

서남극 온난화에 의한 해양-빙하 상호작용과
빙하후퇴 연구과제 발굴을 위한 기획연구

Survey on Global Research Trend
for Ocean-Ice Interaction &
Antarctic Glacier Retreat



2016. 5. 31.

한 국 해 양 과 학 기 술 원
부 설 극 지 연 구 소

제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “서남극 온난화에 의한 해양-빙하 상호작용과 빙하후퇴 연구과제 발굴을 위한 기획연구”
과제의 최종보고서로 제출합니다.

2016. 5. 31.

연구책임자 : 이 상 훈

참여연구원 : 양 은 진

김 태 완

조 경 호

박 기 홍

정 진 영

박 지 수

나 형 술

하 선 용

김 소 영

안 인 영

김 현 철

신 형 철

최 은 정



보고서 초록

과제관리번호		해당단계 연구기간		단계 구분	(해당단계) / (총단계)
연구사업명	중 사 업 명				
	세부사업명				
연구과제명	중 과 제 명				
	세부(단위)과제명	서남극 온난화에 의한 해양-빙하 상호작용과 빙하후퇴 연구과제 발굴을 위한 기획연구			
연구책임자	이 상 훈	해당단계 참여연구원수	총 : 14 명 내부 : 14 명 외부 : 0 명	해당단계 연구비	정부: 5,000 천원 기업: 천원 계: 5,000 천원
연구기관명 및 소속부서명	극지해양환경연구부		참여기업명		
국제공동연구	상대국명 :		상대국연구기관명 :		
위 탁 연 구	연구기관명 :		연구책임자 :		
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자이내)					보고서 면수
1. 아문젠해로 대표되는 서남극은 1950년대 기온관측 이후 지속적, 가속적으로 온난화, 최근 10년간 0.25도 상승, 2000년대 빙하후퇴 속도는 90년대보다 5배 가속 - 그러나 아문젠 결빙해역을 정기적으로 자유로이 출입하며 연구하는 쇄빙연구선은 한국 아라온 뿐 (2010년 이후 현재까지 독일 Polarstern, 미국 NBP, 영국 JCR이 부정기 간헐적으로 아문젠 외곽해역에 1-2회 운항) 2. 2010.5월 - 2016.12월 수행 극지연구소 아문젠 연구사업 (사업명: 서남극 아문젠해역 생태계와 해양순환 변동연구)은 4회의 아문젠해역 현장조사를 수행, 2015. 12월 현재 39건의 저명 SCI 국제논문 발표를 통하여 다음을 규명, 파악함 (5개국 국제공동). 가. 아문젠해 해류순환 패턴과 열수지 (심층 온난수 유입 및 순환) 규명. 아문젠해 빙붕과 빙하 후퇴의 원동력인 해양의 열공급 기작과 열수지 규명. 나. 아문젠해 생태환경 (수온, 염도, 미량원소, 영양염, 해수순환 등)과 생태계 (주요 생물군, 군집 구조, 먹이망 섭식 등), 생리현상 (광합성, 대사작용 등) 및 다. 생지화학순환 (탄소 및 기타 온실기체물질의 생물학적 화학적 거동)에 대한 주요 관측/연구 거점을 확보하고, 생태계 구조와 기능, 주요종 분포, 생지화학순환 체계도 (Flux Chart)를 완성, 파악함. 3. IPCC Report 5 (2014)는 지구기후변화의 가장 심각한 재앙은 해수면 상승임을 경고하고, 다음을 강조. - 온난화 과정에서 지구에 축적된 열의 90% 이상이 해양에 흡수되었으나, - 해양에 의한 남극빙하의 소멸 속도와 과정에 대한 과학적 관측 자료는 부족하며, - 불행히도 남극빙하의 소멸은 가속적이며 불가역적 (이제는 되돌이킬 수 없음). 4. 따라서 서남극 해양연구에서 가장 시급한 과제는 해양-빙하(빙붕) Ocean-Ice 상호작용, 빙하 융빙 및 후퇴에 따른 해양환경 (해양순환, 생태환경, 탄소/온실기체순환 등) 변화, 빙하 후퇴속도 규명 연구임. 5. 본 기획과제 보고서는 기 수행 아문젠 연구결과를 토대로, 주요 남극연구국가의 관련 프로그램과 공조하여, 남극 빙하후퇴 속도추정과 빙하후퇴에 따른 파급효과 (해양순환 변동, 해수면 상승) 를 극지연구소가 선도하여 연구하는, 국제공동 광대역 종합해양 연구과제를 발굴 제안함.					
색 인 어 (각 5개 이상)	한 글	서남극 온난화, 빙붕·빙하후퇴, 해양순환 변동, 생지화학순환 변동, 생태계 모니터링, 해수면 상승			
	영 어	Western Antarctic Warming, Ice Melting, Ocean Circulation, Biogeochemical Cycle, Ecosystem Monitoring, Sea-Level Rise			

요 약 문

I. 제목: 서남극 온난화에 의한 해양-빙하 상호작용과 빙하후퇴 과제발굴을 위한 기획연구

II. 연구개발의 목적 및 필요성

- 목적: 2017-2019간 수행될 극지연구소 제 4기 주요사업으로서 합당하고 과학적으로 의미 있는 연구주제와 효과적인 수행방안의 주요 골격을 발굴, 제안하고자 함.
- 필요성: 서남극은 지난 50년 동안 가속적으로 온난화. IPCC Report 5 (2014)는 지구기후변화의 재앙적 결과로 빙하의 소멸에 의한 해수면 상승이 초래될 것임을 경고. SCAR Horizon Scan은 남극 온난화에 의한 빙하 소멸을 주요 과제로 선정.

III. 국내외 기술개발 현황

- 국내 현황: 극지연구소는 국내 유일 서남극 아문젠해 종합해양연구를 2010-2016간 수행해 오고 있으며, 아라온을 활용, 4회 총 103일의 아문젠해 현장조사를 수행, 8개 국내 기관, 6개국 9개 외국 기관, 국내 인원 연 120명, 외국 인원 연 20명의 지구환경 연구자들이 참여, 서남극 온난화 원인과 추세, 서남극 물질순환과 생태계에 미치는 온난화 파급효과를 연구하여 2015. 12월 현재 39편의 국제저명 SCI 학술논문을 생산함.
- 국외 현황: 영국은 2010-2015간 750만 파운드를 투자, iSTAR (Ice Stability: 서남극 빙붕 소멸연구)를 수행한데 이어 FISS (Filchner Ice Shelf System, 2015-2020) 프로그램으로 6년간 남극 웨델해 빙붕 소멸속도 관측과 모델링 연구를 수행. SOOS의 NECKLACE 프로그램은 FISS 프로그램을 국제적으로 확대 발전시켜, 남극대륙 전체의 주요 빙붕붕괴 현장을 각국의 국내프로그램이 분담, “환남극 빙하후퇴 관측과 모델링 연구”를 수행하는 국제공조 프로그램. SOCCOM Southern Ocean Carbon and Climate Observations and Modeling 프로그램은 미국 과학재단이 2014-2018간 지원하고 Princeton 대학, UW, MBARI, Scripps 등이 컨소시엄으로 참여하는 남빙양 탄소순환과 기후모델링 연구프로그램이며, 생태계 모니터링 연구의 세계적 표준이 된 US Antarctic LTER Long-Term Ecosystem Research 프로그램이 1990부터 현재까지 계속 남극반도-벨링스하우젠 해역의 남극해 생태계와 생지화학순환을 장기모니터링해 오고 있음.

