

남극권 고해양/고기후 복원을 통한 지구환경
변화 규명 기획 연구

Planning study for Antarctic paleoceanography/
paleoclimate reconstruction



2016. 05

한국해양과학기술원
부설 극지연구소

제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “남극권 고해양/고기후 복원을 통한 지구환경변화 규명 기획연구 (PE16130)”과제의 최종보고서로 제출합니다.



2016. 5. 31

연구책임자 : 윤호일

참여연구원 : 이재일

“ : 유규철

“ : 김기태

“ : 이민경

“ : 이춘기

“ : 김성한

보고서 초록

과제관리번호	PE16130	해당단계 연구기간	2016.2.15-5.31	단계 구분	1단계/1단계
연구사업명	중 사업명	극지연구소 정책사업			
	세부사업명	연구정책·지원 사업			
연구과제명	중 과제명				
	세부(단위)과제명	남극권 고해양/고기후 복원을 통한 지구환경 변화 규명 기획 연구			
연구책임자	윤호일	해당단계 참여 연구 원수	총: 7 명 내부: 6 명 외부: 1 명	해당단계 연구비	정부: 5000 천원 기업: 천원 계: 5000 천원
연구기관명 및 소속부서명	극지연구소 극지기후변화연구부		참여기업명		
국제공동연구	상대국명 :		상대국연구기관명 :		
위탁연구	연구기관명 :		연구책임자 :		
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)				보고서 면수	40
<ul style="list-style-type: none"> ○ 목적: 남극권 고해양/고기후 복원을 통한 지구 환경 변화 규명 연구 계획 수립 ○ 필요성: 남극 지역은 기후 변화 감지의 최적지이자 기후 변화의 주요 원인이 되는 지역임. 남극 고해양/고기후 연구의 방향성을 제시하고 구체적 계획 수립을 위해 기획 연구가 필요 ○ 연구 목표: 퇴적물 기록으로부터 서남극 지역의 과거 빙상-해양-기후 변화를 복원하고 그 상호작용을 이해 ○ 세부 연구 목표 및 연구내용 <ul style="list-style-type: none"> - 마지막 빙하기 이후의 남극 고해양/고기후 변화: 지난 해빙기와 홀로세의 퇴적 특성 및 고해양 변화, 고해상도 고기후 변동 - 플라이오-플라이스토세 남극권 고해양/고기후 변화 복원: 마지막 빙하기 빙권 변화 및 빙하 주기 연구, 중기 플라이스토세 전환기 연구 - 고기후 프록시/연대측정법 도입 및 기후지시자 원리 탐구: 다양한 연대측정법 도입, 생지화학적 지시자, 점토광물, 지진 기록 프록시 개발 ○ 연구지역: 서남극 빙상 주변부인 남극반도, 로스해, 벨링스하우젠 해 					
색인어 (각 5개 이상)	한 글	남극, 고해양, 고기후, 서남극 빙상, 해양퇴적물			
	영 어	Antarctic, Paleoceanography, Paleoclimate, West Antarctic Ice Sheet, marine sediment			

요 약 문

I. 제 목 (과제명): 남극권 고해양/고기후 복원을 통한 지구환경 변화 규명 기획 연구

II. 연구개발의 목적 및 필요성

1. 목적: 남극권 고해양/고기후 복원을 통한 지구 환경 변화 규명 연구 계획 수립

2. 필요성:

- 고기후 연구의 필요성: 자연적 지구환경 변화의 영향 및 동인을 이해
- 남극 지역의 중요성: 기후 변화 감지의 최적지이자 기후 변화의 주요 원인
- 남극 고해양/고기후 연구의 방향성을 제시하고 구체적 계획 수립을 위해 기획 연구가 필요

극지연구소

III. 연구개발 결과

1. 남극 고해양/고기후 복원 연구의 목표: 해양퇴적물 기록으로부터 서남극 지역의 과거 빙상-해양-기후 변화를 복원하고 그 상호작용을 이해한다

2. 세부연구목표 별 연구내용

- 1) 마지막 빙하기 이후의 남극 고해양/고기후 변화: 지난 해빙기의 퇴적환경 특성 및 해빙 시기 제시, 홀로세 구조 연니층 퇴적물의 성인 해석, 홀로세 고해상도 고기후/고해양 변동 복원, 빙봉의 후퇴 및 붕괴에 따른 퇴적상 및 프록시 변화 연구, 남반구 중위도 호소퇴적물의 고기후 복원 및 중위도-고위도 기후 변화의 상호 연관성 규명
- 2) 플라이오-플라이스토세 남극권 고해양/고기후 변화 복원: 마지막 빙하기의 퇴적 특성 및 빙상 범위, 빙하 주기에 따른 남극 빙권 및 해양 환경 변화 복원, 중기 플라이스토세 전환기의 남극 고해양 변화 복원
- 3) 고기후 프록시/연대측정법 도입 및 기후지시자 원리 탐구: 다양한 연대측정법을 활용한 남극 퇴적물의 연대 확립, 과거 빙권의 규모 변화에 따른 생지화학적 지

시자 연구, 남극 퇴적물 내 점토광물의 광물학적 특성과 고환경적 의미, 퇴적물을 이용한 지진 기록 복원 프록시 개발

3. 연구지역: 서남극 빙상은 그 기저부가 해수면 아래에 있어 기후변화에 취약한 것으로 알려져 있음. 남극 고해양/고기후 과제에서는 서남극 빙상 주변부인 남극반도, 로스해, 벨링스하우젠 해를 연구하고자 함.

IV. 연구개발결과의 활용계획

- 퇴적물을 이용한 남극 고해양/고기후 연구 계획 수립에 활용 (2017년~2019년)
- 연차별 로드맵, 연구비 규모, 정량적 연구목표, 인프라 활용 계획 제시
- 국내·외 공동연구 계획 수립



목 차

제출문	1
보고서 초록	2
요약문	3
목차	5
제 1 장. 서론	6
1-1. 연구개발 목적 및 필요성	6
1-2. 연구개발 내용 및 범위	9
제 2 장. 국내외 기술개발 현황	9
2-1. 국내 동향	9
2-2. 국외 동향	11
제 3 장. 연구개발수행 내용 및 결과	18
3-1. 연구개발 목표 및 내용	18
3-2. 연구개발 수행 결과	20
제 4 장. 연구개발결과의 활용 계획	31
4-1. 향후 연구방향	31
4-2. 국내외 공동연구 추진 계획	33
4-3. 연구개발 사업 규모	36
4-4. 총 연구기간 로드맵	36
4-5. 인프라 활용 로드맵	36
제 5 장. 참고문헌	38

제 1 장 서론

1-1. 연구개발 목적 및 필요성

가. 연구개발의 목적

- 남극권 고해양/고기후 복원을 위한 지구 환경 변화 규명 연구 계획 수립

이 과제는 한국해양과학기술원 부설 극지연구소의 주요사업 재편을 위해 2016년 2월 15일~5월 31일에 수행된 기획과제의 하나로서, 이 과제를 통해 남극 지역의 고해양 및 고기후 분야의 연구 배경 및 관련 자료를 조사하고 2017년~2019년의 연구 사업 추진을 위한 계획을 수립하고자 한다.



나. 연구개발의 필요성

- 고기후 연구의 필요성: 자연적 지구환경 변화의 영향 및 동인을 이해
- 남극 지역의 중요성: 기후 변화 감지의 최적지이자 기후 변화의 주요 원인
- 남극 고해양/고기후 연구의 방향성 제시 및 구체적 계획 수립을 위해 기획 연구 필요

○ 고기후 연구의 필요성

- 급격한 지구환경 변화는 현실적 위협이 되고 있음
- 기후변화를 포함한 지구 환경 변화 현상에 대한 과학적 이해의 필요성이 증대되고 있음
- 과거의 기후 변화를 복원함으로써 자연적 지구환경 변화 경향을 파악하고 그 영향을 예측하며, 기후 변화의 동인을 이해할 수 있음
- 이를 바탕으로 단기적, 중-장기적 정책을 수립하여 급격한 또는 지속적인 기후변화에 능동적으로 대처할 수 있음
- 전지구적인 기후변화에도 나타나는 양상은 지역적으로 다르게 나타남. 전지구적인 기후변화의 복원 못지않게 지역적인 기후변화 복원이 중요함. 예, 최근 지구 온난화

에 따라 북극의 해빙은 지속적으로 감소하지만, 남극의 해빙은 증가 추세.

- 지역적인 고해양/고기후 특성의 이해를 통해 하나의 연결된 시스템으로서 기후변화를 복원하고 이해할 수 있음

○ 고해양/고기후 연구에서 남극 지역의 중요성 및 연구 필요성

- 극지역은 기후변화에 민감하게 반응하여 (polar amplification), 기후 변화의 영향이 중-저위도 지역에 비해 훨씬 크게 나타나므로 기후 변화 감지의 최적지로 불리움
- 남극은 기후 변화의 주요 원인이 되기도 함: 남극해의 해양생산성 변화에 따른 대기 중 이산화탄소 농도의 변화, 해양 순환의 주요 동인인 심층수의 형성 지역, 남극 빙상의 증감에 따른 해수면 변동 현상 등
- 극지역의 기후변화는 중-저위도 지역의 기후변화와 밀접한 연관이 있지만, 접근성의 제한, 연대 측정의 제한 등의 이유로 남극 지역의 고해양/고기후 연구가 미흡함
- 남극지역의 대기 순환과 해양 순환은 전지구적 기후변화에 있어 매우 중요함. 하지만, 남극 지역의 대기-해양 순환의 관계에 대해서는 잘 정립되어 있지 않음

○ SCAR의 Horizon Scan 80개의 주요 질문(연구주제) 중 남극 고기후 연구와 연관된 질문들:

- 3. How have teleconnections, feedbacks, and thresholds in decadal and longer term climate variability affected ice sheet response since the Last Glacial Maximum, and how can this inform future climate projections? (마지막 빙하기 이후 기후 변동의 기후상관성, 피드백, 임계점이 빙상의 반응에 어떤 영향을 미쳤는가? 미래 기후 예측에 시사하는 점은 무엇인가?)
- 8. Does past amplified warming of Antarctica provide insight into the effects of future warming on climate and ice sheets? (과거 남극의 증폭된 온난화 현상이 미래의 온난화가 기후와 빙상에 미치는 영향에 대해 시사하는 점은 무엇인가?)
- 17. How has Antarctic sea ice extent and volume varied over decadal to millennial time scales? (수십년~수천년 시간 규모에서 남극 해빙의 범위와 부피 변화는 어떠했는가?)
- 21. How did the Antarctic cryosphere and the Southern Ocean contribute to glacial-interglacial cycles? (남극 빙권과 남극해가 빙하기-간빙기 주기 변화에 미친 영향은 무엇인가?)
- 32. How fast has the Antarctic Ice Sheet changed in the past and what does that tell us about the future? (과거 남극 빙상은 얼마나 빠르게 변화하였으며 이로부터 예측할 수 있는 미래 변화는 어떠한가?)
- 33. How did marine-based Antarctic ice sheets change during previous

inter-glacial periods? (이전의 간빙기 동안 기저면이 해수면 아래에 있는 남극 빙상의 변화는 어떠했는가?)

- 남극 고기후 연구는 2030 극지연구소 연구부문 발전전략의 주요해결과제 “지구 고기후의 복원” 과 관련된 항목으로 극지연구소 장기 전략에 부합
- 남극 고해양/고기후 연구 기획 과제의 필요성: 연구의 방향성 제시, 주요 연구 주제 제안, 구체적 연구 수행 계획 수립을 위해 기획 과제 수행이 필요함

1-2. 연구개발 내용 및 범위

- 남극 고해양/고기후 연구 주제 발굴
 - 남극 고해양/고기후 관련 이슈 발굴: 최근 주요 학술지의 남극 고해양/고기후 분야 연구 동향 파악, 남극 관련 국제 기구 및 기후 변화 기구가 선정한 연구 이슈 조사
 - 국내 관련 연구진들과의 워크샵: 최근 연구동향, 연구방법론 개발, 이슈 발굴
 - 남극 고해양/고기후 연구의 중요성 자료 조사: 기후 변화와 대응책 마련을 위한 동향 조사, 극지연구소 연구 부문 발전 전략 및 주요 국제 기후 연구 방향과의 합치성 조사
- 남극 고해양/고기후 연구 수행 세부 계획 수립
 - 중점 연구 지역 제안: 연구 주제 발굴을 위한 조사 결과를 기반으로 고기후 변화의 세계적 이슈 해결에 도움이 되는 지역을 후보지로 선정. 후보지 중 현실적으로 탐사 및 조사가 가능한 지역을 최종 중점 연구 지역으로 제안
 - 쇄빙연구선 사용 및 탐사 계획 수립: 중점 연구 지역 선정 후 쇄빙선 사용 계획 제안
 - 국제 공동연구 계획 수립: 이슈에 따라 국제공동연구 파트너 선정. 국제 공동 연구 시 역할 분담 계획 및 협력 연구의 구체적 방안 수립
 - 연구비 소요액 추산: 연구 지역 및 연구 주제에 따라 필요 기장비 및 인프라 활용 내역 예측. 이에 근거한 장비 구입, 연구진 투입 규모, 탐사 규모 등을 고려하여 추정 연구비 계산

