

보안과제(), 일반과제(O) / 공개(O), 비공개()
장보고기지 주변 빙권변화 진단, 원인규명 및 예측 연구 사업
최종보고서

BSPM18020-044-7

R&D / 20140410

장보고기지 주변 빙권변화 진단, 원인규명 및 예측 연구 사업 최종보고서



2019. 7.

주관연구기관 / 한국해양과학기술원부설
극지연구소

해 양 수 산 부
해양수산과학기술진흥원

제 출 문

해양수산과학기술진흥원장 귀하

‘장보고기지 주변 빙권변화 진단, 원인규명 및 예측’(연구개발 기간 : 2014. 9. ~ 2019. 5.)
과제의 최종보고서를 제출합니다.

2019. 7. 15.

주관연구기관명 : 한국해양과학기술원부설 극지연구소 (대표자) 윤 호 일 (인)
참여기관명 : 서울대학교 (대표자) 서기원 (인), 이화여자대학교 (대표자) 이정
훈(인), 지오룩스 (대표자) 이희순 (인), 국민대학교 (대표자) 강연
식 (인), NOAA (대표자) Robert P. Dziak (인)

주관연구기관책임자: 이 원 상

참여기관책임자 : 서기원 (서울대), 이정훈 (이화여대), 강연
식 (국민대), 이희순 (지오룩스), Robert
P. Dziak (NOAA)

참여연구원: 홍종국, 진영근, 김지희, 박용철, 이주한, 김정훈,
김태완, 황청연, 이춘기, 윤숙영, 이태식, 한영철,
조경호, 강승구, 유현재, 이승현, 진경, 권현정,
김수환, 김형준, 이임교, 이상현, 이인애, 김진석,
최연진, 이지연, 엄주영, 김정훈, 김태완, 한영철,
김영균, 서나리, 김수관, 홍연우, 이선아, 장광일,
엄홍길, 박시원, 윤수정, 이민규, 정진훈, 장우근,
박인우, 윤승태, 황연주, 주현태, 김관수, 김태균,
나지성, 김병훈, 이영균, 전태환, 김재승, 엄국현,
안경재, 김태형, 조승현, 김영희, 김혜린, 함지영,
유현주, 최혜빈, 김지윤, 신경선, 김송이, 정혜정,
임채영, 박세연, 노명근, 임기영, 정유정, 이승희,
고지혜, 안태규, 심민철, 한상진, 강혜영, Haru
Matsumoto, Joe Haxel, Matt Fowler

국가연구개발사업의 관리 등에 대한 규정 제18조에 따라 최종보고서 열람에
동의합니다.

보고서 요약서

과제 고유 번호	20140410	해당 단계 연구 기간	2014.09.01.~20 19.05.31	단계구분	1 단계/1 단계
연구사업명	극지 및 대양과학연구 사업				
연구과제명	대과제명	장보고기지 주변 빙권변화 진단, 원인규명 및 예측			
	세부과제명				
연구책임자	이원상	해당단계 참여 연구원 수	총: 86명 내부: 51명 외부: 35명	해당단계 연구개발 비	정부: 10,007,000 천원 기업: 천원 정부 외: 천원 계: 10,007,000 천원
		총 연구기 간 참여 연구원 수	총: 86명 내부: 51명 외부: 35명	총 연구개발 비	정부: 10,007,000 천원 기업: 천원 정부 외: 천원 계: 10,007,000 천원
연구기관명 및 소속 부서명	한국해양과학기술원 부설 극지 연구소 해수면 변동 예측 사업단			참여기업명	
국제공동연구	상대국명: 미국			상대국 연구기관명: NOAA	
위탁연구	연구기관명			연구책임자	
	서울대학교 이화여자대학교 국민대학교 (주)지오룩스			서기원 이정훈 강연식 이희순	
요약(연구개발성과를 중심으로 개조식으로 작성하되, 500자 이내로 작성합니다)				보고서 면수 : 687 쪽	

< 국문 요약문 >

연구의 목적 및 내용	남극 장보고과학기지를 거점으로 빅토리아랜드 빙권변화를 지속적으로 관측하고 변화 원인을 규명하여 실측자료를 활용한 고해상도 지역모델 입력 자료를 생성하고 빙권 변화과 관련된 새로운 물리기작 발견을 통해 해수면 변동 예측 정확성 향상에 기여				
연구개발성과	<ul style="list-style-type: none"> - 극저온 환경에서 안정적으로 운영 가능한 다학제/융복합 관측망 구축 및 Metadata 제공을 통한 국내외 연구의 중심점 역할 및 허브 기능 정립 - 빙권 장기관측자료 제공 및 지역급 빙권변화모델 개발을 통한 새로운 빙상응용 물리기작 이해와 해수면 변동 예측모델 정확도 향상에 기여 - 빙원 탐사기술은 빙하시추, 대기과학, 천문, 지구물리 등 대륙 연구 수행에 활용 				
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	<ul style="list-style-type: none"> - 빙권변동 관측, 진단 및 예측 연구 수행을 통한 남극 빅토리아랜드 빙권연구 분야 선도적 위치 점유(지역대표 모델, 관측 자료 등) - 장보고 기지 주변 빙하의 동역학적 변화 관측 프로그램의 프로토콜을 확립함으로써 향후 대규모 빙하 연구 프로그램의 전략적 기획방안 마련에 기여 - 극지의 혹독한 환경에 적합하도록 개발될 측지/지구물리 관측 기술들은 극지뿐만 아니라 국내에서도 접근이 어려운 산악 및 도서 지역 등에서 지표 변화 탐지, 산사태 감시 등의 분야에서 기술력 향상에 기여 				
핵심어 (5개 이내)	장보고기지	빙권변화	해수면 변동	빙권감시종합 관측망	빙하동역학

〈 SUMMARY 〉

Purpose & Contents	<p>Long-term monitoring for climate change in the Victoria Land-Ross Sea region, Antarctica, through integrated observation networks to understand physical interactions between Cryosphere-lithosphere-hydrosphere-atmosphere</p> <ul style="list-style-type: none"> - Installation of integrated cryosphere monitoring networks near the Jang Bogo Station - Improvement of the understanding of the processes controlling the behavior of glaciers near the Jang Bogo Station - Application numerical model for ice dynamics to predict future sea level change 				
Results	<ul style="list-style-type: none"> - To play a leading role in polar scientific activities through intensive efforts to build long-term cryosphere monitoring networks - To validate an ice sheet model by comparison against observations toward better prediction and diagnosis of sea-level change - To contribute to developing polar technology on other related fields such as ice coring and geophysics in the Antarctic continent 				
Expected Contribution	<ul style="list-style-type: none"> - Developing leading technology for the monitoring, diagnosis, and expecting cryosphere changes in the northern Victoria Land, Antarctica. - Setting systematic protocols for the study of glacial dynamic changes - Contributing to the monitoring technology of natural disaster in outlying regions 				
Keywords	Jang Bogo Station	Climate change in cryosphere	Sea level change	Integrated monitoring network	Ice dynamics

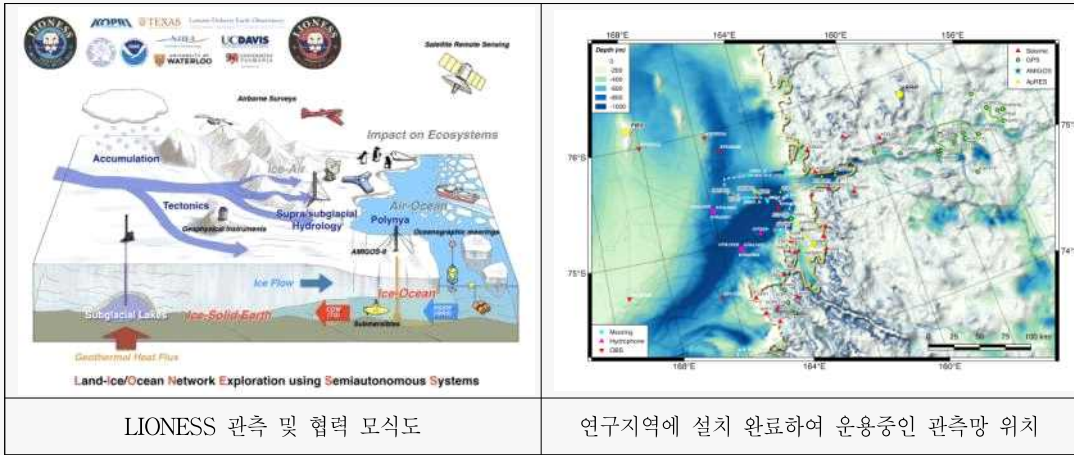
< 최종 과제 수행 요약 >

목표 달성도 개요 및 시사점

1 빙권변화 진단 관련 관측자료 생산 및 자료 DB화

㉔ 세계 최고 수준의 다학제 연구 기반 감시 관측망 구축

- 미국, 뉴질랜드, 이태리 등 6개국, 9개 기관 참여 국제연구 프로그램(LIONESS; Land-Ice/Ocean Network Exploration using Semiautonomous Systems) 착수하여 **개방형 국제협력 관측 프로그램 주도**
- 한반도 면적의 40%에 달하는 넓은 빙상지역의 감시 관측망 구축 성공
- 빙상동역학 수치모델에 활용될 **장기 고품질 관측정보 획득 기반 마련**



LIONESS 관측 및 협력 모식도

연구지역에 설치 완료하여 운용중인 관측망 위치

㉔ 빙권변화 관측자료 확보 및 DB 공개

- 지진, 기상, 해양물리 등 관측자료 획득 및 DB 구축
- 고품질 관측자료는 **빙권변화 원인규명 및 수치예측 모델 정확도 향상에 기여**

관측요소	지진관측	GPS 관측	기상 관측	해양물리 관측
관측거점 수	25	38	16	5
자료획득 달성치 (%)	100	100	81	100

※ 현장관측자료는 KPDC(극지자료센터: <http://kpdc.kopri.re.kr>)를 통해 일반 사용자에게 Metadata 제공, 증빙자료 본문 참조

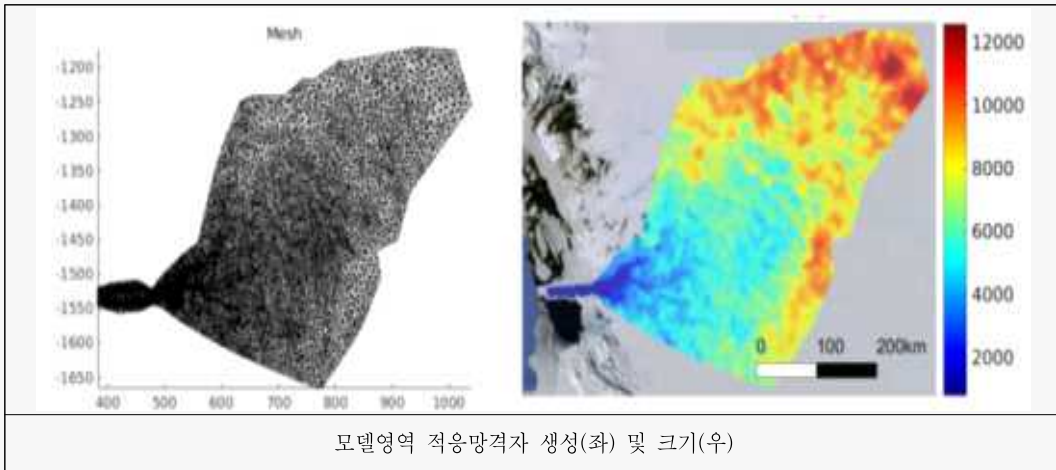
㉔ 남극현장 활동보고서 발간

- 2015~2019년 총 5부 발간 완료

2 빙권변화 원인규명/빙권 거동 수치예측 모델 개발 및 검증

㉠ 미래 빙권거동 예측을 위한 빙상동역학 수치모델 구축 완료

- 지역규모(300km x 300km) 빙상동역학 수치모델(ISSM: Ice Sheet System Model) 구축



모델영역 적응망격자 생성(좌) 및 크기(우)

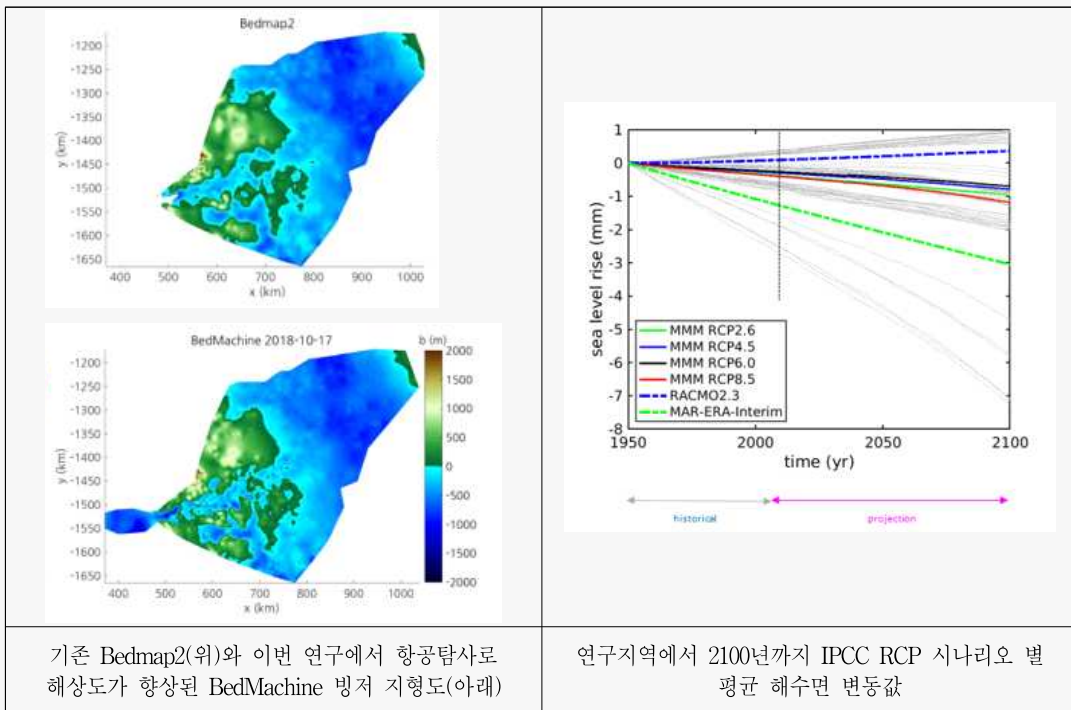
- 예측 수치모델 오차: 빙하 두께 변동 0.2 m/yr (목표 < 1 m/yr), 빙하 이동속도 0.5 m/yr (목표 < 5 m/yr)

㉡ IPCC RCP 시나리오 적용한 수치모델 예측결과 산출을 통한 해수면 변동 추정

- CMIP5 전지구 모델 결과 자료로 20세기 기후재현 실험 수행

- 연구 지역의 빙하가 기반선 부근 높은 기저능(topographic high)의 지형학적 특성으로 매우 안정하여 21세기 지구 온난화 강제력을 적용하여도 뚜렷하지 않은 빙하 질량 손실 예측

- 고해상도 빙저 지형도 확보가 빙상동역학 모델 결과 정확도 향상에 크게 기여함을 확인



기존 Bedmap2(위)와 이번 연구에서 항공탐사로 해상도가 향상된 BedMachine 빙저 지형도(아래)

연구지역에서 2100년까지 IPCC RCP 시나리오 별 평균 해수면 변동값

㉔ 빙붕-해양 상호관계 수치모델링을 통한 난센빙붕 붕괴 재현, 원인규명 및 향후 거동 예측
 - 해수면 상승 예측 정확도를 크게 개선하는 단서를 극지에서 발견

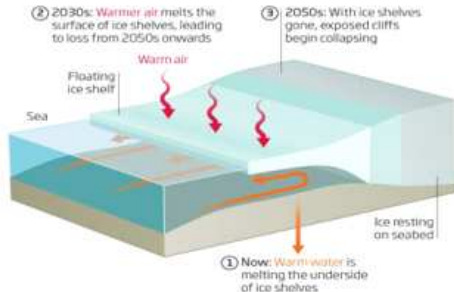
<p>LETTER</p> <p>doi:10.1038/nature22048</p> <p>Antarctic ice shelf potentially stabilized by export of meltwater in surface river</p> <p>Robin E. Bell¹, Winnie Chu^{1,2}, Jonathan Kingslake^{1,2}, Indrani Das¹, Marco Tedesco^{1,3}, Kirsty I. Tinto⁴, Christopher J. Zappa¹, Massimo Frezzotti¹, Alexandra Boghosian^{1,5} & Won Sang Lee^{1,6}</p>	<p>GLACIOLOGY</p> <p>Ice-shelf stability questioned</p> <p>Surface lakes and streams are forming on Antarctica's ice shelves, making them susceptible to instability and possible collapse. But rivers could mitigate this effect by efficiently exporting meltwater to the ocean. SEE LETTERS P.344 & P.349</p>
<p>빙붕 안정도 평가의 새로운 기준을 제시한 연구결과 (Bell, 이원상 외, 2017, Nature, IF 43.070)</p>	<p>네이처誌에 소개된 연구결과의 의미</p>

※ 상기 연구결과는 지난 2년간 39회 인용됨(2019.06.30. 기준)

- 극지역 온난화로 인한 빙붕 붕괴 가속화 원인을 새롭게 규명

<p>SCIENCE ADVANCES RESEARCH ARTICLE</p> <p>GEOLOGY</p> <p>Basal channels drive active surface hydrology and transverse ice shelf fracture</p> <p>Christine F. Dow^{1*}, Won Sang Lee^{2,3}, Jamin S. Greenbaum⁴, Chad A. Greene^{4,5}, Donald D. Blankenship^{4,5}, Kristin Poinar^{6,7}, Alexander L. Forrest^{7,8}, Duncan A. Young⁴, Christopher J. Zappa⁹</p>	
<p>빙붕 붕괴의 새로운 원인 규명 (Dow, 이원상 외, 2018, Science Advances, IF 12.804)</p>	<p>빙붕 하부의 물골이 상부의 물골 형성을 촉진하여 빙붕 불안정성을 가속화함을 최초로 규명</p>

3 성과/발견 및 반성/시사점




② 2030s: Warmer air melts the surface of ice shelves, leading to loss from 2050s onwards

③ 2050s: With ice shelves gone, exposed cliffs begin collapsing

① Now: Warm water is melting the underside of ice shelves

Labels: Floating ice shelf, Warm air, Sea, Ice resting on seabed



Change in discharge (km³ yr⁻¹)

Mask Budget (km³ yr⁻¹)

스웨이츠 빙하

장보고기지

- 남극 얼음의 급작스런 녹아내림은 주로 따뜻한 환남극심층수가 얼음 하부까지 침투해 녹임으로 발생
- 2050년부터는 따뜻한 해수에 의한 영향보다 기후변화로 급상승한 대기온도가 얼음 표면을 녹이는 영향이 우세

- 장보고기지 부근은 남극에서 기후변화에 관한 빙상변화의 민감도가 높아, 동남극과 서남극의 경계에서 향후 남극 전체 변동 추세를 가능할 수 있는 최적의 장소
- 서남극 스웨이츠 빙하 지역은 남극에서 가장 빨리 얼음이 녹는 곳으로 미래 해수면 변동 예측의 열쇠를 지니고 있는 장소

성과/발견 [2014-2018]

- ✓ 상승한 대기 온도에 의한 얼음 표면 용융은 현재 진행형
- ✓ 장보고기지 주변 해양에서는 환남극 심층수의 존재가 미약하며, 빙상 변동은 더디게 진행

➔

반성/시사점 [2019-2022]

- ✓ 예상보다 빠른 돌발 붕괴 대응하기 위해 기존 성과를 바탕으로 발빠른 연구수행 필요
- ✓ 급격한 해수면 변동 예측을 위해서는 서남극 스웨이츠 빙하로 연구지역 확장 필요

4 향후 추진 계획

- 급격한 해수면 상승의 주범으로 지목된 서남극 스웨이츠 빙하 지역 진출
 - 미국-영국은 2018년부터 남극 과학연구 역사상 가장 큰 규모의 국제공동연구 추진
 - 서남극 스웨이츠 빙하 연구는 네이처 및 사이언스誌에서 2019년 주목해야할 연구로 선정
 - 해양수산부는 부처 R&D 연구사업으로 스웨이츠 빙하 연구에 2022년까지 200억원 투자 결정, 극지연구소는 선정평가를 통해 동 연구사업 주관수행기관으로 선정
 - 스웨이츠 빙하 붕괴가 초래하는 전지구적 해수면 상승 영향평가연구 수행 예정

	
네이처 및 사이언스誌에 소개된 서남극 스웨이츠 빙하 연구	스웨이츠 빙하 연구에 국제공동연구 파트너로 극지연구소 참여

< LIST >

I. Introduction of R&D project	34
1. Purpose	34
2. Necessity	34
3. Scope	49
II. Current R&D Status in Korea and Other Nations	53
1. Current R&D Status in Other Nations	53
2. Current R&D Status in Korea	87
III. R&D Implementation Contents and Results	99
1. Introduction	99
2. Multidisciplinary observation of cryospheric changes	99
3. Investigating behavior and interaction of cryospheric system near Jang Bogo station	421
4. Prediction of cryospheric changes near Jang Bogo station	546
5. Technical/economical outcome	621
IV. Degree of R&D Goal Achievement and Contribution	624
1. Degree of R&D Goal Achievement	624
2. Degree of Contribution to Related Areas	653
V. Application Plans of R&D Results	659
VI. Information of Foreign Science Technology During the R&D ·	669
VII. Security Level of the R&D Results	672
VIII. Current Status of Research Facility · Equipment Enrolled to National Science and Technology Information System	673
IX. Performance Results of Safety Action During Fulfillment of the R&D	674
X. Representative Results of the R&D	675
XI. Other Consideration	677
XII. References	678

〈 목 차 〉

제1장. 연구개발과제의 개요	34
1. 연구개발 목적	34
2. 연구개발의 필요성	34
가. 빙권변화 관측	34
나. 극지관측 기술 및 대용량 자료처리기술 개발	38
다. 빙권변화 원인규명	40
라. 빙권변화 재현 및 예측 시스템 구축	46
마. 장보고 학술 프로그램	47
3. 연구개발 범위	49
가. 연구개발 추진체계	49
나. 연구개발 핵심기술 조직도	49
다. 국가과학기술 표준분류 체계에 따른 연구개발 핵심기술 및 수행 연구인 력	50
라. 핵심 연구주제 및 해당 기술분야	51
마. 연차별 연구개발 진행현황 로드맵 및 연구주제별 상호 유기적 관계도 ·	52
바. 모델링 연구 추진 체계 다이어그램	52
제2장. 국내외 기술 개발 현황	53
1. 국외 기술 개발 현황	53
가. 국외 동향	53
나. 빙권변화 관측 및 원인 규명 기술개발 현황	56
다. 빙권 변화 재현 및 예측 시스템 개발 현황	73
라. 극지 관측기술 개발 현황	79
2. 국내 연구 기술 개발 현황	87
가. 국내 동향	87
나. 극지관측, 모델 기술 현황	89
다. 본 과제 기반 주요 연구개발 현황	94
제3장. 연구 수행 내용 및 성과	99
1. 서문	99
2. 빙권 변화 다학제 관측	99
가. 육상 다학제 관측망 운영 및 탐사	99
나. 해양 환경변화 관측을 위한 탐사	203
다. 관측자료 Quality Control	361
라. 신규 탐사 기술 개발과 활용	400
3. 장보고기지 주변 빙권 시스템 거동 파악 및 상호관계 규명	421
가. 빙저호 거동 규명	421
나. 남극 빙하 거동 규명	465

다. 드라이갈스키 빙설 및 난센 빙붕 거동 규명	479
라. 빙하 용융수의 기원 추정	503
마. 테라노바 만 빙붕수의 성질 변화와 생성 기작 연구	532
4. 극지역 환경변화에 따른 장보고기지 주변 빙권 시스템 거동 예측	546
가. 빅토리아랜드 지역대표 후빙기 조륙운동 보정(GIA) 모델 향상	546
나. 수치모델링을 통한 빙하-빙붕 거동 예측	582
5. 기술적/경제적 성과	621
가. 기술적성과	621
나. 경제적성과	622
제4장. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도	624
1. 목표 달성도	624
가. 정량적 목표 달성도	624
나. 정성적 목표 달성도	652
2. 관련분야 기여도	653
가. 극지 관측기술	653
나. 극지자료 분석기술	655
다. 극지 빙상 미래변화 예측 기술	658
제5장. 연구개발성과의 활용계획	659
1. 관측자료 활용계획	659
2. 극지 관측망 운영/관측/연구수행 역량을 미래 빙하 연구에 활용	663
3. 빙권 수치예측 모델 국내 활용 방안	668
4. 연구 성과 확산 및 홍보 전략	668
제6장. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보	669
제7장. 연구개발성과의 보안등급	672
제8장. 국가과학기술종합정보시스템에 등록된 연구시설·장비 현황	673
제9장. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적	674
제10장. 연구개발과제의 대표적 연구 실적	675
제11장. 기타 사항	677
제12장. 참고 문헌	678

<표 차례>

표 1 각 국 남극연구의 주요 내용	54
표 2 얼음 하부 탐사에 필요한 기능(좌)과 해당 기능을 갖춘 개발된 AUV 종류(중), Icefin 무인 잠수정에 구현된 기술(우) (Spear <i>et al</i> , 2016)	86
표 3 탐사기술 현황	92
표 4 데이비드 빙하 지진 관측망	126
표 5 2015년 GPS 관측 결과. * 현장 수준 측량을 통한 slope correction 산출	129
표 6 자기지전류 탐사 측정점	136
표 7 장보고 기지 주변 지진 관측망 현황	174
표 8 GPS 자료 회수 및 유지 보수 현황	184
표 9 GPS 관측 결과	187
표 10 멜번화산 지역의 자기지전류 측정점 (2017/2018)	189
표 11 하이드로폰 설치 위치도	210
표 12 16/17 남극 하계탐사에서 수행한 CTD 일자와 시간, 위치 정보	234
표 13 VMP 관측점 정보	242
표 14 DITN 투입 장비 정보	246
표 15 DITN에서 회수한 계류장비의 위치 시간 정보	247
표 16 DITN에서 회수한 계류장비와 설치한 계류장비의 메타데이터	247
표 17 DITD 계류 장비에 부착된 장비 구성	251
표 18 DITD 메타데이터	251
표 19 DITS 1702 부착 장비 정보	254
표 20 DITS 1702 위치 및 시간 정보	255
표 21 DITS 1702 메타데이터	255
표 22 신규로 설치된 테라노바만 북부 수중음향 관측망 정보	256
표 23 2015/2016 시즌에 설치한 남쪽 수중음향 관측망 위치 정보	259
표 24 2016/2017 시즌에 설치한 남쪽 수중음향 관측망 위치 정보	260
표 25 LOBSTER 해저면 지진계 주요 구성장비 정보	261
표 26 LDEO 무어링 트라이앵글레이션 결과	265
표 27 자석 나침반 값과 보정전의 글라이더 나침반의 방향값(좌)와 보정후의 방향값(우)	268
표 28 난센 빙봉 인근 Gavia 투입시 아라온의 위치	275
표 29 OBS 정점좌표 및 정보	284
표 30 탐사장비 및 자료획득 개요	288
표 31 장보고 주변 해수면 마이크로층에서 분리한 신종 미생물 특성 비교	294
표 32 정점 1번부터 27번까지 사용한 CTD 센서 정보	296
표 33 정점 28번부터 44번까지 사용한 CTD 센서 정보	296
표 34 17/18 남극 하계 탐사에서 수행한 CTD, LADCP 관측 일자와 시간, 위치 정보	297
표 35 수중음향 관측망 회수 정보	303

표 36	수중음향 관측망 설치 정보	303
표 37	DITN에 부착된 센서 정보	308
표 38	DITN 메타데이터 정보	309
표 39	DITN에 부착된 센서 정보	309
표 40	DITN에 부착된 센서 정보	310
표 41	TNBD 에 부착된 센서 세팅 정보	317
표 42	OBS 주요 구성장비 정보 (Lobster Model)	318
표 43	관측 정점 정보	331
표 44	수중음향 관측기 회수 시간	339
표 45	수중음향 관측기 위치 삼각측량 결과	340
표 46	획득 수중음향 자료 정보	340
표 47	DITD 계류장비 정보	341
표 48	DITN 계류장비 정보	344
표 49	TNBD 계류장비 정보	347
표 50	클라이더 나침반 보정 작업 결과	351
표 51	남극 탐사 획득 해양 자료 및 품질 관리 (Quality Control) 현황	361
표 52	해양 계류 자료 기간 및 관측 변수 정보	385
표 53	Aquadopp current meter 자료 read MATLAB 코드 예시	386
표 54	MT 장치 시제품 성능	400
표 55	데이비드 빙하 빙저호의 위치와 크기	428
표 56	주요 빙저수문망 모델	439
표 57	부정류 모델 수문특성 및 빙저용융량 입력인자	458
표 58	난센빙봉 조석분석을 위한 GPS 및 틸트미터 측정	479
표 59	관측된 하부용융량과 질량 보존 기법으로 산출한 하부용융량의 비교	496
표 60	산출된 OLS and TLS 비교값	522
표 61	선행연구에서 mixing ratio 계산을 위해 사용한 해수의 염소 농도	530
표 62	ISSM 빙상동역학 모델 실험에 사용된 초기조건 및 보조자료	604
표 63	사용된 IPCC CMIP5 전지구 모델 자료	617
표 64	경제성 추정치와 세부 내용	623

<그림 차례>

그림 1	빙권변화 원인규명을 통한 미래 빙하거동 및 해수면 상승을 예측하기 위해 반드시 필요한 관측 요소	35
그림 2	인공위성 원격탐사를 통해 밝혀진 그린랜드와 남극대륙의 질량 변화(NASA: Earth's Climate History: Implications for Tomorrow by Hansen and Sato, July 2011)	35
그림 3	인공위성 원격탐사를 통해 규명된 남극대륙에서의 빙하 이동속도(Rignot <i>et al.</i> , 2011) ..	36
그림 4	인공위성 고도계 자료에 의한 남극 고도 변화	36
그림 5	남극대륙 하부 깊이에 따른 S파 지진파 속도 구조. 상부맨틀(100-200km)의 경우 동남극에서 PREM 보다 비교적 빠른 속도구조를 보이고 있으며, 이는 동남극이 서남극에 비하여 오래되고 안정된 지체구조임을 확인할 수 있다(Danesi and Morelli, 2001).	37
그림 6	(a) 따뜻한 심층수가 빙붕 하부로 침투하여 지반선(grounding line) 후퇴를 유발, (b) 빙붕 두께를 얇게 하여 최종적으로 빙붕의 안정성을 약화시켜 빙붕 붕괴를 가속화 시킨다(Hanna <i>et al.</i> , 2013).	38
그림 7	무인항공기를 활용한 방송촬영 및 화물 배송	39
그림 8	사물인터넷이란 모든 것들(사람, 사물, 공간 등)이 인터넷으로 연결되어 상호간 정보를 공유하거나 활용하는 것을 지칭한다. 다학제 종합관측망 자료의 융합 및 관측망 원격제어에 적극적으로 활용 가능한 기술로 기대된다.	39
그림 9	빅데이터(Big data). 자료간의 연관성 분석을 통한 새로운 가치 창출 수요 급증	40
그림 10	남극대륙의 기반암 지형도(Bedmap2; Fretwell <i>et al.</i> , 2013). 약 30-130m의 고도 오차를 보여준다. 서남극 대부분의 지역은 해수면보다 낮은 지형을 보여주며, 아문젠 해의 경우 수심 약 2,000m 깊이에 해저기반암이 위치한다.	41
그림 11	(좌) 영국 국립해양센터(National Oceanography Centre)에서 개발한 AutoSub AUV, (우) 서남극 파인아일랜드 빙하 하부에 AutoSub AUV를 투입하여 획득한 정밀 해저지형도	42
그림 12	지진파 해석을 통해 결정된 남극중단산맥(TAMs; TransAntarctic Mountains) 하부 지진파 속도 및 감쇄구조(Lawrence <i>et al.</i> , 2006). 동남극(EA; East Antarctic)의 지각이 서남극(RS; Ross Sea) 보다 두꺼운 안정된 육괴(陸塊)임을 확인할 수 있다	43
그림 13	POLENET 국제 공동연구를 통해 TAMs 주변에 광대역 지진관측망을 설치/운영하여 테라노바 만에 위치하고 있는 데이비드 빙하에서 발생한 빙하지진의 위치 및 발생 기작 결정(Zoet <i>et al.</i> , 2012). 대부분의 빙하지진이 지반선 부근(왼쪽 적색 점)에서 빙하가 정단층의 형태로 고도가 낮은 위치로 이동해가면서 발생함을 알 수 있다	44
그림 14	남극 빙하 하부의 하천망 구조(US National Science Foundation)	45
그림 15	빙하 하부 물의 흐름을 나타내는 모식도(Wingham <i>et al.</i> , 2006)	45
그림 16	서남극 Marie Byrd Land에 위치한 Mount Sidley에서 탄성과 탐사를 통해 위치가 결정된 빙저화산(Lough <i>et al.</i> , 2013). 두꺼운 빙상을 뚫고 화산이 분출하지는 못하지만 빙상 하부를 지속적으로 녹여 빙상의 안정성 약화를 초래하게 된다.	46
그림 17	PISM을 통해 예측된 동남극 빙상의 변화. Wilkes 분지의 얼음이 모두 녹게 되면 3-4m 의 해수면 상승을 초래할 것으로 평가된다(Mengel and Levermann, 2014)	47
그림 18	해수면이 1m만 상승하게 되더라도 전 세계 인구 중 적어도 1억 명이 직접적인 영향을 받게 되며 많은 연안 도시(도쿄, 상하이, 자카르타, 뭍베이, 뉴욕 등) 및 섬들의 침수를 유발할 것으로 예측되고 있다	48
그림 19	네이처誌에 소개된 6대 남극 연구 우선순위 (Kennicutt <i>et al.</i> , 2014)	53

그림 20 연구 지역 현황: 기후변화에 따른 남극의 변화가 현재 빠르게 이동하는 곳으로 연구 중심이 이동	55
그림 21 ITGC 프로젝트 빙권변화 진단 예측 통합 모니터링 및 모델 예측 계획	55
그림 22 국내 인프라 및 연구 기술의 성장으로 미,영 연구진과 공동연구를 수행하는 빠른 발전을 이룩	56
그림 23 GRACE 인공위성 중력값을 이용하여 계산한 2003-2006년 남극 빙하량 변화(Chen <i>et al.</i> , 2006).	56
그림 24 인공위성 고도계(Cryosat-2)를 통해 산출된 최근(2011-2015) 남극 지역 빙상 고도 변화 (Gardner <i>et al.</i> , 2018)	57
그림 25 남극 빙하별 빙하 손실량 및 시간에 따른 변화(2008-2015) (Gardner <i>et al.</i> , 2018)	58
그림 26 극지방 변화 감지를 위한 인공위성: 좌로부터 ENVISAT, Cryosat-2, ICESat	58
그림 27 남극 장보고 기지 주변 빙하 이동 속도 분포. 단위는 m/yr	59
그림 28 고도계 자료를 이용한 총 해수면 상승(파란색), GRACE 위성을 이용하여 관측한 바다 질량 변화에 의한 해수면 상승(검은색), ARGO float으로 관측한 바다의 부피 팽창(빨간색) (Llovel <i>et al.</i> , 2014)	60
그림 29 IceBridge 프로그램 일환으로 수행되는 빙봉의 두께 측정 항공탐사	61
그림 30 CReSIS 운영 개념도	62
그림 31 Cryosat-2에 의해 확인된 Cook E2 빙저호 지역의 최근 표면 고도	62
그림 32 ICESat을 이용하여 서남극 빙하의 고도변화를 보여주고 있는 연구결과(Fricker <i>et al.</i> , 2007)	64
그림 33 맥머도 드라이벨리 근처에서 누출수를 채취한 연구(Harris <i>et al.</i> , 2007)	64
그림 34 그린랜드에서 추적자를 이용한 연구결과(Chandler <i>et al.</i> , 2013)	65
그림 35 해수와 빙하와의 동위원소 변동에 대한 모식도	65
그림 36 남극 보스톡 러시아 기지에서 수행 중인 빙저호의 단면모습	66
그림 37 빙저수문망 개념모식도	66
그림 38 레이더 에너지 반사 강도 및 반사 형태에 따른 흐름 빙저수문 흐름 형태의 규명 (Schroeder <i>et al.</i> , 2013)	67
그림 39 (좌) POLENET(IPY) 이전 남극에 설치된 지구물리 관측망, (우) 이후 확장된 관측망 현황	68
그림 40 TAMSEIS 관측망 위치	69
그림 41 남극에 위치한 일본 쇼와기지 주변의 지진(주황색 사각형) 및 초음파 관측소(녹색 삼각형 및 보라색 마름모) 위치	70
그림 42 데이비드 빙하 움직임과 연관된 빙하지진의 위치(적색 별). 주로 지반선 부근에서 발생했음을 확인할 수 있다(Danesi <i>et al.</i> , 2007)	70
그림 43 AMIGOS 구성 및 설치 예	71
그림 44 ADIOS 항공 낙하 장면 및 개요도. Twin Otter 등을 이용하여 접근이 용이하지 않은 지역에 장비를 투하하여 설치하게 된다	71
그림 45 로스 빙봉에서의 자기지진류 탐사 사례(University of Utah) (A) 빙원 위 현장 탐사 모습 (B) CTAM을 가로지르는 탐사 측선도	72
그림 46 PISM을 이용한 논문(좌로부터 Levermann(2011), Winkelmann <i>et al.</i> (2012), 연간 PISM관련 논문 수 증가 패턴 (2019년 상반기까지)	74
그림 47 8개 서로 다른 미래기후 시나리오로 강제된 6개 빙상동역학 모델 평균의 200~500년 후 남극 빙상 용융 예측 결과 (Nowicki <i>et al.</i> 2013)	75
그림 48 CMIP6 구성요소 및 일정	76

그림 49	해양 빙상의 주요 물리과정 (Scambos <i>et al.</i> , 2017)	76
그림 50	해양빙상 및 해양빙벽 불안정 붕괴 모식도 (DeConto and Pollard, 2016)	77
그림 51	빙상동역학 모델 시스템 모식도 및 활용되는 관측 요소들	77
그림 52	IPCC 보고서별 채택된 기후변화 시나리오에 따른 해수면 상승 폭 (좌) 및 IPCC AR5 결과에 남극 용빙 가능성을 반영한 해수면 상승 폭 (Nauel <i>et al.</i> , 2017) (우)	78
그림 53	다양한 외부강제력에 대한 그린랜드 및 남극 용융에 따른 해수면 상승치 모델 상호비 교 연구 결과 (Bindschadler <i>et al.</i> 2013)	78
그림 54	난센 빙봉에 설치된 AMIGOS-II 시스템의 개요	81
그림 55	영국 BAS와 NOC에서 개발한 빙봉 하부 탐사용 무인 잠수정 Autosub3	82
그림 56	호주 쇄빙선 Aurora의 2012년 SIPEX-II 연구항차에서 남극 해빙 밑에 투입된 SeaBED 'Jaguar' AUV	83
그림 57	2012년 Jaguar 무인잠수정 해빙하부 탐사를 통해 획득한 남극 해빙 두께 3차원 지도	84
그림 58	(좌) 빙봉을 직접 뚫어 투입되는 Icefin (노란색) 운영 방법과 일반적인 빙봉 하부 무인 잠수정 탐사(회색) 모식도 (우) 남극 McMurdo 기지 주변 열수시추 구멍을 통해 투입된 Icefin의 모습 (Spear <i>et al.</i> , 2016)	85
그림 59	Icefin 탐사를 통해 획득한 남극 McMurdo 빙봉 하부 해수의 염도와 온도 관측 결과 (Spear <i>et al.</i> , 2016)	85
그림 60	남극 연구 수립 체계	87
그림 61	우리나라 남극연구 추진 로드맵	88
그림 62	얼음하부에 투입하여 해양물리 특성을 관측하고 있는 무인잠수정 (photo courtesy of G. Williams)	90
그림 63	국내 개발 무인 잠수정 (좌) 해미래, (중) 이십이, (우) CR200	90
그림 64	(좌) 글라이더 테스트 지점과 항적도 (우) 글라이더로 측정된 온도 프로파일	91
그림 65	16/17 하계 탐사에서의 해수면 상태와 해저에서의 촬영한 AUV와 해빙 조각	91
그림 66	AUV탐사를 통해 획득한 난센 빙봉 하부의 SSS 이미지. (좌) 난센 빙봉 진입 시작지 점과 (우) 안쪽에서의 하부 이미지	91
그림 67	남극 장보고기지 기반 다학제 입체적 빙권 감시망 구축 사례	95
그림 68	해수면 상승을 막는 캄 빙하의 비밀 규명	95
그림 69	장기 해양 계류 자료 분석을 통한 연안류 특성 규명	96
그림 70	난센 빙봉 관측 자료 해석을 통한 빙봉 안정도 및 불안정도의 원인 규명	97
그림 71	관측 요소별 국제 공동 자료 획득을 위한 LIONESS 협력 체계 구축	98
그림 72	남극 빅토리아랜드에 시범 설치 운영 중인 극지 종합관측시스템(EGGNet).	99
그림 73	Nanometrics 사의 T240 초광대역 지진계 센서	102
그림 74	T240 지진계 센서 주파수 응답 스펙트럼	103
그림 75	Nanometrics 사의 Trillium Compact 광대역 지진관측 센서	104
그림 76	광대역 지진계 센서(T-Compact) 주파수 응답 그래프	105
그림 77	Quantera Q330 24 bit Digitizer	106
그림 78	Nanometrics Taurus 24 bit Digitizer	106
그림 79	Nanometrics Centaur 24 bit Digitizer	107
그림 80	데이비드 빙하 지진관측망과 멜번 화산 지진관측망 위치도	108
그림 81	데이비드 빙하 관측망 KDG01 관측소 전경	109
그림 82	데이비드 빙하 관측망 KDG02 관측소 전경	110
그림 83	데이비드 빙하 관측망 KDG03 관측소 전경	111

그림 84 데이비드 빙하 관측망 KDG04 관측소 전경	112
그림 85 데이비드 빙하 관측망 KDG05 관측소 전경	113
그림 86 데이비드 빙하 관측망 KDG06 관측소 전경	114
그림 87 데이비드 빙하 관측망 KDG07 관측소 전경	115
그림 88 멜번 화산 관측망 KP01 관측소 전경	116
그림 89 멜번 화산 관측망 KP02 관측소 전경	117
그림 90 멜번 화산 관측망 KP03 관측소 전경	118
그림 91 멜번 화산 관측망 KP04 관측소 전경	119
그림 92 멜번 화산 관측망 KP05 관측소 전경	120
그림 93 신규 설치된 멜번 화산 관측망 KP07 관측소 전경	121
그림 94 AMIGOS 시스템의 구성 및 설치 모습	122
그림 95 이동형 GPS 시스템의 구조와 설치 모습	123
그림 96 데이비드 빙하 관측망, 테라노바 만 관측망과 신규 설치한 난센관측망 위치도	126
그림 97 KDG01 관측소 지진자료의 주파수밀도값의 확률분포(PSD)(좌)와 주파수밀도값의 시간적 변화양상(우)	128
그림 98 KP03 관측소 지진자료의 주파수밀도값의 확률분포(PSD)(좌)와 주파수밀도값의 시간적 변화양상(우)	128
그림 99 KGPS05 측정의 GPS 자료 처리 결과	130
그림 100 빙저호 지역 주변 ICESat 고도 변화 관측 결과(2003년-2009년). 단위는 m/yr	130
그림 101 2015/2016년 하계기간 중 데이비드 빙하 상류 빙저호 지역에 설치된 GPS의 위치	131
그림 102 D1 빙저호 지역의 (좌) 고도 모델(DEM)과 (우) 광역 추세 제거 후의 잔여 고도	131
그림 103 D2 빙저호 지역의 (좌) 고도 모델(DEM)과 (우) 광역 추세 제거 후의 잔여 고도	132
그림 104 난센 빙봉 관측망: AMIGOS 및 GPS 측정(적색원), 미국 NASA 연구진의 단기 GPS 관측 측정(흑색원)	133
그림 105 ICESat 및 Cryosat-2에 의해 관측된 난센 빙봉의 표면 고도	133
그림 106 난센 빙봉에 설치된 KA6	134
그림 107 KA6에서 관측하는 카메라 영상. 표면 용융에 의해 생기는 표면 연못을 촬영함	134
그림 108 캄벨 빙하 지역의 GPS 측정	134
그림 109 멜버른 화산 지역 자기지전류 탐사 측정	135
그림 110 멜버른화산 자기지전류 탐사. (좌상) 티타늄 튜브형 전극, (우상) 기록계 및 배터리 박스, (하) 탐사 전경	136
그림 111 지하에 매설된 중력계실 전경	137
그림 112 펌프를 이용하여 액체 헬륨 용기 외벽을 진공으로 만드는 작업 및 결과	138
그림 113 냉각기-압축기 간 헬륨 호스 및 각종 케이블용 관로 매설	138
그림 114 중력 센서부 및 냉각기 설치	139
그림 115 지구물리 관측동 내 압축기 및 전원공급장치 설치	139
그림 116 2015년 12월 25일 이후 초기 냉각에 따른 액체 헬륨 용기 내 온도 변화 및 액체 헬륨 충전율의 변화	140
그림 117 2016년 1월 6일 이후 중력 측정 결과 및 지진파에 의한 중력 기록 변화	140
그림 118 지진파 잡음을 보여주는 중력 관측 자료의 파워 스펙트럼	141
그림 119 초전도 중력계의 네트워크 개략도	142
그림 120 teamviewer를 이용한 초전도 중력계의 원격 제어 화면	142
그림 121 데이비드빙하 관측망(KPSN@DG)	144

그림 122 KDG02 관측소의 연중 온도 및 전압 변화	145
그림 123 기록계 오작동으로 2016년 106일 이후로 기록이 중단된 KDG04 관측소	146
그림 124 겨울철 강풍으로 인해 파손되어 기록이 중단된 KDG07 관측소	146
그림 125 강풍으로 케이블 및 단열박스가 파손된 KDG07 관측소	147
그림 126 테라노바만 지진관측망(KPSN@TNB)	147
그림 127 테라노바만 관측망 유지/보수 작업	148
그림 128 난센빙봉 지진 관측망(KPSN@N)	148
그림 129 2015-16 시즌 신규 설치한 직후의 KN01 관측소의 모습(좌)과 겨울철 강풍으로 파손 된 모습(우)	150
그림 130 강풍에 파손된 KN02 관측소 전경(좌), 솔라패널 Tower를 반으로 줄여 복구한 모습(우) ..	150
그림 131 동계시즌 강풍에 파손된 난센빙봉 지진 관측소들의 모습	151
그림 132 Vegetation Island 에 신규 설치한 관측소 전경(KT)	152
그림 133 난센빙봉 임시 지진관측망(TRL)	152
그림 134 난센빙봉 위 얼음 지형에 설치한 임시 지진관측소 설치 과정	154
그림 135 암반지대에 설치한 임시 지진관측소 설치 과정	154
그림 136 대륙 빙하 위의 눈이 많은 지형에 설치한 임시 지진관측소 설치 과정	154
그림 137 캠벨 빙하 GPS 관측망 위치도	155
그림 138 KGPS21측점의 GPS 관측 결과. (좌상) GPS 속도 변화, (우상) 선형 성분이 제거된 수평 변위, (좌하) 선형 성분이 제거된 수직 변위, (우하) 수평 변위의 공간적 형태(색깔 은 시간을 의미함)	156
그림 139 KGPS20측점의 GPS 관측 결과	156
그림 140 KGPS22측점의 GPS 관측 결과	157
그림 141 (좌) 장보고기지 중장비동 절대 중력 측정과 (우) 초전도 중력계실에서의 절대 중력 측정	158
그림 142 (좌) 중장비도의 절대 중력 관측 결과 및 (우) 초전도 중력계실의 관측 결과	159
그림 143 2016년도 초전도 중력계 관측 결과. (상) 지구조석 모델과 관측값의 비교, (중) 지구조 석이 제거된 관측값과 해양 조석 모델의 비교, (하) 지구 조석 및 해양 조석이 제거된 잔여 중력값	160
그림 144 난센 빙봉의 Landsat 8 영상 및 Cryosat-2로부터의 빙봉 두께	161
그림 145 (좌) 시추 위치, (우) 시추 위치의 확대 영상	161
그림 146 난센 빙봉에 설치된 AMIGOS-II 시스템의 개요	162
그림 147 열수 시추 현장	163
그림 148 열수 시추 과정	163
그림 149 AMIGOS-II 조립 과정	163
그림 150 접지 와이어 및 무게추 설치	164
그림 151 AMIGOS-II 설치 모습	164
그림 152 CTD와 Aquadopp에 관측된 온도 자료	165
그림 153 DTS 광케이블에 의해 관측된 온도 구배	166
그림 154 8개의 표층 온도 센서에서 측정된 온도 변화	166
그림 155 ApRES 탐사 위치	167
그림 156 ApRES 탐사 현장 (ApDRY3)	168
그림 157 ApDRY1 측점에서의 레이더 반사파: 빙봉 두께 1240m	168
그림 158 ApDRY2 측점에서의 레이더 반사파: 빙봉두께 127m	169

그림 159 ApDRY3 측점에서의 레이더 반사파: 빙붕두께 148m	169
그림 160 ApHWD1, ApHWD2, ApHWD3 측점의 레이더 반사파: 빙붕두께 각각 382m, 440m, 408m	170
그림 161 헬리콥터 탑재 빙하투과레이더 시스템	170
그림 162 항공 빙하투과레이더 측선도(흑색실선)	171
그림 163 항공 중력 탐사 측선도(흑색실선)	172
그림 164 난센 빙붕 육상 레이더 탐사	172
그림 165 난센 빙붕의 육상 GPR 탐사 측선(적색 실선). 보라색 선은 기존 항공레이더 탐사 측선임.	173
그림 166 육상 GPR 탐사 결과의 예	173
그림 167 데이비드 빙하 지진 관측망 지도(KPSN@DG)	176
그림 168 KDG02 관측소의 연간 전압, 온도 변화	177
그림 169 기록계 오류로 인해 기록이 중단된 KDG04 관측소	177
그림 170 강풍으로 인해 솔라패널이 파손된 KDG05 관측소	178
그림 171 동계 기간 동안 강한 바람으로 인해 기록계 단열박스가 유실되고 케이블이 파손된 KDG06 관측소	178
그림 172 테라노바만 지진관측망 지도(KPSN@TNB)	179
그림 173 동계 기간 전력 공급 부족으로 기록이 중단된 KP01 관측소	180
그림 174 난센빙붕 지진 관측망(KPSN@N)	181
그림 175 솔라패널 파손으로 인해 불안정한 전력공급을 나타내는 KN03 관측소	182
그림 176 알루미늄타워의 바닥이 휘어질 정도의 강풍으로 인해 파손된 KN03 관측소	183
그림 177 데이비드 빙하 상부의 빙저호 GPS 관측망 지도	185
그림 178 매 12시간 간격으로 기록된 KGPS13 관측소 정보(신형 GPS 컨트롤 보드와 리튬배터리 5개를 적용)	186
그림 179 매 6시간 간격으로 기록된 KGPS11 관측소 정보(신형 GPS 컨트롤 보드, 40W 솔라패널과 충전식 리튬이온 배터리 적용)	187
그림 180 빙저호 D1에 설치된 KGPS13 관측소의 위치 변화	188
그림 181 빙저호 D2에 설치된 KGPS18 관측소의 위치변화	189
그림 182 멜번 화산에 설치된 MT 관측 장비	190
그림 183 장보고기지에 설치된 초전도 중력계	190
그림 184 장보고기지에 설치된 초전도 중력계 cold head 교체	191
그림 185 iGrav 초전도 중력계를 통해 획득한 2년간의 중력 데이터	191
그림 186 Amplitude of tidal constituents reduced by various tide models.	192
그림 187 2016/17 시즌에 설치된 ApRES 관측 사이트 위치	192
그림 188 조사 항목 및 세부 지역	193
그림 189 캠벨 빙하 KGPS21측점에서 관측된 빙하 속도 및 고도의 주기적 변화	199
그림 190 데이비드 빙하 D2 빙저호(KGPS18)에서 관측된 고도 변화	199
그림 191 자기지전류 모니터링 장비 회수	200
그림 192 초전도 중력계 cold head 교체	200
그림 193 드라이갈스키 빙붕 KA2 측점의 수평 거동 양상	201
그림 194 난센 빙붕 ApRES 탐사	202
그림 195 프리슬리 빙하 근처 난센 빙붕에서의 하부용융량 변화	202
그림 196 KUM사의 해저면 지진계, LOBSTER의 모습. 티타늄 프레임에 앵커, 부이, 센서, 기록	

계, 배터리, 어쿠스틱 릴리저, 압력 센서가 일체형으로 조립됨	204
그림 197 2014/2015 남극하계탐사에서 회수 시도한 해저면 지진계 2기(KPOBS01, KPOBS02: 회수실패)와 해저면 수중음향관측기 1기(KPOBH01)의 위치	205
그림 198 KPOBS01 회수 장면	206
그림 199 해저면 수중음향관측장비(KOBH01).	206
그림 200 KPOBS01 위치에서 획득한 XCTD 결과	207
그림 201 드라이갈스키 빙설 남쪽 KPOBS02 위치에서 측정된 XCTD 결과	207
그림 202 KPOBH01 위치에서 측정된 XCTD 결과	208
그림 203 연구 작업 수행 정점과 항적도	210
그림 204 하이드로폰 설치 위치도	211
그림 205 계류장비 모식도	212
그림 206 하이드로폰 설치 과정	213
그림 207 KPDR01 해저면 지진계 회수	214
그림 208 계류 위치도	215
그림 209 NIWA 계류장비 구성 모식도	216
그림 210 상부 해류 측정	217
그림 211 상부 해류 방향과 속도	217
그림 212 상부 해류 변화양상	218
그림 213 상부 압력, 온도 염도	218
그림 214 중간부 센서에서 측정된 해류, 온도	219
그림 215 중간부 해류 방향	219
그림 216 중간부 깊이에서의 해류 방향 변화 양상	220
그림 217 중간 깊이에서의 압력, 온도, 염도	220
그림 218 하단부 압력 온도 염도	221
그림 219 하단부 해류 측정 결과	221
그림 220 하단부 해류 방향	222
그림 221 하단부 해류 변화 양상	222
그림 222 깊이에 따른 압력과 해류 속도	223
그림 223 해류 속도에 따른 계류장비 높이 변화	223
그림 224 깊이별 시간에 따른 수온 변화	224
그림 225 깊이별 시간에 따른 수온 변화 (그림 221에서 색상표 변환)	224
그림 226 LDEO 계류장비 구조	225
그림 227 멀티빔 탐사를 통한 LDEO 계류장비 설치 위치 선정	226
그림 228 CTD와 LADCP 관측 위치도	227
그림 229 드라이갈스키 빙설 주변 CTD 관측을 통해 획득한 온도, 염도 변화	228
그림 230 아라온에 멀티빔 센서를 부착하여 탐사 수행	229
그림 231 멀티빔 센서 테스트 결과	230
그림 232 조디악에 SBP센서를 부착하여 드라이갈스키 빙설 벽면 탐사를 수행	230
그림 233 SBP를 통해 얻은 빙설 벽면 구조	231
그림 234 CTD와 LADCP 관측 위치도	233
그림 235 난센빙봉 주변 CTD 관측을 통해 획득한 수온 자료	237
그림 236 2016/17년 남극 하계탐사에서 수행한 모든 CTD의 온도-압력 그래프	237
그림 237 왼쪽은 2016/17년 남극 하계탐사에서 수행한 모든 CTD의 염도-온도 그래프	238

그림 238	난센빙봉에서 CTD yo-yo 관측을 통해 획득한 수온 자료	239
그림 239	LADCP 자료 1차 분석으로 얻은 테라노바만의 조류 방향	240
그림 240	본 탐사에서 쓰인 Rockland VMP250IR 장비	241
그림 241	난센 빙봉 주변 VMP 측정 정점	241
그림 242	VMP 측정 결과와 초기 분석 값	243
그림 243	해양 생물과 해양 화학 분석 시료의 채수 정점(좌) 및 CTD로 측정된 표층 fluorescence의 분포(우)	244
그림 244	해양 계류장비 전체의 위치도, 항적도는 갈색으로 나타나있고 노란색 점은 Vertical Profiler 측정 위치를 나타낸다.	244
그림 245	이탈신호를 받고 떠오른 DITN 계류장비의 부이	245
그림 246	DITN 사이트에 회수한 장비(좌)와 새롭게 설치한 계류장비(우)의 모식도와 장비 모델명	246
그림 247	트라이앵글레이션 위치결정 작업 결과	248
그림 248	DITN 계류장비에서 측정한 온도, 염도, 해류 속도의 시간 그래프. 녹색은 가장 높은 곳인 70 m 깊이에서 측정한 결과 값을 나타내고, 빨간 그래프는 중간의 270 m 깊이에서 측정한 값, 파란색은 가장 깊은 곳인 650 m 깊이에서 측정한 값이다	249
그림 249	2014년 12월부터 2017년 2월까지의 해류 측정자료	250
그림 250	DITD 계류장비의 구조 모식도	251
그림 251	DITD 트라이앵글레이션 작업 결과	252
그림 252	2017년 2월 11일의 해빙상황	253
그림 253	2017년 2월 12일에 계류된 DITS 1702 모식도	254
그림 254	DITS 1702 트라이앵글레이션 위치결정 결과	256
그림 255	수중음향 계류장비 모식도	257
그림 256	수중음향 관측기 설치 작업	258
그림 257	트라이앵글레이션 계산 결과	258
그림 258	2015/2016 시즌에 설치한 남쪽 수중음향 관측망의 트라이앵글레이션 계산결과	259
그림 259	2016/2017 시즌에 설치한 남쪽 수중음향 관측망의 트라이앵글레이션 계산결과	260
그림 260	KPOBS03 설치 로그시트	262
그림 261	2015/2016년에 설치한 LDEO 계류장비의 구조도	263
그림 262	계류장비 수색 포인트	264
그림 263	2016/2017 테라노바만에 LDEO 계류장비 재설치 모습	264
그림 264	M-Cal 프로그램을 이용한 트라이앵글레이션 작업	265
그림 265	트라이앵글레이션으로 계산한 LDEO 계류 위치	266
그림 266	(a) 발라스트 테스트 장소인 장보고 기지 구부두 (b) Gavia AUV의 발라스트 조정	267
그림 267	글라이더 나침반의 방향값 보정 작업	268
그림 268	글라이더 테스트 운항 결과	269
그림 269	해빙 지역에서의 운항 소프트웨어 로직	270
그림 270	1월 31일 아라운 후갑판에서 글라이더 투입 작업	271
그림 271	글라이더 이상 동작 (Pitch)	271
그림 272	글라이더 이상 동작 (잠수 깊이)	271
그림 273	글라이더 회수 당시 통신 모듈에 얼음이 맺힌 모습	272
그림 274	글라이더의 테스트 지점과 항적도	272
그림 275	글라이더가 측정한 온도 프로파일. 초저온수의 존재를 확인할 수 있다	273
그림 276	글라이더에서 측정한 해수의 온도-염분 다이어그램. 위도는 색깔로 나타냈다	273

그림 277	글라이더의 잠수 프로파일과 가스 측정값	274
그림 278	Gavia 탐사 수행 세팅	275
그림 279	2/2에 수행한 첫 번째 Gavia test의 잠수 깊이 로그	276
그림 280	2번째 미션에서의 잠수 깊이 로그	276
그림 281	3번째 미션 수행에서의 깊이 로그	277
그림 282	4번째 성공적인 미션 수행에서 잠수 로그 파일	277
그림 283	4번째 미션 수행에서 멀티빔 자료로부터 획득한 난센빙봉 하부의 구조	278
그림 284	4번째 미션 수행으로 얻은 난센 빙봉의 하부 구조 단면도	278
그림 285	Side Scan Sonar(SSS) 결과로부터 얻은 깊이 프로파일 단면도	278
그림 286	난센 빙봉 하부의 SSS 이미지 캡취	279
그림 287	2/14 탐사에서 해수면 상태와 해저에서의 촬영한 AUV와 해빙 파편들	280
그림 288	2월 14일 탐사에서 획득한 수층의 Sidescan 이미지	280
그림 289	멀티빔 탐사를 통해 획득한 난센 빙봉이 깨지면서 새롭게 드러난 해저면의 구조. 빨간 사각형으로 표시된 부분이 발견된 해저협곡이다.	281
그림 290	탐사지역 및 OBS, MCS 정점정보	281
그림 291	2016-2017 남극 로스해 OBS & MCS 탐사 모식도	282
그림 292	OBS 탐사 현장기록	283
그림 293	해저면 지진계 설치 및 회수	284
그림 294	Wide Angle Seismic 자료 획득을 위한 대용량 에어건 조립 및 설치	285
그림 295	아라온에 탑재된 컴프레서 용량을 고려한 최적의 발파간격 산정	285
그림 296	다중채널 탄성과 탐사 모식도	286
그림 297	BB01 다중채널 탄성과 탐사 측선에 대한 현장기록	286
그림 298	BB02 다중채널 탄성과 탐사 측선에 대한 현장기록	287
그림 299	탄성과 탐사자료 기록과정	287
그림 300	다중채널 탄성과 탐사자료 획득을 위한 에어건 및 스트리머 (Streamer) 설치 및 탐사 과정	289
그림 301	OBS 기록된 탄성과 신호 (자료처리 전, Raw Data)	289
그림 302	탄성과 탐사단면 (Brute Stack images)	290
그림 303	다중채널 탄성과 탐사 측선변경 및 해빙상황	291
그림 304	다중채널 탄성과 탐사 측선변경 및 해빙상황	292
그림 305	장보고 주변 해수면 마이크로층에서 분리한 신종 미생물(Pseudoalteromonas neustonica)의 16S rRNA 유전자 계통수	295
그림 306	14/15~16/17 남극 하계 관측 정점과 17/18 남극 하계 관측 정점도	297
그림 307	17/18 남극 하계 탐사에서 관측한 모든 CTD 자료의 온위-염분 다이어그램	299
그림 308	17/18 남극 하계 탐사 secondary 센서에서 얻어진 온위-염분 그리고 용존산소 다이어그램	300
그림 309	정점별 -1.95°C 이하 수온이 나타나는 수심의 두께.(검은 정점은 supercooled water가 관측되지 않았음을 의미함)	301
그림 310	LADCP로 관측된 17/18 테라노바만 해류 분포 (전 수심 평균)	301
그림 311	LADCP로 관측된 17/18 테라노바만 해류 분포 (수심별 평균)	302
그림 312	16/17 시즌에 설치한 수중음향관측망(검은색 원)과 17/18 시즌에 설치한 관측망(흰색 원)의 위치	304
그림 313	회수가 불가능했을 당시 설치 지점의 해빙 상황	305

그림 314 회수 시 조류에 의해 밀려든 해빙에 플로트가 끼인 상황	306
그림 315 3월에는 해빙이 테라노바만에서 활발하게 생성되어 회수시 해빙에 의한 라인과 장비 손상 위험성이 존재함	306
그림 316 2018년 3월 6일에 수행된 DITN 회수작업	307
그림 317 DITN 계류장비 모식도	308
그림 318 DITD 장비 모식도	310
그림 319 DITS 무어링 모식도	311
그림 320 드라이갈스키 남쪽 활강풍이 불기 전과 활강풍이 불어서 해빙이 밀려난 후	311
그림 321 도착 당시의 평균 45 노트, 최고 50 노트에 달하는 풍속	312
그림 322 2018년 3월 8일에 수행된 DITS 회수작업	312
그림 323 DITS 투입당시 연결 부속품 절단	313
그림 324 재 회수된 계류장비 하부의 플로트	313
그림 325 부품 교체후 재 연결된 무어링	314
그림 326 어쿠스틱 릴리저 투입	314
그림 327 16/17년도에 설치하여 본 항차에서 회수한 계류장비의 위치	315
그림 328 회수 당시 해빙 상황	315
그림 329 TNBD 계류장비 설치 위치	316
그림 330 TNBD 계류장비 모식도	317
그림 331 해양 생물과 화학 분석 시료 확보 정점	328
그림 332 난센빙봉 주변 빙하 용빙수 및 해수의 영양염 분석 자료	328
그림 333 장보고 기지 주변 테라노바만과 인근 로스해 관측지점	330
그림 334 18/19 남극 하계 테라노바 만 CTD/LADCP 관측 정점	331
그림 335 18/19 남극 하계 CTD 관측 수온 염분 다이어그램	333
그림 336 과거와의 수온-염분 다이어그램 비교 1	334
그림 337 과거와의 수온-염분 다이어그램 비교 2	335
그림 338 과거와의 염분 수직 프로파일 비교	336
그림 339 과거와의 온위 수직 프로파일 비교	336
그림 340 18/19 남극 하계 관측에서 관측된 온난층의 공간 및 수직 분포	337
그림 341 과거와의 온난층 비교	337
그림 342 LADCP 관측 상층 유속 및 심층 유속 평균	338
그림 343 수중음향 관측기 설치 위치	339
그림 344 2018년에 설치하여 2019년 1월에 회수한 DITD18장비 모식도(왼쪽)와 본 항차에서 설치한 DITD19 장비 모식도 (오른쪽)	342
그림 345 본 항차에서 회수된 DITD18 자료 1차 분석 결과	343
그림 346 2018년에 설치하여 2019년 1월에 회수한 DITN18장비 모식도(왼쪽)와 본 항차에서 설치한 DITN19 장비 모식도 (오른쪽)	345
그림 347 본 항차에서 회수된 DITN18 자료 1차 분석 결과	346
그림 348 2018년 3월에 설치하여 2019년 1월에 회수한 TNBD장비 모식도	348
그림 349 본 항차에서 회수된 TNBD 자료 1차 분석 결과	349
그림 350 장보고 기지주변 육상에서 이루어진 글라이더 나침반 보정 작업	350
그림 351 글라이더 투입을 위해 조디악보트를 내리는 과정(위)과 글라이더 회수작업 (아래)	352
그림 352 난센 빙벽을 따라서 수행된 글라이더 첫 번째 미션 루트. 붉은색은 계획된 루트이고 검은색은 실제 글라이더 이동 경로	353

그림 353	첫 번째 미션 후에 손상된 글라이더 꼬리 방향타(digifin)	353
그림 354	첫 번째 미션에서 획득한 온도(상) 염분(하) 관측 자료. UTC 기준 시간	354
그림 355	첫 번째 미션에서 획득한 클로로필(상) 산소포화도(하) 관측 자료	354
그림 356	첫 번째 미션 중 가장 강한 초저온수가 나온 Inexpressible Island의 온도(파란색), 염분(빨간색), 난류 분산율 (검정색)	355
그림 357	첫 번째 미션에서 관측한 난류 분산율, 상단은 북쪽으로 운항 시의 프로파일이고 하단 그림은 남쪽으로 운항 시 관측한 프로파일이다	355
그림 358	난센 빙봉 하부 탐사를 위한 두 번째 미션 운항 경로	356
그림 359	두 번째 미션에서 획득한 온도(상) 염분(하) 관측 자료	357
그림 360	두 번째 미션에서 획득한 클로로필(상) 산소포화도(하) 관측 자료	358
그림 361	난센 빙봉 하부의 온도 프로파일	358
그림 362	두 번째 미션 후반부 박스 미션에서 관측한 수온 프로파일	359
그림 363	온난층 관측을 위한 글라이더 세 번째 미션 탐사 경로	359
그림 364	세 번째 미션에서 획득한 온도(상) 염분(하) 관측 자료	360
그림 365	세 번째 미션에서 획득한 클로로필(상) 산소포화도(하) 관측 자료	360
그림 366	관측 전후 검보정 적용 결과 예시 (15/16 탐사)	366
그림 367	SBE data processing 프로그램 처리 순서	366
그림 368	scan number에 따른 압력과 전기전도도 예시 그래프	367
그림 369	수온과 전기전도도 센서간의 반응 시간 차이로 인해 생기는 염분 스파이크 예시	371
그림 370	CTD 장비를 내릴 때와 올릴 때 염분 값의 차이를 최소로 하는 , 값을 이용, CellTM 과정을 적용한 예시	375
그림 371	15/16 CTD 원시자료(Before)와 QC 적용 후(After) 온위-염분 다이어그램 비교	379
그림 372	QC 완료 CTD 자료를 이용한 5개년 동안의 온위-염분 다이어그램	379
그림 373	LDEO 소프트웨어를 이용한 18/19 탐사 9번째 cast LADCP 자료 처리 결과 예시	381
그림 374	LADCP 자료 QC 이전(위 그림)과 이후(아래 그림) Ensemble과 Bin 번호에 따른 신호 세기 예시	382
그림 375	Uplooker LADCP 및 bottom tracking을 할 경우의 Ensemble과 Bin 번호에 따른 신호 세기 (출처: LDEO data processing manual)	382
그림 376	Uplooker LADCP 및 SADCP를 자료를 사용하고 bottom tracking을 할 경우의	383
그림 377	CATS 모델 정보	384
그림 378	QC 완료 LADCP 자료를 이용한 테라노바 만의 유속 분포	385
그림 379	Aquadopp current meter 자료 처리 후 유속 자료 시계열 예시	393
그림 380	Aquadopp current meter 자료 처리 후 유속 자료 통계	394
그림 381	QC 완료된 DITN, DITD 계류선 수심별 월평균 유속 분포 (Red: DITN 70 m, Black: DITN 270 m, Blue: DITN 660 m, Magenta: DITD 1200 m)	395
그림 382	DITN 3번째 leg(2017.02 ~ 2018.03) 기간 SBE37(#15240) 자료의 QC 전후 압력, 수온, 염분 시계열 모습 비교 예시	396
그림 383	QC 완료된 DITN 계류선 수심별 염분의 시계열과 검보정에 사용된 CTD 그림	396
그림 384	17/18 관측에서 얻어진 SADCP 자료를 통한 수심별 평균 유속 분포(파랑)와 아라온의 이동 경로(검정) 예시	397
그림 385	CODAS 프로그램을 이용한 SADCP 자료 처리 화면	398
그림 386	17/18 관측에서 얻어진 LADCP 자료와 SADCP 자료간의 상층 유속 비교	398
그림 387	MT 측정 방식 모식도	400

그림 388	예비 탐사 위치	401
그림 389	예비 MT탐사 현장 전경	401
그림 390	예비 MT 탐사 및 개발 장비 세팅 모습	402
그림 391	예비 MT 탐사 결과	403
그림 392	MT 장치 개발 시제품 및 납극 적용 모습	403
그림 393	티타늄 메쉬 전극 매설	404
그림 394	납극 멜버른 화산 부근에서 수행된 MT 탐사 결과	404
그림 395	MT 모니터링 장비 시제품 구성 모식도	405
그림 396	MT 모니터링 장비 시제품 성능 및 현장 설치모습	406
그림 397	MT 모니터링 장비 현장 설치 위치	406
그림 398	MT 관측 결과	407
그림 399	빙하용 전극시스템 모식도	408
그림 400	3차원 모식도	408
그림 401	FEM 모델링을 통한 온도 변화 모델링	409
그림 402	36시간 이후의 온도 변화	409
그림 403	1시간 이후의 전극 내부 온도 변화	410
그림 404	6시간 이후의 전극 내부 온도 변화	410
그림 405	12시간 이후의 전극 내부 온도 변화	411
그림 406	120시간 이후의 전극 내부 온도 변화	411
그림 407	180시간 이후의 전극 내부 온도 변화	412
그림 408	시간 변화에 따른 전극시스템 온도 변화 그래프	412
그림 409	극지 환경용 전극별 설치 방식 비교	413
그림 410	오거 방식의 전극장치 모식도	414
그림 411	오거 방식의 전극장치 현장 적용 시나리오	415
그림 412	오거 방식의 전극장치 3차원 설계도	416
그림 413	전극장치 개발 모습 - 세부	417
그림 414	전극장치 개발 모습 - 전체	417
그림 415	GUI 구성 설계도	418
그림 416	GUI 제작 구성	419
그림 417	MT 모니터링 소프트웨어 화면	419
그림 418	MT 모니터링 소프트웨어 구동 모습	420
그림 419	데이비드 빙하 상류 빙저호의 분포 (Smith <i>et al.</i> , 2009)	421
그림 420	데이비드 빙하 빙저호의 부피변화 시계열자료 (Smith <i>et al.</i> , 2009)	421
그림 421	(상) 빙저호(원) 및 ICESat 트랙(직선)의 위치. (중) 트랙을 따라 관측된 표면고도. (하) 수치지형모델에 의해 지형 효과가 제거된 표면 고도 잔차	422
그림 422	빙저호 D1과 D2 주변의 ICESat 평균 고도 변화량 (2003년-2009년). 단위는 m/yr	423
그림 423	Cryosat-2 Swath 기법을 이용한 데이비드 빙하 빙저호 지역 정밀 수치 고도 모델	424
그림 424	수치 고도 모델(DEM)과 항공 레이저 고도계 탐사 자료의 비교: (좌상) Cryosat-2 Swath 기법 DEM, (우상) BEDMAP2 DEM, (좌하) Cryosat-2 L2 DEM, (우하) ICESat DEM	424
그림 425	데이비드 빙하 빙저호 지역 표면 고도 변화(단위 m/yr). D2 빙저호 지역에서 뚜렷한 수위변화 관측됨	425
그림 426	헬리콥터 항공 지구물리 탐사 시스템 (미국 UTIG와 공동 탐사 수행); 빙하투과 레이	

더, 레이저 고도계, DSLR 카메라 탑재	426
그림 427 데이비드 빙하 지역 헬리콥터 레이더 탐사 측선 (흑색선)	426
그림 428 헬리콥터 레이더 탐사를 통해 규명된 데이비드 빙하 빙저 기반암 고도	427
그림 429 D1 및 D2 지역 (좌) 수리포텐셜 분포 및 (우) 수리포텐셜 경사	427
그림 430 인공위성 고도계와 수리포텐셜로부터 추정되는 데이비드 빙하 빙저호 분포	428
그림 431 ICESat 고도계로 관측된 D1 빙저호들의 평균 고도 변화	429
그림 432 Cryosat-2 고도계로 관측된 D2 및 D7 빙저호의 최대 고도 변화	430
그림 433 ICESat 고도계 자료와 헬리콥터 고도계 자료의 차이	431
그림 434 ICESat 고도계 자료와 헬리콥터 고도계 자료의 차이	431
그림 435 데이비드 빙저호 지역에 설치된 GPS 측점	432
그림 436 D2 빙저호에 위치한 KGPS18 측점의 고도 변화	433
그림 437 GPS로 관측된 빙저호 지역 고도 변화율. 적색화살표: 양의 고도변화율, 청색화살표: 음의 고도 변화율	433
그림 438 남극 빙저 수문망	434
그림 439 GPS 고도변화 및 인공위성 고도계 자료를 활용한 남극지역 수문 변동 주기 연구 사 례 (Fricker <i>et al.</i> , 2014)	435
그림 440 항공레이더 탐사 자료 기반 빙저 수문망 형태 및 빙저수 부존 예측지역 규명 사례 (Schroeder <i>et al.</i> , 2013)	435
그림 441 빙저수문망 흐름의 동적 변동성	436
그림 442 빙권-암권 경계에서 생성되는 다양한 수문흐름 구조(Flowers <i>et al.</i> , 2015)	437
그림 443 SHMIP 프로젝트에서 활용된 빙저수문망 모델들의 출력값(유효압력과 흐름형태) 비교 (de Fluverian <i>et al.</i> , 2018)	438
그림 444 GlaDS 모델의 격자망	440
그림 445 빙저 수문망 흐름에서 두가지 흐름요소의 상호작용을 보여주는 모식도	441
그림 446 남극 Recovery Ice stream 을 개념화한 수치모델 도메인에서 빙저수문망 모델을 수행 하여 표면수의 유입 없이도, 빙저 용융량의 급격한 유입이 있는 하류지역에서 채널의 생 성과 소멸로 인한 빙저호의 filling & drainage의 주기성이 만들어 질수 있다는 것이 규 명되었음 (Dow <i>et al.</i> , 2016)	442
그림 447 Recovery Ice stream에서 빙저수문 변동성 연구: 실제 유역규모의 수치모델 도메인을 구축하여, 인공위성고도계(ICESat)자료 와 연계하여 빙저수문 변동성을 해석하고자 하였 음(Dow <i>et al.</i> , 2018)	443
그림 448 데이비드 빙하지역에 구축된 빙저수문 모델 격자망: 기반선 및 주요 관측 빙저호 지 역에 세밀한 격자망을 구성하였음	444
그림 449 데이비드 빙하 유역의 주요 빙저호 위치	445
그림 450 빙저수문모델에 활용된 데이비드 빙하 하부 지형(좌) 및 표면 고도(우)(m)	446
그림 451 빙저수문망 두께 결과 [Case A : $K_s(1 \times 10^{-4} \text{ m}^{7/4} \text{ kg}^{-1/2})$, $K_c(5 \times 10^{-2} \text{ m}^{3/2} \text{ kg}^{-1/2})$, 빙저용융량 (8mm/a): 가시성을 위해 최대값 5m의 범위에서 공간 분포값을 도 시하였음	447
그림 452 빙저수문망 두께 결과 [Case B : $K_s(1 \times 10^{-5} \text{ m}^{\text{H}} \text{ kg}^{-1/2})$, $K_c(5 \times 10^{-2} \text{ m}^{3/2} \text{ kg}^{-1/2})$, 빙저용융량 (5mm/a): 가시성을 위해 최대값 5m의 범위에서 공간 분포값을 도시	448
그림 453 빙상압력 대비 빙저수 압력분포 [Case C : $K_s(1 \times 10^{-4} \text{ m}^{7/4} \text{ kg}^{-1/2})$, $K_c(4 \times 10^{-2} \text{ m}^{3/2} \text{ kg}^{-1/2})$, 빙저용융량 (8mm/a)]	449
그림 454 빙저수 압력 및 반사도(specularity) 공간분포 비교 [Case A : $K_s(1 \times 10^{-4} \text{ m}^{7/4}$	

	kg-1/2), Kc(5x10 ⁻² m ³ /2 kg-1/2), 빙저용융량 (8mm/a): 반사도 0.4 이상의 지역의 위치와 빙저호_D1, D2u, D2d 경계를 함께 도시하였음	450
그림 455	유역 내 채널형성 분포도 [Case A : Ks(1 x10 ⁻⁴ m ⁷ /4 kg-1/2), Kc(5x10 ⁻² m ³ /2 kg-1/2), 빙저용융량 (8mm/a)]	451
그림 456	유역 내 채널형성 분포도 [Case B : Ks(1 x10 ⁻⁵ m ⁷ /4 kg-1/2), Kc(5x10 ⁻² m ³ /2 kg-1/2), 빙저용융량 (5mm/a)]	452
그림 457	CASE A 모델 결과 지반선으로 빠져나가는 주요 흐름 채널의 위치	453
그림 458	REMA 고도 자료에서 드라이갈스키 빙설의 두꺼운 부분과 빙설하부 채널분포	453
그림 459	장보고기지 및 캠벨 빙하의 위치. 빙하천 흐름 지역을 따라 GPS 5기를 설치하여 표면 고도와 속도의 시계열 자료를 획득 하고 있음	455
그림 460	캠벨 빙하 빙저수문망 격자망 구성 및 경계조건	456
그림 461	16/17 하계남극 탐사에서 수행한 캠벨빙하 KOPRI-UTIG 항공 레이더 탐사 축선	456
그림 462	캠벨빙하 빙저지형 (좌상) 기존 Bedmap2 기반 빙저지형 고도 공간 분포 (우상) 개선된 Bedmachine2 기반 빙저지형 공간분포 (하) 주 흐름 방향을 따라 도출된 두 가지 지형간의 비교	457
그림 463	(좌) 모델에서 수문망 상부 빙상(overburden ice)의 두께 분포 (우) 모델에서 가정된 빙저면 미끄러짐 속도 분포	458
그림 464	부정류 모델에서 입력된 빙저 용융량 분포	459
그림 465	정류모델에서의 초기 빙저수문망 두께 및 유효압력값 분포	460
그림 466	Case A (Kc=1e-3), B (Kc=7e-3), C (Kc=2e-2)에서 모델의 구동에 따른 수문 변화. A-1, B-1, C-1은 모델구동 20년 후 결과, A-2, B-2, C-2는 부정류모델의 최종 결과 값을 나타냄	461
그림 467	모델 기간동안 각 Case별 빙저수문 최대 두께 분포 및 유효압력 분포	462
그림 468	빙저수문 두께 변동성 (모델 기간중 최대수치 - 모델최종수치) (좌) CASE B (우) CASE C	463
그림 469	부정류모델에서의 채널 흐름 생성 분포 형태	463
그림 470	데이비드 지역 빙하 이동속도 (MEaSURES, Rignot <i>et al.</i> , 2017)	465
그림 471	GPS 관측 빙하 속도와 InSAR 관측 빙하 속도의 차이 (GPS-InSAR)	466
그림 472	2013년에 관측된 드라이갈스키 빙설위의 GPS 위치와 GPS 속도의 잔차(GPS 속도 - 평균속도)	467
그림 473	KA2 측점에서의 GPS 관측자료(적색선), GoLIVE 속도 자료(Scambos <i>et al.</i> , 2016), InSAR 속도 자료(Mouginot <i>et al.</i> , 2017)의 비교. (상) 이동 속도 및 (하) 이동 방향	468
그림 474	KA2 측점 속도 성분의 분해. (a) 좌표계 상의 속도 성분 변화, (b) 평균 흐름 방향과 회전 방향으로 분해된 속도 성분, (c) 난센 빙봉 C-33 빙산의 속도 변화	469
그림 475	(a) 시간에 따른 난센 빙봉의 변형 모습을 보여주는 Landsat 인공위성 영상과 (b) 난센 빙봉위의 세 지점에서 관측되는 빙봉 속도 변화	469
그림 476	드라이갈스키 빙설과 난센빙봉의 상호 작용	470
그림 477	Oct-tree 방법의 간략한 도식	472
그림 478	Oct-tree 방법을 이용하여 계산된 PDF 결정 과정	473
그림 479	2016년도 관측된 장보고 기지 주변 빙진, 화산 기원 및 단층 지진원 위치	473
그림 480	데이비드 빙하 상부에서 발생한 지진원의 위치. 대부분의 지진은 데이비드 빙하가 빠르게 이동하는 지역에서 발생하고 있음.	474
그림 481	남극 분지	475