IV. 기획연구가 제안하는 주요과제의 연구목표와 연구내용

- 아문젠해 온난화에 따른 빙붕 열교환 속도, 빙붕/빙하 소멸속도를 밝히고, 국제공동연구와 환남극 데이터 합성을 통하여, 남극전체 빙하소멸과 해수면상승 추세를 규명.
- 온난화 및 용빙수 유입에 따른 해양순환 변동과 해수화학 변동에 기인하는 생태환경, 생태/생리활동, 탄소/온실기체 생지화학순환 등의 변화를 추적, 생태계 변화와 지구기후변동 추세를 규명.

목 차

제 1 장 기획연구의 목적과 필요성

- 1-1 기획연구의 목적
- 1-2 기획연구의 필요성
- 1-3 기획연구의 내용

제 2 장 국내외 기술개발 현황

- 2-1 국내 동향
- 2-2 국외 동향

제 3 장 기획연구가 제안하는 주요과제의 연구목표와 연구내용

- 3-1 연구목표와 내용
- 3-2 연차별 연구목표와 내용
- 3-3 국내외 공동연구 추진 계획
- 3-4 연구개발 사업 규모
- 3-5 총 연구기간 로드맵
- 3-6 인프라 활용 로드맵



제 4 장 연구개발결과의 활용계획

- 4-1 향후 활용방안
- 4-2 과학적 산물

제 5 장 참고문헌

제 6 장 참고자료

본 문

(작 성 요 령)

1. 본문의 순서는 장, 절, 1, 가, (1), (가), ①, ㉔, 등으로 하고,
 - 장은 17 포인트 중고딕체
 - 절은 15 포인트 명조체
 - 본문은 11 포인트 신명조체로 한다.단, 본문의 내용중 중요부분은 중고딕체로 사용할 수 있다.
2. 장은 원칙적으로 페이지를 바꾸어 시작한다.
3. 본문은 명조체 11 포인트 횡으로 작성한다.
4. 페이지 번호는 하단 중앙 끝에 11 포인트로 한다.
5. 각주는 해당 페이지 하단에 8포인트 활자로 표기하며, 본문과 구분토록 한다.
6. 페이지수는 편집순서 2의 제출문부터 시작한다.
단, 삽입물이 있을 때는 그 삽입물의 크기에 불문하고 1면을 한 페이지로 하여 일련번호를 붙인다.
7. 한글, 한문, 영문을 혼용할 수 있다.
8. 뒷면지에 주의문을 넣는다.
- 9.참고문헌(reference) 인용의 경우 본문 중에 사용처를 반드시 표시한다.

제 1 장 기획연구의 목적 및 필요성

1-1. 기획연구의 목적

본 기획연구는 2017-2019간 수행될 극지연구소 제 4기 주요연구사업으로서, 남극해 해양-빙하 상호작용과 빙하 후퇴현상을 연구하기 위하여, 극지연 주요사업으로 합당하고 과학적으로 의미있는 연구주제와 효과적인 수행방안의 주요 골격을 발굴, 제안하는데 있다.

1-2. 기획연구의 필요성

본 기획연구는 아래와 같은 이유로 인하여 남극해, 특히 서남극해에서 “해양-빙하 상호작용과 빙하 후퇴현상” 연구가 극지연구소 주요사업으로 시급히 수행되어야 할 필요성이 있다고 판단한다.

필요성 1. 여타 남극지역에 비하여 서남극에서 상대적으로 급격한 온난화 진행

- 서남극의 급격한 온난화 (Steig et al. 2009; NASA 2009)
- 서남극은 지난 50년 동안 가속적으로 온난화가 진행,
- 최근 10년간 섭씨 0.25도 상승했으며, 그 속도는 점차 빨라져서,
- 2000년대 빙하후퇴 속도는 90년대보다 5배 가속된 것으로 판단

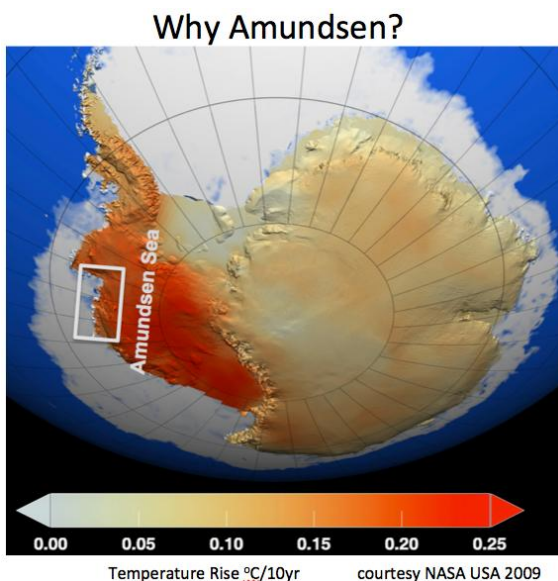
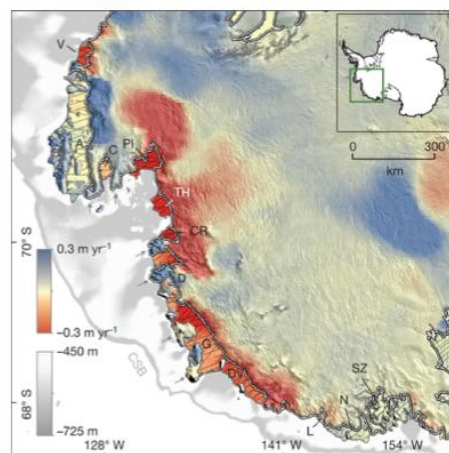


그림 1. 1957년 남극기온관측 이래 2006년까지 현장실측값과 위성관측값을 교합·보정 추산한 자료 (NASA 2009)

Surface $\Delta h/\Delta t$ on the ice shelves and grounded ice of the Amundsen/Bellingshausen Sea coasts, 2003–2008.



