

북극해 로모노소프해령 국제공동시추프로그램  
아라온 시추참여 및 북극해 퇴적층에 기록된  
플라이스토세 밀란코비치 주기 기후변동연구

Araon Expedition to join an International Drilling Program on  
the Lomonosov Ridge of the Arctic Ocean and Study on  
Climate Changes of Milankovitch Cycles recorded in Arctic  
Sediments during the Pleistocene



한 국 해 양 과 학 기 술 원  
부 설 극 지 연 구 소

# 제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “북극해 로모노소프해령 국제공동시추프로그램 아라온 시추참여 및 북극해 퇴적층에 기록된 플라이스토세 밀란코비치 주기 기후변동 연구”과제의 (최종)보고서로 제출합니다.

2021. 02. 26

연구 책임자 : 남 승 일

참 여 연 구 원 : 진 영 근, 홍 종 국, 김 정 현,  
김 수 관, 김 형 준, 장 광 철,  
주 영 지, 손 영 주, 박 광 규,  
조 영 진, 김 다 해, 안 영 규,  
우 경 식

보고서 초록

과제관리번호	PE20440	해당단계 연구기간	2020.05.01. - 2020.12.31	단계 구분	(1단계) / (총1단계)
<b>연구사업명</b>	중 사업명	정책연구개발사업			
	세부사업명				
연구과제명	중 과제명				
	세부(단위)과제명	북극해 로모노소프해령 국제공동시추프로그램 아라온 시추참여 및 북극해 퇴적층에 기록된 플라이스토세 밀란코비치 주기 기후변동 연구			
연구책임자	남 승 일	해당단계 참여연구원수	총 : 11명 내부 : 7명 외부 : 4명	해당단계 연구비	정부: 200,000천원 기업: 천원 계: 천원
연구기관명 및 소속부서명	한국해양과학기술원 부설 극지연구소 빙하환경연구본부		참여기업명		
국제공동연구	상대국명 : 독일 상대국연구기관명 : Alfred-Wegener 극지·해양연구소, Bremen University				
위탁연구	연구기관명 : 연구책임자 :				
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자이내)				보고서 면수	39
<p>“북극해 로모노소프해령 국제공동시추프로그램 아라온 시추참여 및 북극해 퇴적층에 기록된 플라이스토세 밀란코비치 주기 기후변동 연구”를 통해 다음과 같은 연구 성과를 도출함</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 2014년 및 2018년 AWI 폴라스텐 탐사자료를 활용한 로모노소프 해령 시추위치 선정 기본자료 수집 <ul style="list-style-type: none"> <li>- 로모노소프해령 국제공동해저시추탐사를 위한 기본 자료 분석</li> <li>- 북극해 및 로모노소프 해령 주변해역에서 약 15년간 9월 최소면적의 해빙분포변화 위성자료 수집 및 분석</li> <li>- 2014년과 2018년 AWI 폴라스텐 탐사를 통해 획득된 로모노소프 남부해령 시추해역 탐사자료 수집</li> </ul> </li> <li>○ 로모노소프해령 국제공동해저시추 참여를 위한 아라온 JPC 시추 5정점 선정 <ul style="list-style-type: none"> <li>- 2021년 또는 향후 아라온에 장착된 JPC를 이용한 시추해역 탐사·시추계획 수립</li> </ul> </li> <li>○ 서북극해 퇴적물 코어에 기록된 고지자기 분석을 통한 층서 재정립 및 플라이스토세 밀란코비치 주기변동 최초 복원 <ul style="list-style-type: none"> <li>- 서북극해 아라온 시추 코어 퇴적물 2점(ARA03B/41GC, ARA06C/04JPC)에 기록된 고지자기 분석을 통한 중기 플라이스토세 이후 층서 재정립</li> <li>- Brunhes-Matuyama chron 경계 이후 서북극해 멘델레프 해령에서 시추된 코어 (PS72/410-1)에 기록된 유라시아와 로렌타이드 빙하발달과 붕괴에 의해 북극해에 유입된 용빙수의 변화에 의한 고해양환경 변화에 대한 정밀 기록 최초 복원</li> </ul> </li> </ul>					
색인어 (각 5개 이상)	한글	북극해, 로모노소프해령, 국제공동해저시추프로그램, 쇄빙선 아라온, JPC 시추, 밀란코비치 주기			
	영어	Arctic Ocean, Lomonosov Ridge, IODP, RV ARAON, JPC coring, Milankovich cycle			

# 요 약 문

I. 제 목: 북극해 로모노소프해령 국제공동시추프로그램 아라온 시추참여 및 북극해 퇴적층에 기록된 플라이스토세 밀란코비치 주기 기후변동 연구

II. 연구개발의 목적 및 필요성:

- 로모노소프 남부해령 시추위치 선정 및 자료 수집
- 2021년 및 향후 아라온 JPC 시스템을 이용한 시추해역 탐사/계획 수립
- 서북극 해양퇴적층의 플라이스토세 밀란코비치 주기변동 복원

III. 연구개발의 내용 및 범위

- 성공적인 로모노소프 남부해령 시추를 위한 9월 중순 해빙분포변화자료 수집 및 분석
- 로모노소프 남부해령 시추관련 자료수집(지형, 지층 자료)
- 서북극해 시추코어의 밀란코비치 주기기록 복원

IV. 연구개발결과

- 1999년과 2005-2020년 동안 9월 중순 북극해 해빙면적 변화 비교
- Parasound 탐사자료기반 로모노소프 해령 IODP 시추정점 선정
- Parasound 탐사자료기반 로모노소프 해령 아라온 JPC 시추 5정점 선정
- 고지자기-기반 서북극해 퇴적층서의 연대모델 구축 및 밀란코비치 주기변동 복원

V. 연구개발결과의 활용계획

- 거대지구과학프로그램 참여를 통한 북극해 빙하역사 복원 연구
- 동시베리아-로모노소프 해령 항해 동안 수집되는 기상 및 해빙관측자료 등의 북동항로 개척에 활용
- 중앙 결빙 미답해역 탐사 및 북서항로 루트 개척에 아라온 또는 차세대 쇄빙선 활용

# S U M M A R Y

I. Title: RV Araon Expedition to join an International Drilling Program on the Lomonosov Ridge of the Arctic Ocean and Study on Climate Changes of Milankovitch Cycles recorded in Arctic Sediments during the Pleistocene

## II. Purpose and Necessity of R&D

- Selection of drilling/coring locations and data collection for the IODP
- Using RV ARAON Jumbo piston coring (JPC) system, planning of the Arctic expedition since 2021
- Reconstruction of Pleistocene Milankovitch Cycles from the western Arctic Ocean sediments

## III. Contents and Extent of R&D

- Monitoring of the Arctic sea-ice minima from 1999 to 2020
- Collection of drilling/coring-related data (multi-beam/SBP) in the southern Lomonosov Ridge
- Reconstructing Milankovitch Cycles of sediment cores taken from the western Arctic Ocean

## IV. R&D Results

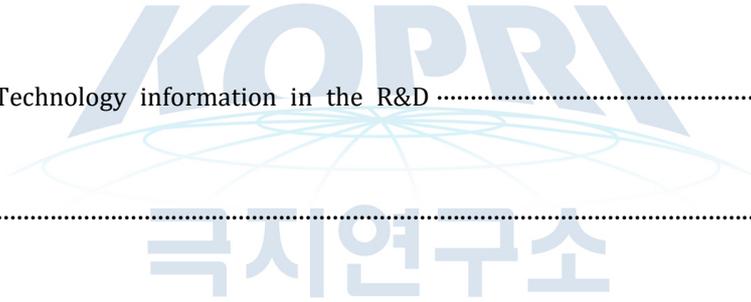
- Comparison of the Arctic sea-ice minima in 1999 and 2005-2020
- Based on Parasound data, selection of drilling locations during the IODP
- Based on Parasound data, selection of RV ARAON JPC locations during the IODP
- Reconstructing Milankovitch Cycles based on constrained paleomagnetism-based age model using western Arctic Ocean sediments

## V. Application Plans of R&D Results

- Reconstruction of Arctic glacial history through participation in the Big Earth Science Program
- Utilization of weather and sea-ice data collected during the expedition(or cruise) from the East Siberian margin to Lomonosov Ridge
- Utilization of RV ARAON and/or the next emerging icebreaker to pioneer the NW passage cruise route and the sea-ice covered and unexplored central Arctic Ocean

# C O N T E N T S

Chapter 1 Introduction .....	7
Chapter 2 Current R&D Status in Korea and Other Nations .....	11
Chapter 3 R&D Implementation Contents and Results .....	15
Chapter 4 Degree of R&D Goal Achievement and Degree of Contribution to Outside Research Institute .....	30
Chapter 5 Application Plans of R&D Results .....	31
Chapter 6 Science & Technology information in the R&D .....	34
Chapter 7 References .....	39



# 목 차

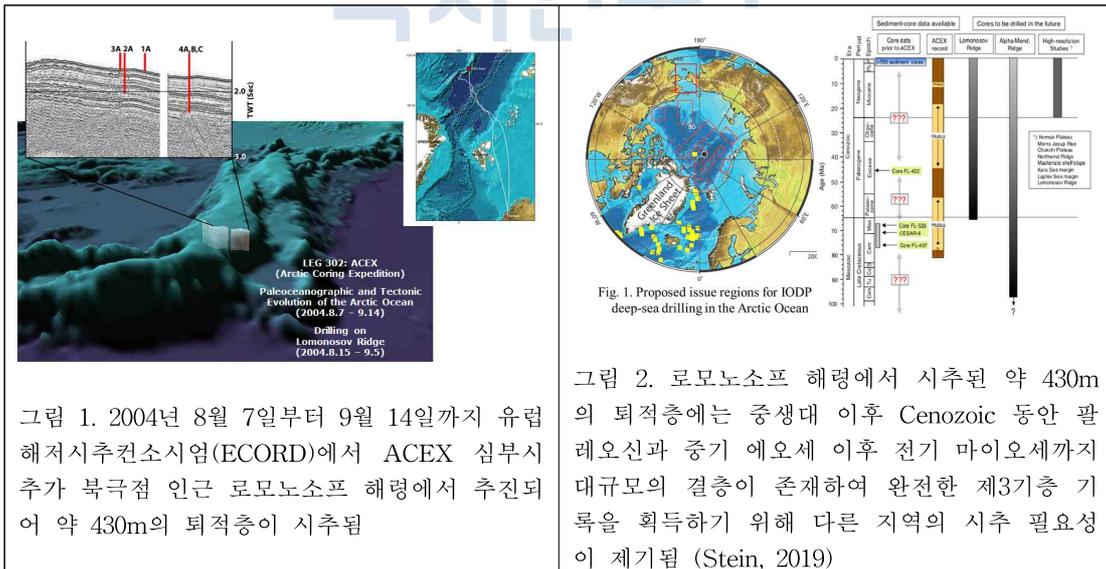
제 1 장 서론 .....	7
제 1절. 연구개발의 필요성 .....	7
제 2절. 연구개발의 목적과 범위 .....	10
제 2 장 국내외 기술개발 현황 .....	11
제 1절. 국내 기술개발 현황 .....	11
제 2절. 국외 기술개발 현황 .....	13
제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과 .....	15
제 1절. 로모노소프해령 국제공동해저시추탐사를 위한 기본자료 분석 .....	15
제 2절. 로모노소프해령 국제공동해저시추정점 선정 .....	20
제 3절. 서북극해 퇴적물 코어에 기록된 플라이스토세 밀란코비치 주기변동 최초 복원 ...	23
제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도 .....	31
제 5 장 연구개발결과의 활용계획 .....	33
제 1절. 기대 성과 .....	33
제 2절. 연구개발결과의 활용방안 .....	33
제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보 .....	34
제 7 장 참고문헌 .....	39

# 제 1 장 서론

## 제 1절. 연구개발의 필요성

### 1. 북극해 해저심부시추 개요 및 추진의 필요성

- 전 세계 5대양 중 크기가 가장 작고 대부분 두꺼운 해빙(sea ice)으로 연중 덮인 북극해는 쇄빙선을 투입한 탐사가 가능하기 때문에 다른 대양에 비하여 매우 제한적인 탐사자료 및 시추코어 퇴적물이 획득이 가능함
- 주로 독일, 미국, 러시아, 스웨덴, 캐나다 등에 의해 탐사가 수행되었으며 2008년과 2010년 이후 아시아 국가에서는 주로 우리나라와 중국은 자국의 쇄빙선을 활용하여 서북극해 탐사를 집중적으로 수행하고 있음
- 각국의 쇄빙선에 장착된 시추코어를 이용하여 북극해에서 획득된 시추된 코어는 대부분 10m 이내의 비교적 길이가 짧은 퇴적물이며 수 십 만년 내외에 비교적 플라이스토세 중기 이후 젊은 시대의 층서연대 기록으로 북극해 생성 후 지구조운동에 의한 진화과정을 통해 해빙발달과 주변대륙에 형성된 빙하역사를 복원하는데 한계가 있어 심부시추에 대한 필요성이 제기됨
- 2004년 8월 7일부터 9월 14일까지 북극점에 인접한 로모노소프 해령에서 최초로 국제공동 해저시추프로그램(IODP)에서 ACEX (Leg 302: Arctic Coring Expedition) 약 430m의 심부시추를 통해 중생대 이후 북극해 생성과 진화에 대한 최초의 기록이 밝혀짐



- 그러나 ACEX 시추코어에는 중생대 이후 Cenozoic 동안 팔레오신(Paleocene)과 중기 에오세 이후 전기 마이오세까지 약 26백만년에 걸쳐 결층이 존재하여 완전한 제3기층 퇴적층 시추에 대한 필요성이 대두되어 북극해의 주요해역에서 시추를 위한 시추제안서가 IODP에 제출됨 (그림 2)

- 그 중에서도 독일 AWI 극지해양연구소 Ruediger Stein 교수팀이 주도하여 제2의 로모노소프 시추제안서를 2006년 처음으로 제출한 이후 여러 번에 걸친 시추 제안서의 수정이 거친 후 2018년 8월 말부터 10월 중순까지 시추가 결정됨
- 그러나 시추를 위한 시추선을 비롯한 두꺼운 쇠팅으로부터 시추선을 보호하고 시추에 참여한 과학자들의 생활공간 및 연구실 제공을 위한 2척의 쇠팅선 참여가 필요하며, 이를 위한 막대한 예산 투입의 어려움으로 2018년 시추계획은 연기되었음
- 2019년 11월 7일 아일랜드 수도 더블린에서 2021년 8월말부터 10월초까지 약 6주 동안 북극해 로모노소프해령에서 심부시추가 결정되었으며, 이는 2004년에 이어 두 번째 북극해에서 추진되는 거대지구과학 프로그램으로
- 2021년 로모노소프 해령 시추는 시추비용 절감하기 위하여 제3기층인 약 1,000 m 길이의 시추공 1점을 시추 할 계획이며, 다년빙의 위험으로부터 시추선을 보호하기 위하여 스웨덴 쇠팅선 RV Oden의 참여가 결정됨
- 특히 IODP에서는 퇴적층 상부의 플라이오세-플라이스토세 기후변화 기록을 확보하기 위해 JPC 시추능력을 갖추고 있는 아라온의 참여를 바탕으로 대한민국이 북극해에서 국제공동으로 추진하고 있는 거대지구과학프로그램 참여를 적극 요청함

## 2. 연구개발의 필요성

### 가. 기술적 측면

- 극지연구소는 아라온에 탈부착이 가능한 기존 구축된 JPC 시추기술을 기반으로 플라이오세-플라이스토세 기후변화복원에 필요한 약 20~30 m 길이의 코어퇴적물 5점을 확보함으로써, 로모노소프 해령에서 추진되는 국제공동해저심부시추를 선도적으로 주도하고 극지과학 연구에 있어 대한민국의 위상을 제고할 수 있는 절호의 기회임
- 국내 최초의 쇠팅선 아라온의 2010년 성공적인 시험항해 이후, 북극탐사연구를 수행하고 있는 극지연구소는 세계 26개국이 북극해에서 공동으로 추진하고 있는 전 지구적인 기후변화의 주요 이슈를 해결하고자 하는 Big Science 연구에 능동적인 참여를 통한 북극해의 주요 이슈를 공동 해결하는 역할이 필요함
- 북극해에서 전용 시추선을 이용하여 빙·해양퇴적층 심부시추 및 활용기술 습득
- 북극해에서 장기간 시추선 운영 및 다년빙으로부터 장비운영 등 노하우 습득