그림 482 (a) 남극 전체 빙하 감소량 (b) 각 분지별 감소율	476
그림 483 선형성분이 제거된 각 분지별 GRACE 관측값(파란색)과 SMB(빨간색)	476
그림 484 EOF로 분리한 GRACE 관측자료의 대기압 에러 성분	477
그림 485 대기압 에러가 보정된 GRACE 자료 (파란색)과 SMB (빨간색)	478
그림 486 GRACE자료 (ΔM_*)와 SMB (P_*)를 동시에 EOF 분석한 결과	478
그림 487 난센빙붕 조석분석을 위한 GPS 및 틸트미터 측정의 위치도	480
그림 488 추세가 제거된 수직 조석 변화(회색)과 평균 변위성분이 제거된 수평 변화	480
그림 489 조석 분석으로 산출된 수직 조석 성분(회색)과 수평 조석 변화(컬러)	481
그림 490 Y 방향의 틸트, 내부 온도 변화, 강설량	482
그림 491 틸트미터 성분과 인근 GPS 측정에서의 수직 조석 성분의 비교	483
그림 492 드라이갈스키 빙봉을 따른 흐름선(flow line). (a) MEaSUREs 속도 분포를 이용한 경우, (b) 각속도 $0.065^\circ/\text{yr}$ 로 보정한 속도 분포를 이용한 경우	485
그림 493 평활화 변수의 결정. (a) UTIG 레이저 고도계 관측값 및 다양한 평활화 변수에 따라 평활화된 고도들. (b) 라그랑지안 고도변화와 다양한 평활화 변수에 따른 의 비교. ...	486
그림 494 선 기반 질량 속 추정 기법의 예	487
그림 495 드라이갈스키 빙설의 질량손실(B-A)의 (상) 공간 분포와 (하) X축 방향으로의 평균 질량손실량	488
그림 496 ICESat 자료에서 산출된 정밀 고도 자료	489
그림 497 난센 빙봉 ApRES 측정	489
그림 498 1년 후 재측정을 통해 획득된 하부용융량 관측 결과	490
그림 499 HWD 측정 1차 관측 결과 (2017.02 - 2017. 06)	491
그림 500 HWD 측정 ApRES 2차 관측 결과 (2017.11 - 2018.03)	491
그림 501 NAP10 측정의 ApRES 관측 결과	492
그림 502 NAP10 측정의 GPS 관측 결과	493
그림 503 NAP10 측정의 하부용융량과 난센 빙봉 앞바다의 바람/해빙 상태와의 상관관계	494
그림 504 질량 보존 방법으로 산출한 난센 빙봉 질량 손실 분포	495
그림 505 난센 빙봉 지역의 Free-air 중력 이상	497
그림 506 중력 역산 흐름도	498
그림 507 난센 빙봉 주변의 수심(초기 모델). 단위: m	499
그림 508 난센 빙봉 주변의 해수층 두께(초기 모델). 단위: m	499
그림 509 (좌상) 관측 중력 이상과 순산 중력 이상의 차이	500
그림 510 역산을 위한 중력 이상도 제작	501
그림 511 중력 역산 결과. (상) 해저 지형도 및 (하) 해수 두께	501
그림 512 빙하 흐름선을 따라 도시한 역산 결과	502
그림 513 역산 결과에 따른 난센 빙봉 지역 해저 지형도 및 추정되는 과거 빙하 흐름	503
그림 514 다른 조건에서 채취된 눈 시료의 안정 동위 원소 값 통계적 차이	504
그림 515 (a) 테프라가 눈 위를 덮은 경우와(b) 그렇지 않은 깨끗한 눈 시료의 산소 및 수소동위 원소비 관계	505
그림 516 얼음용융도(F) 변화에 따른 용융수의 (a) 산소 동위 원소비, (b) 수소 동위 원소비 조성(삼각형) 및 모델 결과(실선)	506
그림 517 얼음이 녹아 형성된 물의 산소 및 수소 동위 원소비	508
그림 518 (a)-(d) 용융도 변동에 따른 유출량 변화를 나타낸 확률 밀도분포이다. 1-4의 실험을 통해 얻은 값이 총 유출량에서 차지하는 비를 단위시간당 유출량에 대하여 나타낸 그래프	511

그림 519 연구지역 및 시료채취 지역	512
그림 520 연구지역의 동위원소 및 염도 변화 요건과 수괴 변화 과정	513
그림 521 1차년도(P1)와 4차년도(P4) 시료의 TS 도표.	513
그림 522 (a) 해수 시료의 산소 및 수소 안정동위원소 값 (b) 산소안정동위원소와 수온 그래프 (c) 중수소과잉값과 염도 그래프 (d) 4차년도 시료의 리튬안정동위원소 값	514
그림 523 산소동위원소(a)와 수소동위원소(b)의 동위원소-염도 그래프. ISW가 노란색으로 표기 되어있으며, 각 색은 다음과 같이 채취 깊이를 의미함 ○ surface (~60m) ● upper (60m~300m) ● middle (300m~500m) ● lower (500m~)	515
그림 524 TS 도표와 함께 나타낸 각 시료의 산소동위원소 값. CDW, HSSW, Glacier는 해수의 온도와 염분에 영향을 주었을 것으로 추정되는 단 성분(endmember)	516
그림 525 보통최소자승법(OLS)과 완전최소자승법(TLS)의 개념도. 실선은 $y=a+bx$ 의 추세선을 나 타내며, 점선은 추정되는 오차를 의미함	523
그림 526 직선에 대한 완전최소자승법	523
그림 527 (a) 보통최소자승법과 완전최소자승법을 사용하여 나타낸 세종기지에서 채취한 눈 시 료와 용빙수 시료의 수소 및 산소 동위원소비의 선형관계 (b) 관찰된 자료와 보통최소 자승법, 완전최소자승법을 각각 활용해 구한 산소 동위원소값 간의 차이	524
그림 528 (a) 보통최소자승법과 완전최소자승법을 사용하여 나타낸 Lee <i>et al.</i> (2013) 에서 사용 된 수증기의 산소 및 수소 동위원소비의 선형관계 (b) 관찰된 자료와 보통최소자승법, 완전최소자승법을 각각 활용해 구한 산소동위원소 값 간의 차이	525
그림 529 염소 이온의 해수 평균 농도와 표준편차(표60)를 이용하여 혼합비 계산 오차를 나타 낸 컨투어 그래프	531
그림 530 브롬 이온의 해수 평균 농도와 표준편차(표60)를 이용하여 혼합비 계산 오차를 나타 낸 컨투어 그래프	531
그림 531 5개년 남극 하계 테라노바 만 관측을 통해 확인된 TISW(테라노바 만 빙봉수) 분포 · 532	
그림 532 왼쪽은 Jacobs(1992)에서 발췌한 것으로 용빙수 유출 기작을 모식적으로 표현한 그림. 오른쪽은 Malyarenko <i>et al.</i> (2019)에서 발췌한 것으로 wedge(저염수괴)에 의한 빙봉 용 빙 기작을 보여줌.	533
그림 533 관측별 온위-염분 다이어그램 및 wedge 관측(초록색 타원) 표시	533
그림 534 16/17 관측에서 얻어진 TISW layer(300-700 m)에서의 평균 온위, 염분, 용존 산소, 유속 분포	534
그림 535 왼쪽은 Budillon <i>et al.</i> (2011)에서 발췌한 것으로 대륙붕 부근에서의 수괴 분포를 보 여줌. 오른쪽은 Cincinelli <i>et al.</i> (2008)에서 발췌한 것으로 로스해 수괴 거동을 모식적 으로 표현한 것임.	535
그림 536 Rusciano 등[2013]에서 발췌한 것으로 활강 바람에 의한 폴리냐 발달에 따른 HSSW 의 발달 모습을 보여줌	536
그림 537 테라노바 만 CTD 및 해양 계류선 관측 정점도 (Yoon <i>et al.</i> , 2019)	537
그림 538 DITN, DITD 계류선 심층 염분 변화 시계열과 4개년 CTD 수직 프로파일 (Yoon <i>et</i> <i>al.</i> , 2019)	538
그림 539 DITN 계류선 3개 수심(70, 270, 660 m) 염분 시계열과 70, 270 m 수심간의 밀도 차 이 (Yoon <i>et al.</i> , 2019)	538
그림 540 DITN 계류선 수심별 염분의 월별 온위-염분 다이어그램 (Yoon <i>et al.</i> , 2019)	539
그림 541 4개년 LADCP 관측에서 얻어진 테라노바 만의 유속 분포와 DITN, DITD 계류선에서 관측된 월평균 유속 시계열 (Yoon <i>et al.</i> , 2019)	540

그림 542 (a) 2014년부터 2018년까지 4번의 걸친 남극 하계 관측에서 얻어진 400-700 m 평균 유속 그림. 3 km 이내로 가까운 정점에서 얻어진 자료들은 공간 평균함. 검은색 원은 LADCP 자료 정점을 나타냄. 1-2월 동안 평균한 DITN 계류선의 660 m 유속은 파란색 화살표로 표시함. DITN 계류선 근처 유속은 확대하여 오른쪽 하부에 추가로 표시함. (b) (a)와 같은 그림이나, 900 m - 바닥까지 평균한 유속에 해당함. 1-2월 동안 평균한 DITD 계류선의 1,222 m 유속은 자홍색 화살표로 표시함. (Yoon <i>et al.</i> , 2019)	541
그림 543 (a) 2107/18 남극 하계 관측에서 얻어진 CTD자료로 드라이갈스키 빙설(파란색 사각형 정점들)을 따라 그린 염분의 수직 단면도. 염분은 색으로 나타냈으며 색 범위는 (b)에 표시하였음. 간격은 0.01임. 등밀도선은 0.1 kg/m ³ 간격으로 표시함. (b) (a) 그림과 같으나 드라이갈스키 분지(빨간색 원 정점들)를 따라 그린 염분 수직 단면도 및 등밀도선. (Yoon <i>et al.</i> , 2019)	542
그림 544 (a) AWS Manuela 정점 바람과 ERA-Interim 재분석 자료 바람의 평균 분포 (2014-2018) 및 해빙 농도의 평균 분포 (b) AWS Manuela 정점 자료와 ERA-Interim 자료 간의 연관성 분포 (대기 온도 - 색깔, 바람 - contour line) (Yoon <i>et al.</i> , 2019)	543
그림 545 (c) 2015년 일별 동풍 계열 바람 속도(빨강)와 7일 이동 평균한 속도(노랑) 시계열, 일별 해빙 농도를 이용해 계산한 테라노바 만 open water 비율(그림 527(a) 박스에서 계산됨), DITN 상층 염분 변화율(삼각형-70 m, 원-270 m) (d) 2016년 시계열 (e) 2017년 시계열 (Yoon <i>et al.</i> , 2019)	544
그림 546 SAR(Synthetic Aperture Radar) 이미지와 30%(파랑), 50%(붉은색) 해빙 농도 컨투어, 노란색 화살표가 랑뮤어 플럼(Langmuir plume)을 의미함.	545
그림 547 맨틀 속도 구조 연구에 사용된 지진관측망의 위치	546
그림 548 MCCC후에 선별된 원격지진원의 위치	547
그림 549 3차원 속도 모델링을 위하여 미리 작성된 격자 모델. 붉은 사각형 지역은 본 모델에서 가장 해상도가 높을 것으로 예상되는 지역	547
그림 550 3차원 속도 모델에서 추출된 각 깊이에 대한 속도 구조	548
그림 551 3차원 속도 모델의 수직 단면에 대한 속도 구조	549
그림 552 (a) 극지연구소 지진관측망(붉은색 삼각형)과 미국의 TAMNNET 지진관측망(초록색 삼각형)에 대한 관측소 쌍(파란색 실선)의 모습. (b) 각 관측소 쌍의 상호상간방법으로 추출된 수직성분 표면파 파형 (Rayleigh waves)	550
그림 553 (a) 각 주기에 대한 표면파 관측 숫자. (b) 각 주기에 대한 계산된 군속도(붉은 원)와 위상속도(초록색 삼각형)와 평균값, 편준편차(error bar)를 보여줌	551
그림 554 Rayleigh wave의 5초, 10초, 15초, 20초에 대한 2차원 위상속도 결과	552
그림 555 Rayleigh wave 위상속도(회색 원)와 상부 맨틀 속도 계산을 위해 사용된 Graw <i>et al.</i> (2016)의 위상 속도 분포 (파란색 삼각형)과 평균값 (붉은 원)	553
그림 556 Pseudo-3D model 계산을 위한 Rayleigh wave 추출 격자 지점. 지점 중에서 지체구조별로 1d model 특성(그림 509)을 나타내기 위한 5개 지점은 큰 원으로 표시됨	554
그림 557 연구지역에서 나타나는 대표적인 5개의 지체구조에 대한 1d 속도 구조 모델	554
그림 558 202개 1d 모델을 합하여 생성된 3d 속도 구조 모델에서 추출한 35km-80km 깊이에 대한 속도 구조와 오차 범위. 6개의 수직 단면도의 위치는 40km 깊이 모델에 나타나 있고, 단면 모델은 그림 503에서 보여줌	555
그림 559 202개 1d 모델을 이용하여 생성된 3d 모델의 수직 단면도.	556
그림 560 널리 추천되는 방법으로 보정된 GRACE 자료의 자체 일관성 평가.	559

그림 561	이전 그림과 동일한 형태의 그림이나, GRACE 자료는 가장 자체 일관성이 높은 조합으로 처리	560
그림 562	자체 일관성이 가장 높은 그림 533과 같은 GRACE 자료를 써서 구한 추세도. (A)는 해수면 방정식으로 구한 결과이며, (B)는 효과적으로 보정된 GRACE의 잔여 바다 신호로부터 구한 해수면 상승률이다	561
그림 563	자체 일관성이 높은 자료에 지구 무게 중심 이동 효과를 더한 총 질량 해수면의 변동. 북극해의 질량 해수면이 감소세라는 것이 특기할 만하다	562
그림 564	이전 그림과 동일한 자료를 바탕으로 지구 무게 중심 이동 효과를 추가로 더한 질량 해수면 변화율의 공간적 분포. 육지의 수질량이 끊임없이 유출된다고 알려진 그린란드와 서남극 인근의 감소율이 눈에 띈다	562
그림 565	A13을 이용하여 PGR 신호가 제거된 GRACE 신호(녹색) 와 PGR 모델 차이의 스펙트럼 세기. R1(검정색), R2(빨간색), R3(파란색)는 각각 A13 - Paulson07, A13 - Peltier15, Pelter15 - Paulson07이다. 모든 값에 500km 반지름의 Gaussian 평활화가 적용되어 있다	565
그림 566	PGR error가 포함된 degree-1(좌) 과 PGR error가 보정된 degree-1(우) 구면조화함수 계수	568
그림 567	왼쪽 그림은 A13(빨간색), Paulson07(파란색), Peltier15(녹색)에 의해서 PGR 효과가 보정된 GRACE C21(위), S21(아래) 그림이다. 오른쪽 그림은 왼쪽 그림들의 경우와 비슷하지만 PGR error가 제거된 C21, S21구면조화함수 계수들이다. 세로축의 단위는 mm 이고, 각 그림의 숫자는 시계열의 선형성분(mm/yr)을 나타낸다 (95% 신뢰구간)	569
그림 568	A13(빨간색), Paulson07(파란색), Peltier15(녹색)에 의해 PGR 효과가 제거된 GRACE 자료로부터 계산한 대륙별 물 수지($a\sim g$)와 평균 질량 해수면 변화(h). Leakage 효과는 FM을 이용하여 모두 제거 되었다. 각 그림속의 숫자들은 계절 변동 성분이 제거된 시계열의 선형 성분과 95% 신뢰구간을 나타낸다($a\sim g$: Gton/yr, h: mm/yr).	570
그림 569	PGR model error가 보정된 대륙별 물 수지 및 평균 질량 해수면 변화.	570
그림 570	중력관측실 전경	572
그림 571	중력센서부 및 냉각기	572
그림 572	지구물리관측동 내 압축기 및 전원공급장치	573
그림 573	초기 냉각에 따른 액체 헬륨 용기 내 온도 변화 및 액체 헬륨 충전율의 변화	574
그림 574	중력 측정 결과 및 지진파에 의한 중력 변화의 예	574
그림 575	중력 관측 자료의 파워 스펙트럼	575
그림 576	초전도 중력계 네트워크 개략도	576
그림 577	초전도 중력계 및 절대 중력계 관측치의 상관 관계 및 산출된 변환 계수	577
그림 578	변환된 초전도 중력계 중력값과 절대 중력계 중력값의 비교	577
그림 579	조석 분석 과정을 나타내는 다이어그램(Kim <i>et al.</i> , 2011)	578
그림 580	이론 조석과 관측 조석의 비교	579
그림 581	해양 조석에 의한 지각 변형을 제거한 후의 잔여 벡터 진폭	579
그림 582	(상) 초전도 중력계 관측값, (중) 조석 분석에 따른 조석 성분, (하) 보정된 중력과 기압변화에 의한 대기 효과	580
그림 583	극운동 성분과 장주기 조석 성분($S_a + 18.6$ 년 조석)을 제거한 잔여 중력	581
그림 584	모델 영역의 빙붕 두께, 해저 지형, 해수 두께와 동경 163도를 따라 모델의 수직 구조	583
그림 585	(좌) 1월과 7월의 바람응력과 바람 회전장의 공간분포, (우) 테라노바만 영역에서 공간 평균된 동서, 남북 방향의 바람 성분의 시계열	585

그림 586 상층(100m)과 하층(500m)에서 해류와 온도의 수평 분포	586
그림 587 (좌) 난센 빙붕의 용융률과 모델의 첫 번째 층과 마지막 층에서의 해류와 수온 분포. (우) 빙붕 전체 영역에서 평균된 용융률의 계절 변화	586
그림 588 난센 빙붕 지역별 평균된 용융률의 계절 변화	587
그림 589 동경 163도를 따라 수온(상)과 남북 방향의 속도 성분(하)의 연직 분포	588
그림 590 2016년 4월 난센빙붕에서 떨어져 나온 두 개의 빙산(c), 두 빙산 중 큰 쪽은 C-33으로 명명되어 현재까지 인공위성으로 위치를 추적	589
그림 591 (A) 빙붕 상, 하에 형성된 채널 모식도, (B) ICECAP 결과 획득된 빙붕 단면도, 녹색 화살표는 Landsat 인공위성에서 식별된 빙붕 상부 하천망 위치, 검정색 화살표는 항공 지구물리탐사로 규명된 빙붕하부 채널(Dow <i>et al.</i> , 2018)	590
그림 592 인공위성 자료분석을 통해 획득된 난센빙붕 Digital Elevation Model(DEM)	591
그림 593 MODIS 인공위성을 통해 확인된 빙붕 내 ice fracturing (Dow <i>et al.</i> , 2018)	592
그림 594 좁은 간격의 어레이에서 각 센서에 신호 도달시각 차이로부터 wave 방향과 속도를 계산할 수 있는 PMCC	593
그림 595 수중음향 자료에 PMCC 방법을 적용하여 계산한 난센 빙붕 방향에서 발생한 빙권 발생 신호의 시기별 발생 분포 (a)와 신호 방향 (b) (Dziak <i>et al.</i> , 2019)	593
그림 596 2016년 3월 전후 난센빙붕 주변에서 발생한 빙권 발생 이벤트인 빙진(Icequakes)의 스펙트로그램과 파형 (Dziak <i>et al.</i> , 2019)	595
그림 597 난센빙붕 붕괴가 발생한 2016년 4월 7일의 기상 상황	595
그림 598 난센빙붕 붕괴과정 모식도	596
그림 599 1994년에서 2017년까지 난센 빙붕의 기저 용융률(좌)과 난센 빙붕 입구를 통과하는 열 수송(우)의 시계열	597
그림 600 3월과 9월 수심 110m에서의 해류와 수온의 수평 분포(좌). 모델 영역에서 평균된 운동에너지와 수온의 시계열(우)	598
그림 601 각 시기 테라노바만 영역에서 공간 평균된 동서, 남북 바람의 계절 변동	599
그림 602 각 시기 상층(좌)과 하층(우)에서의 해류와 수온의 수평 분포	599
그림 603 각 시기 동경 163도를 따라 수온, 염분, 동서 방향, 남북 방향의 속도 성분 아노말리의 연직 분포	600
그림 604 각 시기 난센 빙붕의 기저 용융률	600
그림 605 동남극 북빅토리아랜드 데이비드 빙하-드라이갈스키 빙설 위치(좌) 및 관측 빙속 분포(우)	602
그림 606 모델영역 적응망격자 생성(좌) 및 크기(우)	602
그림 607 Bedmap2와 KOPRI 항공레이더 관측자료가 반영된 BedMachine 기저지형 비교	603
그림 608 지반선 부근 Bedmap2와 BedMachine 기저능 고도 비교	603
그림 609 BedMachine Antarctica의 소스 자료 현황. 데이비드 빙하 지역에 표시된 파란색 부분이 본 연구에서 획득된 자료를 이용하여 제작된 500m 급 해상도의 빙저 지형도 영역에 해당함. (https://sites.uci.edu/morlighem/bedmachine-antarctica/)	604
그림 610 모델에서 관측과 테스트베드를 활용한 물리과정모수화 개선 과정 모식도 (ECMWF, 2012)	606
그림 611 다양한 변수의 모의 성능을 1차원 지수로 가시화하여 보여주는 스코어카드 예시	606
그림 612 ARM (Atmospheric Radiation Measurement) 프로젝트에서 기획된 집중관측과 단일 기동모델 상호비교 연구 모식도 (http://arm.gov)	607
그림 613 데이비드 빙하 빙속 분포(좌, Mouginit <i>et al.</i> 2012) 및 빙하의 표면 고도	608

그림 614	Bedmachine(좌)과 Bedmap2(우)를 사용한 실험 역산 결과 모델 영역에서 빙속 면적 가중치 오차값 분포	608
그림 615	Bedmachine(좌)과 Bedmap2(우)를 사용한 실험 역산 결과 모델 영역에서 빙속(위)과 빙하 표면고도(아래) 면적 가중치 오차값 분포	609
그림 616	GPS 현장 관측 빙하 속도와 인공위성 InSAR 관측 빙하 속도(MEaSURES, Rignot <i>et</i> <i>al.</i> , 2017)의 차이 (GPS-InSAR)	609
그림 617	빨간색 박스 영역에서 RMSE(좌) 및 면적 가중치 오차값(우)를 적용한 시간에 따른 표면 빙속 변화	611
그림 618	모델 전체 영역에서 RMSE(좌) 및 면적 가중치 오차값(우)를 적용한 시간에 따른 빙 하 표면고도 변화	611
그림 619	200년 기준 실험 결과 산출된 빙속(좌) 및 전지구 해수면 상승값 (우)	612
그림 620	모델 강제력으로 처방된 빙하 말단부 위치 변동(좌) 및 빙붕하부용융률 분포(우) ..	612
그림 621	모델 강제력으로 처방된 빙붕하부용융률(좌) 및 극한 빙붕하부용융률(우)의 시간에 따 른 변화	613
그림 622	200년 간의 빙하 말단부 위치 변동(좌) 및 빙붕하부용융률(우)	614
그림 623	200년 간의 빙하 말단부 위치 변동(위) 및 빙붕하부용융률(중간)과 극한 빙붕하부용융 률(아래) 강제력 실험 결과 산출된 지반선 이동	615
그림 624	빙하 말단부 위치 변동(좌) 및 빙붕하부용융률(우)	616
그림 625	IPCC AR5에서 산출한 2100년까지 온실가스 배출 RCP 시나리오	617
그림 626	빙상동역학 모델 영역인 북빅토리아랜드 데이비드빙하-드라이칼스키 빙설 지역에서 IPCC CMIP5 현재기후 재현실험 결과 산출된 표면질량균형값 및 MAR(Agosta, 2018)과 RACMO2.3(VanWessem, 2018) 지역기후모델에서 산출된 표면질량균형값	618
그림 627	빙상동역학 모델 영역인 북빅토리아랜드 데이비드빙하-드라이칼스키 빙설 지역에서 2300년까지 IPCC RCP 시나리오 강제력 실험 결과 예측된 해수면 변동값	619
그림 628	빙상동역학 모델 영역인 북빅토리아랜드 데이비드빙하-드라이칼스키 빙설 지역에서 2100년까지 IPCC RCP 시나리오 강제력 실험 결과 예측된 다중모델 앙상블 평균 해수 면 변동값	620
그림 629	지진관측소 년도별 자료회수율 그래프	634
그림 630	GPS 관측소 년도별 자료회수율 그래프	636
그림 631	기상관측시스템 자료회수율 그래프	638
그림 632	해양계류장비 년도별 자료 회수율 그래프	639
그림 633	새롭게 개발된 저저항 솔라패널 프레임	653
그림 634	무선 전송 시험: 지상 무선 중계기	654
그림 635	무선 전송 시험: 경비행기 운행 중 무선 전송 시험 수행	654
그림 636	무선통신 시스템을 이용하여 개발중인 GPS RTK 시스템	655
그림 637	Swath 자료처리방법의 개념도 (Gourmelon <i>et al.</i> , 2017)	656
그림 638	수치 고도 모델(DEM)과 항공 레이저 고도계 탐사 자료의 비교	657
그림 607	MT 탐사기술 적용을 위한 2차원 비저항 역산기법 연구(Wannamaker <i>et al.</i> , 2007) ..	669
그림 608	동남극 지역에서 MT 탐사를 수행하여 겉보기 비저항 (Apparent resistivity) 및 위상 (Phase) 자료를 바탕으로 하부 층서 구조를 규명함 (D.N. Murthy <i>et al.</i> , 2013)	670

1장. 연구개발과제의 개요

1. 연구개발 목적

- 남극 장보고과학기지를 거점으로 빅토리아랜드 빙권변화를 지속적으로 관측하고 변화 원인을 규명하여 실측자료를 활용한 고해상도 지역모델 입력 자료를 생성하고 빙권 변화과 관련된 새로운 물리기작 발견을 통해 해수면 변동 예측 정확성 향상에 기여
- 연구를 통하여 빙권변화 진단과 관련한 장기 관측자료 생산/자료 DB화와 빙권-지권-해양 상호작용 정량화 및 빙권 거동 수치예측모델을 활용, 미래 해수면 상승을 예측하여 기후변화 적응 방안 및 재해 경감 대책 수립 기반을 제공

2. 연구개발의 필요성

- 기술적 측면에서의 연구개발 중요성 및 필요성

연구개발은 다음의 5가지 핵심 연구분야를 통하여 수행됨

1. 빙권변화 관측
2. 극지관측 기술 및 대용량 자료처리기술 개발
3. 빙권변화 원인규명
4. 빙권변화 재현 및 예측 시스템 구축
5. 장보고 학술 프로그램

가. 빙권변화 관측

- 빙하거동에 따른 정확한 해수면 변화 모델링에 필요한 다양한 변수의 장기관측이 무엇보다 중요함



그림 1 빙권변화 원인규명을 통한 미래 빙하거동 및 해수면 상승을 예측하기 위해 반드시 필요한 관측 요소. 남극 장보고 과학기지는 다학제/융복합 연구를 위한 최적의 연구 인프라.

- 다양한 인공위성 원격탐사를 활용, 대륙 규모의 빙권변화 연구가 활발히 진행되고 있으나 비교적 관측 기간이 짧기 때문에 여전히 큰 오차범위를 보이고 있어, 발전된 원격 탐사 방법을 융합하는 기술을 개발하여 보다 정확한 빙상/빙하/빙붕의 변화 관측 필요성이 증대됨
- 인공위성 원격탐사의 경우 결과의 신뢰성을 확보하기 위하여 지상의 실측 자료를 통한 검증과 보정 과정이 반드시 요구됨(예, GPS 관측자료)

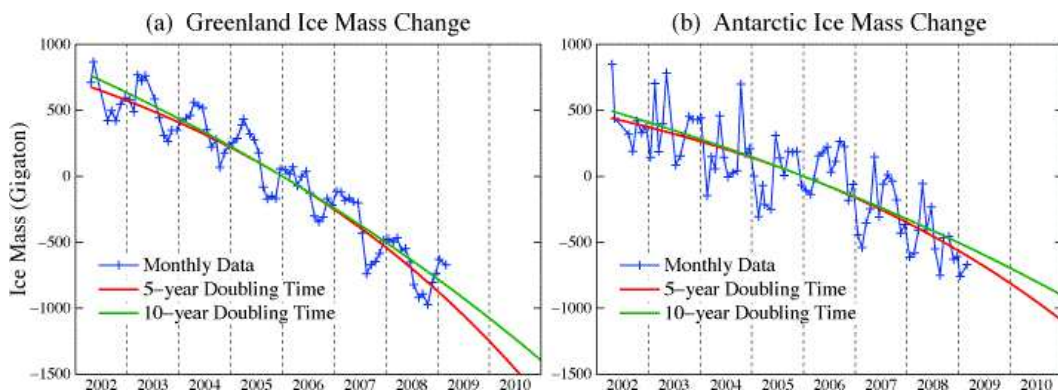


그림 2 인공위성 원격탐사를 통해 밝혀진 그린랜드와 남극대륙의 질량 변화(NASA: Earth's Climate History: Implications for Tomorrow by Hansen and Sato, July 2011). 두 지역 모두 뚜렷한 감소 경향을 보여주고 있다.

- 빙하 동역학(Ice dynamics) 연구에 빙하의 이동속도 및 두께변화 측정은 가장 중요한 관측 요소 중 하나임. 인공위성 원격탐사(InSAR¹⁾ 등)를 통해 대륙규모의 빙하 이동속도/두께 측정에 관한 연구가 활발히 진행됨

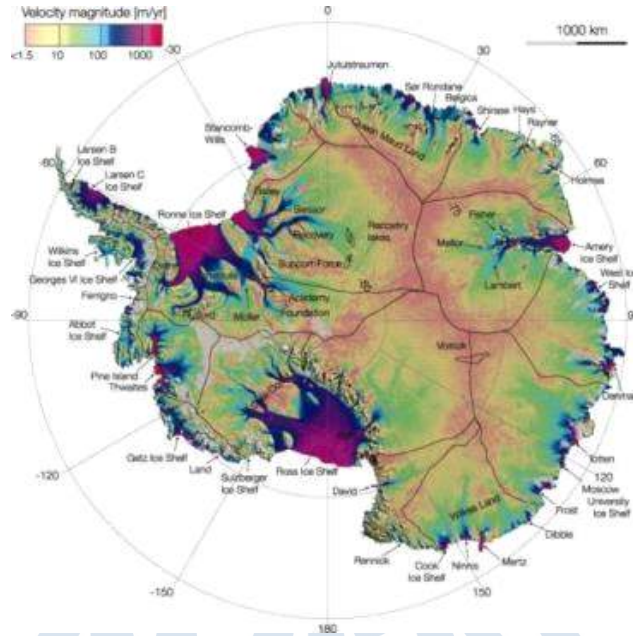


그림 3 인공위성 원격탐사를 통해 규명된 남극대륙에서의 빙하 이동속도(Rignot *et al.*, 2011). 연간 1km 이상 빠르게 이동하는 빙하도 관측된다.

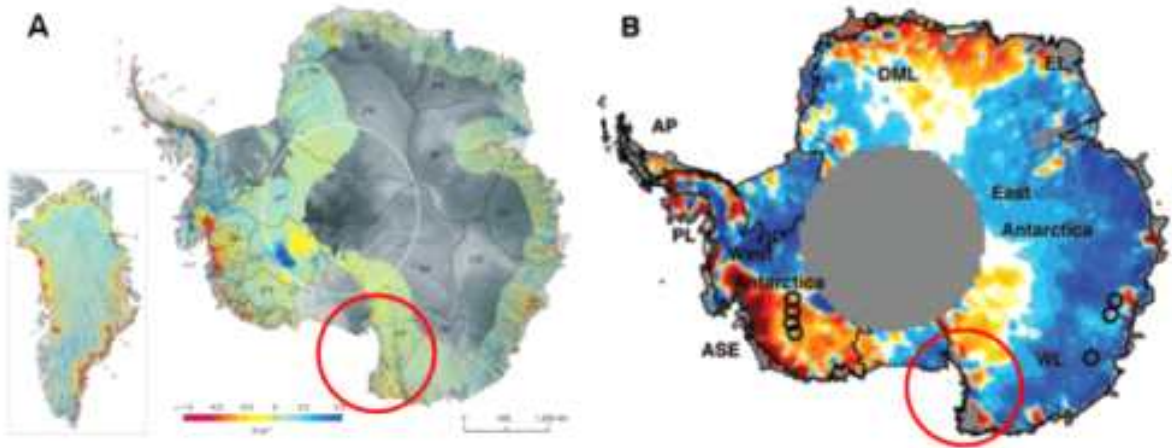


그림 4 인공위성 고도계 자료에 의한 남극 고도 변화: (A) ICESat 레이저 고도계(2003-2009)에 의해 추정된 남극 고도 변화율(Pritchard *et al.*, 2009), (B) ERS-2 레이더 고도계(1995-2003)에 의해 추정된 남극 고도 변화율(Helsen *et al.*, 2008). 서남극 지역의 얼음두께가 전반적으로 감소하는 양상을 관측할 수 있다. 적색 원은 남극 장보고 과학기지가 위치해 있는 테라노바 만 지역을 표시한다.

1) Interferometric Synthetic Aperture Array: 원격탐사 및 측지학에서 사용되는 레이더 탐사 기술

- 빙하 주변 지권(地圈, Lithosphere)의 지구조적 특성(지체구조 활동, 지열 등)은 빙하의 움직임을 규정하는 중요한 요소임. 또한 빙하의 움직임은 지반 및 대기 중을 통하여 지진파 및 음향파의 형태로 에너지가 전달되게 되며, 이들 신호는 빙하 거동 원인을 규명하는데 결정적인 단서를 제공하므로, 빙하 주변 육/해상에 지구물리 종합 관측망(예, 지진관측망, 초저주파 관측망, GPS 관측망, 수중음향관측망 등)을 운영하여 장기적으로 양질의 관측 자료를 확보하는 노력이 시급함

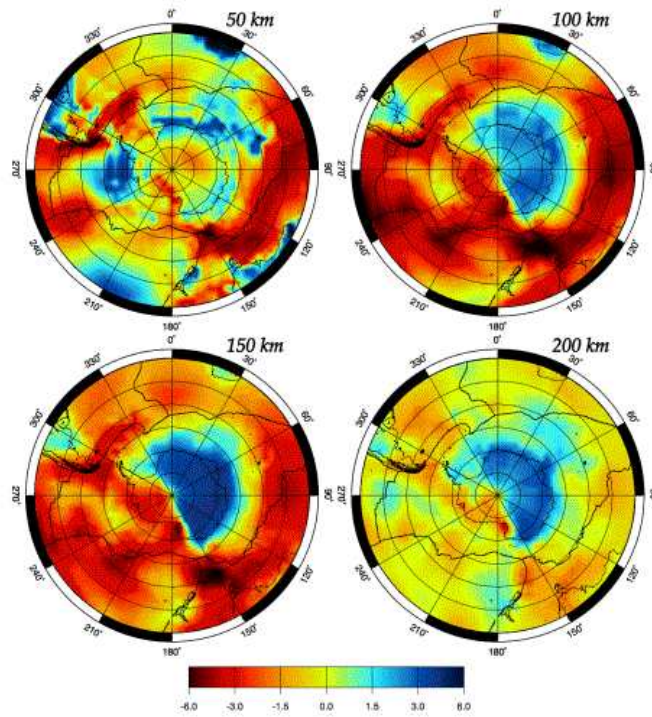


그림 5 남극대륙 하부 깊이에 따른 S파 지진파 속도 구조. 상부맨틀(100-200km)의 경우 동남극에서 PREM 보다 비교적 빠른 속도구조를 보이고 있으며, 이는 동남극이 서남극에 비하여 오래되고 안정된 지체구조임을 확인할 수 있다(Danesi and Morelli, 2001).

- 빙하가 충분히 빠르게 해안선 방향으로 이동하고 해수의 온도 또한 충분히 차갑다면 얼음은 판의 형태로 물 위로 떠 있는 상태로 거대한 빙붕(氷棚, Ice shelf)/빙설(氷舌, Ice tongue)을 이루게 됨. 이러한 빙붕/빙설은 주변 해양환경에 매우 민감하게 반응하게 되는데, 특히 따뜻한 환극지 심층수(Circumpolar Deep Water; CDW)가 빙붕/빙설 하부를 지속적으로 용융시켜 빙붕/빙설의 붕괴를 가속화하므로 이와 같은 해양물리 특성을 지속적으로 모니터링할 수 있는 해양계류 관측망 구축 및 인공위성 원격탐사를 통한 빙붕 하부 용융(basal melting) 장기 관측이 반드시 필요함

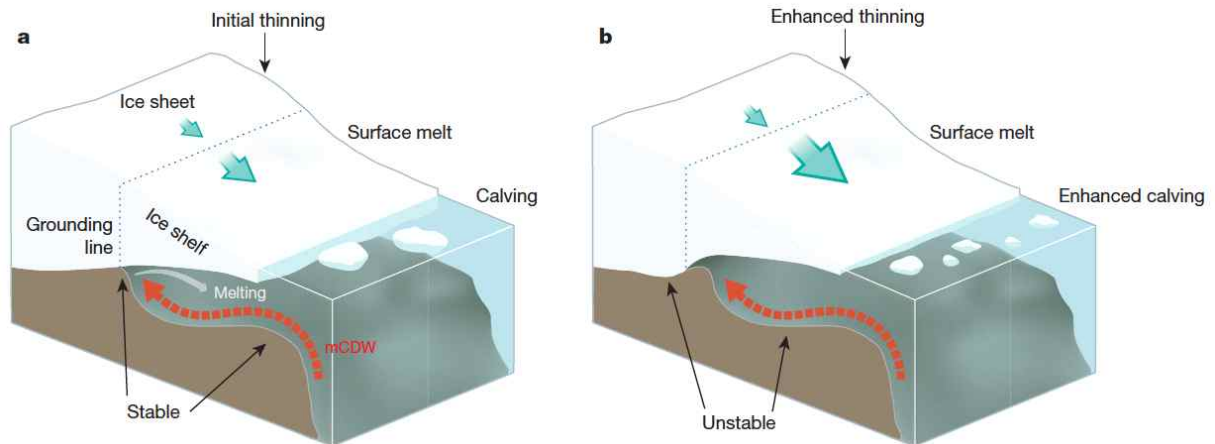


그림 6 (a) 따뜻한 심층수가 빙붕 하부로 침투하여 기반선(grounding line) 후퇴를 유발, (b) 빙붕 두께를 얇게 하여 최종적으로 빙붕의 안정성을 약화시켜 빙붕 붕괴를 가속화 시킨다(Hanna *et al.*, 2013).

나. 극지관측 기술 및 대용량 자료처리기술 개발

- 극지역은 극저온 및 접근이 매우 어려운 극한환경으로 안정적인 관측장비 및 운영기술 확보가 필수적임. 또한 통상적인 자료회수가 연간 1회 미만에 불과하여 상시 자료회수가 가능한 국지 자료전송 네트워크 구축의 필요성이 증대되고 있음

- 이와 더불어 남극 대륙기지를 거점으로 수행하는 연구 활동에는 극한환경조건에 따른 위험성이 상존함. 이에 따라 극한환경에서 장시간 스스로 이동하며 자료를 수집함으로써 위험요소를 감소시킬 수 있는 무인항공기의 개발이 시급한 실정임

- 특히 남반구 겨울철 고위도 지역에는 실질적인 현장탐사가 수행되기 어려운 상황이므로 무인기를 활용하여 정기적인 탐사가 이루어진다면 연중 지속적인 빙권변화 모니터링이 가능할 것으로 기대됨

- 최근 무인항공기 기술이 보편화되고 안정화됨에 따라 이를 민간에 활용한 신산업이 대두되고 있음. 기존 군수시장 뿐만 아니라 농업, 방송엔터테인먼트 사업, 통신사업, 택배산업 등에서 시장이 확산되는 추세임



그림 7 무인항공기를 활용한 방송촬영 및 화물 배송.

- 21세기 인터넷 및 디지털 자료 저장매체 생산 기술의 비약적인 발전으로 인해 지금까지와는 전혀 다른 방식의 대용량 자료처리 방법 도입이 활발히 이루어지고 있음. 특히 IoT²⁾를 활용한 매우 다양한 정보를 공유하는 환경은 극지역 다학제 종합관측망 관측 자료의 효율적인 분석 및 관측망 운영에 큰 도움이 될 것으로 예상함



그림 8 사물인터넷이란 모든 것들(사람, 사물, 공간 등)이 인터넷으로 연결되어 상호간 정보를 공유하거나 활용하는 것을 지칭한다. 다학제 종합관측망 자료의 융합 및 관측망 원격제어에 적극적으로 활용 가능한 기술로 기대된다.

- IoT 기술은 자료의 양, 주기, 형식 등에서 기존 자료에 비해 비교할 수 없을 정도로 큰

2) Internet of Things: 사물인터넷, 생활 속 사물들을 유무선 네트워크로 연결해 정보를 공유하는 환경

빅데이터³⁾를 생산하므로 정보 인프라를 더욱 유연하고 분산되며 개방적인 환경으로 변모시키는 노력이 요구됨. 과거 하나의 관측 자료에서 한 가지 과학적 결론만을 도출하는 연구가 대부분이었다면, 하나의 자연 현상(예, 빙권변화)을 다양한 방법을 활용하여 획득된 관측 자료는 자료의 본질적인 특성 외에 자료 간 패턴분석을 통한 새로운 가치를 창출할 수 있는 융합 분석 기술 도입이 시급함

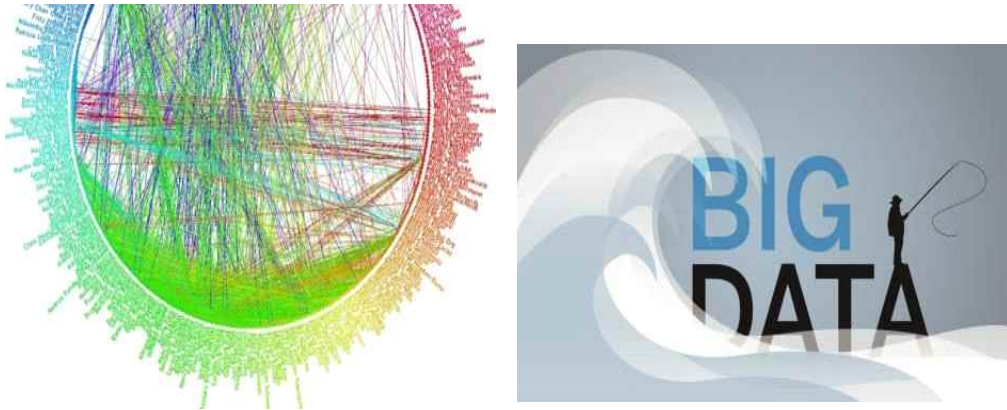


그림 9 빅데이터(Big data). 자료간의 연관성 분석을 통한 새로운 가치 창출에 관한 수요가 급증.

다. 빙권변화 원인규명

- 장보고 기지가 위치한 테라노바 만은 지리적으로 동남극에 속하고 있으나 현재 가장 큰 빙하의 유실이 일어나고 있는 서남극의 아문젠 해에서 가장 가까운 동남극권에 해당하며 아문젠 해의 해류와 로스 해의 해류가 밀접한 관계를 가지고 있어 향후 동남극 빙하 변화의 선행 지시자일 가능성이 높음

- 최근 인공위성 고도계 관측에 의하면 빅토리아 랜드에서 빙하의 유실이 관측되고 있어 장보고 기지 부근 지역의 빙하 질량 균형에 주목할 필요가 있음

- 빙하는 얼음 자체의 무게로 인하여 자연적으로 고도가 낮은 해안지대로 이동하게 됨. 빙하 하부 지형은 빙하의 이동속도에 가장 큰 영향을 미친다고 알려져 있으며, 이미 대륙규모의 빙하 하부 지형도가 제작되어 있음(Bedmap2; 그림 10). 하지만, 지역규모의 빙하거동 수치모델링을 위해서는 보다 정밀한 공간적 해상도를 가지는 지형도가 요구되며, 이는 항공 정밀 탐사 및 빙상(氷上) 레이더 탐사를 통해 획득 가능함

3) Big data: 초대용량의 데이터 양(volume), 다양한 형태(variety), 빠른 생성 속도(velocity)라는 뜻에서 3V라고 불리며, 여기에 네 번째 특징으로 가치(value)를 더해 4V라고 정의하기도 한다. 빅데이터에서 가치(value)가 중요 특징으로 등장한 것은 엄청난 규모뿐만 아니라 빅데이터의 대부분은 비정형적인 텍스트와 이미지 등으로 이루어져 있고, 이러한 데이터들은 시간이 지나면서 매우 빠르게 전파하여 변함에 따라 그 전체를 파악하고 일정한 패턴을 발견하기가 어렵게 되면서 가치(value) 창출의 중요성이 강조되었기 때문이다(출처: 시사상식사전, pmg 지식엔진연구소, 박문각).

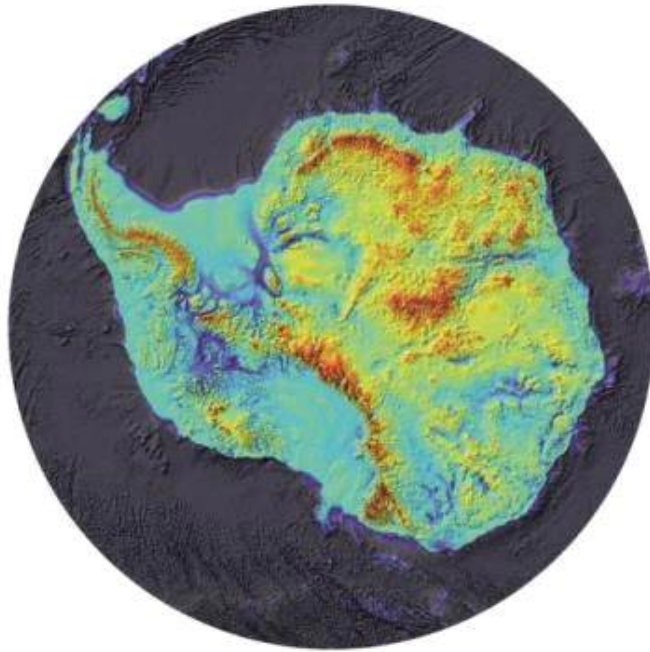


그림 10 남극대륙의 기반암 지형도(Bedmap2; Fretwell *et al.*, 2013). 약 30-130m의 고도 오차를 보여준다. 서남극 대부분의 지역은 해수면보다 낮은 지형을 보여주며, 아문젠 해의 경우 수심 약 2,000m 깊이에 해저기반암이 위치한다.

- 현존하는 중력계 중 최고 정밀도를 가지는 초전도 중력계는 지각의 움직임 및 해수면의 장기 관측에 매우 유용하게 활용되며, 현재 극지에서는 일본 쇼와 기지에서 유일하게 운영 중임. 장보고 과학기지는 쇼와 기지와 남극 정반대에 위치하고 있으므로 장보고기지에 설치 예정인 초전도 중력계의 미세 중력변화 관측 자료는 국제적인 중요성을 가질 것으로 예상됨
- 남극 빙권과 해양의 상호 작용은 남극 빙하 변화를 이해하고 해수면 상승을 예측하는데 필수적인 역할을 하기 때문에, 극지 연구 선진국에서는 빙권과 대기/해양의 상호작용을 이해 하기 위해 많은 대형 연구과제가 수행 중. 특히 빙하-해양 상호작용에 중요한 역할을 하는 해저지형은 인공위성 원격탐사 혹은 항공탐사를 통해 대략적인 지형도를 작성할 수는 있으나, 공간적 해상도가 떨어져 실제 정밀한 수치모사를 수행하기에는 무리가 따름. 이를 극복하기 위해 빙봉 하부에 AUV⁴⁾를 직접 투입하여 해양의 물리적 특성 및 정밀 해저 지형도를 작성하는 연구 활동이 요구됨

4) Autonomous Underwater Vehicle: 수중탐색용 자율 무인잠수정. 활용목적에 따라 다양한 센서를 탑재하여 해양탐사를 수행한다.

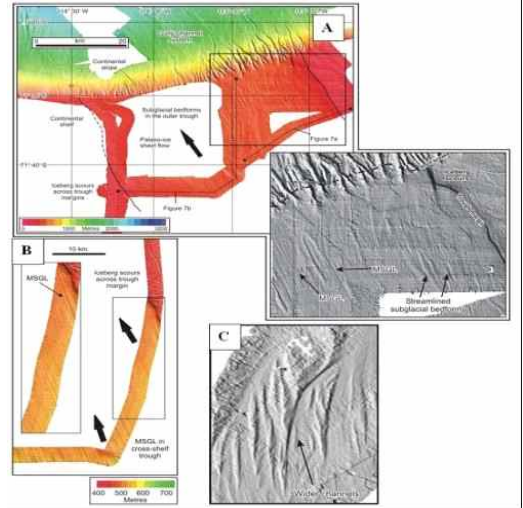


그림 11 (좌) 영국 국립해양센터(National Oceanography Centre)에서 개발한 AutoSub AUV, (우) 서남극 파인아일랜드 빙하 하부에 AutoSub AUV를 투입하여 획득한 정밀 해저지형도.

- 남극대륙의 빙하는 수십 km에 달하는 두꺼운 지각위에 놓여있어 직·간접적으로 지권의 영향을 받게 됨. 특히 빙하 하부와 기반암이 인접한 부분의 지형 및 지열분포(地熱分布; Geothermal heat flux)에 관한 정보는 빙권과 지권 상호작용을 정량화하여 빙하거동을 이해하는 핵심요소임. 지열분포는 지각 및 상부 맨틀의 지진파 속도 및 감쇄구조를 통하여 계산될 수 있으며, 상부 맨틀의 점성도(黏性度; viscosity)는 인공위성 중력관측에서 PGR⁵⁾의 영향을 보정할 수 있는 중요한 변수임

- 빙하 동역학적인 측면에서 빙하지진(glacial earthquake) 발생 원인규명은 향후 빙하의 거동을 예측할 수 있는 매우 중요한 요소임. 빙하지진의 발생 위치 및 발생 기작(focal mechanism)은 빙하 주변에 조밀하게 설치한 광대역 지진관측망을 통해 관측/규명이 가능하며, 빙하의 지반선 위치를 결정할 수 있는 단서를 제공

5) Post Glacial Rebound: 후빙기 지각 융기, 빙하기 이후 녹은 얼음으로 인한 질량감소로 지각 표면이 융기하는 현상

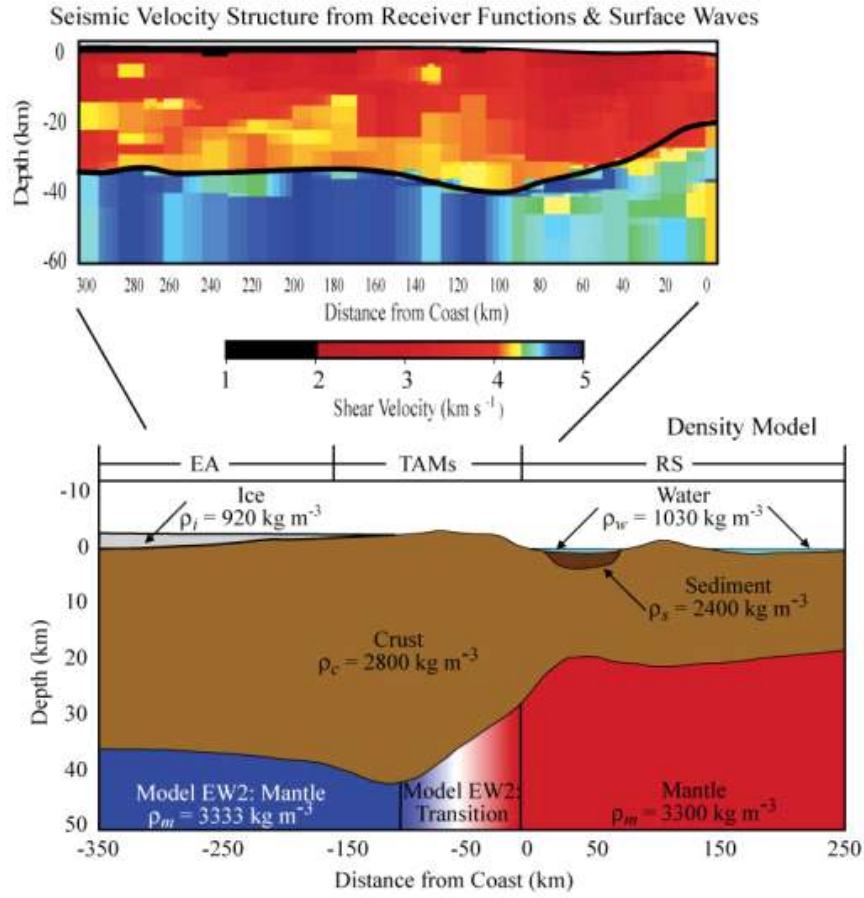


그림 12 지진파 해석을 통해 결정된 남극종단산맥(TAMs; TransAntarctic Mountains) 하부 지진파 속도 및 감쇄구조(Lawrence *et al.*, 2006). 동남극(EA; East Antarctic)의 지각이 서남극(RS; Ross Sea) 보다 두꺼운 안정된 육괴(陸塊)임을 확인할 수 있다. 남극종단산맥 하부 상부맨틀 밀도가 비교적 낮고 지각의 두께가 얇아진다는 결과는 종단산맥지역 융기 현상을 뒷받침하는 증거이다.

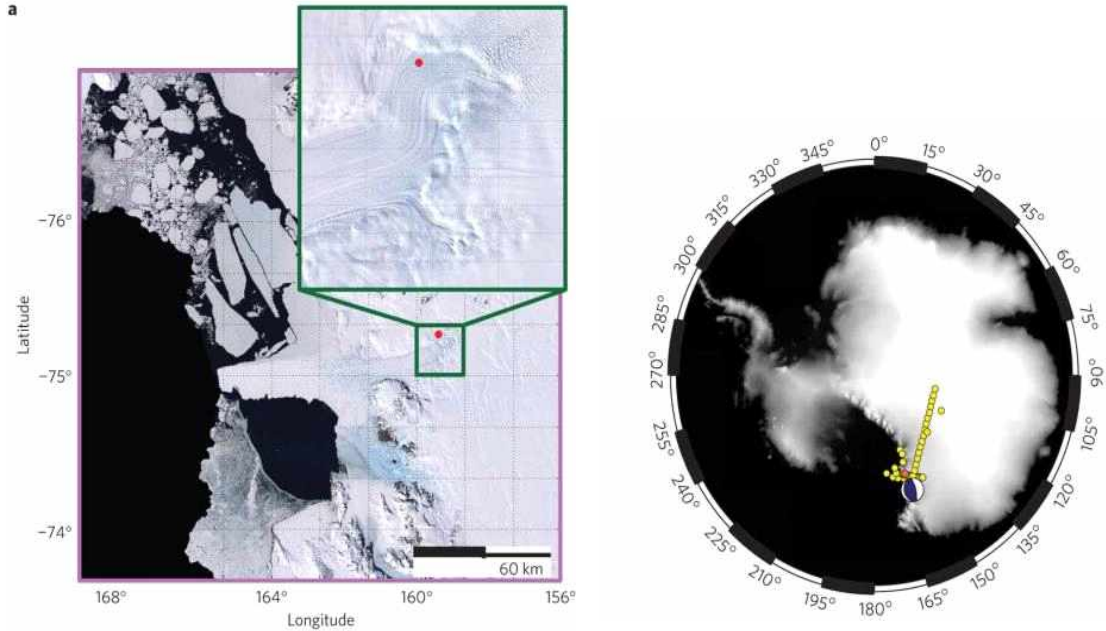


그림 13 POLNET 국제 공동연구를 통해 TAMs 주변에 광대역 지진관측망을 설치/운영하여 테라노바 만에 위치하고 있는 데이비드 빙하에서 발생한 빙하지진의 위치 및 발생 기작 결정(Zoet *et al.*, 2012). 대부분의 빙하지진이 지반선 부근(왼쪽 적색 점)에서 빙하가 정단층의 형태로 고도가 낮은 위치로 이동해가면서 발생함을 알 수 있다. 발생빈도의 시간적 해석을 통해서서는 조수(潮水)의 영향이 빙하지진의 주요 원인임을 규명하였다.

- 빙하의 무게로 인한 압력 증가로 얼음의 녹는점이 낮아져 빙하 하부에 부분용융이 발생함. 부분용융에 의해 생긴 물은 빙하와 기반암 사이에서 윤활작용을 하여 마찰력을 감소시켜 빙하의 이동을 촉진하며, 시간이 지남에 따른 수량(水量) 감소는 이동속도의 감소를 초래함
- 빙하의 거동 및 빙권의 질량 균형을 정량적으로 이해하기 위해서는 빙하 하부의 물과 빙하의 상호작용에 대한 연구가 필요하지만 주로 간접적인 방법에 의해서만 이와 같은 상호작용을 규명해 왔음. 하지만, 최근 인공위성 원격탐사 기술의 발전과 극지인프라의 발달로 인해 빙하의 움직임을 실시간으로 관찰하고 빙하 하부를 직접 시추하여 빙하 하부의 물과 빙하의 상호작용을 이해하려는 시도가 행해지고 있음(Wingham *et al.*, 2006; 그림 14, 15)
- 인공위성 고도계를 활용하여 빙하의 높이를 지속적으로 관찰하게 되면 높이의 변화를 강설량과 빙하 하부에서의 물의 양의 변동으로 설명할 수 있음. 따라서 급격한 빙하의 높이 변화는 기후변화와 함께 빙하 하부에서의 수권의 변동으로 설명될 수 있으므로, 항공/빙원 탐사를 통한 빙하 하부 하천망 분포(hydrological network)의 시각화가 반드시 선행되어야 하며, 이를 통해 빙하지진의 시간적 변화 양상을 이해하는 데 큰 도움이 될 것으로 기대

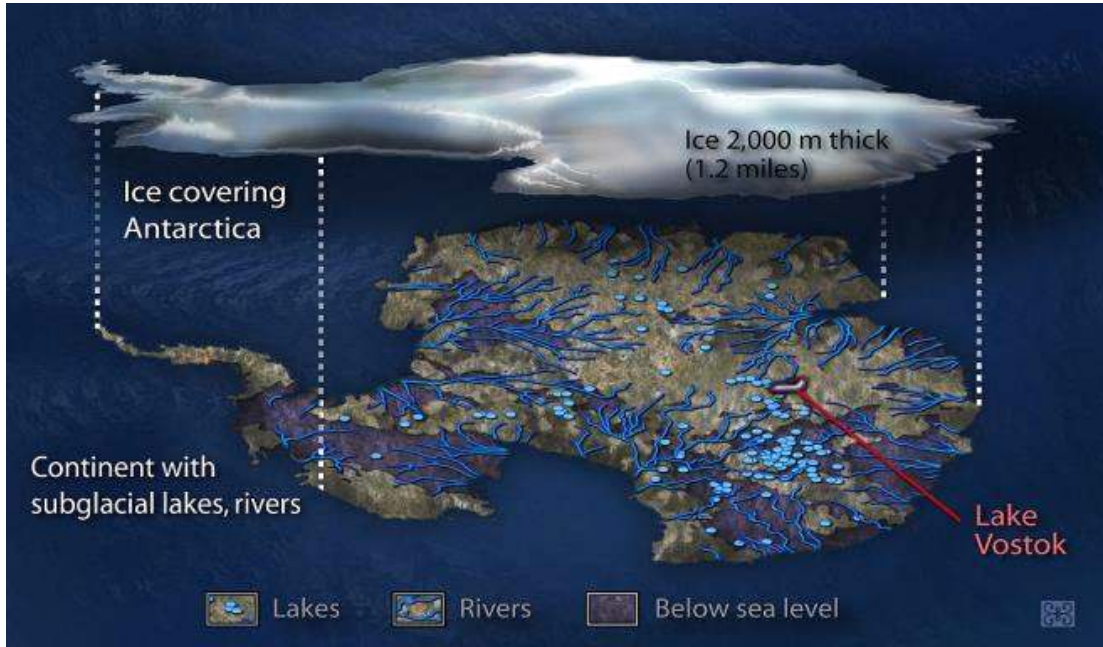


그림 14 남극 빙하 하부의 하천망 구조(US National Science Foundation)

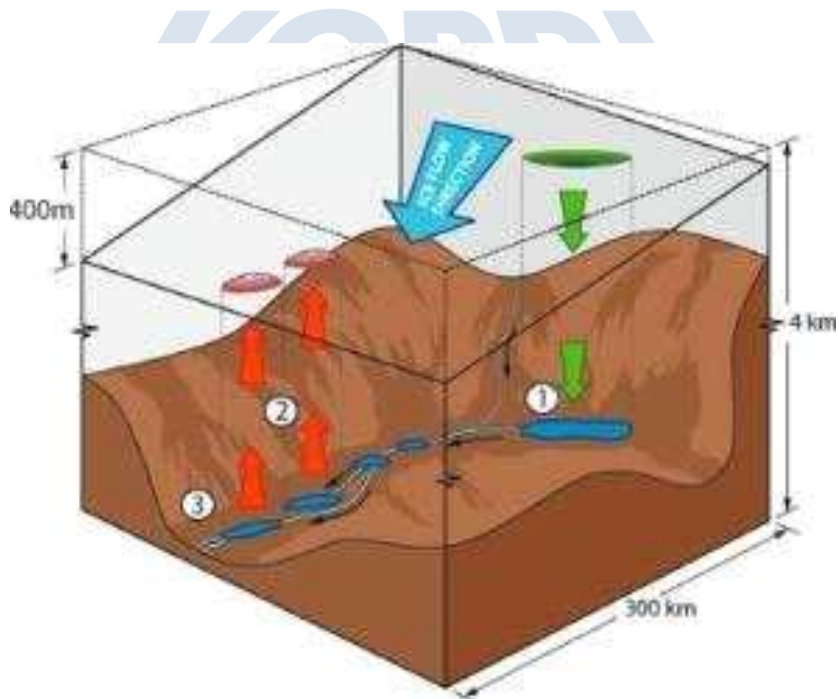


그림 15 빙하 하부 물의 흐름을 나타내는 모식도(Wingham *et al.*, 2006)

- 빙하 무게에 의한 압력 증가와 더불어 신기 조산활동 지역 빙하 하부 화산(subglacial volcano)은 주변에 높은 지열을 발생시켜 대규모 하부 용융을 유발하는 또 다른 요소이며, 빙하의 안정성을 크게 약화시키는 역할을 담당함

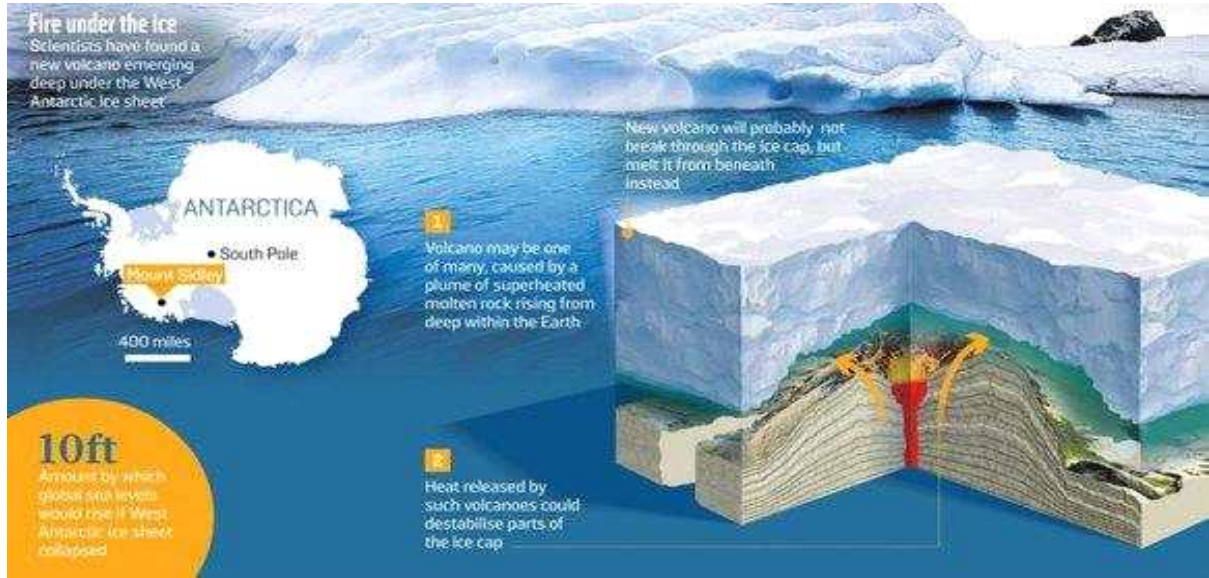


그림 16 서남극 Marie Byrd Land에 위치한 Mount Sidley에서 탄성과 탐사를 통해 위치가 결정된 빙저화산(Lough *et al.*, 2013). 두꺼운 빙상을 뚫고 화산이 분출하지는 못하지만 빙상 하부를 지속적으로 녹여 빙상의 안정성 약화를 초래하게 된다.

- 빙저 수문계측망 및 빙저호 수량변화 모니터링과 화산과 연관된 마그마의 거동 파악은 자기전류(Magnetotelluric; MT) 탐사를 통해 효율적으로 수행 가능하지만, 극지역에서는 표면이 얼음 또는 눈으로 덮여있기 때문에 지하수 탐사에서 일반적으로 사용하는 접지를 이용하는 전기장 측정 방법은 적용할 수 없고, 자기장도 중위도 지방과는 매우 다른 양상을 보이기 때문에 통상적인 MT 탐사 기법으로는 탐사가 불가능하므로 극지 환경에 최적화된 MT 탐사 기술의 개발을 통해서만 빙하 하부 지체구조의 전기전도도 구조를 규명할 수 있음

라. 빙권변화 재현 및 예측 시스템 구축

- 지구상의 유일한 미개척지인 남극은 기후변화에 가장 민감하게 반응하는 지역의 하나로써 인류의 최대 현안문제인 기후변화 원인규명과 미래 기후변화 예측을 위한 최적의 장소임
- 남극 장보고 과학기지가 위치하는 테라노바 만 해역은 대서양 열염분순환의 시발점으로서 전지구 에너지순환에 있어서 매우 중요한 위치임. 남극대륙 및 남극해에 존재하는 빙상과 해빙은 남극의 기후를 결정하는 주요인자로서 남극대륙에서 빙권의 역할이 잘 이해될 필요가 있음. 2012년 SCAR⁶⁾에서 승인된 차세대 연구프로그램 AntClim21⁷⁾에서도 남극 지역에 대한 기후모델링 평가 및 개발연구를 주요한 항목의 하나로 제시하였음
- 국가적 차원의 기후변화 예측 및 대응전략 마련을 위해서는 기후모델을 통한 구체적인 기후변화 자료가 필요함. 현재의 기후예측모델에서 시급한 개선이 요구되는 분야중 하나가 남극과 북극 지역 모의성능 향상임. 특히 기후변화에 따른 남극의 거대한 빙상의 변화는 전지구

6) Scientific Committee on Antarctic Research: 남극 과학위원회

7) Antarctic Climate Change in the 21st Century: SCAR 산하 과학연구 프로그램. 21세기 남극 기상, 해양, 빙권변화 예측을 목표로 함

기후에 파급효과를 주는 중요한 요소임. 그럼에도 불구하고 기술적 어려움 등 제약조건으로 인해 수치모델 개선에 필요한 충분한 관측과 모델 개발이 미진함

- 수치모델의 재현 및 예측 정확성은 수집된 관측 자료의 신뢰도에 근거하므로 양질의 장기 관측 자료 확보가 무엇보다 선행되어야 할 사항임. 남극 빙권변화 연구의 최종 목표는 전지구 해수면 상승에 극지 빙권변화가 얼마만큼의 영향을 미치는지 정량적인 평가를 하는 것이므로 빙하 동역학 수치모델 및 빙하-해양 상호작용 모델을 통한 빙권 질량 균형 규명 연구가 반드시 수행되어야 함

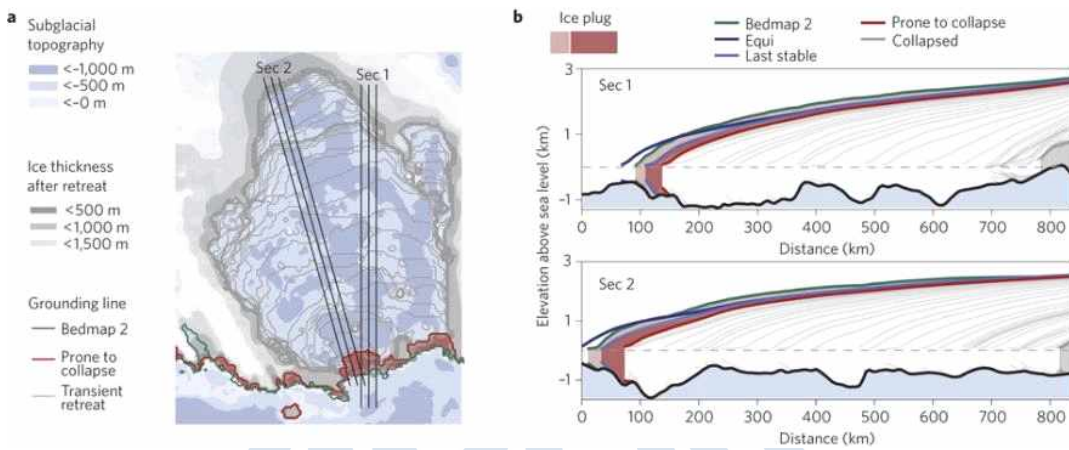


그림 17 PISM을 통해 예측된 동남극 빙상의 변화. Wilkes 분지의 얼음이 모두 녹게 되면 3-4m의 해수면 상승을 초래할 것으로 평가된다(Mengel and Levermann, 2014)

극지연구소

마. 장보고 학술 프로그램⁸⁾

- 국내 극지연구는 한국해양과학기술원 부설 극지연구소 주도로 대학 및 유관 기관과 협동으로 수행되고 있으나, 여전히 연구 인력 및 주제 다양화 측면에 미진한 부분이 있음

- 극지 빙권변화연구 전문가 집단 형성, 차세대 연구 인력 양성 및 보다 개방된 다양한 융복합 연구주제 도출을 위해 ‘장보고 학·연 연구진흥 프로그램(JAP; Jang Bogo Academic Program)’ 운영 요구가 증대됨

- JAP 및 다양한 매체(장보고기지 부근 빙권연구 관련 웹사이트 운영 등)를 통한 국제수준의 장보고 과학기지 활용 연구 결과 신속 전파, 극지연구 활성화 및 저변확대를 도모함

○ 경제적/산업적 측면에서의 연구개발 중요성 및 필요성

- 지구온난화의 영향으로 급변하는 극지환경에 대한 국민적 관심사가 높아지고 있으며, 세계 10위권의 경제 규모인 우리나라의 위상에 맞는 인류현안 문제 해결을 위한 극지에서의 과학연구 수행을 통한 국가위상 제고 노력이 필요함

- 남극 빙상의 변화는 간접적으로 기후 변화 뿐만 아니라 직접적으로 전지구적인 해수면 상승을 유발시키기 때문에 남극 빙상의 현 상태를 이해하고 궁극적으로 남극 빙상의

8) 상세 운영방안은 3장 연구개발 추진전략 및 방법 참조

미래를 예측하는 것은 급격한 환경 변화에 따른 사회, 정치적 변화와 경제 구조의 변화에 선제 대응하는 것으로 향후 한국의 경제·산업 구조 개편에 중요한 자료로 사용

By 2100 sea level could overtake low-lying coastal areas

Much of the land of the Maldives and Kiribati is about 2 meters above present-day sea level. Below are three predictions for how many meters the ocean could rise this century.