HD Pritchard et al. *Nature* **484**, 502-505 (2012) doi:10.1038/nature10968

그림 2. 서남극 온난화의 가속적 진행으로 녹아 후퇴하는 아문젠/벨링스하우젠 해역의 빙하와 빙상 (위성 관측값; Pritchard et al. 2012))

필요성 2. IPCC Report 5 (2014)는 해양온난화와 해수면상승에 대한 경고

- IPCC Report 5 (기후변화에 관한 정부간 협의체 제5차 종합보고서, 2014)에 따르면,
 - 지구에 축적된 열의 90% 이상이 해양에 흡수되어, 해양온난화와 빙하후퇴가 진행.
 - 그러나 해양에 의한 남극빙하의 소멸 속도와 과정에 대한 과학적 자료는 부족.
 - 결국 지구기후변화의 가장 심각한 재앙은 해수면 상승으로 나타나리라 경고.
 - 남극빙하의 소멸은 가속적이고 비가역적 (이제는 되돌이킬 수 없음) 이라 판단.

- 해발 1m 지역에 이 시각 현재 1억 5천명의 인류가 거주
- 해발 30m 이내 지역에 전 인류, 재화, 문명의 반 이상이 존재

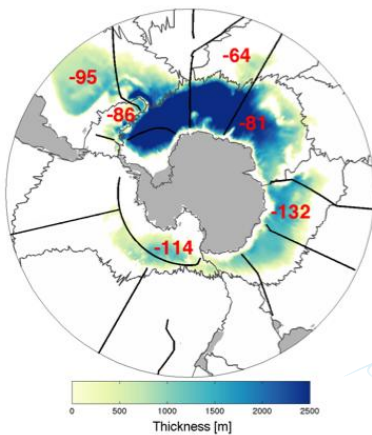


그림 3. 1980-2000년간 관측된 자료에 의하면, 지구온난화로 축적된 열에 의하여 남극대륙 주변부 저온 심층부 해수가 점차 줄어들고 있다. 아문젠 해역에는 이미 저온 심층해수가 사라졌다 (빨간 글씨는 심층해수가 얇아지는 속도, m/10년; Purkey & Johnson, 2012; NOAA, 2012)

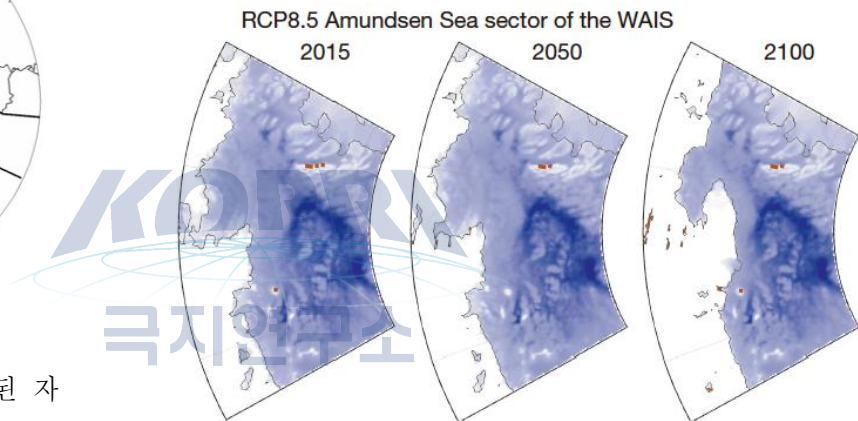


그림 4. 서남극 아문젠해역 빙하후퇴 예측모델에 의하면 75년 후 (2100년)에 아문젠 빙상 (Pine Island, Thwaites, Dotson, Getz)은 100 km 이상 후퇴하며, 전세계 해수면은 최소한 1미터 상승한다 (DeConto & Pollard, 2016). 해발 1m 지역에 현재 1억 5천명의 인류가 거주하고 있으며, 해발 30m 이내 지역에 전 인류, 재화, 문명의 반 이상이 존재한다.



그림 5. 지구온난화 과정에서 열을 흡수하여 따뜻해진 해양이 남극 빙붕이 녹아 후퇴하는 주요 원인이라는 Science 기사 (2014)

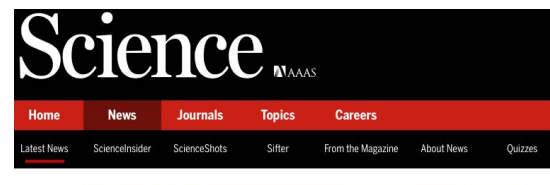


그림 6. 아문젠해 Pine Island와 Thwaites 빙하는 건드리기만 해도 무너져내릴 지경이 되었으며, 서남극 빙하가 녹으면 해수면은 3m 상승하리라는 Science 기사 (2015)

필요성 3. SCAR Horizon Scan 남극과학위원회가 제안한 주요 과학적 의제

- SCAR Horizon Scan (Kennicutt II et al. 2014a, 2014b)에서 제시한 7개 주요 분야의 80개 Key Scientific Questions (남극과학연구에서 시급히 다루어야 할 주요 과학적 의제) 중에서 약 1/4이 해양-빙하-해수면 상호작용 연구와 직접 관련되어 있다.
 - Cluster 2. Southern Ocean and sea ice in a warming world
 - Cluster 3. Antarctic ice sheet and sea level
- 의 Key Scientific Question (첨부 1 참조) 중에서 10개의 연구주제 (첨부 2 참조) 관련.

필요성 4. 2030 극지연구소 연구부문 발전전략에 직접 기여하는 연구주제

- “서남극해 해양-빙하 상호작용과 빙하 후퇴현상 연구”는 2030 극지연 발전전략에 아래와 같이 완전히 부합되는 연구주제이다
 - 3대 전략목표의 2번 “극지의 변화 원인 규명 및 대응”
 - 5대 핵심연구분야의 2번 “극지 환경변화 원인파악 및 영향 파악 및 예측”

1-3. 기획연구의 내용

본 기획연구는 선행연구사업 “서남극 아문젠해역 생태계와 해양순환 변동 연구 (2010-2016)”의 연구성과 및 결과를 토대로, 국내외 관련 기술개발 연구동향을 조사하고 발전방향을 예측함으로써, 새로운 연구사업 “서남극해 해양-빙하 상호작용과 빙하 후퇴현상 연구”에서 지향해야 할 차별화되고 진화한 연구내용과 연구목표를 설정하였다.

제 2 장 국내외 기술개발 현황

2-1. 국내 동향

- 극지연구소는 국내에서 유일하게 서남극 아문젠해 종합해양연구를 2010부터 수행해 오고 있다. 아라온을 활용한 4회의 아문젠해 현장조사를 통하여 총 103일간, 국내인원 연 120명, 국외인원 연 20명의 지구환경과학 연구자들이 아문젠 해역에서 현장조사를 수행하였다.
- 글로벌 이슈대응 국제공동연구 K-POLAR 사업으로 시작한 KOPRI 아문젠 프로젝트에 2010-2016 동안 참여한 국내 기관은 해양과학기술원을 비롯하여 서울대, 부산대 등 8개 기관 (위탁연구기관 포함)이며, 외국 기관은 미국, 영국, 스웨덴 등 6개국 9개 기관이다.
- 다학제적 광대역 종합해양기후변화연구를 표방한 KOPRI 아문젠 프로젝트는 아래와 같은 최종 연구목표를 달성하였다.