### 나. 경제·산업적 측면

- 로모노소프 해령에서 추진되는 국제공동해저시추 프로그램에 아라온이 직접 참여함으로써 시추해역까지 연결된 미래 북동항로의 예비탐사자료 확보 및 탐사 영역확대
- 북극해역의 심부시추가 실현되면 시추선 보호를 위해 최소한 2척의 쇠팅선 투입이 필요하기 때문에 향후 아라온 재투입시 시추참여 노하우를 통해 경제적 효과 창출
- 북극해에서 수행되는 거대지구과학 프로그램에 참여 및 주요 과학적 이슈 해결을 통해 차세대 쇠팅선 건조 필요성 극대화 및 당위성 확보

#### 다. 과학적 측면

- 아라온 시추 참여를 통해 향후 극지 해역의 주요 과학적 이슈 해결에 필요한 시추제안서의 주도적 작성 등 북극해에서 추진될 거대지구과학 프로그램 참여를 위한 국제공동네트워크 구축 노하우 등 습득 가능
- 특히 시추제안서 작성을 위한 시추지점 선정에 필요한 탄성과탐사자료 및 시추코어 획득 기술 확보를 통해 향후 북극해에서 추진되는 빅사이언스 연구분야에서 대한민국의 주도적 추진이 가능함
- 북동시베리아 El'gygytgyn 운석충돌에 의해 형성된 호수에서 시추된 퇴적물코어에 기록된 플라이스토세 기후변동(Melles et al., 2012, Science)과 북극해 시추코어에 기록된 기후변화 기록의 대비를 통해 북극해 밀란코비치 주기변동에 대한 기록 복원의 필요성이 있음

#### 라. 사회·문화적 측면

- 아라온을 활용한 북극해 탐사연구를 통해 과거의 기후변화를 이해함으로써 현재의 기후변화의 영향을 보다 중요하게 인식하여 불확실한 미래 기후변화에 대한 이해를 높임으로써 북극해 연구의 중요성에 대한 국민적 관심 및 공감대 형성
- 전 세계 26개국이 추진하고 있는 거대지구과학프로그램에 우리나라가 주도적으로 참여함으로써 극지연구의 중요성에 대한 대국민홍보강화
- 북극해 주요 이슈인 기후변화가 한반도 기후에 미치는 영향에 대한 국민적 관심이 커지면서 전 세계에서 공동으로 추진하고 있는 거대지구과학 프로그램에 쇠빙선 아라온이 참여함으로써 국민의 자긍심 및 국가 브랜드제고

극지연구소

## 제 2절. 연구개발의 목적과 범위

### 1. 연구개발의 목적

가. AWI 탐사자료를 활용한 로모노소프 해령 시추위치 선정 및 기본자료 수집

- 북극해 및 로모노소프 해령 주변 약 15년간 9월 최소면적의 해빙분포변화 위성자료 수집 및 분석
- 2014년과 2018년 AWI 폴라스틴 탐사를 통해 획득된 로모노소프 남부해령 시추해역 탐사자료 수집

나. 2021년 또는 향후 아라온에 장착된 JPC를 이용한 시추해역 탐사·시추계획 수립

다. 서북극해 퇴적물 코어에 기록된 플라이스토세 밀란코비치 주기변동 최초 복원

### 2. 연구개발의 범위

가. 북극해 및 로모노소프 남부해령 주변 9월 중순 해빙분포변화자료 수집 및 분석을 통한 시추추진계획 수립

나. 로모노소프 남부해령 시추관련 자료수집연구

- 로모노소프해령 해저지형 및 천부 지층 탐사 자료 수집(AWI 탐사자료 공동연구 활용)
- 기존 AWI 자료 기반 탐사지역 및 시추 위치 선정

다. 북극해 시추 코어에 보존된 밀란코비치 주기 기록 복원 연구

- ARA06C/04JPC, ARA03B/41GC 시추코어 퇴적물 고지자기분석자료 획득 및 플라이스토세 층서 재정립 및 플라이스토세 밀란코비치 주기변동 기록 복원
- 2008년 폴라스틴 탐사를 통해 서북극해 멘텔레프해령에서 획득한 시추코어(PS72/410-5)에 기록된 빙하활동기록 복원

## 제 2 장 국내외 기술개발 현황

### 제 1절. 국내 기술개발 현황

#### 1. 지금까지의 연구개발 실적

가. 쇄빙선 아라온에 장착된 JPC 롱코어 시스템을 이용하여 우리나라 동해 시험항해 장비테스트 및 서북극해 탐사를 통해 최초로 JPC 빙·해양시추코어 퇴적물 획득

- 2015년 북극탐사에 앞서 우리나라 동해에서 처음으로 아라온에 장착된 JPC 롱코어 시스템 시추성능 테스트를 성공적으로 수행함



그림 3. 2015년 5월 북극탐사에 앞서 동해에서 최초로 아라온에 장착된 JPC 시추코어를 이용하여 롱코어 퇴적물 시추를 성공적으로 수행함



그림 4. 2015년 5월 동해 시험항해에서 최초로 아라온에 장착된 JPC 시추코어를 이용하여 약 30m의 롱코어 퇴적물을 성공적으로 시추함

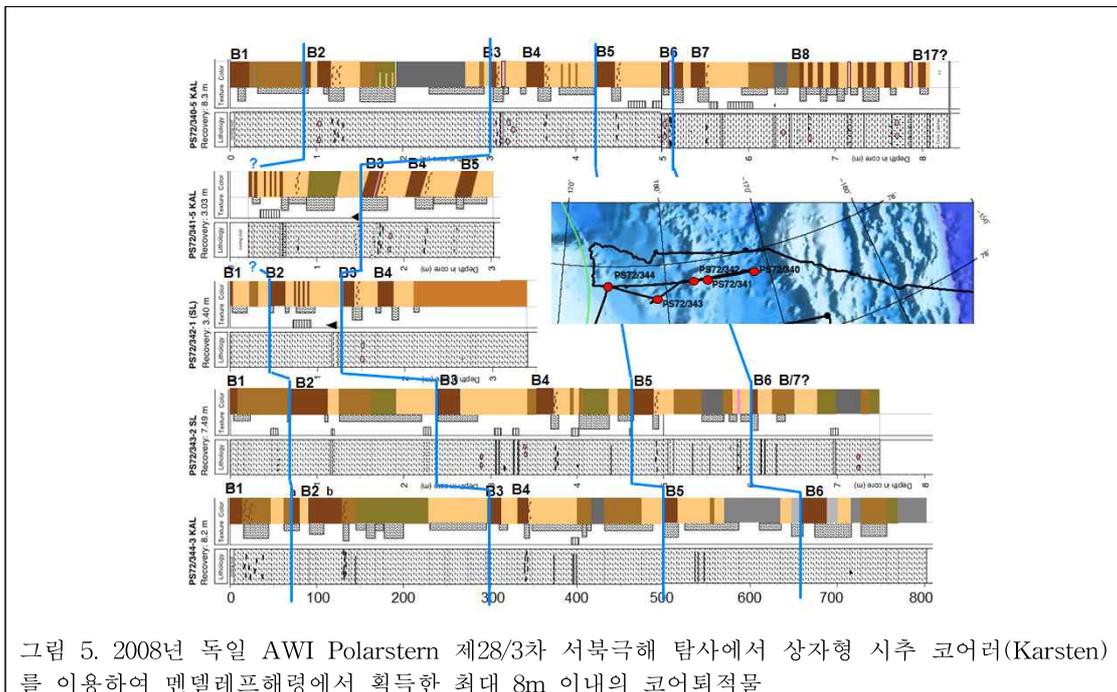


그림 5. 2008년 독일 AWI Polarstern 제28/3차 서북극해 탐사에서 상자형 시추 코어러(Karsten)를 이용하여 멘델레프해령에서 획득한 최대 8m 이내의 코어퇴적물

- 아라온에 장착된 JPC 롱코어 시스템을 이용하여 서북극해 동시베리아 대륙붕과 척치해 주변해역의 4정점에서 최초로 14 m 길이의 빙·해양시추코어 퇴적물 획득
  - 독일 쇄빙선 “플라스턴”호를 이용해 지난 33년 동안 북극해에서 시추된 코어 길이는 8m 내외임
- JPC를 이용하여 최초로 14 m 길이의 빙·해양퇴적물 시추코어를 이용해 서북극해의 빙하역사 및 고기후환경변화 정밀 복원 가능
  - 약 100만년의 빙하역사 및 빙하기-간빙기 기후변화 기록 확인
  - 북극해에서 거대 빙하기가 존재하였다고 추측되는 MIS 16과 12 동안에 서북극해에 거대 빙하가 존재했던 기록을 세계 최초로 밝히는 연구를 현재 수행 중임

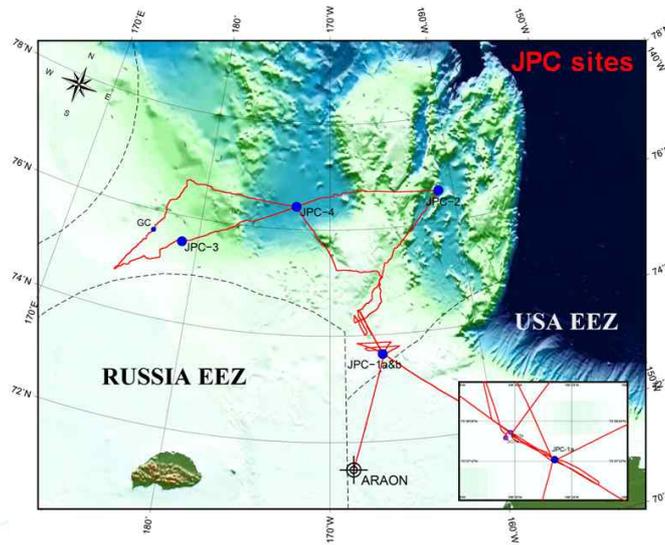


그림 6. 2015 아라온 서북극해 탐사라인 및 해역에서 시추된 JPC 시추 4정점

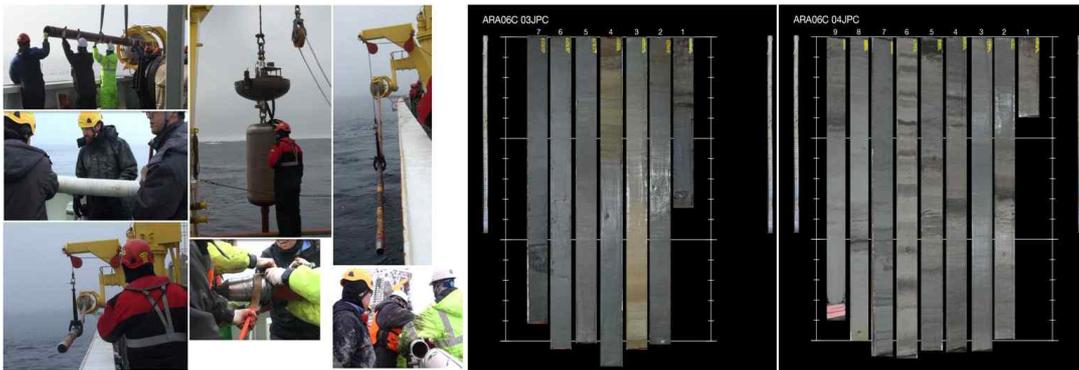


그림 7. 2015 아라온 서북극해 탐사동안 척치해의 심해분지(수심 약 2200 m) 정점 JPC04에서 획득한 약 14m 길이의 빙·해양퇴적물 코어

## 제 2절. 국외 기술개발 현황

### 1. ACEX (Arctic Coring Expedition, 2004): 북극점 로모노소프해령 국제공동해저심부시추 및 북극해 지구조 진화에 의한 기후환경변화 기록 최초 복원

- 유럽연합공동시추컨소시엄(ECORD)은 2004년 북극점 주변의 로모노소프 해령에서 최초로 약 440m의 퇴적층을 시추(ACEX)하여 중생대 후기 이후 북극해의 진화역사를 처음으로 밝힘

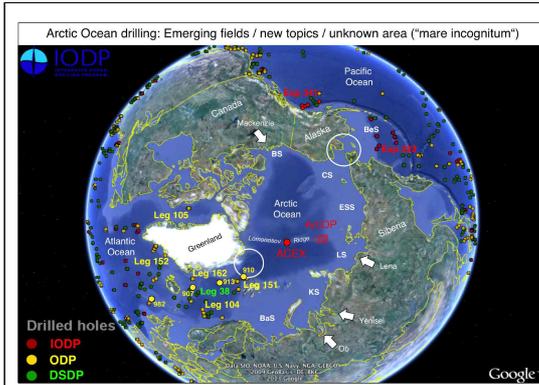


그림 8a. 지난 50년 동안 DSDP, ODP 및 IODP에서 전세계 대양에서 추진한 국제공동해저시추프로그램으로 시추가 수행된 대양과 시추정점



그림 8b. 2004년 유럽국제공동해저시추컨소시엄(ECORD)에서 최초로 북극점 인근 로모노소프해령에서 심부시추를 추진하였으며 이를 위해 러시아 핵추진쇄빙선 I/B Sovetskiy Soyuz 1척, 스웨덴 쇄빙선 I/B Oden 1척 및 시추선 I/B Viking이 선단을 구성하여 북극해 시추를 성공적으로 수행함

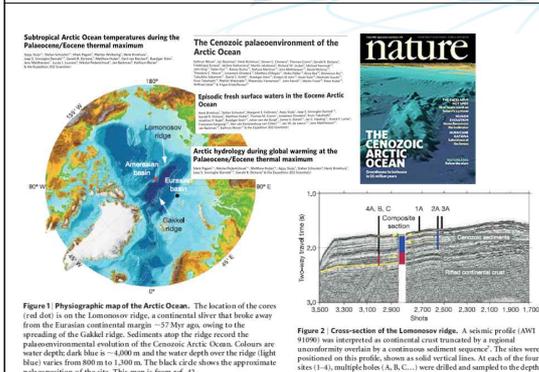


그림 8c. 2004년 ACEX 시추를 통해 중생대 이후 북극해 생성 및 진화역사에 관한 기후환경변화기록이 처음으로 밝혀져 Nature등에 다수의 논문이 게재됨

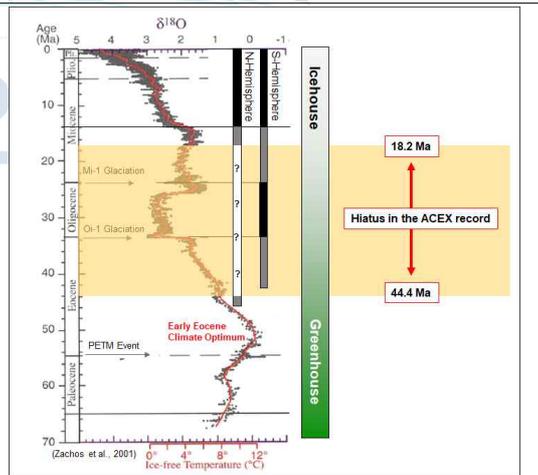


그림 8d. ACEX 시추코어에 약 26백만년의 결층이 확인되어 북극해 여러 해역에서 추가적인 시추의 필요성이 제기되었음

그림 6. 2004년 유럽국제공동해저시추컨소시엄(ECORD)에서 최초로 북극점 인근 로모노소프해령에서 심부시추(ACEX)를 추진하여 중생대 이후 북극해 생성 및 진화역사에 대한 기록이 처음으로 밝혀짐

- 그러나 ACEX 시추코어에는 약 2600만년(에오세-올리고세-전기 마이오세) 기록이 결층(Hiatus)으로 밝혀져 3기층 기록획득을 위한 추가적인 시추의 필요성이 높아짐
- 북극해에서 중생대 이후 북극해 생성 및 진화에 따른 전 지구적 기후변화복원 및 그 원인을 규명하기 위한 다양한 시추제안서가 제출되었음