제 2 장 국내외 기술개발 현황

2-1. 국내 동향

가. 국내 남극 고해양/고기후 연구 사례

- 극지연구소의 주요사업을 중심으로, 대부분 극지연구소와 국내 대학 및 연구소의 공동연구 방식으로 수행되고 있음. 극지역 연구에는 쇄빙연구선 및 기지 활용과 같은 인프라 이용이 결정적 역할을 하고 있어 개별 연구진이 독자적인 연구를 수행하기에는 어려움이 있음.
- 극지연구소의 남극 고기후 관련 연구 사업: 남극권 고해양 및 고기후 연구 (2004-2005: 윤호일, 극지연구소 기본사업), 지구온난화 대응책 마련을 위한 극지역 고기후 및 고해양 변화 복원기술 개발 (2007-2010: 이재일, 극지연구소 기본사업), 서남극 빙봉 변화 관측 시스템 구축 및 제4기 해빙사 복원 기술 개발 (2010-2016: 윤호일, 극지연구소 K-Polar 사업). 이 중 앞의 두 사업은 극지연구소 기본사업으로 남극권/극지역의 고기후/고해양 연구에 집중하였고, K-Polar 사업인 ‘서남극 빙봉 변화 관측 시스템 구축 및 제4기 해빙사 복원 기술 개발’ 사업은 고해양/고기후 뿐만 아니라 지구물리 장비 등을 활용한 빙봉 관측 및 해양/생물/화학 등의 다학제적 사업으로 추진되었음. 남극 반도 주변 지역의 빙하기 이후 고기후 및 고해양 변화에 대한 연구 지속적으로 수행 중
- 극지연구소에서 현재 수행하고 있는 K-polar 사업 및 미래부 빙권 모니터링 과제와의 차별성: K-Polar 사업인 ‘서남극 빙봉 변화 관측 시스템 구축 및 제4기 해빙사 복원 기술 개발’사업에서 해양퇴적물을 이용한 남극 고기후 연구를 수행하고 있음. K-polar 사업은 빙봉 중심 연구로서 다학제적인 연구로서, 특히 빙봉 모니터링 분야가 큰 비중을 차지하고 있음. 하지만 육상 기반의 빙권 모니터링 분야가 연구 개발을 통해 미래부 부처 R&D 사업을 발전하였고, 새로운 기획과제에서는 해양퇴적물 고기후 연구 주제만을 다루게 되었음. 따라서 두 사업은 연구 주제, 연구 방법, 연구 대상이 모두 명확히 달라지게 되었음. 또한 빙권 모니터링 과제는 장보고 기지 주변 지역을 연구 지역으로 삼아 좁은 지역의 집중적인 모니터링을 목표로 하는데 비해 퇴적물 고기후 과제는 서남극 빙상의 과거 거동 변화 복원을 목표로 하고 있어 서남극 주변 해양 전체를 연구 지역으로 삼고 있음.

나. 국내 남극 고해양/고기후 연구의 최근 변화 경향

- 쇄빙연구선 아라온 건조 이후 양적, 질적으로 비약적 발전을 이룸: 결빙해역 연구 가능해짐, 국제공동탐사 활성화, 롱 코어러 시료를 이용한 장기 기후복원 연구 가능성 대두. 2015년 12월 로스해 쪽 남빙양 심해에서 17.5m의 점보 피스톤 코어 획득. 지금까지 극지연구소가 극지역에서 채취한 퇴적물 코어 중 가장 긴 코어
- 연구지역 확대: 장보고 기지의 설립으로 로스해 지역으로 연구 영역 확대. 장보고 기지 주변은 난센 빙봉 붕괴 등 현재 환경 변화가 일어나고 있는 지역임.
- 실질적 국제 협력의 강화: 국제공동탐사, 시료 공동 분석, 논문 공동 작성, 인력 교류 등
- 국제 공동 탐사 사례: 2013년 한-미 공동으로 웨델해 라슨 빙봉 지역 및 남극반도 서안 지역 탐사 (세계 최초로 라슨-C 지역의 퇴적물 코어 획득), 2015년 한-뉴질랜드-미국 공동으로 로스해 및 남극해 지역 탐사



◀ 아라온에 설치된 롱 코어러 운용 모습

다. 현 기술상태의 취약성

- 극지연구소 고기후 연구 분야: 다양한 프록시 분석을 위한 전문가 부족. 국내 학-연, 연-연 협력 및 국제 공동연구를 통해 약점 보완 가능.
- 장기적 쇄빙선 사용 계획의 부재: 국제 공동탐사 및 장기적 연구 계획, 이슈 중심형 연구 추진에 걸림돌이 되고 있음.

라. 앞으로의 전망

- 고해상도 고기후 복원의 중요성 확대: 급격한 기후 변화의 증거 확보의 중요성이 대두되면서 고해상도 기후 변화 복원의 중요성이 계속 강조되고 있음
- 협력 연구 강화: 연구 주제에 따라 다양한 분야의 연구진의 공동 탐사 및 공동 연구 지속. 국제-국내 공동연구 강화로 다양한 자료를 바탕으로 한 신뢰도 높은 논문 출판 확대
- 연구 방법 향상: 분석 기술 발달에 따른 연대 측정의 정확도 향상 및 다양한 프록시 개발 지속
- 국내 해양퇴적물 시추 기술 향상에 따라 장기 고기후 분야 연구 가능해짐

- : 아라온 장착 장비인 점보피스톤 시추기가 2015년 성공적으로 운영되기 시작하면서 최대 39m 의 긴 퇴적물 코어 획득이 가능해짐. (기존 중력 시추기 최대 약 10m)
- : 긴 퇴적물 코어 획득으로 연구 가능한 시간 범위가 확대됨: 심해에서는 보다 긴 기간 동안의 (수백만년 예상) 장주기 기후 변화 연구, 연안에서는 홀로세 해양 퇴적물에 대한 고해상도 기후 복원 기간을 늘릴 수 있을 것으로 예상됨
- 연구 지역 확대: 기존의 남극반도 지역 뿐 아니라 로스해 지역까지 연구영역이 확대됨에 따라 서남극 빙상의 거동에 대한 보다 거시적인 해석이 가능해질 것으로 전망됨. 로스해 해양퇴적물 시료로부터는 일부 동남극 빙상 변화 자료 획득도 가능할 것으로 전망.

2-2. 국외 동향

가. 국외 주요 남극 고해양/고기후 연구 추진 개요

- 미국: 2002년 남극반도 웨델해 라슨 빙봉의 붕괴로 급격한 남극 환경 변화를 추적하기 위해 2009년부터 2014년까지 국립과학재단(NSF) 지원으로 '서남극 라슨 빙봉 환경 연구 프로그램(LARISSA, LARsen Ice Shelf System, Antarctica)'을 진행하여 빙봉 붕괴에 따른 생태계 변화, 빙권 역학, 해양/빙하/지질/생물 환경의 상호 연관성 및 고환경을 연구함
- 영국: 남극조사소(BAS) "장기관측 프로그램(LTMS)"을 중심으로 남극반도 서안 월킨스 빙봉 또는 조오지 6 빙봉 해역에서 빙봉의 변동 및 과거 환경 연구를 지난 50여년 간 지속적인 연구 수행함
 - 1970년대 이후 인공위성자료를 이용하여 남극반도 지역에서 워디 빙봉(Wordie Ice Shelf)을 포함한 여러 빙봉의 면적 변화와 온난화와의 상관관계에 대해 연구(Doake and Vaughan, 1991; Rignot et al., 2005)
 - 2000년 남극반도 서안의 조지6세 빙봉(George VI Ice Shelf)에서 퇴적물을 이용한 홀로세 고기후/고환경 변화 연구 수행(Bentley et al., 2005; Smith et al., 2007a,b; Roberts et al., 2008)
- 독일: 알프레드 베게너 연구소(AWI)를 중심으로 쇠빙연구선 폴라쉬테른 기반으로 남빙양 및 남극 빙봉 해역에서 퇴적물 시추 및 해양 모니터링 사업으로 지난 수십년 동안 과거 환경 변화 연구 수행
- 이탈리아, 뉴질랜드: 남극 장보고과학기지 주변 및 로스해 중심으로 빙봉/해양 모니터링 사업 및 연안, 대륙붕, 남빙양의 시추 퇴적물을 통한 과거 환경 변화 연구

수행

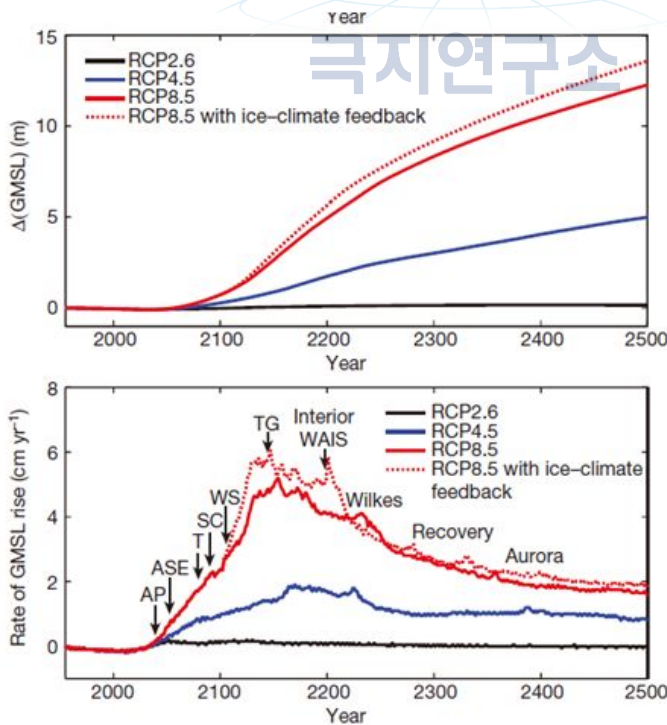
- 국제대양드릴시추프로그램 (IODP): 미국, 독일, 영국, 이탈리아, 뉴질랜드, 한국 등 빙봉 및 남빙양에서 드릴 시추 퇴적물의 국제 공동 연구 프로그램을 통해 장기 기후 변화 복원 및 원인 규명 연구 모색 중

나. 최근 남극 고해양/고기후 분야 주요 연구 결과

최근 남극 고기후 및 고해양 분야의 주요 연구 결과들을 이슈별로 정리하였다. 최근의 환경 변화와 관련하여 대기 중 이산화탄소 농도와 해수면 변화, 이에 대한 남극 빙상의 역할 등이 큰 이슈가 되고 있다. 아래에서 정리한 내용은 극지연구소의 남극 고해양/고기후 연구를 위한 방향 설정의 배경자료로 사용되었다.

- 대기 중 이산화탄소 농도와 기후 변화, 해수면 변화

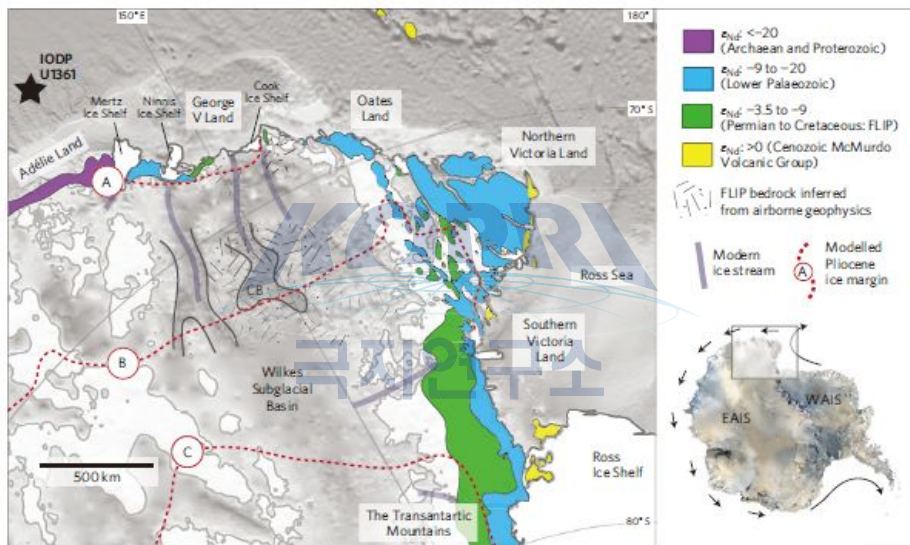
- 남극 빙상 변화의 중요성: 해수면 변동을 일으킬 수 있음. 대기 온도 상승 뿐 아니라 빙봉의 수압파쇄와 빙벽의 구조적 붕괴 요인을 모두 고려한 새로운 빙상-기후 모델 결과에 따르면, 온실 기체 방출이 계속될 경우 남극의 빙상 축소에 의한 해수면 상승은 2100년이면 1m 이상, 2500년이면 15m 이상에 달할 수 있다고 함 (DeConto and Pollard, 2016).



◀ 현재와 같은 온실기체 방출이 지속될 경우 남극 빙상 축소에 의한 해수면 상승 모델 결과 (DeConto and Pollard, 2016)

- 고기후 기록의 활용: 과거 이산화탄소 농도가 비슷했던 시기의 빙상 변화를 참조

- 플라이오세 (400ppm; 현재와 비슷한 수준): 비교적 따뜻. IODP 318 결과 동남극 빙상이 Wilkes Subglacial Basin 안쪽으로 후퇴했음을 밝힘 (Cook et al., 2013; Patterson et al., 2014; Reinardy et al., 2015). 이에 따른 모델 수정. 몇 가지 요인을 덧붙이면 현재보다 해수면 약 17m 높았을 것으로 계산됨 (Pollard et al., 2015).
- 마이오세 (약 500ppm; 21세기 중반이면 도달할 것으로 예측되는 수준-IPCC): 동남극 빙상 중 marine-based ice는 모두 사라졌을 것으로 추정. 이에 따른 해수면 상승은 약 22m 정도. ANDRILL 코어 결과로 로스해 빙상 가장자리는 지구궤도 변화에 따른 변동을 잘 나타내며 약 6도의 온도 상승이 추정되었고, 이에 따른 빙상 모델에서는 빙붕의 hydrofracturing physics 및 기후-빙상 피드백을 결합하여 저서성 유공충의 산소동위원소 기록과 일치하는 결과를 도출하였다 (Levy et al., 2016; Gasson et al., 2016).