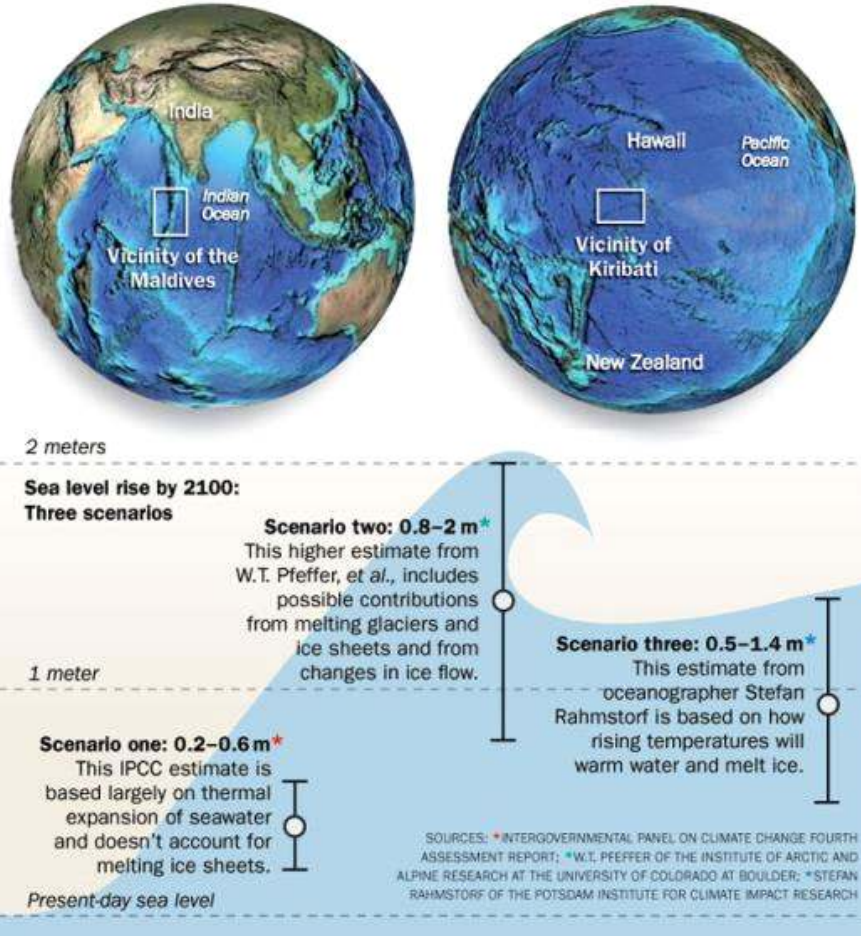


그림 18 해수면이 1m만 상승하게 되더라도 전 세계 인구 중 적어도 1억 명이 직접적인 영향을 받게 되며 많은 연안 도시(도쿄, 상하이, 자카르타, 봄베이, 뉴욕 등) 및 섬들의 침수를 유발할 것으로 예측되고 있다 (출처: <http://mastereia.wordpress.com/2012/05/18/sea-level-rise-and-coastal-erosion/>)

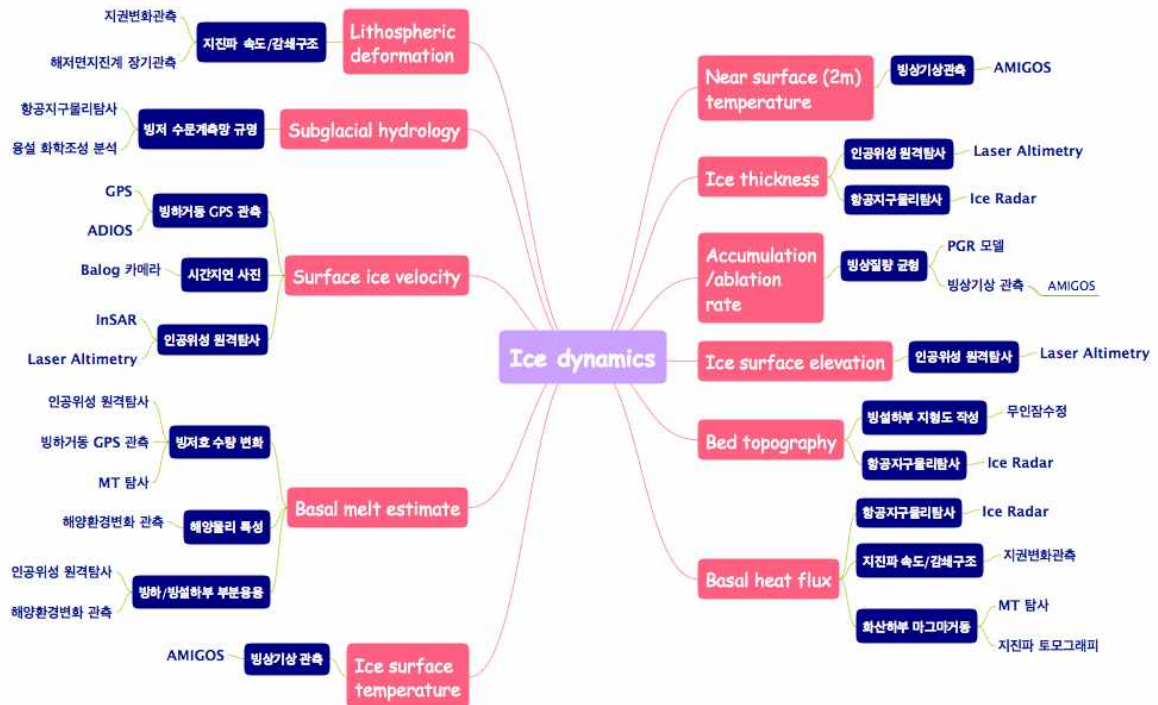
- 기후변화에 대응하는 중장기 경제전략 마련을 위해서는 보다 정확한 전지구 및 한반도 기후변화 예측자료가 절실함. 빙권 장기관측자료 제공 및 지역급 빙권변화 수치모델은 남극 대륙 및 전지구 기후예측모델 정확도 향상에 기여할 것으로 예상됨
- 빙원 탐사기술은 빙하시추, 대기과학, 천문, 지구물리 등 남극 대륙 연구 수행에 전반적으로 활용 가능

3. 연구개발 범위

가. 연구개발 추진체계



나. 연구개발 핵심기술 조직도



다. 국가과학기술 표준분류 체계⁹⁾에 따른 연구개발 핵심기술 및 수행 연구인력

ND	지구과학(지구/대기/해양/천문)	ND08	해양과학
ND01	지질과학	ND0801	물리해양학 이원상, 홍종국, 윤숙영, 강승구, 김태완, 조경호, 이태식, 나형술, 김형준, NIWA, AMJ, LDEO, NOAA
ND0106	화산/제4기 지질학 ND0202 연계		
ND02	지구물리학	ND0801a	수중음향학
ND0201	지열/지구내부물리/지구동역학 진영근	ND0803	생물해양학 황청연, 장광일
ND0202	지진학 이원상, 박용철, 윤숙영, 홍종국, 김수관 ^이 , 김진석, 이지연, 박시원, AMJ ¹⁾	ND11	극지과학
ND0202a	지진파 속도구조 결정	ND1101	빙하학 이원상, 이춘기, 이승현, 서기원(서울대), IMJ, NASA
ND0202b	지진파 감쇄구조 결정	ND1101a	빙저호 수치 모델링
ND0202c	진원위치 결정	ND1101b	후빙기 조류운동 보정 모델
ND0202d	진원 발생기구 결정	ND1101c	빙권동역학 수치 모델링
ND0202e	상시잡음 분석	ND1106	극지 생태계 모니터링 황청연, 김정훈, 장광일
ND0202f	탄성파 탐사	ND1107	극지 해양 이원상, 윤숙영, 김태완, 조경호, NIWA, AMJ, LDEO, NOAA
ND0203	중력/지자기/측지학 이원상, 진영근, 이춘기, 이주환, 엄주영, 김진석, 최연진, 박시원, 서기원(서울대) ^이 , NASA	ND1107a	해양-빙하 상호작용 모델링
ND0203a	인공위성 중력탐사	ND1110	극지 인프라구축 및 활용 극지연구소 극한지 지구물리 연구그룹
ND0203b	항공 중력탐사	ND1110a	빙권 종합관측망 구축
ND0203c	절대/상대 중력탐사	EA	기 계
ND0203d	인공위성 측지	EA01	측정표준/시험평가기술
ND0204e	GPS 측지	EA0106	교정/시험평가 이원상, 박용철
ND0204	지전자기학 이원상, 이춘기, 이희순(Geolux), UT	EA11	항공시스템
ND0204a	지구내부 물성변화 탐지	EA1106	항공시스템 관련 S/W 강연식(국민대)
ND0204b	항공 Radar 탐사	EA1106a	극지역 무인기 자동항법 S/W
ND03	지구화학	OX	인력 및 인프라
ND0302	지하유체지구화학 한영철, 이정훈(이화여대)	OX03	연구정보
ND0302a	동위원소 지구화학	OX0302	비과학기술적 일반 콘텐츠의 제작, 가공, 분석 및 유통을 위한 연구와 응용 분야 김진석, 이지연, EIS
ND04	대기과학		
ND0401	대기 관측/분석기술 이춘기, LDEO, NSIC		
ND07	자연재해분석/예측		
ND0702	지진발생 분석/예측 이원상, 박용철		

라. 핵심 연구주제 및 해당 기술분야

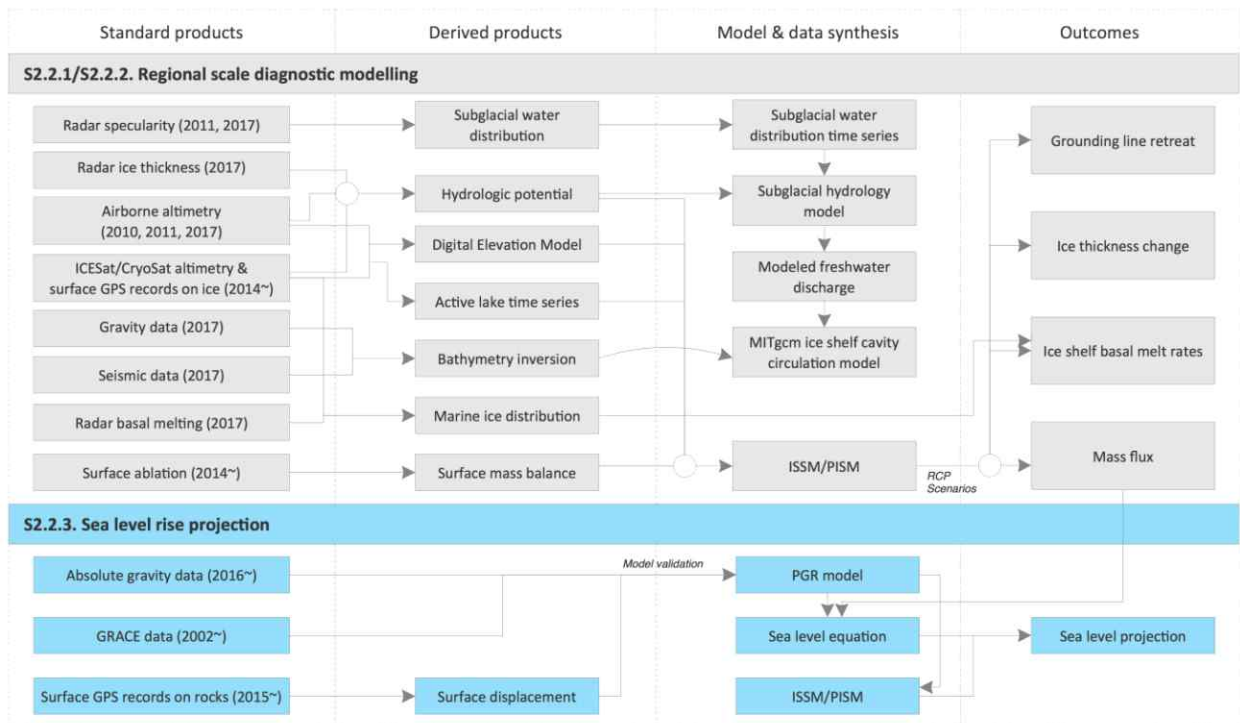
Code	연구 주제	해당 기술*	비고**
S1	장보고기지 주변 빙권 시스템 거동 파악 및 상호관계 규명 <i>빅토리아랜드 빙권을 구성하는 빙저호-빙하-빙설-해양의 상호관계 규명</i>		
S1.1	빙저호 거동 규명 <i>데이비드 빙하 상류 빙저호의 시-공간적 변화 관측을 통한 빙하 이동속도 조절 역할 규명</i>		
S1.1.1	빙저호 위치 및 크기 결정	ND0202c, ND0202f, ND0203d, ND0203e, ND0204b	C1
S1.1.2	빙저호 수량변화 모니터링	ND0202c, ND0203d, ND0203e, ND0204a, ND0204b, EA0106	C1
S1.1.3	빙저호 거동예측 수치모델링	ND0203d, ND0203e, ND1101a	C2, C3
S1.1.4	빙저수문계측망 구조 영상화	ND0203d, ND0204b	C1
S1.1.5	빙저 용융수 기원 추정	ND0302a, ND0801	C1, C2
S1.2	데이비드 빙하 거동 규명 <i>빅토리아랜드 대표 빙하 거동 규명을 통한 빙상 질량수지 추정</i>		
S1.2.1	빙하 이동속도 관측	ND0203d, ND0203e	C1
S1.2.2	빙상 질량수지 추정	ND0203a, ND0203c, ND0203d, ND0203e, ND0401, ND1101c, ND1107a	C2
S1.2.3	빙진 시-공간적 패턴 및 발생원인 규명	ND0202c, ND0203e, EA0106	C2
S1.2.4	조석에 따른 빙하의 물리적 변형 특성 규명	ND0203d, ND0203e, ND1107a	C2
S1.3	드라이갈스키 빙설 및 난센 빙봉 거동 규명 <i>대규모 빙설 및 난센 빙봉 거동 관측을 통한 빙하-해양 상호관계 규명</i>		
S1.3.1	빙설/빙봉 두께 변화관측을 통한 빙설/빙봉 하부 용융도 추정	ND0203d, ND0203e, ND0401	C2
S1.3.2	해수의 물리적 특성 변화에 따른 빙설/빙봉의 반응 관측	ND0203d, ND0203e, ND0801	C1
S1.4	빙권 시스템 변화에 따른 주변 해양 환경변화 모니터링 <i>빙하 용융에 따른 해수 담수화가 주변 해양 환경 및 생태계에 미치는 영향 모니터링</i>		
S1.4.1	소규모 분출빙하(outlet glaciers) 거동 관측	ND0203d, ND0203e, ND0401, ND0801, EA1106a, OX03	C1
S1.4.2	로스빙봉 거동 관측	ND0202e, ND0801	C1
S1.4.3	폴리나 거동 관측	ND0401, ND0801	C1, C2
S1.4.4	미생물 다양성 및 적응기작 연구	ND0803, ND1106	C1, C2
S2	극지역 환경변화에 따른 장보고기지 주변 빙권 시스템 거동 예측 <i>빅토리아랜드 빙권거동 수치모델링을 통한 미래 예측</i>		
S2.1	빅토리아랜드 지역대표 후빙기 조륙운동 보정(GIA) 모델 향상 <i>지역급 GIA 모델 향상을 통한 빙권 질량수지 추정 정확도 향상</i>		
S2.1.1	수치모델과 현장 측지관측자료 비교	S1, ND1101b	C1, C2, C3
S2.1.2	초고해상도 현장 중력관측	ND0203c	C1
S2.1.3	지구 내부구조 규명	ND0106, ND0202a, ND0202b, ND0204a, ND0702, EA0106, EA1106a	C1, C2
S2.1.4	GRACE 자료해석 정확성 향상	S2.1, ND0203a	C1, C2, C3
S2.2	수치모델링을 통한 거동 예측 <i>고품질 현장관측자료를 바탕으로 개선된 빙권 수치모델을 적용하여 미래 데이비드 빙하-드라이갈스키 빙설 거동 예측</i>		
S2.2.1	빙하-빙설 거동 수치모델링	S1, ND11	C3
S2.2.2	IPCC 미래 기후변화 시나리오 적용 수치모델링	ND1101c	C3
S2.2.3	빙권변동에 따른 해수면 상승 기여도 추정	S1, S2	C3

마. 연차별 연구개발 진행현황 로드맵 및 연구주제별 상호 유기적 관계도



※ FY1: 2014, FY2: 2015, FY3: 2016, FY4: 2017, FY5: 2018

바. 모델링 연구 추진 체계 다이어그램



※ Standard products : 관측 자료 획득, Derived Product : 모델링 입력자료 생성(4차년도 수행), Model&data synthesis : 세부 모델 개발 (5차년도 수행), Outcomes : 최종 성과로 도출

제2장. 국내외 기술 개발 현황

1. 국외 기술 개발 현황

가. 국외 동향

(1) SCAR¹³⁾ Horizon Scan(2014)

- [남극과학연구위원회(SCAR)의 중장기비전(Horizon Scan)] 향후 20년 간 우선해서 수행해야 할 남극연구 6대 분야와 80개 과제를 제시[Kennicutt *et al.*, 2014]

- 남극의 대기·해양이 지구 전체에 미치는 영향 등 기후변화 분야가 중심. 특히, 남극의 얼음이 사라질 경우 잠재적 해수면 상승 기여가 최대 60m 까지 예상되므로 온난화에 의한 남극 빙상의 질량손실 관련 문제들이 주요 해결 우선순위로 도출. 온실효과 증가에 의해 빙상의 붕괴를 촉발 시키는 임계점이 존재하는지, 빙상의 바닥조건, 해양온난화 조건이 빙상붕괴에 어떻게 영향을 미치는지, 그리고 우리가 이것을 예측해서 미래사회에 대처할 수 있는지에 대해서 최우선적인 문제로 제시

- 미국은 '해수면 상승의 크기와 속도'를 연구 우선순위로 추진하고 있으며 일본은 '남극으로부터 다가오는 지구시스템 변동'을 주요 주제로 선정하는 등 각국은 남극의 빙권 변화에 따른 해수면 변동이나 전체 지구 기후 시스템 변동에 관한 연구를 최우선 과제로 선정하는 추세

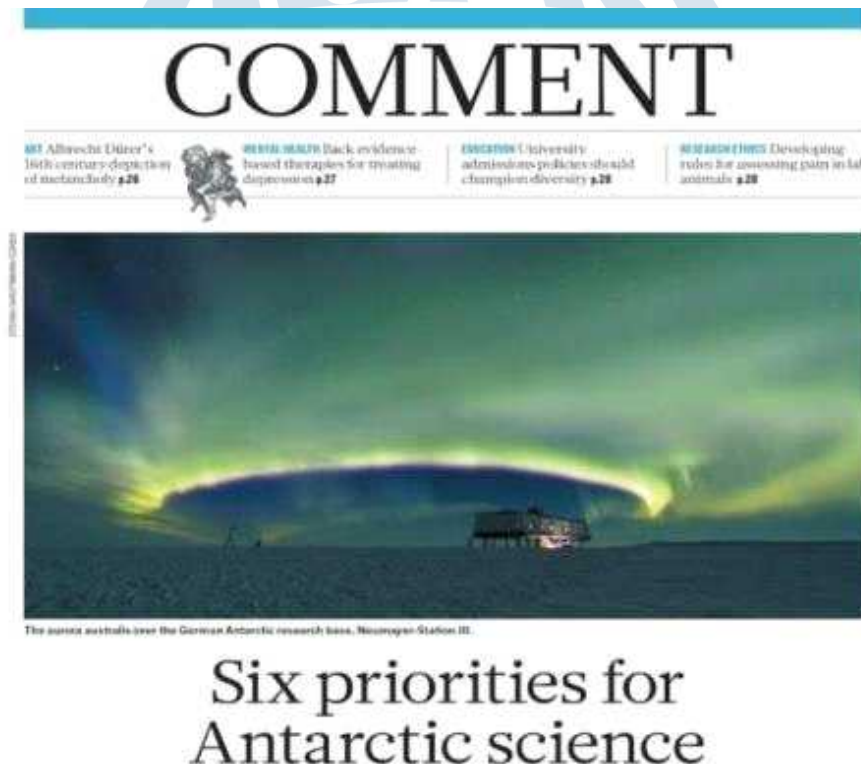


그림 19 네이처誌에 소개된 6대 남극 연구 우선순위 (Kennicutt *et al.*, 2014)

13) Scientific Committee on Antarctic Research: 1958년 설립된 비정부 기구로, 남극대륙에 대한 과학연구와 국가간 협력 및 교류 강화를 목표로 활동. 남극조약협약의 당사국 회의의 옵저버로 참여하며 과학, 기술, 환경적 이슈 제시 등을 통해 자문 기구로서의 역할 또한 수행

표 1 각 국 남극연구의 주요 내용

국 가	주 요 내 용
미국	- 해수면 상승의 크기와 속도, 남극 생명의 적응과 진화, 우주의 기원 규명을 3대 전략적 우선순위로 추진
영국	- '16-'20 우선과제: 극지의 변화, 지구와 극지, 인간과 극지, 극지첨단(지식), 과제극지전문가활용
독일	- 지구의 과거-현재-미래 지구시스템의 핵심변화 규명 - 지구환경, 지질 및 지구물리, 극지생태계 등 기초 및 원천과학연구에 높은 투자 비중
일본	- 과학연구, 연구기반, 국제협력 등 종합정책 - '남극으로부터 다가오는 지구시스템 변동' 을 주제로, 남극-지구 대기시스템, 대기-빙상-해양의 상호작용, 남극 고환경 복원을 3대 분야로 설정
중국	- 거점연결형(Prydz Bay, Amery Ice Shelf, and Dome A observation) 탐사 프로그램 - 해양-해빙-대기의 상호작용, 빙봉-해양 순환작용, 기지주변 모니터링 및 빙하탐사 등 5개 프로젝트
호주	- 4대 테마: 기후 프로세스 및 변화, 육지 및 근해 생태시스템, 남빙양 환경시스템, 프론티어 과학 - 대외 개방으로 우수 연구프로그램 유치
뉴질랜드	- 기후·빙권·대기, 육상 및 해안 생태계, 남극해 보존 및 자원관리 등 3대 총괄 연구 분야 선정 및 추진 - 남극연구소(NZARI ¹⁴) 중심 남극 해빙, 해양 연구에 집중
브라질	- 5대 프로그램 : 빙권, 남극 생태계, 기후변화 및 남빙양, 지구 역학 및 지질학, 고층대기와 우주 상호작용 - 신규 분야로 사회과학 및 인간 생물학 등 연구 추진
칠레	- 6대 연구분야: 남극 생태계, 회복력 및 적응력, 기후변화, 물리 및 지구과학, 미생물학, 남극환경 - 최근 연구 프로그램과 지원기관 다변화 강화

(2) 미국-영국 ITGC¹⁵ 프로젝트

- 빙권 변화 관측기술 발달과 함께 기후변화 관련 인류문제 현안 해결을 위한 연구들이 선진국을 기반으로 수행되고 있음. 특히, **통합적인 빙권 변화 규명**을 통하여 주요 기후변화 이슈인 해수면 상승과 연계된 연구가 중요하게 대두되고 있음

14) New Zealand Antarctic Research Institute

15) The International Thwaites Glacier Collaboration



그림 20 연구 지역 현황: 기후변화에 따른 남극의 변화가 현재 빠르게 이동하는 곳으로 연구 중심이 이동

- 세계 최대 규모의 예산을 지구과학 연구에 지원하는 미국의 NSF와 영국의 NERC가 매칭 펀드를 통하여 현재 가장 급격하게 변하고 있는 남극지역인 스웨이츠 빙하를 중심으로 공동연구를 시작. 해당 지역은 해양에서 고온심층수의 유입 및 지구온난화의 영향으로 인해 최근 30년 동안 빙권의 이동속도가 2배 이상 빨라진 지역으로 해당 연구 프로젝트는 2018년부터 수행을 시작하여 5년 동안 빙권 변화의 가속화를 유발하는 기작에 대해 현장탐사 및 모델을 기반으로 연구를 수행 할 계획
- ITGC 연구그룹은 통합적인 빙권 변화 원인 규명 및 빙권 변화 미래 예측을 남극에서 가장 빠르게 녹고 있는 스웨이츠 빙하에서 수행하는 연구그룹으로 모델링 연구 그룹(PROPHET, DOMINOS), 빙하 유역 경계(ice margin)에서의 빙권 진화 연구 그룹(TIME), 빙상 하부 지형 연구(GHOST), 고환경 연구(GHC), 해양환경연구(THOR), 해양-빙권 상호작용 및 지반선 기작연구그룹(MELT, TARSAN)을 포함함

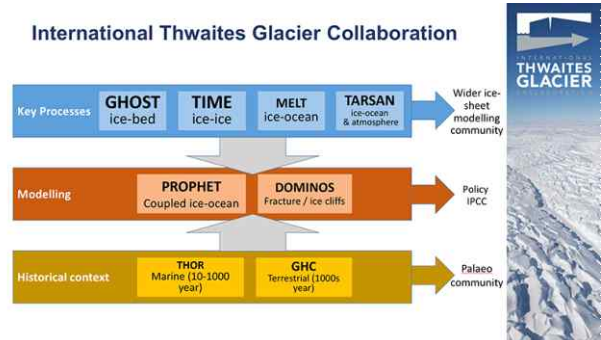
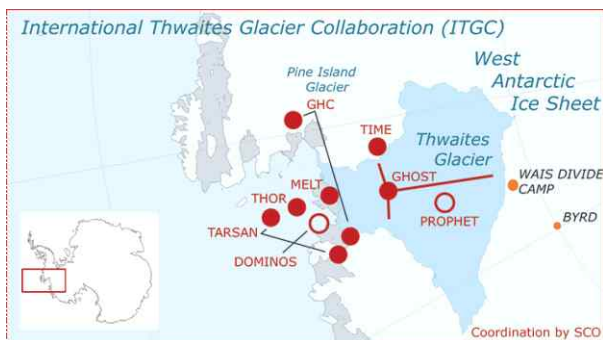


그림 21 ITGC 프로젝트 빙권변화 진단 예측 통합 모니터링 및 모델 예측 계획

- 현재, 해수부 주관의 장보고기지 주변 빙권변화 진단, 원인규명 및 예측 R&D 연구 사업(2014.6 - 2019.5)에서 도출된 성숙된 연구 성과 및 탐사기술을 바탕으로 한국 역시 해당연구그룹과 상호보완적인 측면에서 공동연구를 계획, 구체화 단계에 있음



그림 22 국내 인프라 및 연구 기술의 성장으로 미,영 연구진과 공동연구를 수행하는 빠른 발전을 이룩

나. 빙권변화 관측 및 원인 규명 기술개발 현황

(1) 원격탐사 기반 빙권 변화 원인 규명

- 극지방 빙하의 변화를 탐지하기 위한 원격탐사 센서는 크게 중력, 고도계(Altimeter), SAR 간섭계(InSAR)로 나누어지고 있었으나, 최근 남극 빙하의 질량 균형을 직접적으로 측정하는 방법으로 인공위성 중력 원격탐사 방법이 새로운 대안으로 등장

- 2002년 5월 GRACE¹⁶⁾ 인공위성이 최초로 지구 중력의 시간 변화를 관측하기 위해 발사됨. 시간에 따른 중력변화는 저위도 지방의 경우 지표수나 지하수에 의해, 고위도 지방의 경우 빙하의 변화에 의해 유발되기 때문에 중력의 변화를 분석함으로써 남극에서의 빙하 질량 균형 측정이 가능하여 대륙규모의 연구가 활발히 진행 중임

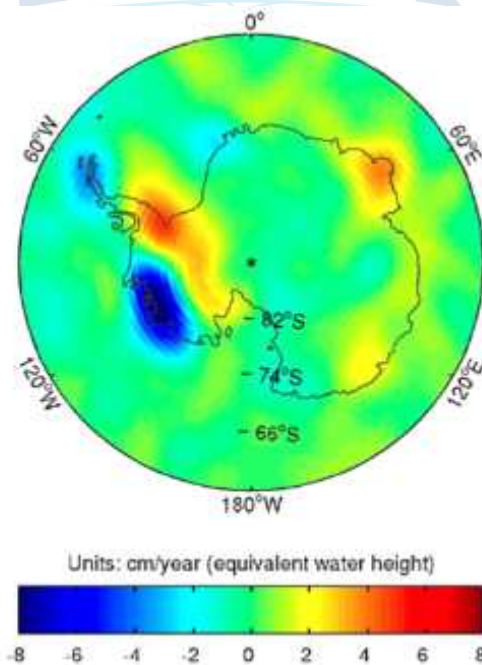


그림 23 GRACE 인공위성 중력값을 이용하여 계산한 2003-2006년 남극 빙하량 변화 (Chen *et al.*, 2006).

16) Gravity Recovery and Climate Experiment

- GRACE 중력 자료를 이용한 빙하 질량 균형 연구에는 여러 오차발생 요인이 존재하는데, 그 중 PGR의 영향은 명확하게 규명된 바 없기 때문에 다수의 연구진이 PGR 모델을 개발하고 있는 중. 이러한 PGR 모델을 검증하기 위해 극지방에 GPS 관측망을 설치/운영하고 있으며, 이를 통해 보정된 인공위성 중력 변화 결과를 이용하여 극지방의 빙하 유실을 정밀하게 계산하는 연구가 진행 중. GRACE 인공위성 중력 자료(2002~)는 질량 변동성을 직접적으로 제시함
- 고도계를 이용한 인공위성 원격탐사는 빙하의 고도변화를 탐지하여 간접적인 빙하의 질량 균형 연구에 활용되고 있음(예, Helsen *et al.*, 2008; Pritchard *et al.*, 2009)
- ERS/ENVISAT(유럽연합)은 90년대 초반부터 운영되어 상대적으로 오랜 기간의 자료를 축적하고 있으나, 레이더 고도계의 낮은 공간 해상도(~수 km 반경)와 낮은 정확도(수십 cm)는 약점으로 지적됨
- 2010년 **고해상도 레이더 고도계인 Cryosat-2가 발사**, 자료 획득 개시하였으며, ICESat(미국 NASA)은 2003년 발사되어 2009년까지 자료를 획득하였으며, 탑재된 레이저 고도계는 높은 해상도(~수백 m)를 가지며 정확도도 수 cm로 레이더 고도계에 비해 높음. ICESat 인공위성(2002-2009) 고도계를 통하여 최초로 실측 빙하 두께 변화가 산출됨 (~4m/yr)
- 2019년에는 **ICESat-2가 발사예정**에 있으며, 보다 향상된 정확도와 ~수십 m 수준의 해상도로 연속관측이 가능하도록 설계되어 많은 연구결과 생산이 예상됨

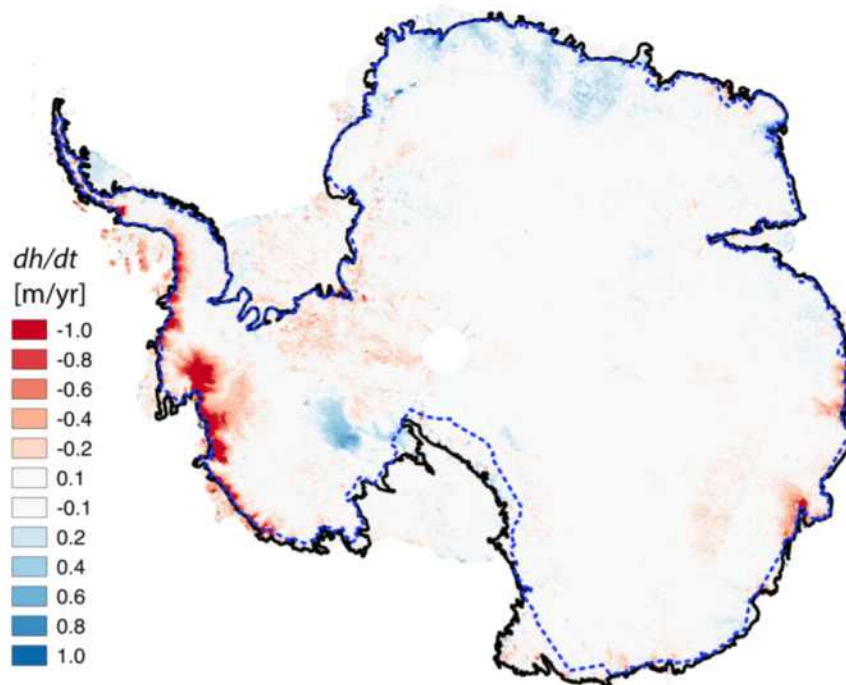


그림 24 인공위성 고도계(Cryosat-2)를 통해 산출된 최근 (2011-2015) 남극 지역 빙상 고도 변화 (Gardner *et al.*, 2018)

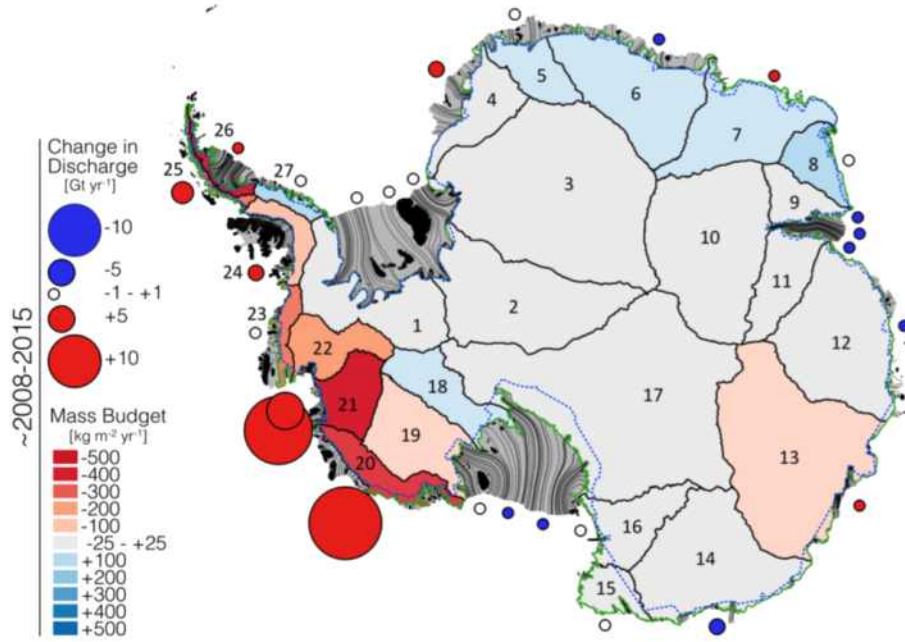


그림 25 남극 빙하별 빙하 손실량 및 시간에 따른 변화(2008-2015)
(Gardner *et al.*, 2018)

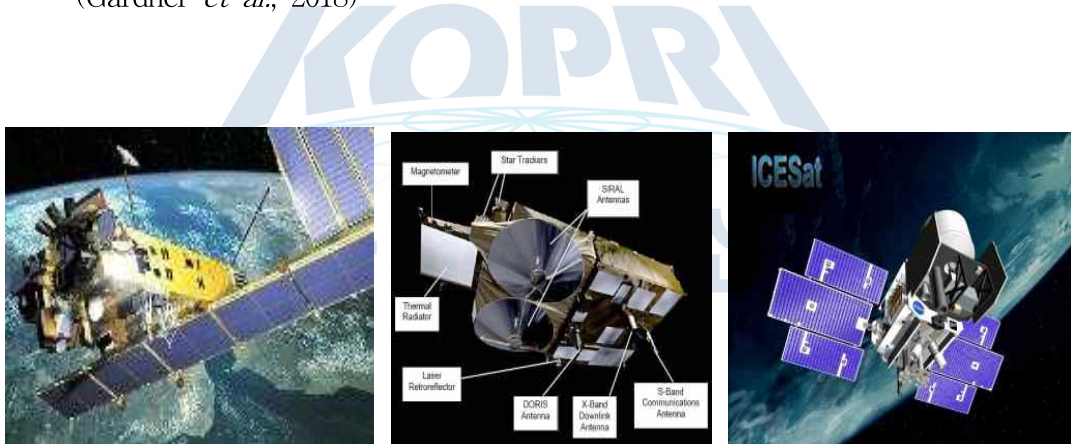


그림 26 극지방 변화 감지를 위한 인공위성: 좌로부터 ENVISAT, Cryosat-2, ICESat.

- InSAR 관측의 경우 서로 다른 2개의 SAR 영상의 위상차를 이용하여 빙하의 변화를 1년에 수 cm의 까지도 관측이 가능하며(Joughin *et al.*, 1999), 빙붕의 이동 속도분포를 측정하는데 매우 유용하기 때문에, 남극 대륙의 많은 빙붕의 속도 분포가 InSAR 기법을 통해 밝혀지고 있음

- 그림27는 2007년부터 2009년 사이에 획득된 SAR 영상으로부터 얻어진 InSAR 결과로, 장보고 기지 주변의 빙하 이동속도 분포를 보여줌(Rignot *et al.*, 2011)

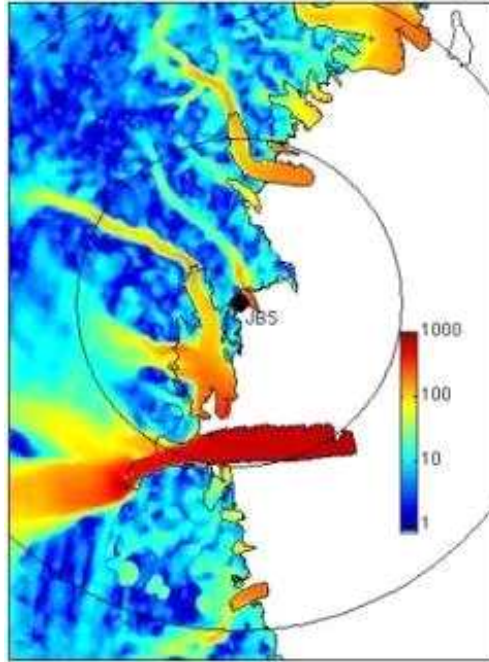


그림 27 남극 장보고 기지 주변 빙하 이동 속도 분포. 단위는 m/yr.

- InSAR를 이용한 빙붕 이동속도 연구의 취약점으로는 남극 지역의 InSAR 자료가 부족하다는 점인데, 이는 향후 미국, 일본 그리고 유럽에서 발사되는 극궤도 SAR 위성 계획의 성공에 의해 해결될 것으로 예상됨. 자료 부족 외에도 측정방법 상 두 SAR 영상의 위상 차이를 이용하여 결과가 얻어지기 때문에, 실제 빙붕의 속도 변화의 다양한 주파수 성분 중에서 고주파 성분이 주로 해석되어 빙붕의 속도 변화가 매우 심할 경우 정확한 결과 산출에 어려움이 있는 단점이 있음(Joughin, 2002)

- 최근 이러한 제한을 극복하기 위해 빠르게 이동하는 빙붕에서는 인공위성 레이저 고도계를 이용하여 이동 속도를 구하는 방법이 개발됨(Lee *et al.*, 2012)

- 고도변화 탐지에 가장 정밀도가 높은 ICESat 고도계는 2009년 종료된 이후 운영이 되고 있지 않으나, ICESat-2가 2019년 이후 발사 예정이어서 향후 활용 가능

- GRACE 인공위성은 질량 변화를 직접적으로 관측할 수 있는 장점이 있으나, 소규모 지역의 변화를 구별하기 어려워 위성 고도계 자료와의 복합 해석이 요구됨

- Cryosat-2 고도계는 높은 해상도의 고도 관측값을 제공하나 경사가 심한 지역에서는 오차가 매우 크기 때문에, ICESat 자료와의 융합이 필요 하며, 인공위성 관측 해상도 향상을 위해 현장 관측(항공 레이더)이 필요

- 인공위성 고도계, ARGO float, GRACE 위성 자료를 결합하여 해수면 상승을 유발시키는 해수의 부피 팽창 및 질량 증가 효과를 정량적으로 규명하고자 하는 노력이 진행 중이며 정밀도가 100배 향상된 GRACE 후속 중력 탐사 위성이 곧 발사될 예정

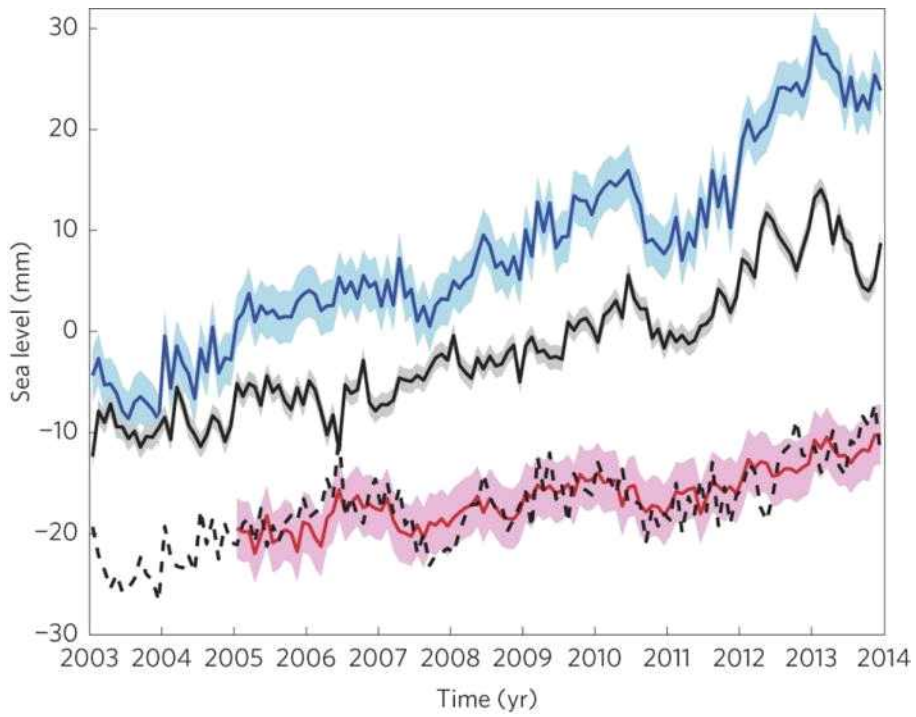


그림 28 고도계 자료를 이용한 총 해수면 상승(파란색), GRACE 위성 데이터를 이용하여 관측한 바다 질량 변화에 의한 해수면 상승(검은색), ARGO float으로 관측한 바다의 부피 팽창(빨간색)(Llovel *et al.*, 2014)

극지연구소

(2) 항공탐사 기반 빙권 변화 원인 규명

- 극지역 항공탐사는 ICESat(2003-2009)과 ICESat-2(2015~)의 간극을 메우기 위한 IceBridge 프로그램¹⁷⁾을 통해 남극과 그린랜드에서 대규모 항공 레이저 고도계 관측이 지속적으로 이루어지고 있으며 소형 항공기를 이용한 레이저 고도계 관측 연구도 소규모로 이루어짐. 이는 항공 레이더 탐사 기술을 정밀 빙저지형탐사 및 빙하 하부 물의 거동 예측 등에 활용 될 수 있음

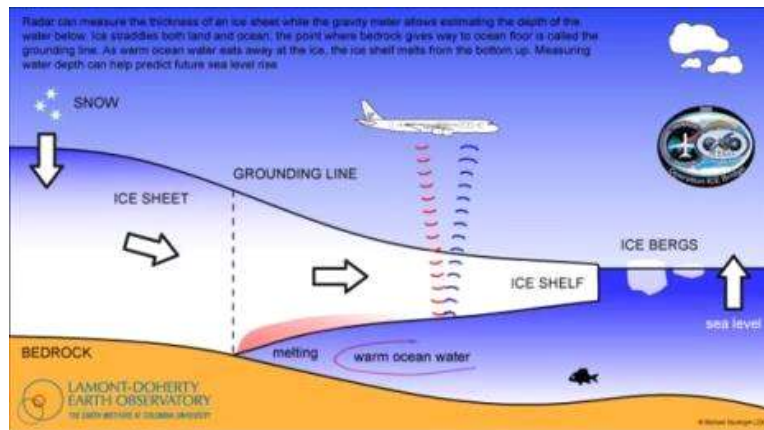


그림 29 IceBridge 프로그램 일환으로 수행되는 빙봉의 두께 측정 항공탐사 (<http://www.ldeo.columbia.edu/res/pi/icebridge/>)

- CReSIS¹⁸⁾ : 미국 NSF에 의해 설립된 빙하 원격 연구 연구센터(Center for Remote Sensing of Ice Sheets)로 매년 남극과 그린랜드에서 항공기를 이용한 레이더 탐사를 실시하여 빙하 하부 구조 및 빙하의 특성을 규명. 탐사에 사용되는 레이더를 직접 개발하여 보다 정확하게 빙하를 탐사하기 위한 연구를 수행하고 있음

17) http://www.nasa.gov/mission_pages/icebridge

18) <http://www.cresis.ku.edu>

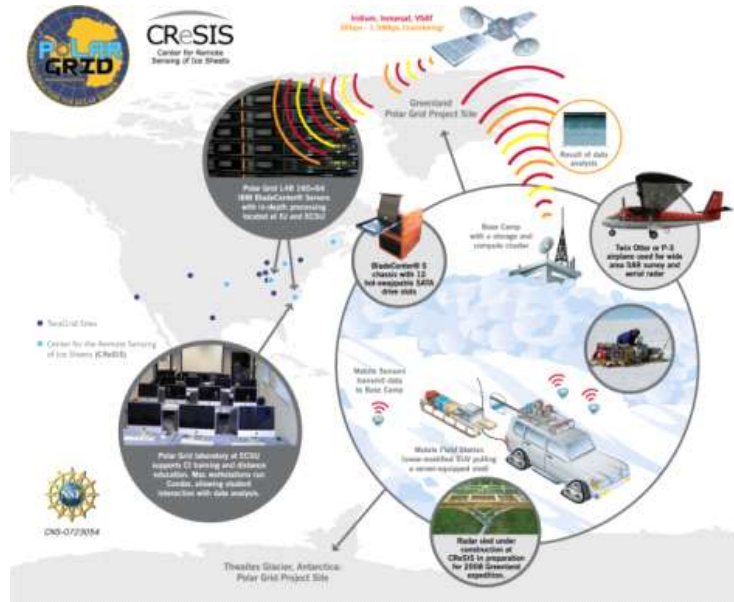


그림 30 CReSIS 운영 개념도.

(3) 빙저호 거동 규명

- 최근 ICESat 고도계 자료로부터 남극 내에 다수의 빙저호가 추가 발견됨(Smith *et al.*, 2009), 특히 로스 빙붕으로 흘러드는 Byrd 빙하 상류의 빙저호에서 2000년대 중반 발생했던 빙저호 범람이 관측되고, 빙저호의 범람이 하류의 빙하 속도 변화에 결정적인 기여를 하고 있음이 밝혀짐(Stearns *et al.*, 2008)

- 장보고기지에서부터 330km 떨어진 Cook E2 빙저호에서 2007-2008년 6Gt¹⁹⁾의 물이 급격히 범람(배출)하였음이 Cryosat-2 인공위성 고도계 관측에 의하여 확인됨. 범람에 의해 호수 위 빙하 표면에 크레이터를 형성함(McMillan *et al.*, 2013)

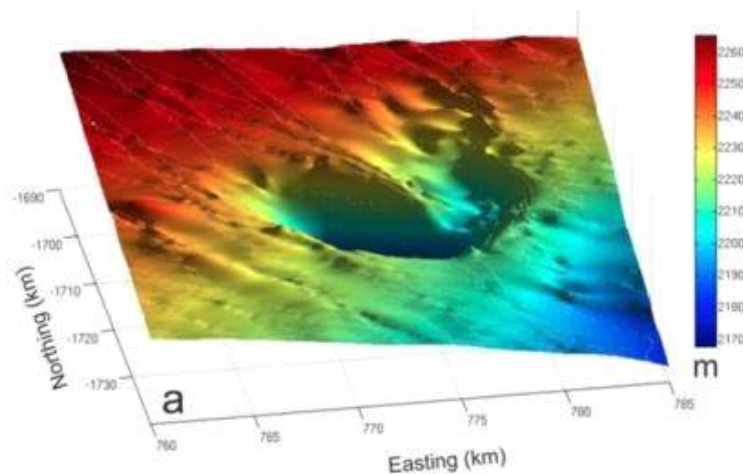


그림 31 Cryosat-2에 의해 확인된 Cook E2 빙저호 지역의 최근 표면 고도

19) 남극 빙상 하부에서 발생하는 연간 용융수의 약 10%

- SCAR에서는 이와 같은 빙저호에 관한 연구를 SALE²⁰⁾ 프로그램을 통하여 수행하고 있으며, 주로 남극 빙상 밑의 존재하는 강과 호수를 연구하고 있음. Geodynamics²¹⁾, Hydrology²²⁾, Limnology²³⁾, Ice Sheets, Microbiology²⁴⁾, Paleoclimate²⁵⁾ 등 다양한 하위 연구 주제 그룹이 구성되어 있음
- ICESat 인공위성을 이용하여 빙하의 위치를 실시간으로 모니터링하여 빙하하부 물의 움직임을 관찰하고 있으며, 이를 통해 빙하의 움직임과 빙권 질량 균형을 규명하고 있음(Fricker *et al.*, 2007)
- 남극의 다양한 지역에서 빙하하부와 같은 조성이라고 판단되는 지역에서 누출수를 채취하고 분석하여 빙하하부에 있는 물의 조성을 간접적으로 파악하고 물의 기원 및 빙하의 용융과정을 간접적으로 규명하는 연구도 진행됨(Harris *et al.*, 2007)
- 그린랜드에서는 추적자(tracer)를 이용하여 빙하 하부의 물의 흐름을 관측한 연구결과도 보고된 바 있음(Chandler *et al.*, 2013). 항공탐사 자료를 활용, 빙저 수문하천망 상부에서 추적자를 주입하고 하부에서 추적자의 농도 변화를 관찰한다면 빙하하부 물의 이동 속도를 추정할 수 있음. 용빙수의 흐름 경로(지표에서 생성된 용빙수 및, 내부에서 생성되어 흐르는 용빙수)에 따라 채수된 용빙수의 화학적 조성이 다를 수 있음



20) Subglacial Antarctic Lake Environment

21) 지구동역학(地球動力學), 지구물리학의 한 분야로 주로 맨틀의 대류로 인한 판구조적 운동 및 이에 수반되는 각종 현상에 관한 연구를 다룬다.

22) 수문학(水文學), 지하수의 거동 등에 관한 학문 연구 분야

23) 담수학(淡水學), 지구상에 존재하는 물 중 담수에 관한 거동에 관한 연구를 수행한다.

24) 미생물학(微生物學)

25) 고기후학(古氣候學), 퇴적물 코어 등을 이용하여 과거 기후환경을 복원하는 학문

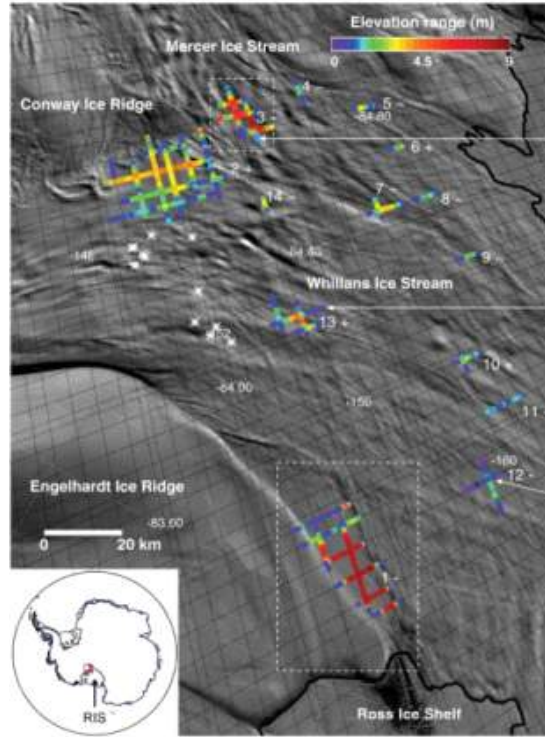


그림 32 ICESat을 이용하여 서남극 빙하의 고도변화를 보여주고 있는 연구결과 (Fricker *et al.*, 2007).

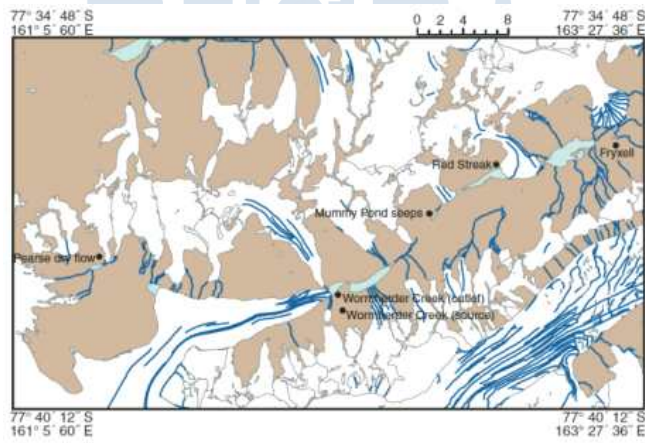


그림 33 맥머도 드라이밸리 근처에서 누출수를 채취한 연구(Harris *et al.*, 2007).

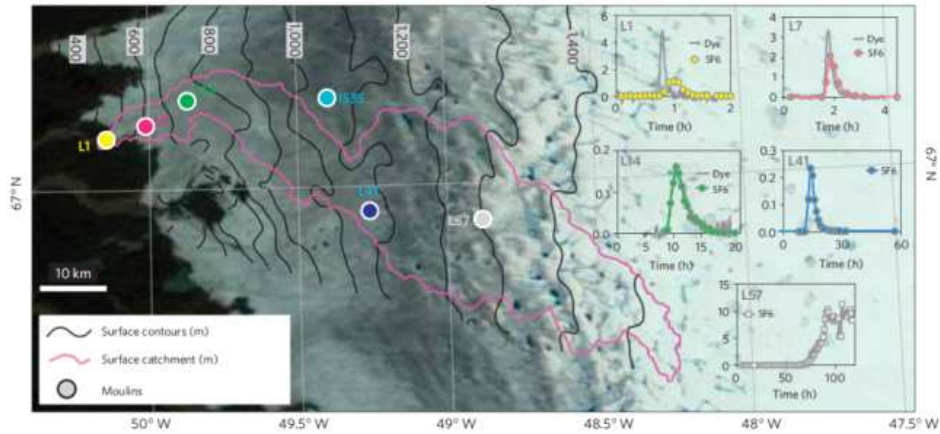


그림 34 그린란드에서 추적자를 이용한 연구결과(Chandler *et al.*, 2013).

- 빙하 하부 및 빙하 절단면 등에서의 물의 화학적 특징은 일부 보고 되어 있으나 남극의 경우 빙권의 두께가 두껍고 접근이 어려운 특성상 빙하하부의 물을 직접 채취하여 분석한 경우는 매우 제한됨. 따라서, 접근이 가능한 지역의 물 샘플 활용하여 동위원소를 통한 물의 진화 규명은 해양-빙권 변동성 규명에 강력한 근거를 제시 가능

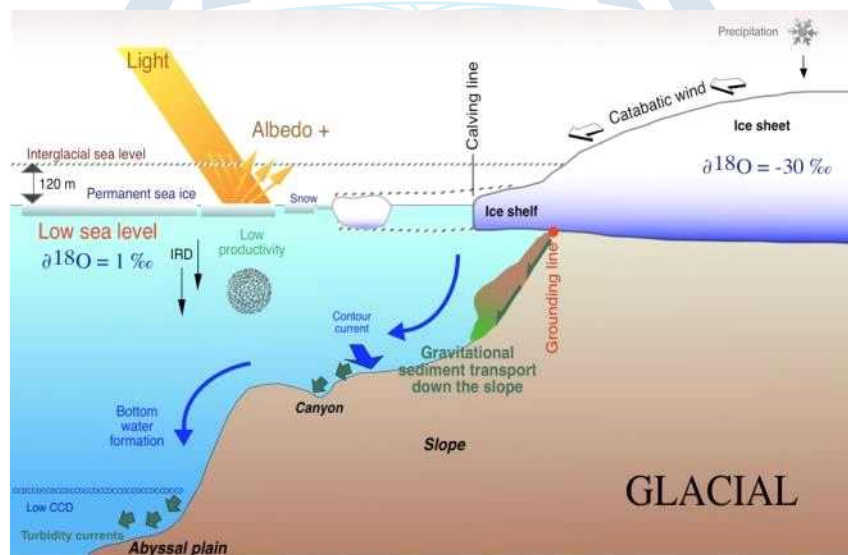


그림 35 해수와 빙하와의 동위원소 변동에 대한 모식도

- 접근이 어려운 물의 존재 지역에 열수시추 등의 방법을 통하여 물을 샘플링하여 해석할 경우 수문 해석에 새로운 결과물 제시 가능함. 이러한 연구 분야에서 세계적인 수준의 결과를 도출하기 위해서는 여러 해외 선도 연구그룹과 공동연구가 반드시 필요하며, 향후 10년 이내에 국내 연구진이 빙저호를 직접 시추하여 과거 남극 빙하 생성 초기의 빙하 고환경에 관한 연구를 수행하는 것이 필요함

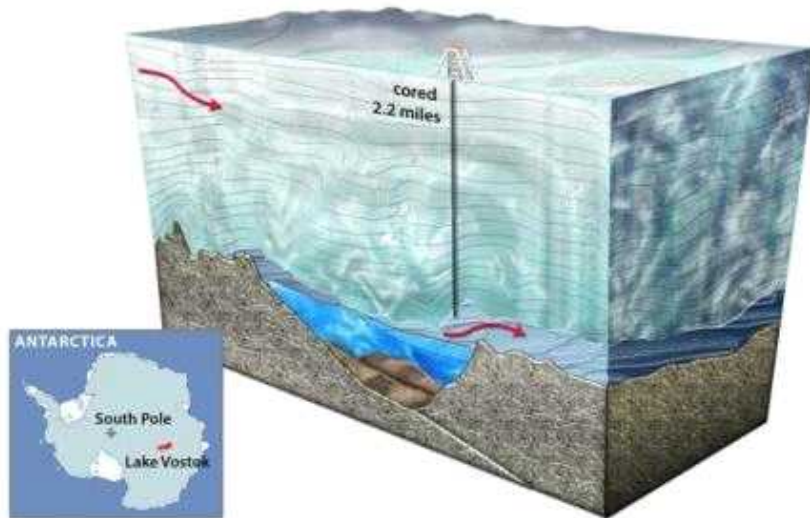


그림 36 남극 보스톡 러시아 기지에서 수행 중인 빙저호의 단면모습

- 빙상 하부의 흐름의 경우 빙압의 구배, 빙권 암권 사이의 매질의 특성, 하부 용융량 등의 조건에 따라 넓은 지역을 천천히 흐르는 분산흐름(distributed flow) 형태와, 채널을 통해 빠르게 흐르는 흐름(Channelized flow)의 형태가 동적으로 변화 하며 나타남. 이러한 흐름 형태의 변화는 상부 빙상의 미끄러짐에 기여하므로 빙저 수문망 규명은 빙권의 거동 변화와 밀접하게 연관되어 있음

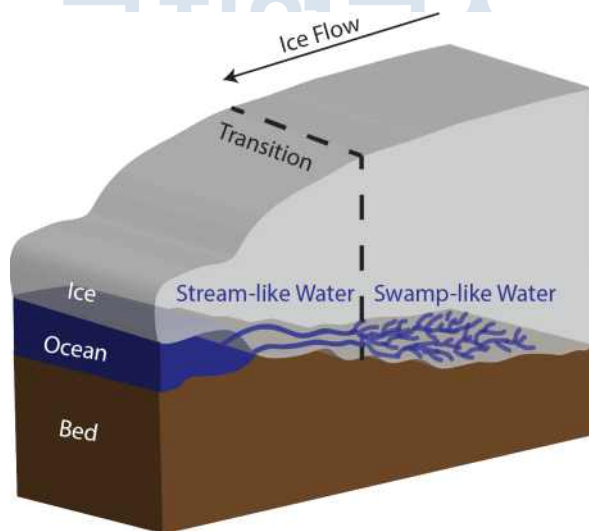


그림 37 빙저수문망 개념모식도

- 국내 빙저수문변화 연구의 경우 인공위성 고도계 자료 분석을 통해 수문망의 변화와 관련하여 로스해 지역 Kamb 빙하 지역이 멈춘 원인 해석(Kim *et al.*, 2016)

- 빙저수문모델과 같은 경우 빙상하부 수문흐름을 유효압력 조건에 따라 채널형 흐름과 분산형 흐름의 동적 변화를 구현하는 흐름 모델이 개발되었음(Werder *et al.*, 2013; de Fluerian *et al.*, 2014, 2016).
- 그린란드 지역의 경우 여름 Moulin을 통한 지표수 유입이 빙상거동 가속화와 상관관계가 있어 빙상거동속도가 연도별 주기성을 보임
- 남극의 경우 basal sliding과 관련된 대륙 규모 빙상 거동 모델이 수행되고 있지만, 수문학적 요인(hydrological variable)과 연계된 basal sliding 연구는 부족 (Flowers *et al.*, 2015).
- 최근 Subglacial Hydrology Model Inter-comparison Project (SHMIP)를 통하여 빙상 하부 경계조건에 연관된 변수(ex. 빙저 유효압력의 시공간적 분포 및 유출량 계산)의 변화양상을 정성적으로 비교하는 프로젝트가 진행 중
- 항공레이더 탐사 자료의 경우 초기에는 빙권, 암권 경계면 지형 도출에 사용되었으나(Siegert *et al.*, 2005), 이후 반사 강도의 분석을 통한 경계면의 물의 존재 유무 규명에 활용되었으며(Carter *et al.*, 2007) 최근에는 에너지 반사형태 및 강도 분석을 통하여 수문망의 대략적인 규명에까지 활용되고 있음 (Schroeder *et al.*, 2013)

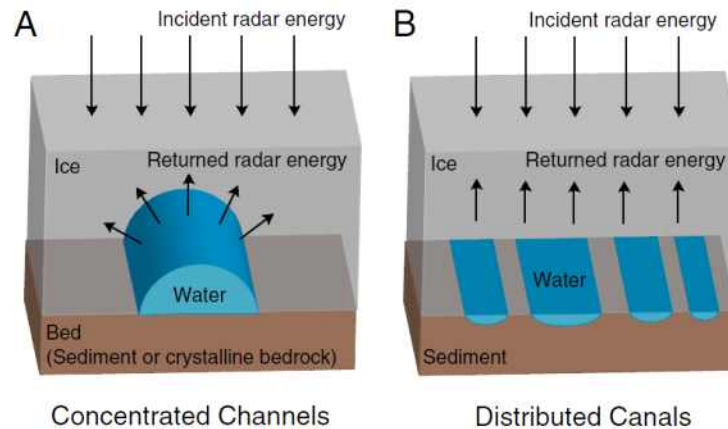


그림 38 레이더 에너지 반사 강도 및 반사 형태에 따른 흐름 빙저수문 흐름 형태의 규명(Schroeder *et al.*, 2013)

(4) 고체지구-빙권 상호관계 규명

- 초미세 중력변화 연구는 남극에서는 유일하게 일본 쇼와 기지에 초진도 중력계가 설치되어 남극 조석, 지진 및 지구 자유 진동, 남극 지각 용기, 남극 질량 균형 연구에 활용되고 있음(예, Iwano *et al.*, 2005)
- POLENET 등의 국제적인 빙하 관측 프로그램들은 자동화된 GPS와 지진계 원격 관측 시스템 등을 통해 지구온난화와 관련된 빙권의 거동에 대한 연구 및 지체구조에 관한 연구를 진행하고 있음

- 원격 관측 시스템 기술 개발을 통하여 장비의 경량화가 빠르게 진행되고 있고 태양열, 풍력, 고용량 배터리 기술을 바탕으로 보다 장기간 지속가능한 관측시스템이 보편화되고 있음

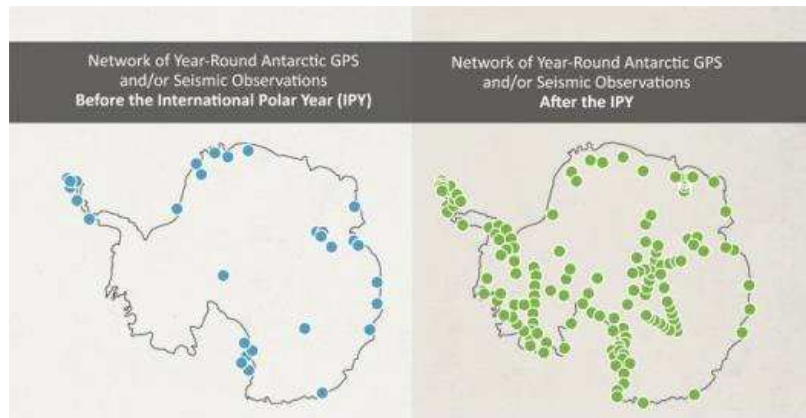


그림 39 (좌) POLENET(IPY) 이전 남극에 설치된 지구물리 관측망, (우) 이후 확장된 관측망 현황

- 미국 연구진을 중심으로 이태리, 영국, 호주, 캐나다, 일본, 대한민국 등 28개국이 참여하여 2007년 11월부터 2012년 1월까지 남극 전역에 지진관측소와 GPS관측소를 설치하여 남극 대륙의 고체지구물리학적 특성과 빙권의 상호관계를 규명하기 위하여 연구를 수행
 - POLENET 프로그램은 국제공동으로 각국의 남극 기지 주변과 남극 내륙 전역에 지구물리 관측망을 구축하여 장기 모니터링을 수행하고, 현재 공동 연구 사업은 공식적으로 종료되었지만 아직까지 몇 개의 관측소는 여전히 운영되고 있음
 - 2000년 11월부터 2003년 11월까지 남극 종단 산맥의 생성 원인과 동남극 대륙괴(craton) 구조를 연구하기 위한 TAMSEIS²⁶⁾를 수행. 17개의 광대역 지진계를 동남극 대륙괴 중심에서 시작하여 선형으로 1,400km에 이르는 지역에 설치함(그림40의 청색 점)
 - 이 관측망에 수직으로 교차하도록 16개의 광대역 지진관측소로 이루어진 관측망을 400km 길이로 설치하고(그림40의 적색 삼각형), 11개의 광대역 지진계를 남극종단 산맥을 따라서 Ross섬 주변의 해안에 설치함(그림40의 황색 사각형)

26) TransAntarctic Mountains Seismic Experiment

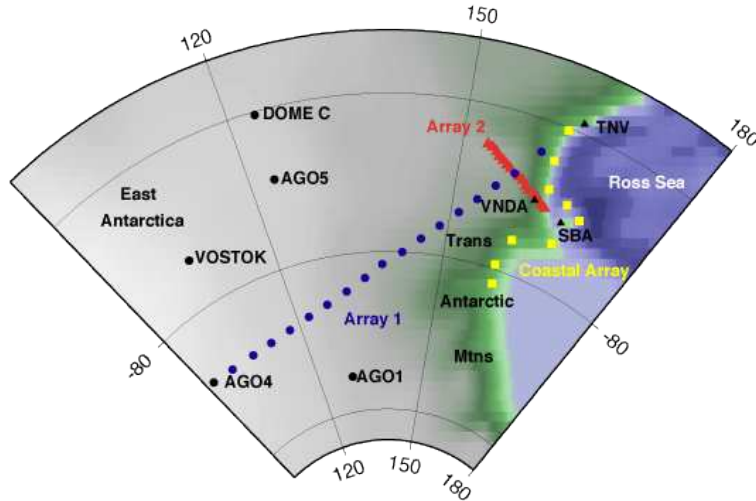


그림 40 TAMSEIS 관측망 위치

- 일본 극지연구소(NIPR²⁷⁾)에서는 남극 쇼와기지 주변에 지진관측소와 초음파 관측소 (Infrasound monitoring array) 및 비디오 카메라를 설치/운영하고 있으며, 미국과의 공동 연구인 POLENET, AGAP²⁸⁾, GAMSEIS²⁹⁾ 프로그램에 적극적으로 참여하고 있음



27) National Institute of Polar Research: 1959년 설립된 일본 국립 극지연구소. 일본은 이미 1912년에 Shirase가 남위 80도 선에 접근하는 등 오랜 남극 탐사 역사를 지니고 있다.

28) Antarctica's Gamburtsev Province Project: 남극대륙에서 가장 오래된 육괴인 Gamburtsev Province에서 남극대륙 및 빙하의 진화과정을 연구하는 국제공동 연구과제(<http://www.ldeo.columbia.edu/res/pi/gambit/>). 지구상에 존재하는 마지막 발견 빙저 산맥

29) Gamburtsev Antarctic Mountains Seismic Experiment: AGAP의 세부 과제로 Gamburtsev 산맥의 진화과정을 규명하기 위한 연구과제(<http://epsc.wustl.edu/seismology/GAMSEIS/>)

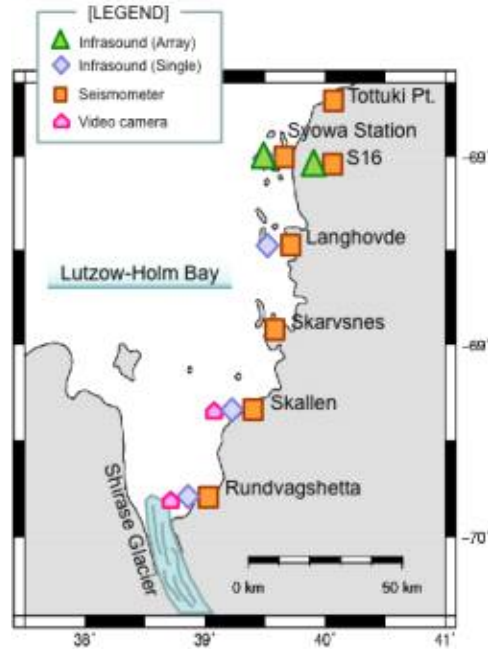


그림 41 남극에 위치한 일본 쇼와 기지 주변의 지진(주황색 사각형) 및 초음파 관측소(녹색 삼각형 및 보라색 마름모) 위치.

- 장보고기지가 위치한 테라노바 만에는 마리오 주첼리 기지³⁰⁾가 인접해 있으며, 약 30여 년간 지구물리, 해양, 생태 등 많은 분야의 연구 활동을 수행해 왔음. 2003-2004년 동안 뉴질랜드와 공동으로 데이비드 빙하부근에 지진관측소 및 GPS 관측소를 단기간 운영하여 빙하 움직임과 연관된 다수의 빙하지진을 관측함

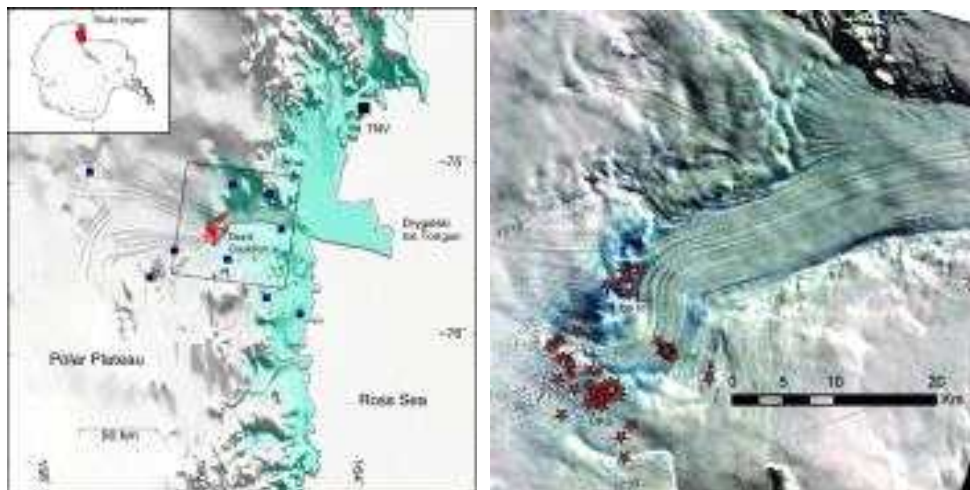


그림 42 데이비드 빙하 움직임과 연관된 빙하지진의 위치(적색 별). 주로 지반선 부근에서 발생했음을 확인할 수 있다(Danesi *et al.*, 2007)

30) Mario Zucchelli Station: 남극 테라노바 만에 위치한 1986년부터 운영되고 있는 이탈리아 남극 하계 기지

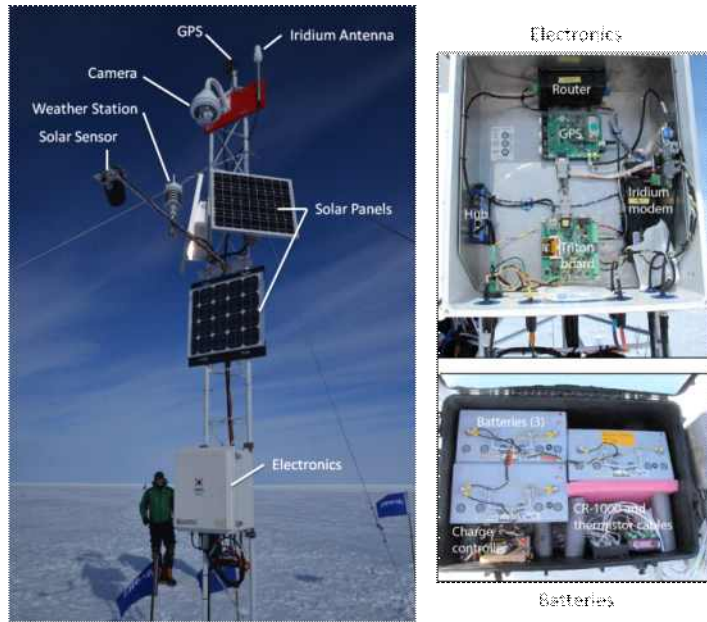


그림 43 AMIGOS 구성 및 설치 예

- 빙하 이동 속도 및 얼음 표층의 물성 관측을 위해 미국 NSIDC³¹⁾에서 개발한 AMIGOS³²⁾를 설치/운영하고 있음
- 영국 BAS³³⁾에서는 항공기의 착륙이 불가능한 빙원 위 크레바스 지역 등의 빙하 이동속도를 측정하기 위한 장비인 ADIOS³⁴⁾를 개발하여 2011년에 시험탐사를 수행하고 2012년부터 서남극 파인아일랜드 지역에 성공적으로 설치/운영하고 있음

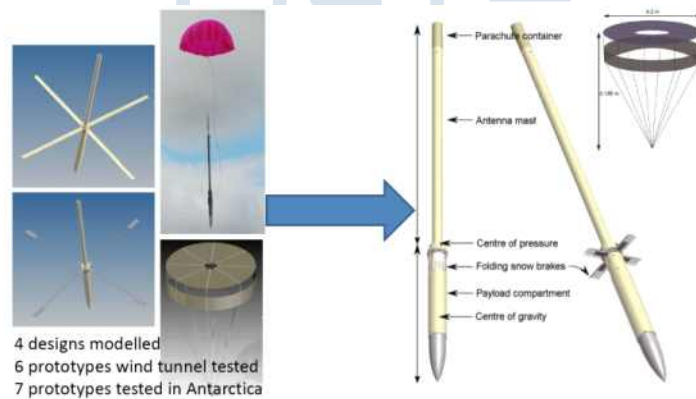


그림 44 ADIOS 항공 낙하 장면 및 개요도. Twin Otter 등을 이용하여 접근이 용이하지 않은 지역에 장비를 투하하여 설치하게 된다.

31) National Snow and Ice Data Center: <http://nsidc.org>
 32) Automated Met-Ice-Geo Observation System: <http://thistle.org>
 33) British Antarctic Survey: <http://www.bas.ac.uk>
 34) Aircraft-Deployable Ice Observation System

- 남극대륙에서 수행된 MT 탐사는 Wannamaker *et al.* (2004) 등에 의해 연구가 본격적으로 시작되었으며, 최근 남극 로스 빙봉 지역에서 Central TransAntarctic Mountain(CTAM)을 가로지르는 MT 탐사를 수행

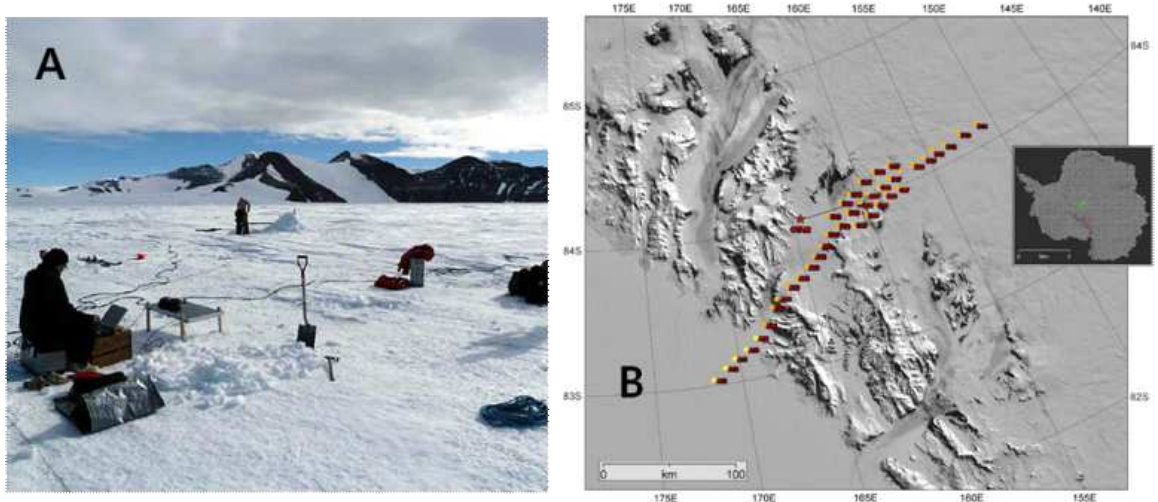


그림 45 로스 빙봉에서의 자기지전류 탐사 사례(University of Utah). (A) 빙원 위 현장 탐사 모습, (B) CTAM을 가로지르는 탐사 측선도

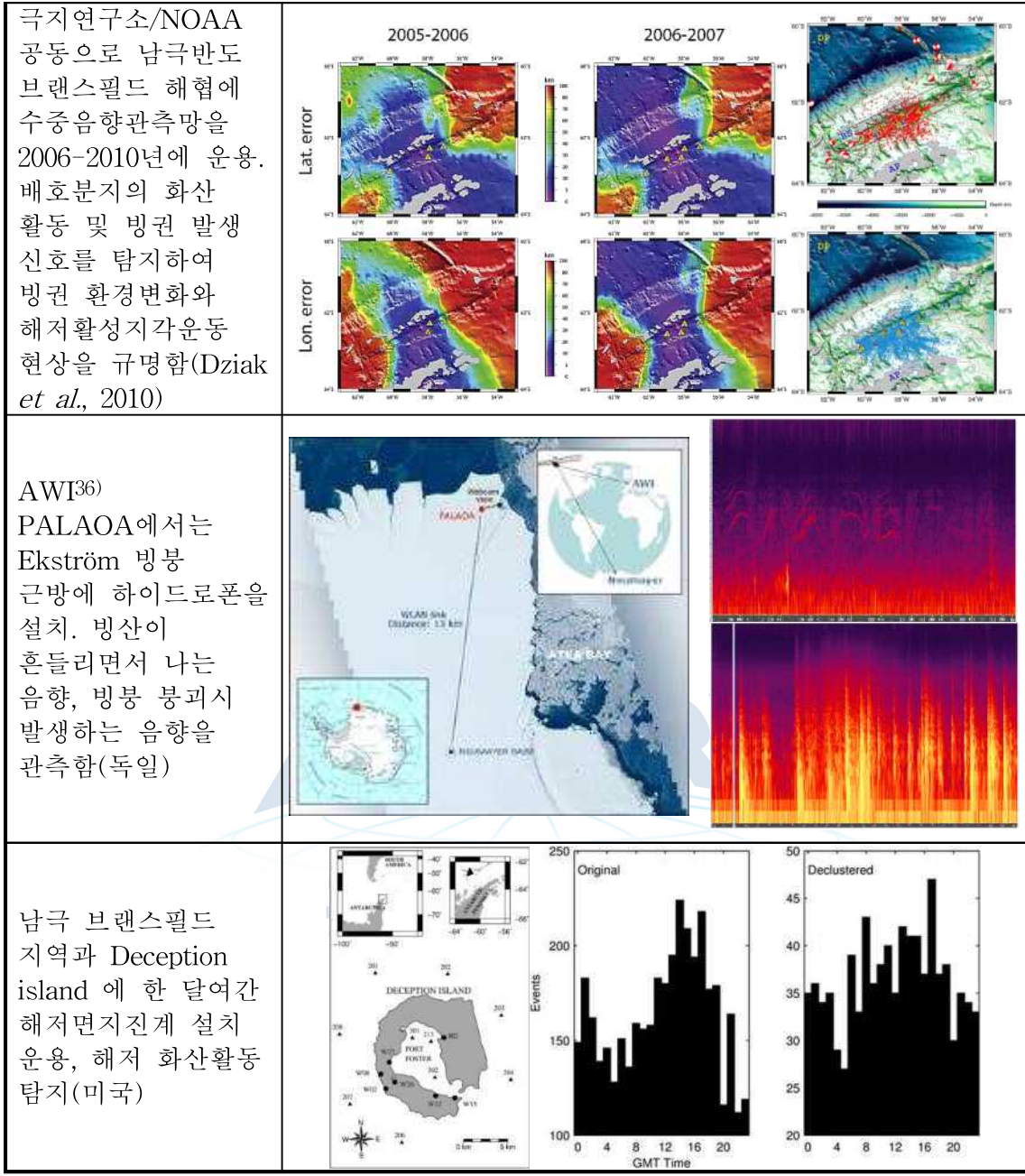
(5) 수중음향관측 연구

- 미국 NOAA/PMEL³⁵⁾은 선도적으로 수중음향관측망을 이용하여 전세계 각 지역에서 해저 지각 활동과 해양포유류 음향신호 연구를 수행하고 있음
- 남극반도 부근 브랜스필드 해협에서 극지연구소와 NOAA/PMEL 공동으로 관측망을 설치 운용하여 그동안 관측되지 않은 빙권 발생음과 해저지각활동을 탐지함
- 미국 워싱턴대학 연구진은 남극 브랜스필드 해협에서 해저면 지진계를 한 달가량 단기간 설치 운용하여 다수의 해저지각활동음을 포착함

연구(국가)	연구 성과
태평양 및 대서양에 수중음향 관측망을 설치. 해양 T 파를 분석하여 해저 지진, 해저화산활동, 고래 등 수중 생물의 생태 연구 수행(미국)	<p>The figure shows a map of the EPR Array General Locations in the Pacific Ocean, with latitude and longitude coordinates. To the right is a spectrogram showing frequency (0 to 60 Hz) versus time, with a color scale from blue to red.</p>

35) National Oceanic and Atmospheric Administration/Pacific Marine Environmental Laboratory: 미국 상무부 소속의 해양 대기청에 속해 있는 태평양 해양환경 연구소

36) Alfred Wegener Institute: <http://www.awi.de/de>, 독일의 극지 연구를 담당하는 연구소



다. 빙권 변화 재현 및 예측 시스템 개발 현황

(1) 빙상 동역학 수치모델

- 빙상 거동 수치모델은 수많은 종류의 관측 자료 및 이를 구성하는 정교한 하위 구조 모델 개발과 이들의 유기적인 상호작용을 구현하는 등의 복합적인 노력이 요구되는 대규모 공동연구를 통하여 도출됨. 주로 미국 및 유럽 국가들의 공동연구로 개발이 되고 있으며, 대표적으로 미국 로스알라모스 국립 연구소가 주도하는 CISM³⁷⁾과 미국 알래스카 대학 및 독일 포츠담 환경 영향 연구소가 공동 개발한 PISM, 미국 JPL/NASA, UC Irvine 주도의

37) Community Ice Sheet Model

ISSM, 프랑스 IGE 주도의 Elmer-ICE 등이 있음

- 빙상 거동 수치모델의 최종 목표는 모델을 통하여 전지구 온난화의 영향으로 발생하는 빙상의 후퇴 및 이에 수반되는 해수면 상승 예측하는 데 있음

- CISM은 전지구 기후 변화 모델인 CCSM³⁸⁾에 빙권변화에 관한 정량적 분석을 담당하며, 이미 개발된 GLIMMER³⁹⁾를 벤치마크하여 개발중

- 수치모델은 다음의 대표적인 입력 자료들을 필요로 하며, 아무리 정교하게 개발된 모델이라 하더라도 장기적인 정밀한 현장 관측자료의 확보 없이는 정확한 미래 예측이 불가능

- ▶ 빙상의 스트레스 균형(stress balance)
- ▶ 빙저 수문계측 모델(subglacial hydrology model)
- ▶ 기반암 변형 모델(bed deformation model)
- ▶ 기반암 물성 모델(basal strength model)
- ▶ 빙하분리(氷河分離; calving)
- ▶ 빙하 유동학⁴⁰⁾(流動學; rheology)
- ▶ 빙상 표면 변동 모델(표면 용융, 강설량 등)
- ▶ 대기, 해양 모델(기온, 풍속, 빙붕 하부 해양경계부 상호작용, 해수면 높이 등)

- 최근 PISM을 활용한 다수의 영향력 있는 국제논문(Nature誌 포함)이 출간됨

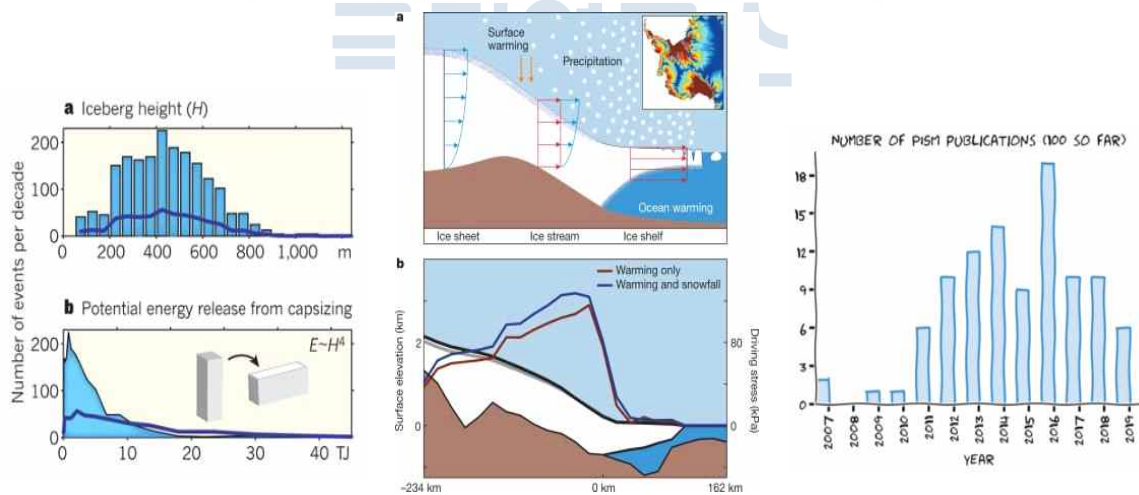


그림 46 PISM을 이용한 논문(좌로부터 Levermann(2011), Winkelmann *et al.*(2012), 연간 PISM관련 논문 수 증가 패턴(2019년 상반기까지)

38) Community Climate System Model

39) 영국 브리스톨 대학이 주도하여 개발한 전지구 기후 모델에 빙상 거동을 구현하는 하나의 인터페이스 모델로, 3차원 열적/기계적 빙상 거동을 모사한다. CCSM 4차 버전에 채택되었으며, IPCC 환경평가에 사용되었다.