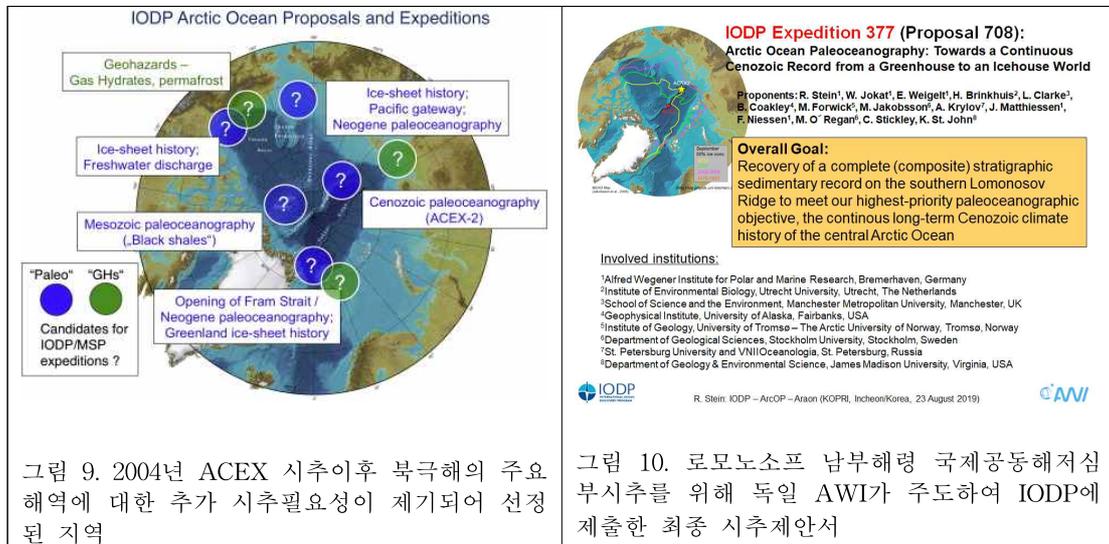


그림 9. 2004년 ACEX 시추이후 북극해의 주요 해역에 대한 추가 시추필요성이 제기되어 선정된 지역

그림 10. 로모노소프 남부해령 국제공동해저심부시추를 위해 독일 AWI가 주도하여 IODP에 제출한 최종 시추제안서

## 2. 로모노소프 남부해령에 대한 2차 시추를 위한 시추제안서 공동제출

- 독일 AWI Stein 교수 중심으로 로모노소프 남부해령에서 심부시추를 위한 시추제안서를 2006년 처음으로 예비시추제안서를 제출한 이후 최종 시추제안서를 제출함
- 최종 시추제안서를 제출한 이후에도 여러 차례 수정본을 제출함

## 3. ArcOP (Arctic Ocean Paleocyanography): 로모노소프 남부해령에 대한 2차 시추 추진 결정

- IODP는 2018년 8월 하순부터 10월 초까지 러시아 대륙붕에 인접한 로모노소프 남부해령의 심부시추를 약 6주간 시추를 결정하였음
- 그러나 IODP는 2018년 계획된 시추는 막대한 시추경비와 다년빙의 위험에 따른 시추선의 안정성 확보에 필요한 제2 쇄빙선 확보에 어려움이 있어 취소되었음
- 2019년 11월 7일 아일랜드 수도 더블린에서 개최된 IODP 회의에서 2021년 시추를 다시 결정하였음
- 그러나 주요 시추공을 4공에서 1000m 길이의 1공으로 줄이고 상부 수십m의 퇴적층에 대한 시추를 권고하였음
- 약 20~30m 길이의 상부퇴적층은 30m 퇴적물 코어 획득이 가능한 시추시스템을 갖춘 쇄빙선 투입을 고려하여 추진함

## 제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

### 제 1절. 로모노소프해령 국제공동해저시추탐사를 위한 기본자료 분석

#### 1. 북극해 및 로모노소프 해령 주변해역 위성관측 해빙분포 변화 분석

가. 1999년 9월과 2005년부터 2020년까지 15년간 북극해에서 위성으로 관측된 여름철(9월 중순) 해빙 최소면적자료 비교

- 시추가 예정된 로모노소프 남부해령 주변의 지난 15년간 관측된 9월 중순 해빙은 대부분 사라진 상태로 파악되어 쇄빙선의 보호 하에 시추선을 이용하여 시추를 추진하는데 큰 어려움이나 위험도는 낮을 것으로 판단됨
- 2020년 9월 14일 역대 두 번째로 북극해 해빙이 감소( $3.7 \times 10^6 \text{ km}^2$ )하였으며, 시추 예정인 로모노소프 남부해령 해역은 해빙이 거의 사라진 상태로 지구온난화에 의해 북극해 해빙의 감소패턴은 지속적으로 진행될 것으로 보임
- 2021년 1월 중순까지 결빙 면적은 역대 최소면적으로 감소하였으나 1월 중순이후 다소 결빙면적이 증가하여 2020년과 같은 패턴을 보여주며, 향후 지속적인 결빙 면적변화를 파악함으로써 3월말 이후 봄철을 지나면서 해빙이 서서히 진행됨으로써 2021년 여름철 해빙 면적 감소 경향을 예측할 수 있을 것으로 판단됨



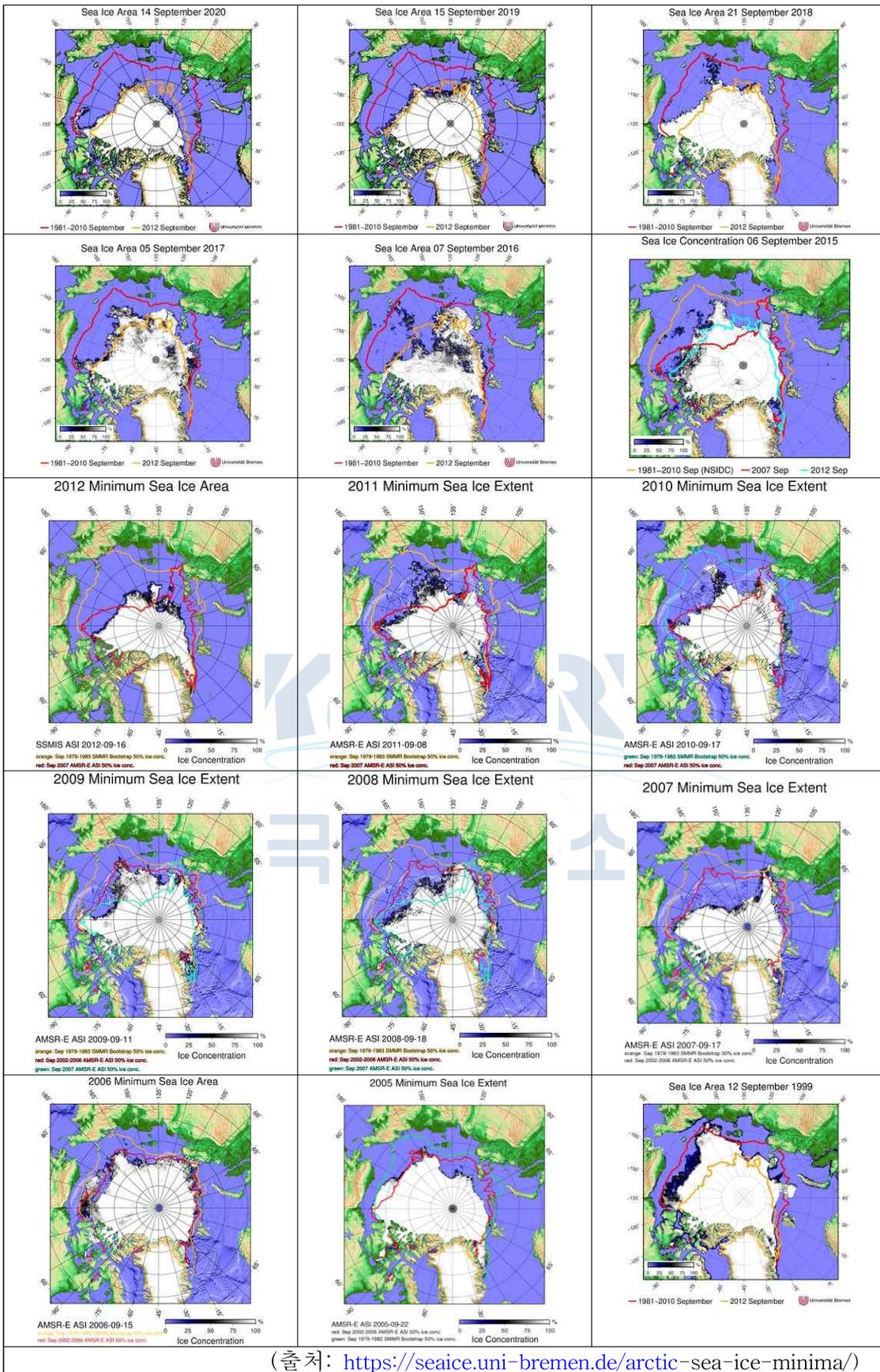


그림 11. 1999-2020년도 북극해 해빙면적 비교

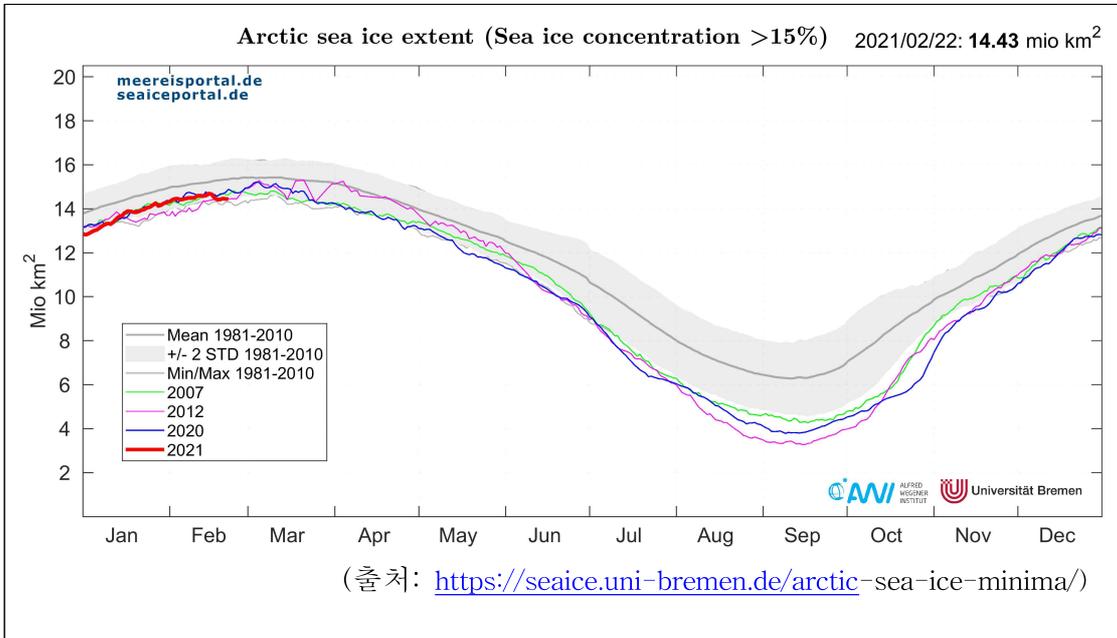
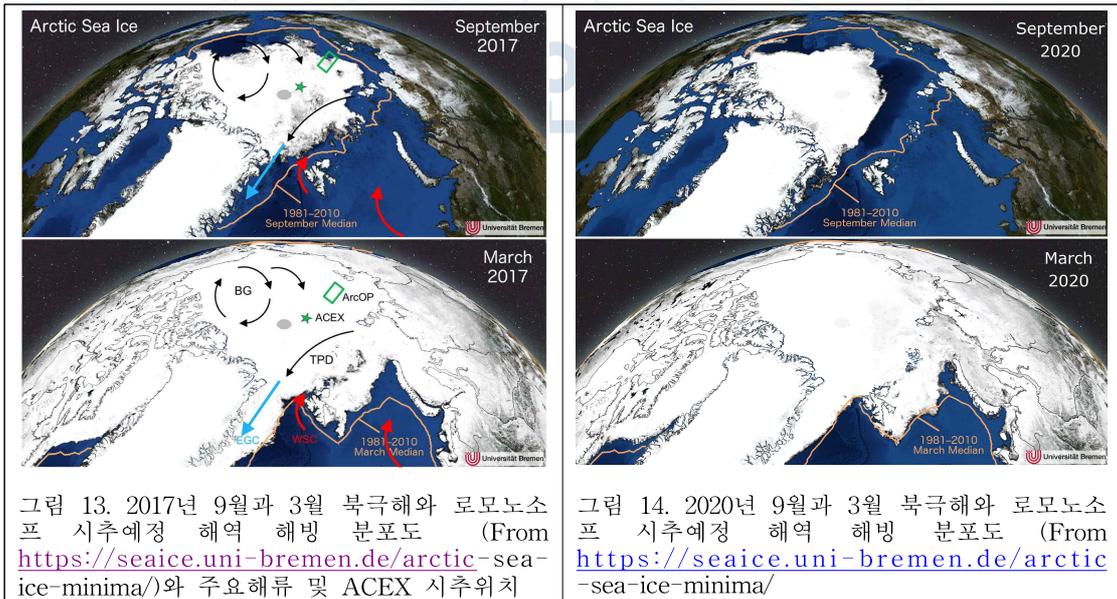


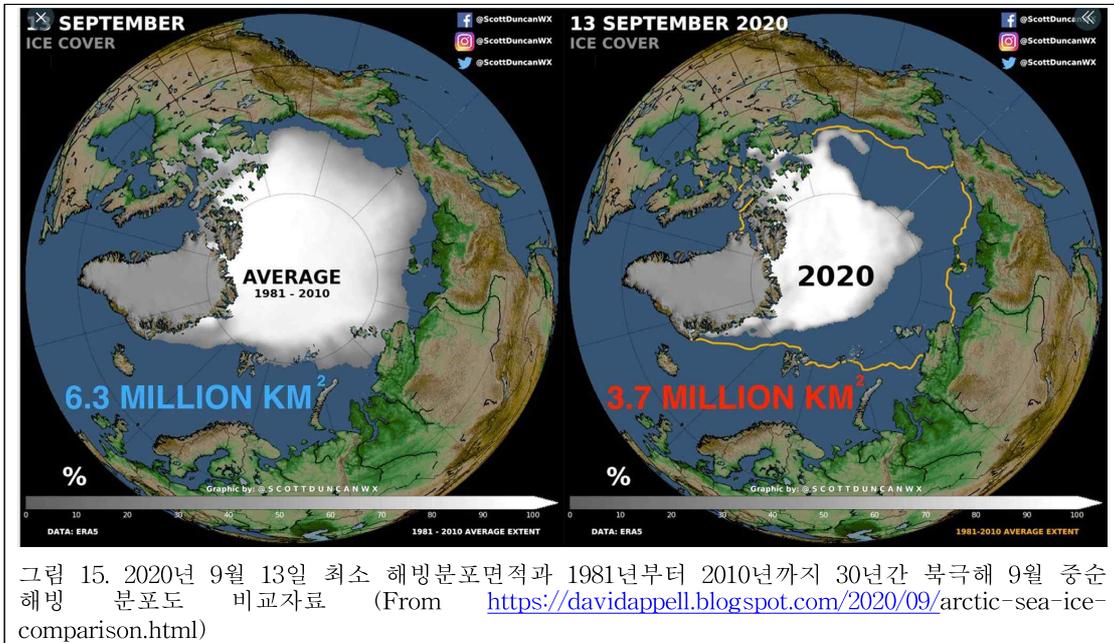
그림 12. 2021년 1월 이후 북극해 해빙 분포변화 곡선, 2월 22일 약 14.43x10<sup>6</sup> km<sup>2</sup>의 해빙면적을 기록함

## 2. 시추예정인 북극해 로모노소프 남부해령 주변해역 위성관측 해빙분포 파악

가. 시추 예정인 로모노소프 남부해령에서 위성으로 관측된 2017년과 2020년 9월 (여름철)과 3월 (겨울철) 해빙분포패턴 비교자료



나. 2020년 9월 13일 최소 해빙분포면적(3.7x10<sup>6</sup> km<sup>2</sup>)과 1981년부터 2010년까지 30년간 북극해 9월 중순 위성으로 관측된 해빙 분포도 비교자료해빙분포패턴 비교자료