▲ Nd 동위원소 분석을 통해 Wilkes 빙저 분지 지역에서의 플라이오세 동안의 빙상의 범위를 추정. 이로부터 약 3-5백만년 전의 플라이오세 동안 동남극 빙상이 온난화에 취약하여 내륙으로 수백 km 이상 후퇴했다고 해석하였음 (Cook et al., 2013).

○ IPCC 5차 보고서 (2013)

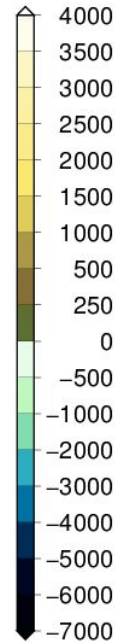
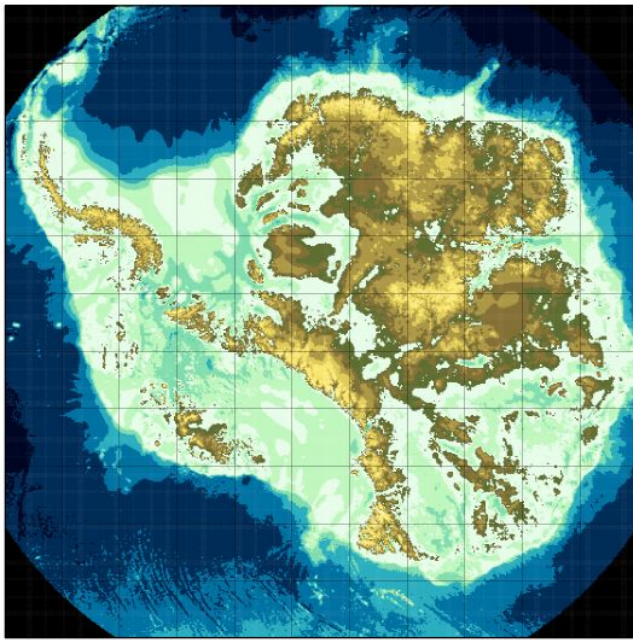
- 기후변화에 대한 정부간 협의체 (Intergovernmental Panel on Climate Change; IPCC)의 5차 보고서 (IPCC, 2013) 중 고기후 관련 내용
- IPCC 5차 보고서 중 제5장. 고기후 기록으로부터의 정보 (Masson-Delmotte et al., 2013), 제13장. 해수면 변동 (Church et al., 2013), Technical Summary, 정책 입안자를 위한 요약 부분이 고기후 관련 내용

- 주요 고기후 연구 결과

- 1) 지난 수백만년 중 현재보다 따뜻했던 시기의 그린랜드와 WAIS 부피는 감소했었다 (high confidence): 이산화탄소 농도가 350-400ppm 또는 그 이상일 때 서남극 빙상 (West Antarctic Ice Sheet; WAIS)의 후퇴가 일어났음을 지질학적 증거와 모델에서 지시하고 있음
- 2) 대기 중 이산화탄소 농도의 변화에 따른 polar amplification 현상이 있음을 고기후 복원과 모델링 결과가 지시함 (high confidence)
- 3) mid-Pliocene의 따뜻했던 시기 (3.3-3백만년 전)에는 평균 해수면이 현재보다 높았음 (high confidence): 이 시기 그린랜드, WAIS, 일부 EAIS의 deglaciation으로 인한 해수면 상승은 20m는 넘지 않았을 것이다.
- 4) 현재의 대기 중 CO₂, CH₄, N₂O 상승률 및 관련된 radiative forcing은 지난 2만 2천년 간의 가장 해상도 높은 빙하 코어 기록과 비교해 볼 때 유례가 없는 일이다 (very high confidence)
- 5) CO₂, CH₄, N₂O 농도는 지난 80만년 간 유례 없이 높은 정도로 증가했다.

○ 동남극 빙상 (East Antarctic Ice Sheet; EAIS)의 안정성 문제

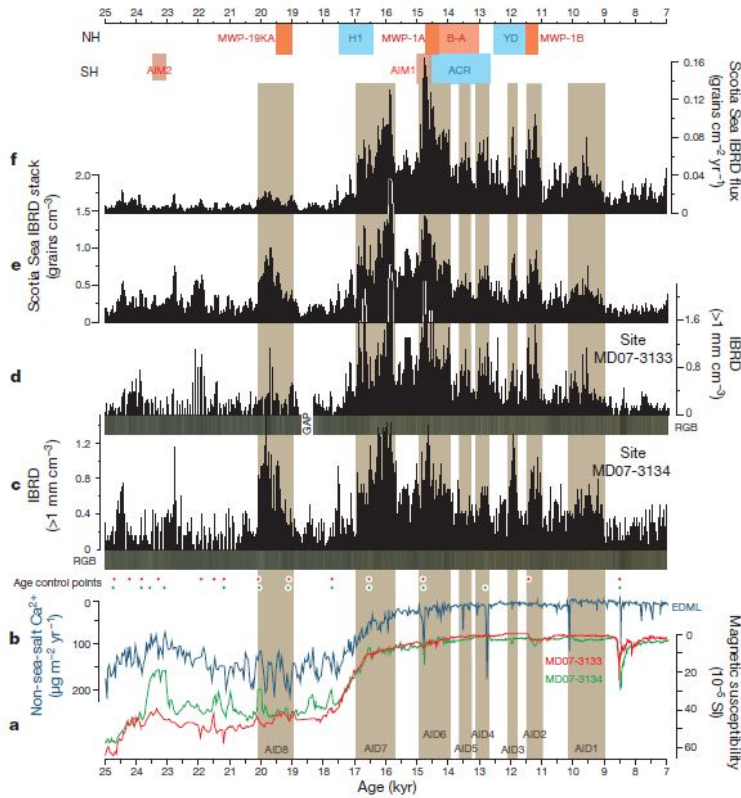
- EAIS의 해수면 변동에 대한 기여도는 아직 모르는 부분이 많음
- 마이오세 동안은 동남극 빙상의 marine-based 부분은 모두 붕괴했을 것으로 추정됨
- 플라이오세 Wilkes Subglacial Basin의 예. 초기 플라이오세 동안 Wilkes Subglacial Basin으로 marine-based EAIS가 후퇴했다는 지질학적 증거 제시. EAIS도 WAIS 만큼, 혹은 그 이상으로 해수면 변동에 기여할 수 있음을 암시 (Cook et al., 2013; Patterson et al., 2014; Reinardy et al., 2015)
- 이전 기후 및 빙상 모델들은 대기 중 이산화탄소 농도만으로는 far-field 해수면 기록에 나타나는 만큼의 변동을 일으킬 만큼의 동남극 빙상의 축소를 재현하지 못하였으나 (Miller et al., 2012), 새로운 지질학적 기록이 나오면서 빙상 모델의 개선이 이루어지고 있다. 그 결과 melt-driven hydrofracturing of ice shelves and ice-margin cliff failure 조건을 합쳤을 때 플라이오세의 서남극 빙상의 빠른 붕괴 및 동남극 subglacial basins으로의 후퇴를 재현할 수 있게 되었다 (Pollard et al., 2015). 이 시기 남극 빙상 붕괴에 따른 해수면 상승은 17m 정도로, far-field 해수면 기록과 near-field 빙상 extent 기록과 합치.
- 동남극 빙상에도 Wilkes Subglacial Basin 처럼 marine-based ice sheet 부분이 많이 있음



◀ 남극 빙상 아래의 지형 및 수심을 복원한 BEDMAP-2 지도. 서남극 지역은 그 대부분이, 동남극 지역에서도 많은 부분의 기저면이 해수면 아래에 위치하고 있는 것을 볼 수 있다.

○ 지난 해빙기(Last Deglaciation)의 해수면 상승에 대한 남극의 역할

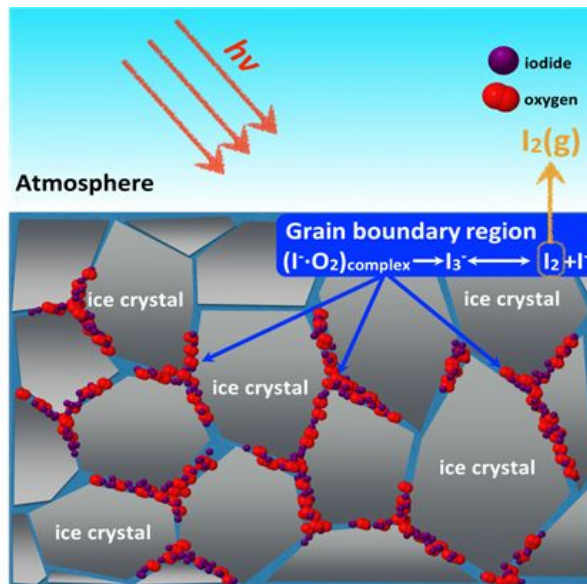
- LGM 동안의 빙상 범위 및 홀로세의 빙하 후퇴 패턴에 대한 새로운 지질학적 증거 및 수심 자료들 (The RAISED consortium 2014; Weber et al., 2014; Rebesco et al., 2014): 20-9 ka 사이의 남극 빙상의 episodic mass loss에 대한 자료 제공.
- 비교적 오래된 event들: 남극반도 빙상 및 SE Weddell Sea의 동남극 빙상의 해빙은 비교적 오래된 event들에 관계 있음. 약 17kyr의 IRD peak이 남극전반에 걸친 deglacial warming의 시작을 지시. 이 시기는 북반구에서는 Heinrich event 1으로 추웠던 시기임.
- Meltwater Pulse 1A: 빙상 모델에서 남극의 contribution을 지시 (Golledge et al., 2014), 스코시아해의 IRD 기록 (Weber et al., 2014). WAIS로부터의 ice mass discharge가 MWP 1A 동안 1m/century 의 해수면 상승률을 일으킬 수 있음. 또한 ocean warming이 빙상 후퇴 시기에 중요한 역할을 함을 지시한다. Warming ocean이 향후 어떤 반응을 일으킬 수 있는지에 대한 중요한 시사.



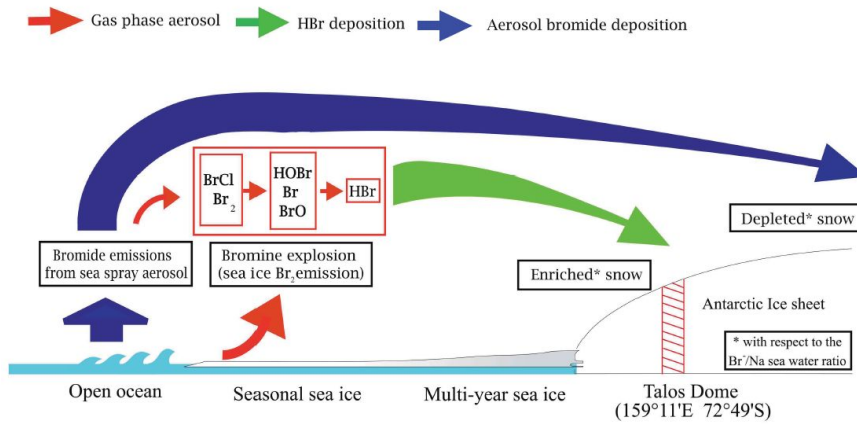
◀ 지난 빙하기부터 홀로세 사이(2만 5천년 전~7천년 전)의 스코시아해의 퇴적물 코어 기록. 해빙기 동안 스코시아 해에서 발견된 빙하 운반 퇴적물의 퇴적 시기가 해수면의 급격한 상승기와 대비됨을 제시함 (Weber et al., 2014)

○ 빙권에서 일어나는 지화학 반응의 특성 및 기후와의 관련성 연구

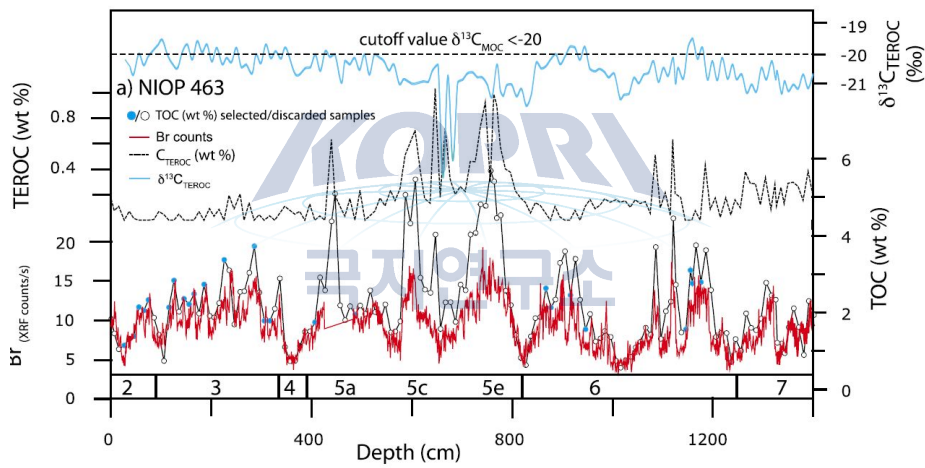
- Kim et al. (2016)은 빙권에서 일어나는 독특한 지화학 반응으로 해양에 존재하던 할로젠 물질이 대기로 방출될 수 있음을 밝힘. 이는 과거 빙권의 규모가 할로젠 물질의 해양/대기/빙권에서의 분포에 영향을 미칠 수 있음을 시사함. 역으로 해양/대기/빙권에서의 할로젠 물질의 분포를 연구함으로써 과거 빙권의 규모를 예측할 수 있을 것으로 생각됨.