- 서남극 온난화의 원인과 추세 규명 (물리분야)
 - 온난화 모델시스템으로서 아문젠 결빙해역의 해류순환패턴을 규명
 - 아문젠 결빙해역 해류와 열 유입 시뮬레이션 모델링 가동 (열수지 파악)
 - 대기-해양-해빙 상호작용에 의한 온난화 진행과정 Mechanism 파악
- 온난화가 서남극 물질순환과 생태계에 미치는 과급효과 (화학 및 생물 분야)
 - 탄소 등 온실기체의 생지화학적 물질순환 Flux 파악
 - 생태/생리현상의 기후환경변화에 대한 반응, 생태계 구조 (주요 종조성 및 분포 등) 기초조사 완료

- 아문젠해 온난화와 물질순환 및 생태계 관련 연구논문은 2012년부터 출간되기 시작하여, 국제저명학술지 SCI 논문만 추렸을 때, 2015년 12월 현재 39편으로 아래 표와 같으며, 2016년에는 13편 출간을 예상하고 있다. 이 중에는 두 편의 Science 논문과 1편의 PNAS 논문이 포함되어 있으며, 2016년 1월에는 Deep Sea Research II에 KOPRI Amundsen Project에 관한 Special Issue를 발간, 14편의 연구논문과 1편의 리뷰 논문을 발표하였다.

Area of SCI pub	2012	2013	2014	2015	Total
Physics	1	2	2	3	8
Chem/GeoChem	0	0	1	4	5
Bio/BioChem	3	5	8	10	26
Total	4	7	11	17	39

그림 7. KOPRI 아문젠과제에서 생산된 분야별, 연도별 SCI 국제논문

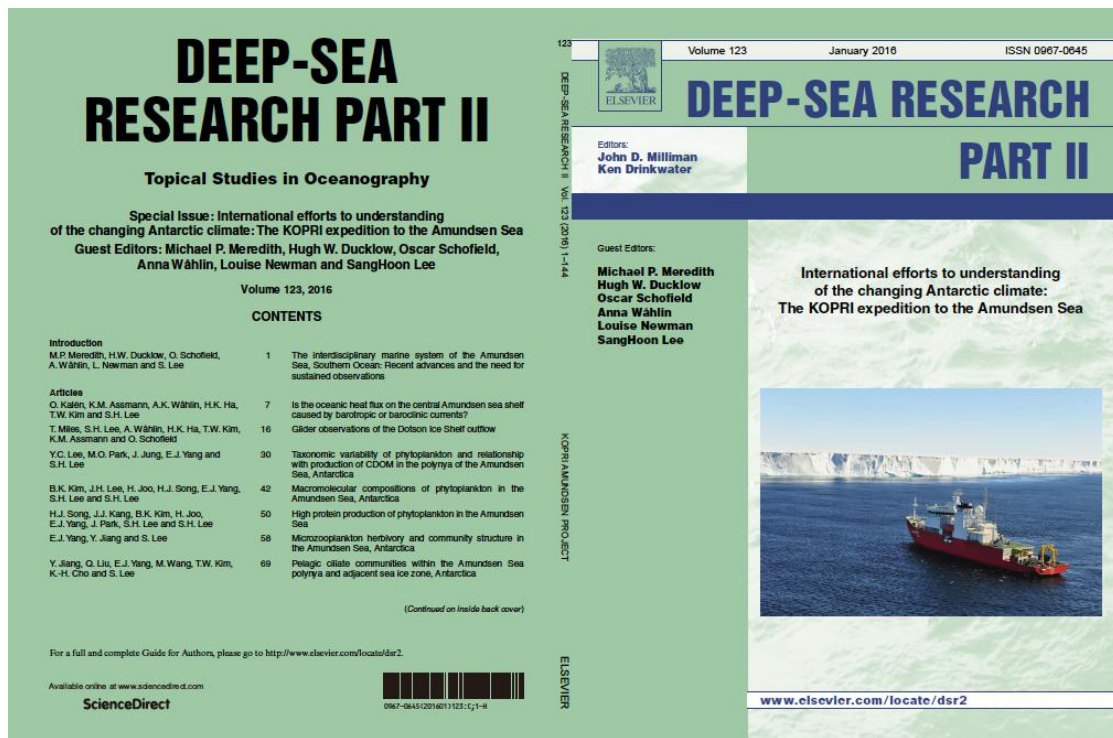


그림 8. 2016년 1월 발간된 KOPRI Amundsen Project Special Issue. 14편의 Research Article, 1편의 Review Article과 함께, 무너져 내리는 아문젠 빙붕 앞에 정박한 아라온호 사진이 표지에 실렸다 (Deep Sea Research II)

- 과학적 성과 이외에도, 국제적 연구그룹이 동참하는 Leading Science를 수행하고, 장기무인 해양관측장비, 자동실시간 레이다관측자료 위성전송기술, 웹기반 자동항행 해양관측장비 등 첨단장비와 기술을 적극 접목, 활용함으로써 다음과 같은 성과를 이루었다.
 - 급속 온난화 해역에 다층(多層; 인공위성 - 심해저) 중장기 관측시스템을 구축.
 - 한국-남극 통과해역 관측을 통한 광대역 기후변화신호의 파급과정 장기자료 집적.
 - SCOR, SCAR, SOOS 등 국제기구가 인정하는 서남극 기후변화연구 국제프로그램으로서 각인되고, 한국 극지연구소가 국제공동연구프로그램을 주도하는 선진과학 연구기관으로 부상 (아래 SOOS 3개년 성과보고서 참조).



그림 9. 2015 SOOS 3개년 성과보고서에 소개된 KOPRI 아문젠 프로젝트

2-2. 국외 동향

1. 영국 NERC-BAS는 2010-2015에 750만 파운드 연구비를 투자하여 iSTAR (Ice Stability: 서남극 빙붕소멸연구)를 수행하면서 벨링즈하우젠해와 아문젠 동부해역의 주요 빙붕의 안정성 (융빙속도, 후퇴속도, 그라운드잉 라인 위치변화 등)에 대한 연구를 진행하였다 (<http://www.istar.ac.uk>). 과학적으로 의미있는 연구결과가 생산되었으며, 이러한 연구결과는 전 지구적 관심사인 지구온난화와 해수면상승 이슈와 맞물려, iSTAR 프로그램은 2015년 시작된 FISS (<https://www.bas.ac.uk/project/fiss/> Filchner Ice Shelf System, 2015-2020) 프로그램으로 진화 발전하여 2020까지 6년간 남극 웨델해 Filchner 빙붕 소멸 속도 관측과 모델링 연구를 수행하게 된다. FISS 프로그램은 영국의 BAS가 주축이 되어, NERC 산하 연구기관과 대학, 그리고 독일 AWI가 국제협력 파트너로 참여한다.