### 3. 북극해 로모노소프 남부해령 해역 AWI 탐사자료 수집 및 분석

가. 2014년 폴라스텐 제 28/3차(PS/87) 로모노소프 해령탐사

- 시추예정 해역인 로모노소프 남부해령에 대한 정밀 심부탐성과 탐사를 통해 예비시추정점 10점 선정

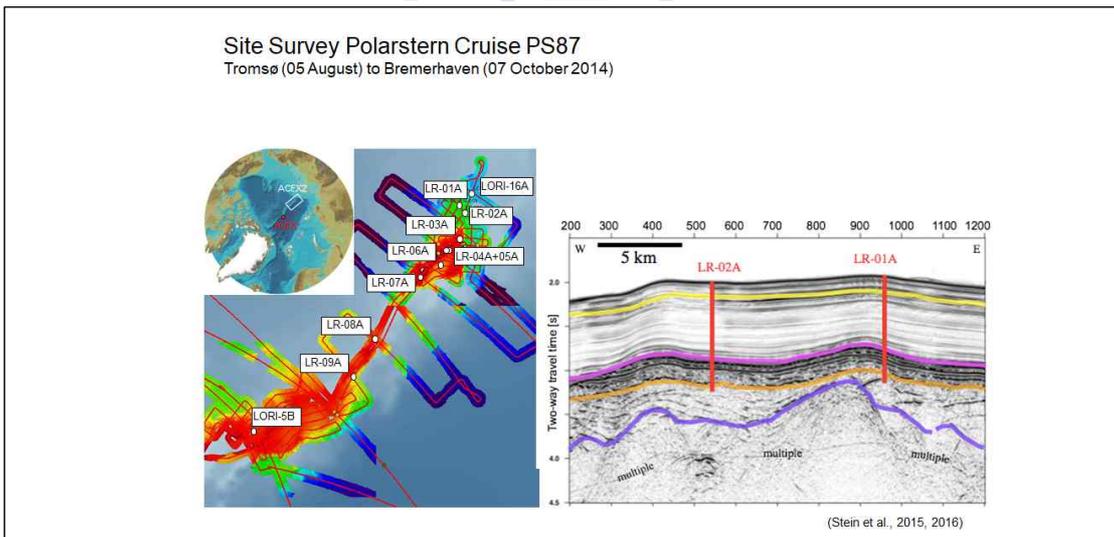


그림 16. 2014년 폴라스텐 제 28/3차 북극해 탐사에서 로모노소프 남부해령에서 예비시추정점 선정을 위한 심부탐성과탐사 수행

- 시추예정해역 시추정점 주변 침식면에서 마이오세 후기 퇴적물 코어 획득

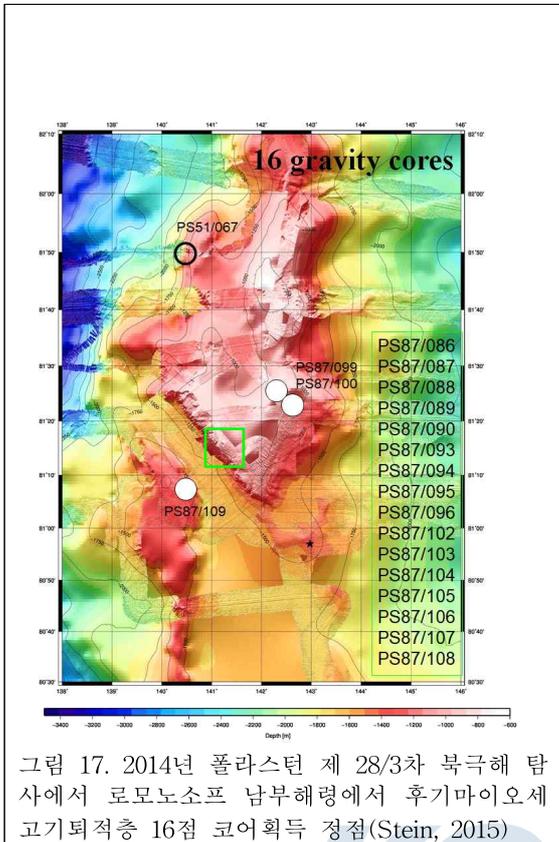


그림 17. 2014년 폴라스턴 제 28/3차 북극해 탐사에서 로모노소프 남부해령에서 후기마이오세 고기퇴적층 16점 코어 획득 정점(Stein, 2015)

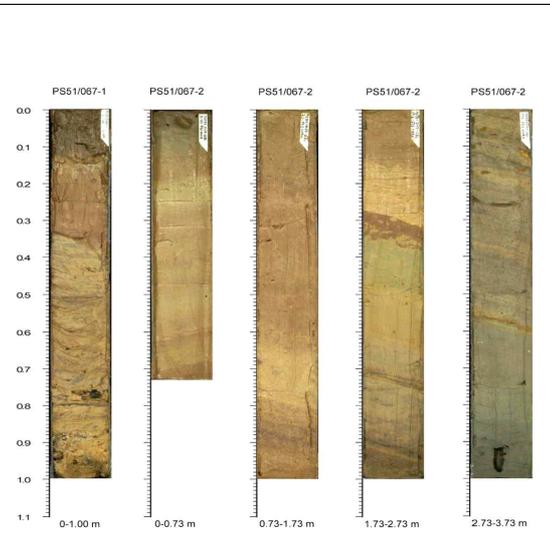


그림 18. 2014년 폴라스턴 제 28/3차 북극해 탐사에서 로모노소프 남부해령에서 중력코어를 이용하여 획득한 16점의 고기퇴적층은 후기마이오세에 퇴적된 층으로 밝혀짐 (Stein, 2015; Stein et al., 2016)

나. 2018년 폴라스턴 PS115/2 로모노소프 남부해령 추가탐사

- 시추예정해역 심부탄성파탐사 추가자료 획득 및 퇴적물 코어 추가획득

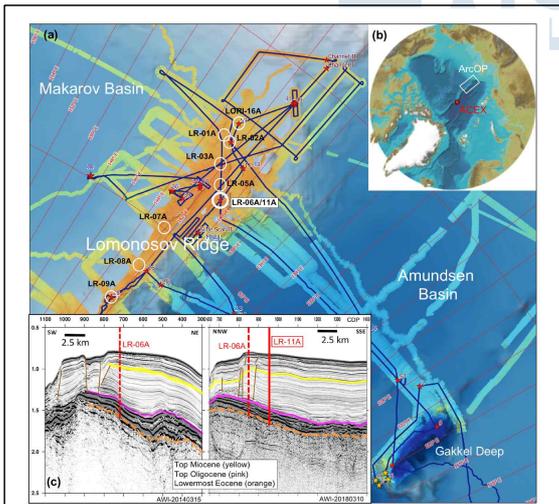


그림 19. 2018년 폴라스턴 PS115/2 북극해 탐사에서 로모노소프 남부해령에서 심부탄성파탐사를 수행하여 선정된 예비시추정점과 심부시추정점의 심부퇴적층 구조 (Stein 2019b)

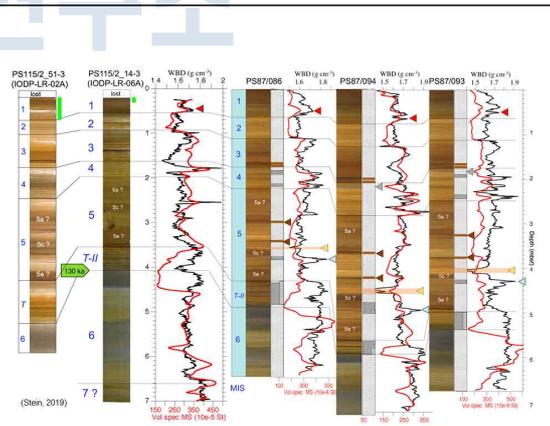


그림 20. 2018년 폴라스턴 PS115/2 북극해 탐사에서 로모노소프 남부해령에서 획득한 시추코어 퇴적물 (Stein 2019a)

## 제 2절. 로모노소프해령 국제공동해저시추정점 선정

### 1. 북극해 로모노소프 남부해령 국제공동해저심부시추 제안서 “Arctic Ocean Paleooceanography: Towards a Continuous Cenozoic Record from a Greenhouse to an Icehouse World (ArcOP)” 기반 시추를 위한 시추정점 선정

#### 가. Parasound (3.5 kHz) 탐사자료기반 로모노소프 해령 시추정점 선정

- 현재 약 950m와 50m 길이의 퇴적층 시추를 위한 시추정점이 잠정적으로 선정
  - LR-06A 또는 06B 정점 중 정점 06B에서 약 950m 길이의 시추가 유력함
  - LR-06C 정점에서 약 50m 길이의 시추가 유력함

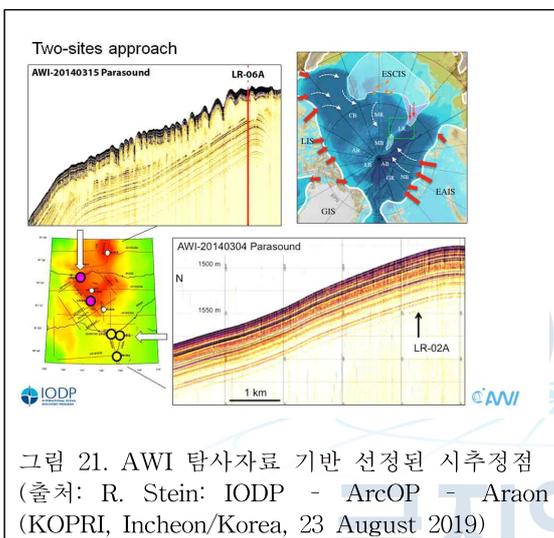


그림 21. AWI 탐사자료 기반 선정된 시추정점 (출처: R. Stein: IODP - ArcOP - Araon (KOPRI, Incheon/Korea, 23 August 2019))

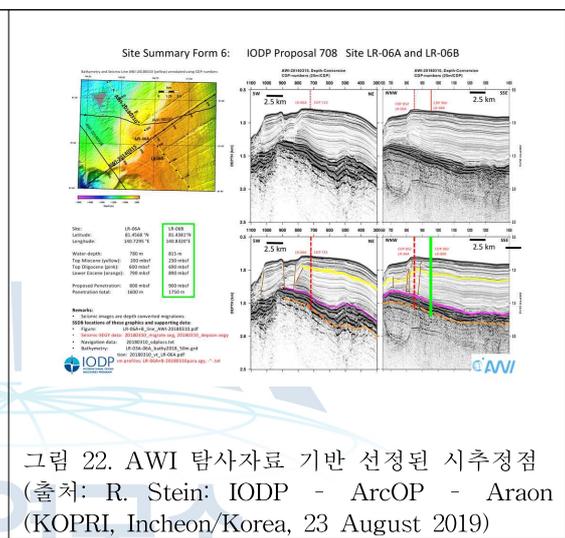


그림 22. AWI 탐사자료 기반 선정된 시추정점 (출처: R. Stein: IODP - ArcOP - Araon (KOPRI, Incheon/Korea, 23 August 2019))

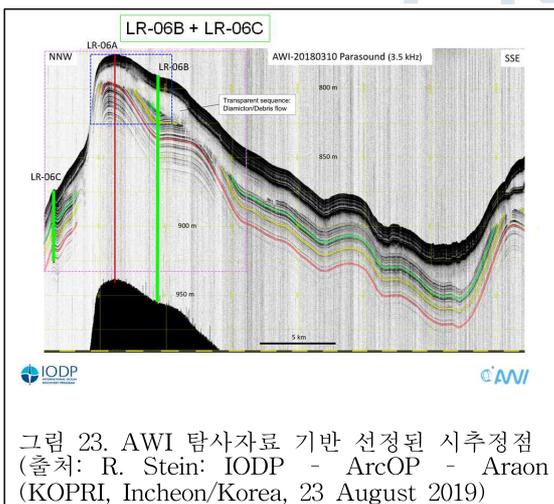


그림 23. AWI 탐사자료 기반 선정된 시추정점 (출처: R. Stein: IODP - ArcOP - Araon (KOPRI, Incheon/Korea, 23 August 2019))

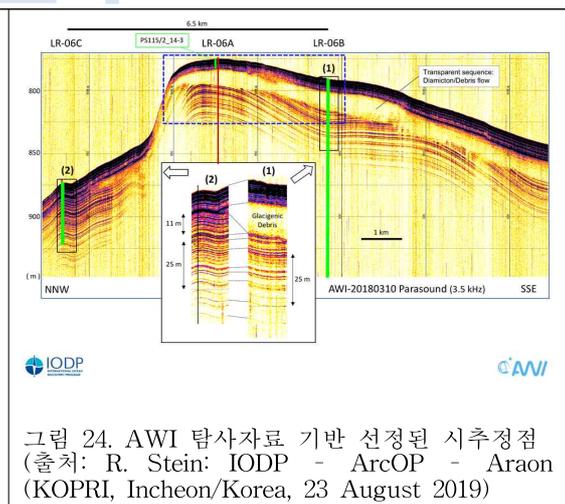
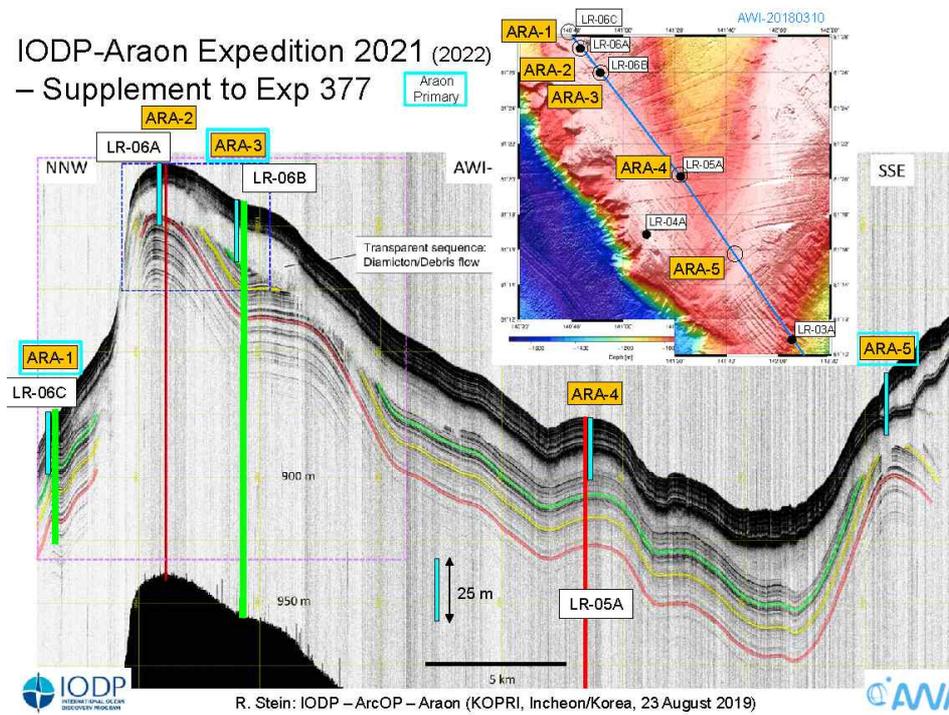


그림 24. AWI 탐사자료 기반 선정된 시추정점 (출처: R. Stein: IODP - ArcOP - Araon (KOPRI, Incheon/Korea, 23 August 2019))

#### 나. JPC 코어시스템 활용 IODP-Araon Expedition (2021-2023) 주도적 참여 추진

- 2015년도 아라온 탐사는 점보피스톤 코어시추(Jumbo piston coring, JPC)를 통하여 양질의 장주기적인 퇴적물 기록을 확보한 바 있음
- 2022년 예정된 북극해 로모노소프 남부해령 국제공동시추동안 아라온의 점보피스톤 코어링