- Spolaor et al. (2013)은 남극 빙하에서 할로젠 물질(브롬과 요오드)을 분석하여 과거 해빙의 규모 및 빙하기/간빙기 순환을 복원하는데 사용함



- Ziegler et al. (2008)의 연구에서는 해양퇴적물에서 할로젠물질(브롬, Bromine)을 분석하여 과거 유기탄소의 양을 복원하려는 시도가 이루어짐



제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

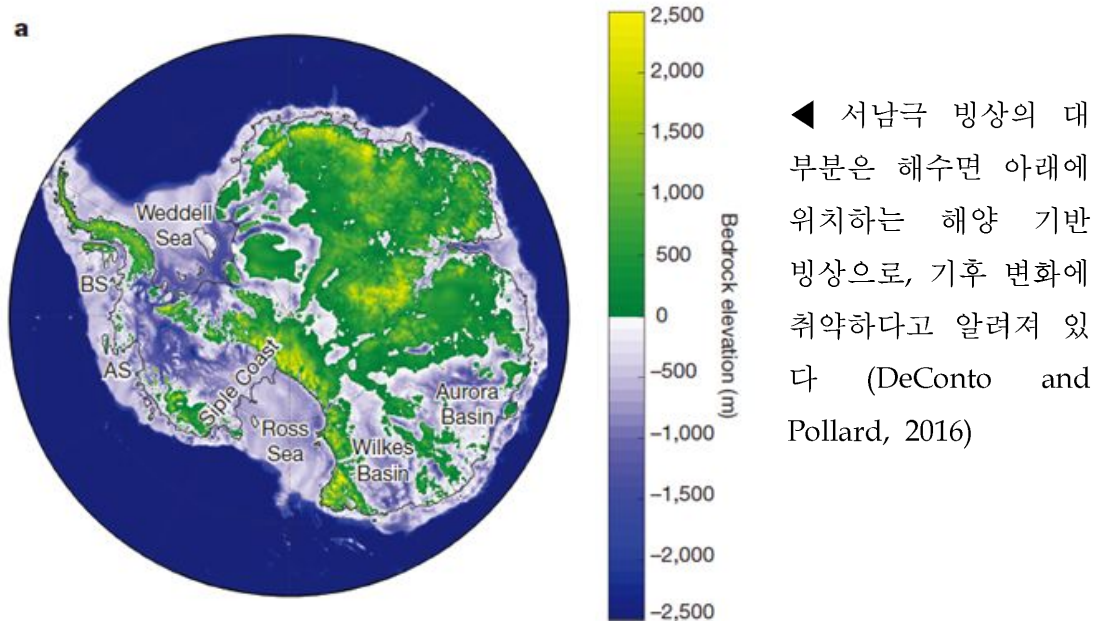
3-1. 연구개발 목표 및 내용

가. 기획과제의 목표 및 내용

본 기획과제의 최종 목표는 남극권 고해양 및 고기후 복원을 통한 지구 환경 변화 규명 연구 계획을 수립하는 것이다. 구체적으로는 남극 고해양/고기후 연구 주제 발굴 및 2017-2019년 사이의 연구 세부 계획을 수립하는 것을 목표로 하고 있다.

연구개발의 내용 및 범위에는 자료 조사 및 토의를 통한 주요 연구 주제 발굴, 중점 연구 지역 제안, 쇄빙 연구선 사용 계획 수립, 국제 공동연구 계획 수립, 예산 연구비 추산 등이 포함되어 있다. 이를 위해 문헌 조사, 극지연구소 내부의 연구진 및 국내 관련 연구진과의 회의 및 자문, 워크숍 개최 등의 연구방법을 사용하였다.

나. 남극권 고해양/고기후 복원 연구 목표 및 연구 내용 설정



남극의 고기후 연구의 세계적인 주요 이슈인 '빙상 안정성과 전지구 환경 변화' 측면에서 특히 중요하게 여겨지는 지역이 서남극 지역이다. 서남극 빙상(West Antarctic Ice Sheet)

은 빙상의 대부분의 기저부분이 해수면 아래에 존재하는 해양 기반 빙상 (marine-based ice sheet)이다. 해양 기반 빙상은 온난화와 같은 기후 변화에 특히 민감하게 반응하여 붕괴 위험이 큰 취약한 빙상이다. 과거 10만년 전의 지난 간빙기 때는 서남극 빙상이 모두 사라졌다고 하며, 현재에도 서남극 주변 빙상 및 빙봉은 축소 및 붕괴의 위협을 겪고 있다. 남극권 고해양/고기후 복원 연구에서도 서남극 빙상의 과거 변화에 주목하였으며, 이 연구의 최종 목표는 서남극 지역의 과거 빙상-해양-기후 변화 기록을 복원하고 그 상호작용을 이해하는 것으로 설정하였다.

- 남극권 고해양/고기후 복원 연구의 최종 목표:
퇴적물 기록으로부터 서남극 지역의 과거 빙상-해양-기후 변화를 복원하고 그 상호작용을 이해한다

남극 고기후 분야의 주요 과학 이슈 조사를 바탕으로 1. 마지막 빙하기 이후의 남극 고해양/고기후 변화, 2. 플라이오-플라이스토세 남극권 고해양/고기후 변화 복원, 3. 고기후 프록시/연대측정법 도입 및 기후 지시자 원리 탐구의 세 가지의 세부연구목표를 설정하였다. 세부연구목표 별로 추진하고자 하는 연구 내용은 아래 표에 요약 정리하였고 보다 자세한 내용은 다음 절 ‘연구개발수행 결과’에 기술하였다.

세부연구목표	연구 내용
1. 마지막 빙하기 이후의 남극 고해양/고기후 변화	<ul style="list-style-type: none"> ○ 지난 해빙기의 퇴적환경 특성 및 빙하 후퇴 양상 ○ 홀로세 구조 연니층 퇴적물의 성인 해석 ○ 홀로세 고해상도 고기후/고해양 변동 복원 ○ 빙봉의 후퇴 및 붕괴에 따른 퇴적상 및 프록시 변화 연구 ○ 남반구 중위도 호소퇴적물의 고기후 복원 및 중위도-고위도 기후 변화의 상호 연관성 규명
2. 플라이오-플라이스토세 남극권 고해양/고기후 변화 복원	<ul style="list-style-type: none"> ○ 마지막 빙하기의 퇴적 특성, 빙상 범위 및 빙상 안정성 ○ 빙하주기에 따른 남극 빙권 및 해양 환경 변화 복원 ○ 중기 플라이스토세 전환기의 남극 고해양 변화 복원

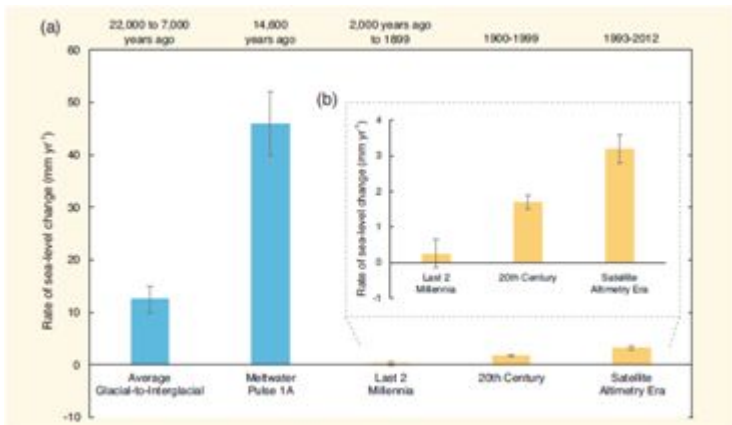
세부연구목표	연구 내용
3. 고기후 프록시/연대 측정법 도입 및 기후 지시자 원리 탐구	<ul style="list-style-type: none"> ○ 다양한 연대측정법을 활용한 남극 해양퇴적물의 연대 확립 ○ 과거 빙권의 규모 변화에 따른 생지화학 지시자 연구 ○ 해양퇴적물 내 점토광물의 광물학적 특성과 고환경적 의미 ○ 해양퇴적물을 이용한 지진 기록 복원 프록시 개발

3-2. 연구개발수행 결과

이 절에서는 남극 고기후/고해양 분야의 주요 과학적 이슈에 따라 도출한 연구 주제 및 연구 내용에 대해 기술하고 있다. 연구 지역 제안 및 각 지역 별 주요 이슈들에 대해서도 소개한다. 이 외에 인프라 사용 계획, 국제 및 국내 공동연구 계획, 예상 연구비는 제 4 장 활용계획 편에서 기술하였다.

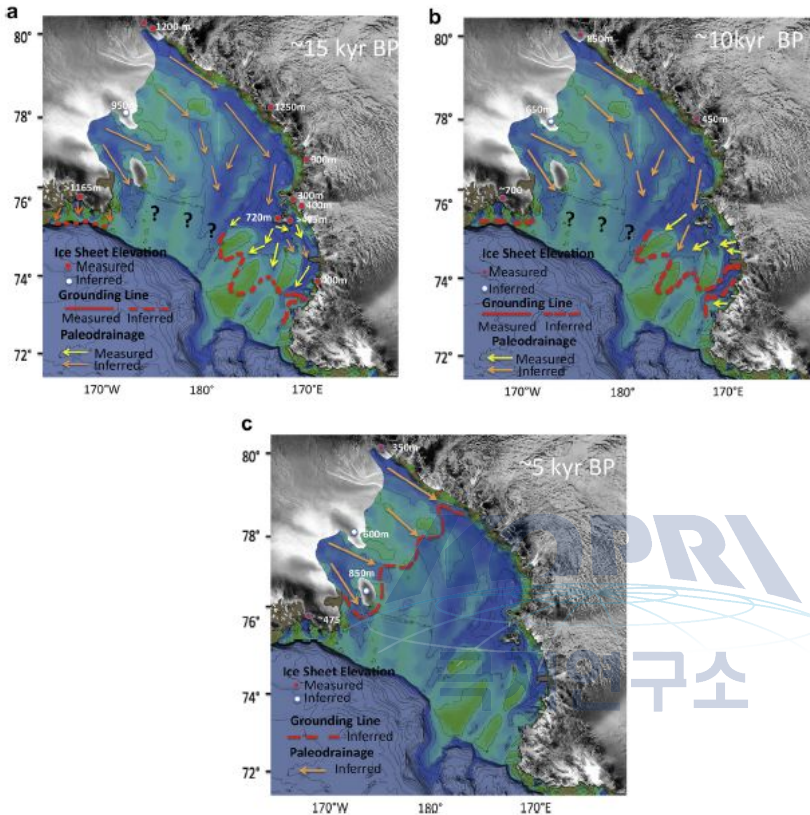
가. 남극 고기후/고해양 주요 연구 주제 및 연구 내용

- 지난 해빙기(deglaciation)의 퇴적 환경 특성 및 빙하 후퇴 양상
 - 마지막 빙하기 이후 간빙기로 넘어서는 시기인 해빙기 동안 전세계 해수면은 급격히 상승하였음. 향후 온난화에 따른 빙상 붕괴와 이로 인한 해수면 상승 가능성과 관련하여 지난 해빙기의 빙하 후퇴 조절 요인은 고기후 연구의 주요 이슈로 대두되고 있음. 특히 서남극 빙상은 기저면이 해수면보다 낮은 곳에 있는 marine-based ice sheet으로서 기후 변화에 대한 불안정성이 큰 것으로 여겨지고 있어 주목의 대상임.



◀ 지난 해빙기 (deglaciation) 동안의 평균 해수면 상승률과 meltwater pulse 1A 동안의 평균 해수면 상승률 (파란 막대), 현재의 해수면 상승률 (노란 막대).