40) 물질의 변형과 유동(流動)에 관한 과학으로, 물질의 구조나 그 분자 또는 원자간의 힘과 밀접한 관계를 가지고 있어, 역학이나 물성론, 생물학·콜로이드화학·고분자학 등에 관련이 깊다.

(2) 모델 연구 개발 현황

- IPCC AR4 보고서(2007)에서 당시의 빙상동역학 모델이 빙하의 최근 급격한 질량·속도 변화의 정확한 재현이 쉽지 않았기 때문에 미래 해수면 상승 예측에서 반영하지 못하였으며, 따라서 빙상모델이 미래 해수면 상승 예측 불확실성을 높이는 주요 원인이라고 지적

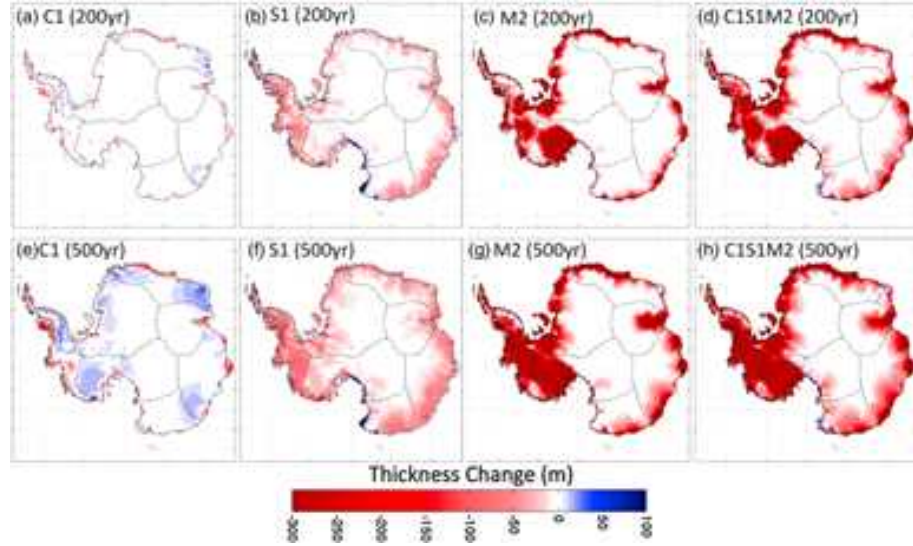


그림 47 8개 서로 다른 미래기후 시나리오로 강제된 6개 빙상동역학 모델 평균의 200~500년 후 남극 빙상 용융 예측 결과 (Nowicki *et al.* 2013)

- 이후 미국과 유럽을 중심으로 SeaRISE(Sea-level Response to Ice Sheet Evolution), ice2sea, COMBINE(Comprehensive Modelling of the Earth System for Better Climate Prediction and Projection) 등의 국제공동연구를 통하여 동역학빙상모델을 이용한 그린랜드와 남극 빙하 용융 및 미래 해수면 변화 예측 실험이 체계적으로 수행됨

- 이러한 노력들이 ISMIP6(Ice Sheet Model Intercomparison Project for CMIP6)로 수렴되면서 동역학빙상모델뿐 아니라 동역학빙상모델-지구시스템모델 접합시스템을 이용한 그린랜드와 남극 빙하 용융 및 미래 해수면 변화 예측 실험이 계획되어 2022년 출간될 IPCC AR6 보고서를 위한 CMIP6(Climatic Model Intercomparison Project 6)의 구성요소로 채택되었음

- WCRP(World Climate Research Program)에서 얼음 용융의 전지구적 영향(Melting Ice and Global Consequences) 및 지역 해수면 변동이 해안지역에 미치는 영향(Regional Sea-Level Change and Coastal Impacts)을 다가오는 10년 동안 해결해야 할 주요 연구 과제로 선정하였으며, IPCC에서는 해양 및 빙권 특별보고서(SPOCC, Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate)를 2019년 발간할 예정임

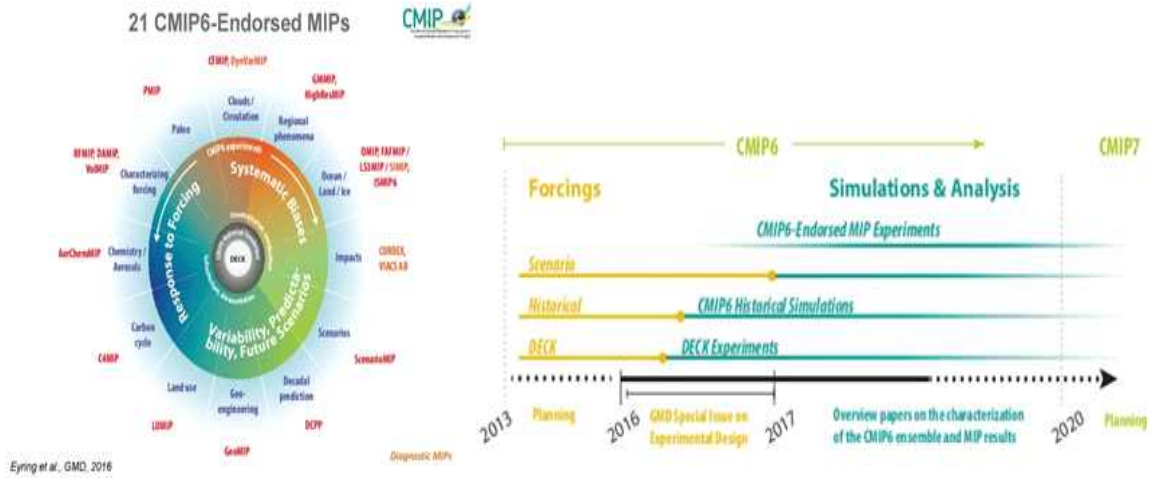


그림 48 CMIP6 구성요소 및 일정

- 최근 서남극 지역 해양빙상 붕괴가 주요 이슈로 대두됨에 따라 빙하의 장기적 지표질량 변화뿐만 아니라 빙상-해양 경계에서 발생하는 물리 과정들에 중점을 두는 MISMP+(Marine Ice Sheet MIP third phase), MISOMIP(Marine Ice Sheet - Ocean Model Intercomparison Project) 등의 빙상동역학 모델링 국제공동연구가 진행 중
- 미국 NASA(우주항공국)은 향후 100~200년 전지구 해수면 상승 예측성 향상을 위한 빙상동역학 수치모델 및 빙상-해양 접합모델 개발 및 개선 연구를 수행지원하고 있음, 국가적인 지원 하에서 CISM(Community Ice Sheet Model), ISSM(Ice Sheet System Model), PISM(Parallel Ice Sheet Model) 등 다수의 빙상동역학 모델이 개발되었으며 빙상-해양, 빙상-기후 접합모델로 확대 개발 중

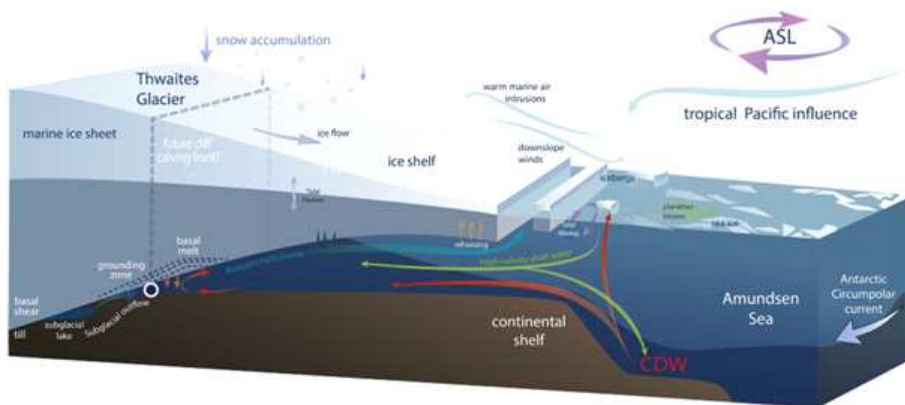


그림 49 해양 빙상의 주요 물리과정 (Scambos *et al.*, 2017)

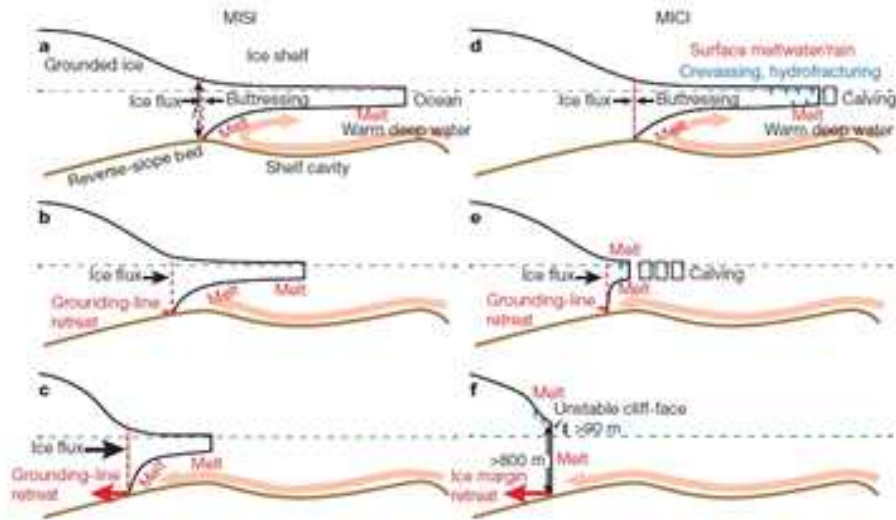


그림 50 해양빙상 및 해양빙벽 불안정 붕괴 모식도 (DeConto and Pollard, 2016)

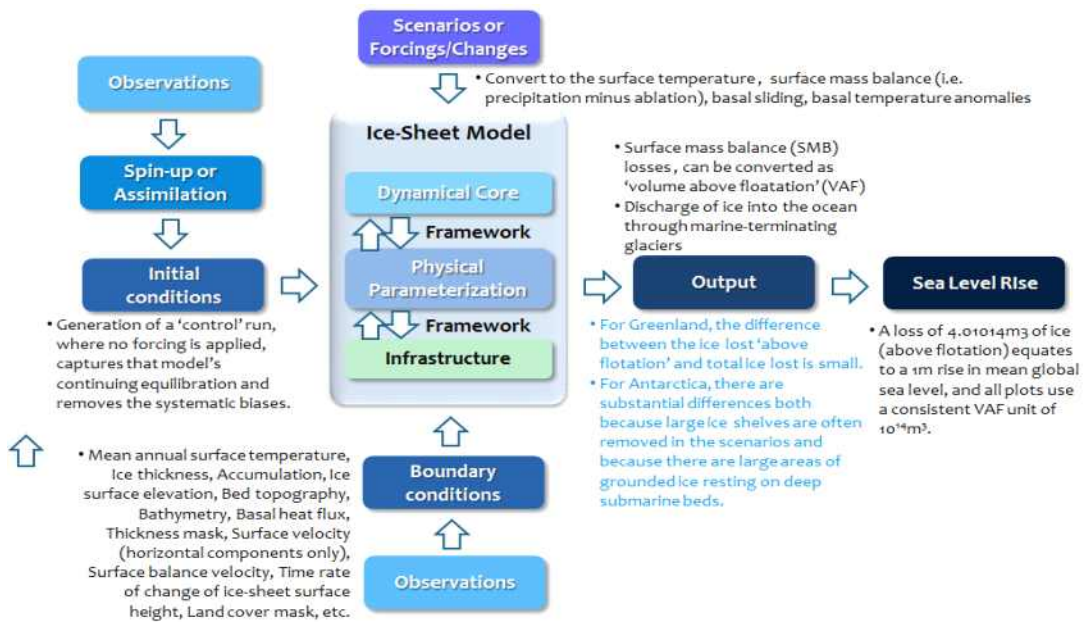


그림 51 빙상동역학 모델 시스템 모식도 및 활용되는 관측 요소들

- 남극 빙권의 질량·부피 변화와 해수면 상승의 상관관계는 관측 기반 수리·물리 방정식으로 정리되는 중이며 빙하·빙상·해빙 등 특성에 따라 다르게 구현될 수 있음 (Noerdlinger and Brower, 2007; Jenkins and Holland, 2007; Levermann and Winkelmann, 2016)
- 이를 기반으로 미래 해수면 변동은 수치 모델링 (Ren *et al.* 2013) 또는 반경험적 (semi-empirical) 모델 (Rahmstorf, 2007, 2010) 등으로 예측될 수 있으며 IPCC 보고서에 종합적으로 기록됨, 그러나 2100년까지 53.5~91.4 cm 해수면 상승 예측값을 산출한 가장 최근의 IPCC AR5 보고서 (2013)에서는 남극 빙하·빙상 용융으로부터 기인한 해수면 변동값은 포함되지 않았음

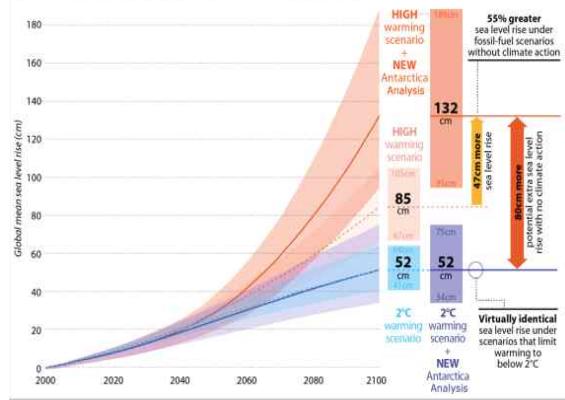
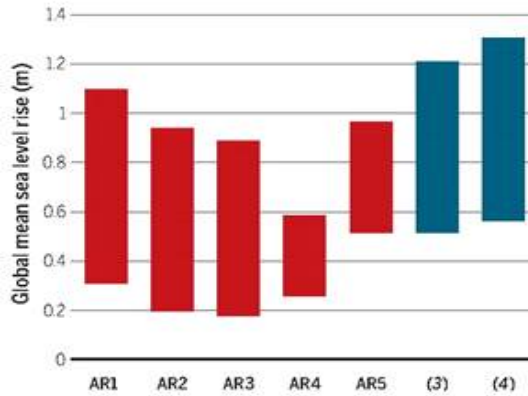


그림 52 IPCC 보고서별 채택된 기후변화 시나리오에 따른 해수면 상승 폭 (좌) 및 IPCC AR5 결과에 남극 용빙 가능성을 반영한 해수면 상승 폭 (Nauel *et al.*, 2017) (우)

- 빙상동역학 모델 결과의 신뢰도는 평가 및 불확실성 측량·평가는 다양한 통계적 기법들을 적용하여 개발되어 왔으며 (MacAyeal, 1993; Lin *et al.*, 2012), 여러 모델을 동일한 실험 조건에서 적분하는 상호비교연구도 빙상동역학 모델의 다양한 특성 평가를 위하여 다수 계획되어 활용되어 왔음 (Huybrechts and Payne, 1996; Payne *et al.* 2000; Bindshadler *et al.* 2013; Parizek *et al.* 2013; Eyring *et al.* 2016)

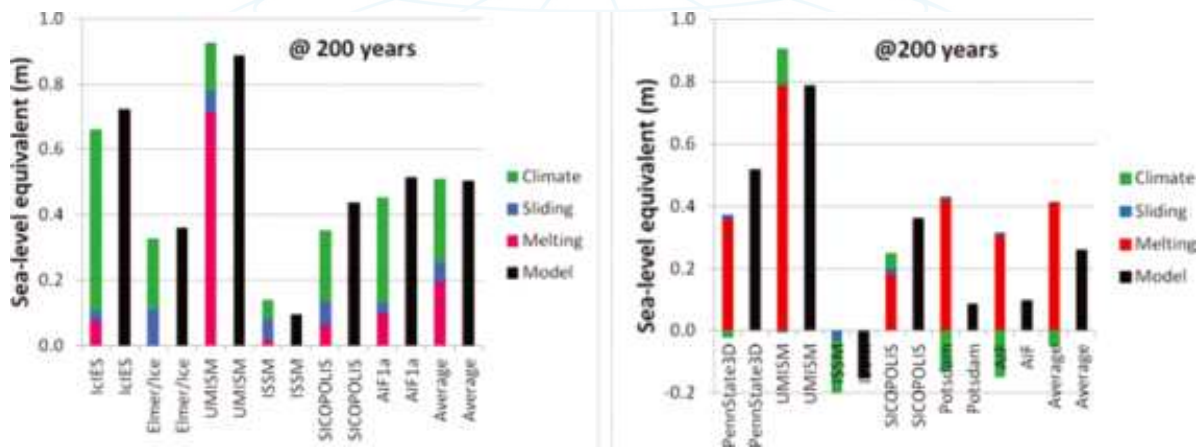


그림 53 다양한 외부강제력에 대한 그린란드 및 남극 용융에 따른 해수면 상승치 모델 상호비교 연구 결과 (Bindshadler *et al.* 2013)

라. 극지 관측기술 개발 현황

(1) 주요 극지 연구개발 기술 보유 현황

- [영국] 영국남극연구기관 BAS⁴¹⁾는 ApRES⁴²⁾를 독자적으로 개발하여 해당 관측 장비를 활용하여 빙봉 용융량의 시계열 변화 관측에서 세계 최고수준의 기술을 보유하고 있으며, 빙봉 하부 직접 관측을 위한 무인잠수정(AUV) 운영에서 세계최고 수준의 기술 보유
- [미국] 인공위성 자료를 활용한 빙상-빙하 거동 관측 및 해석기술(NASA/JPL⁴³⁾), 항공탐사를 활용한 지반 매핑기술 및 물리탐사 해석 기술(UTIG⁴⁴⁾), 수중음향 관측기술(NOAA⁴⁵⁾), 대기-빙권-해양 통합관측망 시스템 구축(NSIDC⁴⁶⁾) 등 탐사 모니터링 분야 뿐 아니라 빙상동역학 모델을 활용한 해수면 예측 모델 분야 등과 관련 극지연구 분야 전반에서 세계최고의 기술수준을 보유
- [독일] 해양물리탐사를 통한 해양 지형 해석 및 지열 연구(AWI⁴⁷⁾) 등에서 세계최고 기술 보유
- [프랑스] 빙상 동역학 수치모델, 해수면 변동 예측 모델링 분야에서 세계 수준의 기술 보유

(2) 무인항공기, 무인 로봇의 활용

- 미국과 유럽 등 주요 선진국에서는 무인항공기 및 무인로봇을 개발하여 극지방에서의 과학연구를 활발히 수행 중임
- 2007년 BAS 과학자들과 독일의 브라운슈바이크 대학이 남극에서 무인항공기를 활용하여 데이터를 수집함
- 이후 미국, 일본, 호주 등의 국가에서 무인항공기를 활용하여 극지 기상 및 대기관측을 수행하는 연구결과를 발표함
- 최근 들어 무인항공기를 이용한 연구의 범위는 생태계 및 암석조사 등 다양한 영역으로 확장되었으며 또한, 무인지상로봇을 활용하여 크레바스 탐사 및 운석채집 등을 실시함
- 극지역의 특성상 접근이 용이하지 않아 관측 자료의 회수가 수시로 이루어지기 불가능한 상황이므로, 일반적으로 매년 수행되는 남극 하계 탐사시 자료를 회수함. 상황에 따라 2년에 한번 꼴로 자료를 회수하는 상황까지 발생
- 1-2년 주기의 자료회수는 관련 연구의 지연을 유발시키므로, 이를 극복하고자 하는 노력으로 각 관측소에 이리듐 모뎀을 이용하여 인공위성으로 자료를 준실시간으로 전송하는 기술이 개발되어 미국을 비롯한 몇개 나라 연구진이 활용하고 있는 중이나, 대용량 자료 전송에는 통신료 부담이 가중되어 최근 국지규모(100km 이내) 관측소간 라디오 통신망을 구축, 주변 관측소 자료를 한데 모아 자료를 압축하여 인공위성을 통해 관측자료를 송신하는 기술이 개발되고 있음(예, 남극 Union 빙하에 설치된 AMIGOS 자료 전송, NSIDC)

41) British Antarctic Survey

42) Autonomous phase-sensitive Radio Echo Sounder

43) The National Aeronautics and Space Administration/Jet Propulsion Laboratory

44) The University of Texas at Austin Institute for Geophysics

45) The National Oceanic and Atmospheric Administration

46) National Snow and Ice Data Center

47) Alfred Wegener Institute

연구(국가)	연구 성과	
하층대기와 빙하의 열교환 데이터 측정 (영국)		
항공자기 및 기상관측 (일본)		
GPR을 이용하여 크레바스 연구 (미국)		
UGV(48)를 이용하여 암석 및 운석 탐사 (미국)		
남극빙하 및 생태계 특성 연구 (미국)		
글로벌호크를 이용하여 대기 관측 (미국)		
UAV를 활용하여 미지생물 연구 및 Mapping (호주)		

48) Unmanned Ground Vehicle: 무인 지상 차량



(3) 통합 관측 시스템 개발

- 극지연구소/콜로라도 대학/알래스카 대학의 협력을 통해 2017년 2월 12일 난센 빙봉에 빙봉 모니터링 시스템인 AMIGOS-II (Automated Meteorology-Ice-Geophysics Observing System, mark II)를 설치, AMIGOS-II는 해양 관측 케이블을 탑재하고 있는 자동화된 다중 센서 관측 시스템으로서 열수 시추를 통해 확보한 시추공을 통해 해양 케이블이 설치, 기상 자료, 사진 영상, 정밀 GPS 자료, 온도센서를 이용한 표층 빙하 온도, 광케이블을 이용한 빙봉 하부 해수층의 온도 프로파일을 연속적으로 관측함으로써 해수 순환 및 하부 용융을 직접 관측할 수 있음

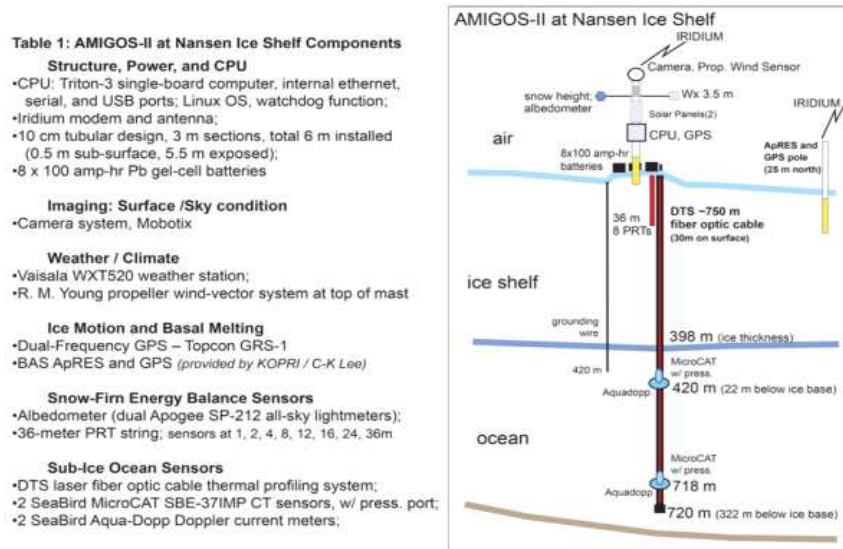


그림 54 난센 빙봉에 설치된 AMIGOS-II 시스템의 개요

(4) 무인잠수정 활용 기술 현황

- 빙봉 하부의 물성, 하부 지형과 공동의 구조, 해수의 특성과 물의 흐름 등을 정확하게 관측하는 것은 해수에 의한 하부용융 예측에 필수적인데 이를 가장 효과적으로 수행할 수 있는 것은 무인잠수정 탐사임

- 빙저 용융이 일어나는 경계부는 접근이 어렵고 (두꺼운 얼음, 해저, 빙저 등). 모델링에서 중요한 관측 지점임에도 불구하고 기존 기술로는 관측에 한계가 있음. 모델링에 있어 정확한 경계조건 관측값 제시가 매우 중요하므로 최첨단 기술을 활용하여 접근이 제한되었던 시공간을 관측

- 2009년에는 영국 BAS와 NOC (National Oceanography Centre), 미국 LDEO (Lamont-Doherty Earth Observatory) 3개 기관이 협력하여 Autosub3 무인잠수정을 이용하여 서남극 Pine Island 빙봉 하부를 4일간 510km 탐사를 수행하였고 이 탐사에서 상부와 하부를 동시에 보는 sonar를 이용하여 빙봉의 하부와 빙봉 밑 해저면 매핑을 성공적으로 수행함
 - 빙봉하부 탐사는 정확한 경로를 따라 빙봉 입구로 잠수정이 다시 돌아나와야 하지만 잠수정 회수가 가능하다는 점에서 해빙탐사와는 다르게 매우 위험하며 보다 정확한 항법 기술이 필요함
 - Autosub3은 BAS에서 Autosub1, 2에 이어 3번째로 개발한 무인 잠수정으로 NOC에서 개발한 음향 신호를 해저면에 쏘아 Doppler shift로부터 속도를 정확하게 연속적으로 관측하여 위치 변화를 계산하는 dead reckoning(추측 항법)을 사용하였다. Autosub에서 적용된 항법은 0.1도 이내 오차로 heading을 판별할 수 있는 센서와 정확한 속도 계산을 통해 1km 진행 시 1m 에러의 오차로 현재 위치를 판별할 수 있음 (<http://noc.ac.uk/facilities/marine-autonomous-robotic-systems/autosubs>)



그림 55 영국 BAS와 NOC에서 개발한 빙봉 하부 탐사용 무인 잠수정 Autosub3

- WHOI의 SeaBED Jaguar는 해저 사진 자료 수집과 고화질 sonar 이미지 획득이 가능한 무인 잠수정으로 북극과 남극에서 해빙 하부 매핑을 수행하였고, ALTEX 무인잠수정은 노르웨이 북극해에 투입되어 해빙 하부 탐사를 수행하였음(Bellingham *et al.*, 2008)



그림 56 호주 쇄빙선 Aurora의 2012년 SIPEX-II 연구항차에서 남극 해빙 밑에 투입된 SeaBED 'Jaguar' AUV
(<https://www.who.edu/news-release/SeabedAntarctc>)

극지연구소

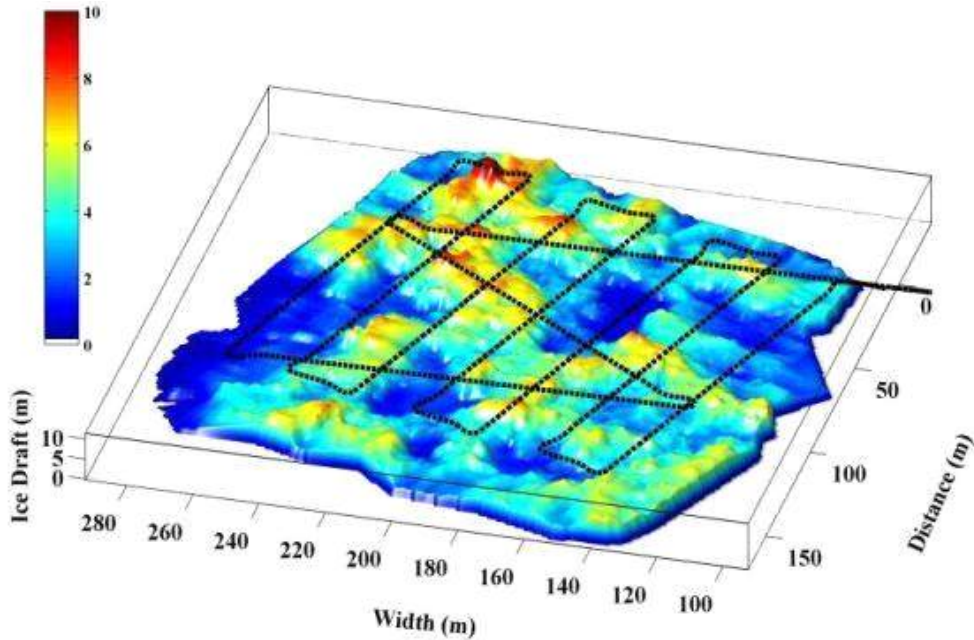


그림 57 2012년 Jaguar 무인잠수정 해빙하부 탐사를 통해 획득한 남극 해빙 두께 3차원 지도

(<http://www.antarctica.gov.au/news/2012/first-3-d-map-of-under-the-east-antarctic-sea-ice>)

- Endurance 무인잠수정은 남극 빙저호에 투입되어 탐사를 수행하였고 ROV의 작업 자유도와 AUV의 항해능력의 장점을 모두 가진 Nereid under-ice(NUI)는 2014년에 북극 해빙 하부 탐사를 수행하였음(Bowen *et al.*, 2014)
- Endurance 무인 잠수정의 차세대 모델인 ARTEMIS는 2015년에 남극 맥머도 빙봉 하부와 해빙에 투입되어 탐사를 수행하였다(Burnett *et al.*, 2015).
- 최근 미국에서는 목성의 위성인 유로파의 얼음 하부를 탐사하기 위한 목적으로 무인잠수정 Icefin을 개발하여 남극에서 테스트를 수행 (Spears *et al.*, 2016)
- Icefin은 일반적인 AUV와는 다르게 광학 케이블로 연결되어 작동하며 얼음을 뚫고 하부로 직접 투입되도록 디자인 되어 있음, 자이로 옵틱을 이용한 방향 계산과 DVL(Doppler velocity log)를 이용하여 이동방향과 거리를 정확하게 계산하고 나침반 사용이 어려운 극지역에서 활용할 수 있도록 기준점에서부터 상대적인 좌표를 계산하여 위치를 추정하는 방식을 사용

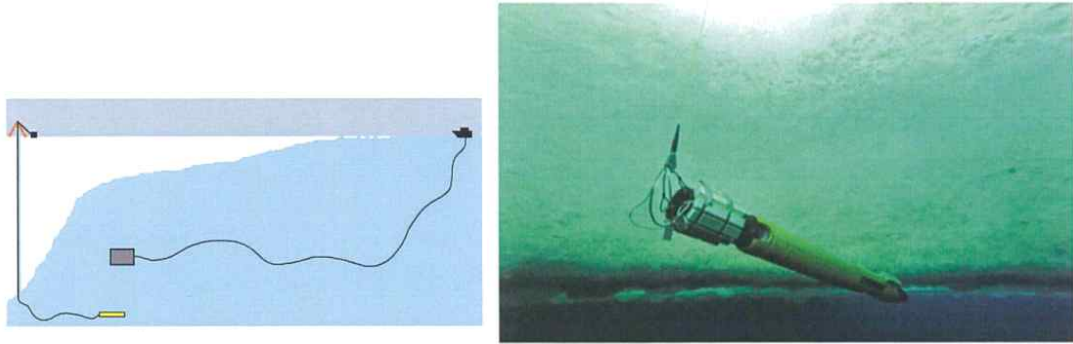


그림 58 (좌) 빙붕을 직접 뚫어 투입되는 Icefin (노란색) 운영 방법과 일반적인 빙붕 하부 무인잠수정 탐사(회색) 모식도 (우) 남극 McMurdo 기지 주변 열수시추 구멍을 통해 투입된 Icefin의 모습 (Spear *et al.*, 2016)

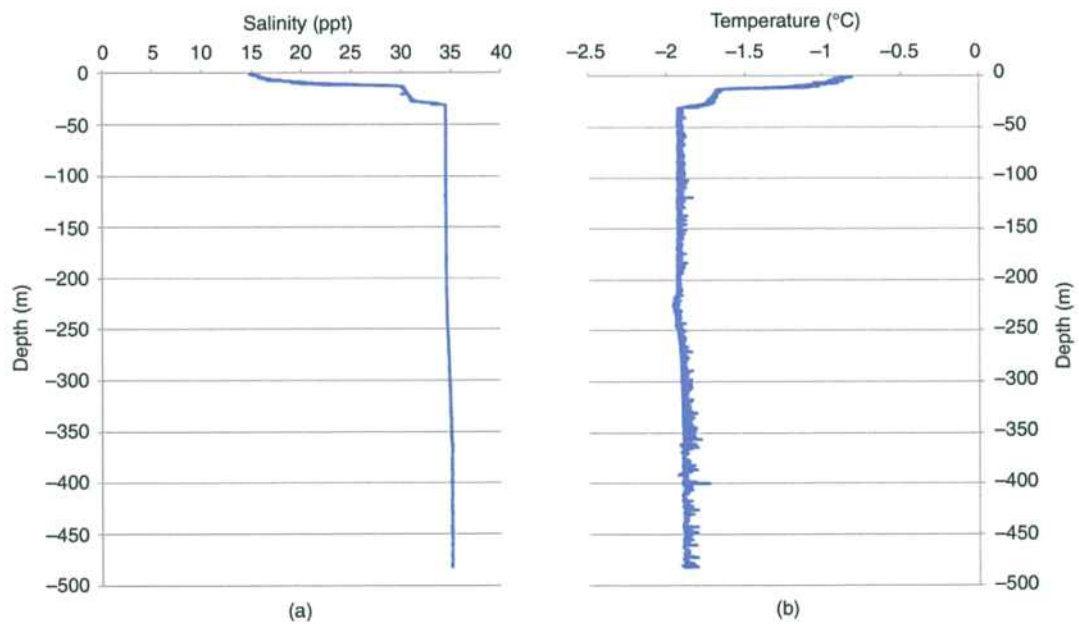


그림 59 Icefin 탐사를 통해 획득한 남극 McMurdo 빙붕 하부 해수의 염도와 온도 관측 결과(Spear *et al.*, 2016)

표 2 얼음 하부 탐사에 필요한 기능(좌)과 해당 기능을 갖춘 개발된 AUV 종류(중), Icefin 무인 잠수정에 구현된 기술(우) (Spear *et al.*, 2016).

Under-Ice Mission Requirement	Capable Vehicles	Icefin Design Solution
Subfreezing water temperatures (-5 °C)	Icefin, SeaBED, Autosub, ALTEX, ENDURANCE, NUI, ARTEMIS, Seaglidors, Bluefin, Theseus, SCINI, Deep SCINI	Battery temperature kept ideal; temperature-rated sensors
Hovering capability; six DF vehicle control; nonprotruding thrusters or control planes	Icefin, SeaBED, ENDURANCE, NUI, deep SCINI, ARTEMIS	Four nonprotruding directional thrusters over two modules, along with main rear thruster
Limited power budget; onboard battery power	Icefin, SeaBED, Autosub, ALTEX, ENDURANCE, NUI, ARTEMIS, Seaglidors, Bluefin, Theseus, Deep SCINI	Ability to switch power ON-OFF to each sensor from the surface control station in the software
Remote vehicle control and communication; deployment and recovery of the vehicle	Icefin, NUI, Deep SCINI	Kevlar-reinforced single-mode strand of optical fiber for vehicle tether
Small-diameter deployment hole in ice; difficulty avoiding snags during deployment/recovery	Icefin, SCINI, Deep SCINI	Constraints on vehicle diameter design; no protruding sensors nor actuators
1,500-m depth mission requirement; 3-km range requirement	Icefin, SeaBED, Autosub, ALTEX, NUI, Theseus, Deep SCINI	Cylindrical pressure vessel for main electronics module (rated to mission depth); pressure-rated sensors and actuators; >3-km tether
Reliable vehicle navigation and position information; vehicle control and sensor data management	Icefin, SeaBED, Autosub, ALTEX, ENDURANCE, NUI, ARTEMIS, Seaglidors, Bluefin, Theseus	Greensea Balefire software to estimate position and record sensor data
Human-portable vehicle mission requirement	Icefin, SCINI, Deep SCINI	Modular design of vehicle; size/weight constraints in the vehicle design
Need for both ice and seafloor data collection	Icefin, SeaBED, ENDURANCE, NUI	Modular sensor bay that can be rotated to face the ice or seafloor
Vertical deployment configuration of vehicle but horizontal mission configuration	Icefin, SCINI, Deep SCINI	Frangibolt [3] drop-weight system at the front of the vehicle

DoF: Degrees of freedom.

극지연구소

- 스웨덴 Gotenberg 대학은 Kongsberg 사의 Hugin⁴⁹⁾ 무인 잠수정을 구매하여 극지연구소 협력 하에 2019/20 남극 하계 시즌 아문젠해 빙봉 투입을 목표로 테스트 중에 있음. 이 무인잠수정은 기존에 사용되던 IMU, DVL을 이용한 위치추정 방식 뿐만 아니라 음향신호를 이용하여 위치를 보다 정확하게 추정할 수 있도록 하여 빙봉 아래에서도 정교하고 안전하게 운항할 수 있도록 함
- 호주에서는 2017년에 남극 빙저 탐사를 위해 International Submarine Engineering 사의 Explorer 무인 잠수정을 확보, 140km를 24시간동안 배터리 충전없이 운항할 수 있으며 DVL 뿐 아니라 음향 신호를 활용한 정확한 위치 추정이 가능함. 현재 호주에서는 2018/19 남극 하계 시즌에 탐사를 수행하는 것을 목표로 테스트 중에 있음

49) Hugin 무인잠수정의 상세 제원은 ([https://www.km.kongsberg.com/ks/web/nokbg0397.nsf/AllWeb/76ABD1760DA9C064C1257B470029C7A5/\\$file/382309_hugin_product_specification.pdf?OpenElement](https://www.km.kongsberg.com/ks/web/nokbg0397.nsf/AllWeb/76ABD1760DA9C064C1257B470029C7A5/$file/382309_hugin_product_specification.pdf?OpenElement))에서 확인할 수 있음

2. 국내 연구 기술 개발 현황

가. 국내 동향

(1) 제3차 남극연구활동진흥 기본계획(2017.4.)

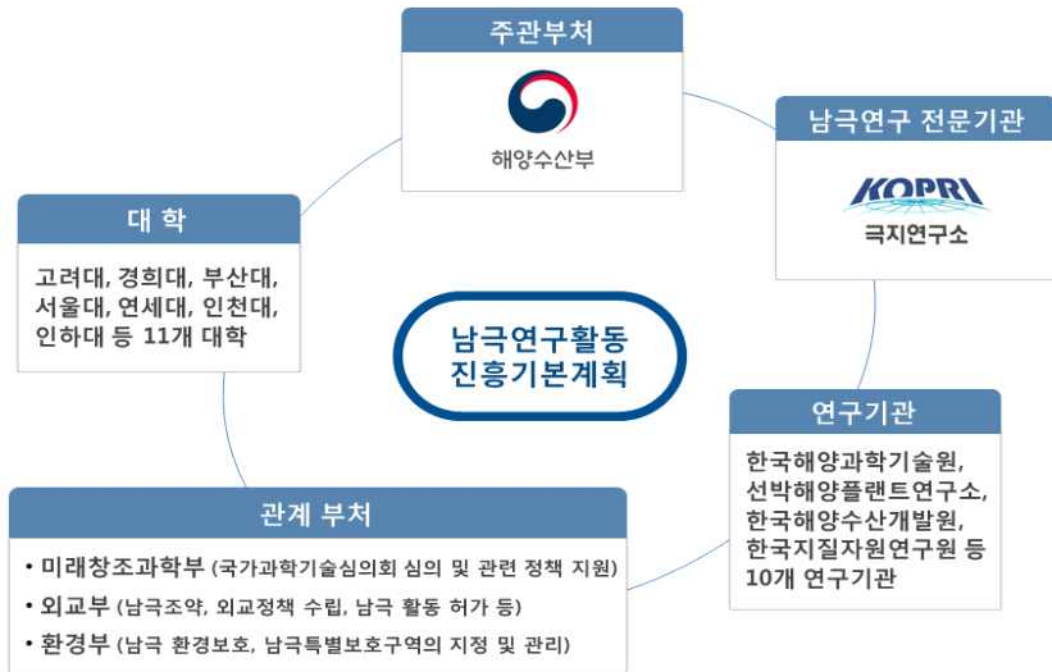


그림 60 남극 연구 수립 체계

- [남극연구 지평확대] 남극 연구를 통한 글로벌 환경변화의 예측 및 대응
- [기후 변화의 원인 규명과 변화에 대한 체계적인 대응] 최근 이상 기후의 원인을 분석하고 체계적으로 대응할 필요성 증대. 전 세계 곳곳에서 극한기후 현상이 빈번히 발생하고 있으며 그 정도가 늘어나고 있는 추세. 따라서 기후 변화에 대한 원인을 규명하고 이를 통해 미래 예측을 하기 위한 과학연구가 시급
- [무주지(無主地)인 남극에 대한 선제적 연구] 남극은 극지라는 지리적 입지로 접근이 어렵고 그에 따른 극한환경으로 인간의 활동이 제약되며 남극조약에 따라 개발과 영유권 주장이 제한되는 특수한 지역으로 정치적 개입은 제한되어 있으나 과학적 연구에 대한 국제적 협력은 증대. 따라서 기후변화에 따른 피해 감소를 위한 연구 및 신뢰도가 높은 미래 기후변화 예측 시스템 개발을 선도함으로써 인류의 공통 현안을 해결하고 실질적인 국제 협력 체계 구축을 주도하여 중·장기적으로 남극 거버넌스에서의 발언권과 영향력을 증대할 필요성
- [중장기 추진전략(도약기 '17-'21)] 쇄빙연구선 아라온 및 장보고과학기지 등 대형 인프라를 기반으로 연구 활동 지역과 범위를 확대하고 국제적으로 선도할 수 있는 연구를 착수. 과학연구를 통해 기후변화 등 글로벌 현안 해결에 기여
- [제4차 기본계획 기간 이후(남극활동 주도기)] 주요 연구 분야를 국제 수준으로 끌어올리고 국제 공동연구를 주도. 이러한 연구성과를 바탕으로 남극 거버넌스에서 선도적 역할을 수행



그림 61 우리나라 남극연구 추진 로드맵.

(2) IBS⁵⁰⁾ 기후물리연구단 해빙-해수면 상승 연구

- 2017년 기초과학연구원(IBS) 연구단 가운데 하나인 기후물리 연구단을 부산대에서 유치(2017.1.)
- 지구 기후와 관련된 온실가스, 강우패턴, 탄소 사이클, 빙하, 지역적 해수면 등 지구시스템의 상호관계 및 피드백 작용에 대한 통합 연구를 수행
- 다양한 시간 척도에서 불안정성 및 민감도에 대한 이해를 높이고 고성능 슈퍼컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 기후 체계를 장기적으로 예측하여 전 지구적, 지역적 기후변화, 해수면 상승, 해양 산성화 등이 야기할 위협을 점진적으로 이해하고 대처하는 목적의 연구를 수행
- 전 지구시스템의 모델링 요소 및 다양한 기후변화요소의 상호작용에 초점을 맞춰 연구가 진행 중이지만, 해수면 변동예측에서 불확실성이 가장 높은 빙권 관측 및 지역규모 빙상 모델링 요소 누락

(3) 남극 연구 인프라 확대 및 기술수준 향상

- 남극 장보고과학기지 부근 테라노바만 일대 데이비드 빙하 거동 관련 기초 지구물리탐사연구 수행 (극지연구소, 2011-2013)
- 남극 세종과학기지는 세계기상기구(WMO⁵¹⁾) 정규기상관측소로 지정 및 운영(1988), 지구대기감시 (GAW) 프로그램의 지역급 관측소 등재(2010)
- 세종기지 주변 기후변화에 의한 육상 생태계 생물 다양성 변화 및 생태계 반응 연구 수행 (극지연구소, 2011-2013)

50) Institute for Basic Science

51) World Meteorological Organization

- 천부 빙하 시추기 개발, 몽골 고산빙하 시추, 첨단 빙하연구 분석시스템 도입 등의 빙하연구 인프라구축(극지연구소, 2006-2013)
- 쇄빙선 아라온의 출항에 따라 남극 활동에서의 연구 범위 및 국제공동연구 수요가 비약적으로 증대 (극지연구소, 2009)
- 장보고 과학기지 준공을 계기로 우리나라의 남극 대륙탐사는 새로운 전기 마련하였고 남극 기지 인프라 기반의 거대연구, 융복합 연구들을 발굴(극지연구소, 2014)
- 남극 내륙 탐사를 위한 K-루트 개척 및 빙저호 시추를 목적으로 육상루트 개척 및 탐사 수행 (극지연구소, 2016-현재)
- “장보고기지 주변 빙권변화 진단, 원인규명 및 예측사업”을 수행하며 다학제 융복합 연구를 위한 빅토리아랜드, 테라노바만 주변에 극지 빙권변화 종합관측망 구축 성공(극지연구소, 2014-2019)
- 장보고 기지, 쇄빙선 아라온 등의 인프라와 세계 수준의 연구그룹과의 국제공동연구를 통하여 새로운 미답지에 진출하는 등 관측기반의 첨단 연구 수행이 가능

나. 극지관측, 모델 기술 현황

(1) 개요

- 우리나라는 세계 선도적 인프라인 쇄빙선 아라온 및 장보고 기지를 활용하여 남극 진출 및 다양한 국제 공동 연구 프로젝트를 성공적으로 수행. 이를 바탕으로 극한지 빙권변화 관측망 구축 및 자료처리 기술에 대한 경험을 축적하여 국제 선도 그룹과의 격차 해소 노력. 특히, 관측망 구축 기술을 통한 빙상-빙봉 두께 및 용융량 관측, 빙하 이동 관측기술, 해양환경 물리 모니터링에서 극지연구소, 국내연구진이 세계기술 대비 경쟁력 있는 기술을 보유.
- 그에 반해 무인항공기(UAV⁵²), 무인잠수정(AUV⁵³) 및 열수시추 기술을 활용하여 극지 탐사를 독자적으로 수행하기에는 아직 부족한 실정. 해당 기술은 국제 공동 연구(LIONESS⁵⁴) 등을 통하여 보완하는 동시에 국내연구진(KRISO⁵⁵) 등과 기술 협업, 극지 경험을 통하여 기술 격차를 좁힐 필요성
- 빙권 수치모델링 분야도 선진국 대비 낮은 경쟁력을 보유하고 있어 국외연구기관 협력 강화 및 국내 인력 양성을 통하여 선도 기관과의 격차를 좁히는 방안 강구 필요

(2) 무인 잠수정 기술

- ‘To see the unseen’: 혁신적인 무인탐사기술의 발달로 과거 이미 존재하고 있지만 볼 수 없었던 자연 현상들을 직접 관측할 수 있는 계기가 마련이 되고, 특히 빙봉하부 탐사 무인로봇(AUV⁵⁶), Glider 등) 활용 연구 및 장비개발이 활발히 이루어지고 있으므로 관련 인프라 확보가 시급함

52) Unmanned Aerial Vehicle

53) Autonomous Underwater Vehicle

54) Land-Ice/Ocean Exploration with Semiautonomous Systems: 극지연구소 주도의 6개국 8개 기관이 참여한 다학제 극지 빙권변화 관측을 위한 연구 공동체

55) Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering(선박해양플랜트 연구소)

56) Autonomous Underwater Vehicle(자율 무인 잠수정), 최근 장거리 빙봉 하부 탐사를 위해 대형 장비 개발/활용 추세

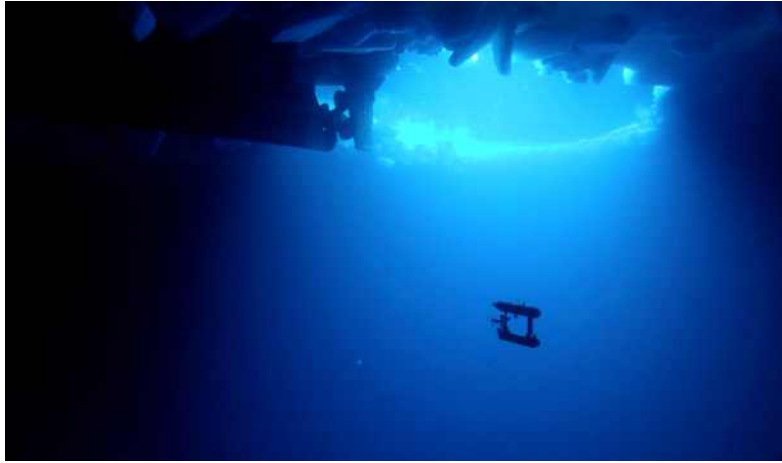


그림 62 얼음하부에 투입하여 해양물리 특성을 관측하고 있는 무인잠수정 (photo courtesy of G. Williams)

- 한국해양과학기술원은 6,000m급 심해 탐사용 무인잠수정 '해미래'를 개발하여 퇴적물 채집, 암석 채취, 생물 채집 등을 통해 해양 미생물, 지질학적 특성 연구에 활용함, 지난 2015년 동해에서 다공질 암석절벽 발견, 퇴적물 시료 채취, 해저 생물 관측 및 채집, 폐어망 회수 등을 수행하였고, 2016년에는 마리아나 해저 화산지 역 및 확장대에서 열수를 찾고 열수분출공 주변 환경을 직접 탐사함, 이외 천해용 자율무인잠수정 '이십이', 다관절 복합이동 해저로봇 크랩스터 'CR200' 등을 개발하여 해양과학탐사에 활용하고 있으나 극 지역 탐사에 활용은 없으며 현재 해당 기술을 개발하기 위한 연구를 진행 중



그림 63 국내 개발 무인 잠수정
(좌) 해미래, (중) 이십이, (우) CR200

- 극지연구소에서는 2016/17 남극 하계 탐사에서 미국의 UC Davis, Univ. of Columbia, Univ. of Delaware, Univ. of New Hampshire, 호주 Univ. of Tasmania, Blue Ocean Monitoring사와 협력하여 남극 로스해에서 Slocum 글라이더(UCD-636)와 AUV(UBC-Gavia) 탐사를 수행함. 글라이더는 8일간 투입되어 수온, 염도 등을 측정한 뒤 회수되었고 Gavia는 극지역 빙봉 하부탐사에 테스트 된 적이 없기 때문에 보다 안전한 탐사를 위하여 줄에 묶어 조디악 보트로 보조하면서 탐사를 수행하여 난센빙봉 하부의 구조 관측에 성공함 (극지연구소 2017, 105-118)

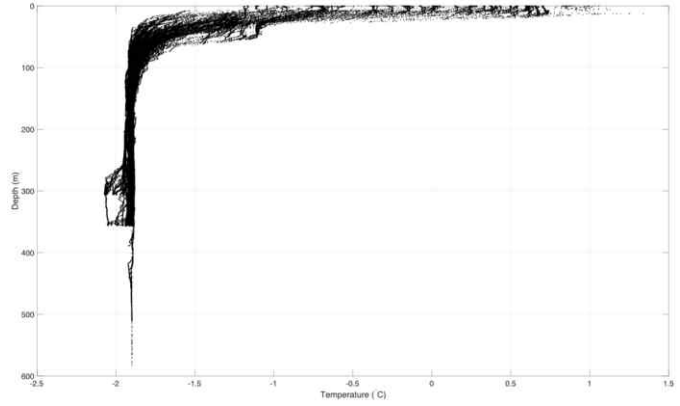
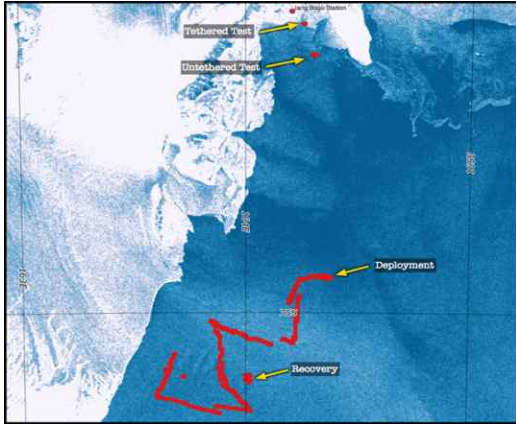


그림 64 (좌) 글라이더 테스트 지점과 항적도 (우) 글라이더가 측정한 온도 프로파일



그림 65 16/17 하계 탐사에서 해수면 상태와 해저에서의 촬영한 AUV와 해빙 조각

극지연구소

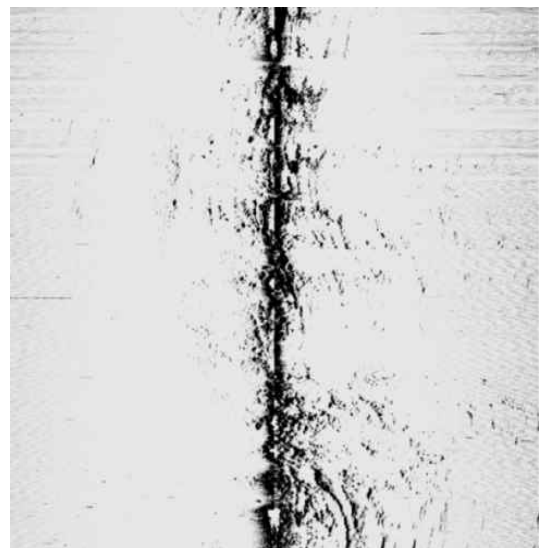
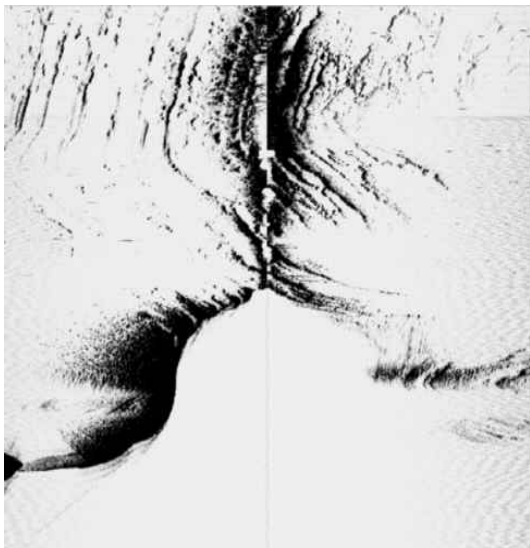


그림 66 AUV탐사를 통해 획득한 난센 빙붕 하부의 SSS 이미지. (좌) 난센 빙붕 진입 시작지점과 (우) 안쪽에서의 하부 이미지

(3) 국내 탐사기술 수준 현황

- 남극 관측기반의 해수면 변동 예측 기술 개발을 위하여 빙권-지각-해양을 포함하는 다학제적인 통합 관측망 기술이 요구됨. 극지연구소를 비롯한 국내연구진의 경우 육상 통합 모니터링망 구축 기술에 세계적인 수준에 근접해 있음

- 해양 관측기술 및 항공, 육상물리탐사와 관련하여 자체적, 혹은 외국기관과 협력하여 기술활용이 가능. 하지만, 현재 극지역 무인잠수정 운용기술, 빙권지역 열수시추기술, AMIGOS II와 같은 통합 관측시스템 운영과 관련하여서는 국제 협력을 통해서 기술 활용이 가능한 수준

표 3 탐사기술 현황

탐사기술	사진	필요 지역	필요성	국내 기술 보유	주요 기술 보유 기관
무인잠수정(AUV)		빙봉	빙봉 하부 정밀 매핑 빙봉 하부 해양 물리 특성 규명	△	UC Davis Univ. of Tasmania KRISO
열수시추 기술		빙상/ 빙봉	열수시추기술로 빙하에 직접 구멍을 뚫어 하부 시료 채취 및 계류 장비 설치 가능	×	NSIDC, Polar66
GPS 반사파		빙상/ 빙봉	빙하고도, 적설량 측정, 눈 토양 수분함량 측정, 해수면 높이 측정	○	Geolux
계류장비 (Mooring) 설치		해양	해양계류관측을 통한 수온, 염분, 유속의 전층 구조 파악 및 열수송 기작 규명을 위한 장기 시계열 관측	○	극지연 서울대 LDEO NIWA
CTD/ LADCP		해양	CTD 관측 다양한 변수를 관측할수 있도록 센서 세팅, 수온, 염분, 용존산소, 탁도, 광합성량, LADCP 관측으로 유속 profile 획득	○	극지연
XCTD/U CTD		해양	빙봉 근해에서 상층 수온 염분을 조밀한 공간 간격으로 관측하여	○	극지연 서울대 해양연

			빙봉수와 스웨이트 해역 수괴들 간의 상호작용 관측		
ApRES		빙봉	정밀 시계열 빙봉 용융 기작 및 용융량 규명	△	극지연 BAS
GPS		빙상/ 빙봉	PGR 관측, 빙하거동 변화 관측 및 빙저수문 시계열 변동성 연구	○	극지연 KIGAM
퇴적물 코어링 기술		해양	고기후 복원 자료를 통한 빙상-해수면 모델 검증	○	극지연
자기지전류 탐사 기술		빙상	극지 환경에서 지하구조 및 수문 구조 환경 자료 획득	○	Geolux
항공지구 물리탐사		빙상/ 빙봉	항공 레이다, 중력 탐사를 통한 빙하두께 정밀 매핑, 빙저 해저면 지형, 빙저 수문 구조 해석	△	UTIG
지진계		빙상	빙진원 규명 및 빙하 하부 지열류량 추정	○	극지연 PASSCAL
해저면 지진계		해양	해양 빙권 신호 기원 추적 및 빙봉 안정성 평가	○	극지연 AWI
OBP		해양	해수면 상승, 하강 실측 자료 및 지각 반등 연구	△	NOAA
AMIGOS II		빙봉	열수시추공에 설치하여 기상-빙권-해양 통합 관측 자료 획득	○	NSIDC
수중음향 관측		해양	빙권 거동 발생 신호 감지, 수온 해류 등 해양 요소와의 상관관계 규명	△	NOAA

(4) 국내 빙상모델링 기술 현황

- 국내에서는 빙상동역학 모델링 개발 연구 및 빙상동역학 모델을 이용하여 수행된 빙상용융에 따른 해수면 변동 예측연구는 수행되지 않았음
- 빙상 붕괴로 인한 해수면 상승 및 전 지구에 미치는 영향의 정량적 예측·전망은 매우 중요한 주제임에도 불구하고 극지역 관측자료 부족으로 인하여 복잡한 빙상역학 및 관련된 물리 기작에 대한 이해가 부족하고, 빙상동역학 모델과 지구시스템 모델 개발활동 간 교류가 활발하지 않았으며 그리고 대기·해양 강제력과 빙하·빙상의 상호작용에 대한 불확실성이 크기 때문에 빙상동역학 모델링의 기술 수준은 뒤쳐져 있음. 특히 해양빙상에서 주요한 지반선 움직임·흐름, 빙붕 분리(calving), 수압파쇄(hydrofracturing), 빙벽 불안정(ice cliff instability), 기저마찰(basal friction), 빙저수(subglacial water) 등 복잡한 물리 과정을 현실적으로 구현하기 위한 빙상동역학 모델의 개선 필요
- 국내에서는 극지 빙상 및 해수면 변동 예측기술 개발 인력 부족으로 독자적인 예측 모델 개발이 불가능하며, 빙상동역학 모델 또는 기후모델-빙상동역학 접합모델을 이용하여 수행된 빙상용융에 따른 해수면 변동 예측연구는 전무함. 따라서 미래 해수면 상승 예측 불확실성 저감을 위하여 과거 빙상의 급격한 크기 및 속도 변화를 재현하고 미래 변화를 예측할 수 있도록 빙상동역학 모델을 개선하고, 선진 모델링 그룹과의 상호 교류를 통하여 기술 격차를 줄일 필요성이 있음

다. 본 과제 기반 주요 연구개발 현황

- 본 과제의 수행(극지 및 대양과학 연구사업(장보고 과학기지 기반) 대표 연구 성과 [2017년 KIMST 우수연구사업 선정])으로 국내 빙권탐사기술 및 연구 수준이 한 단계 상승 도약
- 2014년 남극 장보고기지 건축과 더불어 주변 지역 빙권 변동 원인 규명 및 예측 목적으로 다학제 종합 관측망 구축을 통한 연구가 국내 최초로 수행
- 본 사업을 통하여 남극 관측기반의 빙권 거동 기작 규명 및 해수면 상승 연구의 기초적 토대를 마련하였으며 세계 선도 기관과의 공동연구 체계 구축 및 세계 수준과의 연구격차를 좁히는데 기여

(1) 장보고기지 기반 다학제 입체적 빙권 감시 관측망 구축

- 장보고기지 및 아라온 인프라를 바탕으로 매년 남극 탐사자료 회수 및 연중 데이터 획득이 가능해져 종합 빙권 모니터링 자료 획득이 가능
- 연간 자료를 육상 지진계, AMIGOS, 해양계류장비, GPS 장비, 해저면 지진계, CTD관측 등 자료를 종합적으로 획득

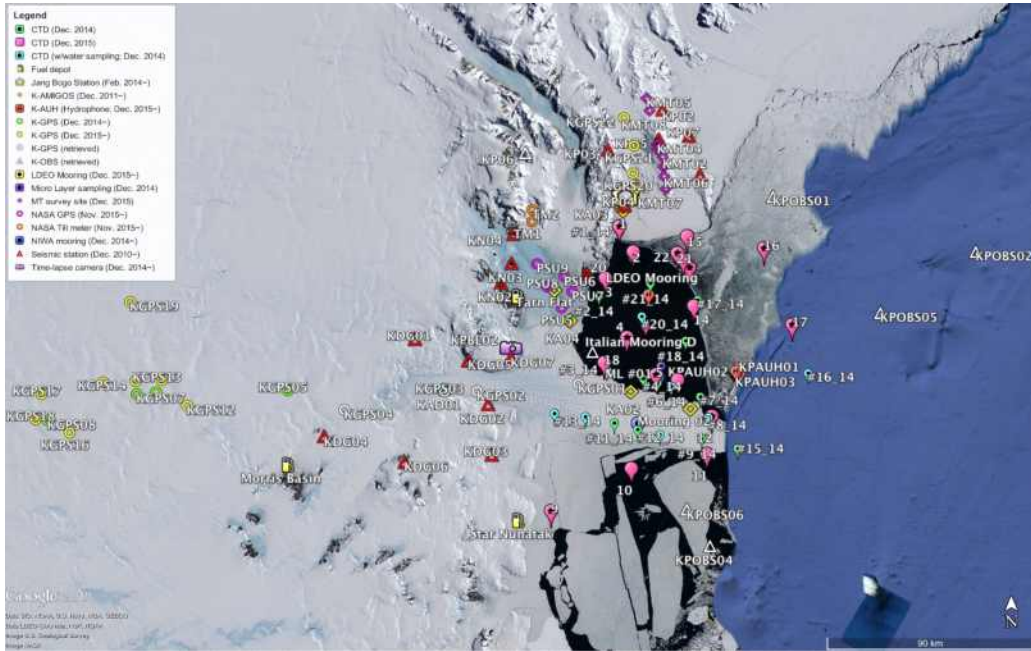


그림 67 남극 장보고기지 기반 다학제 입체적 빙권 감시망 구축 사례

(2) 인공위성 원격 탐사를 통한 빙권 거동 규명

- 인공위성 원격 탐사를 활용하여 빙상-암반 경계에서의 경계기작 원리 및 수문진화 양상을 해석하여 해수면 상승을 막는 빙하의 특성을 규명

해수면 상승 운동으로 막는 남극 '캠 빙하'의 비밀 풀었다

2017년 01월 13일 19:20



그림 68 해수면 상승을 막는 캠 빙하의 비밀 규명

- 이를 통하여 해수면 상승 관점에서 남극 전체의 빙하 움직임을 예측함과 동시에 빙상 안정도 변화 연구의 중요성에 대한 근거를 제시하였음

(3) 장기해양계류를 통한 장보고 기지 부근 연안류 특성 규명

- 장보고기지 연안 장기 해양계류 자료를 통해서 부근 연안류 특성을 규명하여 수괴를 분류
- 이러한 수괴의 해석은 빙봉 하부 용융에 대한 직접적인 근거를 제시해주므로 해수면 변동 연구시 빙봉의 지지역할을 약화시키는 빙봉 하부 용융량 산정과 직접적으로 연관

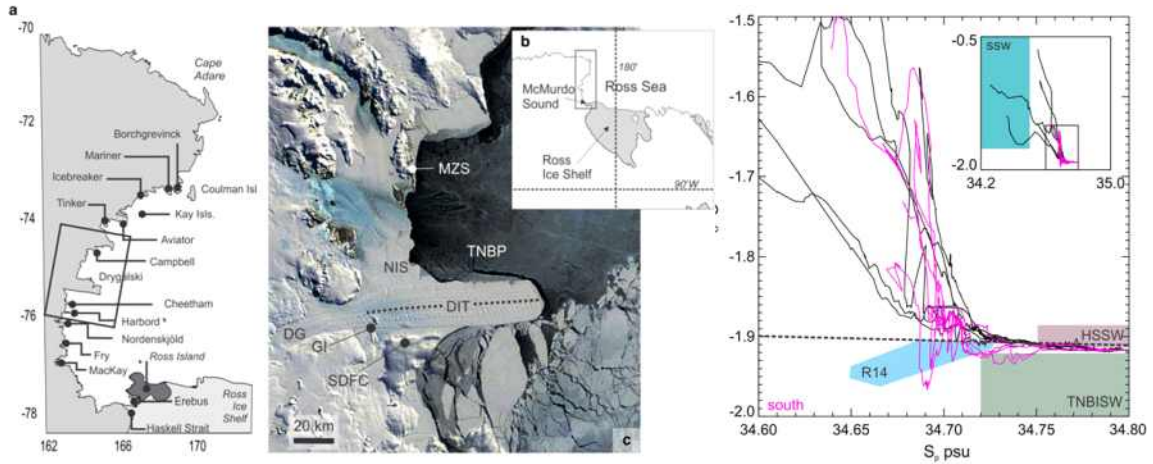
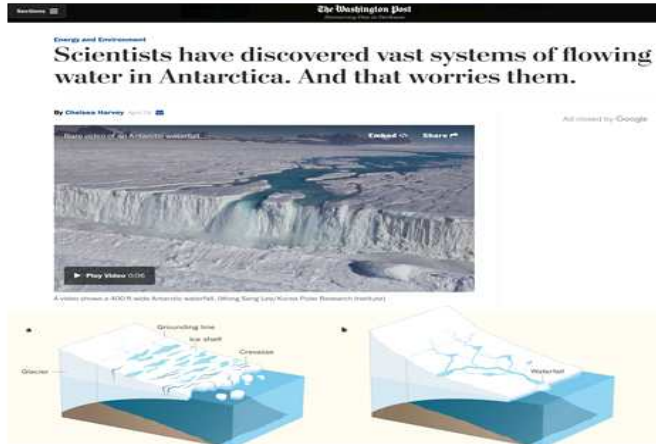


그림 69 장기 해양 계류 자료 분석을 통한 연안류 특성 규명

(4) 새로운 빙봉 변동 기작 발견을 통한 기존 해수면 변동 예측 결과 수정 제안

- 빙봉 상부의 용융, 물 웅덩이(melt pond)의 형성 및 물이 빠지는 기작이 빙봉 안정화에 기여하는 관점 및 빙봉의 불안정화에 기여하는 관점에 대해서 해석하여 난센 빙봉 안정도 및 불안정도를 유발하는 원인 규명
- 관측기반으로 새로운 빙봉 붕괴 원인을 발견함으로써 미래 해수면 상승 예측 모델의 재검토 필요성을 강력히 제기함
- 본 연구는 장보고기지 기반의 인프라 활용 현장 관측 자료를 해석함으로써 새로운 빙봉 붕괴의 물리기작을 발견한 사례임



Nature 논문 게재, 세계적 주목을 받음 [2017년]



Science Advances 게재승인, 빙붕붕괴기작 규명 [2018]

그림 70 남센 빙붕 관측 자료 해석을 통한 빙붕 안정도 및 불안정도의 원인 규명

극지연구소

(5) 빙권관측분야 국제 공동연구기반구축

(가) LIONESS 협력연구

- 장보고기지 일대 및 향후 스웨이트스 빙하 연구 대상 지역으로 국제공동연구 상호협력 체계 구성

- 남극 탐사는 하나의 학제, 하나의 기관으로 이루어지기에는 자원 및 기술적 한계가 존재하여 국제 협력 연구는 선택이 아닌 필수적임. LIONESS 플랫폼 기반은 극지연구소 주도로 5개국 8개 기관의 협력을 바탕으로 추진된 지역규모 빙권변화 감시 모니터링 시스템 구축 및 연구 협력 체계로 향후 어느 빙하 지역이던지 적용되어 공동연구를 수행할 수 있음



Land-Ice/Ocean Network Exploration using Semiautonomous Systems

그림 71 관측 요소별 국제 공동 자료 획득을 위한 LIONESS 협력 체계 구축

- LIONESS 공동협력 체계를 바탕으로 다학제 빙권 관측이 성공적으로 가능해졌으며, 이와 더불어 향후 ITGC와의 협력 연구 활동은 남극 대륙연구 관련 극지연구 선진국과의 기술격차를 해소하고 나아가 극지 빙상변화 관측분야를 선도할 수 있는 연구 역량 극대화 기대할 수 있게 되었음

제3장. 연구 수행 내용 및 성과

1. 서문

본 사업은 남극 빅토리아랜드 장보고기지 주변 빙권의 변화 진단, 원인 규명 및 거동 예측을 최종목표로 장보고 기지 주변 다학제 관측망을 구축하고 육,해상 탐사를 통해 빙권 관측을 수행하여 장보고기지 주변 빙권 변화의 원인과 물리기작을 규명하고 이를 바탕으로 보다 상승된 정확도의 빙권변화 예측결과를 도출하였다.

2. 빙권 변화 다학제 관측

가. 육상 다학제 관측망 운영 및 탐사

(1) 2014/2015 남극 현장탐사

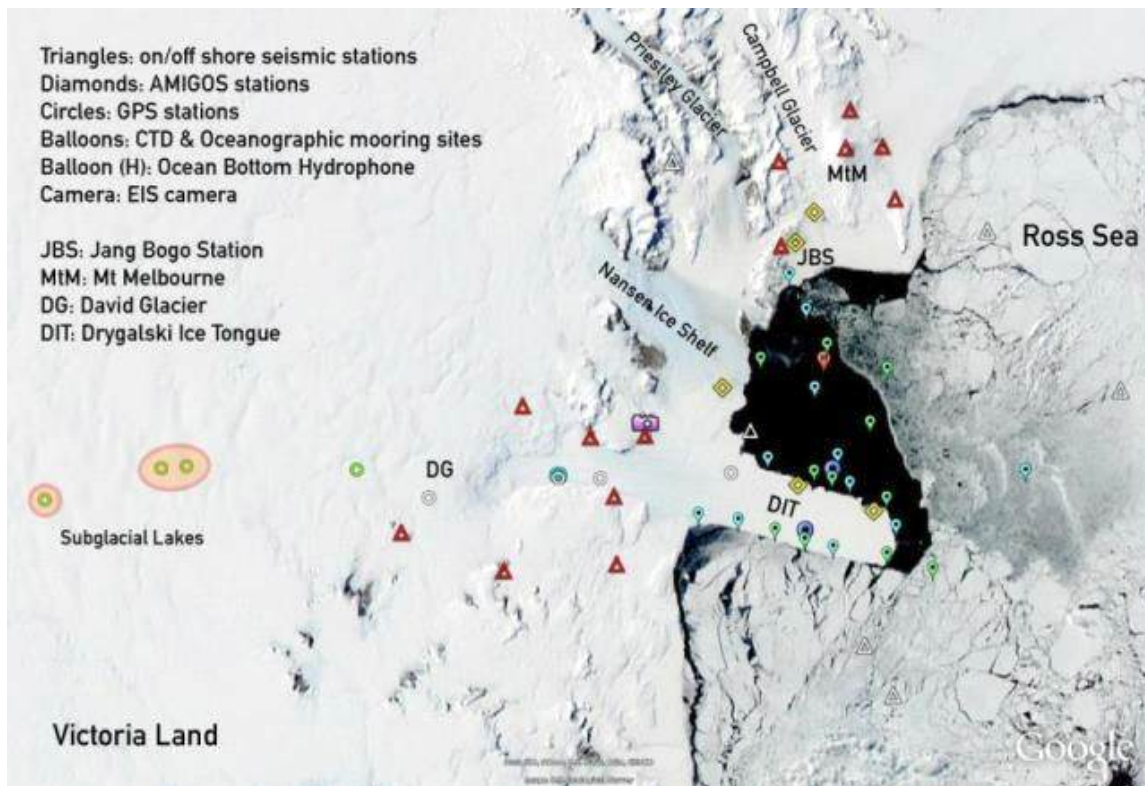


그림 72 남극 빅토리아랜드에 시범 설치 운영 중인 극지 종합관측시스템(EGGNet).

(가) 연구활동 내용 요약

장보고기지 주변 멜번 화산(5개 지진관측소 100% 자료회수) 및 데이비드 빙하 부근(7개 지진관측소 100% 자료회수)에 지구물리 관측 장비 유지/보수(AMIGOS 관측소 3개소 100% 자료회수) 및 신규 관측소 설치(1개 지진관측소, GPS 4개 관측소, ADIOS 1개 관측소 및 AMIGOS 2개소)

(나) 현장탐사 일정

2014년 12월 10일 ~ 2015년 1월 3일

(다) 현장참여 연구인력

성명	분야	소속	활동내용	비고
이원상	지구물리	극지연구소 지구시스템연구부	드라이갈스키 주변 물리해양 탐사, 관측망 유지 보수	
박용철	지구물리	극지연구소 지구시스템연구부	장보고기지 주변 지구물리 관측망 유지 보수 및 신규 설치	
이춘기	지구물리	극지연구소 지구시스템연구부	장보고기지 주변 지구물리 관측망 유지 보수 및 신규 설치	
황정연	해양미생물	극지연구소 극지생명과학연구부	드라이갈스키 주변 물리해양 탐사, 관측망 유지 보수, 미생물 샘플링	
윤숙영	지구물리	극지연구소 지구시스템연구부	드라이갈스키 주변 물리해양 탐사, 관측망 유지 보수	
김진석	지구물리/ 극지안전	극지연구소 지구시스템연구부	장보고기지 주변 지구물리 관측망 유지 보수 및 신규 설치	
Brett Grant	해양물리	NIWA	드라이갈스키 주변 물리해양 계류장비 신규설치	New Zealand
Michelle Fournet	해양생물	NOAA/OSU	테라노바만 수중음향관측장비 회수	USA
Cameron Edwards	해양물리	U. of Tasmania	드라이갈스키 주변 물리해양 탐사	Australia
Jurgen Gossler	해양지구물리	KUM	테라노바만 해저면지진계 회수	Germany

(라) 남극현장탐사 관측망 구축

① 관측망 및 장비 특이사항

㉞ 무인지진관측 시스템

- 장보고기지가 위치하는 서남극 지역은 극한의 자연환경으로 인해 지구상에서 가장 과학탐사가 용이하지 않은 지역 중 하나
- 남/북극과 같은 극한-오지에서의 과학탐사를 위해서는 탐사장비 및 탐사대의 투입 및 철수 경로개척, 혹한의 환경에서 견딜 수 있는 탐사장비의 개발, 장비의 유지관리 및 운영 등 극지역에 특화된(Polar-rated) 장비관련 기술과 연구 노하우가 요구
- 특히 극한의 관측환경에서도 안정된 관측자료를 도출하기 위해서는 극한 환경에 특화된 관측장비 및 부대시스템의 사용은 필수적
- 지진관측 장비의 경우 2000년대 중반 이후 미국 NSF⁵⁷⁾의 지원을 받은 IRIS⁵⁸⁾/PASSCAL⁵⁹⁾의 주도 하에 본격적으로 극한환경(극저온, 강풍대 및 고지대)에 특화된 탐사장비의 개발 및 검증, 관측장비 운영기술에 관련된 연구과제를 수행하며 극지역 탐사기술을 개발
- 미국의 IRIS/PASSCAL에서 개발/검증된 극지역 지진관측장비 및 운영기술은 현재 전세

57) National Science Foundation

58) Incorporated Research Institutions for Seismology

59) Program for Array Seismic Studies of the Continental Lithosphere

계적으로 극지역 지진관측기술의 표준으로 사용

- 현재 남극 빅토리아랜드에 시험적으로 설치/운영 중인 무인지진관측 네트워크는 IRIS/PASSCAL로부터 기술지원을 받아 데이비드빙하(David Glacier) 및 장보고기지 부근 벨번 화산 일대 지진관측망의 설계/구축 작업을 수행

㉞ 극지역 지진장비 설계기준

일반적으로 지진관측장비는 아래와 같은 시스템 수행성능(System performance)을 보유하여야 한다(ANSS, 2007).

- 단주기 P파를 포함한 실체파 및 장주기 표면파(surface wave)의 정확한 관측성능
- 모든 지진규모에 걸쳐 지진시그널 균일 스케일링(on-scale) 성능
- 모든 지진자료 샘플 포인트에 대한 정확한 절대시간 동기화 성능
- 지진시스템 및 통신장비의 오작동 시 최소한의 자료손실 성능
- 외부 및 내부 잡음의 최소화 성능
- 실시간 자료분석을 위한 최적의 자료전송성능
- 외부 관측환경의 변화에 민감하지 않은 안정적인 관측성능

㉟ 관측 장비

㉠ 지진계 센서

지진계 센서는 외부환경의 변화와 관계없이 요구된 주파수 영역(일반적 0.01 ~ 50Hz)에서 왜곡없는 일관된 계기응답을 보여주어야 함. 또한 극저온에서도 최소한의 전력소비 성능도 극한지역에서 필수적으로 요구되는 성능. IRIS/PASSCAL은 극저온 환경 테스트를 실시한 후 극지역 탐사에 활용

㉡ Nanometrics Trillium 240 센서

주기 약 240초에서 200Hz 구간에서 안정된 계기응답을 보이는 3성분 광대역 지진계(그림 73). 주변잡음이 낮은 지역에서의 전력소모량은 약 650mW이며, $\pm 1\text{deg}$ 센서기울기 안정도를 보임. Trillium 240 모델을 데이비드 빙하 지진관측망에 7기, 장보고 관측망에 1기(KP05)를 설치하여 지진관측에 활용.