시스템을 통해, 드릴시추 코어정점 주변부에 양질의 시추코어를 확보하는 것을 제안



IODP-KOPRI 북극해 국제공동심부시추 및 아라온 시추 정점

그림 25. IODP-Araon 공동시추 정점

다. 5정점의 점보피스톤 코어시추 제안 및 지질학적 의미

- ARA-1: IODP LR-06C 정점과 비교를 위하여, 교란과 침식이 일어나지 않은 고해상도의 상부 20-25 m의 퇴적기록 확보
- ARA-2: IODP LR-6A 및 PS115/2-14 정점과 인접한 지역으로 교란되지 않은 상부 10 m의 퇴적기록 확보와 하부 빙퇴적층의 상·하부 층서 경계에 대한 정보 확보
- ARA-3: IODP LR-6B 정점과 인접한 지역으로 교란되지 않은 상부 10 m의 퇴적기록 확보와 하부 빙퇴적층의 상·하부 층서 경계에 대한 정보 확보
- ARA-4: IODP LR-5A 정점과 인접한 지역으로 교란되지 않은 상부 15 m 퇴적기록 확보와 하부 빙퇴적층의 상·하부 층서 경계에 대한 정보를 확보
- ARA-5: MIS 4/6와 MIS 12?동안 거대빙상 발달에 의해 형성된 것으로 추정되는 빙퇴적층에 대한 정보 확보가 목적임. 특히 동시베리아 대륙주변부의 반복된 과거 주요 빙하작용의 증거가 보존된 기록을 확보함으로써 IODP 심부시추 기록을 해석하는데 있어서 필수적인 자료로 활용

## 2. 타부처 국가 R&D 연구사업 연계 북극해 로모노소프 남부해령 탐사 추진 방안

가. 현재 북극해에서 수행 중인 해양수산부 국가 R&D 연구사업과 연계한 효율적 추진전략의 필요성

- 매년 척치해와 동시베리아 주변해역 탐사를 추진하고 있는 “북극해 해저자원환경 탐사 및

해저메탄방출현상 연구(PM20050)” 연구사업과 연계한 탐사전략의 필요성이 있음

- 동시베리아 해역에서 로모노소프 해령 시추해역까지 1.5일에서 2.5일의 항해 시간이 필요
- JPC 시추 시스템을 이용할 경우 각 시추정점 당 최소 1일에서 1.5일이 필요하기 때문에 5정점의 시추를 추진할 경우 약 8일 정도의 시간이 필요함
- IODP에서 요청한 최소 요건인 3정점을 시추할 경우 최대 약 5일정도 소요될 것으로 판단 됨

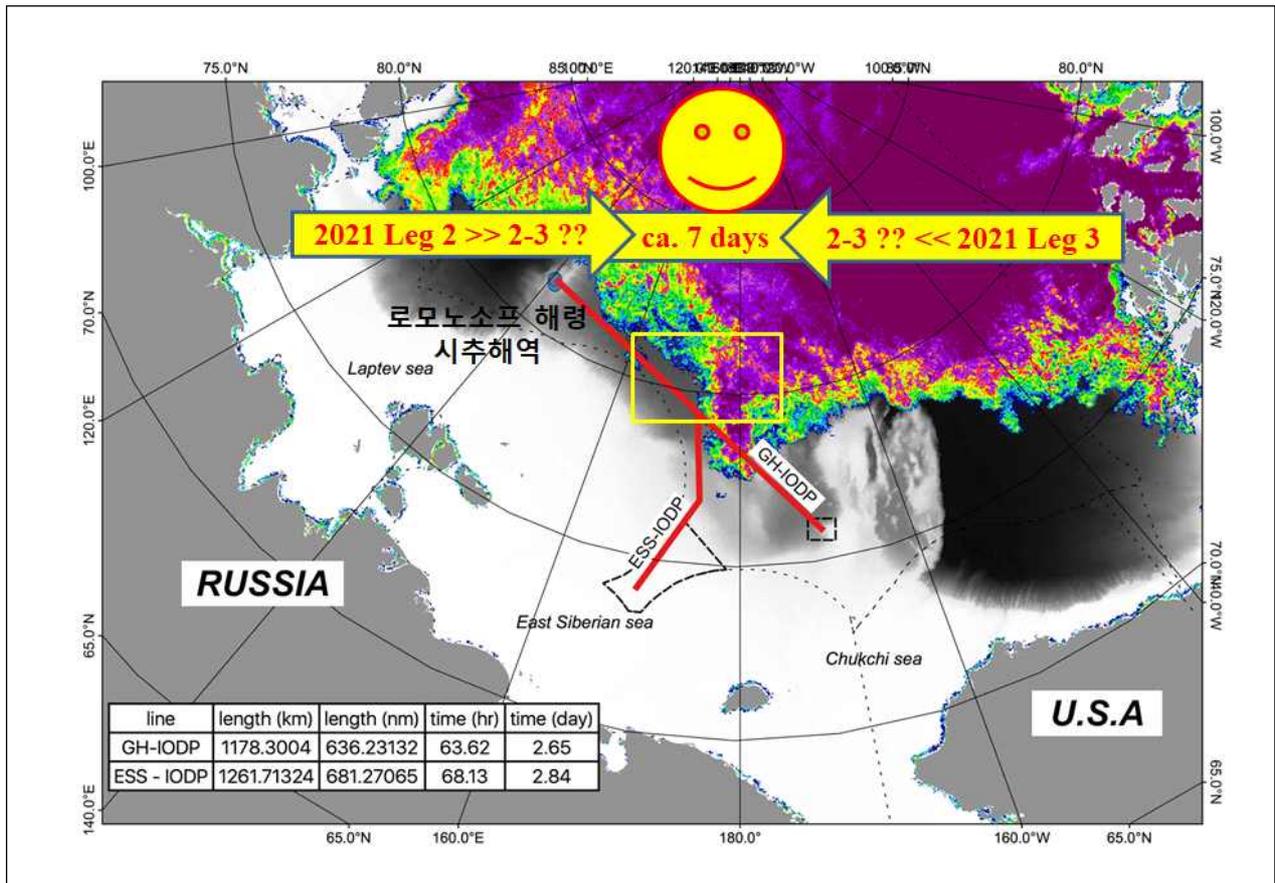


그림 26. 동시베리아 해역에서 로모노소프 해령의 시추해역까지 아라온 최대 항해거리 및 시간

### 제 3절. 서북극해 퇴적물 코어에 기록된 플라이스토세 밀란코비치 주기변동 최초 복원

#### 1. 서북극해 퇴적물코어에 기록된 플라이스토세 밀란코비치 주기변동 최초복원

가. 서북극해 마카로프 분지 코어퇴적물(ARA03B/41GC)의 지자기분석자료 해석과 플라이스토세 층서 재정립

○ 연구 배경

- 상대적으로 많은 연대 설정이 이루어진 플라이스토세 후기에 비하여 연대정보가 부족한 이전 연구의 연대 모델을 보정하기 위해 고지자기 분석자료를 획득하여 이에 대한 해석을 통해 독립적인 연대 포인트를 획득하고자 함

○ 연구 내용 및 결과

- 지자기자료 획득 및 해석 : geomagnetic inclination의 역전을 excursion 또는 reversal로 여기는 해석상의 차이가 있음

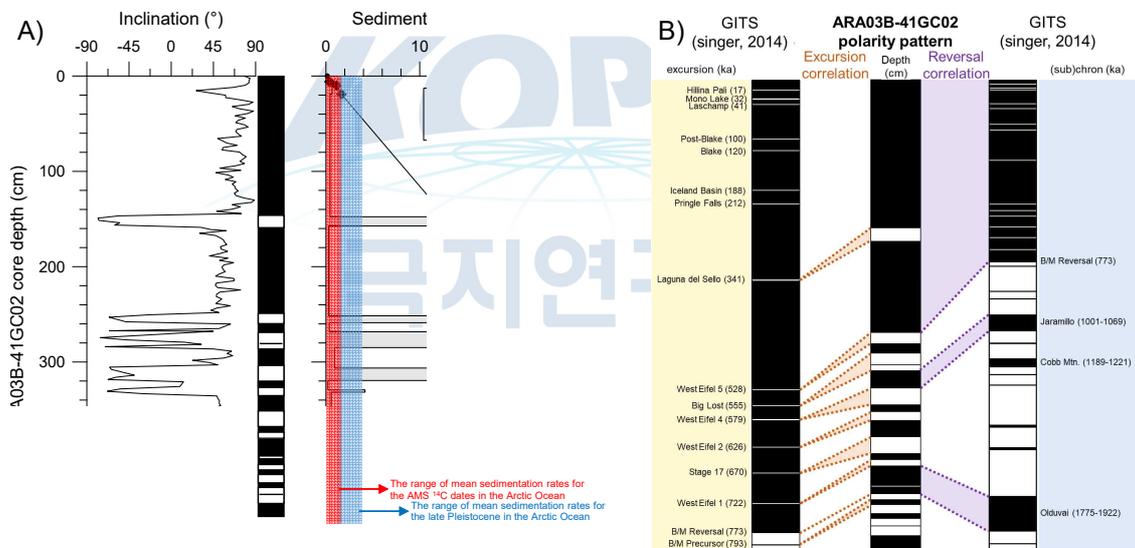


그림 27. A) 서북극해 마카로프 분지 퇴적물 코어 ARA03B-41GC02의 지자기 inclination과 polarity pattern(좌)과 inclination을 excursion으로 해석한 예시(우). B) 퇴적물 코어 ARA03B-41GC02의 지자기 inclination에 대한 해석

- 지자기자료 해석으로부터 획득된 연대 포인트를 적용하여 전지구 기후지시자인 저서성 유공충의 산소동위원소비(Lisiecki and Raymo, 2005)와 퇴적물의 망간 변동을 대비시킨 연대 모델을 수립
- 추가적으로 독립적인 연대 설정을 위해 북서시베리아의 호성퇴적물(ICDP Site 5011-1, Melles et al., 2012)과 마카로프 분지 코어퇴적물간의 망간 변동성을 대비시킨 연대 모델을 설정하여 비교

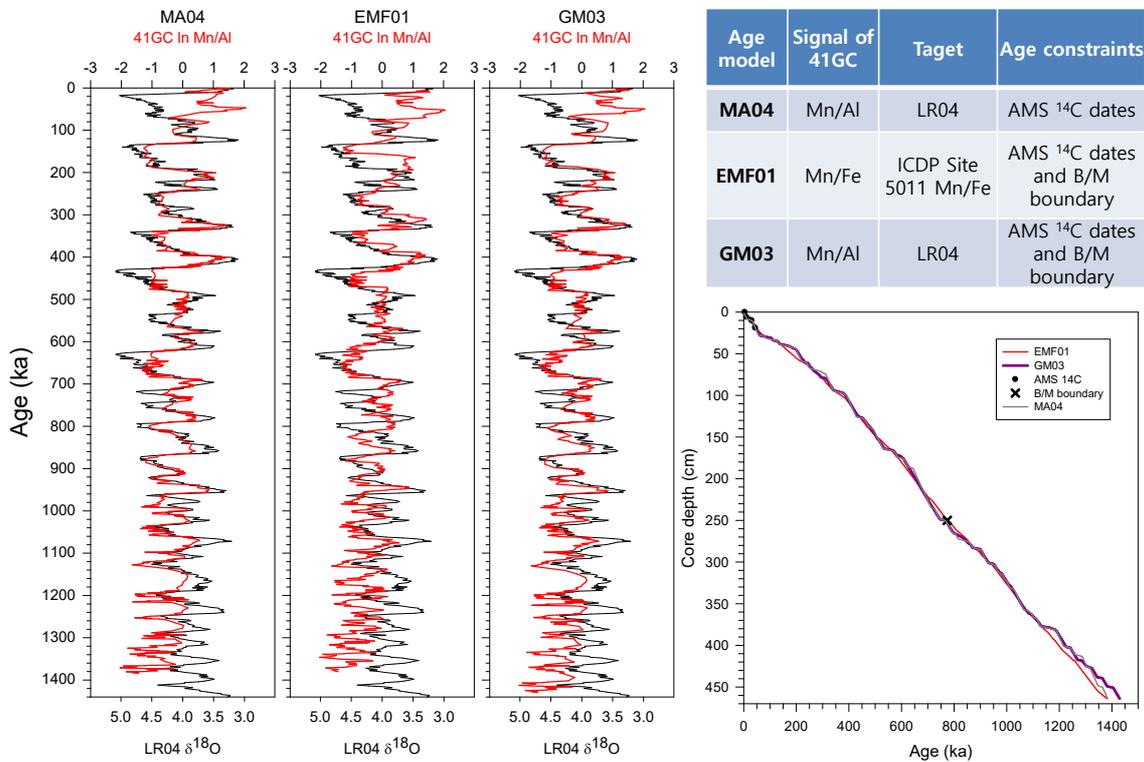


그림 28. 독립적인 연대모델로부터 도출된 망간과 저서성 산소동위원소비(좌). 독립적인 연대모델에 적용된 프록시와 대비대상 및 연대포인트(우상). 도출된 연대모델들의 코어깊이-연대 관계도

○ 토의 및 결론

- 마카로프 분지의 퇴적물에서 2.5m 이하에서 나타나는 지자기 inclination 변화가 excursion일 경우 암층서 및 퇴적학적으로 해석할 수 없는 퇴적물 증가가 나타나기 때문에 chron 또는 subchron으로 해석
- 서북극해의 다른 퇴적물 기록과 잘 대비되는 ARA03B-41GC02의 코어 깊이 2.5 m의 inclination 역전을 Brunhes-Matuyama chron의 경계로 설정한 연대모델은 육상 호수퇴적물과의 대비를 통해 설정된 독립적인 연대모델과 유사한 결과를 보이며 전지구 빙하기-간빙기 기후지시자와 잘 일치함
- 지자기 inclination 변화로부터 해석한 연대정보를 통해 보정된 새로운 연대모델은 이전 연구에서 제시한 연대모델보다 제4기 동안의 북미대륙빙상의 거동을 잘 설명함

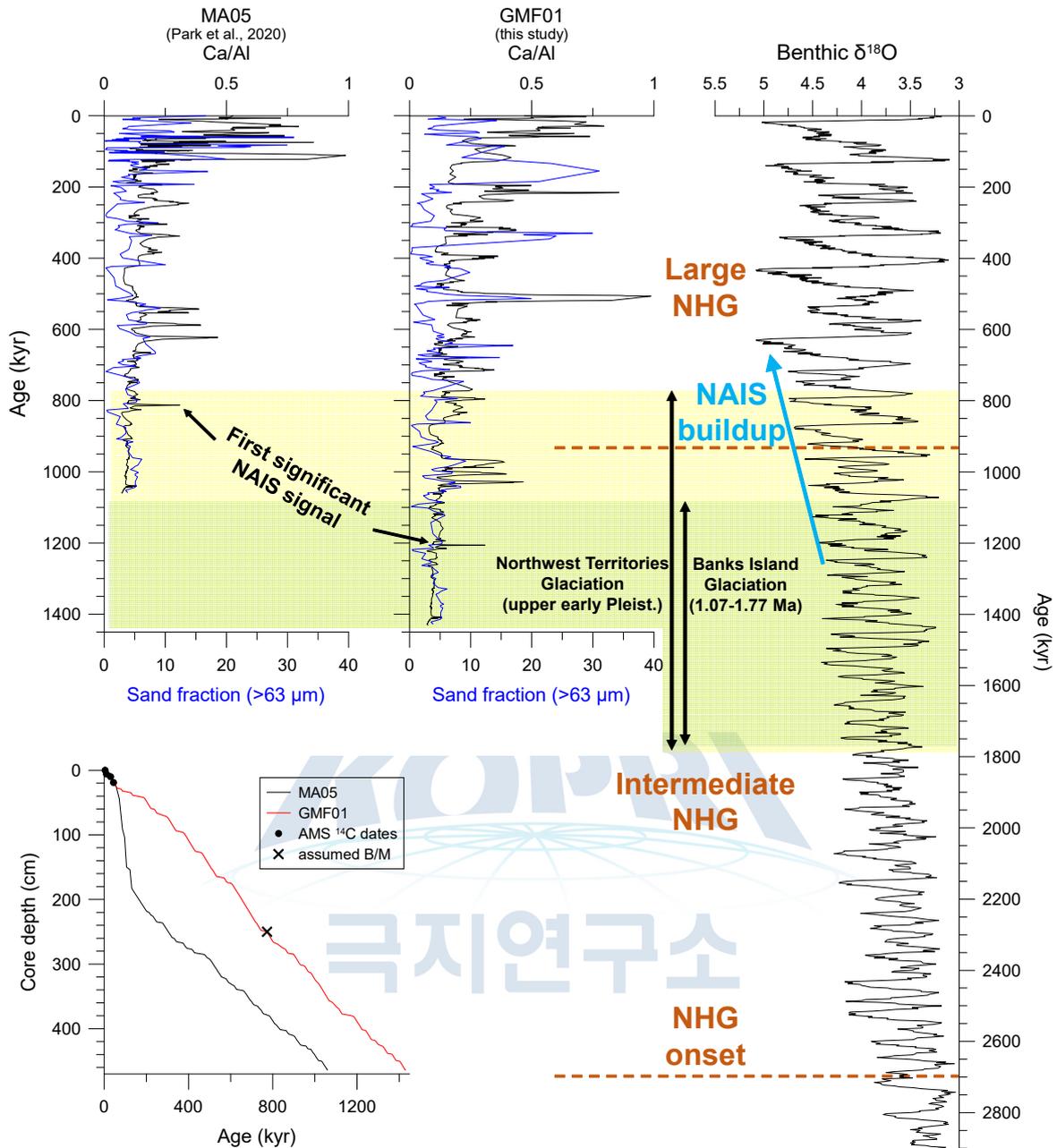


그림 29. 이전 연구에서 제시된 연대 모델과 ARA03B-41GC02의 코어 깊이 2.5m의 inclination 역전을 Brunhes-Matuyama chron의 경계로 설정한 연대모델로부터 도출된 북미대륙빙상 프록시(Ca/Al)와 빙하쇄설퇴적물 프록시(sand fraction)의 시간에 따른 변화