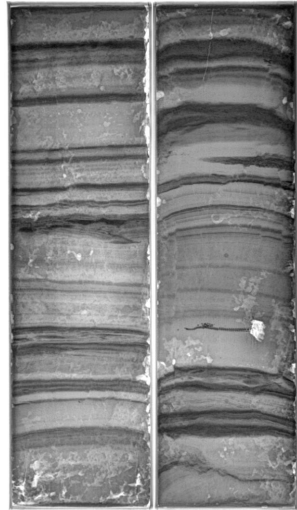
- 남극반도, 벨링스하우젠, 로스해 동부 시료로부터 서남극 빙상의 후퇴 시기 및 양상 연구. 로스해 서부 시료에서는 동남극 빙상의 후퇴에 대한 정보 획득. 동-서남극 빙상 안정성 비교
- 지난 해빙기 중 급격한 해수면 상승 이벤트(e.g. meltwater pulse 1A) 발생에 서남극 빙상이 관련이 있는지 연구



◀ 약 1만 5천년 이후 로스해 대륙붕에서의 빙상 후퇴사 복원 모식도. 아직 많은 부분이 부정확하거나 전혀 자료가 없음을 볼 수 있다 (Anderson et al., 2014)

○ 홀로세 고해상도 고기후/고해양 변동 복원

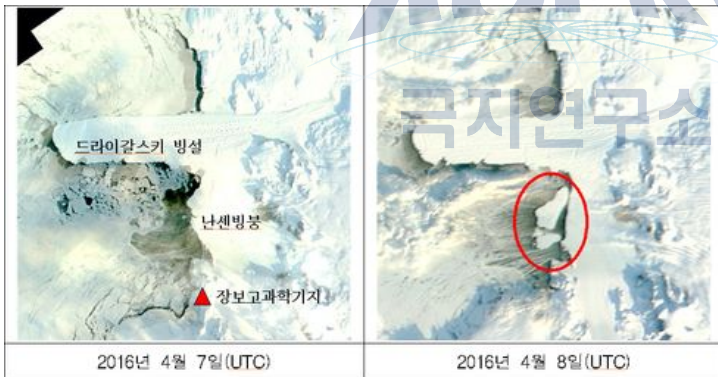
- 홀로세 구조 연니 퇴적층의 성인 해석: 남극반도와 로스해 일부 지역에 홀로세의 구조 연니 층이 잘 발달하고 있음. 이 층은 퇴적률이 높고 유기물 함량이 높은 특징이 있어 고해상도 고기후 해석에 적합한 특성을 보임. 이 퇴적층의 형성 조건에 대해 퇴적학적 분석을 통해 이해하고자 함
- 구조 연니층을 비롯하여 비교적 홀로세 퇴적률이 높은 퇴적층을 대상으로 고해상도 고기후 분석을 수행하여 홀로세의 기후 변동 양상을 복원하고자 함.



◀ 남극 로스해 북빅토리아랜드 연안의 모브레이 만에서 채취한 퇴적물 코어 RS15-LC62의 X-선 사진. 엇리 구조가 잘 발달하고 있으며, 이 구조는 규조 연니와 쇠설물 퇴적물 구간이 반복으로 형성되었다.

○ 빙봉의 후퇴 및 붕괴에 따른 퇴적상 및 프록시 변화 연구

- 최근 빙봉이 붕괴한 지역 부근(예: 난센 빙봉)을 중심으로 빙봉 말단 부근의 퇴적상 변화를 기재하여 빙봉 붕괴 시의 퇴적학적 특성을 파악하고자 함
- 이를 바탕으로 퇴적물 코어에서 유사한 퇴적상을 빙봉 붕괴의 지시자로 사용할 수 있을 것으로 기대됨



◀ 장보고 기지 인근 난센빙봉의 붕괴 모습. 2016년 4월. 뉴스창 보도 사진.

○ 남반구 중위도 호소퇴적물의 고기후 복원 및 중위도-고위도 기후 변화의 상호 연관성 규명

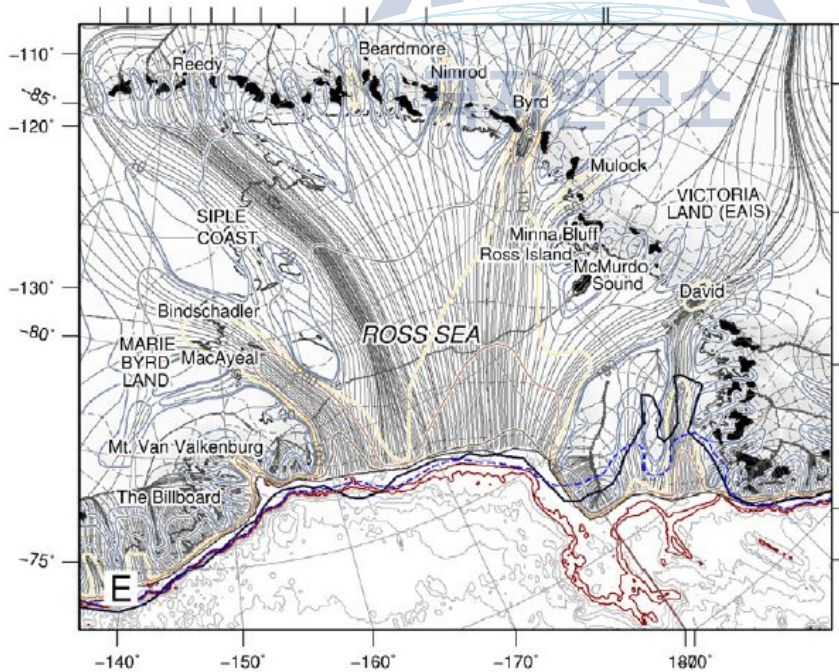
- 뉴질랜드 호수 퇴적물의 고해상도 고기후 복원 연구에 참여
- 뉴질랜드-남극해-로스해 대륙붕 지역의 홀로세 고기후 연구 결과를 바탕으로 위도 변화에 따른 기후 변동 패턴을 분석하고 남극 기후와 중위도 기후의 상관성을 파악하고자 함
- 뉴질랜드와의 공동연구로 진행할 예정



◀ 뉴질랜드 남섬 오후우 호수의 퇴적물 시추 작업 (2015년)

○ 마지막 빙하기의 퇴적 특성, 빙상 범위 및 빙상 안정성

- 마지막 빙하기 동안 대륙붕 말단까지 진출했던 빙상에 대해서는 빙상 범위 중심으로 연구가 이루어져 왔음. 빙하기 동안 빙상은 거의 변동이 없는 것으로 간주되었으나 실제로는 지난 빙하기 동안에도 수천년 규모의 기후 변동이 있었고 이런 변동은 빙하 코어에는 기록되어 있음.
- 마지막 빙하기의 남극 대륙붕 퇴적물을 조사하여 이런 수천년 규모의 기후 변동이 대륙붕 환경에도 영향을 미쳤는지 살펴보고자 함.

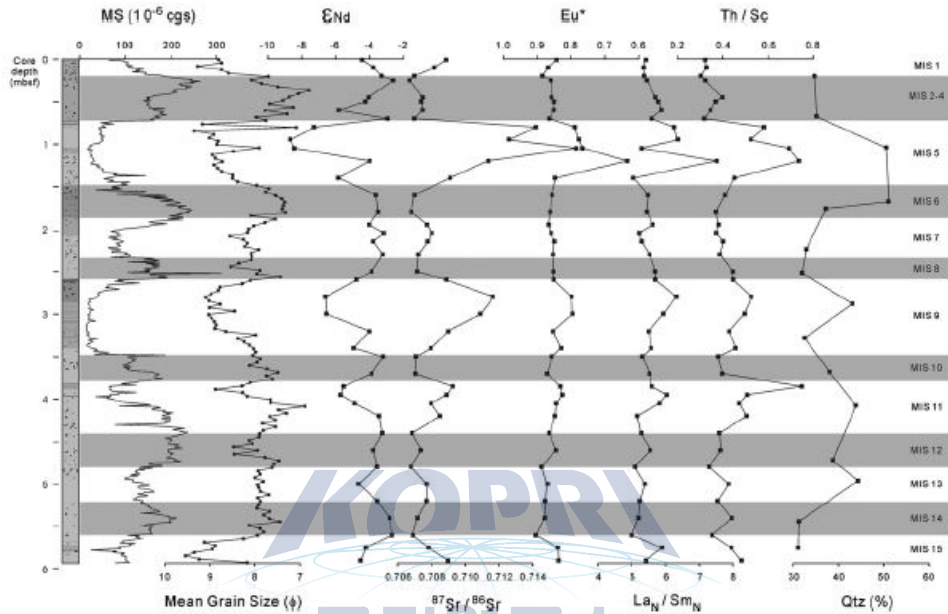


◀ 로스해 지역에서 마지막 빙하기 동안 빙상 범위. 까만 선은 Anderson et al. (2002), 파란 선은 Livingston et al. (2012)의 추정 한계이다. 빨간 선은 대륙붕 한계를 지시한다 (from Golledge et al., 2013)

○ 빙하주기에 따른 남극 빙권 및 해양 환경 변화 복원

- 지난 수백만년 간 지구 기후의 가장 두드러진 특징은 빙하기와 간빙기가 차례로 반복되는 빙하 주기에 따른 기후 변화였음

- 남극은 지구 상에서 가장 큰 빙상이 발달한 지역으로, 빙하주기에 따른 변화가 가장 두드러지게 나타나며 지구 환경 변화에 미치는 영향도 가장 큰 지역 중 하나임
- 퇴적물이 매우 낮은 남극해의 심해 지역에서는 수백만년 전에 퇴적된 퇴적물까지도 연구가 가능하므로 빙하주기 연구에 적합함
- 해양 퇴적물 연구를 통해 빙하기와 간빙기의 해양 순환 패턴 변화, 빙하기와 간빙기의 외해의 환경 변화, 해양생산성 변화 등의 정보를 얻고자 함

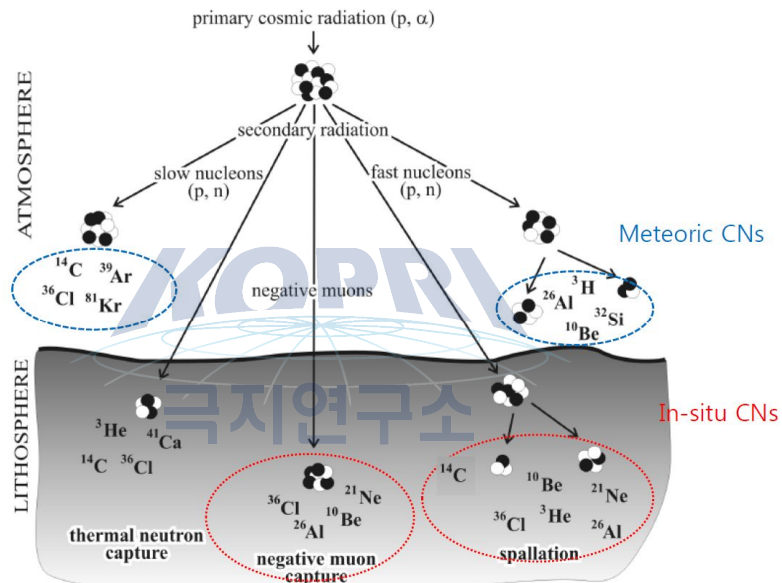


▲ 남극 심해 퇴적물 코어를 이용한 빙하 주기 연구 사례. 남극 드레이크해 퇴적물로부터 과거 약 60만년 간 빙하기-간빙기 변화에 따른 퇴적물 조성 변화와 그 원인인 해양 순환 변화에 대해 연구함 (Lee et al., 2012)

○ 중기 플라이스토세 전환기의 남극 고해양 변화 복원

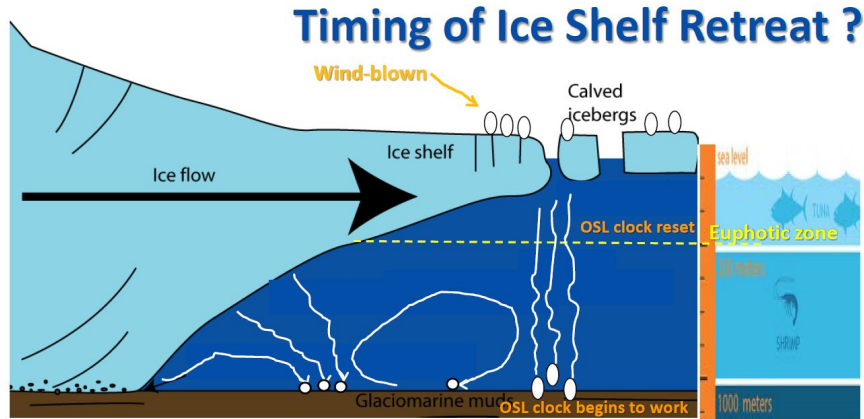
- 중기 플라이스토세 전환기 (mid-Pleistocene Transition)는 약 125만년 전~70만년 전 사이에 걸친 시기로서, 이 시기 이전에는 빙하주기가 약 4만년이었는데 이 시기 이후로는 현재와 같이 약 10만년의 주기로 변화했음
- 이 시기의 기후 특성과 변화의 원인 등에 대해서는 아직 많은 부분이 미지수로 남아 있으며, 일부 연구에서는 90만년 전 남극 빙상의 증가가 큰 역할을 했다는 해석도 제시되었으나 (Elderfield et al., 2012), 그 원인에 대해서는 아직 논란이 계속되고 있음
- 퇴적물이 낮은 남극해의 심해 퇴적층으로부터 이 시기의 남극 고해양 환경 변화를 복원하고자 함. 여러 지역에서 이 시기 퇴적층 획득에 성공한다면 지역별 비교도 가능할 것으로 기대됨.

- 우주선 유발 동위원소를 이용한 남극 퇴적물 고환경 복원 및 연대 측정
 - 우주기원 동위원소 연대측정법은 우주에서 지상으로 떨어지는 동위원소를 이용하여 연대를 측정하는 것으로 노출이 시작된 이후의 연대를 지시함. 따라서 빙하가 후퇴하기 시작한 때로부터의 시간을 측정하는 데 널리 사용되어 왔고 빙하후퇴사 복원에 매우 유용한 연대측정법임. 이 연구에서는 장보고 기지 주변의 빙하 후퇴사 복원을 위해 이 방법을 사용하고자 함.
 - 퇴적물에서 우주기원 동위원소 농도를 측정하면 빙하 하부의 퇴적층과 공해 환경의 퇴적층을 구분할 수도 있음이 최근 제기되고 있음. 남극 퇴적층 중 퇴적환경이 불확실한 일부 퇴적층에 대해 이 분석을 수행하여 퇴적층의 성인을 밝히는 연구도 함께 수행하고자 함.