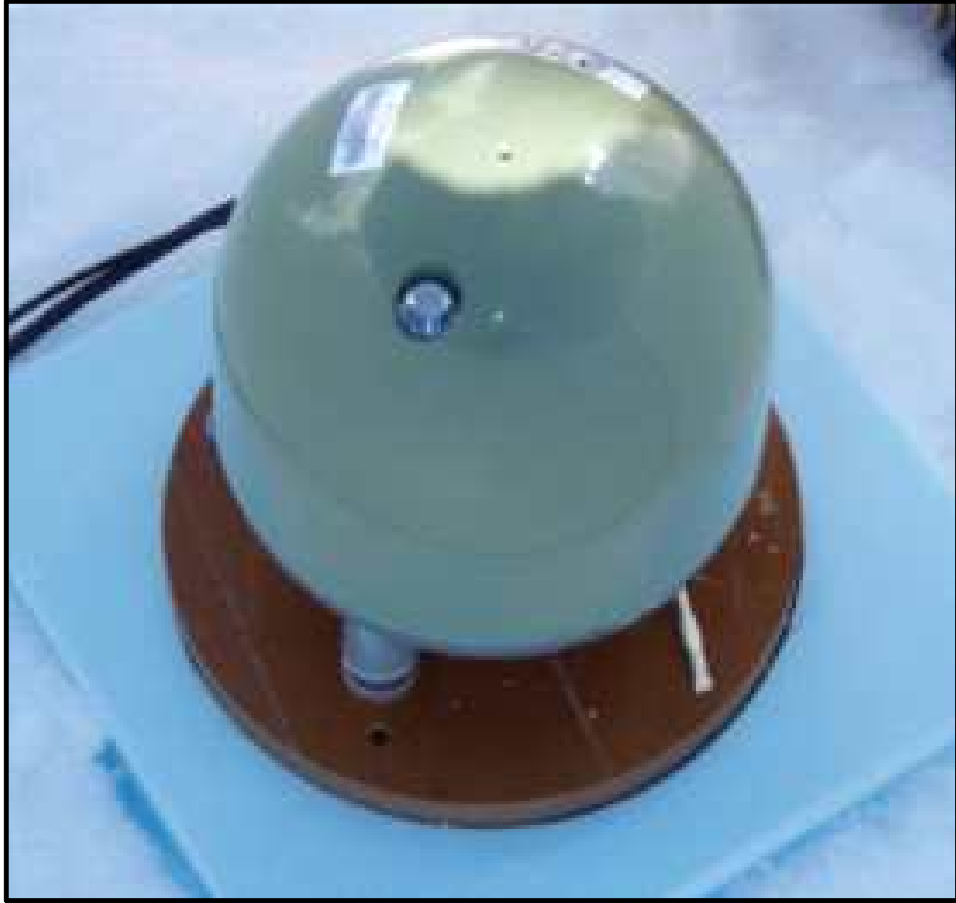


그림 73 극지역에서 안정적으로 운용되고 있는 Nanometrics 사의 T240 초광대역 지진계 센서.

극지연구소

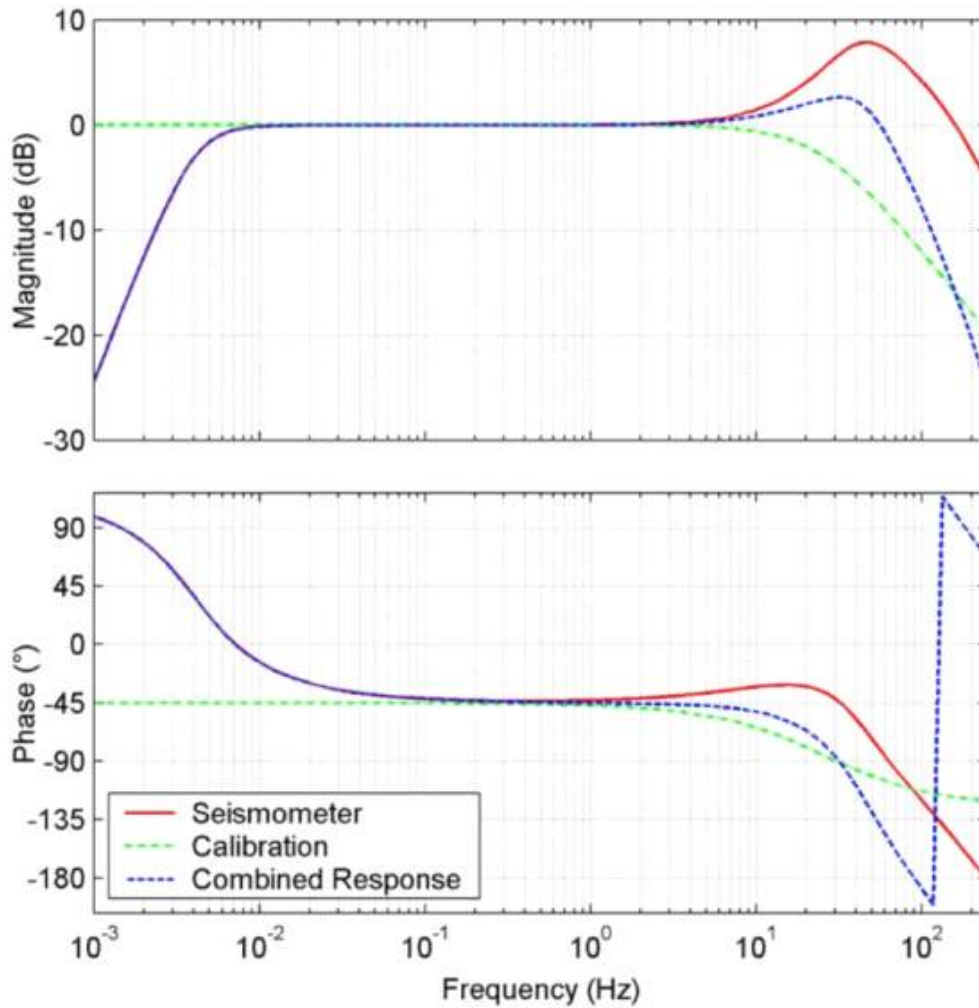


그림 74 T240 지진계 센서 주파수 응답 스펙트럼. 240초 ~ 200Hz 대역에서 안정적인 관측이 가능함을 알 수 있다.

Ⓢ Nanometrics Trillium Compact 120s 센서

Nanometrics Trillium Compact 120s 센서(그림 74)는 주기 약 120 초에서 100 Hz 사이의 구간에서 안정적인 계기응답을 보이는 3 성분 준 광대역 지진계(그림 74). 전력소비량은 약 160mW이고, 최적성능 온도구간은 -40℃ ~ +60℃. 장보고기지 지진관측망에 5기(KP01, 02, 03, 04, 07)를 설치하여 지진관측에 활용.



그림 75 휴대성이 뛰어나고 고주파 빙진 및 120초 주기의 신호까지 안정적으로 관측할 수 있는 Nanometrics 사의 Trillium Compact 광대역 지진관측 센서.

극지연구소

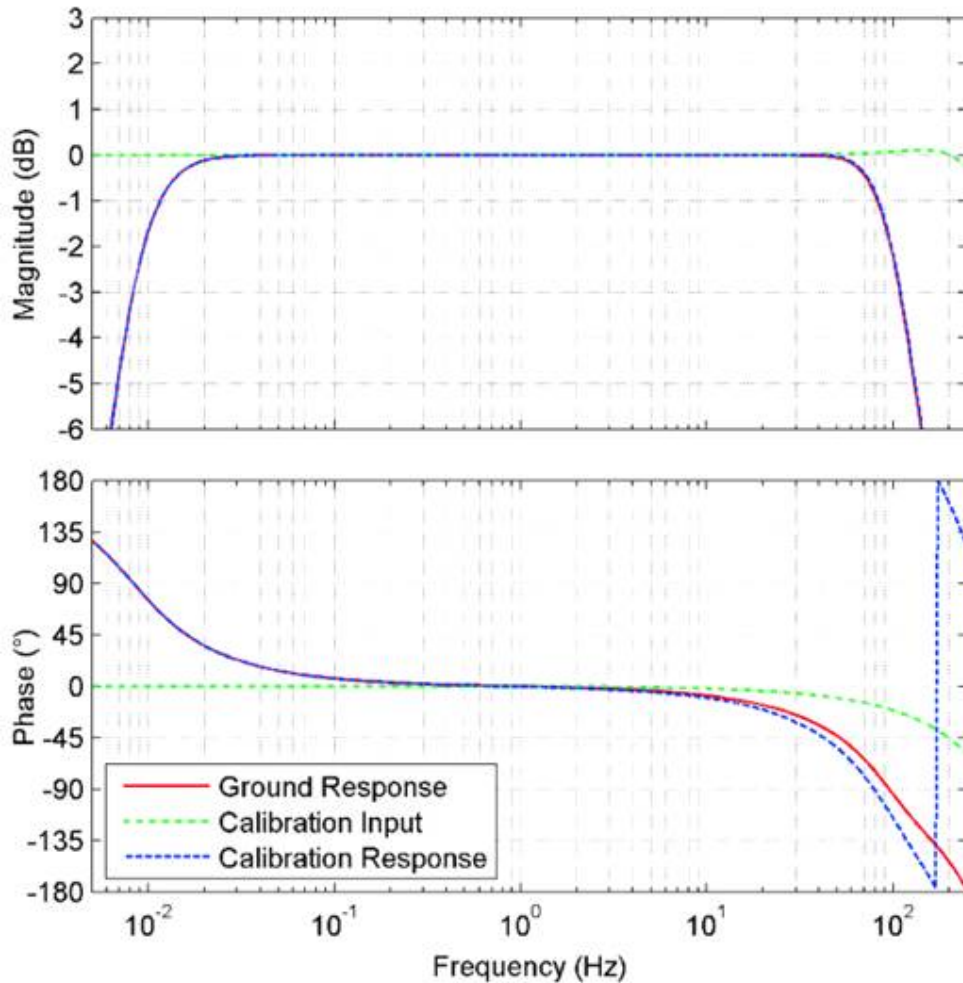


그림 76 120초까지의 신호를 안정적으로 모니터링할 수 있는 성능을 가진 준 광대역 지진계 센서(T-Compact) 주파수 응답 그래프.

㉠ 디지털 지진기록계 시스템

- Quanterra Q330 digitizer

IRIS/PASSCAL 극지연구 그룹은 극저온에서도 안정적인 자료획득 성능을 보여주는 Q330 기록계(그림 77)를 모든 지진관측에 사용. Q330 시스템은 24bit, 3채널 혹은 6채널의 디지털 기록계로 극저온(약 -40℃)에서도 안정적일 뿐만 아니라 전력소비량이 낮아(약 60mW) 중장기 지진탐사용으로 아주 적합. 본 연구에서는 데이비드 빙하 지진관측망에 7기(KDG01, 02, 03, 04, 05, 06, 07), 장보고기지 관측망에 1기(KP05)를 설치하여 지진자료 획득용으로 활용.

- Nanometrics Taurus digitizer

Taurus digitizer(그림 78)는 24bit 고해상도 3채널 디지털 기록계로 극저온(최적온도 약 -40℃ ~ +60℃)에서도 안정적으로 지진자료를 획득할 수 있으며, 전력소비량이 약 75mW 정도로 낮고 휴대가 용이하여 최근 극지역의 중장기 및 대규모 단기 지진탐사에 활용되고 있음. Taurus 시스템을 장보고기지 관측망에 2기(KP 02, 04) 설치하여 지진자료 획득용으로 활용.

- Nanometrics Centaur digitizer

Centaur digitizer(그림 79)는 24bit 고해상도 6채널 디지털 기록계로 극저온(최적온도 약 $-40^{\circ}\text{C} \sim +70^{\circ}\text{C}$)에서도 안정적으로 지진자료를 획득할 수 있는 장비. 이 장비는 Taurus 디지털의 개량된 버전으로 출시되었으며, 디지털이징 간격이 1초에 최대 5,000회(5KHz)가 가능하여 지진관측 뿐만 아니라, 지열류관측 등 다른 지구물리 관측에도 사용이 가능. 전력소비가 약 1W 정도로 Taurus 보다 높으편이나 휴대용 관측기기에 적합한 수준이기 때문에 단기 및 중장기 지진탐사에 활용이 가능. Centaur 시스템을 장보고기지 지진관측망에 3기(KP 01, 03, 07)를 설치하여 지진자료 획득용으로 활용.



그림 77. Quanterra Q330 24 bit Digitizer.



그림 78 Nanometrics Taurus 24 bit Digitizer.



그림 79 Nanometrics Centaur 24 bit Digitizer.

㉔ 전력공급 시스템

IRIS/PASSCAL은 수 년에 걸친 탐사경험을 통해 극지역에 최적화된 전력공급 시스템을 개발하여 극한지역에서의 안정적인 지진계시스템 운영에 활용. IRIS/PASSCAL 전력공급시스템은 충전용 배터리(rechargeable batteries), 보조용 배터리(primary batteries), 태양패널시스템(solar panel system) 및 전력관리모듈박스(power management module box) 등 총 4가지 장비의 조합으로 구성.

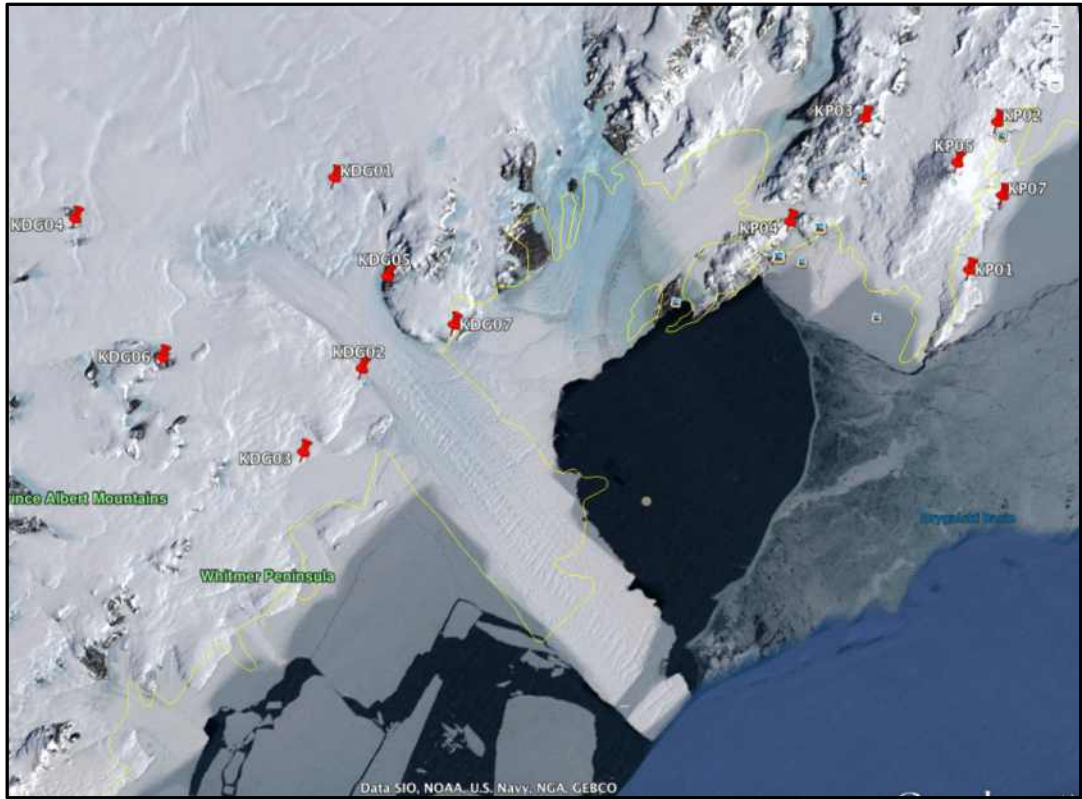


그림 80 데이비드 빙하 지진관측망과 멜번 화산 지진관측망 위치도



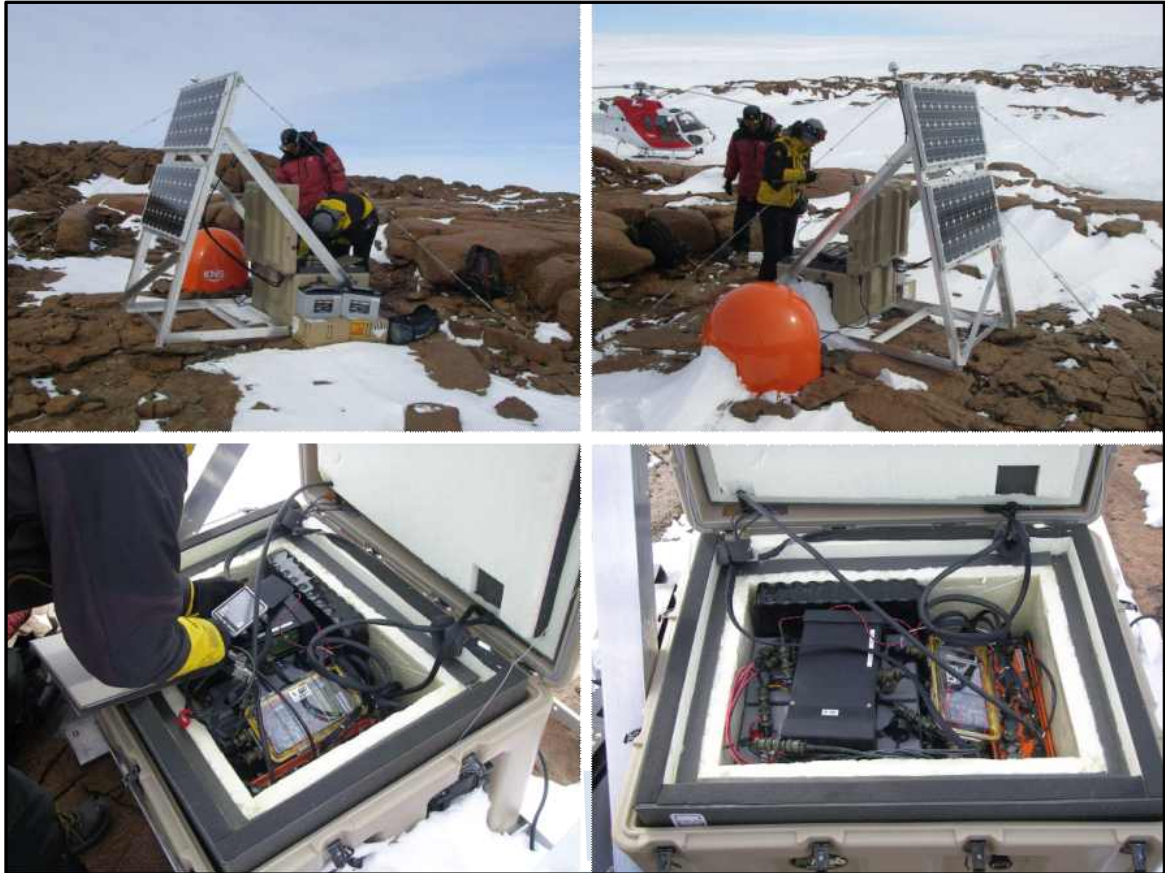


그림 81 데이비드 빙하 관측망 KDG01 관측소 전경.

극지연구소

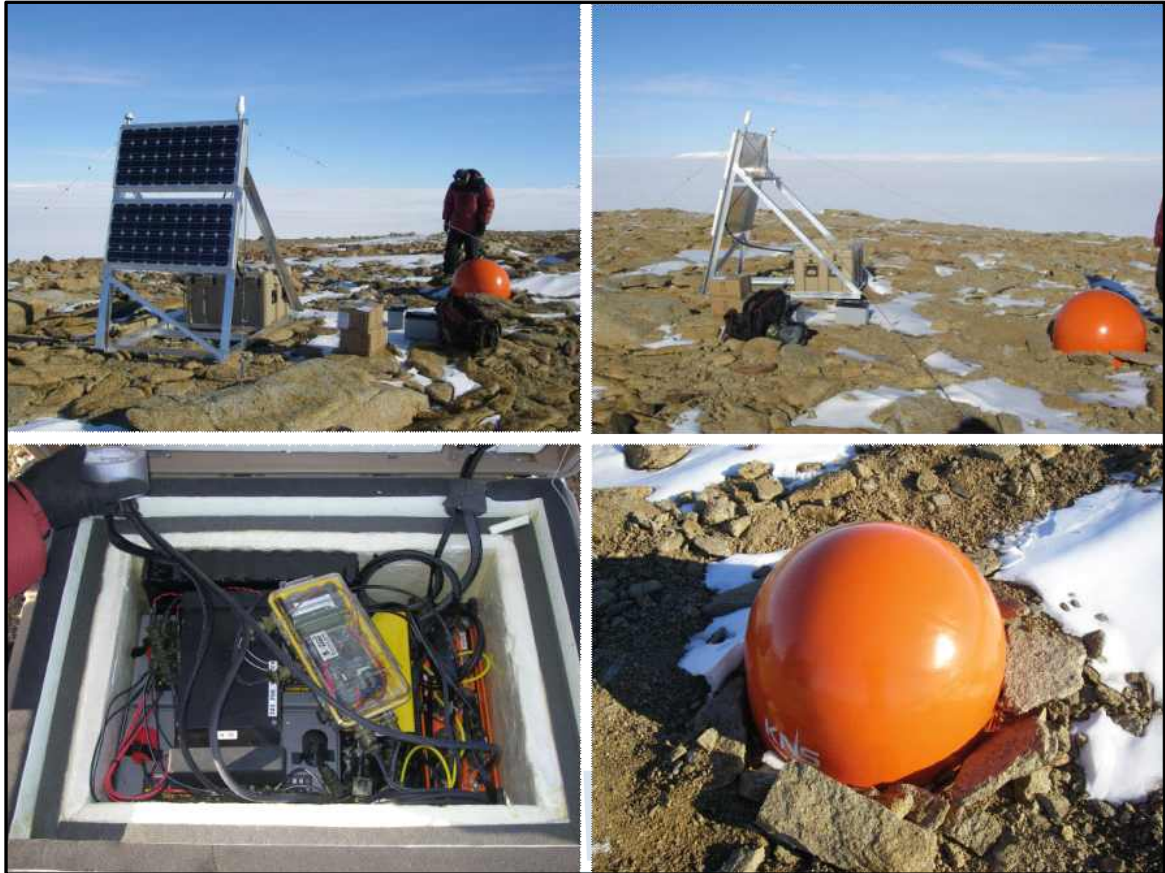


그림 82 데이비드 빙하 관측망 KDG02 관측소 전경.

극지연구소

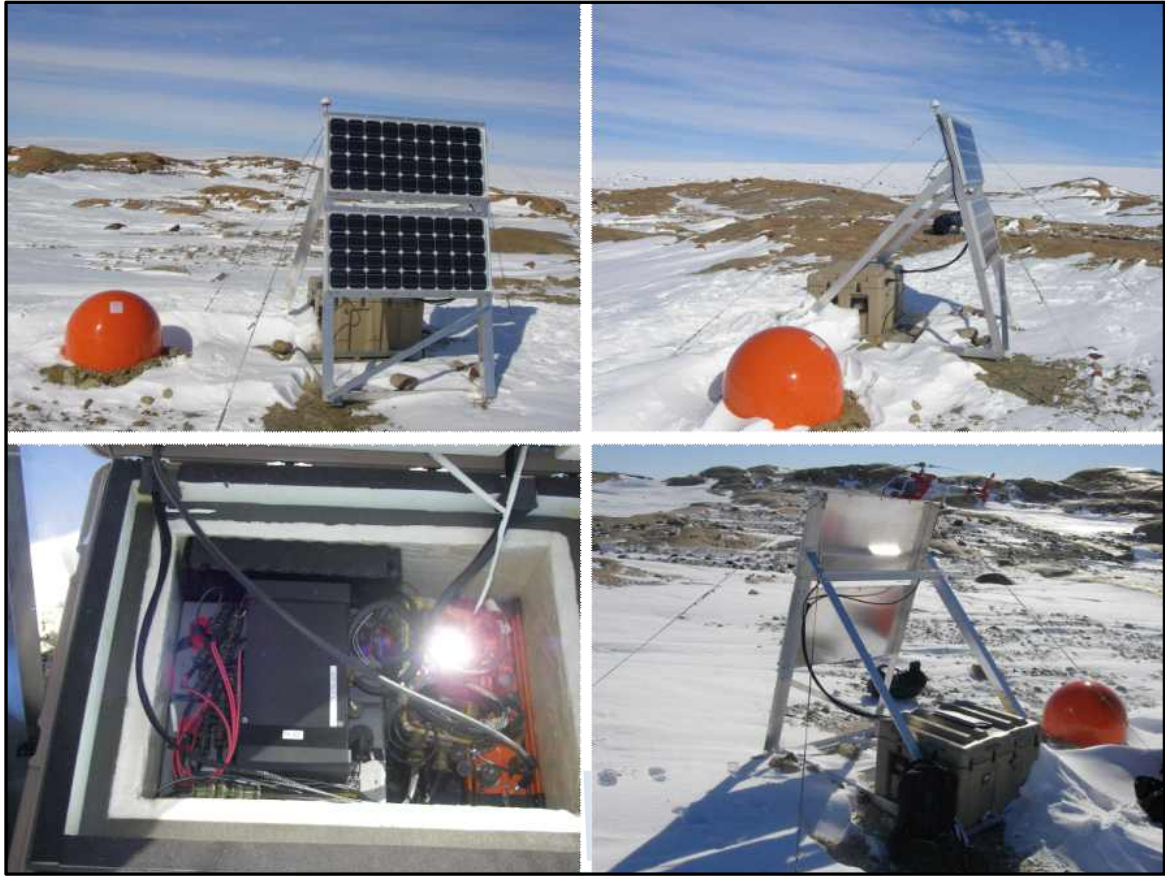


그림 83 데이비드 빙하 관측망 KDG03 관측소 전경.

극지연구소



그림 84 데이비드 빙하 관측망 KDG04 관측소 전경.

극지연구소



그림 85 데이비드 빙하 관측망 KDG05 관측소 전경.

극지연구소



그림 86 데이비드 빙하 관측망 KDG06 관측소 전경.

극지연구소



그림 87 데이비드 빙하 관측망 KDG07 관측소 전경.

극지연구소



그림 88 멜번 화산 관측망 KP01 관측소 전경.

극지연구소



그림 89 멜번 화산 관측망 KP02 관측소 전경.

극지연구소



그림 90 멜번 화산 관측망 KP03 관측소 전경.

극지연구소



그림 91 멜번 화산 관측망 KP04 관측소 전경.

극지연구소



그림 92 멜번 화산 관측망 KP05 관측소 전경.

극지연구소



그림 93 신규 설치된 멜번 화산 관측망 KP07 관측소 전경.

극지연구소

⑥ 측지 시스템

- 빙붕의 이동 속도 및 두께 변화는 빙붕 자체의 동역학적 구조와 대륙 내 빙하와의 상호작용을 이해하는데 필수: 빙붕으로 흘러드는 빙하의 동역학적 변화 혹은 빙붕 내부의 하부용융(Basal melt)과 응력 및 질량 균형 등에 대한 핵심적인 증거를 제공
- 남극 대부분의 얼음은 빙하에 의해 바다로 배출되며, 남극 해안선의 약 13%를 차지하는 빙하가 약 90%의 얼음을 바다로 배출하는 역할을 한다(Morgan *et al.*, 1982)
- 이 연구에서는 데이비드 빙하와 드라이갈스키 빙설 지역의 빙하 이동 속도를 육상과 원격 탐사 방법으로 관측하여 속도 및 두께 변화를 살펴보고 대기-해양-빙권의 상호작용을 규명하고자 함

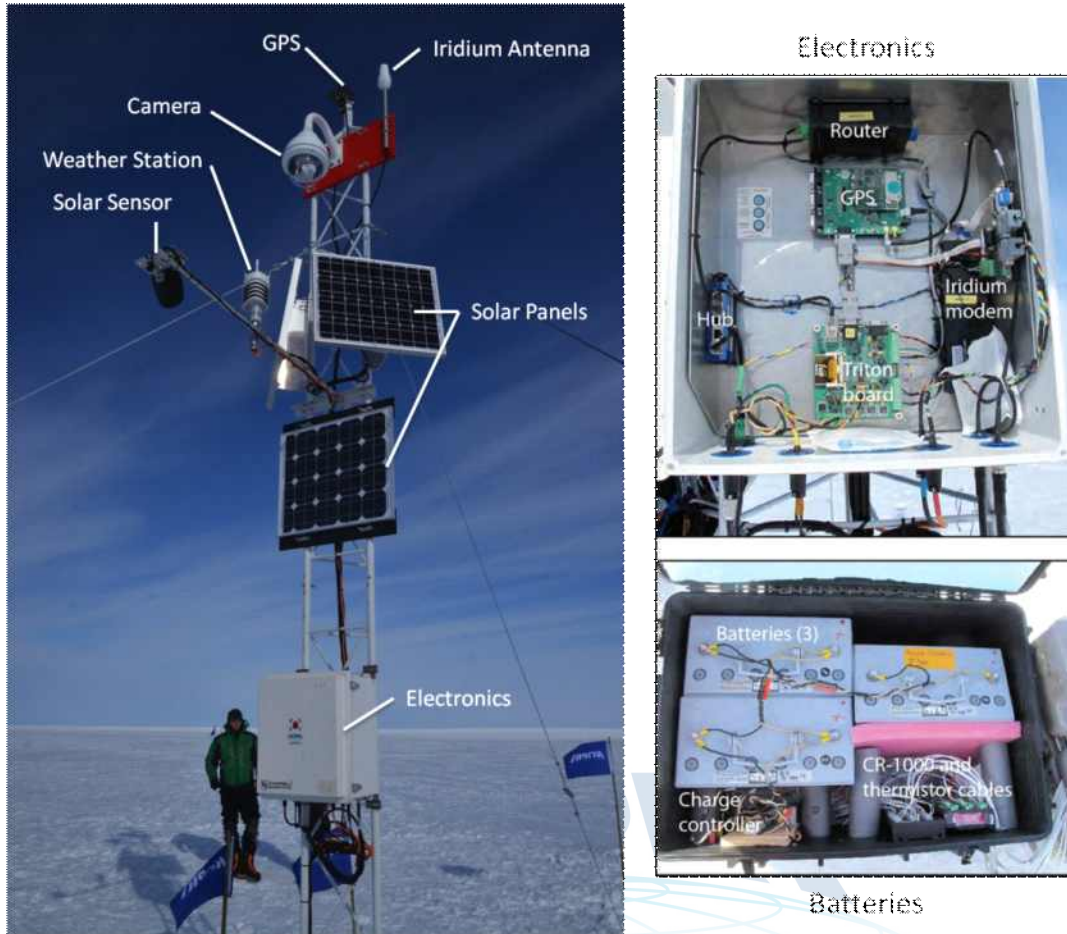


그림 94 AMIGOS 시스템의 구성 및 설치 모습.

㉔ AMIGOS 시스템

- 단일보드 컴퓨터에 의해 작동되는 여러 가지 관측 장비 및 카메라를 장착하고 이리듐 위성 모뎀을 통해 양방향 통신이 가능한 원격 모니터링 시스템
- 소형 기상 관측 장치(Vaisala WXT520), 듀얼밴드 GPS(TopCon GRS-1), 태양광 및 반사도 센서(Apogee GP-212), 웹카메라(Sony SNC-RZ30N/2), 단일보드 컴퓨터, 통신 모뎀, 전원 공급 장치(배터리 및 태양광 패널) 등으로 구성(그림 94)
- 아미고스 시스템에 장착된 GPS 관측 장치는 듀얼밴드 수신기를 적용하여 이온층 교란에 따른 신호 지연 현상을 보정할 수 있는 측지용 수신기
- 보다 많은 측점 운용과 비용절감을 위하여 아미고스 시스템 대신 GPS만 장착된 시스템 4기를 드라이갈스키 빙설의 상류부와 데이비드 빙하 상부 빙저호가 존재할 것으로 추정되는 위치에 설치

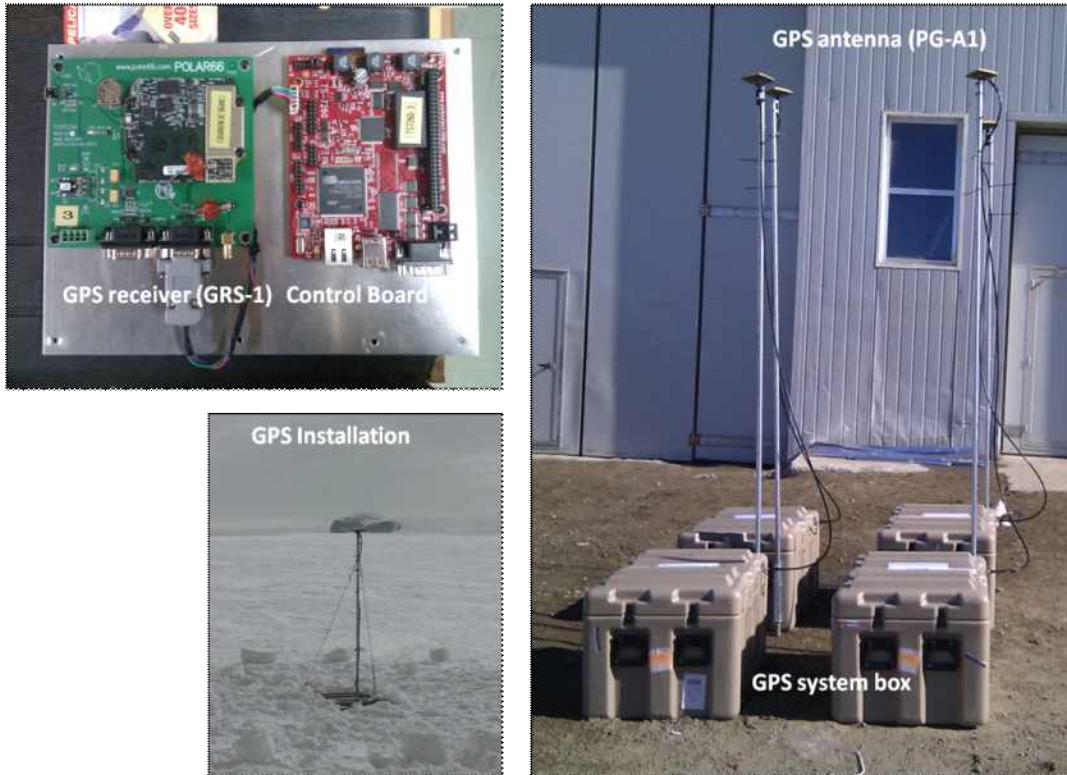


그림 95 이동형 GPS 시스템의 구조와 설치 모습.

② 육상 지진관측망 유지 보수, 신규 구축

2014년 말까지 구축된 육상 지진관측망은 주요 관측지점을 기준으로 두 개의 소관측망으로 구분된다. 데이비드빙하 관측망(KPSN@DG)은 데이비드빙하의 거동, 빙저하천망 유체거동 분석, 빙권구조해석 및 빙진의 발생 기작을 연구하기 위해 구축되었으며, 이를 위해 빙하 주변 7곳의 암반지역에 지진관측시스템을 설치하였다. 테라노바 만 관측망(KPSN@TNB)은 테라노바 만에 위치한 장보고기지 주변의 캄벨, 프리슬리 빙하 및 난센빙봉의 거동 분석, 지질/지체 구조 연구 및 멜버른 화산의 화산활동을 모니터링하기 위해 구축되었으며, 이를 위해 장보고기지 및 멜버른 화산 주변 7곳의 암반지역에 지진관측시스템을 설치하였다.

두 관측망의 지진관측시스템은 IRIS/PASSCAL의 극지역 지진관측시스템 디자인을 토대로 설계되었으며, 지진장비 및 부대장비 구매, 설계, 제작 시 PASSCAL 연구진의 기술지원을 받아 지진관측시스템 설치준비 작업을 수행하였다.

(2) 2015/2016 남극 현장탐사

(가) 연구활동 내용 요약

□ 데이비드빙하 관측망(KPSN@DG)

데이비드빙하 지진관측망(KPSN@DG)의 시스템 구성은 아래와 같다.

- 지진계 센서: Nanometrics Trillium 240 broadband seismometer(T240)
- 지진기록계: Quanterra Q330과 Baler44 package(8 Gb memory × 2)
- 파워시스템: A 타입 또는 Tower 타입 솔라패널시스템, 충전용 배터리, 리튬 보조 배터리, IRIS/PASSCAL 전력관리모듈박스
- 인클로저: IRIS/PASSCAL 디자인 DAS 인클로저, IRIS/PASSCAL 센서볼트

2014-2015년 남극하계탐사 기간동안 총 7개 관측소로 구성된 데이비드빙하 지진관측망 구축작업을 완료하였으며, 2차년도(2015-2016 하계탐사)에는 지진관측소 현장을 방문하여 자료를 획득하고, 시스템의 유지/보수 작업을 수행하였다. 각 관측소의 유지/보수 작업 수행결과를 아래와 같다.

- 작업내용: 각 관측소 지진자료 백업 및 배터리 교체작업 수행함
- 장비현황: KDG06을 제외한 모든 관측소 상태양호, 강풍에 의해 KDG06 관측소 기록계 및 파워시스템 파손됨
- 지진기록:
 - KDG01: 2014년 348일 - 2015년 325일 자료 획득
 - KDG02: 2014년 352일 - 2015년 319일 자료 획득
 - KDG03: 2014년 348일 - 2015년 319일 자료 획득
 - KDG04: 2014년 354일 - 2015년 155일 자료 획득(기록계 오작동)
 - KDG05: 2014년 348일 - 2015년 319일 자료 획득
 - KDG06: 2014년 347일 - 2015년 242일 자료 획득(장비파손)
 - KDG07: 2014년 347일 - 2015년 325일 자료 획득
- 장비교체: KDG04 관측소 기록계 교체
- 보수작업: KDG06 관측소 기록계시스템 및 파워시스템 재설치

□ 테라노바 만 관측망(KPSN@TNB)

테라노바 만 지진관측망(KPSN@TNB)은 시스템 구성은 아래와 같다.

- 지진계 센서: Nanometrics Trillium Compact seismometer, T240(KP05)
- 지진기록계: Nanometrics Taurus(KP02, 04), Centaur(KP01, 03, 07, JBG2)
- Q330 system(KP05)
- 파워시스템: A 타입 또는 Tower 타입 솔라패널시스템, 충전용 배터리, 리튬 보조 배터리, IRIS/PASSCAL 전력관리모듈박스
- 인클로저: IRIS/PASSCAL 디자인 DAS 인클로저, KOPRI(KP01, 02, 03, 04, 07) &

IRIS/PASSCAL(KP05, JBG2) 디자인 센서볼트

2014-2015년 남극하계탐사 기간 동안 총 7개 관측소 구축작업을 완료하였으며, 2차년도 남극하계탐사 동안에는 지구물리 관측동에 설치되어 있던 JBG2 관측소를 새로 건축된 장보고기지 지진계볼트로 이동하여 설치하였으며, 기존 관측소 현장을 방문하여 자료획득 및 시스템 유지/보수 작업을 수행하였다. 장보고기지 건설완료와 함께 기지내부에 JBG2 관측소를 신규 설치했기 때문에 기지 주변에 설치된 KP04 관측소는 장비를 회수하고 운영을 중단하였다. 2014-2015년에 강풍에 의해 유실된 KP06 관측소의 장비(지진기록계 및 펠리칸 박스)를 찾기 위해 헬기를 동원한 수색작업을 수행하였으나 잔해를 발견하지 못하였다. 각 관측소의 유지/보수 작업 수행결과는 아래와 같다.

- 작업내용: 각 관측소 지진자료 백업 및 배터리 교체작업 수행함
- 장비현황: KP02를 제외한 모든 관측소 상태양호, 강풍에 의해 KP02 관측소 기록계 및 센서케이블 파손됨
- 지진기록:
 - KP01: 2014년 351일 - 2015년 330일 자료 획득
 - KP02: 2014년 351일 - 2015년 181일 자료 획득(장비파손)
 - KP03: 2014년 352일 - 2015년 330일 자료 획득
 - KP04: 2014년 355일 - 2015년 331일 자료 획득
 - KP05: 2014년 352일 - 2015년 309일 자료 획득
 - KP07: 2014년 346일 - 2015년 330일 자료 획득
 - JBG2: 2014년 363일 - 2015년 340일(실시간 모니터링)
- 보수작업:
 - KP02 관측소: 센서, 기록계 교체 및 솔라 파워시스템 신규설치
 - KP04 관측소: 장비회수, 운영중단
 - KP06 관측소: 강풍에 의해 장비 유실

□ 신규 관측소 설치

이번 탐사에서는 데이비드빙하 관측망(KPSN@DG)과 테라노바 만 관측망(KPSN@TNB) 사이의 공간적 틈을 메우기 위해 난센빙봉 주변의 네 곳에 신규 관측소를 설치하였다(그림 96). 난센빙봉 부근에 신규관측소를 설치함으로써 난센빙봉 및 프리슬리빙하의 거동을 관측하기가 용이해졌을 뿐만 아니라, 데이비드빙하와 테라노바 만 관측망의 지진자료와 연계하여 광역적인 지구조 및 빙하 동역학 연구가 가능하게 되었다. 신규 지진관측소에는 데이비드빙하 관측망과 동일한 조합의 지진계 시스템이 설치되었다.

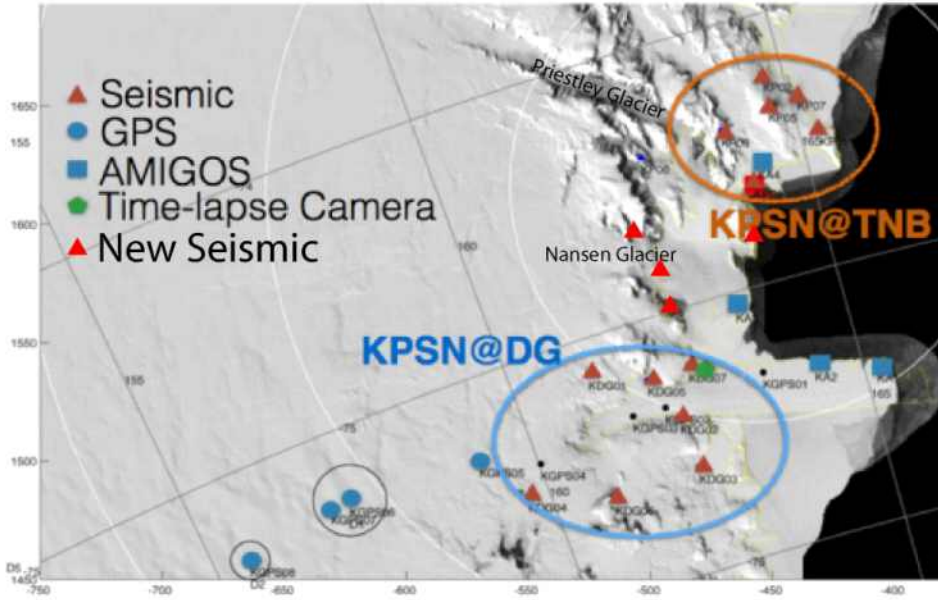


그림 96 데이비드 빙하 관측망, 테라노바 만 관측망과 신규 설치한 나선관측망 위치도

표 4 데이비드 빙하 지진 관측망

Station	위도(°S)	경도(°S)	고도(m)	센서	기록계	전원
KN01	74.884583	163.674533	200	T240	Q330	Solar + Batt.
KN02	74.918617	162.085017	250	T240	Q330	Solar + Batt.
KN03	74.842767	162.579300	380	T240	Q330	Solar + Batt.
KN04	74.727367	162.615400	680	T240	Q330	Solar + Batt.

(나) 배경잡음 분석을 이용한 지진자료 검정

배경잡음 분석기법은 지진계에 기록된 전체 지진자료의 특성 및 자료의 질(quality)를 평가 하는데 많이 사용되어지는 방법이다. 지진계에 기록된 자료의 대부분은 배경잡음(ambient noise)으로 구성되어 있으며, 이 배경잡음은 지역에 따라 특정 주파수에서 제한된 범위의 고유 진폭값 변화양상을 나타낸다. 관측기록의 대부분은 배경잡음으로 이루어져 있기 때문에 배경잡음은 확률적으로 빈도가 높으며 지진에 의한 신호나 자료의 손상 또는 결손 등은 대체로 일시적이기 때문에 확률적으로 빈도가 낮다. 따라서, 한 지역의 배경잡음을 일정기간 동안 분석하면 그 지역의 고유한 배경잡음 특성을 알수 있을 뿐만 아니라 낮은 확률로 존재하는 자료의 이상신호를 쉽게 찾아낼 수 있다.

이러한 통계학적 접근법은 오랜 기간 동안 획득한 자료의 고유특성, 기록의 연속성 및 부지

특성을 파악하는데 효과적이며, 지진관측소의 유지/관리 작업에도 효과적으로 적용될 수 있다. 다시 말해, 정기적으로 관측소 지진자료의 배경잡음 분석을 수행하면, 그 지역의 고유한 배경잡음 특성, 시간 및 계절에 따른 잡음 변화양상 등을 파악할 수 있을 뿐만 아니라, 지진계 auto re-centering, claibration 등의 시스템 프로세스와 자료누락(data-gaps), 비정상적인 고-저주파수 스펙트럼 응답, 센서불량 등을 모니터링하는 것이 가능하다.

그림. 97과 98에 데이비드빙하 관측망과 테라노바 만 관측망 중 대표 관측소 지진자료의 주파수밀도값의 확률분포(PSD)(a)와 주파수밀도값의 시간적 변화양상(b)를 도시한 그림이다. 그림의 (a) 그래프를 살펴보면 KDG01 및 KP03 관측소 모두 주변잡음 진폭의 주파수별 변화양상이 HNM(고잡음모델)과 LNM(저잡음모델) 사이에서 전형적인 형태로 변화하는 것을 알 수 있다. 이는 지진계가 모든 주파수 영역에서 정상적인 응답을 보인다는 것을 의미하며, 차후 지진과 연구에 활용이 가능하다는 것을 의미한다. 또한, 그림 97과 98의 (b)에 도시된 주파수밀도값의 시간적 변화양상을 살펴보면 해당 관측소의 주변잡음의 주파수별, 계절별 변화양상을 알 수 있을 뿐만 아니라, 운영기간 동안 자료의 누락 정도를 판별할 수도 있다.

따라서, 그림. 97과 98로부터 아래의 몇 가지 정보를 얻을 수 있다.

- 두 관측소 모두 운영기간동안 지진계가 정상적인 주파수응답을 보임
- 두 관측소 모두 운영기간동안 자료의 누락이 없음
- 두 관측소 모두 모든 주파수영역에 걸쳐 주변잡음의 변화가 정상범위 내에 위치함(고잡음 모델(HNM) 및 저잡음모델(LNM) 사이에 위치)
- primary microseism 영역(약 10-20초)과 secondary microseism 영역(약 5-10초)에 잡음의 에너지가 집중되어 있음
- 특히, secondary microseism 영역의 잡음에너지는 계절에 따른 변화양상이 뚜렷함(여름: high energy, 겨울: low energy)

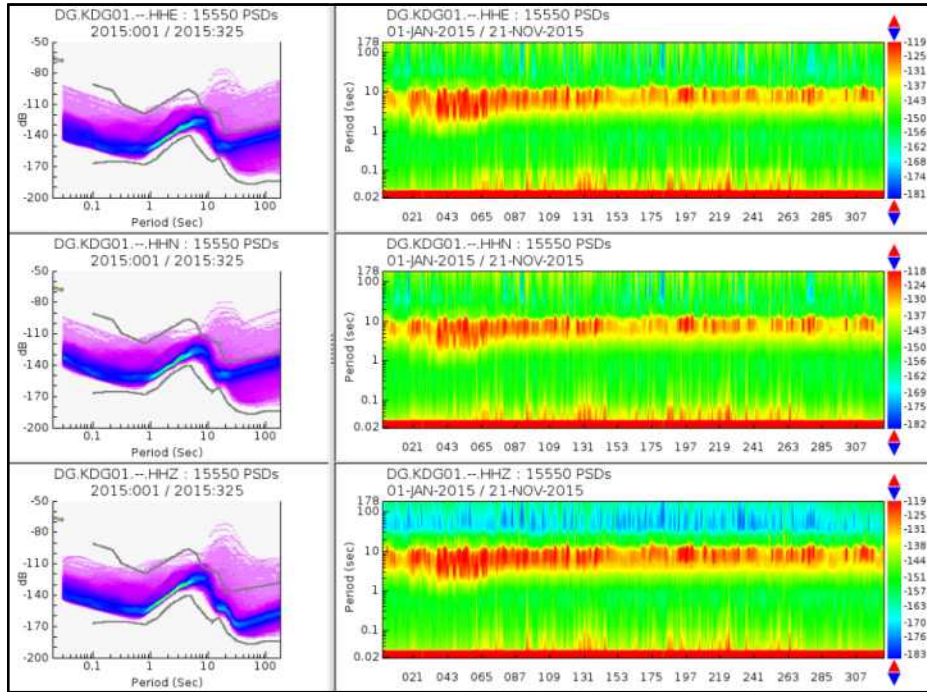


그림 97 KDG01 관측소 지진자료의 주파수밀도값의 확률분포(PSD) (좌)와 주파수밀도값의 시간적 변화양상(우)

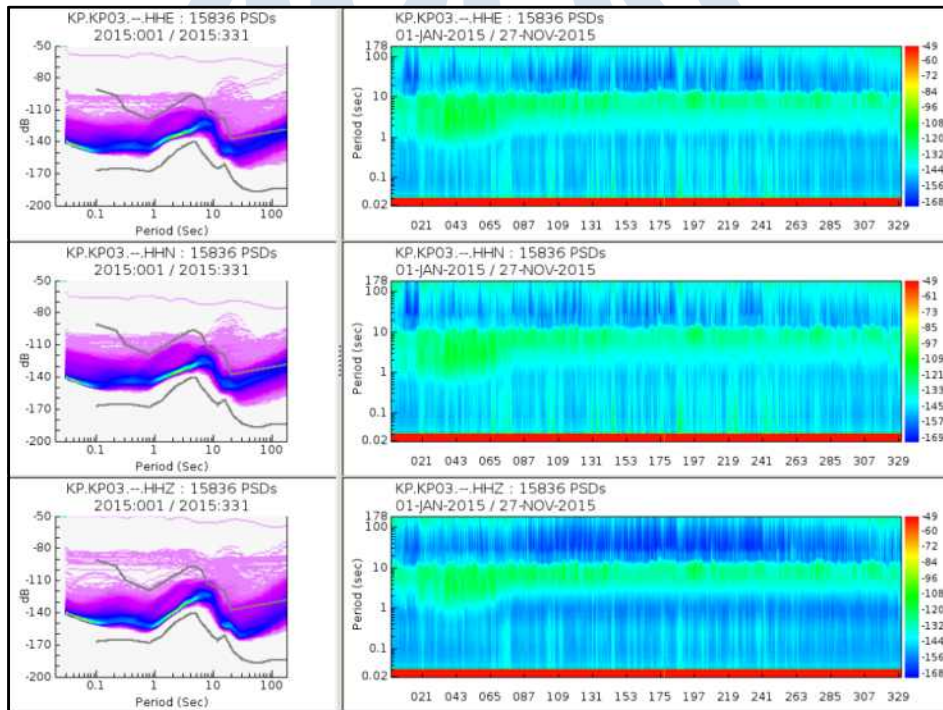


그림 98 KP03 관측소 지진자료의 주파수밀도값의 확률분포(PSD)(좌)와 주파수밀도값의 시간적 변화양상(우)

(다) 남극현장 탐사 수행내용

- ① 모니터링 시스템 설치 및 유지 보수

□ 데이비드 빙하 빙저호 GPS 관측망

데이비드 상류 지역에서는 ICESat 인공위성 고도계 자료의 연구를 통하여 총 6개의 빙저호가 존재하는 것으로 알려져 있다(Smith *et al.*, 2009). 장보고기지에서 가장 가까운 빙저호는 D1으로 기지로부터 약 200km 떨어져 있으며, 직경이 약 30km로 가장 크다. 두 번째로 가까운 빙저호는 D2 이며 약 260km 떨어져 있으며, 나머지 4개의 빙저호는 300km 이상 떨어진 지역에 분포한다. 헬리콥터를 이용한 접근성을 고려하여 2014/2015년 하계기간 중 D1 지역에 GPS 2기(KGPS06, KGPS07)를, D2 지역에 GPS 1기(KGPS08)를 설치하였으며, D1 하류 빙하 지역에 GPS 1기(KGPS05)를 설치하였다. 2015/2016 하계기간에 4기의 GPS로부터 데이터를 회수하였으며, 연장 측정을 위하여 리튬 배터리를 교체하였다.

현장에서의 자료분석을 위하여 관측된 1년간의 자료 중 일부분(1 hour/day)을 PPP(Precise Point Positioning) 방법으로 처리하였다(그림 99). 예를 들어 KGPS05 측정의 경우, 수평방향 이동속도는 거의 일정하며 수직 성분은 점진적으로 고도가 낮아지는 경향과 주기적인 변화가 관찰되나 주기적인 변화는 PPP 방법에 의한 측정 오차로 보인다. 시간에 따른 장주기 고도 변화는 약 -1.43 m/yr이다. 관측지역은 빙하의 하류방향으로 경사가 있는 지역으로 시간에 따른 장주기 고도변화는 표면 경사에 의한 효과와 빙저호 수위변화에 의한 효과가 혼재되어 있는 형태이다. 따라서, 표면 경사에 의한 효과를 제거하기 위하여 수준(level) 측량을 실시하였다. GPS관측이 시작된 지점과 자료 회수 시점에서의 GPS 위치간의 수준 측량을 통해 표면 경사에 의한 효과를 산출하고 경사 보정(slope correction)을 실시하였다.

표 5 2015년 GPS 관측 결과. * 현장 수준 측량을 통한 slope correction 산출

Site	Ice Velocity (m/yr)	GPS elevation change rate (m/yr)	Slope correction* (m/yr)	Elevation change rate (m/yr)
KGPS05	167.3	-1.43	-	-
KGPS06	88.3	-1.92	-1.49	-0.43
KGPS07	79.2	0.22	0.28	-0.06
KGPS08	45.3	-0.38	0.24	-0.52

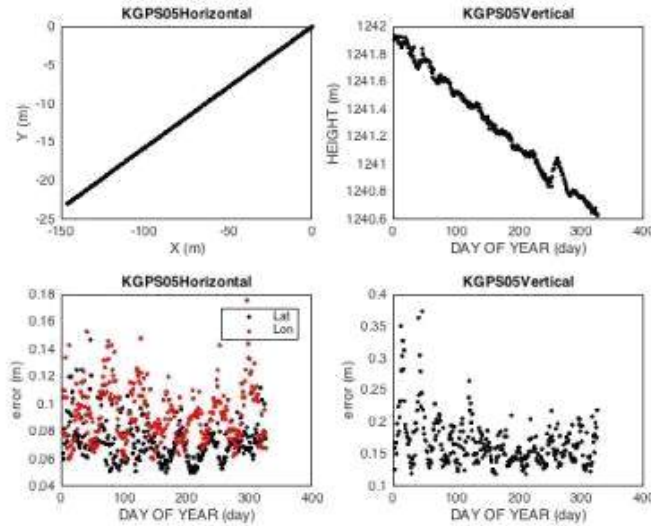


그림 99 KGPS05 측점의 GPS 자료 처리 결과

KGPS05 측점에서의 수준 측량은 누락되어 나머지 3개의 GPS 측점에 대하여 경사 보정을 실시한 결과 KGPS06과 KGPS08 측점에서 유의미한 고도 변화가 관측되었다. D1 빙저호의 중앙부인 KGPS06은 양의 고도변화가, D2 빙저호의 중앙부인 KGPS08에서는 음의 고도변화가 관측되는데, 이는 ICESat에 의해 2003년부터 2008년까지 관측된 고도변화와 같은 경향을 나타내며, 고도변화량도 ICESat 결과와 거의 유사한 값을 보인다(그림 100). 즉, 2015년 1년 동안 D1 빙저호에는 빙저수의 유입, D2 빙저호에서는 빙저수의 배수가 발생한 것으로 추정된다.

극지연구소

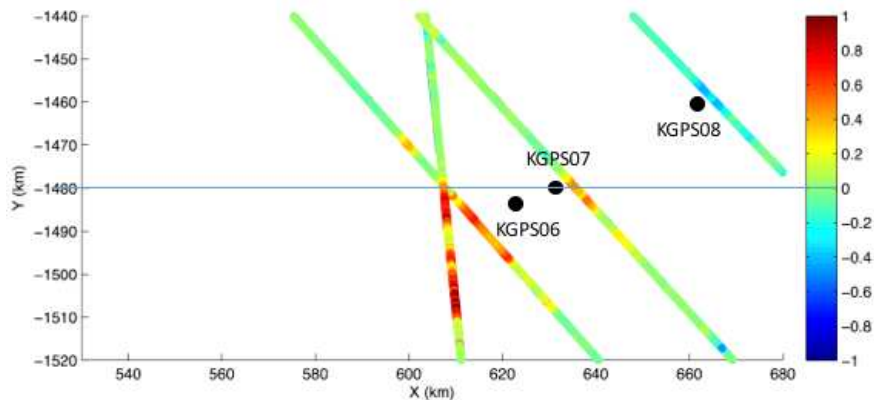


그림 100 빙저호 지역 주변 ICESat 고도 변화 관측 결과(2003년 -2009년). 단위는 m/yr

CESat 결과에 의하면, KGPS07 측점이 D1 빙저호 지역내에 위치하지만 표면 고도 변화가 관측되지 않는 것으로 보아 D1 빙저호는 하나의 빙저호가 아니라 여러 개의 빙저호가 연결되어 있는 것으로 보인다. 2015/2016년 하계기간 중에는 이 지역의 보다 상세한 수위변화

양상을 살펴보기 위하여 8개의 GPS(KGPS11-18)를 추가로 설치하였으며, 정밀한 고도 변화 관측을 위하여 D1 빙저호에서 약 30km 떨어진 흐름이 없는 빙산 지역에 기준국용 GPS(KGPS19)를 설치하였다(그림 101). 그림 102과 그림 103는 Cryosat-2 및 Landsat 영상의 합성을 통한 연구지역의 정밀 고도 모델(DEM)을 보여준다. 광역적인 추세를 제거한 잔여 고도 모델에서 D1 및 D2 빙저호 지역에서 주변보다 낮은 고도를 가지는 지역이 존재하는데 이런 지역은 수리 포텐셜(hydraulic potential)이 작은 값을 가지므로 빙저수가 수렴하여 빙저호가 존재할 가능성이 있다. 이러한 가능성을 바탕으로 신규 GPS 측점이 선정되었다.

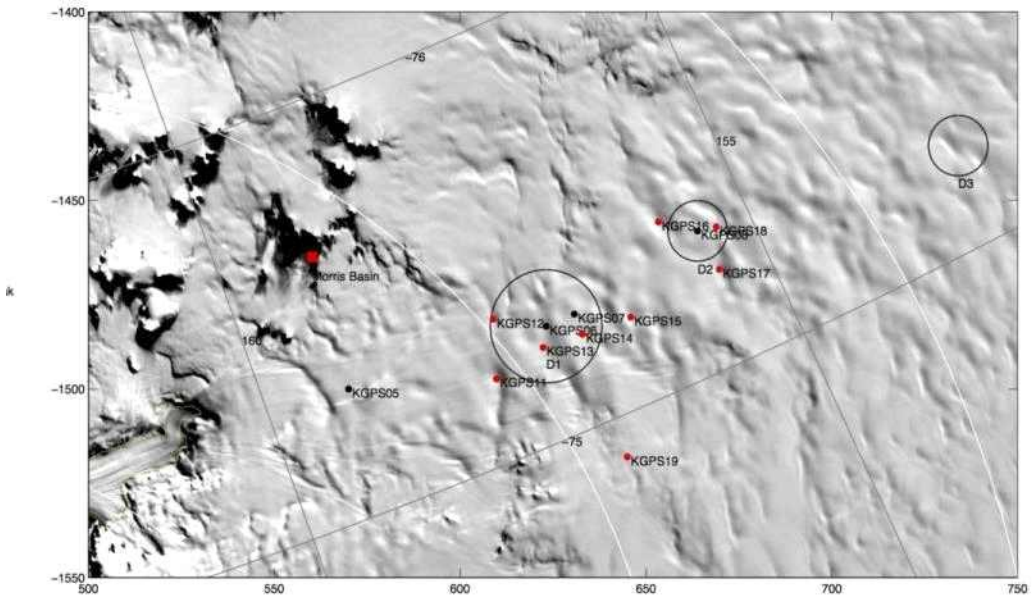


그림 101 2015/2016년 하계기간 중 데이비드 빙하 상류 빙저호 지역에 설치된 GPS의 위치

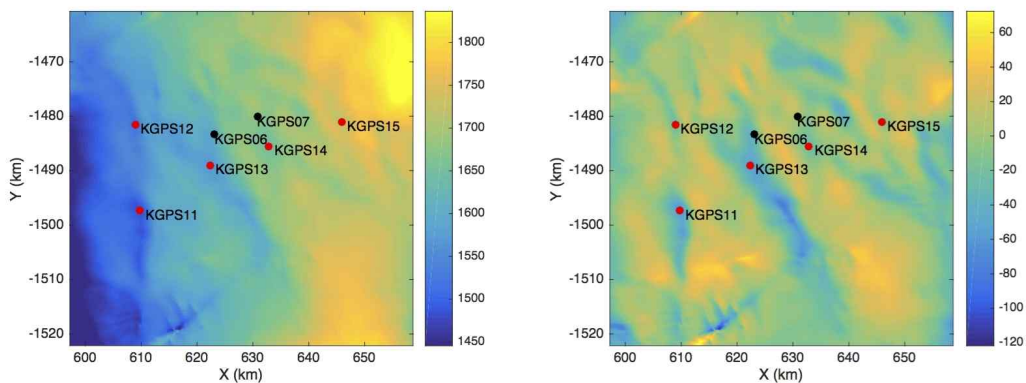


그림 102 D1 빙저호 지역의 (좌) 고도 모델(DEM)과 (우) 광역 추세 제거 후의 잔여 고도

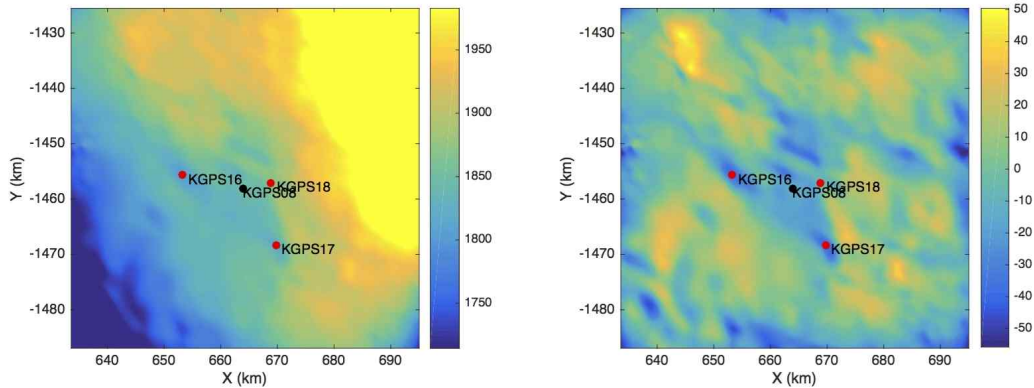


그림 103 D2 빙저호 지역의 (좌) 고도 모델(DEM)과 (우) 광역 추세 제거 후의 잔여 고도

② 난센 빙붕(Nansen Ice Sheet) 및 캠벨 빙하(Campbell Glacier) 지역 측지 모니터링

난센 빙붕 지역에서는 미국 NASA 연구진과 공동으로 난센 빙붕의 조석 변형 및 하부 용융, 그리고 최근 급격히 증가하고 있는 표면 용융에 대하여 연구를 수행하였다. 이를 위하여 2014/2015년 하계기간에 설치된 KA4 AMIGOS의 원활한 운용을 위하여 펌웨어를 업그레이드하고 배터리 박스를 추가 설치하였다. 3년전에 발생한 빙붕 전단부의 큰 rift의 확장성을 살펴보기 위하여 KGPS09 측점(rift를 기준으로 바다쪽)에 GPS를 설치하였으며, 난센 빙붕 중앙부 중 표면 용융수가 다량 흘러가는 지역의 모니터링을 위하여 KA6 AMIGOS를 설치하였다. 그림 106은 KA6 AMIGOS의 설치 모습이며, 그림 107은 KA6에 탑재된 카메라에 의해 촬영되는 영상으로서 최근 급격히 발달하고 있는 빙붕 표면의 연못을 보여주는 것으로 표면 용융의 양상을 실시간으로 관측하고 있다. 미국 NASA 연구진은 5기의 단기 연속 측정 GPS를 2015년 11월에 설치하여 2016년 2월 중에 회수할 예정이다. NASA 연구진의 GPS는 빙붕의 조석 및 조석 변형 현상을 관측하여 향후 빙붕의 안정성을 예측하게 될 것이며, KGPS09 및 2기의 AMIGOS는 1년 이상의 장기 관측을 통하여 빙붕의 하부 용융 및 기상 환경을 모니터링하게 된다.

캠벨 빙하에는 2014/2015년 하계기간 중 KA5 AMIGOS가 설치된 바 있다. 캠벨 빙하의 흐름과 하부 기반암 경계의 상태 및 멜버른 화산의 상관관계를 보다 종합적으로 살펴보기 위하여 3기의 GPS가 추가 설치되었으며 1년간 운영될 예정이다. GPS 관측결과는 빙하 이동 속도 변화, 빙저수의 존재 유무 등의 연구를 위하여 사용되며, 헬리콥터 Radar 탐사 자료와 멜버른 화산 주변 지진 관측망 자료와의 복합 연구를 통하여 캠벨 빙하의 거동이 종합적으로 연구될 것이다.

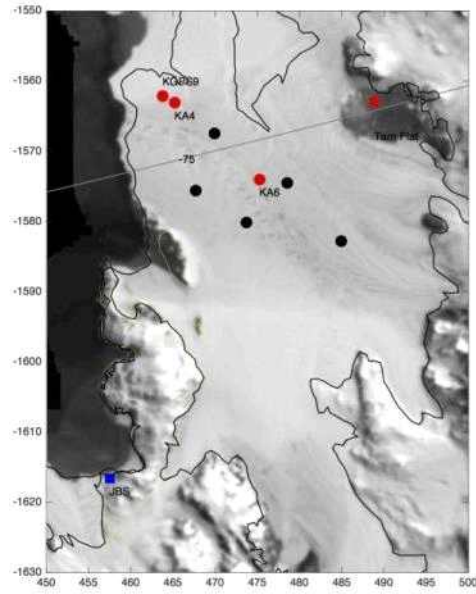


그림 104 난센 빙붕 관측망:
AMIGOS 및 GPS 측점(적색원),
미국 NASA 연구진의 단기 GPS
관측 측점(흑색원)

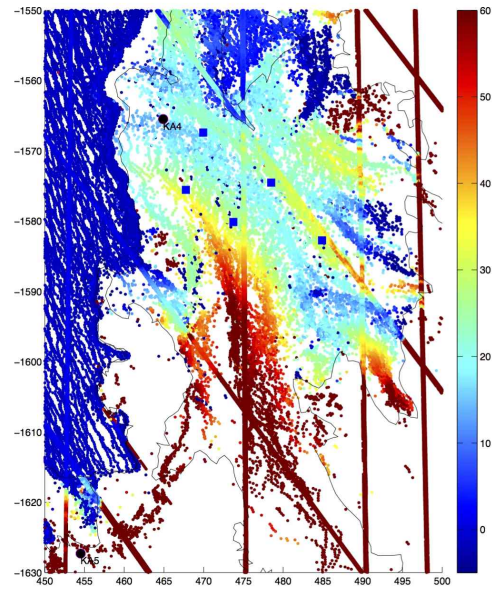


그림 105 ICESat 및 Cryosat-2에 의
해 관측된 난센 빙붕의 표면 고도

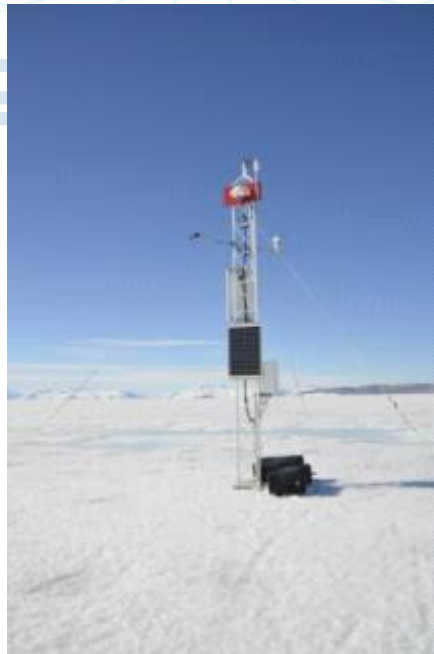


그림 106 난센 빙붕에 설치된
KA6

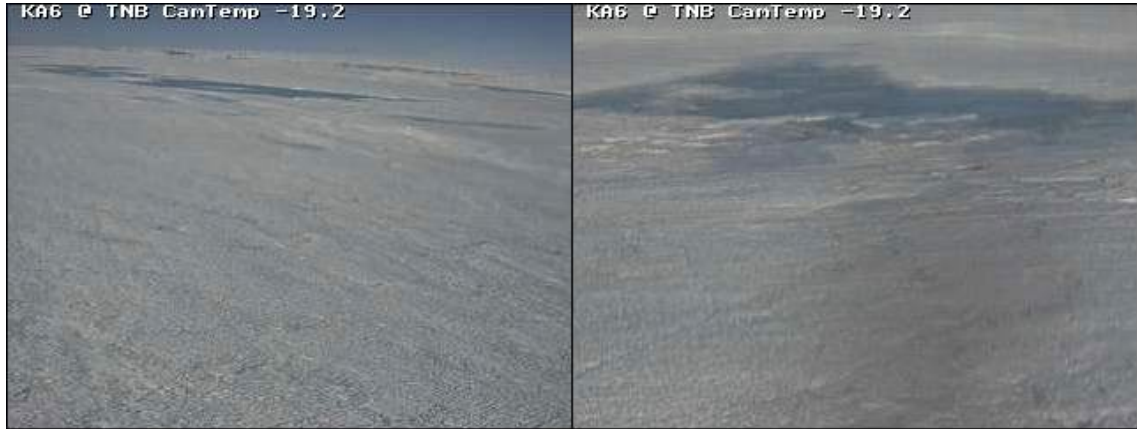


그림 107 KA6에서 관측하는 카메라 영상. 표면 용융에 의해 생기는 표면 연못을 촬영함

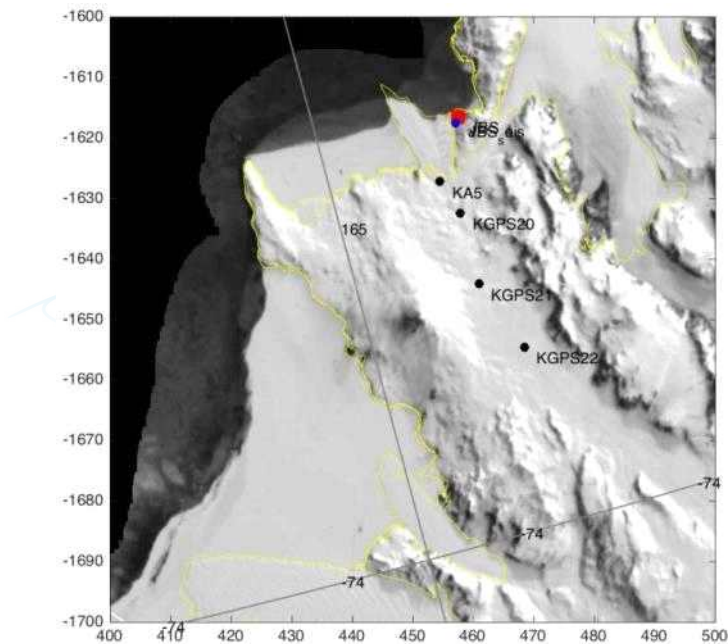


그림 108 캠벨 빙하 지역의 GPS 측점

③ 멜버른 화산 지자기전류 탐사

멜버른 화산의 상부 지각 구조의 규명을 위하여 자기지전류 탐사 장비를 개발하였으며, 멜버른 화산을 가로지르는 측선을 따라 총 8 측점에서 1일 내지 3일 간 측정을 수행하였다(그림 109). 자기지전류 탐사는 전기장과 자기장을 동시에 관측하여 지하내부의 전기전도도를 추정하는 방법으로서, 일반적으로 전도성이 좋은 토양에 비분극전극을 설치하여

전기장을 측정한다. 하지만 남극 지역은 눈 혹은 얼음에 뒤덮혀 있어 토양에 전극을 설치하기가 매우 어렵다. 접지 저항이 매우 큰 눈에 전극을 설치하기 위하여 튜브 모양으로 고안된 티타늄 메쉬를 전극으로 사용하여 전기장을 측정하였다(그림 110). 티타늄 튜브는 눈을 천공하여 매설한 후 소금과 벤토나이트를 눈과 혼합하여 매워서 접촉 저항을 감소시켰다.

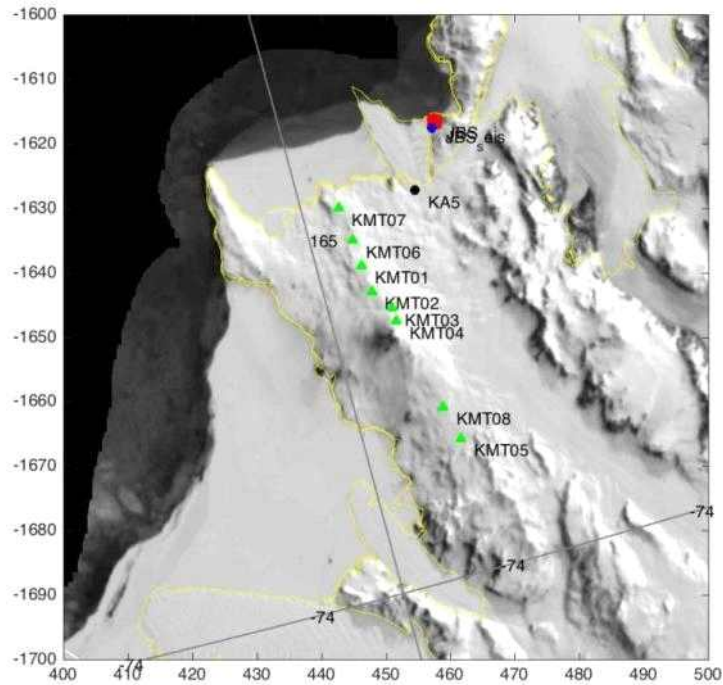


그림 109 멜버른 화산 지역 자기지전류 탐사 측정

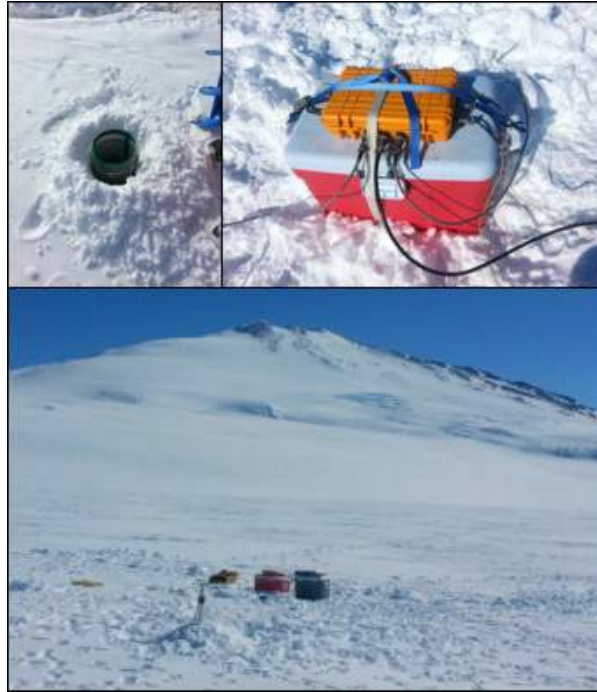


그림 110 멜버른화산 자기지전류 탐사. (좌상) 티타늄 튜브형 전극, (우상) 기록계 및 배터리 박스, (하) 탐사 전경

표 6 자기지전류 탐사 측정점

Site ID	Lat (dd)	Lat (mm.mm)	Lon (dd)	Lon (mm.mm)	Elev. (m)	MT unit
KMT01	74	27.520	164	46.110	1159	#1
KMT02	74	25.190	164	45.200	-	#1
KMT03	74	23.409	164	40.424	1986	#1
KMT04	74	22.256	164	40.203	2523	#1
KMT05	74	11.300	164	30.500	-	#1
KMT06	74	29.780	164	46.470	-	#2
KMT07	74	32.710	164	48.320	-	#2
KMT08	74	14.228	164	33.175	1188	#1

④ 초전도 중력계 설치 및 운영 (서울대 위탁 협업)

초전도 중력계(superconducting gravimeter)는 지금까지 제작된 중력계 중 해상도가 가장 뛰어난 중력계로서, 이론상 0.01nm/s²(1 nGal)까지 상대적 중력 변화를 측정할 수 있다. 초전도 중력계는 크게 중력 센서부, 냉각시스템, 전원공급장치(UPS)로 구성되며 중력 센서부는 액체 헬륨 용기(dewar)안에 초전도 구체, 초전도 자성체 및 코일 등이 장착되어 있고 외부에 제어 회로 및 컴퓨터가 부착되어 있다. 냉각 시스템은 냉각기(cold head)와 압축기(compressor)로 이루어져 있으며 냉각기는 중력 센서부 상단에 위치하여 액체 헬륨 용기 내의 온도를 4.2°K로 유지시키는 역할을 한다. 중력 센서부는 UPS 역할을 하는 전원공급장치에 연결되며 전원공급장치에 탑재된 네트워크 시스템에 의해 외부에서 원격으로 조작 및 점검이 가능하다.

중력 센서부와 냉각기는 장보고기지 내 지구물리관측동 옆 지하에 설치된 2m×1m×2m 공간의 중력계실에 설치하였으며 압축기, 전원공급장치, 헬륨 가스는 지구물리관측동 내에 위치한다. 초기 설치 과정은 다음과 같다.