나. 서북극해 척치 분지 코어퇴적물(ARA06C/04-JPC)의 지자기분석자료 해석과 플라이스토세 새 층서 재정립

○ 연구 배경

- 북극해 빙하역사를 복원하기 위하여, 북극해 퇴적물 기록간에 대비가 가능한 통합적인 연대모델 구축이 필요함
- 동시베리아 기원으로 알려진 망간산화물이 풍부한 갈색 암층서와 캐나다 북극기원의 분홍색의 돌로마이트 빙운쇄설층을 이용한 암층서-기반 연대모델이 개발되고 있음
- 지역적으로 매우 낮은 퇴적율을 보이는 지역에서는 두 개 이상의 갈색층 사이에 결층(hiatus)으로 인해 하나의 갈색층으로 중첩될 수 있으며, 방사성 탄소동위원소 연대분석

- 범위를 넘어선, 장주기적인 암층서 구분은 현재까지도 지역적으로 대비하기에 어려움
- 본 연구는 기존의 암층서를 포함한 고지자기 분석을 통해 장주기적인 연대모델을 구축하고, 최종적으로 고지자기-기반의 연대모델과 연계하여 타지역의 퇴적기록과 비교가 가능한 암층서를 제시하는데 목적을 둠

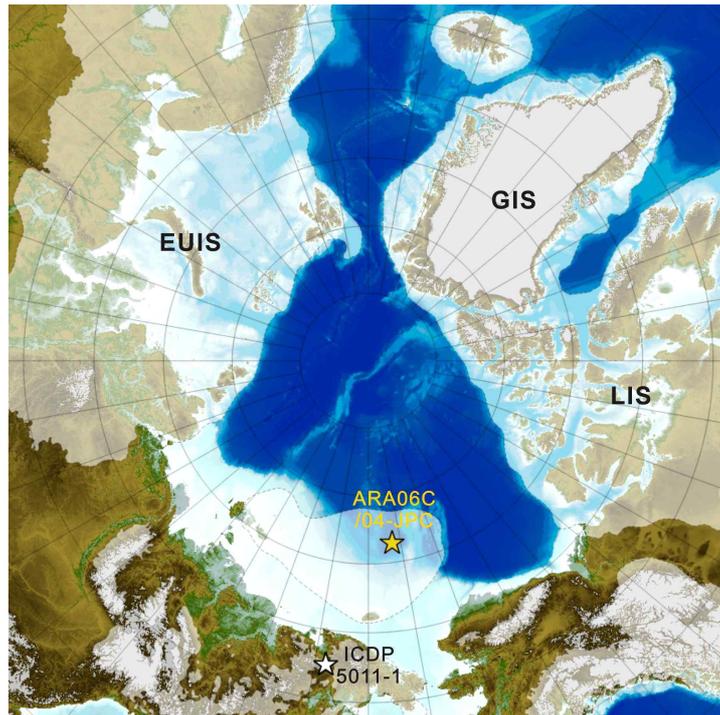


그림 30. 제4기(Quaternary) 최대 빙하규모 및 연구대상 코어 정점(빙하규모 출처: Batchelor et al., 2019)

## 극지연구소

### ○ 연구 내용 및 결과

- 온난기를 지시하는 암층서를 정의하게 위하여 다음과 같은 기준을 설정: 1) 낮은 밀도, 2) 비교적 높은 대자율(MS), 3) 생교란 구조, 4) 비교적 높은 Mn/Fe. 이러한 기준에 따라, ARA06C/04-JPC 퇴적물 코어는 최대 21개의 갈색층이 구분됨
- 캐나다 북극 기원의 돌로마이트 층은 최대 13구간으로 확인되며, 수차례에 걸친 로렌타이드 빙하작용을 지시함. 또한, 가장 두드러진 돌로마이트 층서는 총 3개의 구간으로 정의: 1) B6 하부, 2) B17 하부, 3) B21? 상부
- 빙하기/아빙기 층서를 반영하는 회색층은 갈색층과 교호하며 전반적으로 온난기를 반영하는 갈색층보다 두껍게 퇴적됨. 855-1245 cm 구간에서 회색층이 매우 두껍게 퇴적되며, 저탁류와 암설류 퇴적체가 주를 이룸. 특징적으로, 이 층서 하부에서는 Mn/Fe이 낮고 갈색을 띠진 않지만 생교란된 층서가 두 차례로 관찰됨

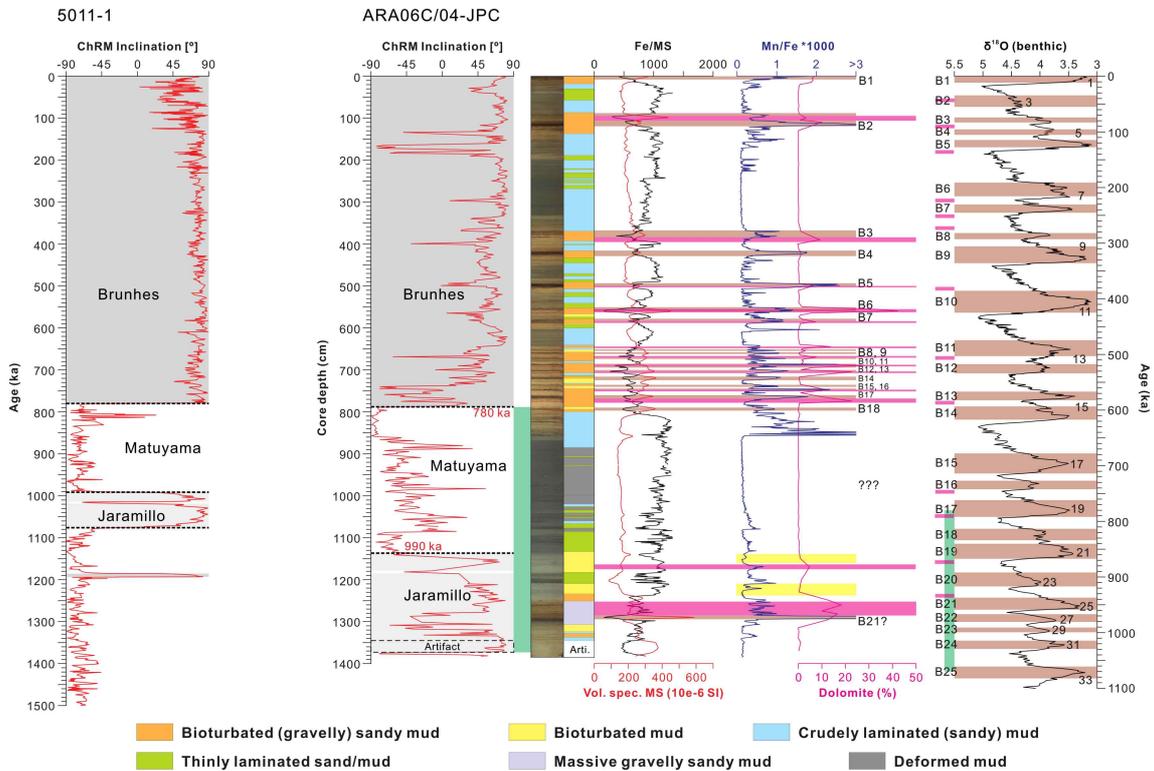


그림 31. ARA06C/04-JPC 코어에 대한 다중 프록시 결과 및 고지자기 변화를 이용한 El'gygytgyn 호수의 시추코어기록(ICDP 5011-1) 대비결과(Nowaczyk et al., 2013)

- 고지자기 분석을 통한 ChRM inclination은 지구 자기장의 방향의 변화를 반영. 04JPC 코어 상층부(0-780 cm)은 오늘날과 동일한 지자기 방향(+90도)을 보이며, 그 하부에서는 -90도로 지자기가 역전을 보임
- 따라서, 지자기 역전을 경계로 04JPC 코어는 지자기 연대 Brunhes와 Matuyama chron으로 구분. Brunhes Chron 내에서 지자기의 진폭변화는 excursion으로 해석이 가능하지만, 기존 연구결과에 따라 Fe/MS와 MS 값의 결과를 통해 온난기 갈색층에서의 negative 지자기는 속성작용에 의한 변형일 수 있으므로 정밀한 excursion 해석을 주의가 필요
- 두꺼운 회색층 내에서는 Fe/MS가 비교적 일정하게 유지되기 때문에, 회색층 내에서의 진폭변화는 속성작용의 의한 변형이 아닌 퇴적당시의 지자기를 반영하므로 excursion이나 sub chron을 해석하는데 적용 가능할 것으로 보임

○ 토의 및 결론

- El'gygytgyn 호수 퇴적층(ICDP 5011-1)의 고지자기 기록과 비교한 결과, 04JPC의 상부 780 cm 구간은 Brunhes chron으로 해석
- Matuyama의 sub-chron 중 하나인 Jaramillo는 04JPC 코어의 1140-1384 cm 구간으로 대비가능. 그러나, 최하부 약 4-5 cm 구간은 피스톤 코어시추 과정에서 퇴적물이 늘어지면서 형성된 구간임으로 지자기 기록을 해석하는데 고려해야 함.
- 고지자기 기록 대비에 따라서, 갈색 퇴적층과 회색층이 빈번하게 교차하는 0-780 cm 구간은 Brunhes chron으로 해석되며, 그 하부는 Matuyama chron내에 MPT(Middle Pleistocene Transition) 구간으로 볼 수 있음

다. 서북극해 멘델레예프 해령(PS72/410-3) 시추코어 활용 빙하활동기록 복원

○ 연구 배경

- 서북극해 멘델레예프 해령 박스코어 퇴적물(PS72/410-1)에서 자생성 네오디뮴 동위원소비를 분석하여 과거 76,000년 동안 3차례의 담수 유출 이벤트가 발생하였음을 복원한 바 있음(Jang et al., 2013)
- 해당 담수 유출 이벤트는 51,000년-46,000년 전 유라시아 빙상의 후퇴로 인해 최초 발생하였으며, 이후 39,000년-35,000년 전, 그리고 21,000-13,000년 전에 북미 로렌타이드 빙상의 후퇴로 발생하였음이 동일 연구를 통해 밝혀짐
- 각기 서로 다른 기원지로부터 유출된 담수 이벤트는, 과거 유라시아 빙상과 북미 로렌타이드 빙상 간 시소(seesaw)형 발달 시나리오에 대한 장기적인 검토를 요구함
- 이러한 가설을 검증하고자 동일 지역에서 채취한 중력코어 퇴적물에서 중장기적인 원소 농도 변화 양상을 검토하고자함

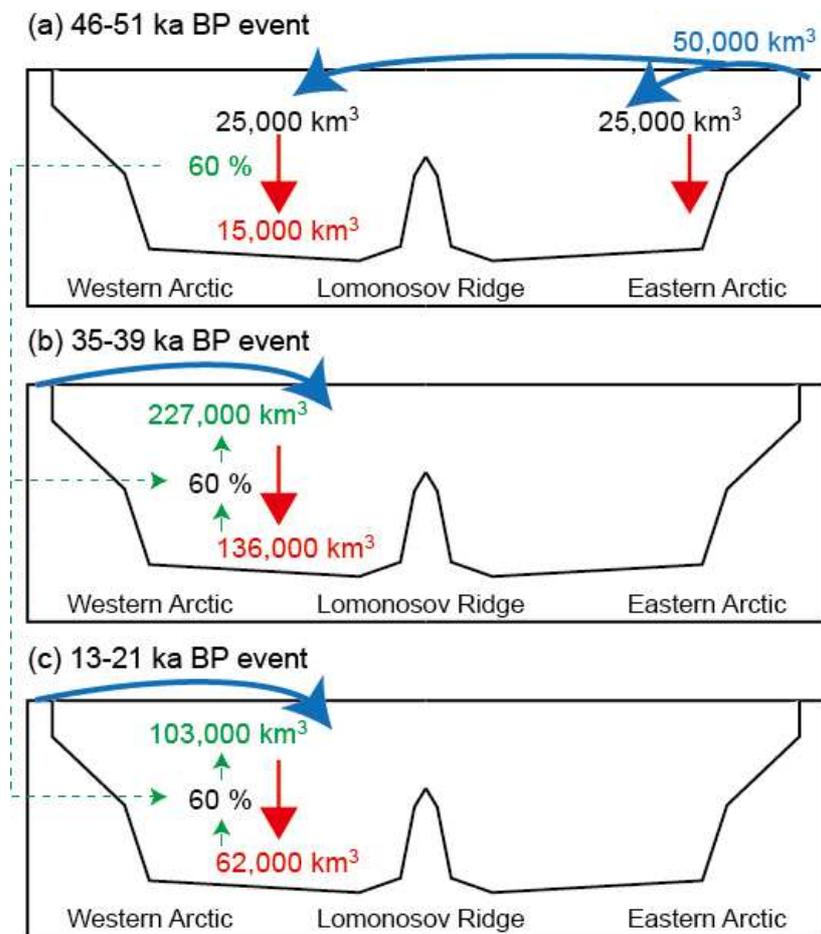


그림 32. 과거 76,000년 동안 발생한 세차례의 담수유출 이벤트 복원 기록 (출처 : Jang et al., 2013)

○ 연구 내용 및 토의

- 고지자기-기반 연대 모델을 적용, Brunhes-Matuyama boundary, Jaramillo, Olduvai 등의 주요 이벤트 연대가 적용된 PS72/410-3 코어의 하부 연대는 3백만 년 이상으로 추정됨
- 본 연구에서는, 코어 약 780cm 중 거대 빙상이 크게 발달했던 플라이스토세

(Pleistocene) 시기를 반영하는 상부 400cm 기록에 집중함

- 상부 400cm의 퇴적물에 대하여 약 5cm 간격의 샘플링이 진행되었고, 후기 플라이스토세(약 80만년)에 해당하는 상부 100cm에 대해서는 약 1cm 간격으로 추가 샘플링이 이루어짐. 확보한 시료에 대해서는 ICP-AES/MS를 활용한 원소 분석이 실시됨