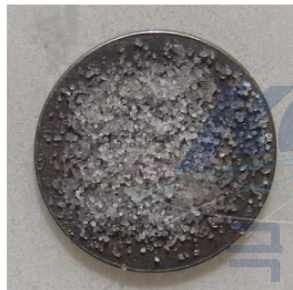
Production of cosmogenic nuclides in the atmosphere and in the lithosphere (Wagner, 1998)

- OSL 연대측정법의 남극 퇴적물 연대 측정의 적용
 - 이론적 배경 (가설): 석영 입자는 햇빛에 노출되어 UV-Blue 파장에 충분한 시간 동안 노출되면 OSL 신호가 초기화됨. 빙봉 위에 쌓여 있다가 빙봉의 붕괴로 인해 해저로 침강, 퇴적된 석영 입자는 빙봉의 붕괴 시기를 지시할 것임. 따라서 코어 퇴적물 중 빙봉 후퇴 시기의 퇴적상을 보이는 퇴적물로부터 OSL 연대를 측정하면 빙봉 붕괴 시기를 알 수 있을 것임.

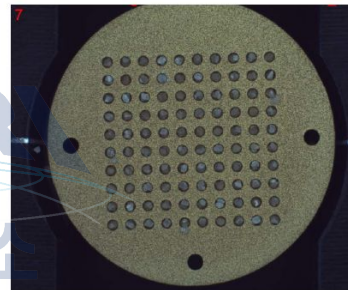


▲ OSL 연대를 이용한 빙하 후퇴시기 결정 원리 모식도

- 하지만 빙붕 인근의 퇴적물은 빙붕 붕괴에 따라 침강한 입자 뿐 아니라 grounding zone에서 기인한 입자들, 즉 빙붕의 후퇴보다 이전 시기의 연대를 지시하는 입자들도 다량 포함하고 있음. 따라서 개별 단일 입자들에 대한 OSL 연대를 측정하여 최소 연대를 사용하는 방법을 사용해야 할 것으로 보임.



Conventional Multiple Grain Dating



Single Grain Dating

▲ 전통적인 OSL 연대측정 시료와 단일입자 분석용 OSL 시료의 비교

- 마지막 빙하기 이후 해빙기 동안 빙붕 퇴적상이 일부 발견되는 로스해 대륙붕 지역의 코어를 대상으로 위의 가설을 검증하기 위해 단일입자 OSL 연대측정을 실시해 보고자 함.

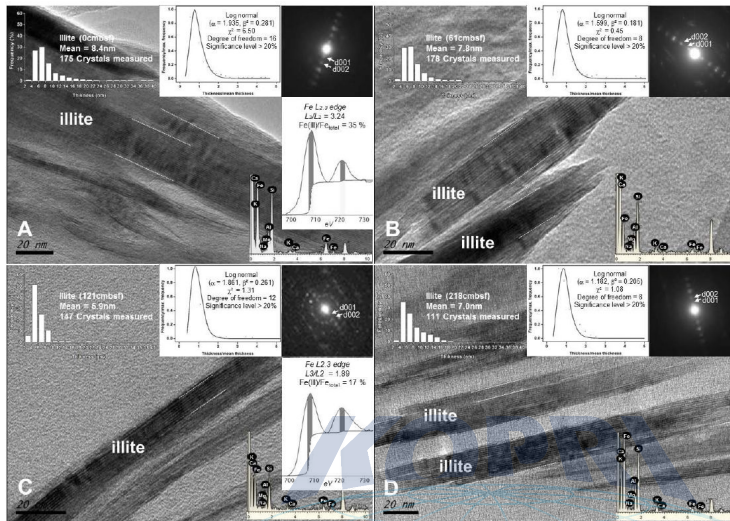
○ 과거 빙권 (빙하 및 해빙)의 규모 변화에 따른 생지화학 (biogeochemical) 지시자 연구

- 빙권에서 일어나는 할로젠 물질의 기초화학반응 및 메커니즘을 연구하여 과거 빙권의 규모에 의한 할로젠물질의 분포특성(해양퇴적물/빙하)을 이해하고 이를 통해 할로젠 물질을 빙하기/간빙기 순환 및 빙권의 규모예측을 위한 지화학적 지시자(proxy)로써 이용하고자 함
- 현재의 빙권 변화가 빙지화학 메커니즘 변화 및 기후변화에 미치는 영향 연구
- 얼음 내의 물질간 산화·환원 반응 연구: 해빙 시 유출되는 물질의 형태와 양 파

약 가능. 자연 환경 변화 뿐 아니라 오염 물질 분야에도 적용 가능.

○ 남극 퇴적물 내 점토광물의 광물학적 특성과 고환경적 의미

- 일라이트 결정도 및 결정 크기: TEM을 이용한 일라이트 구조, 화학성분, packet 크기 분석을 통하여 고환경 유추. 남극 웨델해 라슨 C 지역의 퇴적물 코어로부터의 예비 결과에 따르면 환경에 따라 수층 내 부유 시간 등의 변화가 생기고 이에 따라 광물 내의 산화 수 및 packet 크기 등에 변화가 생길 수 있음



▶ 투과전자현미경 (TEM)으로 관찰한 일라이트 구조의 예시

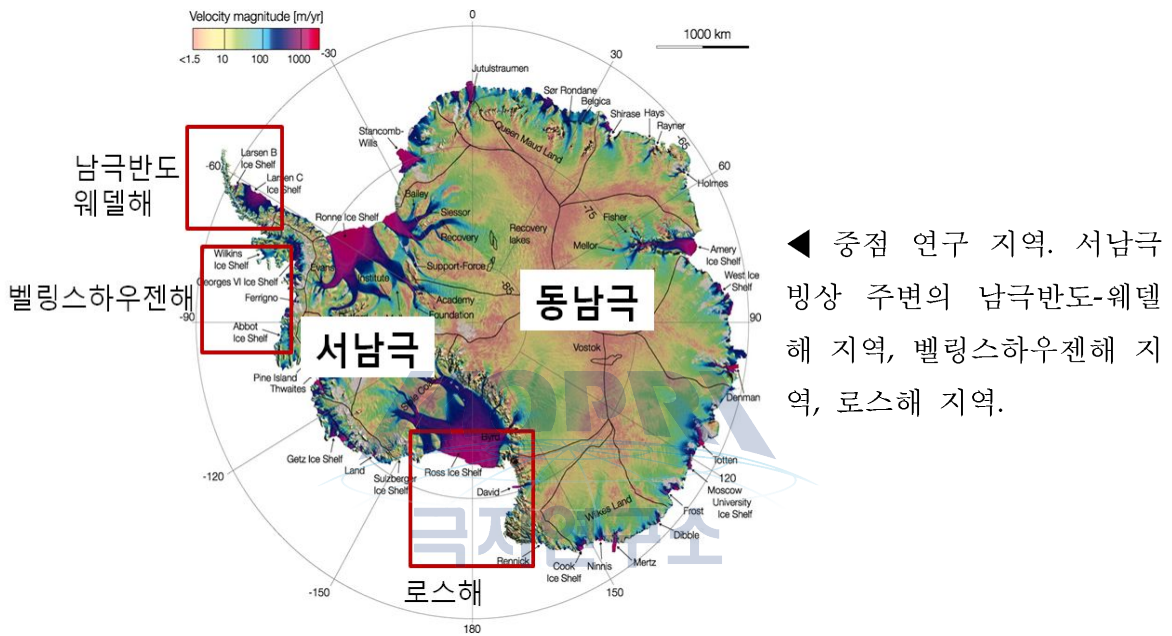
- 빙하기와 간빙기의 퇴적물의 점토광물 조성/구조/결정 크기의 변화로부터 과거 퇴적물 기원지 추적이 가능하며, 이는 고해양 변화를 지시함. 특정 점토광물을 대상으로 하면 전암분석 시보다 보다 정확한 해석이 가능할 것으로 여겨짐.
- 점토 광물 외에도 과거 고환경에 따라 조성/구조 등이 변화하는 광물은 환경 지시자로 사용할 수 있으므로 망간 각 등 해저 침전 광물에 대해서도 조사할 가치가 있음

○ 퇴적물을 이용한 지진 기록 복원 프록시 개발

- 서남극 지역은 조구조적으로 불안정한 지역이므로 지진이 빈번하게 일어나는 지역임. 특히 남극반도 북단 브랜스필드 지역은 퇴적률도 높고 지진활동도 빈번하므로 지진 활동 기록을 살펴보기에 적합한 지역임.
- 지진에 의해 해양퇴적물 내에 생기는 변형 구조를 X-선 사진을 통해 자세히 기재하고 이미 알고 있는 퇴적암의 지진변형구조와 비교하여, 미고결 퇴적물 내의 변형 구조를 지진 활동의 지시자로 개발하고자 함.

나. 연구 지역 제안 및 지역별 이슈

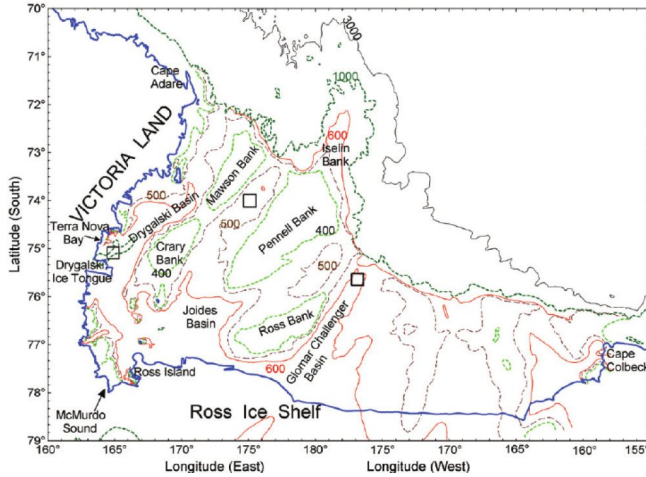
남극 빙상은 크게 서남극 빙상과 동남극 빙상으로 나뉜다. 이 중 서남극 빙상은 기저부가 해수면 아래에 있어 기후 변화와 해양 변화에 매우 민감하게 반응하는 것으로 알려져 있다. 실제로 지난번 간빙기 때는 서남극 빙상이 모두 사라졌다고 한다. 현재 높아진 대기 중 이산화탄소 농도와 이로 인한 온난화의 여파가 서남극 빙상의 안정성에 어떤 영향을 미칠 것인가는 남극 기후 변화 연구의 주요 이슈이다. 본 과제에서는 서남극 빙상의 과거 변화를 살펴 볼 수 있는 여러 지역을 연구 대상 지역으로 제안한다.



◀ 중점 연구 지역. 서남극 빙상 주변의 남극반도-웨델해 지역, 벨링스하우젠해 지역, 로스해 지역.

○ 로스해 대륙붕 지역

- 개요: 북-북동 방향의 해곡 및 뱅크 발달. 과거 수 차례 빙하기의 빙하 발달-전진에 따라 형성되었을 것으로 해석됨. 대륙붕 위에 수심 1000m 가 넘는 깊은 곳도 있음. 중력코어 및 피스톤코어 연구 결과로는 하부의 빙하 기원 다이아믹톤 위를 빙해양 퇴적물-규조가 풍부한 세립 퇴적물이 덮고 있는 층서 배열이 전형적임. 홀로세의 세립퇴적물은 계절적인 공해 환경을 지시하며, 보통 수 cm 두께로 나타나지만 수심이 400m보다 깊은 곳에서는 1-2m 에 달하는 두께로도 나타남.



◀ 로스해 대륙붕. 북-북동 방향의 구조적 분지 및 뱅크들이 발달해 있음

- 로스해 대륙붕에서의 마지막 빙하기의 빙상 범위: 최근에 수행된 로스해의 고해상 음향 탐사, 미화석 분석 및 퇴적물 연구들은 마지막 빙하기 동안 콜먼 섬 근처의 대륙붕 중앙까지 빙상이 진출하였다고 보고 있음. 하지만 코어 자료가 없는 곳도 많고 연대가 명확히 결정된 시료가 많지 않은 실정임. 특히 중부-동부 로스해 코어 시료가 부족함.
- 마지막 빙하기 동안 서남극 빙상과 동남극 빙상의 상대적 중요성: 로스해 대륙붕에서 마지막 빙하기의 빙상은 서남극 빙상일 것으로 추정된 바 있으나 (Conway et al., 1999), 최근의 모델, 해저지형, 퇴적물 기원지 연구들에 따르면 로스해 대륙붕의 서부 지역은 동남극 빙상의 영향권에 있다고 함. 로스해 대륙붕 지역은 서남극 빙상과 동남극 빙상의 상대적 중요성, 두 빙상의 거동 차이 등을 연구하는데 적합한 지역임.
- 최근의 빙붕 붕괴에 따른 퇴적 환경 변화 연구: 2016년 4월 로스해 드라이갈스키 빙설 북단의 난센 빙붕 말단에 있던 틈이 깨지면서 끝단의 빙붕이 붕괴하였음. 이 지역은 장보고 기지 인근에 위치해 있어 접근성이 좋고 극지연구소의 빙붕 관측 연구진이 빙붕 탐사 연구를 계획하고 있는 지역임. 이 과제에서는 난센 빙붕 말단 부근의 퇴적물을 채취하여 빙붕 붕괴에 따라 일어나는 퇴적상 변화를 연구하고자 함.