그림 10. FISS Website 에 소개된 프로그램 개요

FISS 프로그램은 해양-빙하-기후 상호 역학관계에 의한 Filchner 빙하후퇴를 실측 (기상, 해양, 지구물리 분야)과 모델링을 통하여 규명하는 연구로서, 지금까지 일방적으로 위성자료에 의존한 빙하후퇴 모델링과는 다른, 실측에 근거하는 단기 (30-50년) 예측을 목표로 하고 있다. 첨부 3은 프로그램 연구지역 연구활동과 연구내용을 간략히 소개하고 있으며, 프로그램의 최종연구목표는 아래와 같다.

1. Determine the geometry of the model domain (ice-bed elevation, ice thickness and sub-ice shelf bathymetry) in several key areas that lack data coverage. In addition, make targeted measurements of the present-day oceanographic and glaciological regime.
2. Generate atmospheric forcing fields for the ocean models from historical observations
3. Determine the oceanographic regimes, under present and historical atmospheric forcing, and establish the associated pattern and intensity of melting of the ice shelf base and their sensitivity to changes in the atmospheric forcing.
4. Establish the present dynamics of the tributary ice-streams within the coupled ice-sheet ice-shelf system, and determine, with multiple models, the sensitivity of the system to changes in basal melt rate.
5. Produce a state-of-the-art regional coupled ocean-ice shelf-ice sheet model. Verify its performance using observations of grounding-line stability.

2. FISS가 웨델해 Filchner 빙하를 연구하는 영국 국내용 빙하후퇴 관측/모델링

프로그램이라면, 영국이 제안하여 SOOS가 공인한 NECKLACE 프로그램은 남극대륙 전체의 주요 빙붕붕괴 현장을 남극연구국가 각국의 국내프로그램이 분담하여 “환남극 빙하후퇴 관측과 모델링 연구”를 수행하자는 국제공동연구 프로그램이다. 따라서 NECKLACE 프로그램은 FISS 프로그램을 남극 전역으로 확대하여 빙하후퇴를 실측(기상, 해양, 지구물리 분야)과 모델링을 통하여 규명하는 연구이다. 영국은

Filchner-Ronne 빙붕을 맡고, New Zealand는 Ross 빙붕, 호주는 Amery 빙하, 벨지움은 Roi Baudouin을 분담하여 2014/2015 남극시즌부터 국제공동연구가 시작되었다. 아래 그림은 지난 시즌부터 설치되기 시작한 빙하관측거점들이다. 한국, 스웨덴, 노르웨이는 지난 2015/2016 부터 아문젠 해역의 Thwaites, Dotson, Getz에서 관측을 시작함으로써 NECKLACE 프로그램에 참여하였다

(<http://www.soos.aq/news/current-news/196-necklace-2>).

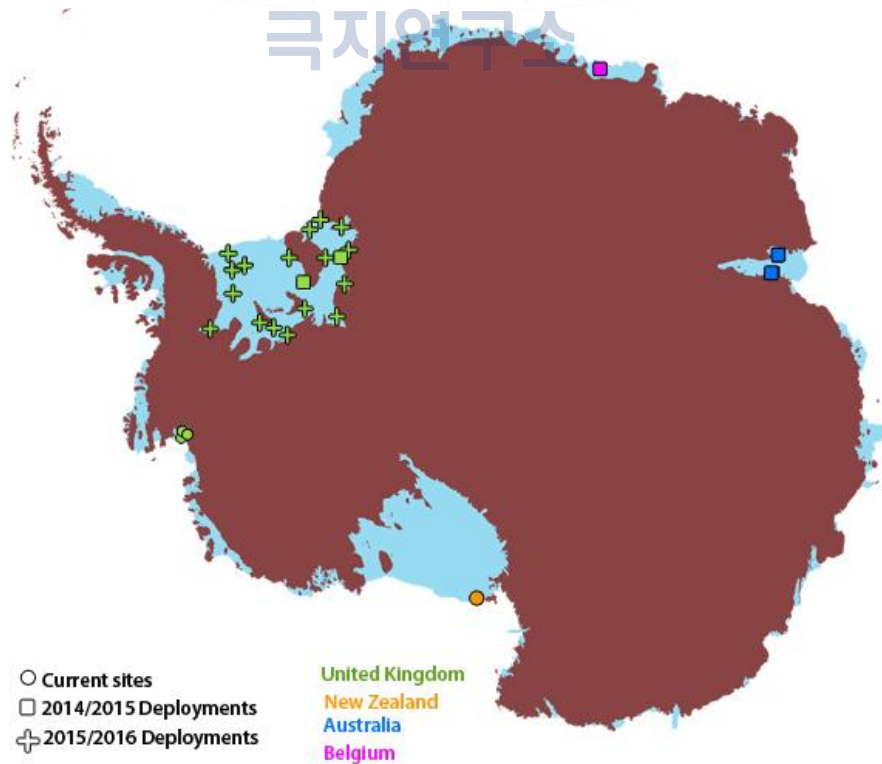


그림 11. SOOS NECKLACE 프로그램에 참여하는 남극 연구국가들이 설치한 환남극 빙하후퇴 국제공동 관측거점

3. 미국 Princeton 대학이 주도하는 SOCCOM Southern Ocean Carbon and Climate Observations and Modeling 프로그램은 미국 과학재단 남극연구 프로그램이 2014-2018간 지원하고 UW, MBARI, Scripps 등이 컨소시엄으로 참여하는 남빙양 탄소순환과 기후모델링 연구프로그램이다 (<http://soccom.princeton.edu> 남빙양 Carbon & Climate 관측과 모델링). 각종 생지화학 센서를 장착한 자동해양관측 부이를 국내외 협력연구기관 선박에서 남빙양 해역에 투하하고 (2016. 5월 현재 50개 운영 중: 총 200개 목표), 실시간 위성전송된 자동관측자료는 연구진에 의하여 후처리되는 동시에 전세계 연구진에 공개되는 자료개방형 프로그램이다. 각지의 관측부이에서 위성전송된 자료를 활용하여 탄소/온실기체 등 물질들의 생지화학 순환 구조를 모델링함으로써, 지구기후변화에 미치는 남빙양의 역할을 추정해 보고자하는 연구이며, 남빙양 탄소생지화학순환 관측과 모델링 연구의 진행간에 중간 결과를 아래와 같이 웹사이트에 공개한다.