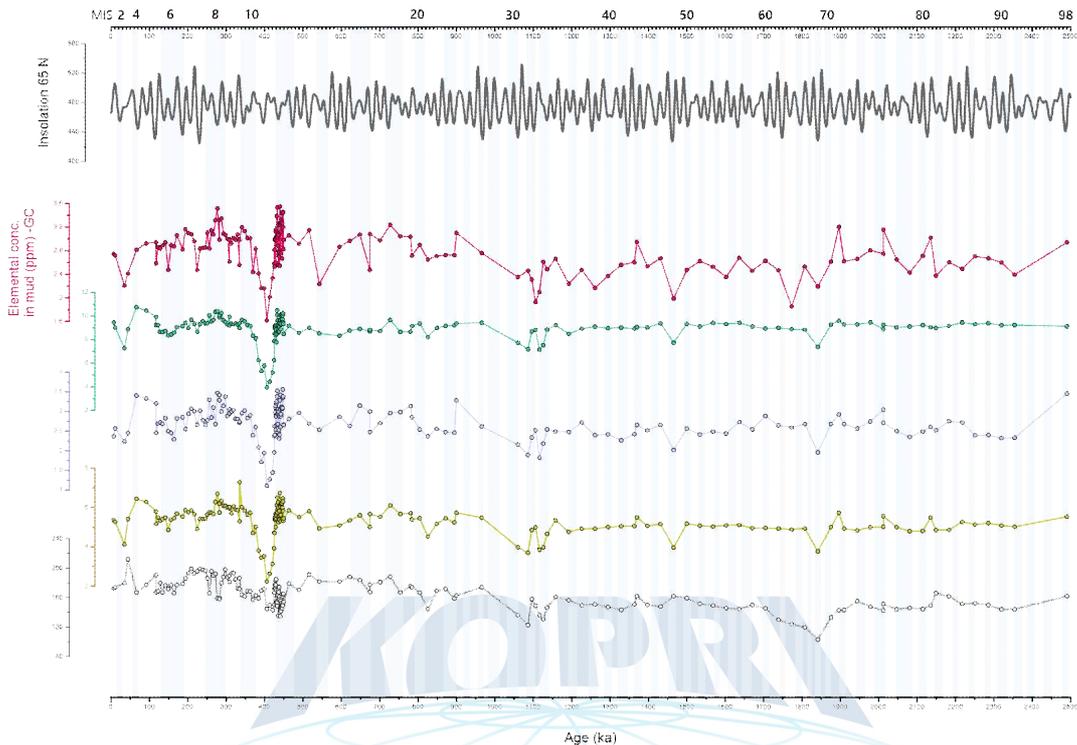


그림 33. PS72/410-3코어에서 분석된 원소분석 결과(붉은색 - K, 녹색 - Al, 연보라 - Be, 노란색 - Fe, 회색 - Sr). 상단의 숫자는 marine isotope stages (MIS)를 의미

- K, Al, Be, Fe, Sr으로 대표되는 원소 농도의 변동성은 일반적으로 그 변화양상이 함께 동반되는데, 북극해 주변 지대에서 분석된 원소 데이터를 감안하였을 때(Vyssotski et al., 2006), 이들의 증가는 유라시아 대륙으로부터의 퇴적물 유입, 감소는 북미 대륙으로부터의 퇴적물 유입의 증가로 해석될 수 있음
- 전반적으로, 플라이스토세 전 기간에 걸쳐 간헐적인 K, Al, Be, Fe, Sr 농도 감소가 관찰되었는데, 이는 북미 대륙에 로렌타이드 빙상이 꾸준히 발달하며 퇴적물 유입의 source로서 기여하였음을 의미함
- 마찬가지로, 전반적인 원소 농도가 관찰되는 MIS 4 시기의 경우, 기존 네오디뮴 활용 연구로부터 유라시아 빙상의 붕괴로 인한 수괴 유입이 있었음이 밝혀졌음을 고려하였을 때(Jang et al., 2013), 이후 유사하게 관찰되는 농도 증가는 유라시아 빙상의 영향력을 의미함. 다만, 플라이스토세 전기 동안 원소 농도의 증가는 후기에 비해 크지 않은데, 이는 상대적으로 추운 플라이스토세 후기 동안 유라시아 빙상이 더욱 크게 발달하였거나, 해당 기간 동안 상대적으로 낮은 퇴적율 및 샘플링 해상도로 인한 인위적인 결과(artifact)일 수 있음
- 원소 농도의 증감을 통해 추적된 플라이스토세 북미 로렌타이드 및 유라시아 빙상의 발달 양상은 간헐적인 농도 피크 등을 고려하였을 때 시소(seesaw)형 발달 시나리오를 어느 정도 지지하지만, 이들 간에 장기적인 주기성이 있음을 단정하기는 어려움. 다만, 시추

코어의 위치가 서북극해에 치우쳐 있고, 해당 지역에 발달한 Beaufort Gyre로 인해 유라시아 빙상으로부터의 퇴적물 유입이 상대적으로 제한됨을 고려하였을 때, 유라시아 빙상의 발달 기록이 과소평가되었을 가능성이 다분함. 유사한 연대를 커버하는 동북극해 시추코어 등을 활용하는 비교연구를 진행하거나, 수괴 성분 변화와 같은 연구를 병행하는 방식을 통해 보다 정교한 가설 검증이 요구됨



## 제 4 장 연구개발 목표 달성도 및 대외기여도

### 1. 북극해 및 로모노소프 남부해령 주변 해빙분포변화 자료 수집 및 분석을 통한 시추추진 계획 수립 100% 달성

가. 1999년, 2005-2020년간 9월 중순 북극해 위성관측 자료를 이용한 해빙 최소면적자료 비교

- 지난 15년간 관측된 9월 중순 해빙은 대부분 사라진 상태로 파악됨
- 이에 따라 2021년도 북극해 및 로모노소프 남부해령 국제공동심부시추/아래온 탐사를 추진하기에 큰 어려움이나 위험도는 낮을 것으로 판단됨
- 2021년도 1월 중순, 결빙 면적이 역대 최소로 감소하였으나 이후 2020년과 동일한 양상으로 다소 증가된 결빙지역 확인함.
- 2021년도 3월 이후 해빙면적 감소함에 따라서, 보다 정확한 감소경향을 예측할 수 있을 것으로 판단됨

### 2. 로모노소프 남부해령 시추관련 자료수집 연구 100% 달성

가. 기존 Parasound (3.5 kHz) 탐사자료기반 로모노소프 해령 시추정점 선정

- 현재 LR-06B 정점에서 950m, LR-06C 정점에서 50m 시추예정
- 공동국제심부시추기간 동안 IODP 시추자료 해석을 위한 필수자료로써 아래온의 점보피스톤 코어시추 시스템을 이용 및 5정점 시추예정: ARA-1(LR-06C), ARA-2(LR-06A), ARA-3(LR06B), ARA-4(LR-05A), ARA-5

### 3. 북극해 시추 코어에 보존된 밀란코비치 주기기록 복원 연구 100% 달성

가. 서북극해 마카로프 분지 코어퇴적물(ARA03B 41GC)의 고지자기분석자료 해석 및 플라이스토세 층서 재정립

- 연대정보가 부족한 장주기적인 플라이스토세 연대 모델을 보정하기 위해 고지자기 분석수행 및 독립적인 연대 포인트 획득
  - 41GC 코어 2.5 m 깊이에서 확인된 지자기 역전을 Brunhes-Matuyama chron으로 설정한 결과 기존 육상 호수퇴적물(ICDP Site 5011-1, Melles et al., 2012) 기록과 유사한 결과 확인
  - 고지자기-기반 새 연대모델은 기존 제시된 연대모델보다 제4기 북미대륙빙상의 거동을 잘 설명함

나. 서북극해 척치 분지 코어퇴적물(ARA06C/04-JPC)의 고지자기분석자료 해석 및 플라이스토세 층서 재정립

- 북극해 퇴적물 시추코어 간에 대비 가능한 통합적인 연대모델 구축을 위해 고지자기 분석 및 다중 암층서 분석 수행
  - 04-JPC 코어 7.8 m 깊이에서 지자기 역전은 Brunhes-Matuyama chron으로 해석, 육상 호수퇴적물 고지자기 분석결과와 대비하여 11.4-13.8m에 positive inclination 구간은 Jaramilo sub-chron 해석
  - 갈색층/회색층이 교차하는 상부 7.8 m는 Brunhes chron으로 빙하기-간빙기 순환에 따른 퇴적양상 확인, 주로 회색의 저탁류 퇴적체로 구성된 하부층은 Matuyama chron 내에 MPT(Middle Pleistocene Transition) 구간으로 해석

다. 서북극해 멘델레예프 해령(PS72/410-3) 시추코어 활용 빙하활동기록 복원

- CP-AES/MS 원소분석을 멘델레예프 해령 중력코어(PS72/410-3)를 이용하여 수행
  - 고지자기-기반 연대모델 적용, Olduvai sub-chron을 포함한 약 300만년 이상의 퇴적기록을 포함하는 것으로 추정
  - K, Al, Be, Fe, Sr으로 대표되는 원소 농도의 변동성은 유라시아 대륙(증가)와 북미 대륙(감소)의 퇴적물 유입 경향도로 해석될 수 있음
  - 원소 농도의 증감을 통해 플라이스토세 북미 로렌타이드 및 유라시아 빙상의 시소형 발달 시나리오를 고려할 수 있으나, 동북극해 퇴적물 시추코어와 비교, 수괴 성분 분석연구 등을 병행함으로써 정교한 가설 검증이 요구됨



## 제 5 장 연구개발결과의 활용계획

### 제 1절. 기대성과

#### 1. 기술적 측면

- 로모노소프 해령에서 추진되는 국제공동해저시추프로그램에 아시아 국가에서 최초로 아라온이 대표하여 참여하는 경우 거대지구과학 프로그램에서 추진하는 탐사 및 심부시추 노하우 습득이 가능하여 아라온 뿐만 아니라 향후 건조예정인 차세대 쇄빙선을 활용한 다른 주요 이슈해역에서 유사한 프로그램을 수행할 수 있는 역량을 확보하여 결빙해역에서 고품질 탐사자료를 획득하는 기술발전이 가능한 동시에 롱코어 퇴적물 시추기술 확보를 통해 우리나라 쇄빙선을 활용한 북극해 탐사영역 확대에 기여할 것임

#### 2. 경제·산업적 측면

- 로모노소프 해령에서 추진되는 아라온이 참여하는 국제공동시추프로그램을 통하여 미래 북동항로의 탐사자료 확보 및 영역확대
- 국제심부시추동안 시추선 보호를 위한 최소 2척의 쇄빙선 필요에 따라서 향후 아라온 재투입시 시추참여 노하우를 통한 경제적 효과 창출
- 북극해 거대지구과학 프로그램에 참여 및 주요 과학적 이슈 해결을 통해 차세대 쇄빙선 건조 필요성 극대화 및 당위성 확보

#### 3 과학적 측면

- 공동심부해저시추프로그램이 수행되어 JPC 시추코어 시스템이 장착된 아라온이 주도적으로 상부 20~30m 퇴적층을 시추할 경우 북극해가 현재보다 온난했던 플라이오세와 거대한 빙하활동이 우세했던 플라이스토세 동안의 수백만년의 빙하생성과 해빙분포 등 북극해에서 고기후·고해양환경변화복원에 대한 수월성 높은 연구를 선도적으로 주도
- 고지자기-기반 새로운 연대모델과 빙하기-간빙기 주기 동안 형성된 암층서 발달양상은 플라이스토세-플라이오세 동안 밀란코비치 주기변화에 반응하는 북극해 기후환경변화 기록의 정확한 해석 가능한 핵심자료로 활용

### 제 2절. 연구개발결과의 활용방안

- IODP에서 추진하고 있는 거대지구과학프로그램에 선도적 참여를 통해 북극해 생성·진화에 의한 빙하역사 복원연구 등 빅사이언스 연구에 활용
- 동시베리아 대륙붕해역에서 로모노소프 해령을 관통하는 항해 동안 수집되는 기상 및 해빙관측자료 등은 향후 북동항로 개척에 기초자료로 활용
- 거대지구과학프로그램에서 획득한 탐사기술은 향후 아라온 또는 차세대 쇄빙선을 투입하여 북동항로뿐만 아니라 북서항로 루트 개척에 활용함으로써 지구온난화에 의한 북극 실�크로드 경제비즈니스 창출을 위한 동력으로 활용

# 제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

## 제 1절. 국외 북극해 탐사계획 자료 수집

### 1. 2026/27년 폴라스턴 북극해 국제공동탐사계획 자료 수집

가. 독일 AWI 극지해양연구소는 폴라스턴과 타국의 제2의 쇄빙선과 공동으로 로모소프해령의 중앙 북극해와 알파해령 탐사에 대한 계획(LAMEX 1+2)인 “Evolution of Arctic ridge systems and their impact on paleoceanography and natural climate variability” 을 수립 중

- 2026/27 폴라스턴 탐사에 아라온 참여를 수석연구원인 Dr. K. Gebhardt와 Dr. J. Mueller로부터 요청받음
- 탐사 목적은 아래와 같음
  - 해류 발달과 관련 기후 및 환경 변화에 대한 해령 시스템의 역할 규명
  - 과거 온난화 기후 동안 중앙 북극해 환경 조건 규명 (예: Miocene 및 Pliocene 기후 최적기)
  - 고 해수면 변화와 관련하여 1) 북극해 해빙과 2) 유라시아 빙상의 발생 및 변동성 규명
  - 신생대 기후 전이 (온실에서 아이스 하우스로)를 제어 한 얼음-바다-대기 상호작용 규명
  - 북극해와 남극해 빙권 발달 사이의 원격상호연결(teleconnection) 규명

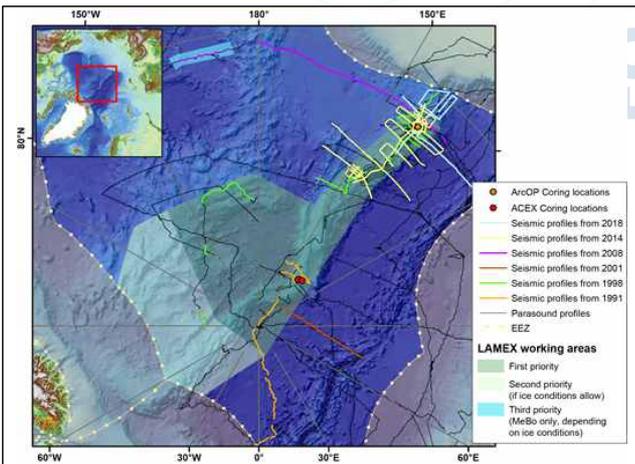


그림 34. 2025/26/27년 폴라스턴 탐사를 추진 중인 로모노소프 해령과 알파해령 해역프로그램(LAMEX 1, Geophysics와 LAMEX 2, Marine Geology)과 그동안 획득한 탐사라인 및 IODP 시추 두 정점(ACEX, 2004; ArcOP, 2022?) (출처, C. Gebhardt e-mail on 14<sup>th</sup> Dec. 2020)

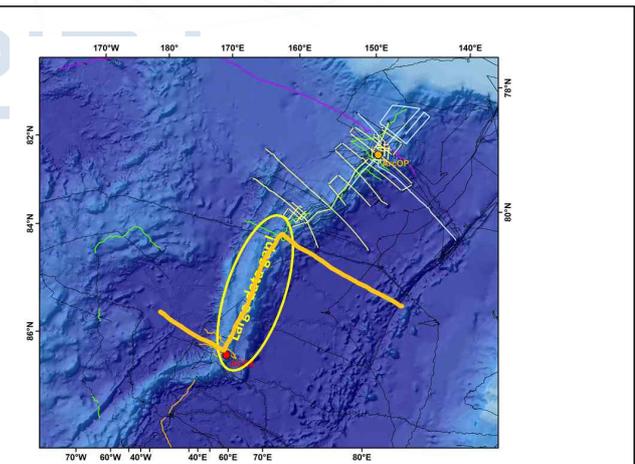


그림 35. 2025/26/27년 폴라스턴 탐사를 추진 중인 로모노소프 해령과 알파해령 해역 프로그램(LAMEX 1, Geophysics)과 그동안 획득한 탐사라인 및 IODP 시추 두 정점(ACEX, 2004; ArcOP, 2022?) (출처, C. Gebhardt e-mail on 14<sup>th</sup> Dec. 2020)

- 특히 해양지질 프로그램에서는 독일 브레멘대학교 MARUM이 보유한 자동해저시추기 (MeBo)를 투입하여 약 100m 길이의 마이오세, 플라이오세 및 플라이스토세의 온난기 기록이 보존되어 있는 퇴적층의 시추가 주요 탐사 목적임