- 액체 헬륨 용기의 진공 강화
- 중력계실내 base plate 설치
- 냉각기-압축기 사이의 헬륨 호스 및 각종 케이블용 관로 매설
- 중력 센서부 설치
- 냉각기 설치
- 압축기 및 전원공급장치 설치
- 중력 센서부 경사 교정



그림 111 지하에 매설된 중력계실 전경

Status of pumping out a dewar (Dec. 18, 2015)

- 1.0-4 means 1.0×10^{-4}
- * Valve 1 opened, valve 2 closed, turn on turbo pump
 - below 1.0-4
- * Valve 1 closed, valve 2 closed, leakage test of hose
 - ~ 5.4-3 mbar (~4 microns of Hg)
- * Valve 1 closed, valve 2 opened, background pressure
 - 3.8-1 mbar (285 micros of Hg)
- * Valve 1 opened, valve 2 opened, start pumping out
 - 19:52 3.8-1 mbar
 - 19:57 1.1-2 mbar
 - 20:02 5.8-3 mbar
 - 20:58 4.2-3 mbar
- * Valve 1 closed, valve 2 opened, first check of pumping status
 - 20:58 2.7-2 mbar
 - 21:13 3.3-2 mbar (25 microns of Hg)
- * Valve 1 opened, valve 2 opened, continue pumping
 - 00:20 1.2-3 mbar
- * Valve 1 closed, valve 2 opened, second check of pumping status
 - 00:26 1.3-2 mbar
 - 00:32 1.6-2 mbar
 - 00:38 1.7-2 mbar
 - 00:45 1.7-2 mbar (13 microns of Hg)
- * Valve 1 opened, valve 2 opened, continue pumping
 - 09:30 3.4-4 mbar
- * Valve 1 closed, valve 2 opened, final check of pumping status
 - 09:30 5.9-3 mbar
 - 09:35 7.4-3 mbar
 - 09:40 8.0-3 mbar
 - 09:45 8.2-3 mbar (~6.2 microns of Hg)
- * Valve 1 opened, valve 2 closed, stop pumping out
- * Valve 1 closed, valve 2 closed, remove the hose from dewar
- * Turn off turbo pump, release valve 3, disassemble turbo pump and hose



그림 112 펌프를 이용하여 액체 헬륨 용기 외벽을 진공으로 만드는 작업 및 결과

극지연구소



그림 113 냉각기-압축기 간 헬륨 호스 및 각종 케이블용 관로 매설



그림 114 중력 센서부 및 냉각기 설치



그림 115 지구물리 관측동 내 압축기 및 전원공급장치 설치

초기 설치 과정 이후 2015년 12월 25일 압축기 및 냉각기의 작동을 시작하였고, 냉각을 시작한지 3.5일 경과 후 액체 헬륨 용기 중심부 온도(Body-T)가 약 4.2°K에 도달하였다. 이때부터, 헬륨 가스가 액화하기 시작하여 냉각을 시작한지 약 8.5일 이후 99%이상 액체 헬륨이 채워졌으며, 이후 헬륨 가스의 공급을 정지시켰다. 헬륨 가스가 충분히 채워진 후 초전도 구체의 levitation을 실시하였으며, 기타 미세 조정을 실시한 이후 2016년 1월 6일 이후에 안정화된 중력 측정이 시작되었다. 그림 117은 2016년 1월 6일 이후의 중력 측정 원시 자료를 보여준다. 중력의 조석 효과가 잘 나타나고 있으며, 지진파에 의한 영향으로 보이는 신호가 다수 관찰된다. 잡음 분석을 위하여 중력 자료를 파워 스펙트럼으로 변환하였을 때 약

15-20초 주기의 1차(primary) 잡음 성분과 이 잡음의 조화 성분(harmonics)인 약 7-10초 주기의 잡음 대역이 뚜렷이 구별된다(그림 118). 이러한 잡음은 장보고기지 인근에 설치된 지진계 자료에서도 관측되는 것으로 바다의 파도 혹은 너울에 의해 지각에 유기되는 지진파 성분에 의한 영향으로 보인다. 현재의 관측자료는 기지 주변 해빙이 녹아 사라진 여름 시기에 해당하므로 잡음이 강하게 관측되고 있으며 해빙이 생성되는 겨울동안에는 이러한 잡음의 영향이 적을 것으로 예상된다.

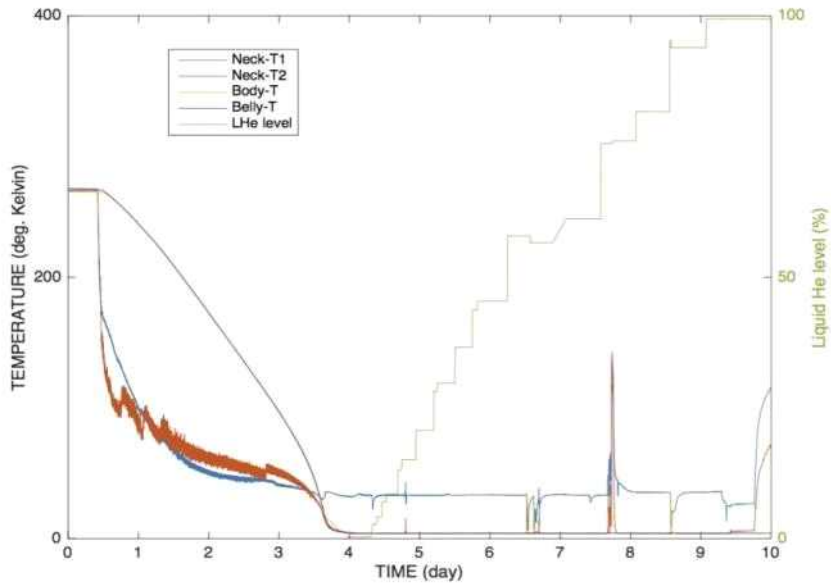


그림 116 2015년 12월 25일 이후 초기 냉각에 따른 액체 헬륨 용기 내 온도 변화 및 액체 헬륨 충전율의 변화

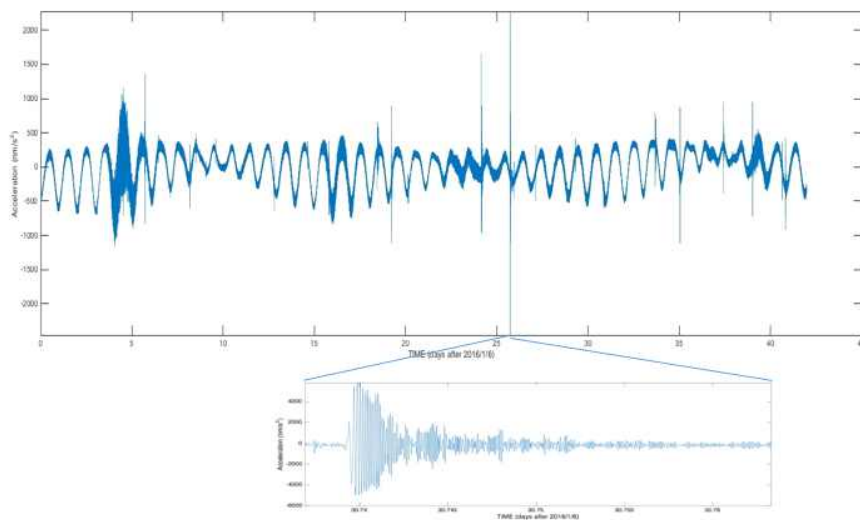


그림 117 2016년 1월 6일 이후 중력 측정 결과 및 지진파에 의한 중력 기록 변화

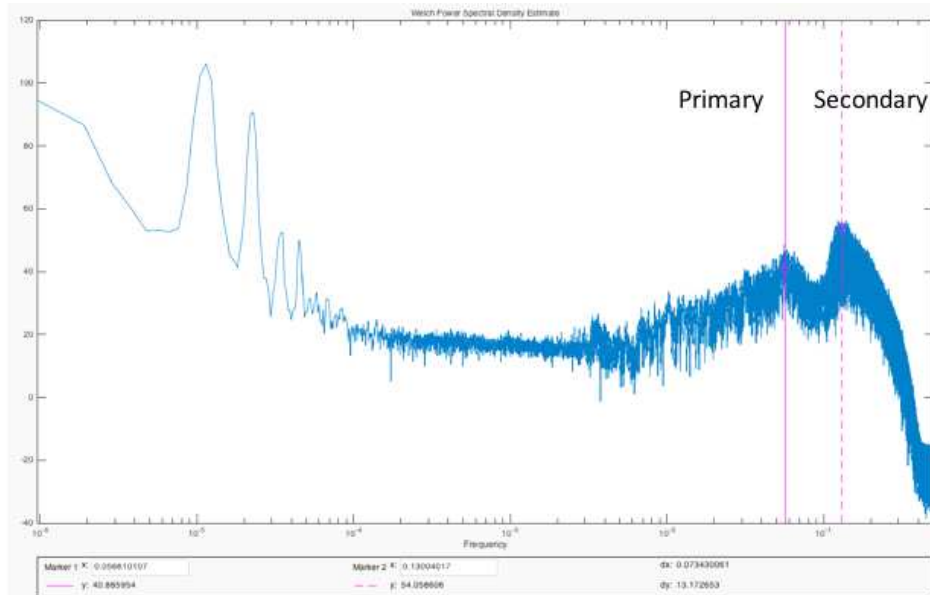


그림 118 지진과 잡음을 보여주는 중력 관측 자료의 파워 스펙트럼

초전도 중력계의 제어는 중력계실 내의 중력센서부에 연결된 컴퓨터를 통해서 이루어진다. 하지만, 점검을 위하여 주기적으로 중력계에 접근하는 것은 중력 자료에 잡음을 유발하므로 네트워크를 통해 원격으로 제어하거나 모니터링하는 것이 좋다. 이를 위해 제어용 컴퓨터와 전원공급장치는 이더넷을 통해 기지내 네트워크에 연결되어 있으며, 네트워크의 개략도는 그림 119와 같다. 먼저, 전원공급장치에 내장된 라우터는 192.168.34.14의 IP로 네트워크에 연결되어 있으며, 전원공급장치와 중력센서부는 이 라우터의 로컬 네트워크에 연결되어 있다. 따라서, 웹 브라우저를 통해 <http://192.168.34.14:3400>에 접속함으로써 전원공급장치 내의 CBW X310 컨트롤러에 접속할 수 있으며 이를 통해 압축기 및 전원공급장치의 온도를 모니터링할 수 있으며, 압축기와 헬륨 가스 공급 밸브의 ON/OFF를 원격으로 제어할 수 있다. 또한 중력센서부는 원격제어 프로그램인 teamviewer 소프트웨어를 통해 원격으로 접속하여 측정 상태를 모니터링하거나 제어할 수 있다.

IDC-UPS GWR LAN Network Diagram: Basic + Router

(For Korea)
 IDC-UPS S/N 34128/1/3
 Mfg date: 8/4/2014
 GWR S/N 2-BAT-002

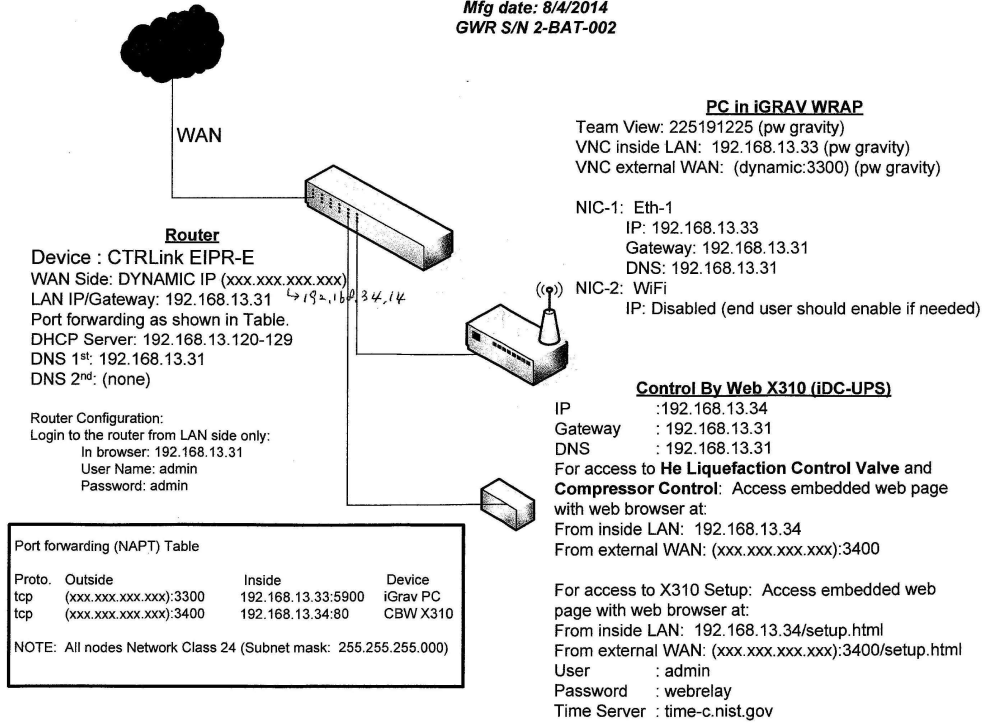


그림 119 초전도 중력계의 네트워크 개략도

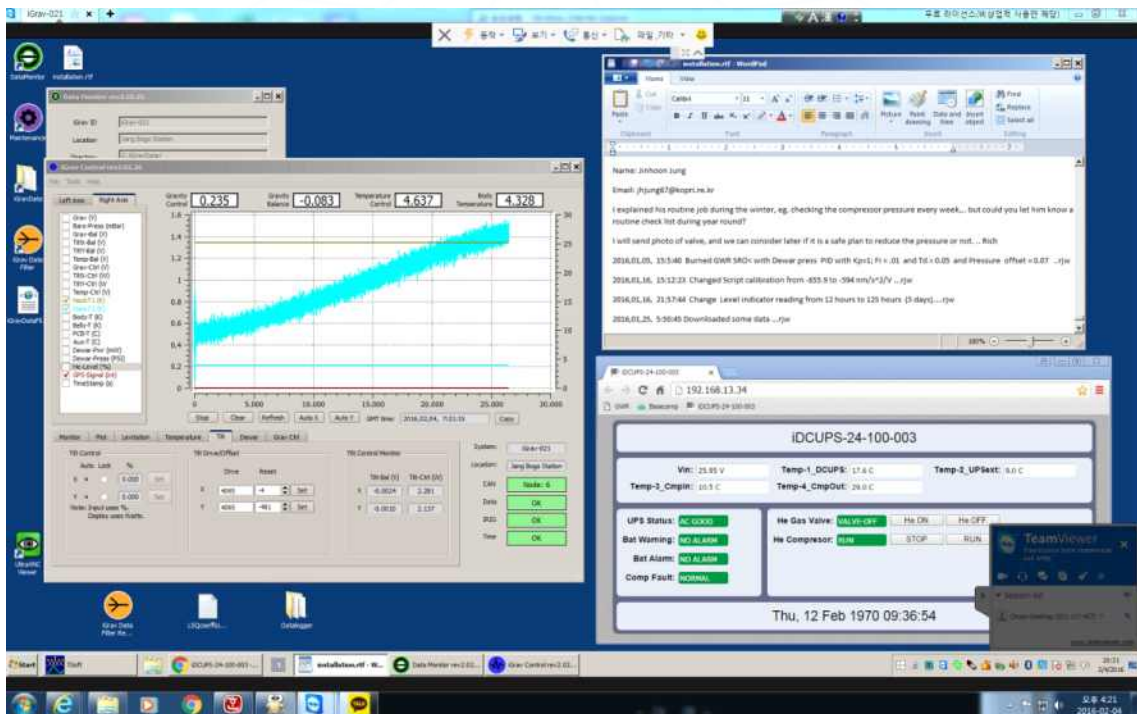


그림 120 teamviewer를 이용한 초전도 중력계의 원격 제어 화면

(3). 2016/2017 남극 현장탐사

(가) 남극 현장탐사 요약

2015년 말까지 구축된 육상 지진관측망은 주요 관측지점을 기준으로 세 개의 소관측망으로 구분된다. 데이비드빙하 관측망(KPSN@DG)은 데이비드빙하의 거동, 빙저하천망 유체거동 분석, 빙권구조해석 및 빙진의 발생 기작을 연구하기 위해 구축되었으며, 이를 위해 빙하 주변 7곳의 암반지역에 지진관측시스템을 설치하였다. 테라노바 만 관측망(KPSN@TNB)은 테라노바 만에 위치한 장보고기지 주변의 캠벨, 프리슬리 빙하 및 난센빙봉의 거동 분석, 지질/지체 구조 연구 및 멜버른 화산의 화산활동을 모니터링하기 위해 구축되었으며, 이를 위해 장보고기지 및 멜버른 화산 주변 7곳의 암반지역에 지진관측시스템을 설치하였다. 또한 지난해 난센빙봉 주변의 암반지역 네곳에 신규 관측소를 설치함으로써 난센빙봉 관측망(KPSN@N)을 추가로 구축하였다. 난센빙봉 관측망 구축을 통해 데이비드빙하 관측망(KPSN@DG)과 테라노바 관측망(KPSN@TNB) 사이의 공간적 틈을 메우며 난센빙봉 및 프리슬리빙하의 거동을 관측하기가 용이해졌을 뿐만 아니라, 데이비드빙하와 테라노바 관측망의 지진자료와 연계하여 광역적인 지구조 및 빙하 동역학 연구가 가능하게 되었다.

세 관측망의 지진관측시스템은 IRIS/PASSCAL의 극지역 지진관측시스템 디자인을 토대로 설계되었으며, 지진장비 및 부대장비 구매, 설계, 제작 시 PASSCAL 연구진의 기술지원을 받아 지진관측시스템 설치준비 작업을 수행하였다.

(나) 남극현장 탐사 수행내용

- ① 모니터링 시스템 설치 및 유지 보수
- 데이비드빙하 관측망(KPSN@DG)



그림 121 데이비드빙하 관측망(KPSN@DG)

데이비드빙하 지진관측망(KPSN@DG)의 시스템 구성은 아래와 같다.

- 지진계 센서: Nanometrics Trillium 240 broadband seismometer(T240)
- 지진기록계: Quanterra Q330과 Baler44 package(8 Gb memory × 2)
- 파워시스템: A 타입 또는 Tower 타입 솔라패널시스템, 충전용 배터리, 리튬 보조 배터리, IRIS/PASSCAL 전력관리모듈박스
- 인클로저: IRIS/PASSCAL 디자인 DAS 인클로저, IRIS/PASSCAL 센서볼트

지난 2차년도까지의 남극하계탐사를 수행하는 동안 총 7개 관측소로 구성된 데이비드빙하 지진관측망 현장을 방문하여 자료를 획득하고, 시스템의 유지/보수 작업을 수행하였다. 3차년도 남극하계 탐사에 해당하는 올해에도 모든 관측소에 방문하여 지진 자료를 획득하고 관측소 유지/보수 작업을 수행하였으며, 각 관측소의 유지/보수 작업 수행결과는 아래와 같다.

- 작업내용 : 각 관측소 지진자료 백업 및 배터리 교체작업 수행함
- 장비현황 : KDG07을 제외한 모든 관측소 상태양호, 강풍에 의해 KDG07 관측소 기록계 단열박스 및 케이블 파손됨
- 지진기록
 - KDG01 : 2015년 326일 - 2016년 313일 자료 획득
(동계기간 전력부족으로 23일간 자료 손실 : 2016년 210일 - 232일)

- KDG02 : 2015년 320일 - 2016년 312일 자료 획득
- KDG03 : 2015년 320일 - 2016년 312일 자료 획득
- KDG04 : 2015년 359일 - 2016년 106일 자료 획득(기록계 오작동)
- KDG05 : 2015년 320일 - 2016년 319일 자료 획득
(동계기간 전력부족으로 9일간 자료 손실 : 2016년 220일 - 228일)
- KDG06 : 2016년 3일 - 2016년 313일 자료 획득
- KDG07 : 2015년 325일 - 2016년 237일 자료 획득(단열박스 및 케이블 파손)
- 장비교체 : KDG02 관측소 센서 및 기록계 교체
- 보수작업 :
 - KDG07 관측소 : 기록계시스템 및 파워시스템 재설치
 - KDG06 관측소 : 태양패널 와이어 보수

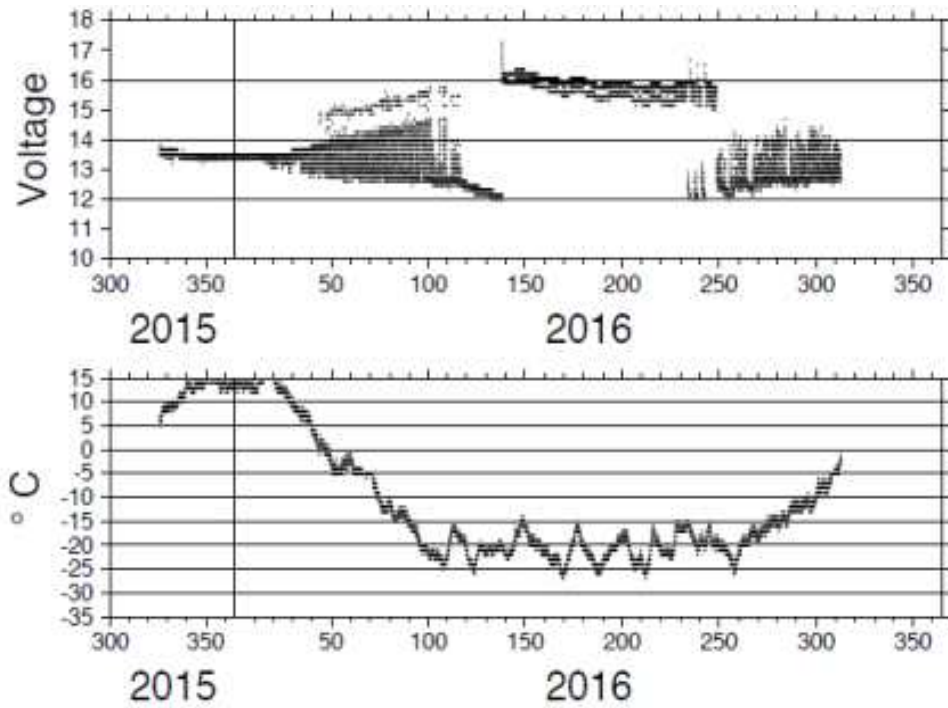


그림 122 KDG02 관측소의 연중 온도 및 전압 변화

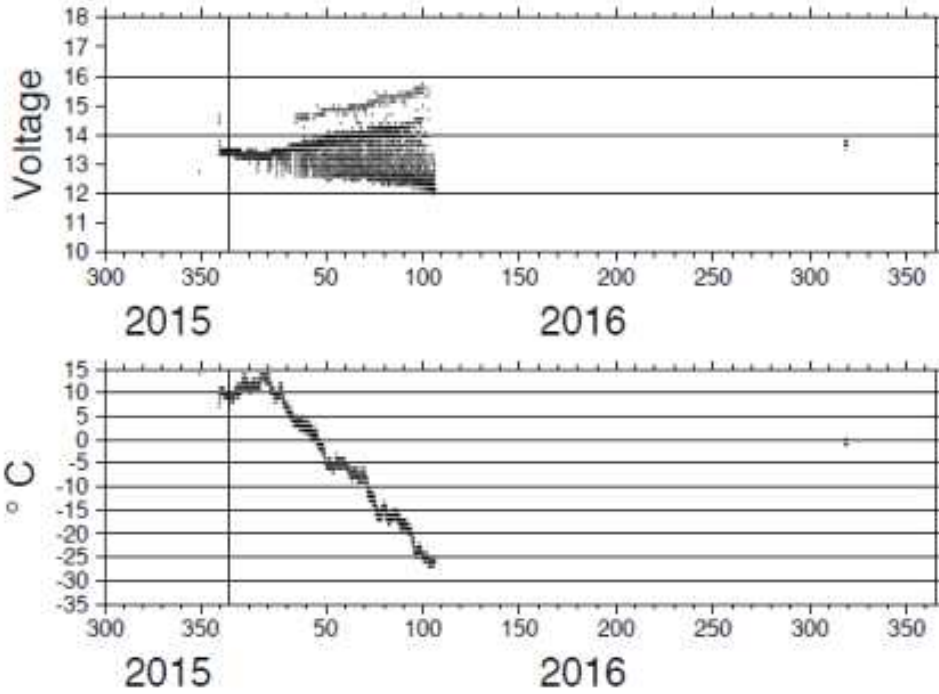


그림 123 기록계 오작동으로 2016년 106일 이후로 기록이 중단된 KDG04 관측소

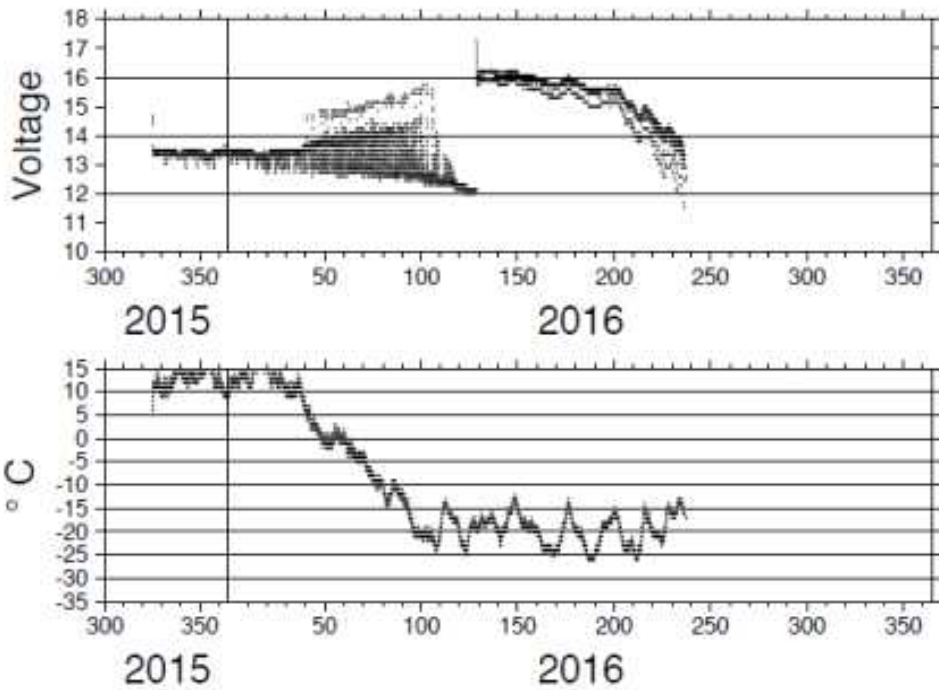


그림 124 겨울철 강풍으로 인해 케이블 및 단열박스가 파손되어 기록이 중단된 KDG07 관측소



그림 125 강풍으로 케이블 및 단열박스가 파손된 KDG07 관측소



그림 126 벨번 화산 관측망 KP02 관측소 전경



그림 127 테라노바만 관측망 유지/보수 작업
 (좌 : 눈에 덮힌 KP07관측소의 지진계 센서, 우: KP02 관측소 전경)

□ 난센빙봉 관측망(KPSN@N)

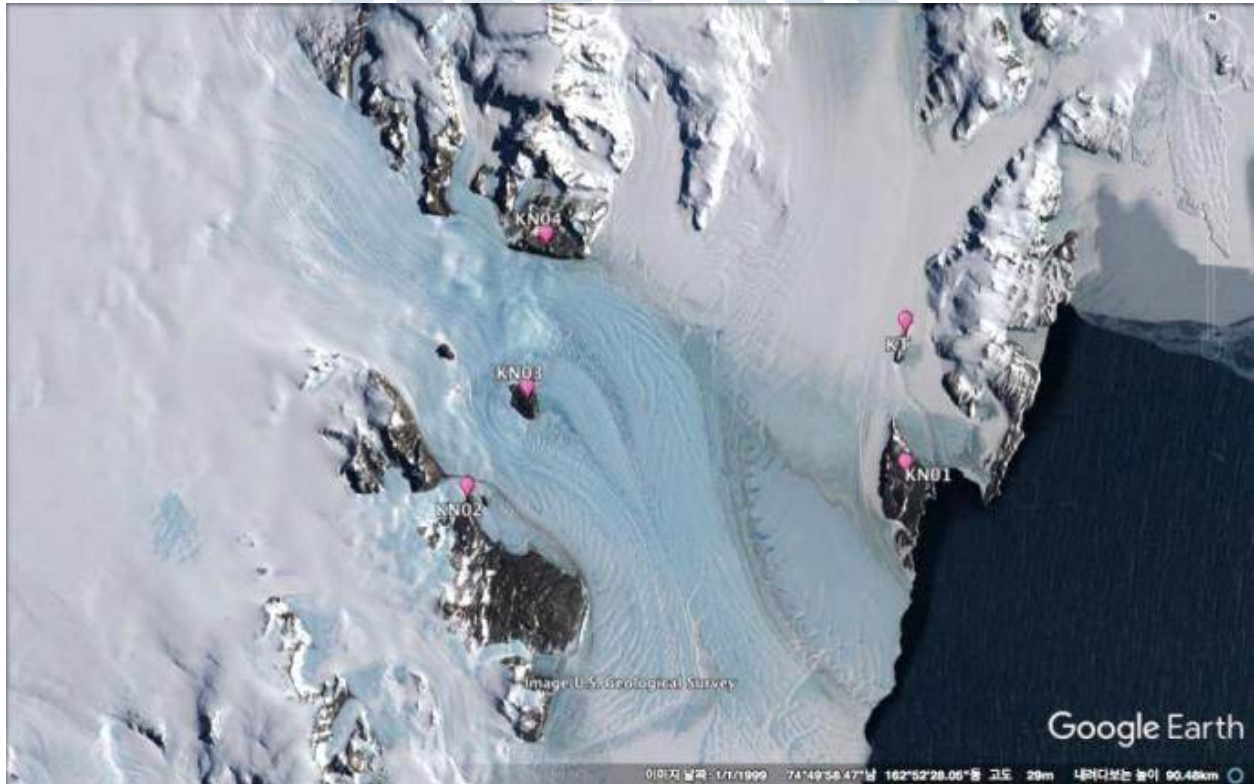


그림 128 난센빙봉 지진 관측망(KPSN@N)

난센빙봉 지진관측망(KPSN@N)의 시스템 구성은 아래와 같다.

- 지진계 센서: Nanometrics Trillium 240 broadband seismometer(T240)
- 지진기록계: Quanterra Q330과 Baler44 package(8 Gb memory × 2)
- 파워시스템: Tower 타입 솔라패널시스템, 충전용 배터리, 리튬 보조 배터리, IRIS/PASSCAL 전력관리모듈박스
- 인클로저: IRIS/PASSCAL 디자인 DAS 인클로저, IRIS/PASSCAL 센서볼트

2차년도(2015-16)에 새로 구축한 관측망으로서 올해 처음으로 데이터를 획득하고 유지/보수작업을 위해 방문하였다. 지난해 4월 초에 깨져 나간 난센빙봉이나 프리슬리 빙하의 거동을 관측하기 위한 지진자료들을 획득할 수 있을 것으로 기대하였으나 대륙에서 난센빙봉으로 불어오는 강한 활강풍의 영향으로 솔라패널과 박스가 파손 되는 등 다른 지역의 관측소들에 비해 피해가 많았다. 강풍에 대비하기 위해 솔라패널 Tower가 붕괴된 관측소는 Tower를 반으로 잘라 높이를 낮춰 새로 설치 하였다.

□ 신규 관측소 설치

현재 각 지진 관측소에 1차전지로 사용되고 있는 리튬배터리의 소모로 인한 비용을 줄이기 위해 재충전이 가능한 국내 Tabos사의 리튬배터리를 사용하여 신규 시험 관측소를 설치하였다. 난센 빙봉에 인접한 Vegetation Island 에 설치한 시험 관측소를 1년간 운영한 후 다른 관측망의 배터리 시스템들도 교체 할 수 있다면 매년 소비되는 소모성 리튬배터리의 비용이 크게 줄어들 것으로 예상된다. 기존에 운영되던 관측소의 전원공급 시스템은 태양광을 통해 충전이 가능한 Gelcell 배터리와 동계 시즌에 사용되는 리튬배터리를 함께 사용하였기 때문에 상황에 맞게 공급원을 전환시켜줄 수 있는 파워박스모듈 또한 함께 사용 되었고, 그에 따라 큰 사이즈의 단열박스를 필요로 하였기 때문에 헬기에 1개 이상의 박스를 실을 수 없는 어려움이 있었다. 시험 설치한 충전식 리튬배터리가 문제없이 운영되어 전원 공급 시스템을 개선 할 수 있다면 소모성 리튬배터리에 사용되는 비용을 절감할 수 있을 뿐 아니라 현장에서의 수송에 관한 문제도 해결될 것으로 생각된다.

난센 빙봉에 인접한 Vegetation Island 에 설치한 시험 관측소를 1년간 운영한 후 다른 관측망의 배터리 시스템들도 교체 할 수 있다면 매년 소비되는 소모성 리튬배터리의 비용이 크게 줄어들 것으로 예상된다. 또한 각 관측소의 유지/보수 작업 수행결과는 아래와 같다.

- 작업내용 : 각 관측소 지진자료 백업 및 배터리 교체작업 수행함
- 장비현황
 - KN01 : 솔라패널 Tower 파손, 기록계 단열박스 파손, 센서 돔 분실
 - KN02 : 솔라패널 Tower 파손, 기록계 단열박스 파손
 - KN03 : 솔라패널 1개 파손
 - KN04 : 솔라패널 1개 파손, 센서 돔 분실

- 지진기록 :
 - KN01 : 2015년 344일 - 2016년 140일 자료 획득(장비파손)
 - KN02 : 2015년 355일 - 2016년 140일 자료 획득(장비파손)
 - KN03 : 2015년 344일 - 2016년 278일 자료 획득
 - KN04 : 2015년 346일 - 2016년 286일 자료 획득
- 보수작업:
 - KN01 : 솔라패널 Tower 재설치, 단열 박스 재설치, 센서 재설치
 - KN02 : 솔라패널 Tower 재설치, 기록계 교체
 - KN03 : 솔라패널 Tower 재설치
 - KN04 : 솔라패널 1개 교체, 센서 돔 재설치



그림 129 2015-16 시즌 신규 설치한 직후의 KN01 관측소의 모습(좌)과 겨울철 강풍으로 파손된 모습(우)



그림 130 강풍에 파손된 KN02 관측소 전경(좌), 솔라패널 Tower를 반으로 줄여 복구한 모습(우)



그림 131 동계시즌 강풍에 파손된 난센빙봉 지진 관측소들의 모습
 (좌측 상단부터 시계방향으로 KN02, KN01, KN02, KN01)



그림 132 Vegetation Island 에 신규 설치한 관측소 전경(KT)

② 해양 탄성과 탐사와 연계한 자료 획득을 위해 임시 지진관측망 설치

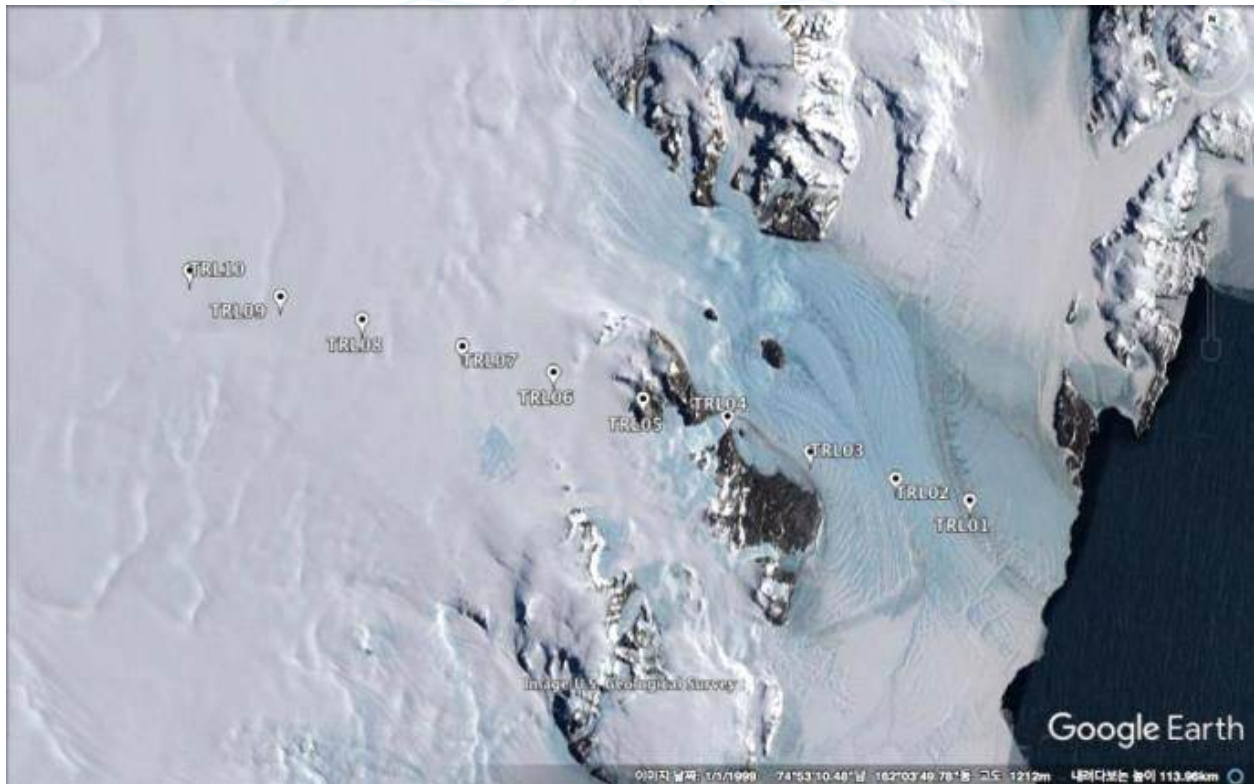


그림 133 난센빙봉 임시 지진관측망(TRL)

3차년도(2015/16) 남극하계 탐사에서는 난센빙봉 앞의 해저면에 위치한 남극 종단산맥 하부 지각권의 정밀 지체구조 규명을 위해 해양 탄성과 탐사가 예정되어 있었으며, 육상에서도 이와 연계한 자료 획득을 위해 난센빙봉 위에도 10기의 임시 지진관측소를 설치 하였다. 아라온에서 수행된 인공탄성과 에너지원(Airgun)의 진행방향에 맞추어 해저면 지진계가 설치되었고 육상에서도 같은 진행방향으로 10km 간격을 두고 10기의 지진계를 설치하였다. 일시적인 관측자료 획득을 위해 구축하는 관측망으로서 기록계 단열박스과 전원공급장치 등 모든 시스템을 최소화 하였으며 센서 돔을 제외한 모든 장비를 단열박스에 넣어 운반하고 설치할 수 있도록 설계하였다.

난센빙봉의 임시 지진관측망(TRL)에 사용된 시스템 구성은 아래와 같다.

- 지진계 센서 : Nanometrics Trillium Compact seismometer
- 지진기록계 : Nanometrics Centaur(TRL01-05), Taurus(TRL06-10),
- 파워시스템 : 리튬 보조 배터리
- 인클로저 : Pelican iM2700

난센빙봉 위의 임시 지진관측망은 해양 탄성과 탐사가 수행되기 수일 전에 구축되었으며 탄성과 탐사 종료 후에 회수하였다. 해안에서 가까운 순서대로 난센빙봉 얼음 위에 3개(TRL01-03), 암반지대 2개(TRL04-05), 대륙빙하위 눈이 많이 쌓인 곳에 5개(TRL06-10)를 설치하였다.

난센빙봉 상에 설치 된 3 곳의 관측소(TRL01-03)는 얼음위에 설치되어야 하는 어려움이 있었지만 주변에 쌓인 눈을 활용해 센서돔과 기록계 박스를 절반정도 묻을 수 있었고 1m짜리 핸드드릴을 이용해 얼음에 구멍을 뚫어 GPS안테나를 설치하였다. 눈이 다져져 바람을 막을 수 있을 것으로 생각했지만 얼음 위에 설치한 관측소에는 눈이 날려와서 쌓이기 보다는 강한 바람에 눈이 깎여 나가는 지역으로 약 2주후에 재방문 했을 때는 센서 돔이 날아간 곳도 있었다(TRL02, 03).

암반지대에 설치한 2곳의 관측소(TRL04-05)는 주변 지형을 활용해 어렵지 않게 설치 할 수 있었으나 헬기가 착륙할 수 없을 만큼 기상이 좋지 않아 최종적으로 회수하지 못하였다. 다음 시즌에 방문 하여 데이터와 장비를 회수 할 예정이다.

난센빙봉 위쪽의 대륙빙하에 설치한 5곳의 관측소(TRL06-10)는 눈이 많은 지형 특성상 눈을 활용해 센서 돔과 기록계 박스를 보호하였으며, 눈이 날아가지 않고 쌓이는 지역이라 회수를 위해 재방문 했을 때도 분실한 장비 없이 회수 해 올 수 있었다.

난센빙봉 주변에 설치한 임시 지진 관측소에서 획득한 자료는 해저면 지진계의 자료들과 연계하여 테라노바 만의 Terror Rift의 지체구조를 정밀하게 분석하는 데에 활용될 예정이다. 각 관측소의 지형에 따른 설치 방법과 작업 과정은 아래와 같다.



그림 134 난센빙봉 위 얼음 지형에 설치한 임시 지진관측소 설치 과정



그림 135 암반지대에 설치한 임시 지진관측소 설치 과정



그림 136 대륙 빙하 위의 눈이 많은 지형에 설치한 임시 지진관측소 설치 과정

③ 측지 모니터링 시스템 설치 및 유지 보수

□ 캠벨 빙하 지역 GPS 관측망

캠벨 빙하는 장보고 기지의 북쪽에 위치한 가장 가까운 빙하로 멜버른 화산 옆을 지나 장보고 기지 앞바다로 흘러들어 빙설을 형성하는 작은 빙하이다. 화산과 빙하의 상호 작용, 빙하 하부 용융수의 거동 등을 연구하기 위하여 2015/2016년 하계기간에 3기의 GPS(KGPS20, KGPS21, KGPS22)가 설치되어 지난 1년간 운영되었다. 2016/2017 하계 기간에는 연속적인 빙하의 움직임을 정밀하게 모니터링하기 위하여 2 측점(KGPS21K, KGPS24K)에서 약 5일간 GPS 연속 측정을 수행하였다. KGPS21 측점 부근에서 관측된 고도 및 속도 변화를 보다 집중적으로 관측하기 위하여 KGPS22측점에 있던 GPS를 KGPS23 측점으로 이동 설치하여 향후 1년간 관측이 이루어질 예정이다.

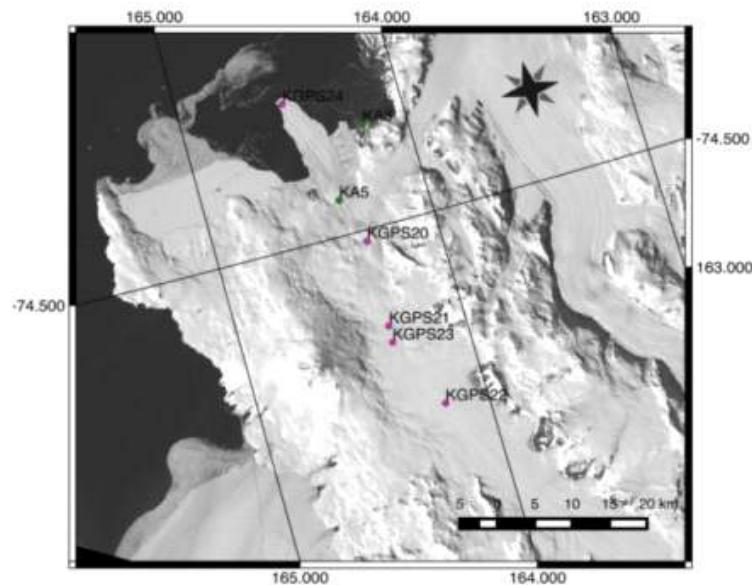


그림 137 캠벨 빙하 GPS 관측망 위치도

KGPS21 측점에서 관측된 GPS 자료는 수평 이동 및 수직 변위에서 유의미한 변화를 보여주고 있다. 수평 변위로부터 산출된 이동 속도 양상을 살펴보면, 약 90일경(3월말-4월초)부터 이동 속도가 미세하게 증가하다가 약 120일경(4월말-5월초)부터 속도가 뚜렷하게 감소하였다. 200일경(7월말)부터는 속도 감소가 멈추고 다시 속도가 증가하기 시작하였다. 5월경에 발생한 속도 변화에 선행하여 수직 변위가 급격히 감소는 것이 관측되므로 수직 변위가 속도 변화의 원인을 제공하였을 가능성이 있다. 수평 변위의 변동성을 살펴보면 빙하의 진행 방향으로 타원에 가까운 운동을 하고 있음을 알 수 있다.

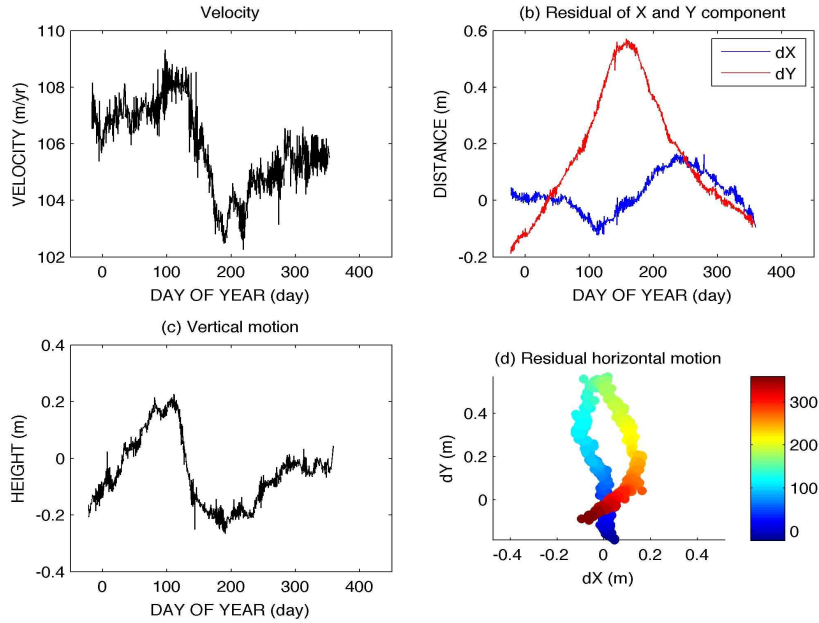


그림 138 KGPS21측점의 GPS 관측 결과. (좌상) GPS 속도 변화, (우상) 선형 성분이 제거된 수평 변위, (좌하) 선형 성분이 제거된 수직 변위, (우하) 수평 변위의 공간적 형태(색깔은 시간을 의미함)

KGPS21의 하류에 위치한 KGPS20 측점에서도 속도 변화와 수직 변위가 관측된다. 약 100일경(4월초) 급격히 속도가 증가하다가 약 130일경 급격히 속도가 감소하여 증가하기전 속도로 복귀하고 이후 점진적으로 속도가 감소하는 양상을 보인다. 급격한 속도 감소가 발생한 약 130일경 수직 변위는 급격히 증가하였다가 서서히 원래 고도로 돌아가는 양상이 나타난다.

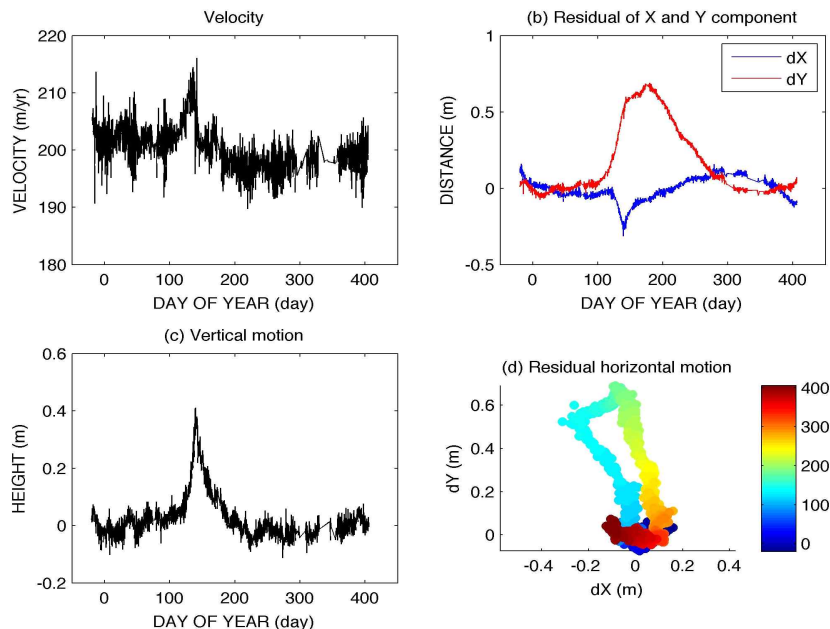


그림 139 KGPS20측점의 GPS 관측 결과

반면, KGPS21측점 상류에 위치하는 KGPS22 측점에서는 뚜렷한 속도 변화와 고도 변화가 관측되지 않는다. 속도 변화는 1 m/yr 내외로 매우 작고 고도 변화 역시 5cm 내외로 KGPS21과 KGPS20에서 관측되는 뚜렷한 변화는 보이지 않는다.

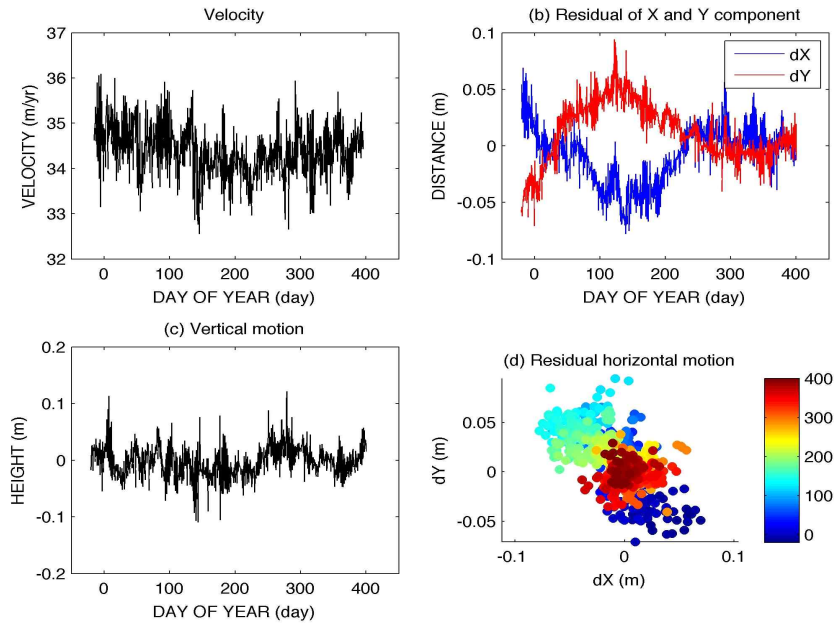


그림 140 KGPS22측점의 GPS 관측 결과

GPS 측점에서 관측된 1년간의 빙하 거동 양상으로부터 캠벨 빙하의 거동 특성을 추정할 수 있다. KGPS22측점에서는 매우 일정한 속도로 빙하가 흘러가고 있으며 경사에 따른 고도 변화를 제외하면 시간에 따른 고도 변화도 관측되지 않는다. 반면, KGPS21 측점 하류에서는 일시적인 속도 및 고도 변화가 있는 것으로 보아 빙하 하부의 용융수가 부존하는 것으로 추정된다. KGPS21 측점 하부에 상시 존재하는 빙저호가 존재하는지는 확인되지 않았으나 빙저호 혹은 얇은 용융수층이 빙하와 기반암 사이에 존재한다는 가정이 GPS 관측 자료를 설명할 수 있다. 약 100일경까지 KGPS21 측점 고도가 높아지는 것은 하부의 용융수층이 점점 두꺼워지는 것을 의미하며, 용융수층의 증가는 빙하 하부의 마찰력을 감소시켜 빙하 이동 속도가 증가하게 한다. 110일경 급격한 배수가 발생함에 따라 용융수층이 얇아지면서 빙하 바닥의 마찰력이 다시 증가함에 따라 빙하 이동속도는 급격히 감소한다. 200일경 배수량이 감소하면서 용융수층이 다시 두꺼워지기 시작하며 빙하 이동속도도 느려지기 이전 속도로 복귀하는 형태를 가지게 된다. KGPS21 측점 하부에서 배수된 용융수는 빙하를 따라 흘러 내려가 KGPS20 측점 부근을 통과하게 되며 이때 용융수의 통과에 의해 KGPS20 측점 부근의 고도가 급격히 증가하였다가 감소하는 경향을 보이게 된다. 용융수층의 급격한 증가에 따라 이동 속도 역시 일시적으로 증가하였다가 원상태로 복귀하는 양상을 보인다.

④ 장보고기지 절대 중력 측정

장보고기지 주변의 장기적인 중력 변화를 모니터링하고, 1년째 운영중인 초전도 중력계의 보정을 위하여 장보고기지 중장비동(2월 2일 - 2월 10일)과 초전도 중력계실(2월 10일 - 15일)에서 절대 중력을 관측하였다. 사용된 장비는 A10 절대 중력계로서 10 μ Gal의 정확도를 가지고 있다.



그림 141 (좌) 장보고기지 중장비동 절대 중력 측정과 (우) 초전도 중력계실에서의 절대 중력 측정

절대 중력 측정시 몇가지 문제점이 발견되었으며, 다음과 같이 해결되었다.

① 레이저 파워 감소 문제

- 5-axis마운트와 연결된 광섬유의 끝부분을 탈거 후(연결부위가 아닌 광섬유의 출력부분 마운트를통째로 탈거해야 함), 레이저미터를 연결하고, x, y 및 수직 스크류5개를 조정하여 출력치가 최대가 되도록 조정하였다. 상단의 3개 스크류를 먼저 조정하고, 400 uw전 후 값이 나오지 않으면 x,y 스크류 - 상단 3개 스크류 순으로 반복하여 조정한다. 드라이버의 접촉이나 외부 충격에 5-axis 마운트가 굉장히 민감하게 반응하니, 레이저 출력을 완전히 잃어버리지 않도록 고도의 집중력이 필요하다.

② IB unit 레이저 센서 문제

- 광섬유 마운트로부터 출력된 레이저가 센서에 닿지 않는 경우가 발생하는 경우, 반사경 각도 조절로 해결할 수 있다. 오실로스코프를 컨트롤박스의 analog fringe 단자에 연결 후, 반사경의 각도를미세하게 변형해가며 센서 앞 레이저 입사위치를 종이 등으로 개폐를 반복했을 때, 오실로스코프에 표시되는 파동의 진폭이 최대가 되는 거울 각도를찾아야 한다. 이 때, 센서는 초기 공장 설정에 의해 회로에 대해 정확히 수직으로 조립되어있지 않으므로, 이를 다시 수직이 되도록 구부린다던가, 레이저의 입사 위치를 정 중앙으로 조정하면 레이저 경로에 영향을 미치거나 수신되는 레이저의 파워가 최대치를 보이지 않는다.

③ 컨트롤박스 케이블 연결 문제

- 컨트롤박스에 있는 케이블이 상호간에 다른 위치에 연결되어 있을 경우, 컨트롤박스과 IB (혹은 Dropper) 간에 명령/인식 체계가제대로 작동하지 않는다. 이번 설치의 경우, 레이저 모드를 전환시켜주는 케이블이 잘못 연결되어 red/blue 측정값들 간의 간격이 3ugal 정도의 큰 차

이를 보였다.

④ 관측 결과는 다음과 같으며 향후 보다 정교한 후처리 작업이 요구된다.

- 중장비동과 중력관측실 측정 모두에서 10ugal 전후의 표준편차 내에서 절대중력 측정되었다.
- 두 측정 모두에서 6-8일 주기의 신호가 관찰되나, 이는 초전도 중력계 자료에서는 확인되지 않는다.
- ambient noise 강도의 변동과 Drop gravitiescatter의 상관관계가 확인되었다.
- 초전도 중력계에서 관측된 ambient noise를 분석하면 A10의 drop gravitiescatter를 줄이고, 절대 중력 측정 정확도를 높일 수도 있을 것이라 생각된다.

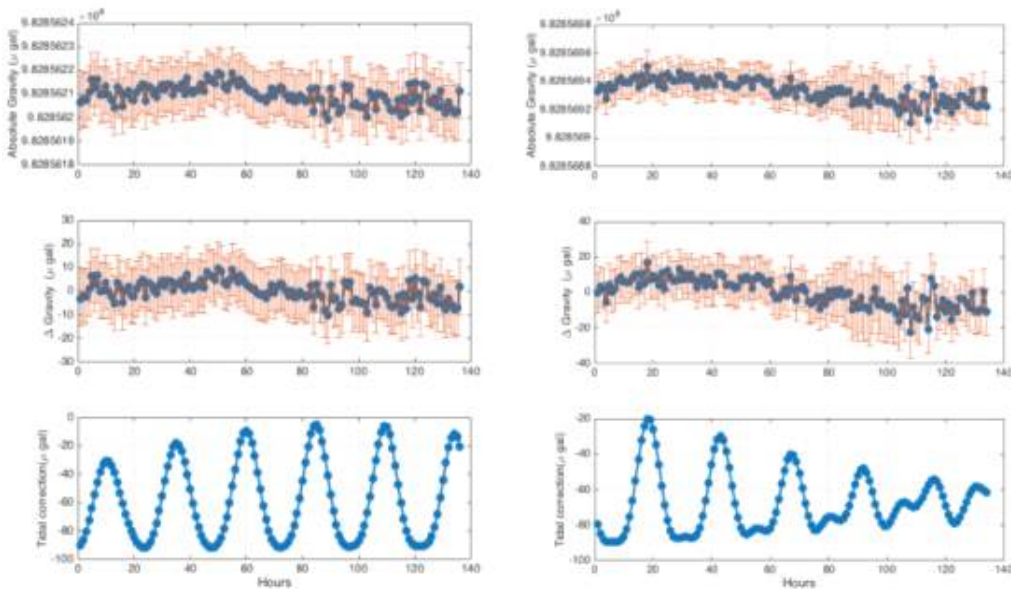


그림 142 (좌) 중장비동의 절대 중력 관측 결과 및 (우) 초전도 중력계실의 관측 결과

⑤ 초전도 중력 관측 운영

2016년 1월부터 시작된 초전도 중력계의 운영은 자료의 누락없이 성공적으로 이루어지고 있으며, 2016/2017년 하계기간 중에 컴프레셔를 교체하는 작업을 수행하였다. 챔버에 저장된 헬륨은 현재 약 96%를 유지하고 있어 약 4%의 빠져나간 것으로 추정되어 매우 안정적으로 유지되고 있음을 알 수 있다.

약 1년 2개월간의 중력 관측 자료에서 나타나는 가장 큰 신호는 지구 조석에 의한 중력변화이며, 두 번째로는 기압 변화에 따른 대기효과이고, 세 번째로는 해양 조석에 의한 지각 변형의 영향이다. 절대 중력 관측을 통한 초전도 중력계의 스케일링값(scaling factor)를 결정하여야 하나 이번 탐사 기간에 관측된 절대 중력자료의 보다 정밀한 자료처리가 필요하다. 이에 앞서, 지구 조석 모델을 이용하여 scaling factor를 먼저 결정하였다. 즉, 관측자료에서 대기효과를 먼저 제거한후, 지구 조석 모델 및 해양 조석 모델과 관측 자료가 가장 잘 일치하는

scaling factor를 결정하였다. 이를 바탕으로 지구 조석 및 해양 조석이 제거된 잔여 중력 변화량을 산출하였다. 초전도 중력계는 연간 약 5 μGal 이내의 drift를 가지고 있는 것으로 알려져 있는데, 관측 자료에서 산출된 drift값은 약 5.9 μGal 이나, 초기 약 6개월간은 중력계의 안정 과정에 따라 drift가 크게 관측되는 것으로 알려져 있어 6개월 이후의 drift는 5 μGal 이내로 유지되고 있음을 알 수 있다.

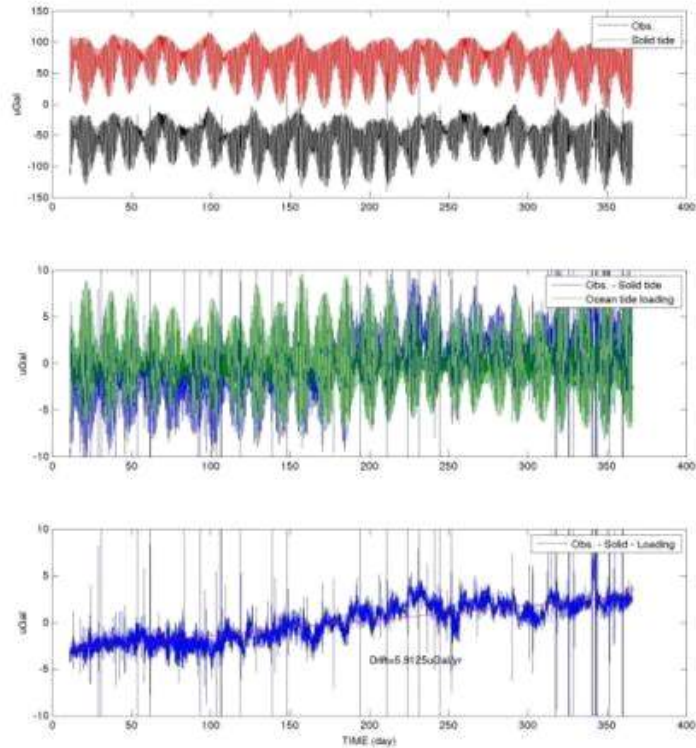


그림 143 2016년도 초전도 중력계 관측 결과. (상) 지구조석 모델과 관측값의 비교, (중) 지구조석이 제거된 관측값과 해양 조석 모델의 비교, (하) 지구 조석 및 해양 조석이 제거된 잔여 중력값

⑥ 난센 빙붕 열수 시추 및 빙붕 모니터링 시스템 설치

극지연구소/콜로라도 대학/알래스카 대학의 협력을 통해 2017년 2월 12일 난센 빙붕에 빙붕 모니터링 시스템인 AMIGOS-II (Automated Meteorology-Ice-Geophysics Observing System, mark II)를 설치하였다. AMIGOS-II는 해양 관측 케이블을 탑재하고 있는 자동화된 다중 센서 관측 시스템으로서 열수 시추를 통해 확보한 시추공을 통해 해양 케이블이 설치된다. 기상 자료, 사진 영상, 정밀 GPS 자료, 온도센서를 이용한 표층 빙하 온도, 광케이블을 이용한 빙붕 하부 해수층의 온도 프로파일을 연속적으로 관측한다. 해수층 내 두 지점에서는 해수 속도, 전도도, 온도가 CTD 시스템을 통해 관측된다.

인공위성 영상(Landsat 8, Path 063 Row 113, 2016년 2월 9일)과 Cryosat-2로부터의 빙붕 두께를 바탕으로 빙붕 두께가 약 385m인 위도 74.783도, 경도 163.525도 지점(장보고기지로부

터 약 25km)을 열수 시추 및 AMIGOS-II 설치 위치로 확정하였다. 이 곳은 프리슬리 빙하의 중심에서 베지테이션 섬을 향하는 동쪽 방향에 위치한다. 이 지점은 프리슬리 및 리브 빙하 상류에서 불어오는 카타바틱풍에 의해 운반되어온 눈이 쌓이는 곳으로 확인된 크레바스는 시추지점에서 동쪽과 북동쪽 약 2km에 위치한다. 하부 해수층의 깊이는 알려져 있지 않다.

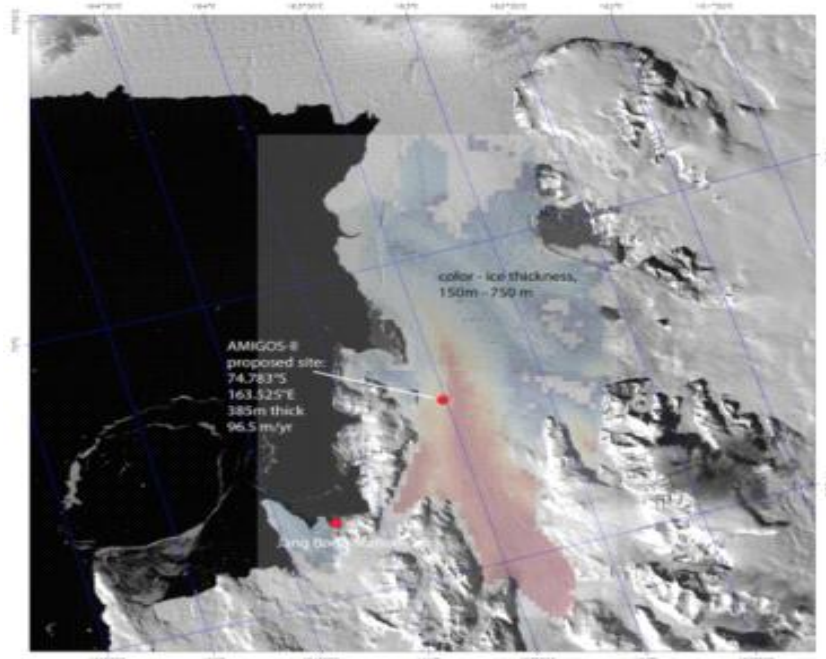


그림 144 난센 빙봉의 Landsat 8 영상 및 Cryosat-2로부터의 빙봉 두께

극지연구소

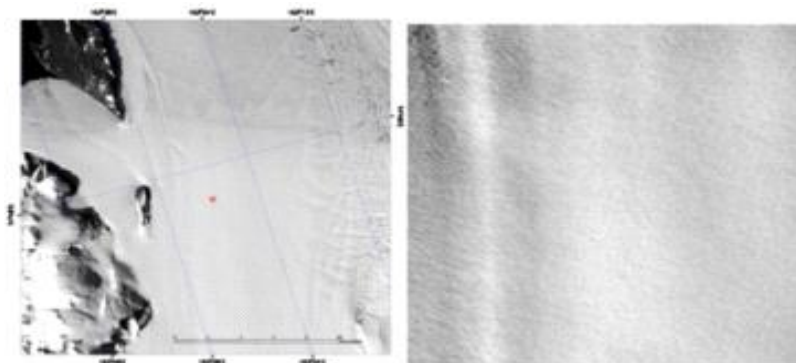


그림 145 (좌) 시추 위치, (우) 시추 위치의 확대 영상

⑦ AMIGOS-II 시스템

AMIGOS-II 시스템은 3.5m 높이의 다중 센서 무인 관측 장치로서 기상 센서(Vaisala WXT250), 풍향-풍속계(RM Young 5103), 조도/알베도계(dual Apogee silicon-cell

pyranometer), 이중 밴드 GPS(TopCon GRS-1000), 이중 해상도 카메라(MOBOTIX DualDome D15D)로 구성된다. 빙붕 아래 해수층을 관측하기 위한 해양 케이블은 다중 온도 센서(1, 2, 4, 8, 12, 16, 24, 36m 깊이), 광섬유 분산 온도 센서(Sensornet DTS), 해양 계류 센서(SeaBird CTD, Nortek AquaDopp, 빙붕 하부 25m 및 케이블 끝)를 가지고 있다. 태양전지 및 배터리에 의해 구동되며 관측 자료는 이리듐 통신을 통해 송신된다.

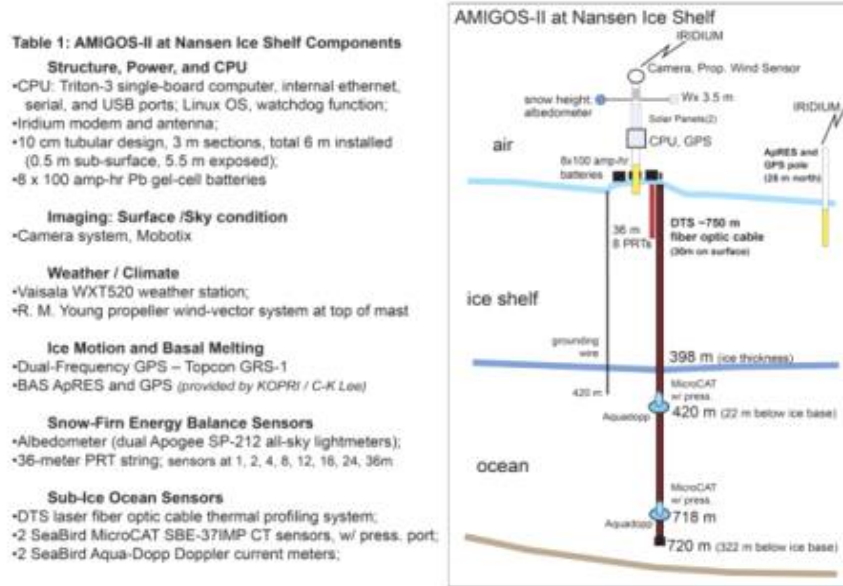


그림 146 난센 빙붕에 설치된 AMIGOS-II 시스템의 개요

극지연구소

㉞ 시추 및 설치

2017년 1월 29일 사전답사를 통해 시추 위치를 선정하고, 2월 3일 캠핑 참가 인원, 장비, 연료, 캠핑 장비 및 식량 등을 운송하였다. 시추를 시작하기전 2월 5일 시추지점 및 인근 지점에서 ApRES(Automated phase sensitive Radio Echo Sounding) 탐사를 수행하였다. 시추지점 북쪽 25m 지점, 동쪽으로 250m 지점, 서쪽으로 250m 지점에서 ApRES 측정을 수행하였으며 각각 408m, 382m, 440m의 빙붕 두께가 관측되었다. 텍사스 대학 UTIG에서 수행하고 있는 항공 RES 탐사는 시추공에서 약 100m 떨어진 지점에서의 빙붕 두께가 약 395m임을 보고하였다. 2월 5일-11일 사이에 두 개의 시추공을 시추하였으며, 두 시추공 모두 약 396m에서 해수층을 만났다. 기존 경험에 의하면 시추시 2m의 하부 얼음이 떨어져 나가는 것으로 추정되므로 빙붕의 실제 두께는 약 398m 이다. 두 시추공을 성공적으로 시추하였으나, 예상보다 낮은 얼음 내부 온도로 인하여 시추시간은 예상을 초과하였다. 이로 인하여 퇴적 코어, 해수 샘플링, 시추공 카메라의 촬영은 취소하였다. 접지선을 설치하기 위한 첫 번째 시추공은 2월 8일 완료되었고, 420m(빙붕아래 22m) 깊이에 접지선을 설치하였다. 두 번째 시추공은 2월 12일 완료되어 해양 케이블을 삽입 설치하였다.



그림 147 열수 시추 현장



그림 148 열수 시추 과정

극지연구소



그림 149 AMIGOS-II 조립 과정



그림 150 접지 와이어 및 무게추 설치



그림 151 AMIGOS-II 설치 모습

해양 케이블을 720m(빙붕하부 322m) 깊이까지 삽입하여, DTS시스템의 반사경은 719.5m 깊이에 위치한다. Aquadopp 유속계와 SeaBird CTD를 420m, 720m 깊이에 설치하였으며, 총 8개의 표층 온도 센서를 1, 2, 4, 8, 12, 16, 24, 36m 깊이에 설치하였다.

㊤ 초기 관측 결과

시추공 내 장비들의 초기 결과는 아래 그림들과 같다. CTD와 Aquadopp 장비에서 관측된 해수 온도는 매우 비슷하다. 420m에 위치한 CTD에서의 온도는 -1.96°C , 718m CTD는 -

2.05℃를 기록하였다. 표면 결빙 온도에 가까운 이 온도는 난센 빙봉 아래 해수층이 해빙의 생성시 형성된 극빙봉해수(polar shelf water)로 채워져 있음을 지시한다. 하지만 해당 깊이 압력 하에서의 녹는 점보다 높은 온도여서 빙봉 하부에 혹은 장비 케이블에 결빙이 생기지는 않을 것으로 보인다. 염분 자료는 CTD의 염분 측정장치가 초기에 결빙된 것을 지시한다. 염분 자료는 점진적으로 개선되고 있으나 여전히 명확하지 않다.

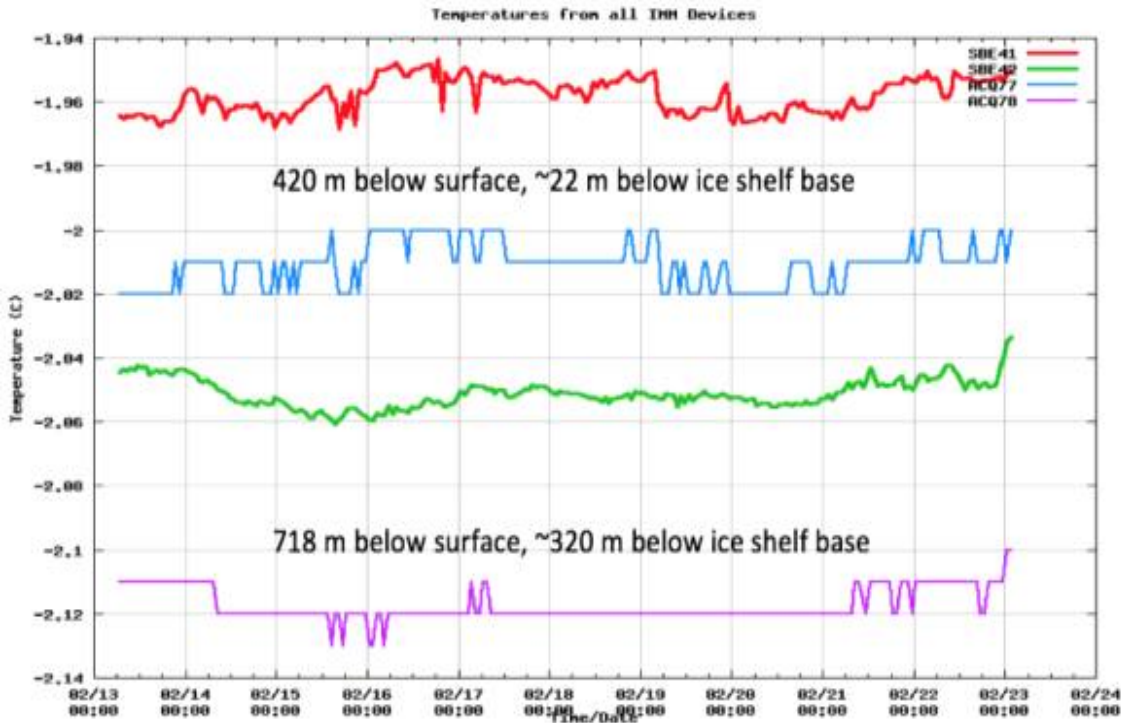


그림 152 CTD와 Aquadopp에 관측된 온도 자료

DTS용 광케이블의 상부 수십m는 표면의 눈층에 묻혀 있어 기온 혹은 표면 눈층의 온도를 측정한다. 표면에서 약 40m 깊이 까지는 공기로 채워진 시추공의 온도를 나타내고 있으며, 그 아래로는 열수 시추시 사용된 물로 채워진 부분이며 점진적으로 결빙이 이루어지고 있는 것을 확인할 수 있다. 표층 온도 센서들의 온도는 여전히 평형 상태로 돌아가는 과정을 보여주고 있다.

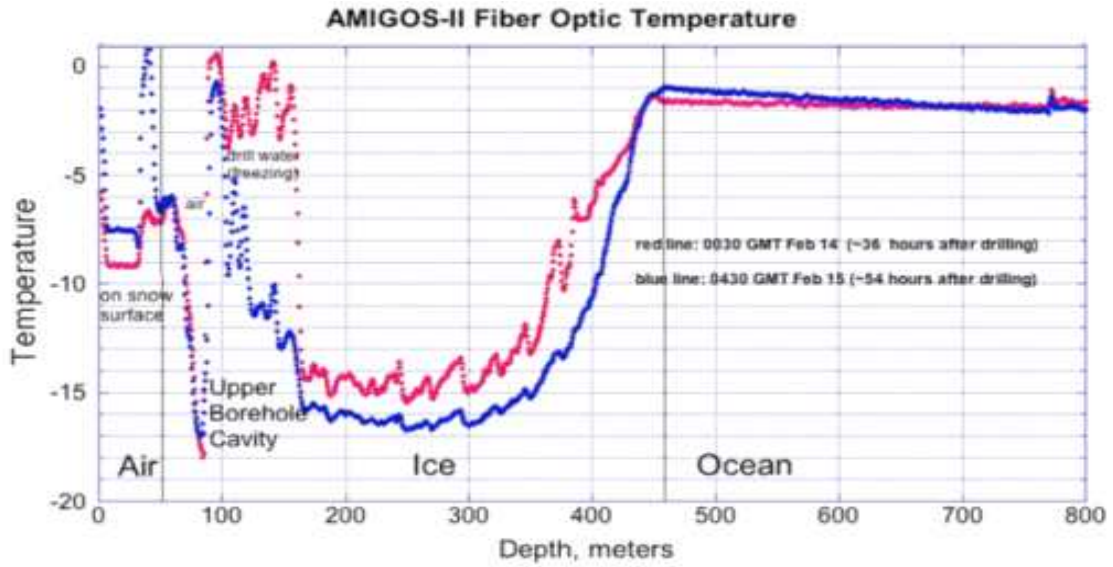


그림 153 DTS 광케이블에 의해 관측된 온도 구배

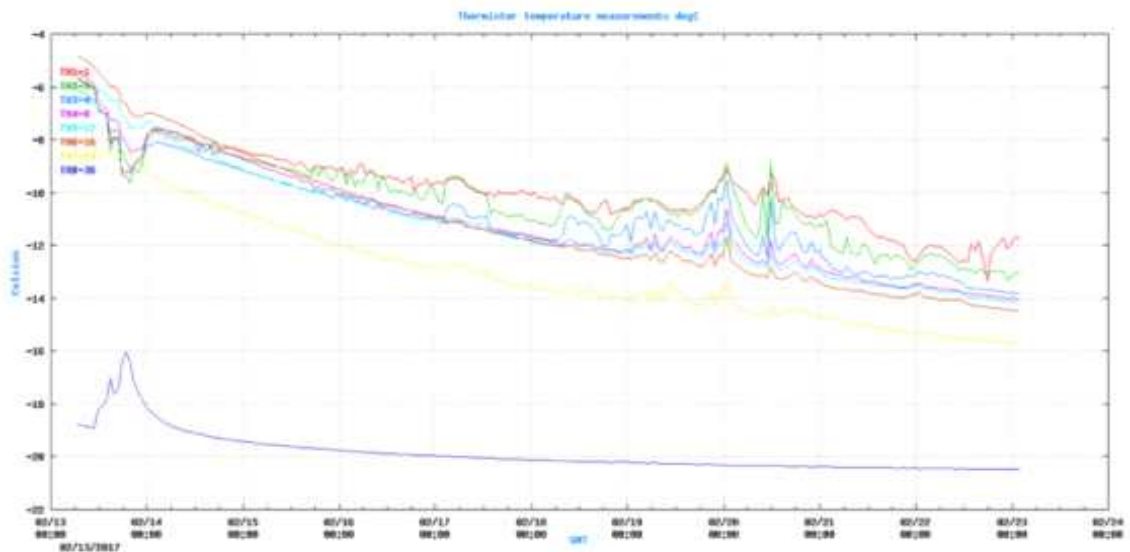


그림 154 8개의 표층 온도 센서에서 측정된 온도 변화

향후 AMIGOS-II 시스템에 UHF 무선 송신 시스템을 추가할 필요가 있으며, 장보고기지로의 송신은 멜버른 화산에 중계기를 설치하면 가능할 것으로 분석되었다. 향후 이 시스템의 추가 설치를 통해 실시간 자료 송신을 위한 위성 통신료를 절감할 수 있을 것으로 기대된다. 상부에 위치한 센서들은 바람에 의한 시추공 내부의 공기 순환에 의해 온도 변화가 관측된다. 36m 깊이에 위치한 온도센서는 보다 안정적인 온도 변화를 보이고 있으며 시추후 10일 후에 영하 20.5도에 도달하였다.