그림 12. SOCCOM Website 에 소개된 프로그램 개요

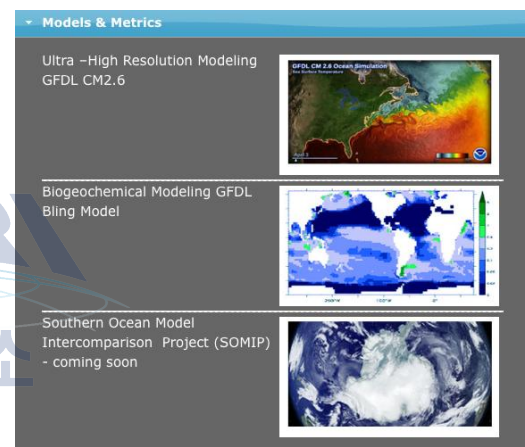


그림 13. SOCCOM에서 공개한 생지화학 모델링의 초기결과들

4. US Antarctic LTER 프로그램 (<https://www.lternet.edu/sites/pal> Long-Term Ecosystem Research)은 1990부터 현재까지 계속 남극반도-벨링스하우젠 해역의 남극해 생태계의 주요 구성 종과 생리활동, 1차생산과 유기물 침강 등 탄소의 생지화학순환을 장기모니터링해 오고 있다. 본 프로그램은 현재 미국 Columbia LDEO Lamont-Doherty Earth Observatory에서 주도하고 있으며, 채빙연구선 Gould와 Palmer를 이용한 해양생태계, 퇴적물 트랩을 이용한 해양 유기물침강, 남극기지 Palmer station을 근거지로 연안생태계, 위성 원격관측, 무인자동관측용 Glider 등 다양한 연구기법과 관측기술을 활용, 남극 생태계 연구를 30년 가까이 수행하고 있다. 그동안 진행된 (그리고 현재도 진행되고 있는) 남극해 온난화의 생태계 영향이 고스란히 중장기 모니터링 데이터에 축적되고 있는, 생태계 장기모니터링 연구의 세계적 표준이 된 사례이다.


The Long Term Ecological Research Network





[HOME](#)
[PUBLICATIONS](#)
[SITES](#)
[RESEARCH](#)
[NETWORK](#)
[DATA](#)
[PEOPLE](#)

Palmer Antarctica LTER



Antarctic Research and Supply Vessel (ARSV) Laurence M Gould docked at Palmer Antarctica LTER, January, 2002.

Contact Information

Lamont-Doherty Earth Observatory
 61 Route 9W Box 1000
 Palisades, NJ 10964-1000
 USA
 Email: hducklow@ldeo.columbia.edu
 Phone: 845-365-8167

Web Site Links

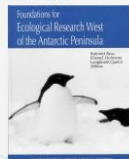
- [Site Home Page](#)
- [Data Catalog](#)
- [Information Management](#)
- [Bibliography](#)
- [Education Program](#)
- [Personnel Directory](#)

Site Contacts

PI: [Hugh Ducklow](#)
Primary: [Hugh Ducklow](#)
Education: [Beth Simmons](#)
IM: [James Connors](#)
Grad rep: [Travis Miles](#)
Climate rep: [Sharon Stammerjohn](#)

Publications

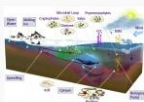
Foundations for Ecological Research West of the Antarctic Peninsula



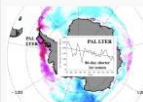
Key Research Findings:



New View
 PAL scientists have pioneered the use of remotely-operated vehicles and animal-mounted sensors to generate new information and images of the Antarctic that have not been available from traditional approaches.
[Read more](#)



Delicate Conditions
 Working in one of the most rapidly-warming regions on the planet, LTER scientists at Palmer Station in the Antarctic discovered intricate, previously-unknown influences of climate change on plant and animal populations throughout the polar ecosystem food web.
[Read more](#)



Changes in Ice and...
 PAL scientists have documented a remarkable decrease in the length of the sea ice season by up to 3 months and an exponential increase in ocean heat content of waters being delivered to western Antarctica via the Circumpolar Current.
[Read more](#)

[View all key research findings for this site.](#)

Overview: The Palmer LTER, established in the Fall of 1990, is one of the National Science Foundation sponsored Long Term Ecological Research Sites which is funded by the NSF Office of Polar Programs. It focuses on the pelagic marine ecosystem along the west Antarctic Peninsula, and the ecological

그림 14. US Antarctic LTER Website 에 소개된 프로그램 개요

제 3 장 제안하는 과제의 연구목표와 연구내용

3-1. 최종 연구목표와 내용

연구목표	내용
아문젠해 빙붕/빙하의 후퇴(융해소멸)속도 추정	빙하 융해수의 아문젠해 유입량과 해양확산패턴 연구 빙붕 하부의 해류순환과 열 유입량 관측 (그라운드 라인 변화) 연구 환남극 데이터 합성을 통한 남극빙하 소멸과 해수면상승 추세 규명
생태환경/생태계/생리현상 변화 중장기 추적	온난화 및 용빙수 유입에 따른 해양순환 변동과 해수화학 변동에 기인하는 생태환경, 생태계 구조 및 구성, 생리활동 변화 등 중장기 추적
탄소/온실기체의 생지화학순환과 지구기후변화요인 추적	해양순환 변동과 해수화학 변동에 기인하는 탄소 등 온실기체 제거기작 변동, 생지화학순환 Flux와 구조의 변동, 이에 따른 기후변화요인의 변동을 중장기 추적

3-2. 연차별 연구목표와 내용

본 기획연구가 제안하는 상기 연구과제는 대기-해양-빙하를 통섭하는 종합지구환경연구로서, 제시된 연구목표를 달성하기 위하여는 적어도 3회의 현장조사를 필요로 하기에 6년의 연구기간을 제안함.

구분	년도	세부연구목표	연구내용
1차년도	2017 현장조사	빙붕/빙하 소멸속도 측정 I	빙붕/빙하 소멸속도 관측 (레이더, 중력계 활용)
		빙붕하부 열유입 측정 I	빙붕 전면 및 하부 해류순환 관측 (AUV 활용)
		생태계 · 생지화학순환 I	종조성, 생리, 제늄, 탄소순환 등 시료/자료 획득
2차년도	2018	빙붕/빙하 소멸속도 측정 I	빙붕/빙하 소멸속도, 해양, 기상 등 자료분석
		빙붕하부 열유입 측정 I	해류순환, 열유입 등 자료분석
		생태계 · 생지화학순환 I	종조성, 생리, 제늄, 탄소순환 등 시료/자료 분석
3차년도	2019 현장조사	빙붕/빙하 소멸속도 측정 II	빙붕/빙하 소멸속도 관측 (레이더, 중력계 활용)
		빙붕하부 열유입 측정 II	빙붕 전면 및 하부 해류순환 관측 (AUV 활용)
		생태계 · 생지화학순환 II	종조성, 생리, 제늄, 탄소순환 등 시료/자료 획득
4차년도	2020	빙붕/빙하 소멸속도 측정 II	빙붕/빙하 소멸속도, 해양, 기상 등 자료분석
		빙붕하부 열유입 측정 II	해류순환, 열수지 등 자료분석, 기초모델 수립
		생태계 · 생지화학순환 II	종조성, 생리, 제늄, 탄소순환 등 시료/자료 분석
5차년도	2021 현장조사	빙붕/빙하후퇴 모델링	남극대륙 전체자료로부터 빙붕/빙하후퇴 모델링
		해양 - 빙하 상호작용 규명	빙붕하부 및 그라운드라인의 변화 모델링
		생태계 · 생지화학순환 변동연구	생태계와 생지화학순환 중장기모니터링 체계구축
6차년도	2022	해양순환 변동과 해수면상승 모델링	대륙전체 해양-빙하 상호작용에 의한 해양순환 변동과 해수면상승을 추적하는 모델링 결과 획득
		생태계 · 생지화학순환 변동연구	남극해 생태계와 생지화학순환에 대한 온난화와 중위도 해양변화 영향 중장기모니터링 연구