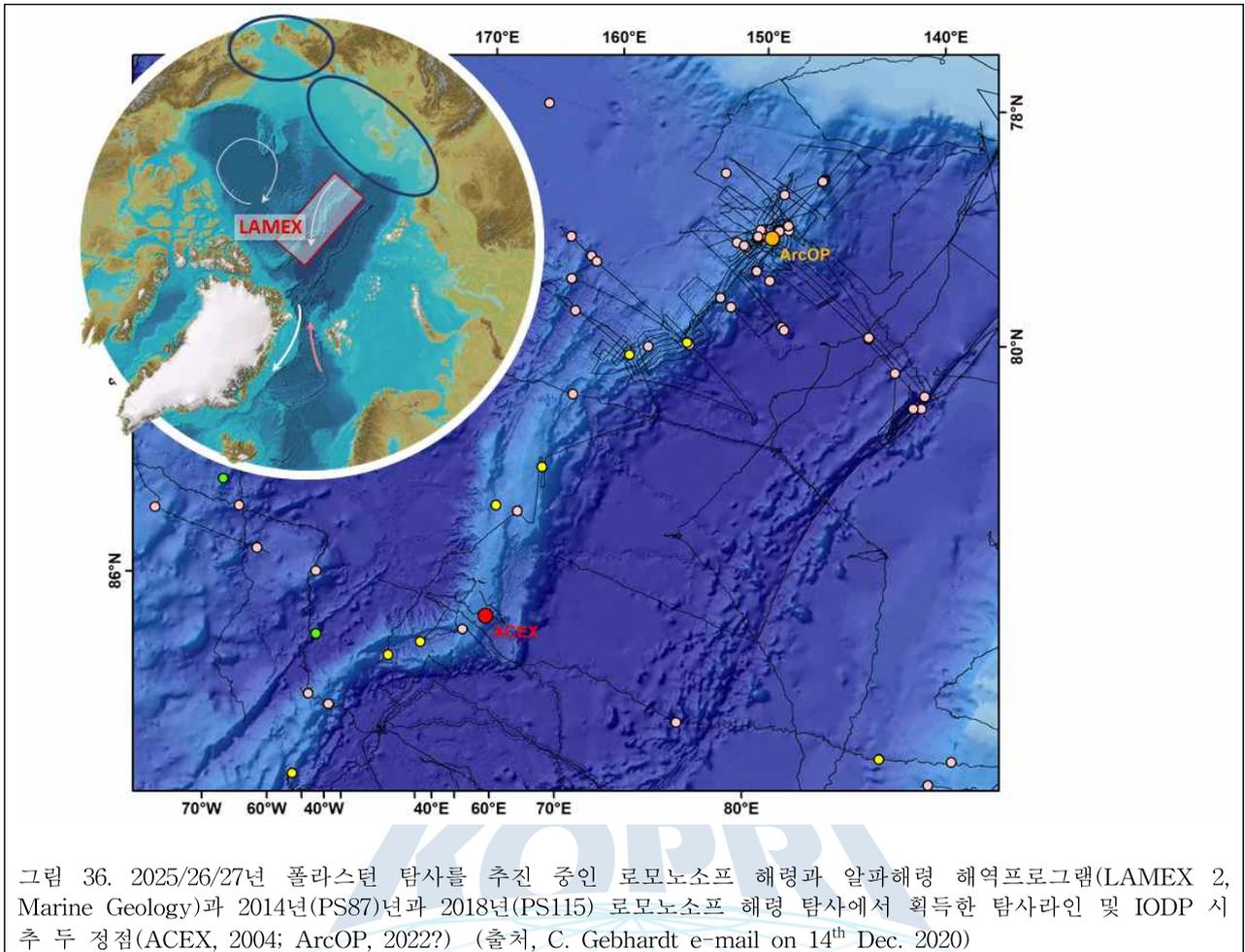


그림 36. 2025/26/27년 플라스턴 탐사를 추진 중인 로모노소프 해령과 알파해령 해역프로그램(LAMEX 2, Marine Geology)과 2014년(PS87)년과 2018년(PS115) 로모노소프 해령 탐사에서 획득한 탐사라인 및 IODP 시추 두 정점(ACEX, 2004; ArcOP, 2022?) (출처, C. Gebhardt e-mail on 14<sup>th</sup> Dec. 2020)

극지연구소

## 2. IODP Expedition 377: Tracking Arctic climate change from a Greenhouse to an Ice house

### Expedition 377 Co-chief Scientists

#### Prof. Ruediger Stein

Ruediger (Rudy) Stein is senior scientist at the MARUM – Center for Marine Environmental Sciences and has a professorship "Paleoceanography of the Arctic Ocean" at the University of Bremen. His scientific expertise is sedimentology, organic geochemistry, and paleoceanography. The major focus of his research is related to the long- and short-term climate evolution of the Arctic Ocean during Cenozoic times with special emphasis on the history of Arctic sea-ice cover, Siberian river discharge and circum-Arctic ice sheets. Stein has participated in 24 major research cruises in the Arctic, Atlantic, and Pacific Oceans (including seven DSDP/ODP/IODP expeditions). He was member of the IODP Expedition 302 (ACEX) Science Party, the first scientific drilling in the Arctic Ocean in 2004, and Co-chief Scientist of IODP Expedition 306 devoted to North Atlantic paleoceanography studies. In 2014 and 2018, he led the Polarstern Arctic expeditions PS87 and PS115/2, respectively, and collected the basic site survey data for selecting and optimizing the drill locations of IODP Expedition 377 (ArcOP).



#### Prof. Kristen St. John

Kristen St. John is a Professor of Geology at James Madison University. Her research focuses on reconstructing Cenozoic glacial and sea-ice histories based on ice-rafted sands recovered from the Arctic, North Atlantic, and North Pacific Oceans. St. John has participated in several research expeditions with the IODP program, including serving as a sedimentologist for IODP Expedition 302, the Arctic Coring Expedition (ACEX). Her expedition-related research demonstrated that Northern Hemisphere ice-rafting began at least 30 million years earlier than previously understood, which supports the hypothesis of a more bipolar Greenhouse to Icehouse transition in the Cenozoic. St. John is also a leader in undergraduate geoscience education research and helped develop the IODP School of Rock program for educators.



#### Expedition Operator

Mission-specific platform expeditions are conducted for IODP by the European Consortium for Ocean Research Drilling (ECORD), which represents the ocean-drilling community of 15 European countries, including Canada. Operations are undertaken by the ECORD Science Operator comprising the British Geological Survey (BGS), the University of Bremen and the European Petrophysics Consortium, made up of the universities of Leicester (UK) and Montpellier (France).



During the expedition regular updates will be posted on the webpage through blogs and via social media:  
[www.ecord.org/expedition377](http://www.ecord.org/expedition377)

#### International Ocean Discovery Program

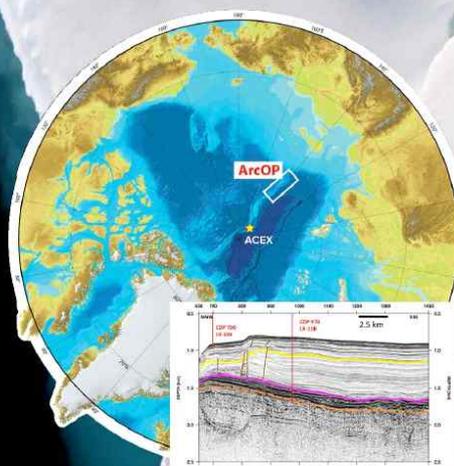
The International Ocean Discovery Program (IODP) is an international marine research programme supported by 23 countries, which explores Earth's history and structure recorded in seafloor sediments and rocks, monitors sub-seafloor environments and research the deep biosphere and microbial life. Through multiple platforms - a feature unique to IODP - scientists can sample and analyse the deep data across a wide range of disciplines and themes, including climate change, processes and effects, the deep biosphere and solid earth cycles and dynamics.

**Credits:** front cover: ice on Arctic Ocean (credits: Patrick Kelley, U.S. Coast Guard), seismic profile of Arctic sediments, Lomonossov ridge, with location of the drillsites of the ArcOP expedition, map (by IBCAO) with ArcOp working area (ECORD/IODP). Inside: map and logo (ECORD/IODP).



**IODP**  
INTERNATIONAL OCEAN  
DISCOVERY PROGRAM

## The Arctic Ocean Paleoceanography ArcOP Expedition



### IODP Expedition 377

Tracking Arctic climate change  
**from a Greenhouse** 🌴  
**to an Icehouse** ❄️



EUROPEAN CONSORTIUM FOR  
OCEAN RESEARCH DRILLING

[www.ecord.org](http://www.ecord.org)

[www.iodp.org](http://www.iodp.org)

# ArcOP

## Arctic Ocean | a key player in global climate change and the Earth system

During the last few decades, the importance of the remote Arctic Ocean in global climate and the Earth system has become clear. Key records are now needed to provide scientists the next puzzle pieces to reconstruct climate history.

Due to complex feedback processes (collectively known as "Arctic amplification"), the Arctic is both a contributor of climate change and a region that is most affected by global warming. Although the Arctic Ocean was and is a key player in the past, present and future global climate/earth system, the marine geoscience and paleoclimate research in the Arctic lags behind other world oceans. In this context, especially long and detailed records of the earlier Earth history characterized by a much warmer global ("Greenhouse") climate with elevated atmospheric CO<sub>2</sub> concentrations, are of overall importance. However, with the successful completion of the Arctic Coring Expedition - ACEX (IODP Expedition 302) in 2004, a new era in Arctic research began.

While the ACEX results were unprecedented, key questions related to the Cenozoic Arctic climate history remain unanswered, largely due to a major mid-Cenozoic hiatus (or condensed interval) and partly to the poor recovery of the ACEX record. Following-up ACEX and its cutting-edge science, the **ArcOP** drilling campaign aims to recover a continuous and complete stratigraphic record of the Cenozoic climate history of the central Arctic Ocean.

## Operations

Expedition 377 is planned and conducted by the European Consortium for Ocean Research Drilling (ECORD) as part of the International Ocean Discovery Program (IODP).

The offshore coring phase will involve coring at two primary sites using a drillship, supported by icebreaker(s). Scientists from around the world will participate in the expedition Science Party.

Due to the facilities available offshore, only a minimum number of measurements will be made on the vessel.

## IODP Expedition 377 main themes

- Complete and detailed characterization of the Cenozoic climate **transition from Greenhouse to Icehouse** in the Arctic and its relationship to the Antarctic and global climate records.
- Special focus on **warm climate extremes**: Paleocene-Eocene Thermal Maximum, Early Eocene Climate Optimum, Middle Miocene Climate Optimum, Early Pliocene Warm Period.
- **History of Arctic Bottom and Surface-Water** characteristics with special focus on the exchange of water masses between the Arctic Ocean and the Atlantic and Pacific oceans.
- **History of Eurasian ice sheets and Arctic sea ice cover** onset and variability.
- **History of Siberian River Discharge** and its influence on sea-ice formation, water mass circulation and climate change.
- **Correlation of the marine ArcOP records with terrestrial records** from the ICDP Siberian Lake El'gygytgyn drilling.



Soon after the offshore phase the team will meet for an "Onshore Science Party" (held at the IODP Bremen Core Repository and MARUM laboratories in Germany) for opening, describing and sampling of the sediment cores. After a period of one year (following completion of the onshore phase), the cores may be used by any scientific researcher who wishes to study them. In addition, all "shipboard data" acquired during the offshore and onshore phases will be available as legacy datasets for any researcher to use.

그림 37. 북극해 로모노소프 해령 국제공동해저시추가 결정된 이후 배포된 홍보 포스터

### 3. 북극해 로모노소프 해령 RV Araon 공동 참여의 중요성을 IODP에게 전달된 문서



Alfred Wegener Institute, PO Box 12 01 61, 27515 Bremerhaven, Germany

To

Gilbert Camoin (EMA Director)  
Dave McInroy (ESO Science Manager)  
Gabi Uenzelmann-Neben (EFB Chair)

**Prof. Dr. Ruediger Stein**  
Marine Geology Department

Am Alten Hafen 26  
27568 Bremerhaven

Phone +49 471 4831 1576  
Cell phone +49 175 4326403  
Email: [Ruediger.Stein@awi.de](mailto:Ruediger.Stein@awi.de)

**Subj.: Expedition 377 (ArcOP) & Korean Icebreaker ARAON**  
(Notes about my visit and discussions at KORPRI, 23-27 August 2019)

29 August 2019  
(corr. 24 September 2019)

Dear all,

from August 22-27 I visited the Korean Polar Research Institute (KOPRI) to discuss the option getting the Korean Icebreaker ARAON involved into our IODP Expedition 377 (ArcOP). Here, I would like to give you some information about the outcome of this discussion, especially (1) to highlight the major advantage for the science of ArcOP as well as the advantage for ECORD/IODP and for KOPRI in general if the ARAON could become part of the ArcOP drilling campaign/program, and (2) to comment on the chance that this joint venture might become reality.

First of all, however, I would like to repeat the summary of my email/response of July 22 about the status of IODP Expedition 377 (ArcOP) from our side:

*We can reach all objectives outlined in the 708 proposal by drilling one deep site LR-11A plus a "1-day add" for drilling/coring the uppermost 40-50 m at a close-by location (LR-10A), i.e., during Expedition 377 and under reduced costs. That means, Expedition 377 (ArcOP) remains a "stand-alone expedition", and we can reach all our goals even without the ARAON. By this, Expedition 377 (ArcOP) can be carried out as approved by EFB/SEP.*

This option is still our "first-order option" for implementing IODP Expedition 377, as this option allows to start now with reviews by ESO & EFB, the concrete planning of the implementation of the expedition including estimates of the costs, etc., to be ready for sending recommendations to the ECORD Council in time, i.e., before the final decision "yes or no" for ArcOP has to be made.

My main discussion partner at KOPRI was first of all Dr. Seung-il Nam, the KOPRI lead scientist for Arctic Ocean Paleocyanography, chief scientist of

Alfred Wegener Institute  
Helmholtz Centre for  
Polar and Marine Research

**BREMERHAVEN**

Am Handelshafen 12  
27570 Bremerhaven  
Germany  
Phone +49 471 4831-0  
Fax +49 471 4831-1149  
[www.awi.de](http://www.awi.de)

Public law institution

Head Office:  
Am Handelshafen 12  
27570 Bremerhaven  
Germany  
Phone +49 471 4831-0  
Fax +49 471 4831-1149  
[www.awi.de](http://www.awi.de)

Board of Governors:  
MinDir Volker Rieke  
Board of Directors:  
Prof. Dr. Antje Boetius  
(Director)  
Dr. Karsten Wurr  
(Administrative Director)  
Dr. Uwe Nixdorf  
(Vice Director)  
Prof. Dr. Karen H. Wiltshire  
(Vice Director)

Bank account  
Commerzbank AG,  
Bremerhaven  
BIC/Swift COBADEFFXXX  
IBAN DE12292400240349192500  
Tax-Id-No. DE 114707273

**HELMHOLTZ**

## 제 7 장 참고문헌

- Jang, K., Han, Y., Huh, Y., Nam, S. I., Stein, R., Mackensen, A., & Matthiessen, J. (2013). Glacial freshwater discharge events recorded by authigenic neodymium isotopes in sediments from the Mendeleev Ridge, western Arctic Ocean. *Earth and Planetary Science Letters*, 369, 148-157.
- Lisiecki, L. E., & Raymo, M. E. (2005). A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic  $\delta^{18}\text{O}$  records. *Paleoceanography*, 20(1).
- Melles, M., Brigham-Grette, J., Minyuk, P. S., Nowaczyk, N. R., Wennrich, V., DeConto, R. M., ... & Wagner, B. (2012). 2.8 million years of Arctic climate change from Lake El'gygytgyn, NE Russia. *science*, 337(6092), 315-320.
- Nowaczyk, N. R., Haltia, E. M., Ulbricht, D., Wennrich, V., Sauerbrey, M. A., Rosén, P., ... & Lozhkin, A. V. (2013). Chronology of Lake El'gygytgyn sediments—a combined magnetostratigraphic, palaeoclimatic and orbital tuning study based on multi-parameter analyses. *Climate of the Past*, 9(6), 2413-2432.
- R. Stein, 2015. The Expedition PS87 of the research vessel Polarstern to the Arctic Ocean in 2014. Reports on Polar and Marine Research. Bremerhaven: Alfred Wegener Institute for Polar and Marine Research 688, 273 p. [https://epic.awi.de/37728/1/BzPM\\_0688\\_2015.pdf](https://epic.awi.de/37728/1/BzPM_0688_2015.pdf).
- R. Stein, 2019a. The Expedition PS115/2 of the research vessel Polarstern to the Arctic Ocean in 2018. Reports on Polar and Marine Research. Bremerhaven: Alfred Wegener Institute for Polar and Marine Research 728, 249 p. [https://doi.org/10.2312/BzPM\\_0728\\_2019](https://doi.org/10.2312/BzPM_0728_2019), <https://epic.awi.de/id/eprint/49226/>
- R. Stein, 2019b. The Late Mesozoic-Cenozoic Arctic Ocean Climate and Sea Ice History: A challenge for past and future scientific Ocean Drilling. *Paleoceanography and Paleoclimatology*, 34, 1851-1894.

극지연구소

## 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.