○ 로스해 대륙사면 및 분지

- 마지막 빙하기 동안 로스해 빙상은 최대 대륙붕 말단까지 발달하였으며 로스해 북쪽의 대륙사면 및 분지 지역은 연중 해빙으로 덮여 있었을 것으로 추정됨. 퇴적환경이 다르므로 대륙붕 지역과는 다른 퇴적기록을 보이며 퇴적률도 더 낮음. 따라서 로스해 대륙사면 및 분지의 drift 퇴적물은 장주기의 기후 변화를 복원하는 데 적합. 2015년 채취한 시료의 예비결과로는 플라이오세 이후의 퇴적 기록을 보존.

- 빙하주기에 따른 고해양 변화 복원 가능: 빙하기 퇴적물과 간빙기 퇴적물의 퇴적상, 고기후 프록시, 퇴적물 기원지 변화 비교 연구에 적합할 것으로 판단됨
- 중기 플라이스토세 전환기 연구: 플라이스토세 동안 빙하주기는 4만년 주기에서 10만년 주기로 변화했는데 이를 중기 플라이스토세 전환기라 함. 빙하주기의 변화 원인과 영향, 이에 대한 남극 빙상의 역할 등은 고기후 연구의 주요 이슈임. 예비 연구에 따르면 일부 코어에는 이 시기의 기록이 남아 있는 것으로 보이므로 더 많은 시료를 채취하여 연구할 가치가 있음.

○ 벨링스하우젠 해 지역

- 벨링스하우젠 해 주변 지역에서는 영국과 독일이 서남극 빙붕의 마지막 빙하기 이후 변동 및 과거 환경 변화를 수행해 오고 있음 (Hillenbrand et al., 2009; Holland et al., 2010; Graham et al., 2011; Larter et al., 2014).
- 이 지역에는 대륙사면에 drift 퇴적층도 발달하고 있으며 이 퇴적층의 형성과 관련하여 남극순환류와 웨델해 기원 해수의 상대적 영향력에 대한 논란이 있음.
- 이 지역에서는 시료에 따라 마지막 빙하기 이후 빙권의 변화에 따른 표층 환경 및 퇴적 환경 변화 뿐 아니라 빙하 주기에 따른 고해양 변화 연구까지 가능함

○ 남극 반도 북부 및 웨델해 지역

- 남극반도 북부 대륙붕 지역 및 웨델해 지역은 수심이 얕고 육지에 가까워 비교적 퇴적물이 높은 편임. 따라서 마지막 빙하기 이후의 고해양/고기후 변화를 고해상도로 복원하는 연구가 주를 이룰 것임
- 특히 일부 지역은 홀로세 동안 높은 생산성을 보이면서 퇴적물이 높은 특성을 보이는데 (예: 브랜스필드 분지, 조인빌 섬 인근, 베가 드리프트) 이런 지역에서는 홀로세의 기후 변동을 고해상도로 복원할 수 있음. 북반구에서 관찰되는 일부 기후 변동이 남극에서도 나타나는지 확인할 수 있는 기회 제공.
- 고해양학적 측면에서는 웨델해에서 기원한 표층수 및 심층수가 남극 반도 서안의 어느 지역까지 영향을 미치는지 살펴보는 것도 흥미로운 연구 주제임. 이 주제를 탐구하기 위해서는 벨링스하우젠 해 및 로스해 대륙사면의 시료까지 종합적으로 살펴볼 필요가 있음.

제 4 장 연구개발결과의 활용계획

4-1. 향후 연구방향

가. 정성적 목표

구분	년도	세부연구목표	연구내용
1차년도	2017	마지막 빙하기 이후의 남극 고해양/고기후 변화	<ul style="list-style-type: none"> - 지화학, 입도, 물리적 특성 분석 - 표층생산성의 변화 복원 - 해빙/빙상의 변화와 관련된 육성기원 물질 유입 변화 복원 - 표층 해수 환경과 저층 해수 환경의 연관성 규명
		플라이오-플라이스토세 남극권 고해양/고기후 변화 복원	<ul style="list-style-type: none"> - 지화학, 입도, 물리적 특성 분석 - 로스해 부근 남빙양 퇴적물로부터 장주기 고해양/고기후 변화를 복원
		고기후 프록시/연대측정법 도입 및 기후 지시자 원리 탐구	<ul style="list-style-type: none"> - 점토광물 조성, 안정동위원소, 우주기원 동위원소 등 다양한 프록시 분석을 통한 다학제적인 고해양/고기후 변화 해석 - ramped pyrolysis 연대측정법의 남극 퇴적물 적용 - 과거 빙권 규모에 영향을 받는 기초 빙-생지화학 연구

구분	년도	세부연구목표	연구내용
2차년도	2018	마지막 빙하기 이후의 남극 고해양/고기후 변화	<ul style="list-style-type: none"> - 지화학, 입도, 물리적 특성 분석 - 남극 대륙붕 퇴적물로부터 마지막 빙하기 이후 빙상 범위 및 안정성 연구 - 최근 빙붕 붕괴 지역에서 빙붕 말단 부근의 퇴적상 변화를 이용한 빙붕 붕괴 지시자 연구
		플라이오-플라이스토세 남극권 고해양/고기후 변화 복원	<ul style="list-style-type: none"> - 지화학, 입도, 물리적 특성 분석 - 로스해 부근 남빙양 퇴적물로부터 지난 해빙기의 퇴적환경 특성 및 빙하 후퇴 양상 복원
		고기후 프록시/연대측정법 도입 및 기후 지시자 원리 탐구	<ul style="list-style-type: none"> - 다양한 프록시 분석을 통한 다학제적인 고해양/고기후 변화 해석 - 퇴적 구조를 이용한 지진 기록 복원 프록시 개발 - 할로젠 물질을 고기후 지시자로 이용하여 과거 해양퇴적물과 빙하 기록의 상호 비교 연구
3차년도	2019	마지막 빙하기 이후의 남극 고해양/고기후 변화	<ul style="list-style-type: none"> - 지화학, 입도, 물리적 특성 분석 - 최근 빙붕 붕괴 지역에서 빙붕 말단 부근의 퇴적상 변화를 이용한 빙붕 붕괴 지시자 연구 - 서남극 빙상의 후퇴 시기 및 양상 연구
		플라이오-플라이스토세 남극권 고해양/고기후 변화 복원	<ul style="list-style-type: none"> - 지화학, 입도, 물리적 특성 분석 - 로스해 부근 남빙양 심해 퇴적물로부터 지난 해빙기의 퇴적환경 특성 및 빙하 후퇴 양상 복원 - 벨링스하우젠해 퇴적물로부터 빙하 주기에 따른 고해양 환경 변화 복원
		고기후 프록시/연대측정법 도입 및 기후 지시자 원리 탐구	<ul style="list-style-type: none"> - 다양한 프록시 분석을 통한 다학제적인 고해양/고기후 변화 해석 - OSL 연대측정법의 남극 퇴적물에의 적용 - 현재의 빙권 변화가 빙지화학 메커니즘 변화 및 기후 변화에 미치는 영향 연구

나. 정량적 목표

구분	국외논문		국내논문		특허출원		기술이전
	SCI* (1저자/공동)	기타	SCI (1저자/공동)	기타	국외	국내	
1차년도 (2017)	5 (2/3)	-					
2차년도 (2018)	6 (3/3)	-					
3차년도 (2019)	7 (3/4)	-					
합 계	18	-					

* 제1저자 및 공동저자(제2저자까지) 기재

4-2. 국내·외 공동연구 추진 계획

- 보다 정확한 고해양/고기후 복원을 위해서는 다양한 연대측정 및 고기후 지시자 자료 획득이 필수적임
- 연대측정 및 고기후 지시자 분석은 전문 분야가 세분화되어 있어 극지연구소 연구원만으로는 다양한 분석을 통한 종합적 해석이 불가능함
- 따라서 국내외 전문가들과의 공동연구를 통해 고기후 복원의 정확도를 향상시켜 신뢰도 높은 연구 결과를 생산하고자 함

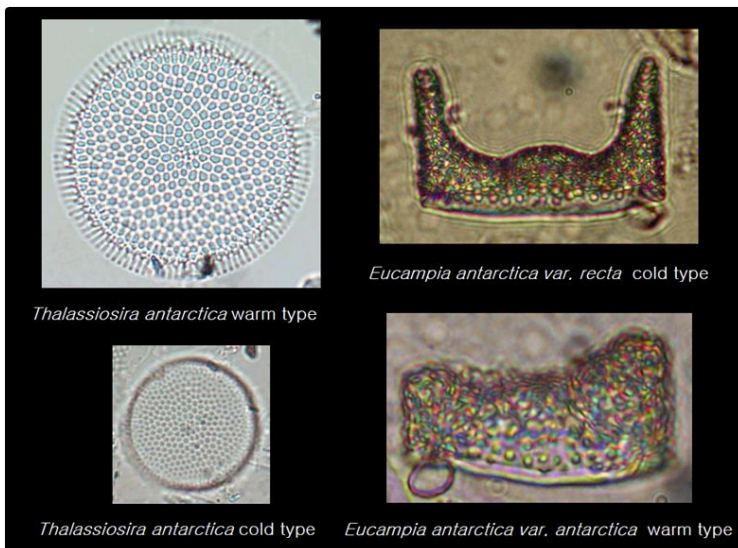
- 퇴적물 연대 측정 연구 (국내 및 국제 공동연구)
 - 남극 퇴적물 연대 결정의 어려움: 퇴적물 내의 연대를 측정하는 데는 퇴적 동시성 탄산염 광물 성분의 방사성 탄소 연대 측정법을 많이 사용하는데, 남극의 경우 이들은 쉽게 용융되어 남아 있지 않는 경우가 많음. 또한 방사성 탄소 동위원소 연대 측정법은 3-4만년 이전의 연대는 알 수 없는 한계가 있음
 - 공동연구의 필요성: 본 과제에서는 남극 퇴적물의 연대를 결정하기 위해 국내·외의 여러 연대측정 전문가들과 공동연구를 통해 다양한 방법을 통해 보다 신뢰도 높은 연대를 찾아내고자 함. 극지연구소에는 특정한 연대측정을 전공으로 하는 연구자가 없기 때문에 공동연구를 수행해야만 함.
 - 우주기원 동위원소 및 OSL 연대 측정법: 국내 연구진과의 공동연구를 통해 추진하

고자 함. 두 연대측정법과 관련하여 자세한 연구 내용은 앞 장에서 기술하였음.

- 고지자기 연대측정법: 뉴질랜드 오타고 대학의 Christian Ohneiser 박사와의 공동연구 예정. 2015년 극지연구소에서 채취한 로스해 대륙사면 퇴적물에 대해 이미 공동연구를 통해 고지자기 연대측정 방법을 적용한 바 있음.
- Ramped pyrolysis 연대측정법: 방사성 탄소 연대 측정 시 퇴적물 내 전체 유기물 성분에 대한 분석이 아니라 열 분해 시 낮은 온도에서 반응하는 퇴적 동시성 유기 성분에 대한 분석 결과만을 사용하는 방법. 국내에서는 적용한 바가 없으며 남극 퇴적물에 대해서 차차 방법론이 만들어져 가는 과정임. 관련 전문가인 미국 남 플로리다 대학의 Brad Rosenheim 교수와 공동연구를 통해 극지연구소의 남극 시료에 대해서도 이 방법을 적용하고자 함.

○ 고환경 해석 및 생층서 확립을 위한 구조 연구 (국내 공동연구)

- 공동연구의 필요성: 남극퇴적물에는 고기후 해석에 많이 사용되는 유공충이 잘 보존되지 않는 대신 구조가 풍부하고 다양하게 나타남. 따라서 구조 종 분석 및 군집 분석 등이 고해양/고기후 복원에 많이 사용됨. 하지만 극지연구소에는 퇴적물 내 구조 분석을 통해 고기후를 분석하는 전문가가 없음. 따라서 위탁연구를 통한 국내 공동연구 형식으로 남극 퇴적물의 구조 분석 연구를 진행하고자 함.
- 구조를 이용한 연구: 구조는 모든 수성 환경에서 나타나므로 매우 유용한 생물학적 환경 지시자임. 빙하기에서 간빙기로의 전이기 동안의 복잡한 환경 변화를 복원하는데 중요한 역할을 함. 극지연구소에서는 2000년 이후 남극 지역의 퇴적물 코어를 대상으로 꾸준히 구조 분석을 해 왔음. 구조는 환경 지시자일 뿐 아니라 연대 지시자이기도 함. 몇몇 구조 종은 멸종과 진화에 따라 특정 시기를 지시하므로 생층서 연대 결정에 도움이 됨. 빙하 주기에 따른 기록의 일부 유실이 있을 경우 특히 유용함.



◀ 남극에서 환경 지시자로 흔히 사용되는 구조 종들의 예시. 같은 종이라도 환경에 따라 형태가 다르게 나타남.

- 빙권 변화와 생지화학적 지시자 연구 (국내 및 국제 공동연구)
 - 빙권 시료에서의 할로젠 물질 분석: 이태리 CNR Andrea Spolaor. 퇴적물에서 할로젠 물질 분석법 개발에 필요.
 - 빙지화학 반응 모델링: 스페인 물리화학연구소 Alfonso Saiz-Lopez. 빙지화학 반응 모델링을 통한 전지구적 영향 도출.
 - 얼음 내 유기 물질과 무기 물질 간의 산화·환원 반응: 국내 공동 연구. 해빙 시 극지 환경 변화 예측에 필요.

