185 from the central Arctic Ocean.
- Steele, M., Ermold, W., and Zhang, J. 2008. Arctic Ocean surface warming trends over the past 100 years. *Geophysical Research Letters*, 35(2).
- Stein, R., 2008, *Arctic Ocean Sediments: Processes, Proxies, and Paleoenvironment*,

- Developments in Marine Geology, 2. Elsevier, Amsterdam, 587 p.
- Stein, R., Fahl, K., Schreck, M., Knorr, G., Niessen, F., Forwick, M., ... and Matthiessen, J. 2016. Evidence for ice-free summers in the late Miocene central Arctic Ocean. *Nature communications*, 7.
- Stein, R., Matthiessen, J. and Niessen, F., 2010a, Re-coring at Ice Island T3 site of key core FL-224 (Nautilus Basin, Amerasian Arctic): sediment characteristics and stratigraphic framework. *Polarforschung*, 79. 2:81-96.
- Stein, R., Matthiessen, J., Niessen, F., Krylov, A., Nam, S.I. and Bazhenova, E., 2010b. Towards a better (litho-) stratigraphy and reconstruction of Quaternary paleoenvironment in the Amerasian Basin (Arctic Ocean). *Polarforschung*, 79. 2:97-121.
- Stein, R., Niessen, F., Dittmers, K., Levitan, M., Schoster, F., Simstich, J., ... and Stepanets, O. V. 2002. Siberian River run off and late Quaternary glaciation in the southern Kara Sea, Arctic Ocean: Preliminary results. *Polar Research*, 21(2), 315-322.
- Stickley, C. E., St John, K., Koç, N., Jordan, R. W., Passchier, S., Pearce, R. B., and Kearns, L. E. 2009. Evidence for middle Eocene Arctic sea ice from diatoms and ice-rafted debris. *Nature*, 460(7253), 376-379.
- Stockmarr, J., 1971, Tablets with spores used in absolute pollen analysis. *Pollen Spores*, 13, 615 - 621.
- Stow, D.A.V. and Holbrook, J.A., 1984, North Atlantic contourites: an overview. Geological Society, London, Special Publications, 15. 1:245-256.
- Stroeve, J., Markus, T., Meier, W. N., and Miller, J. 2006. Recent changes in the Arctic melt season. *Annals of Glaciology*, 44(1), 367-374.
- Svendsen, J. I., Alexanderson, H., Astakhov, V. I., Demidov, I., Dowdeswell, J. A., Funder, S., ... & Hubberten, H. W. 2004. Late Quaternary ice sheet history of northern Eurasia. *Quaternary Science Reviews*, 23(11), 1229-1271.
- Svendsen, J.I., Alexanderson, H., Astakhov, V.I., Demidov, I., Dowdeswell, J.A., Funder, S., Gataullin, V., Henriksen, M., Hjort, C., Houmark-Nielsen, M., Hubberten, H.W., Ingólfsson, Ó., Jakobsson, M., Kjaer, K.H., Larsen, E., Lokrantz, H., Lunkka, J.P., Lysa, A., Mangerud, J., Matiouchkov, A., Murray, A., Möller, P., Niessen, F., Nikolskaya, O., Polyak, L., Saarnisto, M., Siegert, C., Siegert, M.J., Spielhagen, R.F. and Stein, R., 2004, Late Quaternary ice sheet history of northern Eurasia. *Quaternary Science Reviews*, 23. 11:1229-1271.
- Svendsen, J. I., Gataullin, V., Mangerud, J., and Polyak, L. 2004. The glacial history of the Barents and Kara Sea region. *Developments in Quaternary Sciences*, 2, 369-378.

- Tarasov PE, Andreev AA, Anderson PM et al. (2013) A pollen-based biome reconstruction over the last 3.562 million years in the Far East Russian Arctic - New insights climate-vegetation relationships at the regional scale. *Climate of the past* 9: 2759 - 2775.
- Thiede, J. 2004. Quaternary environments of the Eurasian North (QUEEN). *Quaternary Science Reviews*, 23(11-13), 1225-1511.
- Thorndike, A. S. 1986. Kinematics of sea ice. In *The geophysics of sea ice* (pp. 489-549). Springer US.
- Viscosi-Shirley C, Mammone K, Pisiias N et al. (2003) Clay mineralogy and multi-element chemistry of surface sediments on the Siberian-Arctic shelf: Implications for sediment provenance and grain size sorting. *Continental Shelf Research* 23: 1175 - 200.
- Vogt, C. (2009). Data report: semiquantitative determination of detrital input to ACEX sites based on bulk sample X-ray diffraction data. In *Proc. IODP| Volume* (Vol. 302, p. 2).
- Wang C, Liu Y, Dong L et al. (2015) The distribution pattern of the surface sediments in the Bering Sea and the western Arctic and its environmental implications. *Marine Geology & Quaternary Geology* 35(3): 1 - 9.
- Wang, M., and Overland, J. E. 2009. A sea ice free summer Arctic within 30 years?. *Geophysical research letters*, 36(7).
- Wang, R., Xiao, W., Li, W. and Sun, Y., 2010, Late Quaternary ice-rafted detritus events in the Chukchi Basin, western Arctic Ocean. *Chinese Bulletin*, 55. 4-5:432-440.
- Wang, J., Zhang, J., Watanabe, E., Ikeda, M., Mizobata, K., Walsh, J. E., ... and Wu, B. 2009. Is the Dipole Anomaly a major driver to record lows in Arctic summer sea ice extent?. *Geophysical Research Letters*, 36(5).
- Weingartner TJ, Aagaard K, Woodgate R et al. (2005) Circulation on the north central Chukchi Sea shelf. *Deep Sea Research: Part II* 52: 3150 - 3174.
- Weingartner TJ, Cavalieri DJ, Aagaard K et al. (1998) Circulation, dense water formation, and outflow on the northeast Chukchi shelf. *Journal of Geophysical Research* 103(C4): 7647 - 7661.
- Winsor P and Chapman DC (2004) Pathways of Pacific water across the Chukchi Sea: A numerical model study. *Journal of Geophysical Research* 109: C03002.
- Woodgate, R.A., Aagaard, K., Swift, J.H., Falkner, K.K., and Smethie, W.M., 2005, Pacific ventilation of the Arctic Ocean's lower halocline by upwelling and diapycnal mixing over the continental margin. *Geophysical Research Letters*, 32, L18609.
- Woodgate, R.A., Weingartner, T., and Lindsay, R., 2010. The 2007 Bering Strait oceanic heat flux and anomalous Arctic sea-ice retreat. *Geophysical Research Letters*, 37,

L01602.

Yoon, S.H., Chough, S.K., Thiede, J. and Werner, F., 1991, Late Pleistocene sedimentation on the Norwegian continental slope between 67 and 71 N. *Marine Geology*, 99. 1:187-207.



## 뒷 면

(국내 과제용)

### 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.