3-3. 국·내외 공동연구 추진 계획

- 연구목표의 성공적 달성에 필요 충분한 전문인력과 관측자료 확보를 위하여, 아래 분야 및 관련 연구수행에 국내·외 공동연구, 위탁연구, 연구협력 등 다양한 형태의 공조가 필요하리라 판단함.
 - 극지연이 현재 보유하지 못한 전문분야 (광대역 표층해류순환 관측 및 분석, 해류순환 모델링, 해양-빙하 상호 물리작용, 일차생산 생리·생화학, 동물플랑크톤 동정, 미량금속 및 동위원소 정밀측정, Omics와 Heatmap 자료생산 및 분석 등 그 외 다수) 에서의 관측자료 생산과 해석
 - 극지연이 자체 보유 가동하기에 현재로는 부담스러운 첨단 고가 관측장비 (ARGO, 해양표층 Drifter, Air-borne Gravimetry, 빙하 Radar, AUV 등)를 활용한 현장자료 생산과 후처리
 - 공간적 완성도를 제고하기 위하여, 극지연 연구해역 이외 여타 남극해역 및 빙봉에서 생산된 관련 자료와 Integration함으로써 상호 보충 및 보완
- 따라서, 상기 예에서와 같은 필수 연구분야에서 소내 전문가 혹은 연구장비 확보 불가능시 국내위탁 혹은 국제공동연구 수행을 권고

3-4. 연구개발 사업 규모

연구기간 총 6년 (3년 x 2)	연구개발비(억원)					
	2017	2018	2019	2020	2021	2022
2017~2022	24	24	25	25	26	26

3-5. 총 연구기간 로드맵

	1 단계			2 단계		
성과지표	2017	2018	2019	2020	2021	2022
빙봉 빙하 후퇴	- 빙봉 빙하 후퇴 관측 - 빙봉 하부, 용빙수 유입 관측		- 관측자료 분석 - 열 유입 및 교환 현상 분석		- 열교환 및 빙하후퇴 모델링 - 모델 검증 수정, 해수면 상승 추정	
물질순환 변동 연구	- 유/무기 탄소 등 온실기체물질 분포와 플럭스 자료 획득		- 물질순환 관측 계속 및 누적자료 분석 - 온난화 영향 시뮬레이션 모델링		- 생지화학순환 변동 모니터링 - 온난화 영향 평가	
생태계 반응과 변화 연구	- 생태/생리 주요 변수 시료 확보 분석		- 생태/생리 관측 계속 및 누적자료 분석		- 기후변화 생태/생리 생태영향 장기 모니터링	
Resource 현장조사	- AUV, Radar, Gravimetry		- 환남극 관측자료와 통합 - 관측 방법 및 거점 국제공조/조율		- 환남극 관측거점 유지 - 모니터링 장비조달 방안	

3-6. 인프라 활용 로드맵

인프라명	연도	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월
쇄빙연구선 아라온	2017												
	2018	20	15										
	2019												
	2020	20	15										
	2021												
	2022	20	15										

* 활용 시기에 음영표시 및 활용일수 작성



제 4 장 연구개발결과의 활용계획

4-1. 향후 활용방향

- 미답지 자료축적, 독자적 연구 성과 창출, 국제공동연구 네트워크 주도, 결빙해역 연구능력 구축 등을 통하여 중장기 지구기후관측체계 구축, 한국의 과학 선진국 리더십 함양, 국제사회에서 영향력과 브랜드 가치 제고
- 남극 빙하후퇴, 해수면 상승 등, 중장기 전지구 시스템 기후변화 방향 예측과 변화 양상 이해를 통해 정책 입안 측면에서 학술적 근거로 우위를 유지함
- 한반도 기후와 차례대로 연계되는 태평양 중저위도권, 극지해역의 연구를 토대로 기후변화 예측 능력 강화
- 인공위성 관측 결과를 중장기 광역 추세 파악과 생태계 관리에 활용하는 기술 축적, 다른 해역에서도 적용, 위성자료 보정을 위한 실측 자료 생산

4-2. 과학적 산물

- 지구기후변화의 진행, 예측, 영향 등에 관한 연구기술과 국내 전문인력 축적
- 쇄빙연구선 활용 유·결빙해역 연구기술 축적과 중장기 지구기후관측체계 구축
- 남극해 연구 미진지역에서 독보 독자적 연구결과 생성

극지연구소

제 5 장 참고문헌

- Eric J. Steig, David P. Schneider, Scott D. Rutherford, Michael E. Mann, Josefino C. Comiso, Drew T. Shindell. 2009. Warming of the Antarctic ice-sheet surface since the 1957 International Geophysical Year. *Nature* 457; 459-462.
- NASA. 2009. http://www.nasa.gov/topics/earth/features/warming_antarctica.html).
- H. D. Pritchard, S. R. M. Ligtenberg, H. A. Fricker, D. G. Vaughan, M. R. van den Broeke, L. Padman. 2012. Antarctic ice-sheet loss driven by basal melting of ice shelves. *Nature* 484; 502-505.
- IPCC Report 5. 2014. 기상청 번역본 기후변화에 관한 정부간 협의체 제5차 평가 종합보고서; 2014년.
- Sarah G. Purkey, Gregory C. Johnson. 2012. Global Contraction of Antarctic Bottom Water between the 1980s and 2000s. *J. Climate* 25; 5830-5844.
- NOAA. 2012. http://www.noaanews.noaa.gov/stories2012/20120320_antarcticbottomwater.html
- Robert M. DeConto, David Pollard. 2016. Contribution of Antarctica to past and future sea-level rise. *Nature* 531; 591-597.
- Mahlon C. Kennicutt II, Steven L. Chown, John J. Cassano, Daniela Liggett, Rob Massom, Lloyd S. Peck, Steve R. Rintoul, John W. V. Storey, David G. Vaughan, Terry J. Wilson, William J. Sutherland. 2014a. Six priorities for Antarctic science. *Nature* 512; 23-25.
- Mahlon C. Kennicutt II와 다수. 2014b. A roadmap for Antarctic and Southern Ocean science for the next two decades and beyond. *Antarctic Science* 2014 1-16.

제 6 장 참고자료

첨부 1. SACR Horizon Scan이 제시한 Cluster 2 & 3의 Key Scientific Question들 (발췌; A roadmap for Antarctic and Southern Ocean science for the next two decades and beyond, Antarctic Science 2014).