- 퇴적물을 이용한 지진 기록 복원 프록시 개발 (국내 공동연구)
 - 지진 활동에 따라 퇴적물의 변형이 일어나면 변형구조가 퇴적물 내에 남게 되는데, 이를 근거로 과거의 지진 활동의 빈도와 강도를 복원할 수 있을 것임
 - 공동연구의 필요성: 남극 퇴적물 내의 변형 구조가 지진에 의한 것인지 파악하기 위하여 퇴적물 및 퇴적암 내의 지진 변형 구조와의 비교 연구가 필요함. 이를 위해 국내 퇴적학 전문가와 공동연구를 수행하고자 함.

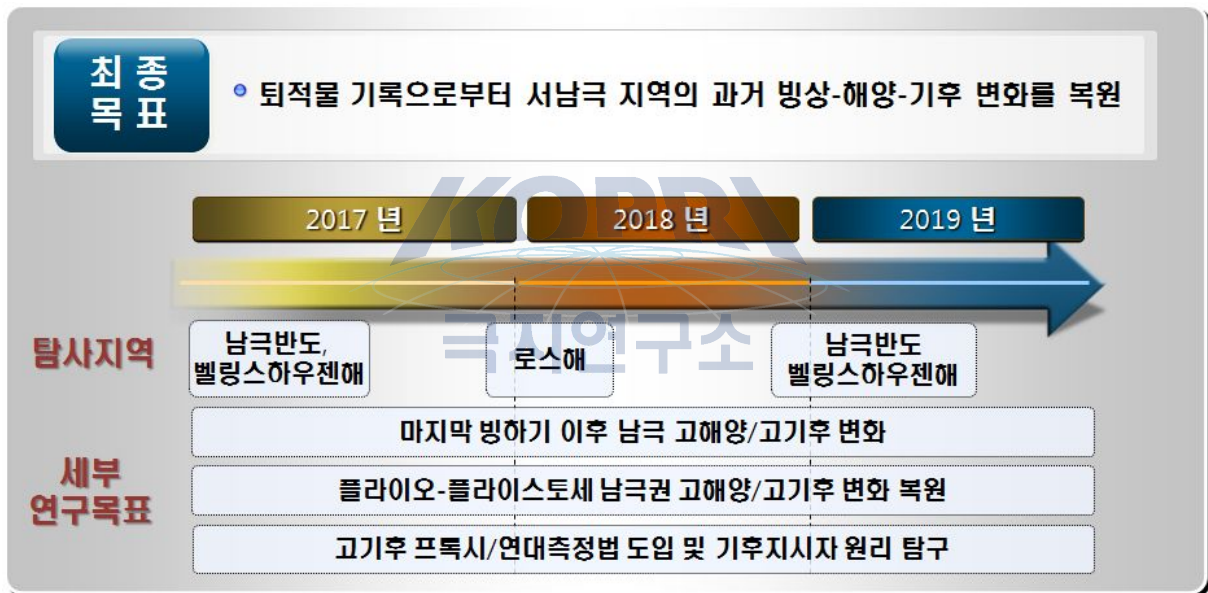
- 기타 남극 고기후 전문가들과의 공동연구 (국내 및 국제 공동연구)
 - 공동연구의 필요성: 남극은 지역 별로 환경 차이가 심해, 세계적 수준의 연구 결과 생산을 위해서는 각 지역의 경험 있는 연구진과의 협력이 중요함.
 - 남극 반도 지역: 마지막 빙하기 이후 남극 라슨 빙봉 지역 및 남극 반도 지역의 고기후 연구를 오랫동안 수행해 온 미국 연구진과의 협력 연구를 수행하고자 함. 미국 남플로리다 대학의 Eugene Domack을 비롯한 LARISSA 연구팀과 협력 예정.
 - 로스해 지역: 로스해 지역은 미국, 뉴질랜드, 이탈리아, 독일이 과학 기지를 세운 지역으로 남극의 타 지역에 비해 비교적 많은 연구가 이루어지고 있음. 이 중 뉴질랜드는 뉴질랜드와 비슷한 경도에 있는 로스해 지역 연구에 집중하여 질 좋은 연구 결과를 생산하고 있음. 또한 뉴질랜드의 고기후 기록과 남극해 기록, 남극 빙상 부근의 기록을 대비하는 연구도 추진하고 있어 지구 규모의 기후 변화 연구도 가능함. 뉴질랜드는 대학 및 연구소 연구진 사이의 협력이 잘 이루어지고 있으므로 뉴질랜드와 협력 연구를 하면 다양한 프록시 적용이 가능함. 뉴질랜드 빅토리아 대의 Tim Naish 교수를 비롯하여 빅토리아대, 오타고대, GNS 등 다양한 기관의 연구진과의 협력 연구를 예정하고 있음. 국내 연구진 중에도 로스해 대륙사면 서쪽의 Wilkes 분지 쪽에서 수행한 IODP 프로젝트에 참여한 연구자가 있어 로스해 대륙사면/분지 퇴적물에 대해 공동연구를 수행하면 좋은 성과를 낼 수 있을 것으로 기대됨.
 - 벨링스하우젠 해: 벨링스하우젠 해의 drift 퇴적물에 대해서는 영국 BAS와 독일

AWI의 연구진들이 논문을 출판하였음. 국내에서는 이 지역에 대해 아직 연구한 바 없으므로 양국 연구진과의 협력 연구를 통해 새로운 연구 방향을 도출할 수 있을 것으로 판단됨

4-3. 연구개발 사업 규모 (직접비)

연구기간(년)	연구개발비(백만원)		
	2017	2018	2019
2017~2019 (3년간)	1,500	1,500	1,500

4-4. 총 연구기간 로드맵



4-5. 인프라 활용 로드맵

인프라명	연도	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월
남극 세종 과학기지	2017											10	30
	2018	10										10	30
	2019	10											
남극 장보고 과학기지	2017	10											
	2018	10											
	2019	10											

인프라명	연도	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월
북극 다산 과학기지	2017												
	2018												
	2019												
쇄빙 연구선 아라온	2017		2	6	6								
	2018		2	6	6								
	2019		2	6	6								

* 활용 시기에 음영표시 및 활용일수 작성

- 세종과학기지: 빙-생지화학 프록시 개발 현장 실험
- 장보고과학기지: 육상 빙하후퇴사 연구를 위한 우주기원 동위원소 분석 시료 채취. 헬기 사용.
- 쇄빙연구선 아라온: 남극반도 및 벨링스하우젠해 (2017년, 2019년), 로스해 (2017년, 2018년)



제 5 장 참고문헌

- Anderson, J.B., Shipp, S.S., Lowe, A.L., Wellner, J.S., Mosola, A.B., 2002, The Antarctic ice sheet during the Last Glacial Maximum and its subsequent retreat history: a review. *Quaternary Science Reviews*, 21, 49-70.
- Anderson, J.B., Conway, H., Bart, P.J., Witus, A.E., Greenwood, S.L., McKay, R.M., Hall, B.L., Ackert, R.P., Licht, K., Jakobsson, M., and Stone, J.O., 2014, Ross Sea paleo-ice sheet drainage and deglacial history during and since the LGM. *Quaternary Science Reviews*, 100, 31-54.
- Church et al., 2013, Ch 13 Sea-level change, IPCC 5th assessment report
- Conway, H., Hall, B.L., Denton, G.H., Gades, A.M., and Waddington, E.D., 1999, Past and future grounding-line retreat of the West Antarctic Ice Sheet. *Science* 286, 280-283.
- Cook, C.P., van de Flierdt, T., Williams, T.J., Hemmings, S.R., Iwai, M., Kobayashi, M., Jimenez-Espejo, F.J., Escutia, C., Gonzalez, J.J., McKay, R., Passchier, S., Bohaty, S.M., Tauxe, L., Sugisaki, S., Lopez Glindo, A., Patterson, M.O., Riesselman, C., Sangiorgi, F., Pierce, E.L., Brinkhuis, H., and IODP 318 Scientists, 2013, Dynamic behaviour of the East Antarctic Ice Sheet during Pliocene warmth. *Nature Geosciences*, 6, 765-769.
- DeConto, R.M. and Pollard, D., 2016, Contribution of Antarctica to past and future sea-level rise. *Nature*, doi:10.1038/nature17145
- Elderfield, H., Ferretti, P., Greaves, M., Crowhurst, S., McCave, I.N., Hodell, D., and Piotrowski, A.M., 2012, Evolution of ocean temperature and ice volume through the mid-Pleistocene climate transition. *Science* 337, 704-709
- Gasson, E., DeConto, R., Pollard, D., and Levy, R., 2016, Dynamic Antarctic ice sheet during the early to mid-Miocene. *PNAS* 113, 3459-3464.
- Golledge, N.R., Levy, R.H., McKay, R.M., Fogwill, C.J., White, D.A., Graham, A.G.C., Smith, J.A., Hillenbrand, C.-D., Licht, K.J., Denton, G.H., Ackert, R.P.Jr., Maas, S.M., and Hall, B.L., 2013, Glaciology and geological signature of the Last Glacial Maximum Antarctic ice sheet. *Quaternary Science Reviews* 78, 225-247.
- Golledge, N. R., Menviel, L., Carter, L., Fogwill, C.J., England, M.H., Cortese, G., and Levy, R.H., 2014, Antarctic contribution to meltwater pulse 1A from reduced

- Southern Ocean overturning. *Nature Communications* 5:5107 doi: 10.1038/ncomms6107
- Graham et al., 2011. An improved bathymetry compilation for the Bellinghousen Sea, Antarctica, to inform ice-sheet and ocean models. *The Cryosphere* 5, 95-106.
- Hillenbrand et al., 2009. Clay mineral provenance of sediments in the southern Bellinghousen Sea reveals drainage changes of the West Antarctic Ice Sheet during the Late Quaternary. *Marine Geology* 265, 1-18.
- Holland et al., 2010. Ice and ocean processes in the Bellinghousen Sea, Antarctica. *Journal of Geophysical Research (Solid Earth)* 115, 1978-2012..
- IPCC, 2013, 5th Assessment Report
- Larter et al., 2014. Reconstruction of changes in the Amundsen Sea and Bellinghousen Sea sector of the West Antarctic Ice Sheet since the Last Glacial Maximum. *Quaternary Science Reviews* 100, 55-86.
- Lee, J.I., Yoon, H.I., Yoo, K.-Ch., Lim, H.S., Lee, Y.I., Kim, D., Bak, Y.-S., and Itaki, T., Late Quaternary glacial-interglacial variations in sediment supply in the southern Drake Passage. *Quaternary Research* 78, 119-129.
- Levy, R., Harwood, D., Florindo, F., Sangiorgi, F., Tripathi, R., von Eynatten, H., Gasson, E., Kuhn, G., Tripathi, A., DeConto, R., Fielding, C., Field, F., Warny, S., Willmott, V., Action, G., Panter, K., Paulsen, T., Taviani, M.T., and SMS Science Team, 2016, Antarctic ice sheet sensitivity to atmospheric CO₂ variations in the early to mid-Miocene. *PNAS* 113, 3453-3458.
- Livingstone, S., O'Cofoigh, C.R., Hillenbrand, C.-D., Vieli, A., Jamieson, S., 2012, Antarctic palaeo-ice streams, *Earth-Science Review*, 111, 90-128.
- Masson-Delmotte et al., 2013, IPCC Ch. 5 Information from Paleoclimate Archives
- Miller, K.G., Wright, J.D., Browning, J.V., Kulpecz, A., Kominz, M., Naish, T.R., Cramer, B.S., Rosenthal, Y., Peltier, W.R., and Sosdian, S., 2012, High tide of the warm Pliocene: Implications of global sea level for Antarctic deglaciation. *Geology* 40, 407-410.
- Patterson, M.O., McKay, R., Naish, T., Escutia, C., Jimenez-Espejo, F.J., Raymo, M.E., Meyers, S.R., Tauxe, L., Brinkhuis, H., and IODP Expedition 318 Scientists, 2014, Orbital forcing of the East Antarctic Ice Sheet during the Pliocene and Early Pleistocene. *Nature Geosciences*, 7, 841-846.
- Pollard, D., DeConto, R.M., and Alley, R.B., 2015, Potential Antarctic Ice Sheet retreat driven by hydrofracturing and ice cliff failure. *Earth and Planetary Science Letters* 412, 112-121.

- The RAISED consortium, Bentley, M.J. and others, 2014, A community-based geological reconstruction of Antarctic Ice Sheet deglaciation since the Last Glacial Maximum. *Quaternary Science Reviews* 100, 1-9.
- Rebesco, M., Domack, E., Zgur, F., Lavoie, C., Leventer, A., Brachfeld, S., Willmott, V., Halverson, G., Truffer, M., Scambors, T., Smith, J., and Pettit, E., 2014, Boundary condition of grounding lines prior to collapse, Larsen-B Ice Shelf, Antarctica. *Science* 345, 1354-1358.
- Reinardy, B.T.I., Escutia, C., Iwai, M., Jimenez-Espejo, F.J., Cook, C., van de Flierdt, T., Brinkhuis, H., 2015, Repeated advance and retreat of the East Antarctic Ice Sheet on the continental shelf during the early Pliocene warm period. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 422, 65-84.
- Weber, M.E., Clark, P.U., Kuhn, G., Timmermann, A., Sprenk, D., Gladstone, R., Zhang, X., Lohmann, G., Menviel, L., Chikamoto, M.O., Friedrich, T., Ohlwein, C., 2014, Millennial-scale variability in Antarctic ice-sheet discharge during the last deglaciation. *Nature* 510, 134-138.



주 의

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