2월 23일 이후 AMIGOS-II와의 데이터 통신이 두절되었지만, 측정 자료는 내부적으로 기록되고 있는 것으로 생각된다. AMIGOS-II의 제어 소프트웨어의 문제인 것으로 파악되며 다음 탐사 기간중에 재방문이 필요하다.

□ 드라이갈스키 빙설 및 난센 빙봉의 ApRES 탐사

ApRES 탐사는 레이더파를 이용하여 빙봉의 두께를 산출하고 연속적으로 혹은 간헐적으로 같은 장소에서 빙봉 두께를 탐사한 후 레이더파의 위상 변화를 이용하여 빙봉의 하부 용융 및 Firn층의 압밀 정도를 산출하는 탐사 기법이다. 드라이 갈스키 빙설의 하부 용융량을 산출하기 위하여 3 측점에서 ApRES 측정을 실시하였으며, 그 중 드라이갈스키 빙설의 끝단에 위치한 1 측점에 장기 모니터링을 수행하고 있다. 난센 빙봉의 열수 시추 및 AMIGOS-II를 이용한 빙봉 하부 모니터링 연구와 연계하여 ApRES 탐사가 3 측점에서 수행되었으며, 이주 1 측점에서 장기 모니터링을 수행하고 있다. 열수 시추 지점을 기준으로 동-서 약 250m 지점과 열수 시추 지점에서 ApRES 탐사를 수행한 결과 각각 382m, 440m, 408m의 빙봉 두께가 관측되었으며 인공위성 고도자료로부터 추정되는 빙봉두께의 양상과 잘 일치하는 결과를 획득하였으며, 시추에서 확인된 빙봉두께와 약 10m의 차이가 나는 것으로 확인되었다. 이런 차이는 얼음에서의 레이더파의 속도가 지역에 따라 다르기 때문인 것으로 생각된다.

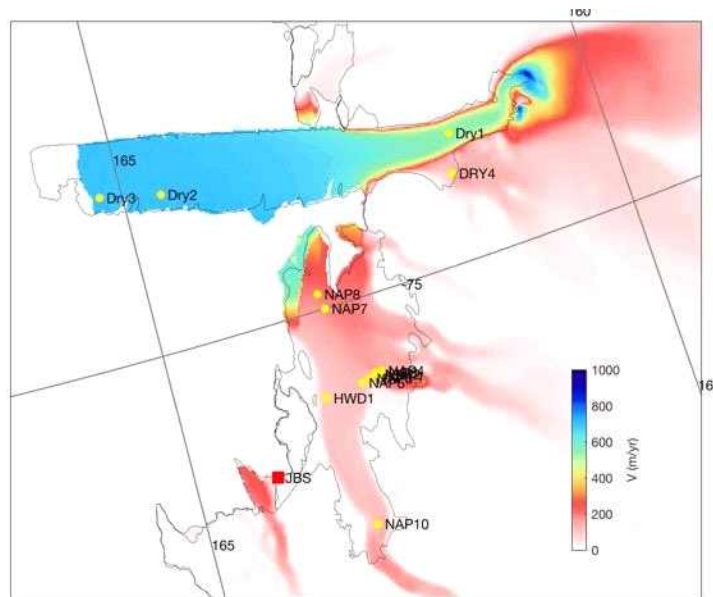


그림 155 ApRES 탐사 위치



그림 156 ApRES 탐사 현장 (ApDRY3)

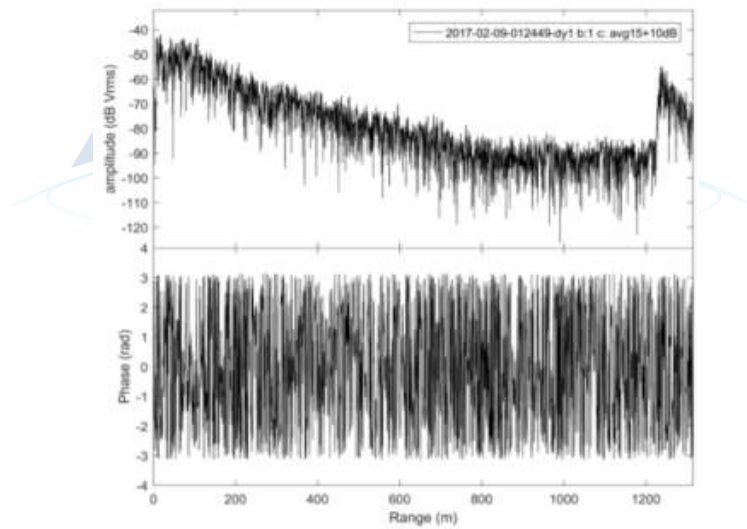


그림 157 ApDRY1 측점에서의 레이더 반사
파: 빙붕 두께 1240m

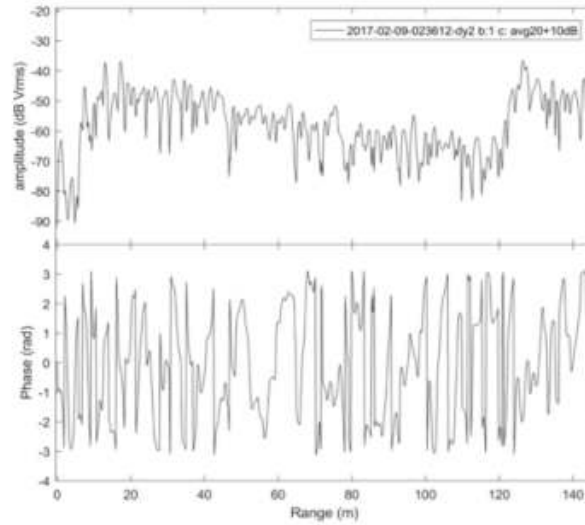


그림 158 ApDRY2 측점에서의 레이더 반사
파: 빙붕두께 127m

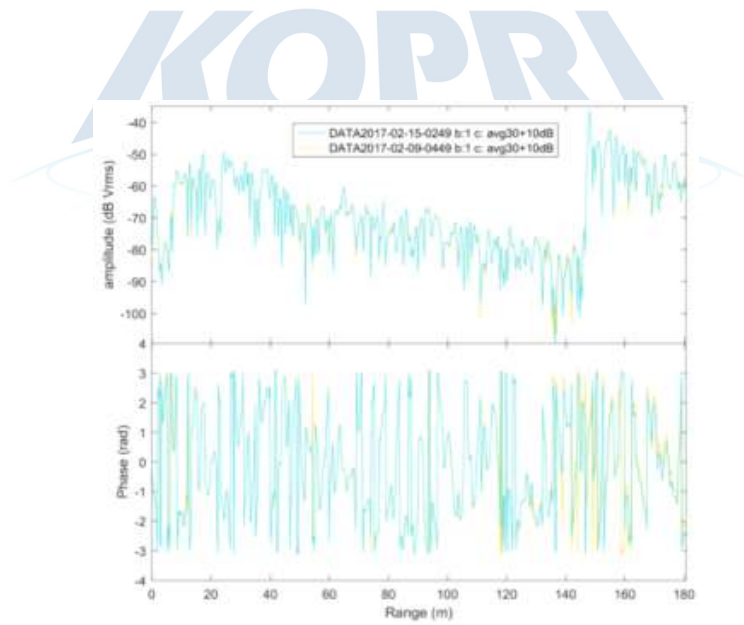


그림 159 ApDRY3 측점에서의 레이더 반사
파: 빙붕두께 148m

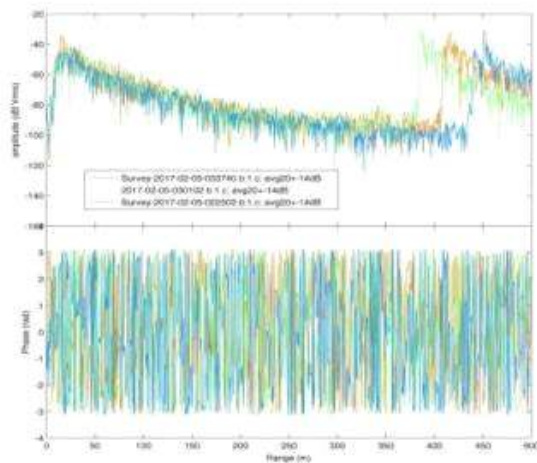


그림 160 ApHWD1, ApHWD2, ApHWD3 측점의 레이더 반사파: 빙붕두께 각각 382m, 440m, 408m

⑧ 항공 빙하투과레이더 및 중력 탐사

난센 빙붕과 드라이갈스키 빙설 지역의 빙붕 두께를 매핑하기 위한 항공 RES 탐사를 미국 UTIG와 공동으로 수행하였다. 항공 빙하투과레이더 탐사 시스템은 헬리콥터에 탑재하여 탐사를 수행하였으며, 빙하투과레이더(Ice Penetrating Radar), 레이저 고도계(laser altimeter), 카메라로 구성되어 있다.



그림 161 헬리콥터 탑재 빙하투과레이더 시스템

미국 UTIG에서 개발한 빙하투과레이더의 사양은 다음과 같다.

- 60 MHz 중심주파수, 15 MHz chirp
- 1microsec 펄스 폭
- 6250 Hz PRF, 32x hardware stacking
- 8kW peak transmit power (~50W average power)
- 14 bit digitizer; high and low gain 채널 독립 기록
- 좌우 안테나 독립 기록

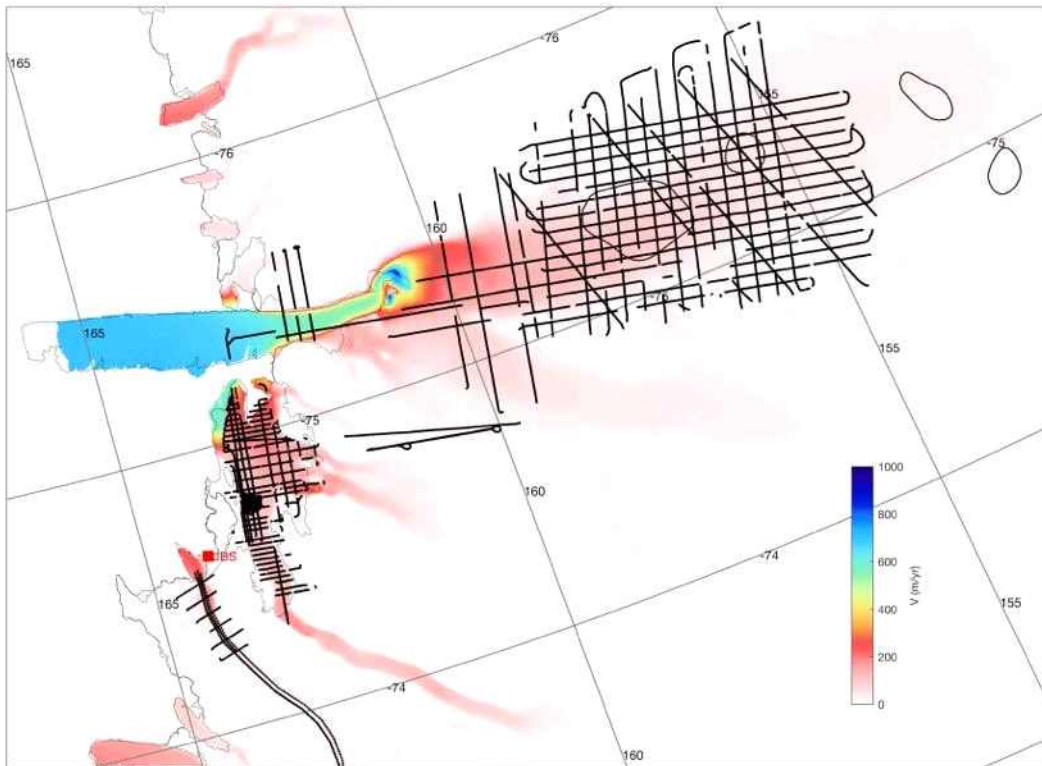


그림 162 항공 빙하투과레이더 측선도(흑색실선)

항공 레이더 탐사 결과와 열수 시추 지점에서의 실측된 빙붕의 두께를 비교한 결과 수 m 이내의 정확도로 빙붕 두께를 탐지하였음을 확인하였다.

드라이갈스키 빙설과 난센 빙붕 하부의 해저면 고도 및 해수층 두께를 파악하기 위하여 항공 중력 탐사를 수행하였다. 중력탐사에 사용된 GT-1A 항공 중력계는 3-axis stabilizer에 의해 안정적인 중력 측정이 가능하며, 1 mGal의 정확도를 가지고 있으며, 150초 필터를 통해 측정값을 획득하였다. 지오폰을 이용한 탄성과 탐사 및 열수 시추 지점에서 획득한 자기지전류 탐사 자료, 난센 빙붕 끝에서 신규로 획득된 멀티빔 자료와의 복합 역산을 이용하여 보다 정확한 난센 빙붕 하부의 해수층 두께를 추정할 수 있을 것으로 기대된다.

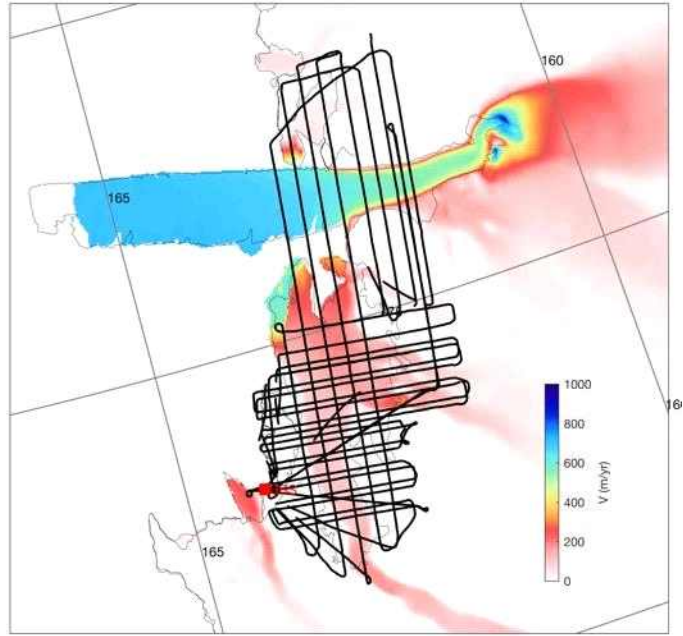


그림 163 항공 중력 탐사 측선도(흑색실선)

□ 난센 빙봉의 육상 지표투과레이더 탐사

난센 빙봉 중심부에 발달된 빙봉 하부 채널의 존재를 확인하기 위하여 캐나다 Waterloo 대학/Carleton 대학과 공동으로 육상 지표투과레이더(GPR) 탐사를 수행하였다. 육상 지표투과레이더 탐사는 항공 빙하투과레이더 탐사 자료 및 빙봉 아래에서 운용된 AUV(Automated Underwater Vehicle)의 탐사 결과와의 비교를 통하여 빙봉 하부 채널이 존재 여부, 거친 정도, 전단 경계부(shear margin)의 특성 등을 파악하는데 이용될 예정이다. 총 9일간의 탐사를 통하여 84km에 달하여 GPR 탐사 자료를 획득하였다.



그림 164 난센 빙봉 육상 레이더 탐사

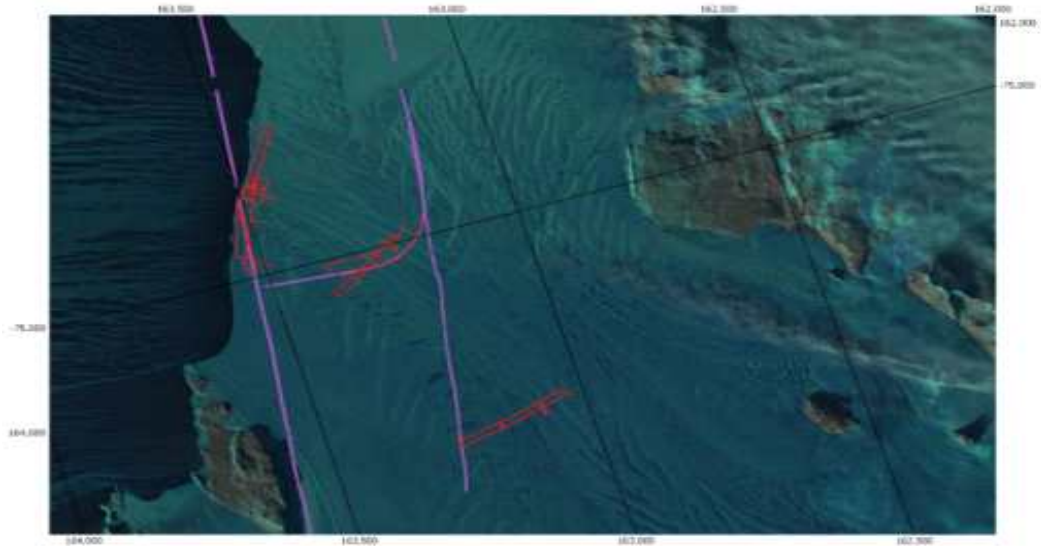


그림 165 난센 빙봉의 육상 GPR 탐사 측선(적색 실선). 보라색 선은 기존 항공레이더 탐사 측선임.

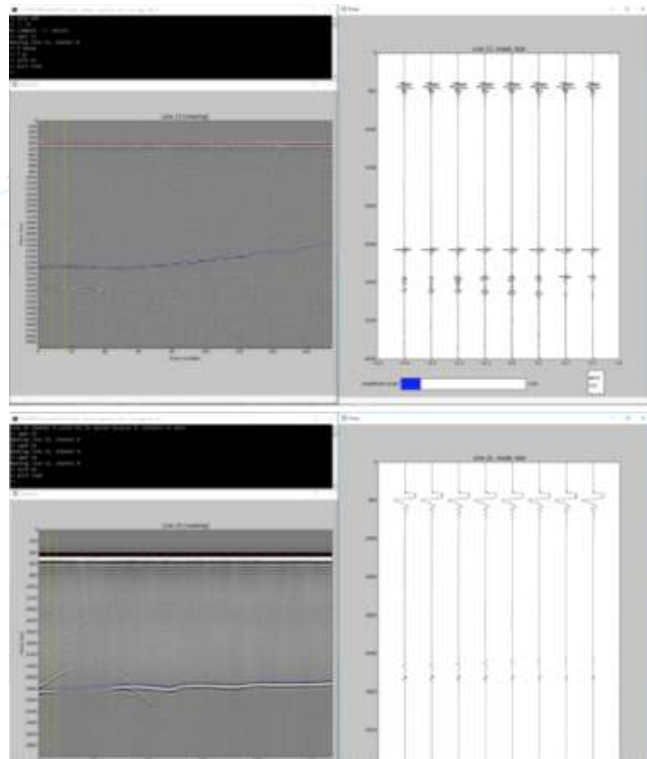


그림 166 육상 GPR 탐사 결과의 예

난센 빙봉으로 모여드는 빙하들의 경계부(suture zone)과 관련된 모레인(moraine) 지역에서는 대부분 빙봉 하부 경계 신호가 관측되지 않았다. 이는 빙봉 하부에 해수가 결빙된 층이 존재하기 때문인 것으로 추정된다. 해수가 결빙된 얼음층은 상대적으로 염도가 높아 레이더 신호가 감쇠하기 때문이다. 이 지역에서의 얼음 조성을 살펴보기 위하여 약 20 지점에서 얼음 샘플을 채취하여 화학 조성을 분석할 예정이다.

(4) 2017/2018 남극 현장 탐사

(가) 연구활동 요약

2016년 말까지 구축된 육상 지진관측망은 주요 관측지점을 기준으로 세 개의 소관측망으로 구분된다. 데이비드 빙하 관측망(KPSN@DG)은 데이비드 빙하의 거동, 빙저하천망 유체거동 분석, 빙권구조 해석 및 빙진의 발생 기작을 연구하기 위해 구축되었으며, 이를 위해 빙하 주변 7곳의 암반지역에 지진관측시스템을 설치하였다.

테라노바 만 관측망(KPSN@TNB)은 테라노바 만에 위치한 장보고기지 주변의 캠벨, 프리슬리 빙하의 거동 분석, 지질/지체구조 연구 및 멜버른 화산의 화산활동을 모니터링하기 위해 구축되었으며, 이를 위해 장보고기지 및 멜버른 화산 주변 7곳의 암반지역에 지진 관측시스템을 설치하였다. 또한 난센빙봉 주변의 암반지역 5곳에 관측소를 추가함으로써 난센빙봉의 거동 변화 관측을 위한 관측망을 구축하게 되었다.

난센빙봉 관측망 구축을 통해 데이비드 빙하 관측망(KPSN@DG)과 테라노바 관측망(KPSN@TNB)사이의 공간적 틈을 메우며 난센빙봉 및 프리슬리 빙하의 거동을 관측하기가 용이해졌을 뿐만 아니라, 데이비드 빙하와 테라노바 관측망의 지진자료와 연계하여 광역적인 지구구조 및 빙하 동역학 연구가 가능하게 되었다.

세 관측망의 지진관측 시스템은 IRIS/PASSCAL 의 극지역 지진관측시스템 디자인을 토대로 설계되었으며, 지진장비 및 부대장비 구매, 설계, 제작 시 PASSCAL 연구진의 기술지원을 받아 지진관측 시스템 설치준비 작업을 수행하였다.

표 7 장보고 기지 주변 지진 관측망 현황

관측소명	위도(°S)	경도(°E)	고도(m)	센서	기록계	전원
KDG01	75.132325	161.1290111	662	T240	Q330	Solar + Batt.
KDG02	75.399278	162.1912528	219	T240	Q330	Solar + Batt.
KDG03	75.600228	162.2298944	496	T240	Q330	Solar + Batt.
KDG04	75.498222	159.6884917	1,214	T240	Q330	Solar + Batt.
KDG05	75.224250	161.9105222	926	T240	Q330	Solar + Batt.
KDG06	75.618156	160.8894194	1,703	T240	Q330	Solar + Batt.
KDG07	75.219111	162.5447500	429	T240	Q330	Solar + Batt.
KP01	74.486600	165.289700	332	Compact	Centaur	Batt.
KP02	74.232194	164.733361	782	Compact	Taurus	Solar + Batt.
KP03	74.394861	163.970778	1,890	Compact	Centaur	Batt.
KP05	74.349500	164.690389	2,617	T240	Q330	Solar + Batt.

KP07	74.332667	165.118133	267	Compact	Centaur	Solar + Batt.
JBG2	74.617950	164.219250	106	Compact	Centaur	상시전원
KN01	74.884583	163.67453	200	T240	Q330	Solar + Batt.
KN02	74.918616	162.41835	250	T240	Q330	Solar + Batt.
KN03	74.84276	162.5793	380	T240	Q330	Solar + Batt.
KN04	74.72736	162.6154	670	T240	Q330	Solar + Batt.
KT01	74.77877	163.64861	70	Compact	Centaur	Solar + Batt.

(나) 현장탐사 일정

- 일정 : 2018.10.30. ~ 2018.11.21. (22일)
- 조사지역 : 장보고기지 주변 멜번화산, 캄벨빙하, 난센빙봉, 데이비드 빙하

(3) 남극현장탐사 관측망 구축

데이비드 빙하 지진 관측망(KPSN@DG)

지난 2011년 최초 구축한 이후로 매년 현장을 방문하여 자료를 획득하고, 시스템의 유지/보수 작업을 수행하였다. 총 7개 관측소로 구성되어 있으며 데이비드 빙하를 중심으로 주변 암반지역에 설치되어 있다.

데이비드 빙하 지진관측망(KPSN@DG)의 시스템 구성은 아래와 같다.

- 지진계 센서 : Nanometrics Trillium 240 broadband seismometer(T240)
- 지진기록계: Quanterra Q330, Baler44 package(8 Gb memory × 2)
- 파워시스템: A 타입 또는 Tower 타입 솔라패널시스템, 충전용 배터리, 리튬 보조 배터리, IRIS/PASSCAL 전력관리모듈박스
- 인클로저: IRIS/PASSCAL 디자인 DAS 인클로저, IRIS/PASSCAL 센서볼트



그림 167 데이비드 빙하 지진 관측망 지도(KPSN@DG)

육상 관측소 유지/보수 작업 내역은 아래와 같다.

- 수행 결과작업 내용 : 각 관측소 지진자료 백업 및 배터리 교체작업
- 수행장비 현황 : 강풍으로 인해 KDG05, KDG06 관측소 파손. KDG05 관측소는 솔라패널이 파손 되었으며, KDG06 관측소는 기록계 단열박스 망실. 나머지 관측소는 모두 상태 양호함.
- 지진 기록
 - KDG01 : 2016년 312일 - 2017년 311일 자료 획득
(동계기간 전력부족으로 33일간 자료 손실)
 - KDG02 : 2016년 311일 - 2017년 303일 자료 획득
 - KDG03 : 2016년 311일 - 2017년 303일 자료 획득
 - KDG04 : 2016년 318일 - 2017년 121일 자료 획득(기록계 오작동)
 - KDG05 : 2016년 318일 - 2017년 265일 자료 획득(솔라패널 파손으로 전력 부족)
 - KDG06 : 자료 획득 실패(기록계 망실)
 - KDG07 : 2016년 322일 - 2017년 303일 자료 획득
(동계기간 전력부족으로 7일간 자료 손실)
- 보수 작업
 - KDG04 : 기록계 교체
 - KDG05, KDG06 : 보수 장비 부족으로 차 년도에 보수 예정(솔라패널, 기록계 단열박스)

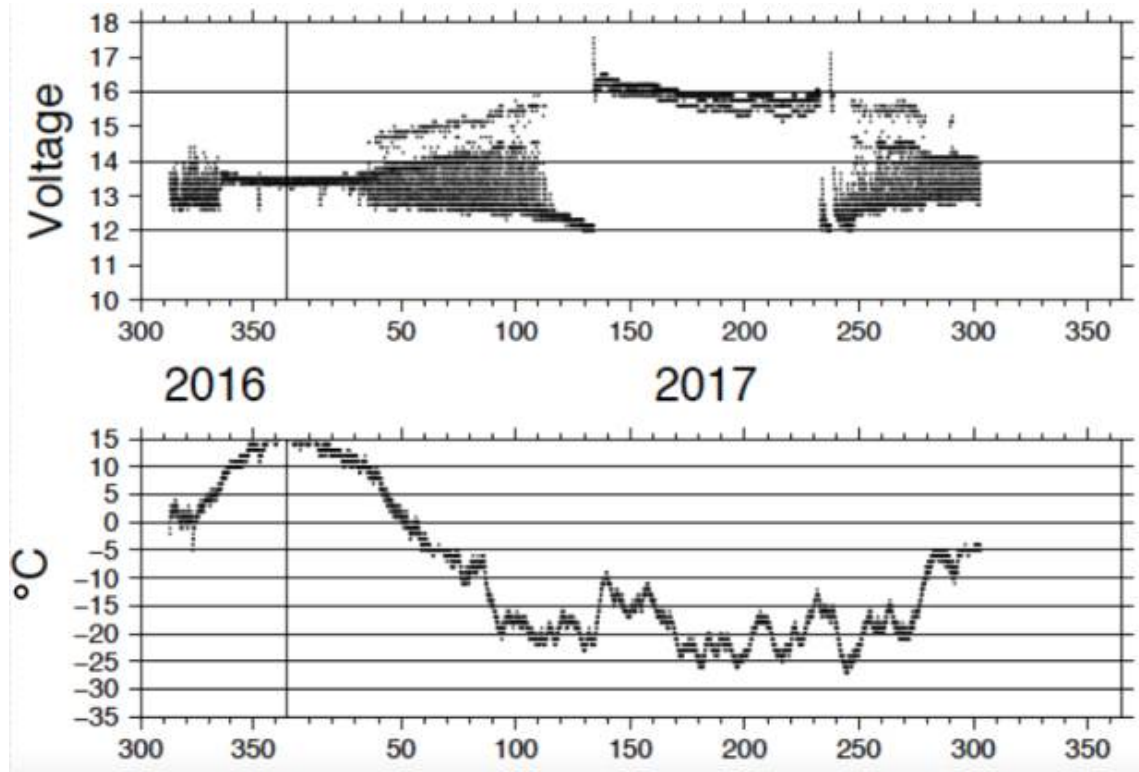


그림 168 KDG02 관측소의 연간 전압, 온도 변화

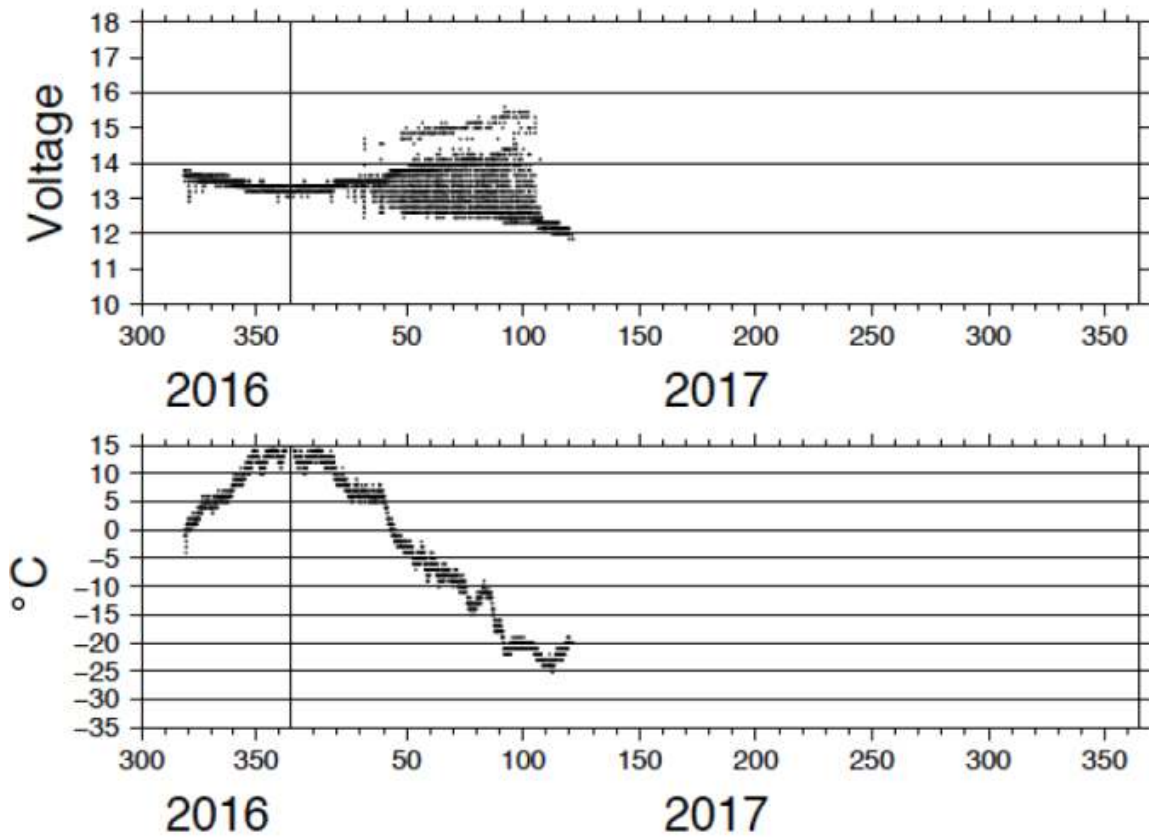


그림 169 기록계 오류로 인해 기록이 중단된 KDG04 관측소



그림 170 강풍으로 인해 솔라패널이 파손된 KDG05 관측소



그림 171 동계 기간 동안 강한 바람으로 인해 기록계 단열박스가 유실되고 케이블이 파손된 KDG06 관측소

□ 테라노바 만 관측망(KPSN@TNB)

데이비드 빙하 관측망과 마찬가지로 최초 구축된 이후 매년 데이터 획득 및 시스템 유지/보수 작업을 수행하고 있다. 장보고 기지 내의 JBG2 관측소가 포함되어 있어 실시간으로 모니터링이 가능하며 KP06 사이트는 14-15시즌에 강풍으로 유실되어 현재는 멜번 화산 정상에 KP05 사이트를 중심으로 총 6개 관측소로 구성되어 있다.

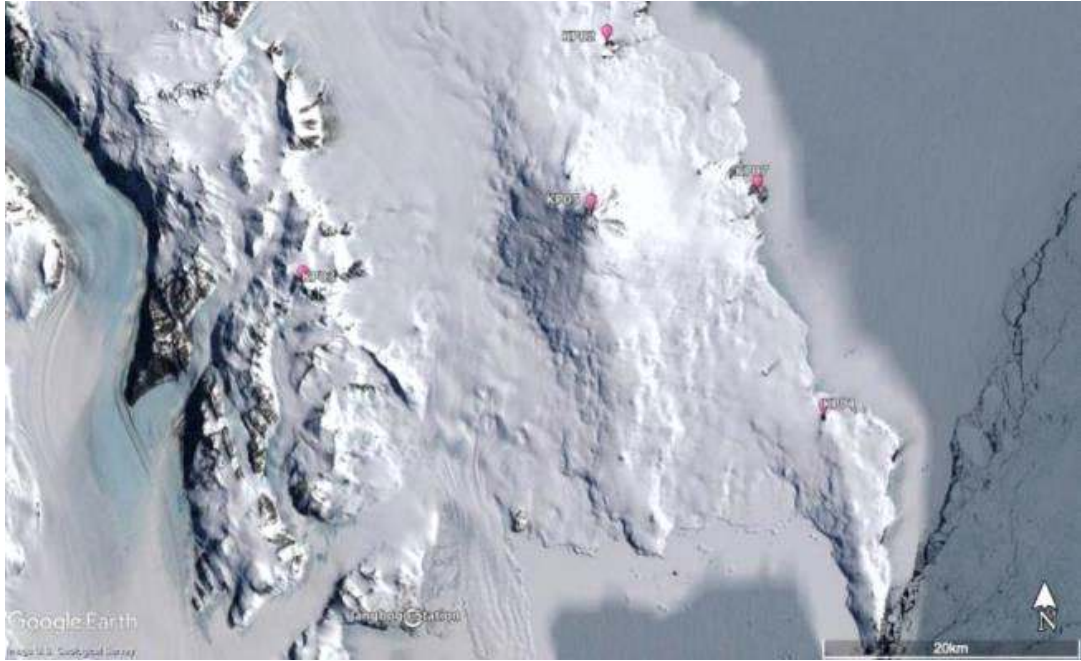


그림 172 테라노바만 지진관측망 지도(KPSN@TNB)

테라노바 만 지진관측망(KPSN@TNB)의 시스템 구성은 아래와 같다.

- 지진계 센서: Nanometrics Trillium Compact seismometer, T240(KP05)
- 지진기록계: Nanometrics Centaur(KP01, 02, 03, 07, JBG2), Q330 system(KP05)
- 파워시스템: A 타입 또는 Tower 타입 솔라패널시스템, 충전용 배터리, 리튬 보조 배터리,
- IRIS/PASSCAL 전력관리모듈박스
- 인클로져: IRIS/PASSCAL 디자인 DAS 인클로져, KOPRI(KP01, 02, 03, 04, 07) & IRIS /PASSCAL(KP05, JBG2) 디자인 센서볼트

각 관측소의 유지/보수 작업 수행 결과는 아래와 같다.

- 작업 내용 : 각 관측소 지진자료 백업 및 배터리 교체작업 수행
- 장비 현황 : 모든 관측소 상태양호
- 지진 기록
 - KP01 : 2016년 302일 - 2017년 228일 자료 획득
(동계기간 전력부족으로 72일간 자료 손실)
 - KP02 : 2016년 302일 - 2017년 300일 자료 획득
 - KP03 : 2016년 302일 - 2017년 232일 자료 획득
(동계기간 전력부족으로 83일간 자료 손실)
 - JBG2 : 2016년 303일 - 2017년 311일 자료 획득
 - KP05 : 2016년 303일 - 2017년 256일 자료 획득
(동계기간 전력부족으로 47일간 자료 손실)
 - KP07 : 2016년 302일 - 2017년 63일 자료 획득(기록계 오작동)
- 보수 작업

- KP07 : 기록계 교체

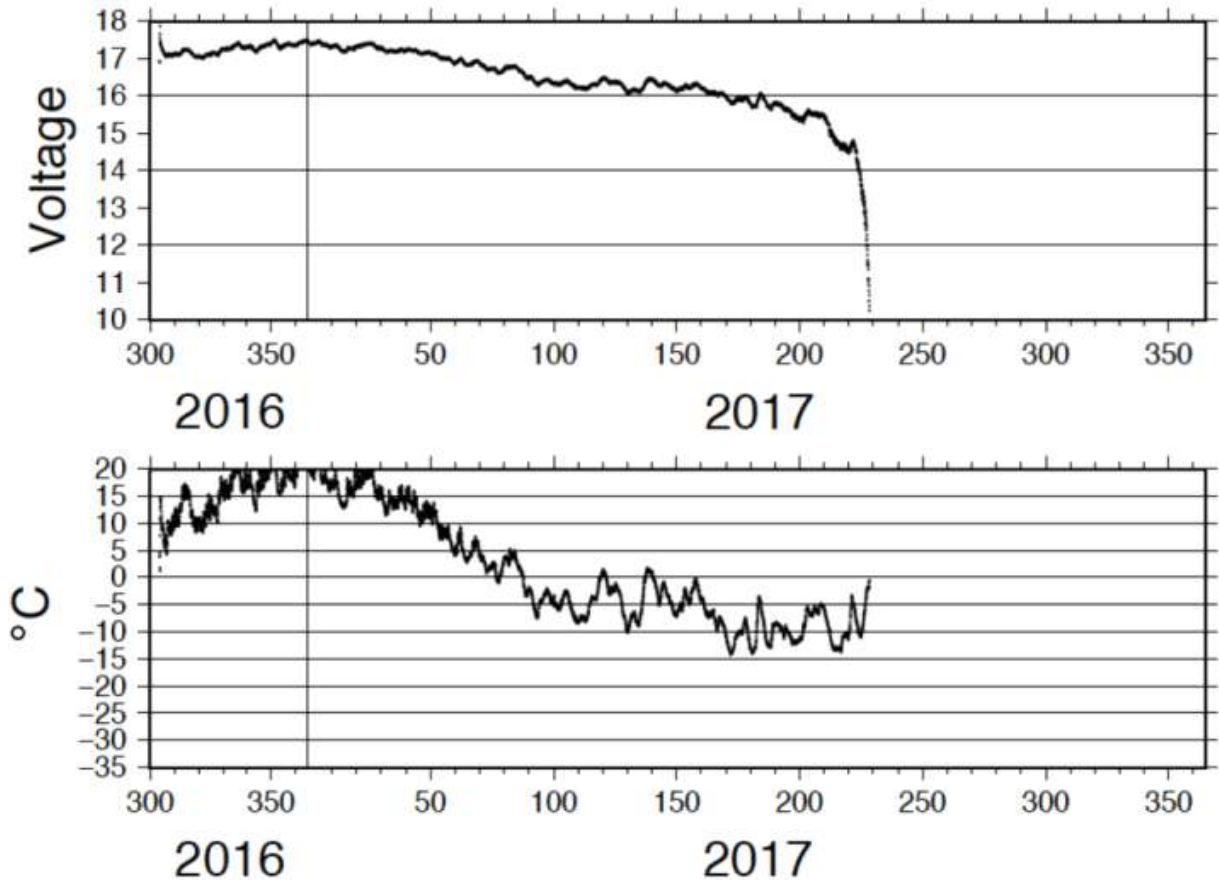


그림 173 동계 기간 전력 공급 부족으로 기록이 중단된 KP01 관측소

□ 난센빙봉 관측망(KPSN@TNB)

난센빙봉 관측망은 작년에 유지/보수 작업을 위해 현장 방문시 강풍으로 관측소들에 피해가 많았기 때문에 이번 현장 탐사 시에도 걱정을 많이 하였다. 다행히 작년 만큼 피해가 크지는 않았지만 기존에 설치했던 2m가 넘는 솔라패널 타워는 타워 바닥의 삼각대가 휘어질 만큼의 강한 힘을 받아 넘어진 사이트도 있었다. 눈이 많이 쌓이는 지역이 아니라면 강한 바람을 피해 높이를 반으로 줄일 필요가 있다.

작년에 난센 빙봉과 근접한 Vegetation Island에 새로 설치한 관측 사이트의 데이터를 획득하여 재충전 가능한 리튬 이온 배터리의 성능을 확인할 수 있었다. 국내 Tabos 사의 리튬 이온 배터리 총 4개와 그에 맞게 줄어든 단열박스를 함께 설치해 동계 기간을 포함하여 안정적인 관측소 유지를 위한 전력량을 확인하고자 하였다. 데이터 확인 결과 동계 기간 중 약 40일 동안 전력이 공급되지 않은 것으로 나타나며, 배터리를 2개 정도 추가 한다면 매년 배터리 교체 없이 안정적으로 자료를 획득 할 수 있을 것으로 보인다.

난센빙붕 지진관측망(KPSN@TNB)의 시스템 구성은 아래와 같다.

- 지진계 센서 : Nanometrics Trillium 240 broadband seismometer(T240)(KN01, 02, 03, 04), Compact(KT01)
- 지진기록계: Quanterra Q330, Baler44 package(8 Gb memory × 2)(KN01, 02, 03, 04), Centaur(KT01)
- 파워시스템: Tower 타입 솔라패널시스템, 충전용 배터리, 리튬 보조 배터리, IRIS/PASSCAL 전력관리모듈박스
- 인클로저: KOPRI 디자인 DAS 인클로저 & 센서볼트

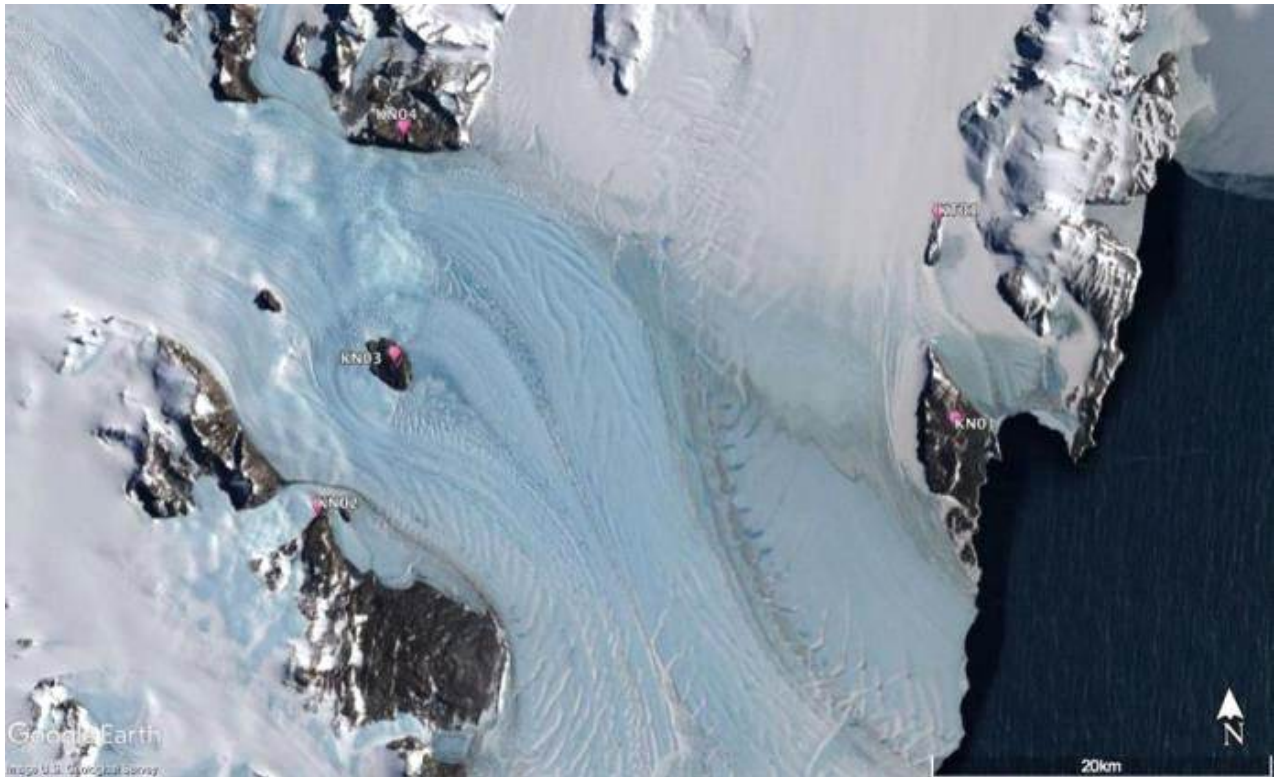


그림 174 난센빙붕 지진 관측망(KPSN@N)

각 관측소의 유지/보수 작업 수행 결과는 아래와 같다.

- 작업 내용 : 각 관측소 지진자료 백업 및 배터리 교체작업 수행
- 장비 현황 : 모든 관측소 상태양호
- 지진 기록
 - KN01 : 2016년 321일 - 2017년 309일 자료 획득
 - KN02 : 2016년 320일 - 2017년 309일 자료 획득
 - KN03 : 2016년 307일 - 2017년 290일 자료 획득
(솔라패널 파손으로 인한 전력부족으로 19일간 자료 손실)
 - KN04 : 2016년 307일 - 2017년 309일 자료 획득
 - KT01 : 2016년 328일 - 2017년 311일 자료 획득
(동계기간 전력 부족으로 40일간 자료 손실)

- 보수 작업
 - KN03, KN04 : 보수 장비 부족으로 차 년도에 보수 예정(솔라패널, 기록계 단열박스)

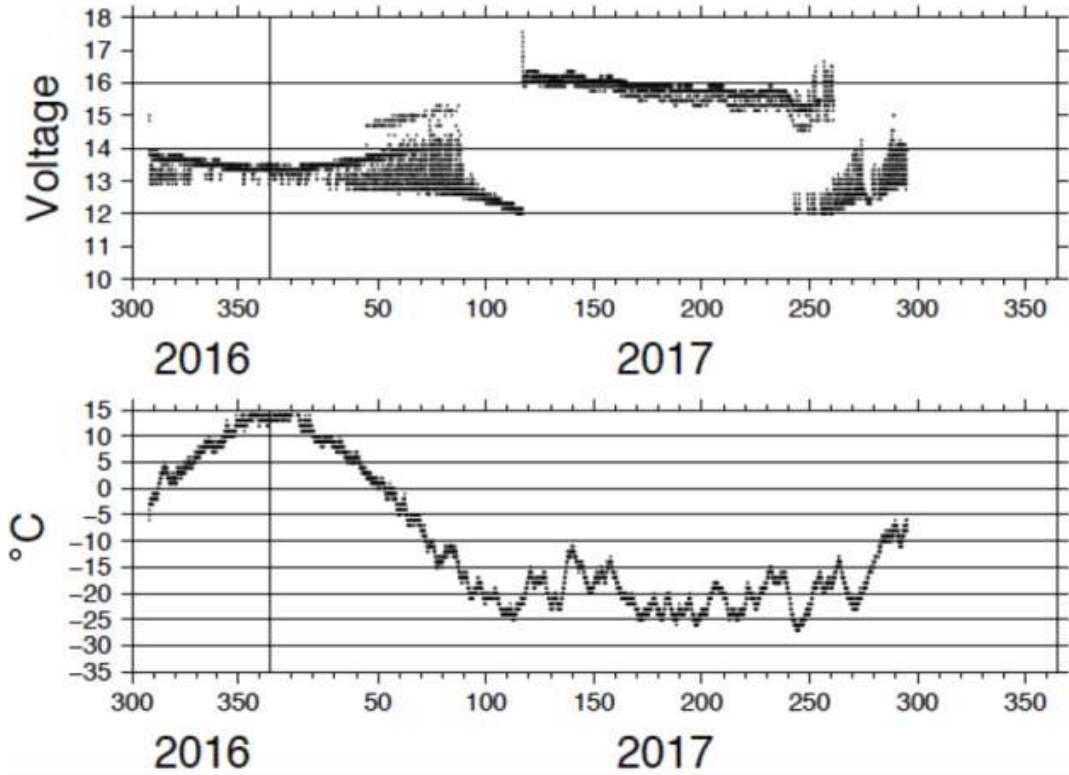


그림 175 솔라패널 파손으로 인해 불안정한 전력공급을 나타내는 KN03 관측소



그림 176 알루미늄타워의 바닥이 휘어질 정도의 강풍으로 인해 파손된 KN03 관측소

□ AMIGOS 시스템 유지보수

각 관측소의 유지/보수 작업 수행 결과는 아래와 같다.

- 작업 내용 : AMIGOS 시스템 유지보수 및 신규 관측
- 장비 현황
 - 드라이갈스키 빙봉 1기 (KA2) 유지보수
 - 난센 빙봉 1기 (KA4) 유지보수
 - 난센 빙봉 AMIGOS-II 1기 회수

□ ApRES 시스템 유지보수

각 관측소의 유지/보수 작업 수행 결과는 아래와 같다.

- 작업내용 및 자료 회수
 - 난센 빙봉 모니터링 장비 2기 (HWD, Nap10) 회수
 - 난센 빙봉 8측점 탐사 (Nap1-8)
 - 드라이갈스키 빙봉 모니터링 장비 1기 (DRY4) 설치

□ 빙하 모니터링 GPS 관측망

각 관측소의 유지/보수 작업 수행 결과는 아래와 같다.

- 작업 내용 : 빙하 모니터링 GPS 시스템 유지보수 및 신규 관측
 - 장비 현황
 - 데이비드 빙하 지역 GPS 5기 유지 보수
 - 데이비드 빙하 지역 GPS 1기 이동설치
 - 캠벨 빙하지역 GPS 3기 유지 보수
 - 캠벨 및 프리슬리 빙하지역 GPS 5기 신규 설치
- * GPS 유지보수 및 신규 설치 측정

데이비드 빙하 지역에는 총 6개의 빙저호가 존재하는 것으로 알려져 있으며, 장보고기지에서 접근이 용이한 2개의 빙저호(D1, D2) 지역에서 빙저호의 변화 양상을 모니터링하기 위하여 정밀 측위를 위한 GPS 관측망이 운영되어 왔다. 2017/2018년 하계 탐사기간 중 9기의 GPS 관측소 자료를 회수하였고, 3기의 GPS 관측소에 대하여 향후 1년간 추가 관측을 위하여 유지 보수를 수행하였으며, 2기의 GPS 관측소를 신규 설치하였다. 캠벨 빙하 지역에서는 멜번 화산과 관련된 빙저수의 거동을 관측할 목적으로 3기의 GPS 관측소가 운영되고 있으며, 자료 회수와 유지 보수를 수행하였다. 리튬배터리로 운영되는 신형 GPS 관측소의 연간 자료 회수율은 96% 이상이나, 전력 소모가 큰 구형 GPS를 사용하는 관측소는 6개월 관측목표에 대하여 약 83%의 자료 회수율을 나타내어, 신형 GPS 보드로 교체할 필요가 있다. 태양전지 시스템의 시험을 위하여 설치된 KGPS11에서의 자료회수율은 63.7%로 흑야를 제외한 기간에는 자료를 정상적으로 획득하였다.

표 8 GPS 자료 회수 및 유지 보수 현황

Site	Location	Latitude	Longitude	Power Supply	Antenna Height(m)	Maintenance	1-year Data Recovery Rate (%)
KGPS06	D1	75.270	157.213	Li-Ion		Data/Instrument Recovery	75.2
KGPS08	D2	75.332	155.520	Li-Ion		Data/Instrument Recovery	90.6
KGPS11	D1	75.200	157.841	Solar	1.15	Data/Instrument Recovery	63.7
KGPS13	D1	75.227	157.318	Li-Ion	0.80	Data Recovery/Battery Replacement	99.2
KGPS15	D1	75.209	156.437	Li-Ion	1.55	Data/Instrument Recovery	99.3
KGPS16	D2	75.391	155.829	Li-Ion	1.62	Data Recovery/Battery Replacement	99.9
KGPS17	D2	75.226	155.482	Li-Ion	1.10	Data/Instrument Recovery	99.7
KGPS18	D2	75.322	155.340	Li-Ion	0.87	Data Recovery/Battery Replacement	99.7
KGPS19	D1	74.904	156.979	Solar	1.60	Data/Instrument Recovery	37.8
KGPS20	Campbell	74.488	164.331	Li-Ion	1.75	Data Recovery/Battery Replacement	97.6
KGPS21	Campbell	74.378	164.338	Li-Ion	1.7	Data Recovery/Battery	84.0

						Replacement	
KGPS23	Campbell	74.268	164.192	Li-Ion	1.9	Data Recovery/Battery Replacement	96.3
KGPS25	New lake	75.555	156.121	Li-Ion	1.80	Installation	
KGPS26	D1	75.177	157.977	Li-Ion	1.80	Installation	

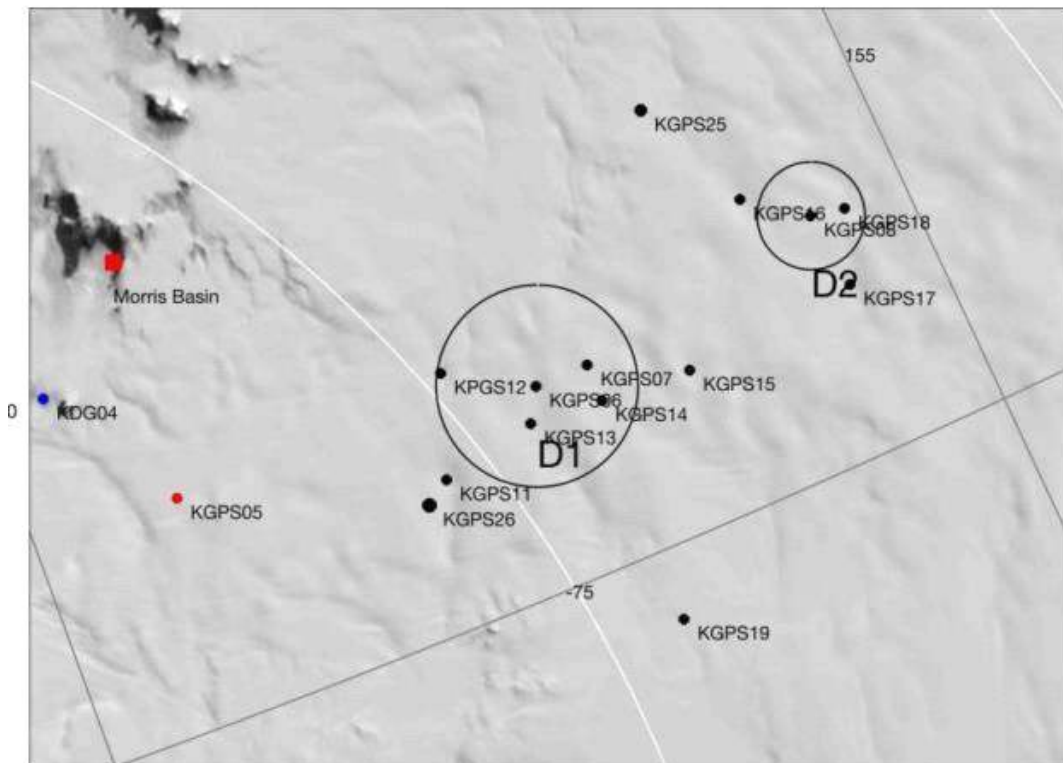


그림 177 데이비드 빙하 상부의 빙저호 GPS 관측망 지도

(라) 남극현장 탐사 수행내용

① GPS 시스템 최적화

구형 GPS 시스템(KGPS06, KGPS08)의 경우, sleep mode에서의 전력소모가 커서 연간 약 7-8개의 리튬배터리팩을 소모한다. 배터리 소모비용을 고려하여 6개월 관측 목표로 4개의 리튬배터리를 사용하였으나, 자료 회수율은 약 83% 이다. 차년도에는 신형 GPS 컨트롤 보드로 교체하여 배터리 소모를 낮추고, 자료 회수율을 향상시킬 예정이다.

아래 그림은 KGPS13 측점에 설치된 신형 GPS (KGPS ver. 2)의 2년간 시스템 측정 자료이다. 시스템 내부온도는 -40 ~ 0 도 범위에서 변화하여, PCB 내부에서는 약간 높은 온도를 보인다. GPS 측정시 0.2 A, 시스템 점검시 0.1 A, sleep mode에서는 3 mA의 전류를 소모한다. 12시간 간격으로 1년간 측정할 경우, 리튬배터리팩(18V 190Ah)을 최소 2개

소모하며, 6시간 간격으로 측정할 경우, 최소 3개의 리튬배터리팩을 소모하게 된다. 리튬배터리의 용량 및 전압은 온도에 민감하여 온도가 낮을 때 전압이 2-3 V 낮아지며, 리튬배터리 용량이 소진되었을때는 낮은 온도에서 전압이 더욱 급격하게 떨어진다. 2년간 시스템을 운영하는 경우, 2년차 겨울에 낮은 온도로 인해 매우 큰 전압의 변동성이 보인다. 따라서, 2년 연속 관측을 위해서는 12시간 관측 간격의 경우 리튬배터리팩 5개, 6시간 관측 간격의 경우 7개의 리튬배터리팩이 적당할 것으로 생각된다.

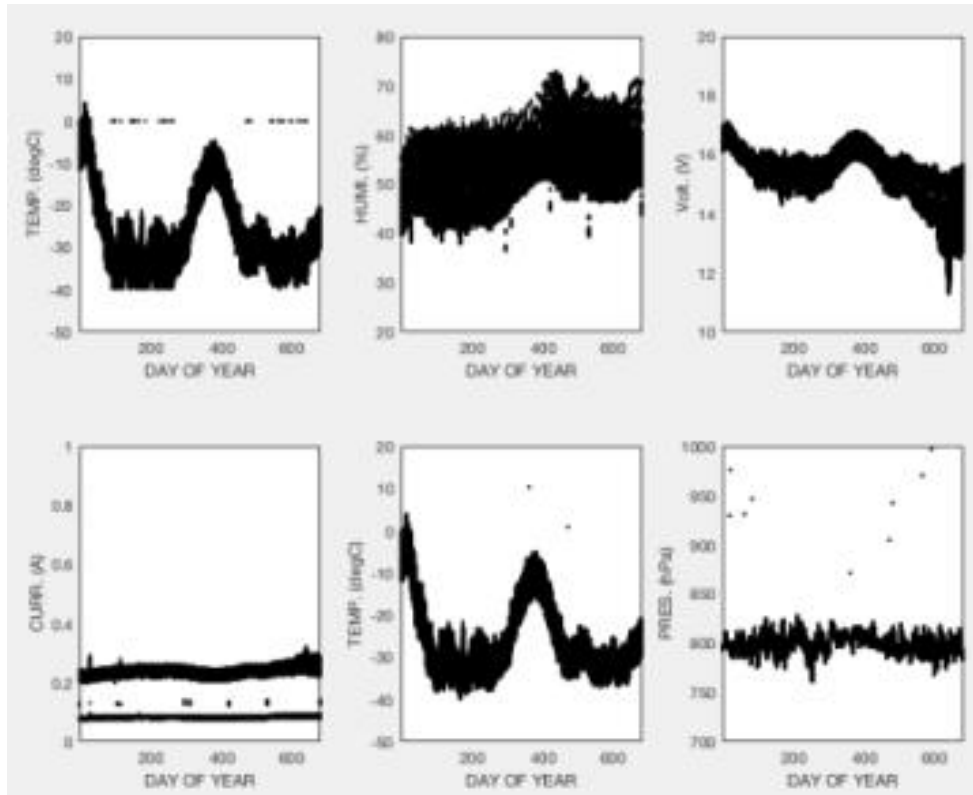


그림 178 매 12시간 간격으로 기록된 KGPS13 관측소 정보(신형 GPS 컨트롤 보드와 리튬배터리 5개를 적용)

태양전지(40W)를 이용한 시스템 운영을 시험하기 위하여 충전용 리튬배터리(타보스 12V 100 Ah) 1개와 일회용 리튬배터리(타디란 18V 190 Ah) 1개를 사용하여 6시간 간격 관측을 수행하였다(KGPS11, 6시간 관측 간격). 충전용 리튬배터리가 완전 방전되는 기간은 연간 약 130일 정도이며, 12V에서 완전 방전되는데 까지 걸리는 시간은 약 30일이다. 즉, 혹야 기간에 시스템을 유지시키기 위해서는 혹야 기간에 충전용 리튬배터리를 대체할 수 있는 일회용 리튬배터리를 사용하여야 하며, 1-2개의 일회용 리튬배터리팩을 추가하는 것이 권장된다. 충전용 리튬배터리팩으로만 혹야를 견디기 위해서는 총 5-6개의 충전용 리튬배터리팩이 필요할 것으로 추정된다.

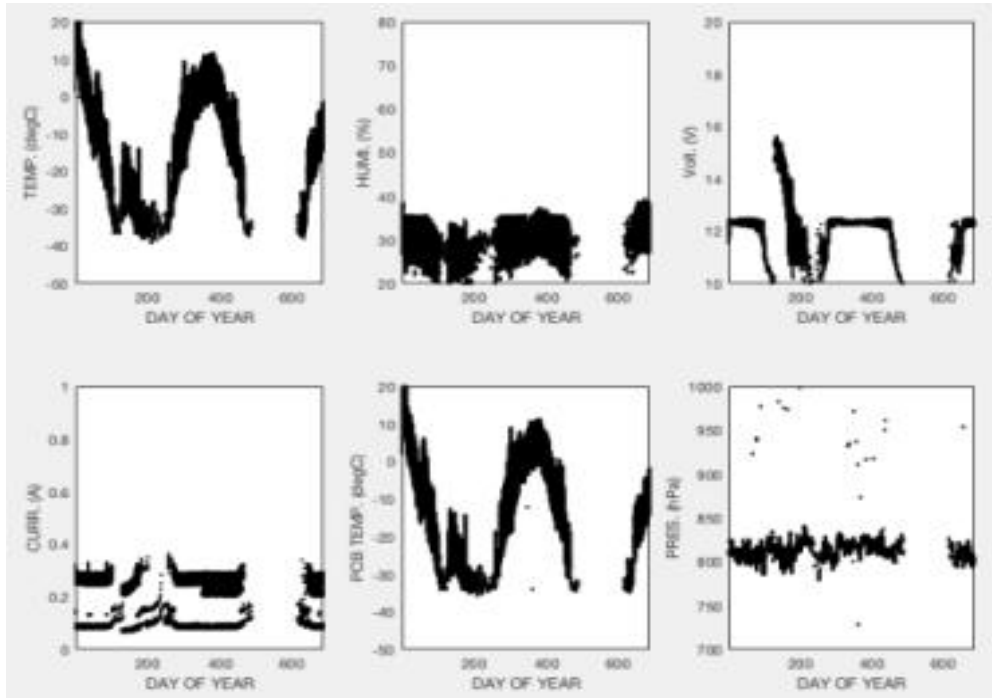


그림 179 매 6시간 간격으로 기록된 KGPS11 관측소 정보(신형 GPS 컨트롤 보드, 40W 솔라패널과 충전식 리튬이온 배터리 적용)

표 9 GPS 관측 결과

Site	Location	Period (day)	Surface Velocity (m/yr)	Elevation Change Rate (dh/dt, m/yr)	Residual Std. Dev. of Elev. Change (m)	Snow accumulation (m)	Etc.
KGPS06	D1	500	88.3	-1.789	0.027	-	
KGPS08	D2	528	45.7	-0.345	0.022	-	
KGPS11	D1	684	110.8	-0.257	0.088	0.27	
KGPS13	D1	688	99.1	0.284	0.059	1.03	Lake response
KGPS15	D1	688	70.8	0.205	0.025	0.25	
KGPS16	D2	517	47.2	-0.359	0.054	0.21	
KGPS17	D2	517	50.5	-0.108	0.025	0.70	
KGPS18	D2	688	45.1	1.321	0.061	0.98	Lake response
KGPS19	D1	138	3.9	-0.138	0.021	0.20	
KGPS20	Campbell	687	199.6	-9.862	0.597	0.10 (2017)	
KGPS21	Campbell	699	106.1	-3.178	0.090	0.50 (2017)	
KGPS23	Campbell	250	86.7	-1.997	0.035	0.47 (2017)	
KGPS25	New lake	75.555	156.121	Li-Ion	1.80	-	
KGPS26	D1	75.177	157.977	Li-Ion	1.80	-	

데이비드 빙저호 지역의 GPS 관측 결과 빙하 이동 속도는 45 - 110 m/yr의 범위를 가지고 있으며 GPS 고도변화는 -1.8 ~ 1.3 m/yr의 범위 내에 분포한다. 선형 추세를 제거한 고도변화는 KGPS11, KGPS13, KGPS16, KGPS18에서 크게 관측되어 이 지역 하부에 빙저수의 거동이 존재하는 것으로 파악된다. 관측 기간 동안의 snow accumulation은 KGPS13과 KGPS18에서 가장 크게 관측되었다. 대표적인 측점인 KGPS13 (D1 lake), KGPS18 (D2 lake)의 관측결과를 아래에 도시하였다.

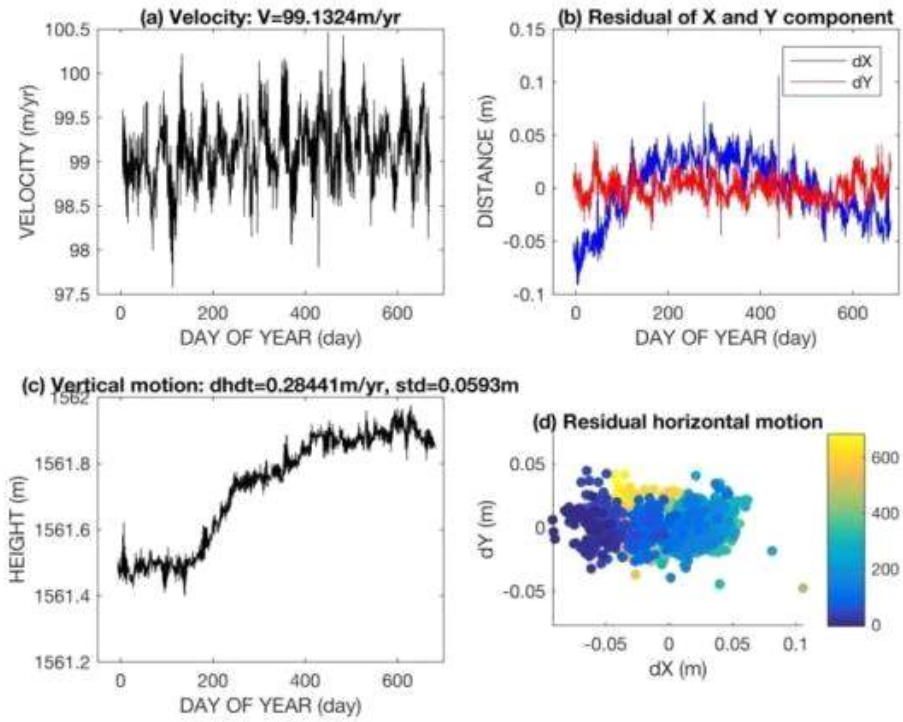


그림 180 빙저호 D1에 설치된 KGPS13 관측소의 위치 변화

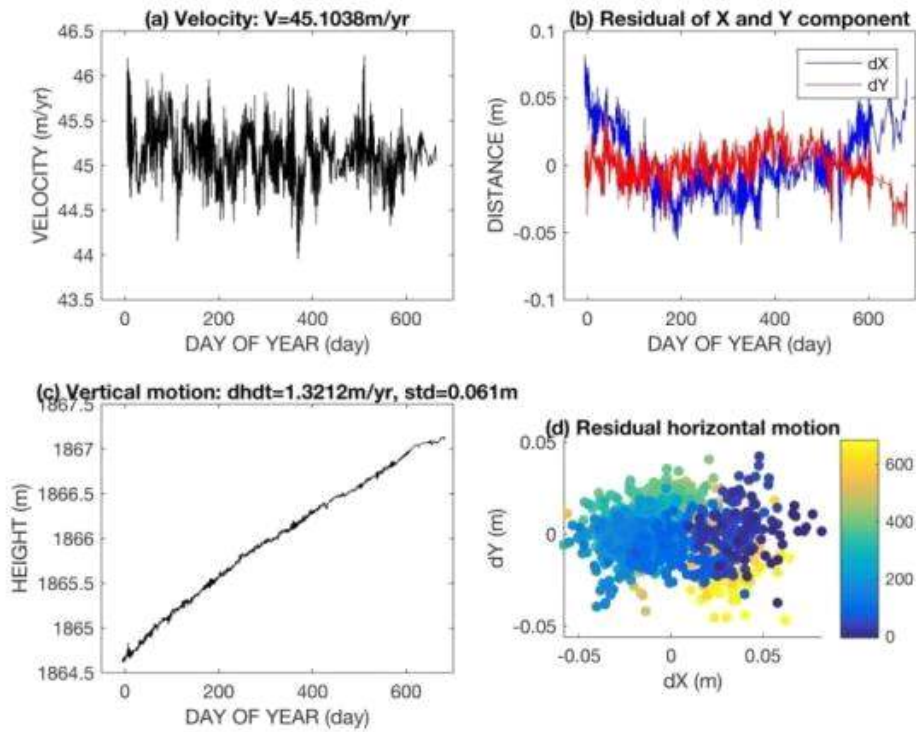


그림 181 빙저호 D2에 설치된 KGPS18 관측소의 위치변화

② 멜번화산 자기지전류 탐사

멜번화산 지역의 지하 구조를 영상화하기 위하여 2개 측정점(KMT03, KMT11)에서 자기지전류 탐사를 추가적으로 수행하였다. 멜번화산의 시간에 따른 거동을 살펴보기 위하여 개발된 모니터링 자기지전류 탐사 장비를 시험하기 위하여 KMT03 측정점에 설치하고 1년간 운영한 후 다음 하계기간에 회수할 예정이다.

표 10 멜번화산 지역의 자기지전류 측정점 (2017/2018)

Site ID	Lat (dd)	Lat (mm.mm)	Lon (dd)	Lon (mm.mm)	Period
KMT03	74	23.409	164	40.424	2 days
KMT11	74	20.785	164	39.132	4 days
KMT16	74	22.752	164	20.358	Continuous (base station)



그림 182 멜번 화산에 설치된 MT 관측 장비

③ 장보고기지 내 초전도 중력계 유지보수

장보고2016년 초부터 운영이 시작된 초전도 중력계(iGrav)의 2년간의 자료를 회수하였다. 중력계의 운영은 누락 없이 2년간 성공적으로 이루어지고 있으며 현재 헬륨의 양은 약 95%를 유지하고 있다.



그림 183 장보고기지에 설치된 초전도 중력계



그림 184 장보고기지에 설치된 초전도 중력계 cold head 교체

2년간의 자료를 이용하여 조석 분석을 실시하였으며 조석이 제거된 중력 신호는 약 1년 주기의 장주기 변화를 성공적으로 보여준다.

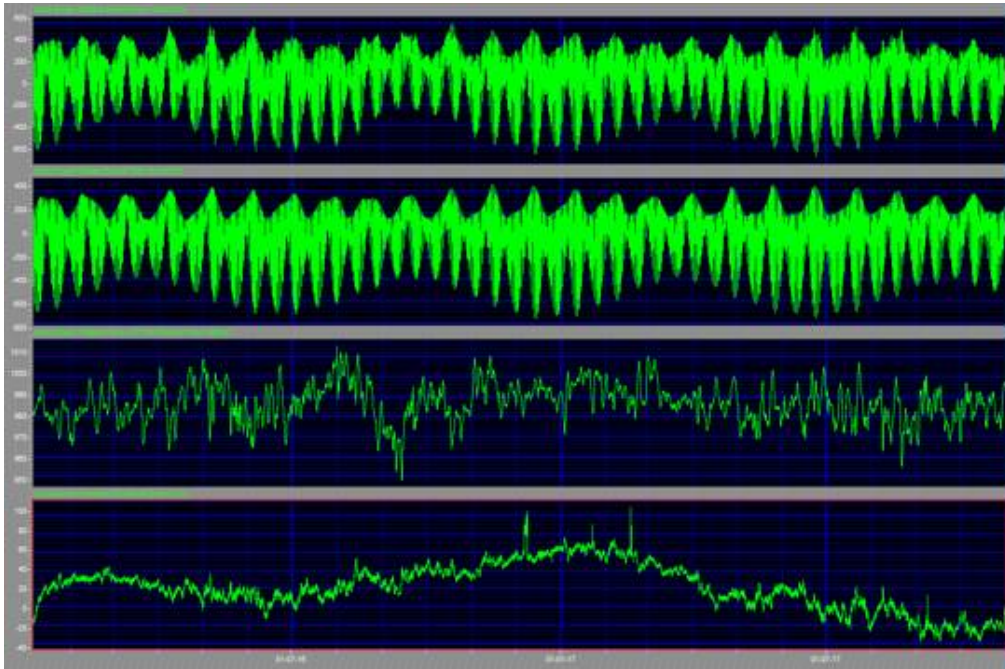


그림 185 iGrav 초전도 중력계를 통해 획득한 2년간의 중력 데이터 (1st panel) observation, (2nd panel) tide model, (3rd panel) air pressure, and (4th panel) residual gravity change.

조석 분석을 통해 획득된 조석 자료를 전지구 조석 모델과 비교한 결과 장보고기지 주변 조석 모델은 약 40-50%의 오차를 포함하고 있는 것으로 보인다.

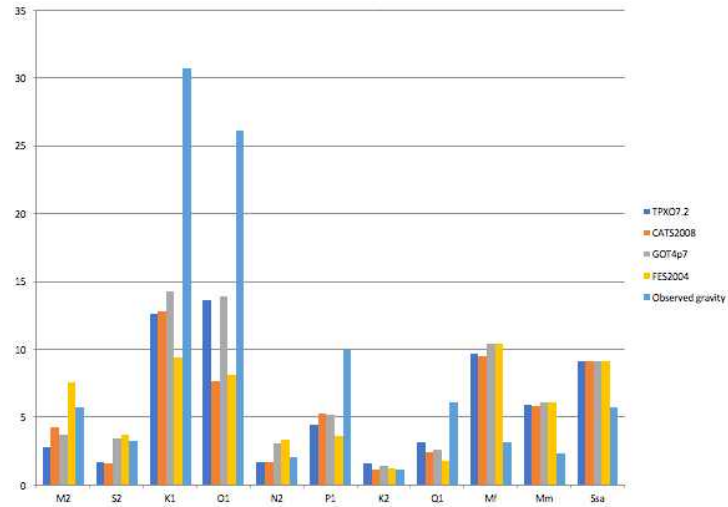


그림 186 Amplitude of tidal constituents reduced by various tide models.

④ 빙붕 두께 변화 관측(ApRES탐사)

2016/2017 하계 기간에 설치 혹은 측정하였던 4개의 ApRES 측정점에서 자료를 회수하거나 재측정하여, 빙붕의 두께 변화를 관측하였다.

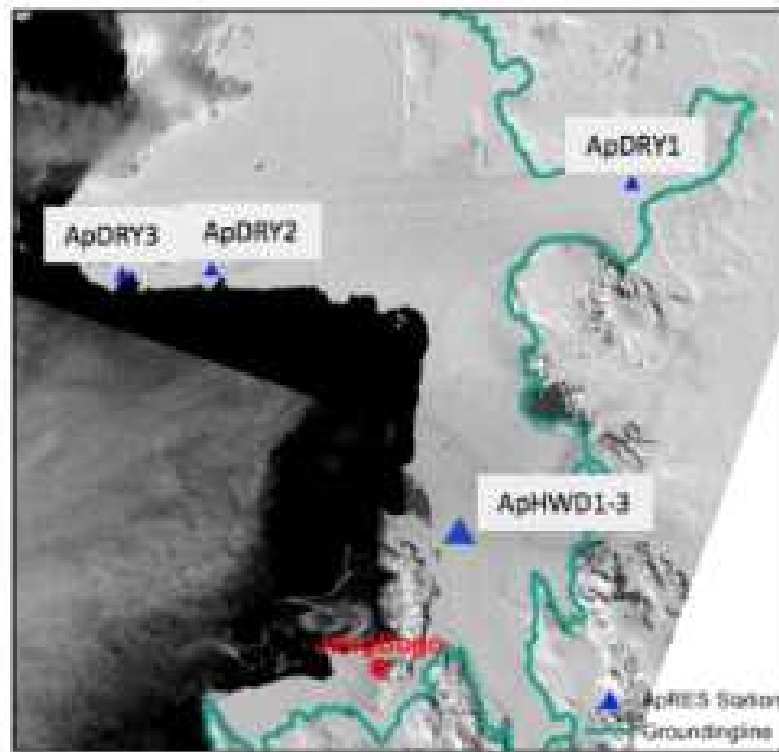


그림 187 2016/17 시즌에 설치된 ApRES 관측 사이트 위치

난센 빙봉의 두께 변화를 살펴보기 위하여 9개의 임시 측정에서 ApRES 측정을 수행하였다. 향후 하계 기간 중 재측정을 실시하여 빙봉 하부 용융량을 산출할 계획이다.

(5) 2018/2019 남극 현장탐사

(가) 조사기간 : 2018.10.30. ~ 2018.11.21. (22일)

(나) 조사지역

- 장보고기지 주변 멜번화산, 캠벨빙하, 난센빙봉, 데이비드 빙하

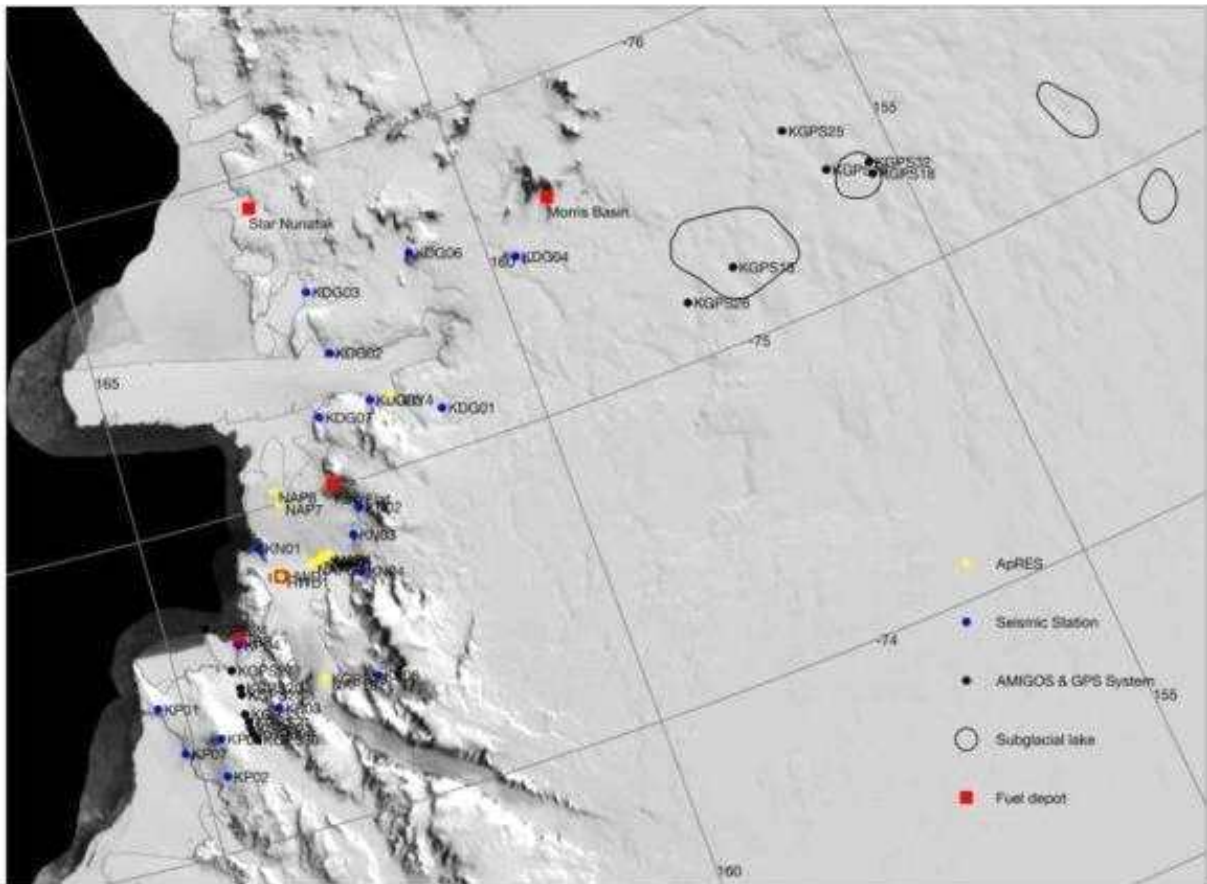


그림 188 조사 항목 및 세부 지역

(다) 육상지진관측

- 2017년 말까지 구축된 육상 지진관측망은 주요 관측지점을 기준으로 세 개의 소관측망으로 구분된다. 데이비드 빙하 관측망(KPSN@DG)은 데이비드 빙하의 거동, 빙저하천망 유체거동 분석, 빙권구조 해석 및 빙진의 발생 기작을 연구하기 위해 구축되었으며, 이를 위해 빙하 주변 7곳의 암반지역에 지진관측시스템을 설치하였다.