Southern Ocean and sea ice in a warming world	
12.	Will changes in the Southern Ocean result in feedbacks that accelerate or slow the pace of climate change?
13.	Why are the properties and volume of Antarctic Bottom Water changing, and what are the consequences for global ocean circulation and climate?
14.	How does Southern Ocean circulation, including exchange with lower latitudes, respond to climate forcing?
15.	What processes and feedbacks drive changes in the mass, properties and distribution of Antarctic sea ice?
16.	How do changes in iceberg numbers and size distribution affect Antarctica and the Southern Ocean?
17.	How has Antarctic sea ice extent and volume varied over decadal to millennial timescales?
18.	How will changes in ocean surface waves influence Antarctic sea ice and floating glacial ice?
19.	How do changes in sea ice extent, seasonality and properties affect Antarctic atmospheric and oceanic circulation? (Cross-cuts 'Antarctic atmosphere')
20.	How do extreme events affect the Antarctic cryosphere and Southern Ocean? (Cross-cuts 'Antarctic ice sheet')
21.	How did the Antarctic cryosphere and the Southern Ocean contribute to glacial/inter-glacial cycles? (Cross-cuts 'Antarctic ice sheet')
22.	How will climate change affect the physical and biological uptake of CO ₂ by the Southern Ocean? (Cross-cuts 'Antarctic life')
23.	How will changes in freshwater inputs affect ocean circulation and ecosystem processes? (Cross-cuts 'Antarctic life')

Antarctic ice sheet and sea level	
24.	How does small-scale morphology in subglacial and continental shelf bathymetry affect Antarctic ice sheet response to changing environmental conditions? (Cross-cuts 'Dynamic Earth')
25.	What are the processes and properties that control the form and flow of the Antarctic ice sheet?
26.	How does subglacial hydrology affect ice sheet dynamics, and how important is it? (Cross-cuts 'Dynamic Earth')
27.	How do the characteristics of the ice sheet bed, such as geothermal heat flux and sediment distribution, affect ice flow and ice sheet stability? (Cross-cuts 'Dynamic Earth')
28.	What are the thresholds that lead to irreversible loss of all or part of the Antarctic ice sheet?
29.	How will changes in surface melt over the ice shelves and ice sheet evolve, and what will be the impact of these changes?
30.	How do oceanic processes beneath ice shelves vary in space and time, how are they modified by sea ice, and do they affect ice loss and ice sheet mass balance? (Cross-cuts 'Southern Ocean')
31.	How will large-scale processes in the Southern Ocean and atmosphere affect the Antarctic ice sheet, particularly the rapid disintegration of ice shelves and ice sheet margins? (Cross-cuts 'Antarctic atmosphere' and 'Southern Ocean')
32.	How fast has the Antarctic ice sheet changed in the past and what does that tell us about the future?
33.	How did marine-based Antarctic ice sheets change during previous inter-glacial periods?
34.	How will the sedimentary record beneath the ice sheet inform our knowledge of the presence or absence of continental ice? (Cross-cuts 'Dynamic Earth')

첨부 2. 본 과제에서 제안하는 주요 연구주제와 일치하는 10 Key Scientific Questions of SCAR Horizon Scan. A roadmap for Antarctic and Southern Ocean science for the next two decades and beyond (Antarctic Science 2014)에서 발췌.

13. Why are the properties and volume of Antarctic Bottom Water changing, and what are the consequences for global ocean circulation and climate?
14. How does Southern Ocean circulation, including exchange with lower latitudes, respond to climate forcing?
15. What processes and feedbacks drive changes in the mass, properties and distribution of Antarctic sea ice?
19. How do changes in sea ice extent, seasonality and properties affect Antarctic atmospheric and oceanic circulation? (Cross-cuts 'Antarctic atmosphere')
22. How will climate change affect the physical and biological uptake of CO₂ by the Southern Ocean? (Cross-cuts 'Antarctic life')
23. How will changes in freshwater inputs affect ocean circulation and ecosystem processes? (Cross-cuts 'Antarctic life')
26. How does subglacial hydrology affect ice sheet dynamics, and how important is it? (Cross-cuts 'Dynamic Earth')
29. How will changes in surface melt over the ice shelves and ice sheet evolve, and what will be the impact of these changes?
30. How do oceanic processes beneath ice shelves vary in space and time, how are they modified by sea ice, and do they affect ice loss and ice sheet mass balance? (Cross-cuts 'Southern Ocean')
31. How will large-scale processes in the Southern Ocean and atmosphere affect the Antarctic ice sheet, particularly the rapid disintegration of ice shelves and ice sheet margins? (Cross-cuts 'Antarctic atmosphere' and 'Southern Ocean')

첨부 3. 영국 FISS 프로그램의 연구지역 (Weddell Sea 빙붕) 주요 연구정점들과 연구활동, 연구내용에 대한 간략한 소개.

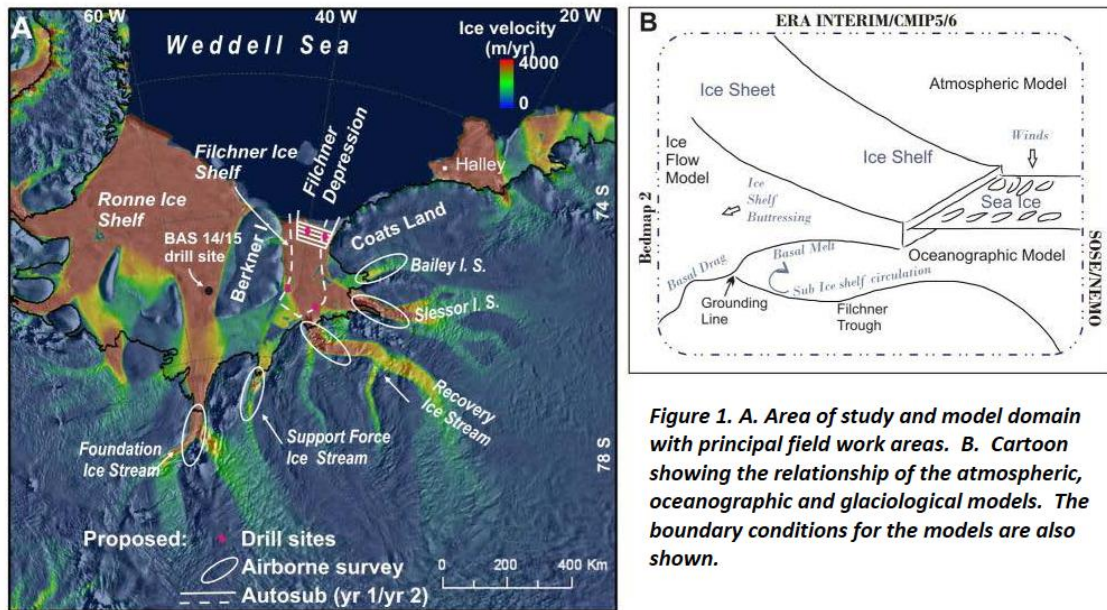


Figure 1. A. Area of study and model domain with principal field work areas. B. Cartoon showing the relationship of the atmospheric, oceanographic and glaciological models. The boundary conditions for the models are also shown.

(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.