- 테라노바 만 관측망(KPSN@TNB)은 테라노바 만에 위치한 장보고기지 주변의 캠벨,

프리슬리 빙하의 거동 분석, 지질/지체구조 연구 및 멜버른 화산의 화산활동을 모니터링하기 위해 구축되었으며, 이를 위해 장보고기지 및 멜버른 화산 주변 7곳의 암반지역에 지진 관측시스템을 설치하였다. 또한 2015년에 난센빙봉 주변 암반지역 5곳의 관측소가 추가되어 난센빙봉의 거동 변화 관측을 위한 관측망을 구축하게 되었다.

- 난센빙봉 관측망 구축을 통해 데이비드 빙하 관측망(KPSN@DG)과 테라노바 관측망(KPSN@TNB)사이의 공간적 틈을 메우며 난센빙봉 및 프리슬리 빙하의 거동을 관측하기가 용이해졌을 뿐만 아니라, 데이비드 빙하와 테라노바 관측망의 지진자료와 연계하여 광역적인 지구조 및 빙하 동역학 연구가 가능하게 되었다.
- 세 관측망의 지진관측 시스템은 IRIS/PASSCAL 의 극지역 지진관측시스템 디자인을 토대로 설계되었으며, 최초 관측소 설치 시 지진장비 및 부대장비 구매, 설계, 제작을 위해 PASSCAL 연구진의 기술지원을 받아 지진관측 시스템 설치준비 작업을 수행하였다.

관측소명	위도(°S)	경도(°E)	고도(m)	센서	기록계	전원
KDG01	75.132325	161.1290111	662	T240	Q330	Solar + Batt.
KDG02	75.399278	162.1912528	219	T240	Q330	Solar + Batt.
KDG03	75.600228	162.2298944	496	T240	Q330	Solar + Batt.
KDG04	75.498222	159.6884917	1,214	T240	Q330	Solar + Batt.
KDG05	75.224250	161.9105222	926	T240	Q330	Solar + Batt.
KDG06	75.618156	160.8894194	1,703	T240	Q330	Solar + Batt.
KDG07	75.219111	162.5447500	429	T240	Q330	Solar + Batt.
KP01	74.486600	165.289700	332	Compact	Centaur	Batt.
KP02	74.232194	164.733361	782	Compact	Taurus	Solar + Batt.
KP03	74.394861	163.970778	1,890	Compact	Centaur	Batt.

KP05	74.349500	164.690389	2,617	T240	Q330	Solar + Batt.
KP07	74.332667	165.118133	267	Compact	Centaur	Solar + Batt.
JBG2	74.617950	164.219250	106	Compact	Centaur	상시전원
KN01	74.884583	163.67453	200	T240	Q330	Solar + Batt.
KN02	74.918616	162.41835	250	T240	Q330	Solar + Batt.
KN03	74.84276	162.5793	380	T240	Q330	Solar + Batt.
KN04	74.72736	162.6154	670	T240	Q330	Solar + Batt.
KT01	74.77877	163.64861	70	Compact	Centaur	Solar + Batt.

장보고 기지 주변 지진 관측망 현황

○ 조사방법

가) 데이비드 빙하 지진 관측망(KPSN@DG) : 지난 2011년 최초 구축한 이후로 매년 현장을 방문하여 자료를 획득하고, 시스템의 유지/보수 작업을 수행하였다. 지난 시즌 유실되었던 KDG06 관측소와 솔라패널이 파손된 KDG05 관측소를 제외하고 현재 5개 관측소로 구성되어 있으며 데이비드 빙하를 중심으로 주변 암반지역에 설치되어 있다.

1) 각 관측소의 유지/보수 작업 수행 결과

- 작업 내용 : 각 관측소 지진자료 백업 및 배터리 교체작업 수행
- 장비 현황 : 일정 부족으로 KDG05, KDG06 관측소 유지보수는 차년도 예정.

KDG05 관측소는 솔라패널 및 단열박스 보수 필요.

2) 지진 기록

- KDG01 : 2017년 312일 - 2018년 309일 자료 획득
- KDG02 : 2017년 302일 - 2018년 309일 자료 획득
- KDG03 : 2017년 302일 - 2018년 309일 자료 획득
- KDG04 : 2017년 312일 - 2017년 316일 자료 획득

(기록계 오류로 인해 자료 획득 실패)

- KDG07 : 2017년 302일 - 2018년 312일 자료 획득

3) 보수 작업

- KDG04 : 기록계 교체

4) 시스템 구성

- 지진계 센서 : Nanometrics Trillium 240 broadband seismometer(T240)

- 지진기록계: Quanterra Q330, Baler44 package(8 Gb memory × 2)
- 파워시스템: A 타입 또는 Tower 타입 솔라패널시스템, 충전용 배터리, 리튬 보조 배터리, IRIS/PASSCAL 전력관리모듈박스
- 인클로저: IRIS/PASSCAL 디자인 DAS 인클로저, IRIS/PASSCAL 센서볼트

나) 테라노바 만 관측망(KPSN@TNB) : 데이비드 빙하 관측망과 마찬가지로 최초 구축된 이후 매년 데이터 획득 및 시스템 유지/보수 작업을 수행하고 있다. 장보고 기지 내의 JBG2 관측소가 포함되어 있어 실시간으로 모니터링이 가능하며 KP06 사이트는 14-15시즌에 강풍으로 유실되어 현재는 멜번 화산 정상에 위치한 KP05 사이트를 중심으로 총 6개 관측소로 구성되어 있다.

1) 각 관측소의 유지/보수 작업 수행 결과

- 작업 내용 : 각 관측소 지진자료 백업 및 배터리 교체작업 수행
- 장비 현황 : 모든 관측소 상태양호

2) 지진 기록

- KP01 : 2017년 299일 - 2018년 244일 자료 획득
(동계기간 전력부족으로 61일간 자료 손실)
- KP02 : 2017년 299일 - 2018년 305일 자료 획득
- KP03 : 2017년 316일 - 2018년 304일 자료 획득
- JBG2 : 2017년 303일 - 2018년 324일 자료 획득
- KP05 : 2017년 303일 - 2018년 305일 자료 획득
- KP07 : 2017년 299일 - 2019년 2일 자료 획득

3) 시스템 구성

- 지진계 센서: Nanometrics Trillium Compact seismometer, T240(KP05)
- 지진기록계: Nanometrics Centaur(KP01, 02, 03, 07, JBG2), Q330 system(KP05)
- 파워시스템: A 타입 또는 Tower 타입 솔라패널시스템, 충전용 배터리, 리튬 보조 배터리, IRIS/PASSCAL 전력관리모듈박스
- 인클로저: IRIS/PASSCAL 디자인 DAS 인클로저, KOPRI(KP01, 02, 03, 04, 07) & IRIS/PASSCAL(KP05, JBG2) 디자인 센서볼트

다) 난센빙봉 관측망(KPSN@TNB) : 난센빙봉 관측망은 항상 강풍으로 유지보수 작업이 어려운 지역이다. 올 시즌에는 작년에 솔라타워가 파손되어 보수 하지 못했던 KN03 관측소 이외에 특별히 파손된 관측소가 없었다. 솔라타워의 높이를 줄여서 설치한 효과가 있는 것으로 보인다.

1) 각 관측소의 유지/보수 작업 수행 결과

- 작업 내용 : 각 관측소 지진자료 백업 및 배터리 교체작업 수행
- 장비 현황 : 모든 관측소 상태양호

2) 지진 기록

- KN01 : 2017년 309일 - 2018년 316일 자료 획득
- KN02 : 2017년 309일 - 2018년 312일 자료 획득
- KN04 : 2017년 309일 - 2018년 318일 자료 획득
- KT01 : 2017년 311일 - 2018년 320일 자료 획득
(동계기간 전력 부족으로 41일간 자료 손실)

3) 시스템 구성

- 지진계 센서 : Nanometrics Trillium 240 broadband seismometer(T240)(KN01, 02, 03, 04), Compact(KT01)
- 지진기록계: Quanterra Q330, Baler44 package(8 Gb memory × 2)(KN01, 02, 03, 04), Centaur(KT01)
- 파워시스템: Tower 타입 솔라패널시스템, 충전용 배터리, 리튬 보조 배터리, IRIS/PASSCAL 전력관리모듈박스
- 인클로저: KOPRI 디자인 DAS 인클로저 & 센서볼트

(라) 빙하 모니터링 GPS 시스템 유지보수 및 신규 관측

- 데이비드 빙하 지역 GPS 5기 유지 보수
- 데이비드 빙하 지역 GPS 1기 이동설치
- 캠벨 빙하지역 GPS 3기 유지 보수
- 캠벨 및 프리슬리 빙하지역 GPS 5기 신규 설치

* GPS 유지보수 및 신규 설치 측정

Site	Location	Lat	Lon	Instrument	Duty cycle	Bat.	Date	AH(old)	AH(new)
KGPS13	D1	-75.22664	157.32803	wKGPS	60mins 2/day	3 Li-Ion	17/11/2018	50	190
KGPS16	D2	-75.39107	155.83358	wKGPS	60mins 2/day	3 Li-Ion	17/11/2018	160	160
KGPS18	D2	-75.32203	155.34485	wKGPS	60mins 2/day	4 Li	17/11/2018	120	170
KGPS20	Campbell Gl.	-74.48953	164.32596	wKGPS	60mins 2/day	3 Li-Ion	01/11/2018	188	190
KGPS21	Campbell Gl.	-74.38013	164.33990	wKGPS	60mins 2/day	3 Li-Ion	01/11/2018	123	174
KGPS23	Campbell Gl.	-74.35909	164.34290	wKGPS	60mins 2/day	3 Li-Ion	01/11/2018	104	174
KGPS24	Campbell Gl.	-74.67510 0	164.50950 0	Trimble	5sec Continuous	Solar-Li100AH	05/11/2018		Not measured
KGPS25	New lake	-75.55517	156.12133	wKGPS	60mins 2/day	Recovered	17/11/2018	95	
KGPS26	D1	-75.17691	157.98063	wKGPS	60mins 2/day	3 Li-Ion			
KGPS27	Campbell Gl.	-74.54438	164.36968	Trimble	5sec Continuous	Solar-40AH Gel	10/11/2018		190
KGPS28	Campbell Gl.	-74.46467	164.33545	KGPS1	60mins 2/day	4 Li used (18.2V)	10/11/2018		190
KGPS29	Campbell Gl.	-74.33898	164.33320	Trimble	5sec Continuous	Solar-40AH Gel	10/11/2018		193
KGPS30	Campbell Gl.	-74.31872	164.30715	KGPS2	60mins 2/day	4 Li used (17.99V)	10/11/2018		175
KGPS31	Campbell Gl.	-74.40360	164.35800	cKGPS	60mins 6/day	3 Li-Ion	16/11/2018		190
KGPS32	D2	-75.36040	155.32622	wKGPS from KGPS25	60mins 2/day	4 Li	17/11/2018	177	
KGPS33	Priesley (NAP10)	-74.44245	163.37880	Trimble	1sec	Solar	18/11/2018	147	

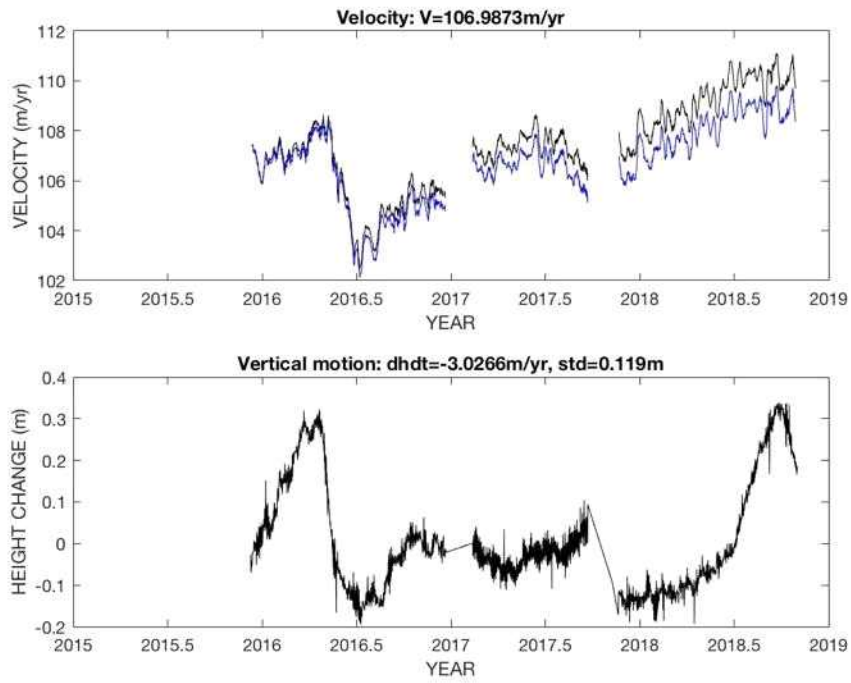


그림 189 캠프벨 빙하 KGPS21측점에서 관측된 빙하 속도 및 고도의 주기적 변화

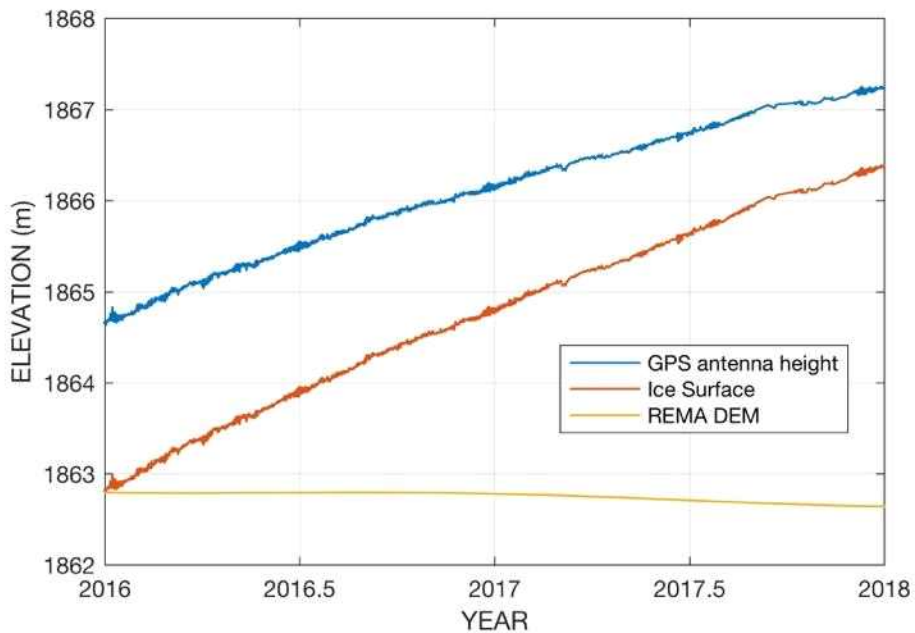


그림 190 데이비드 빙하 D2 빙저호(KGPS18)에서 관측된 고도 변화

(마) 자기지전류 탐사 자료 획득

- 뿔번화산 지역 자기지전류 모니터링 자료 회수



그림 191 자기지전류 모니터링 장비 회수

(바) 초전도 중력계 유지보수(장보고기지)

- 장보고기지 초전도 중력계 cold head 교체



그림 192 초전도 중력계 cold head 교체

(사) AMIGOS 시스템 유지보수

- 드라이갈스키 빙봉 1기 (KA2) 유지보수
- 난센 빙봉 1기 (KA4) 유지보수
- 난센 빙봉 AMIGOS-II 1기 회수
- 난센 빙봉 KA4 관측 재개

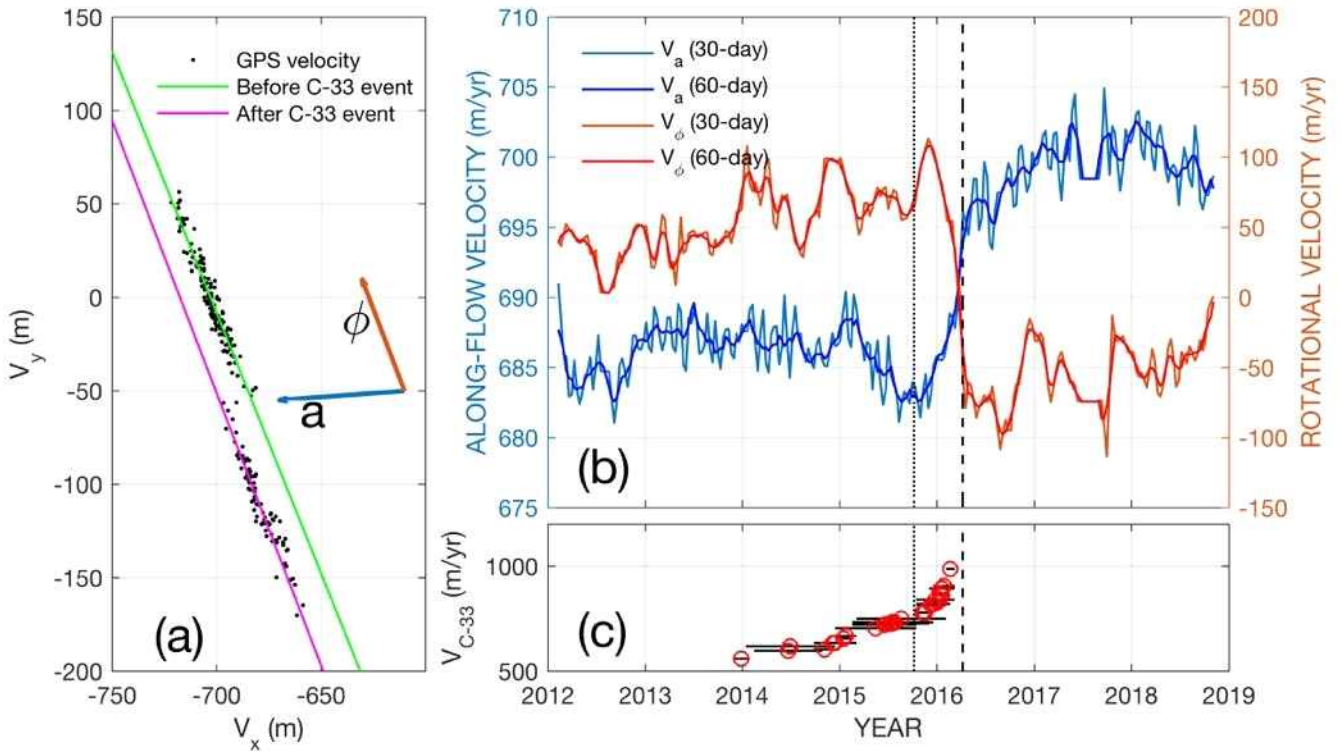


그림 193 드라이갈스키 빙붕 KA2 측점의 수평 거동 양상

(아) ApRES 탐사 및 자료 회수

- 난센 빙붕 모니터링 장비 2기 (HWD, Nap10) 회수
- 난센 빙붕 8측점 탐사 (Nap1-8)
- 드라이갈스키 빙붕 모니터링 장비 1기 (DRY4) 설치
- 프리슬리 빙하 근처 난센 빙붕의 하부용융량 산출
- 하부용융량의 계절 변화 발견
- 지반선 부근 조석에 의한 빙붕의 강한 변형 관측

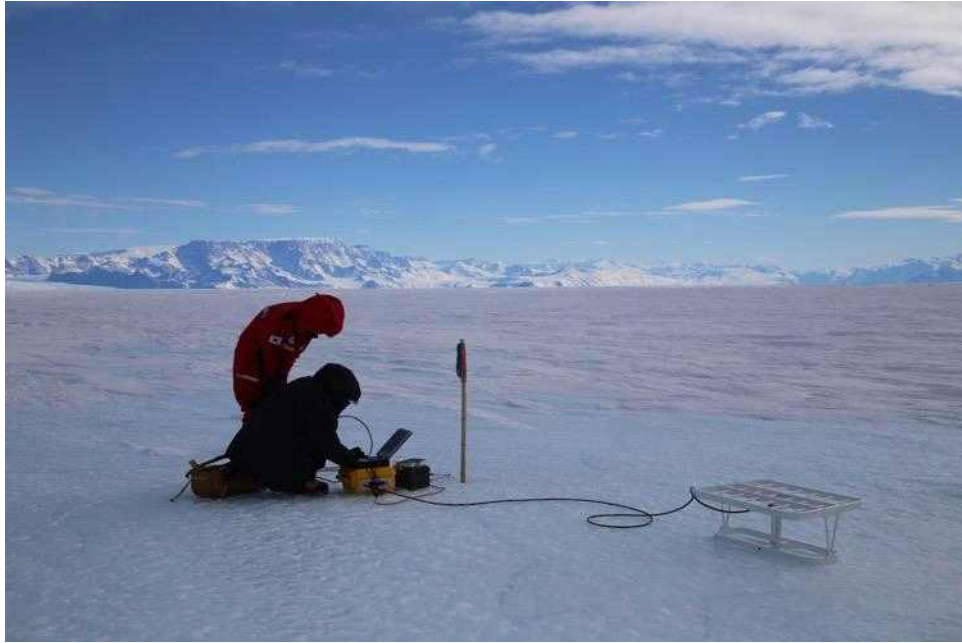


그림 194 난센 빙봉 ApRES 탐사

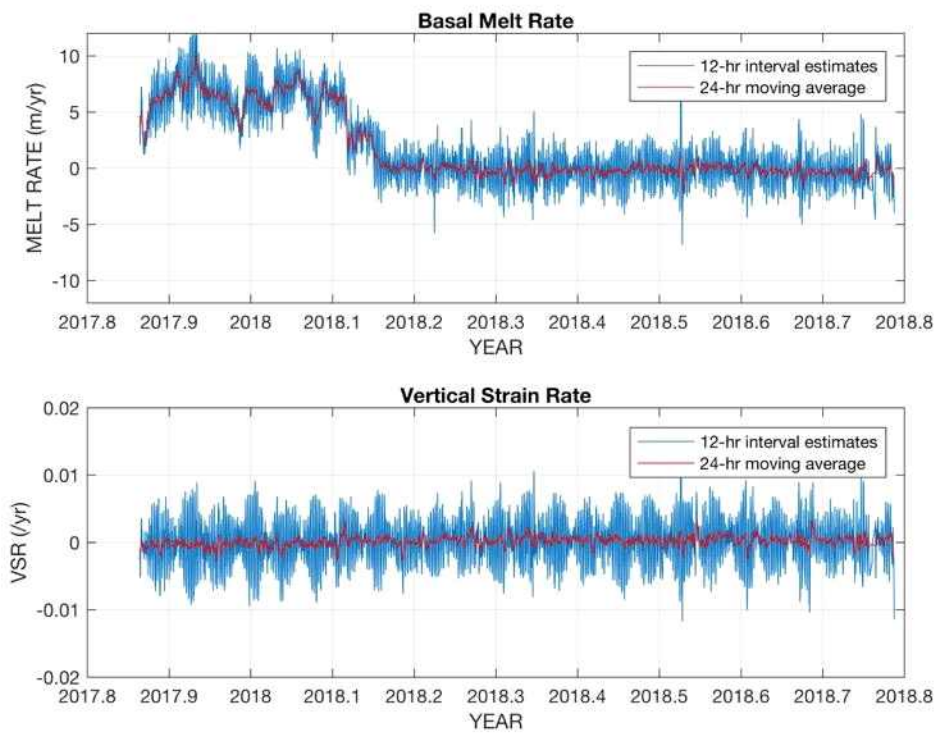


그림 195 프리슬리 빙하 근처 난센 빙봉에서의 하부용융량 변화

나. 해양 환경변화 관측을 위한 탐사

(1) 2014/2015 남극 현장탐사

(가) 연구활동 내용 요약

드라이갈스키 빙붕 부근 물리해양 탐사(CTD 23개 측정), 수중음향관측장비 회수(1개소) 및 해저면 지진관측장비 회수(2개소; 1개소 회수실패), 물리해양 계류장비 설치(2개소), Microlayer 샘플링(1개소)

(나) 현장탐사 일정

2014년 12월 11일 ~ 2014년 12월 17일

(다) 남극현장탐사 관측망 구축 내용

① 관측망 및 장비 특이사항

② 해저면 지진/수중음향 관측 시스템

- 드라이갈스키 빙설과 데이비드 빙하에서 발생하는 빙권관련 신호와 지진 신호를 보다 정확하게 포착하기 위하여 육상 종합관측망 뿐만 아니라 해저 지구물리 관측망을 구축
- 해양지구물리 관측망은 육상관측망에서 관측하기 어려운 해저발생 신호를 보다 효율적으로 관측함으로써 데이비드 빙하의 거동에 결정적인 역할을 하는 드라이갈스키 빙설에서 발생하는 신호를 연속적으로 기록할 수 있고 육상 지진계 관측자료를 보완하여 보다 높은 정확도로 발생 위치결정이 가능하도록 관측망을 구축

▷ 해저면 지진계

독일의 K.U.M 사가 극지연구소와 공동연구를 하고 있는 독일 극지해양연구소 AWI를 위해 개발한 해저면 지진계를 도입. LOBSTER⁶⁰라는 이름의 해저면 지진계는 티타늄 프레임에 앵커, 부이, 센서, 기록계, 배터리, 어쿠스틱 릴리저, 압력 센서가 일체형으로 구성(그림 196).

- 지진계 센서

해저면 지진계의 핵심 구성요소 중 하나인 센서는 KUM사에서 해저용으로 특수 제작한 수심 6000m 에서도 견디는 티타늄 케이스에 Nanometrics사의 Trillium Compact 120s 센서를 장착한 것을 사용. KUM사의 티타늄 케이스 안에는 2 방향의 자유도를 가지는 50°까지 경사를 조절할 수 있는 수평유지 시스템이 있어 어떤 상황에서도 자체적인 수평조절 가능. 케이스에는 3 성분 자기측정기가 함께 장착. 수평이 맞춰진 다음에는 전력소비량은 180mW 이하이고 -40°C ~ 60°C에서 안정적으로 작동. 해저면 지진계는 레벨링(수평맞춤)을 직접 수행할 수 없기 때문에 자동 레벨링이 가장 중요. 이 센서는 3 단계의 레벨링 스케줄러 직접 세팅 가능. 이를 통해 해저면 안착 후에도 해저면의 퇴적물 상태와 해류에 의해 계속적으로 발생할 수 있는 수평 뒤틀림 현상을 방지. 레벨링 작업 중에는 전력 소모가 1.9 W 정도이고 통상적으로 2 분 안에 작업 수행 완료.

60) Longterm OBS for Tsunami and Earthquake Research



그림 196 KUM사의 해저면 지진계, LOBSTER의 모습. 티타늄 프레임에 앵커, 부이, 센서, 기록계, 배터리, 어쿠스틱 릴리저, 압력 센서가 일체형으로 조립됨

- 어쿠스틱 릴리저(Acoustic Releaser)

해저 설치 장비의 경우 직접 사람이 물속에서 장치를 회수할 수 없기 때문에 자동 회수를 위한 장치가 필요. 어쿠스틱 릴리저는 수중에서 음향신호를 받아 체결 고리를 열어주는 장치로 해저면에 안착시키는 앵커와 전체 장비를 연결시키는 역할. LOBSTER의 어쿠스틱 릴리저는 KUM에서 개발한 KUMQUAT K/MT562. 이 장비 역시 해저 6000m 까지 견디는 티타늄 케이스로 제작되었으며 작동 온도 범위는 $-5^{\circ}\text{C} \sim 40^{\circ}\text{C}$. 500Kg 까지 작업가능하며 Release load 는 250Kg이다. Disable 모드에서 전력 소모는 2.5mW이다. 이 장비는 자동 릴리즈 기능이 설정가능한데 스케줄을 설정해놓을 시 자동으로 체결이 해제되어 장비를 회수할 수 있는 기능.

- 기록계

기록계는 SEND Off-Shore Electronics에서 제작한 Geolon-MCS를 사용. 본 기록계는 총 4 채널(3채널 지진자료, 1채널 수중음향자료)을 지원하고 GPS를 통한 시각 동기화(time synchronization) 2msec/day의 시각 정확도. 작동 온도 범위는 $-10^{\circ}\text{C} \sim 75^{\circ}\text{C}$.

- 해저면 수중음향 관측기

2013/2014년 남극하계탐사에서는 고성능의 음향센서가 내장된 수중음향 관측기를 1기 NOAA로부터 임대 설치, 2014/2015년 남극하계탐사시 회수. 앵커, 두개의 센서, 부표로 구성.

▷ XCTD 측정

2013-2014 남극하계탐사에서 해저면 지진계 2기와 해저면 수중음향관측기 1기를 내릴 때 향후 데이터 분석 시 보다 정확한 위치결정을 하기 위하여 XCTD를 각 정점마다 수행하였다.

그림 197은 KPOBS01위치에 2014년 2월 6일에 측정한 XCTD 결과이다. 붉은색 라인은 온도, 연두색은 전도율, 파란색은 염도, 하늘색은 소리의 전파속도, 분홍색은 밀도를 나타낸다. 수온 약층과 존재하고 수층에 저속도층이 존재함을 볼 수 있다. 그림 199은 KPOBH01 사이트에서 2014년 2월 8일에 측정한 XCTD 결과이다. XPOBS01과 비교하여 수온약층이 거의 나타나지 않기 때문에 저속도층이 거의 없음을 볼 수 있다. 표층의 염도도 매우 낮은 것으로 보아 얼음이 녹은 물이 표층에 많이 분포하고 있음을 추측할 수 있다. 그림 198은 드라이갈스키 빙설 남쪽의 KPOBS02 사이트에서 2014년 2월 11일에 측정한 XCTD 결과이다. 뚜렷한 수온 약층과 저속도층을 볼 수 있다.

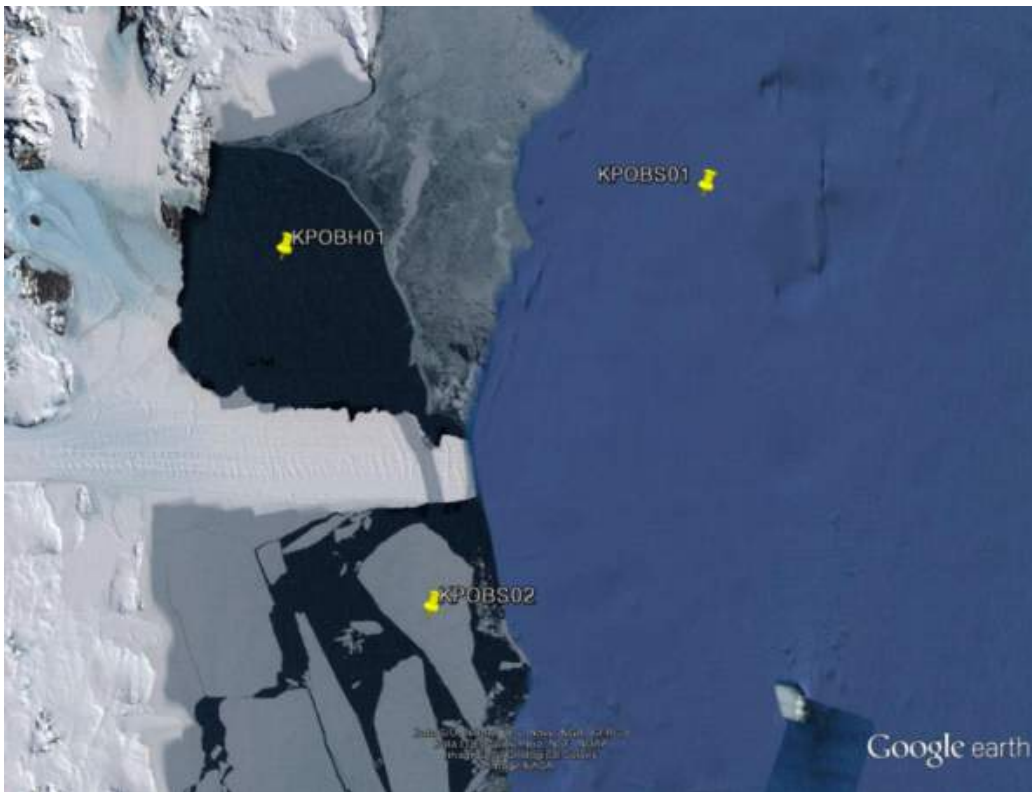


그림 197 2014/2015 남극하계탐사에서 회수 시도한 해저면 지진계 2기 (KPOBS01, KPOBS02: 회수실패)와 해저면 수중음향관측기 1기(KPOBH01)의 위치



그림 198 KPOBS01 회수장면



그림 199 해저면 수중음향관측장비(KOBH01).

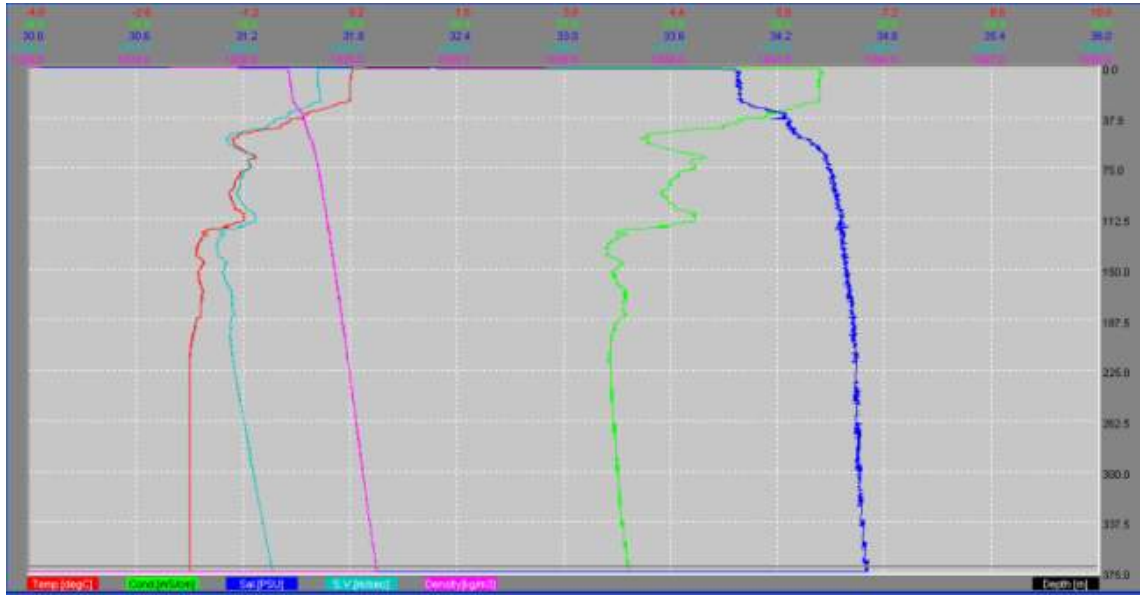


그림 200 KPOBS01 위치에서 획득한 XCTD 결과. 붉은색은 온도, 연두색은 전도율, 파란색은 염도, 하늘색은 수중음파 전파속도, 분홍색은 밀도를 나타낸다. 수온약층이 존재하고 수층에 저속도층이 존재함을 확인할 수 있다.

KOPRI

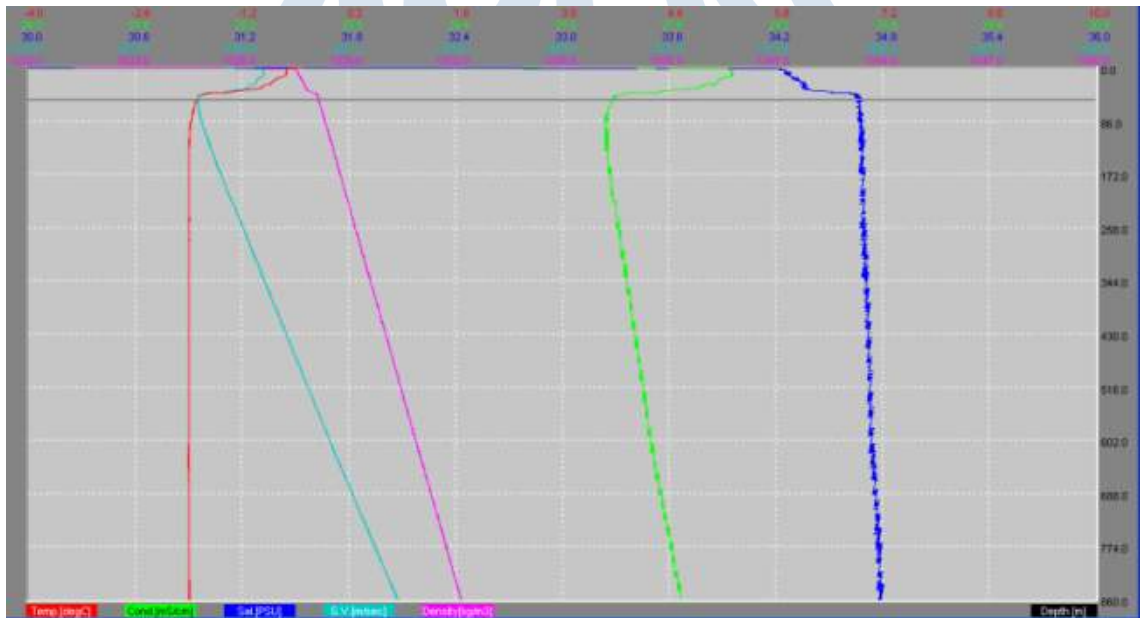


그림 201 드라이갈스키 빙설 남쪽 KPOBS02 위치에서 측정된 XCTD 결과. 뚜렷한 수온 약층과 저속도층이 관찰된다.

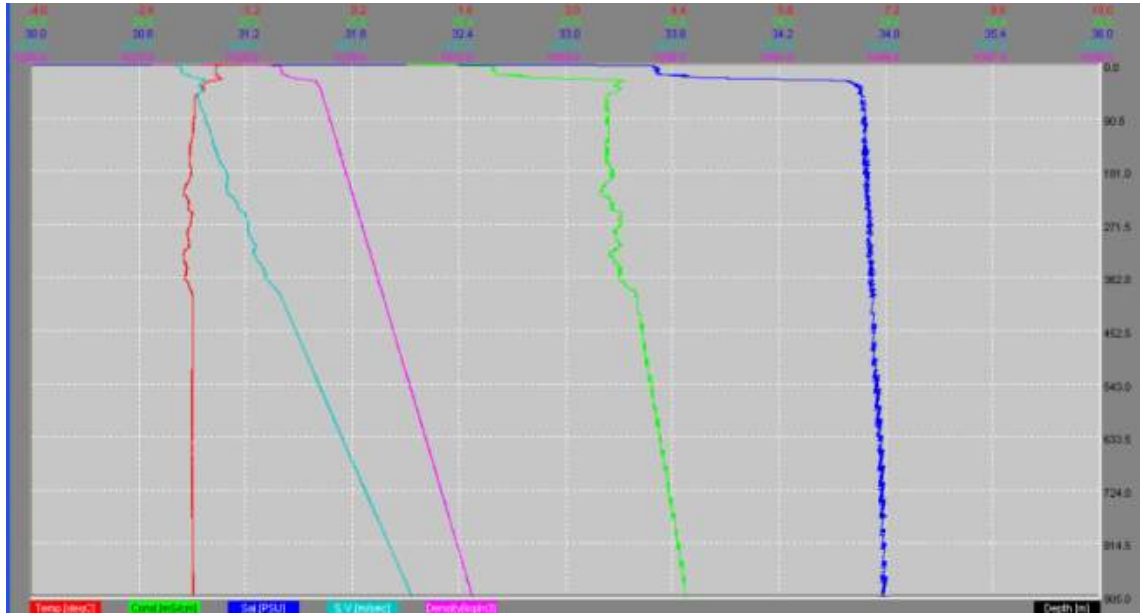


그림 202 KPOBH01 위치에서 측정된 XCTD 결과. 수온약층이 매우 약하게 나타나고 저속도층이 거의 없음을 확인할 수 있다.



(2) 2015/2016 남극 현장탐사

장보고 기지 주변의 빙권 변화를 예측하기 위해서는 영향을 미치는 주요 요소 중 하나인 해양환경변화 관측이 필수적이다. 이에 지구물리 연구실에서는 2015/2016 남극 하계탐사 기간 중 아라온을 이용하여 로스해 종합 해양지구물리 탐사를 수행하였다.

(가) 연구활동 내용 요약

기간	2015년 12월 08일 14:30LT ~ 2015년 12월 16일 21:50LT(총: 8.30일)		
조사해역	남극 로스해	선박	IBRV. ARAON
수행 작업	<ul style="list-style-type: none"> - 수중음향관측기 3기 설치 (NOAA 협력) - 로스빙붕 앞 해저면 지진계 1기 회수 - 드라이갈스키 빙설 인근 해양물리 계류장비 1기 회수 후 재설치 (NIWA 협력) - 테라노바만 해양물리 계류장비 1기 설치 (미 LDEO 협력) - CTD와 LADCP 22 정점 수행 및 해수 채취 - AUV용 멀티빔, SBP 센서, Inertial Navigation System 테스트 (AMC 협력) 		
참여 연구원	극지연구소	윤숙영, 황청연, 이지연, 이인애	
	미국 NOAA	Sharon Nieu Kirk	
	미국 LDEO	Christopher Zappa, Scott Brown	
	AMC (Australian Maritime College)	Isak Bowden, Karl Manzer	
	NIWA	Brett Grant	
조사장비 현황	SBP, Multibeam, CTD, LADCP, Jodiac boat, Gravity Core, Long Core, Box Core, Dredge, Acoustic transducer & Deck Unit		

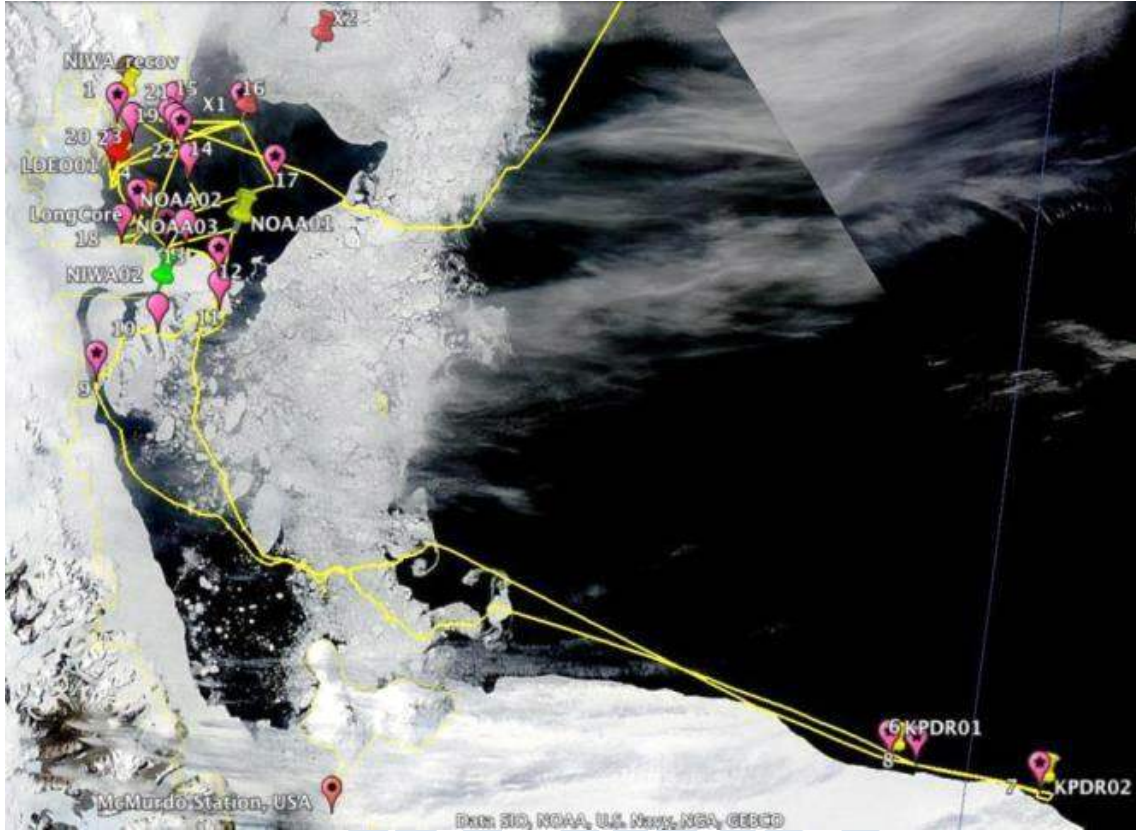


그림 203 연구 작업 수행 정점과 항적도

(다) 수중음향 관측망 설치

드라이갈스키 빙설을 비롯한 해양 빙권 기원 신호와 해저 지각활동을 관측하기 위하여 NOAA와 협력하여 수중음향 관측기 3기를 설치하였다. 본 장비는 2005년에서 2010년까지 남극 브랜스필드에 설치되어 육상지진관측망으로 포착하지 못한 미세한 신호를 잡아낼 수 있음이 검증된 것으로 1년동안 계류한 후 2016/2017 남극 탐사시 회수할 예정이다. 계류된 장비의 위치는 그림 201와 같다.

표 11 하이드로폰 설치 위치도

Station	Target Lat. Lon.	Anchor dropped	Water depth(m)
HC15	75° 18' 14.1" S 165° 59' 02.0" E	75° 18' 14.1" S 165° 59' 02.0" E	838
HC14	75° 19' 22.3" S 165° 59' 33.3" E	75° 19' 22.3" S 165° 59' 33.3" E	810
HC16	75° 18' 56.9" S 165° 55' 45.2" E	75° 18' 57.2" S 165° 55' 43.7" E	830



그림 204 하이드로폰 설치 위치도



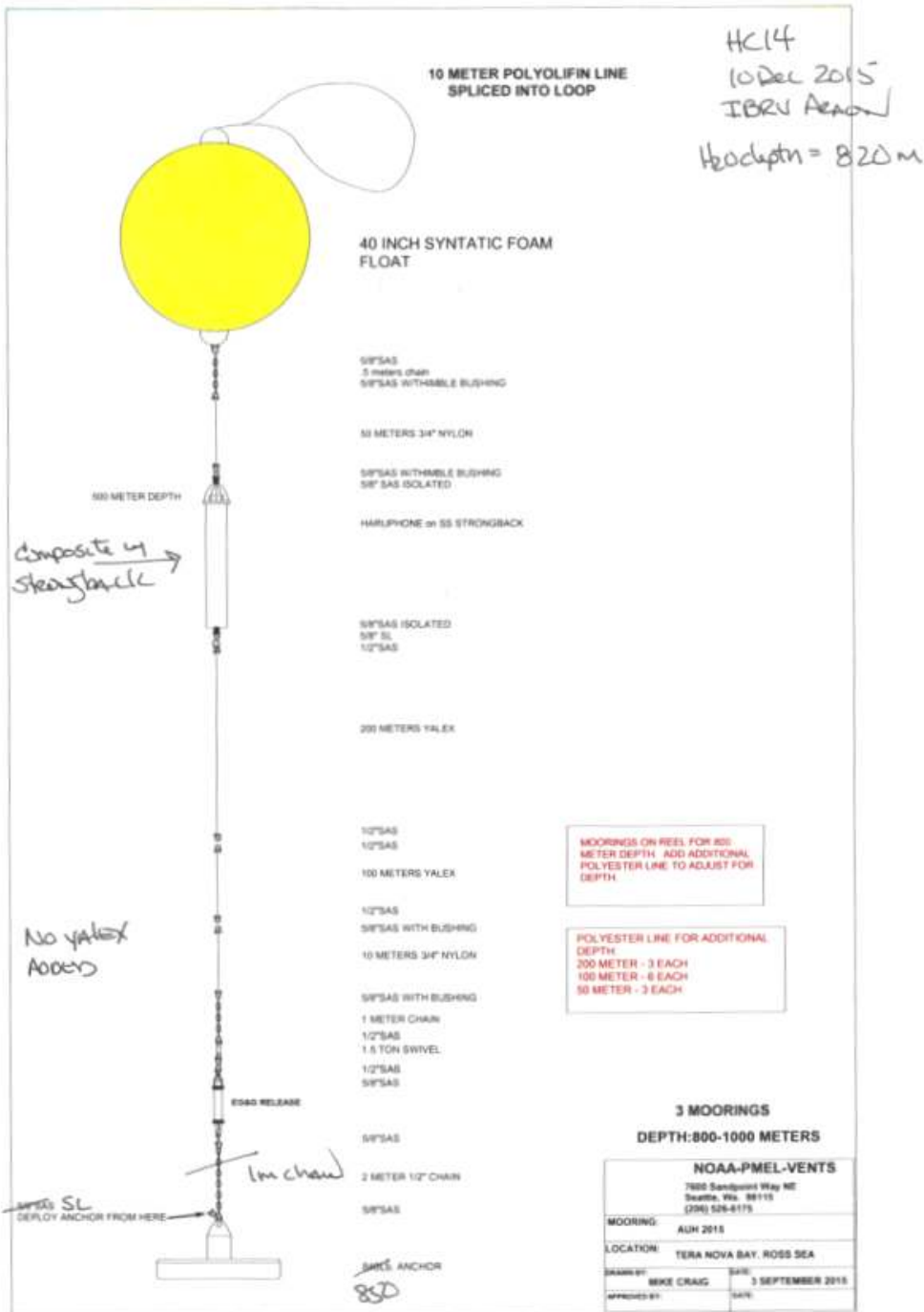


그림 205 계류장비 모식도

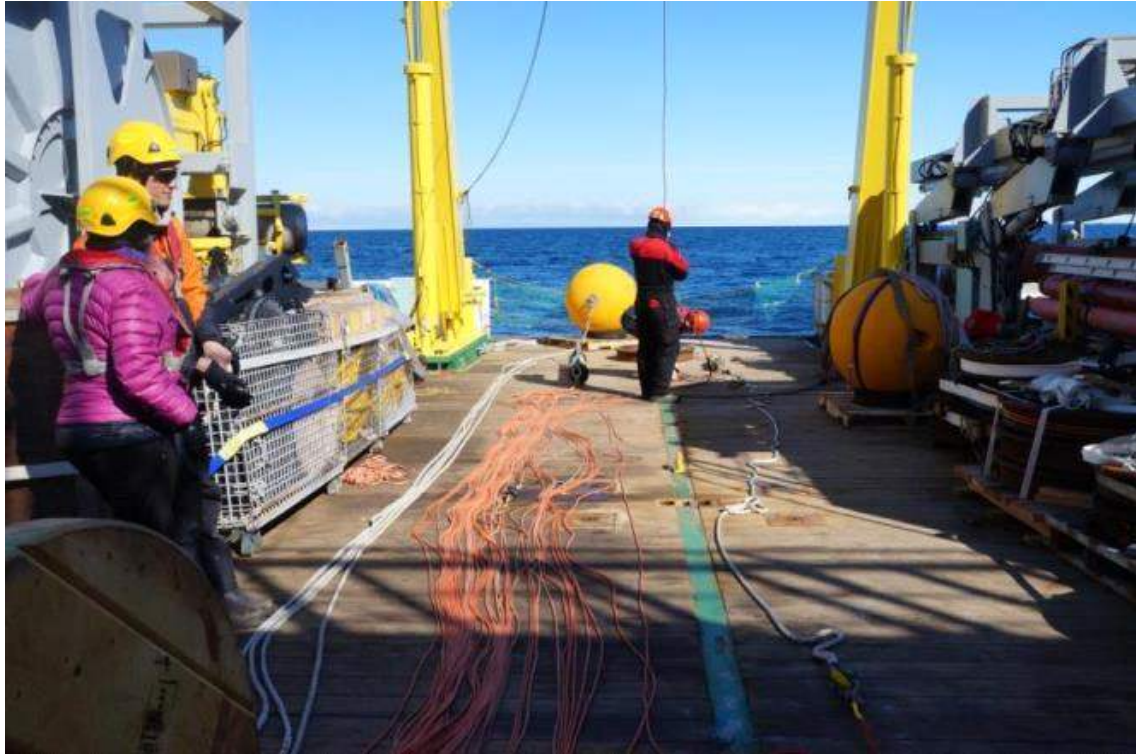


그림 206 하이드로폰 설치 과정



(라) 해저면 지진계 회수

로스 빙봉의 안정성에 바다의 영향을 규명하기 위하여 2014/2015 남극하계 탐사 시 로스 빙봉 앞에 해저면 지진계 2기를 설치하였고 본 현장탐사시 1기의 해저면 지진계를 회수하였다. 각 해저면 지진계의 위치는 아래 표와 같다. KPDR01은 극지연구소 소유의 해저면 지진계이고 KPDR02는 독일 AWI 연구소 소유의 해저면 지진계를 임대하여 설치된 것이다.

	Location	Water depth(m)
KPDR01	77° 41.597' S, 178° 20.619' E	741
KPDR02	77° 45.1714' S, 178° 26.2201' W	678

KPDR01은 2015/12/11 23:42(뉴질랜드 기준 현지시각)에 Release 신호를 보낸지 9분후에 해수면에서 발견되어 12/12 00:12에 회수가 완료되었고 현재 제작사인 독일 KUM에서 시각 캘리브레이션 작업과 자료 선처리 작업이 진행중이다.



그림 207 KPDR01 해저면 지진계 회수

KPDR02는 음파원격이탈기(Acoustic Releaser) 상태이상으로 인하여 회수에 실패하였다. 2015/12/12 06:05 최초 Enable 신호 이후 10번에 걸친 Enable 신호에 응답이 없었으며 7번에 걸친 Release 신호 송신에도 응답이 없었다. 현재 본 장비는 16/17 남극 하계탐사에서 자동이탈을 통한 회수를 시도할 예정이다.

(마) NIWA 해양물리 계류장비 회수와 재설치

2014/2015 남극하계탐사시 드라이갈스키 빙설의 용융현상과 해류, 해수의 물리적 특성을 관측하기 위하여 NIWA 연구소와 협력하여 2기의 종합 해양물리 관측장비를 드라이갈스키 남쪽과 북쪽에 설치하였다. 설치위치와 장비의 구성은 각각 그림 205과 그림 206와 같다. 이 중 북쪽에 설치된 DITN은 회수를 완료후 재설치를 하였으나 남쪽에 설치된 DITS는 설치장소가 해빙으로 덮혀 1년간 더 운용 후 2016/2017 하계탐사시 회수할 예정이다. 회수한 DITN의 데이터는 그림 207~222에 그래프로 표시하였다.

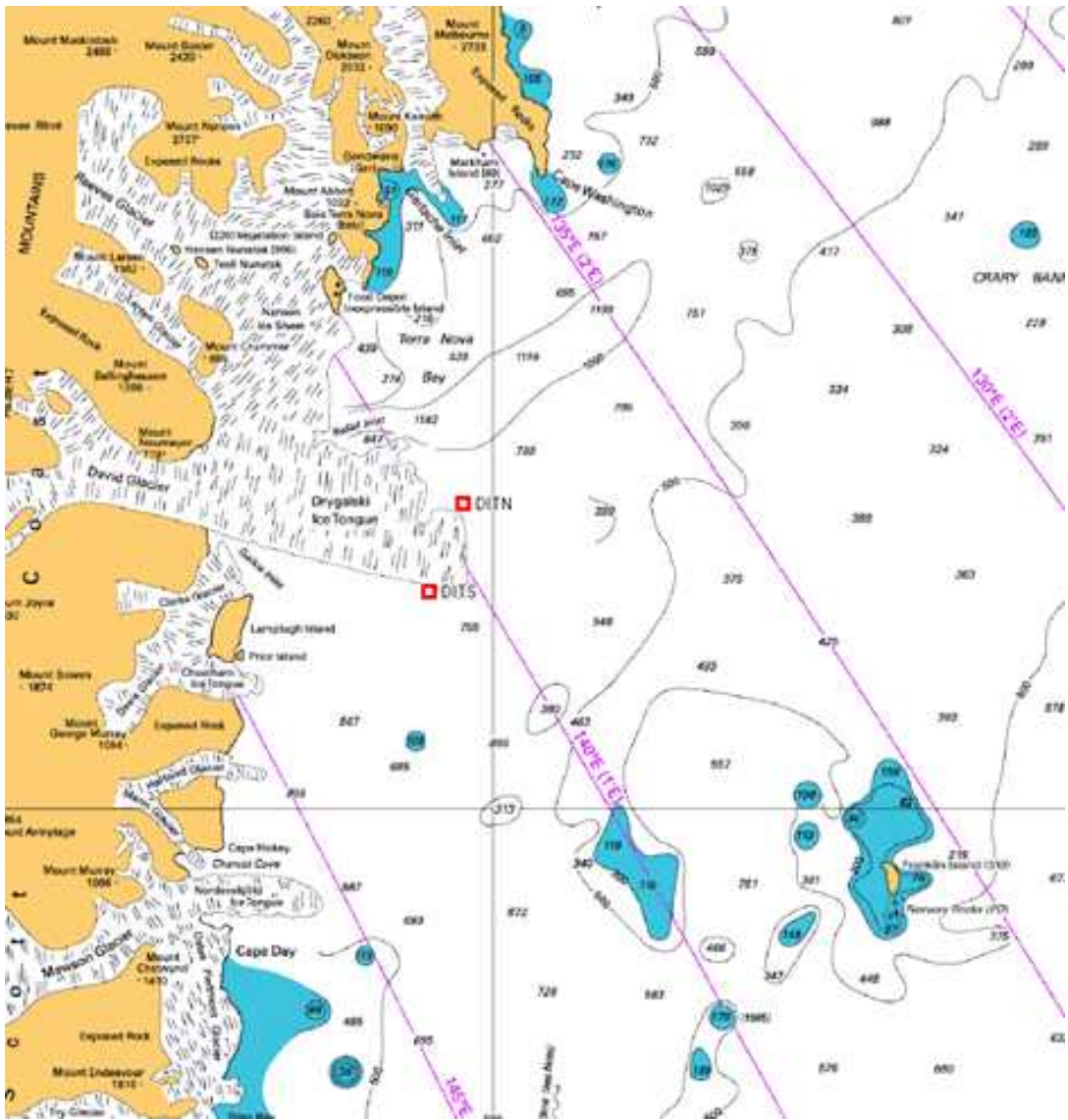


그림 208 계류위치도

DITN Mooring Dec2014 14-Dec-2014

depth	component	S/N	length	rope
71 m	Pickup float			
81 m	Benthos	(6)	10 m	6.0mm dyneema
85 m	RCM9			
86 m	Microcat			
			35 m	3/16" wire jc
121 m	SBE56		40 m	3/16" wire jc
161 m	SBE56		40 m	3/16" wire jc
202 m	SBE56		40 m	3/16" wire jc
242 m	SBE56		40 m	3/16" wire jc
282 m	Benthos	(3)		
286 m	RCM9			
287 m	Microcat			
			390 m	6.0mm dyneema
678 m	Microcat			
678 m	Benthos	(4)		
682 m	RCM9			
			0.5 m	Chain 10mm
683 m	2-AR		0.5 m	Chain 10mm
			5 m	Chain 13mm
690 m	anchor 460 kg			

그림 209 NIWA 계류장비 구성 모식도

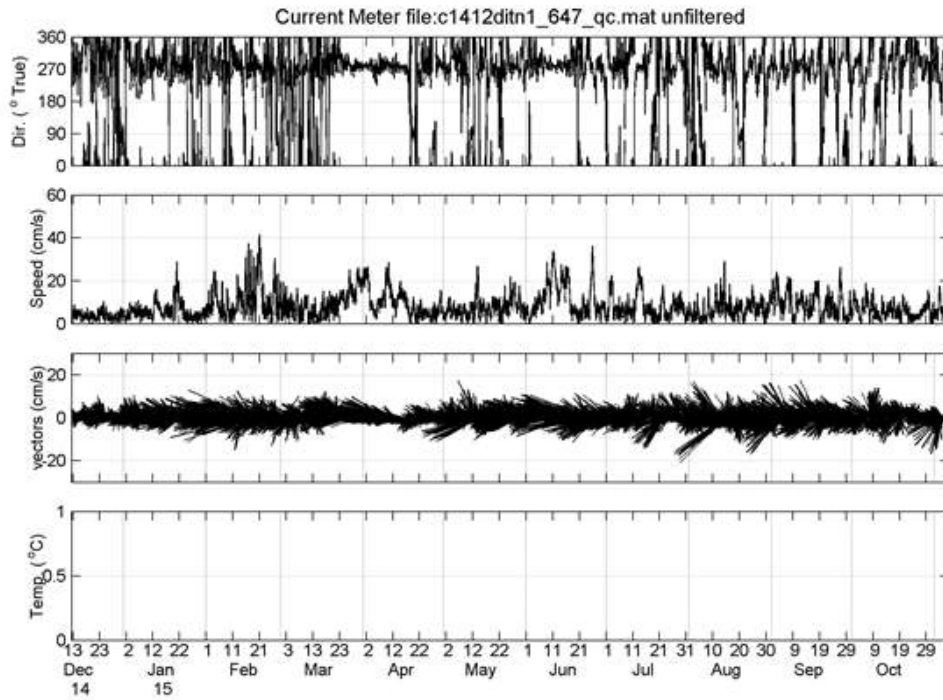


그림 210 상부 해류 측정

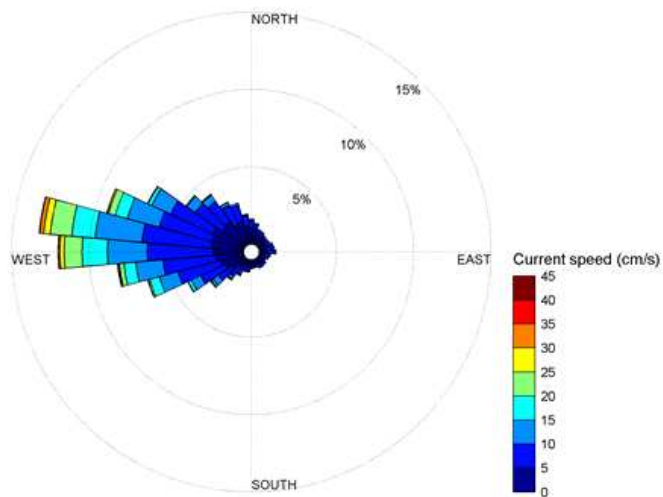
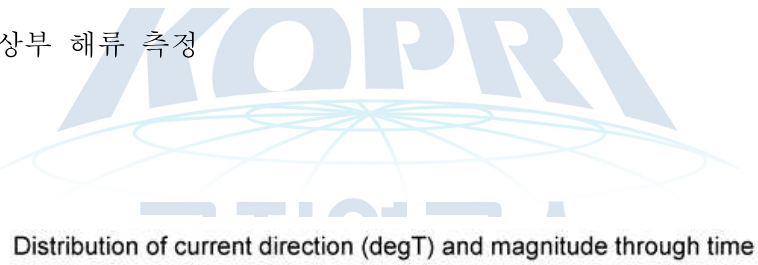


그림 211 상부 해류 방향과 속도

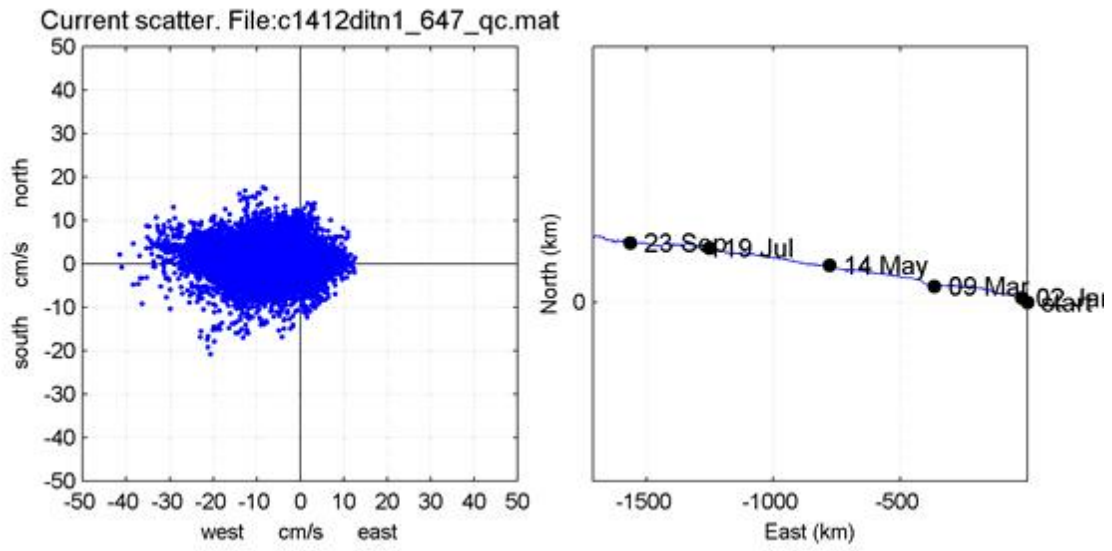


그림 212 상부 해류 변화양상

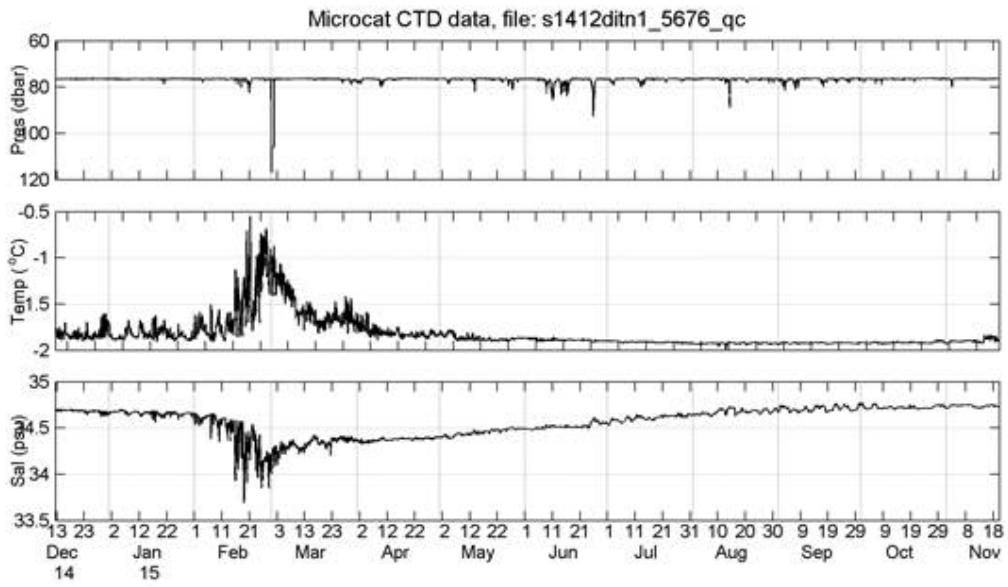


그림 213 상부 압력, 온도 염도

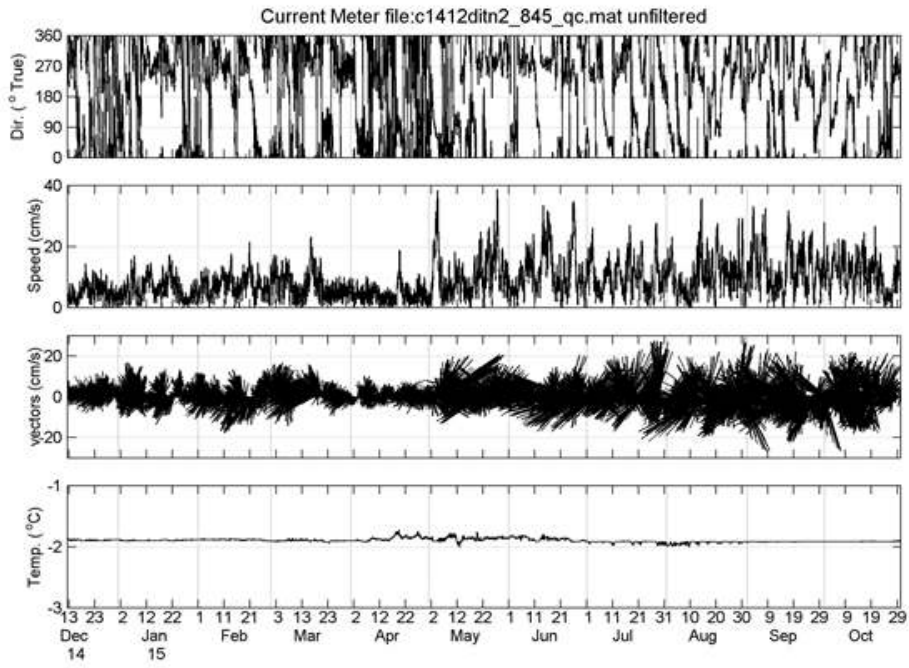


그림 214 중간부 센서에서 측정된 해류, 온도

Distribution of current direction (degT) and magnitude through time

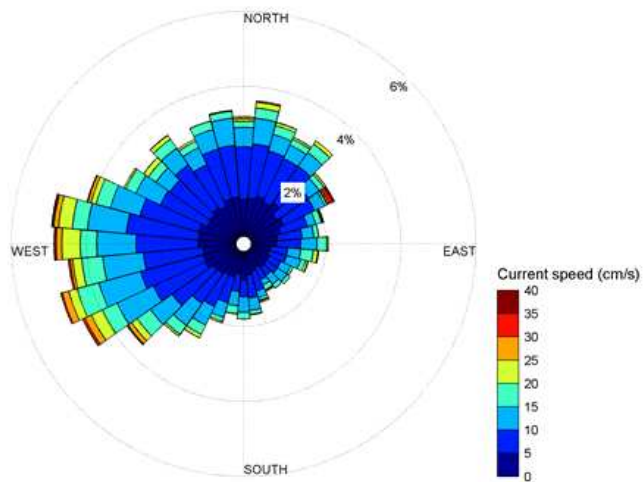


그림 215 중간부 해류 방향

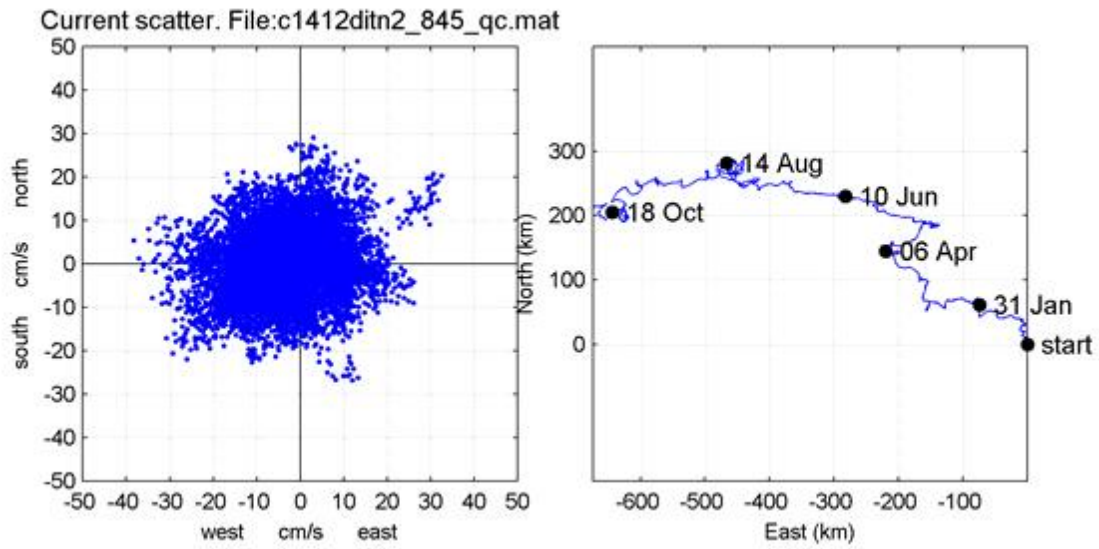


그림 216 중간부 깊이에서의 해류 방향 변화 양상

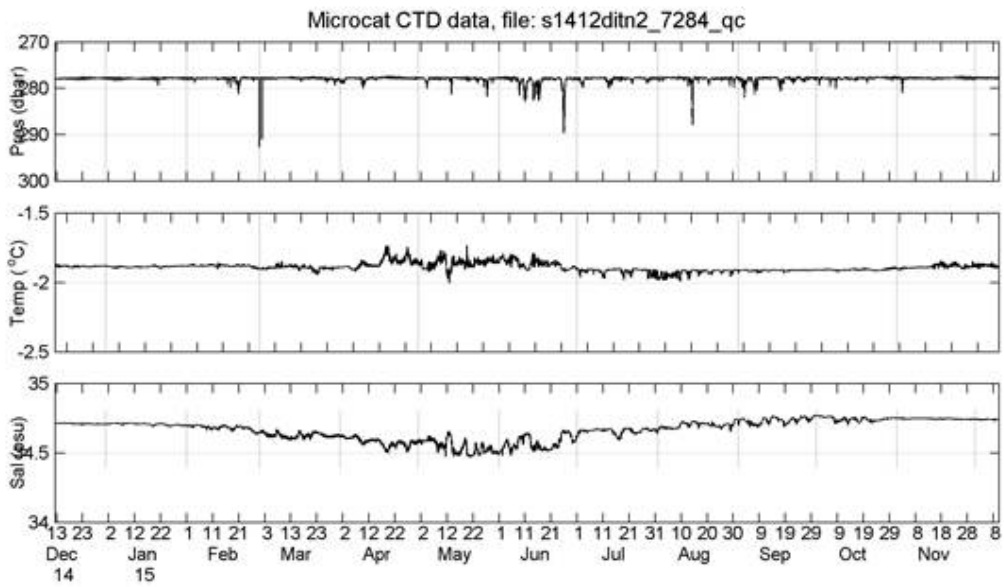


그림 217 중간 깊이에서의 압력, 온도, 염도

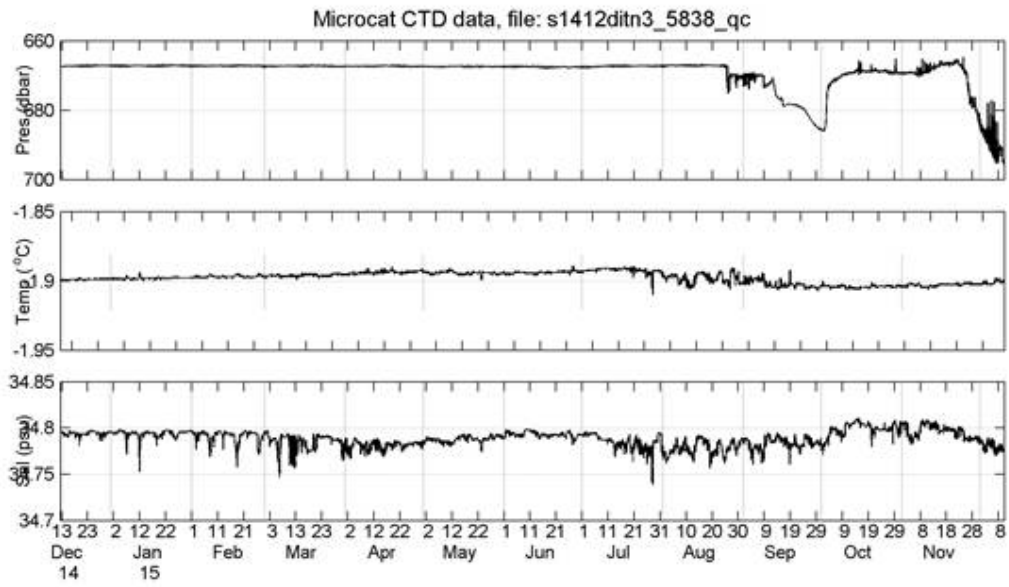


그림 218 하단부 압력 온도 염도

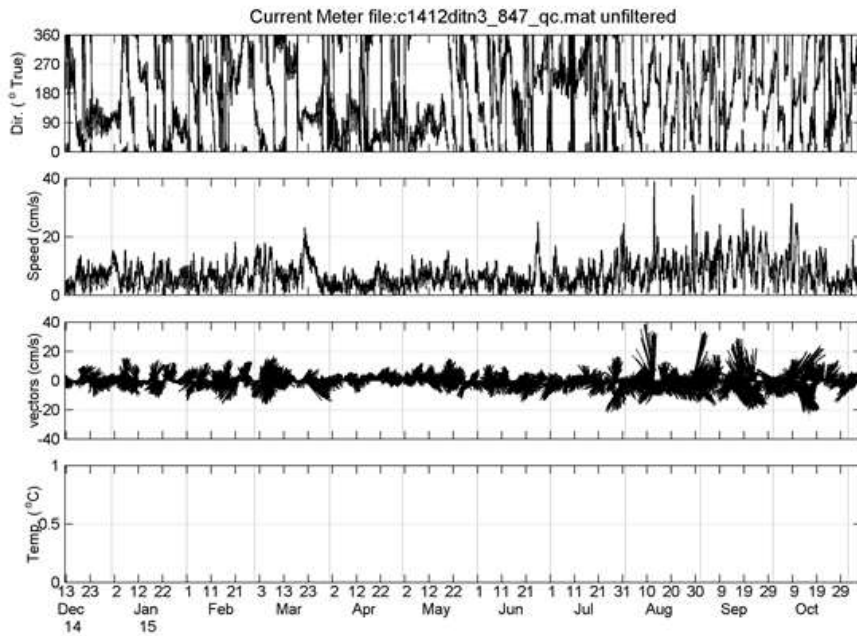


그림 219 하단부 해류 측정 결과

Distribution of current direction (degT) and magnitude through time

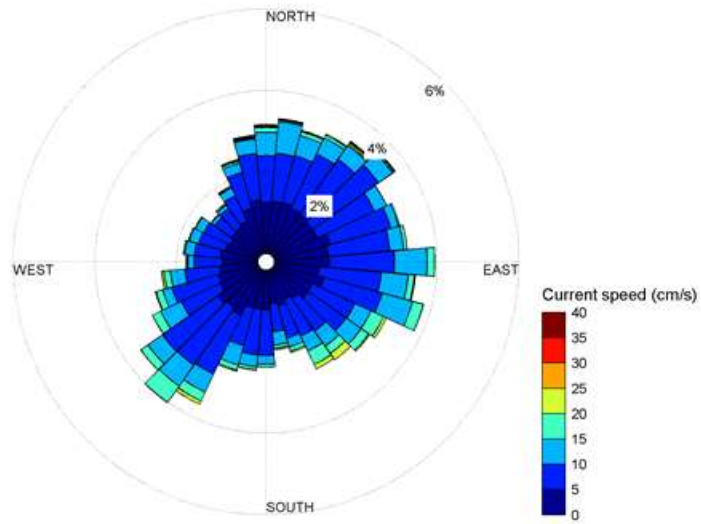


그림 220 하단부 해류 방향

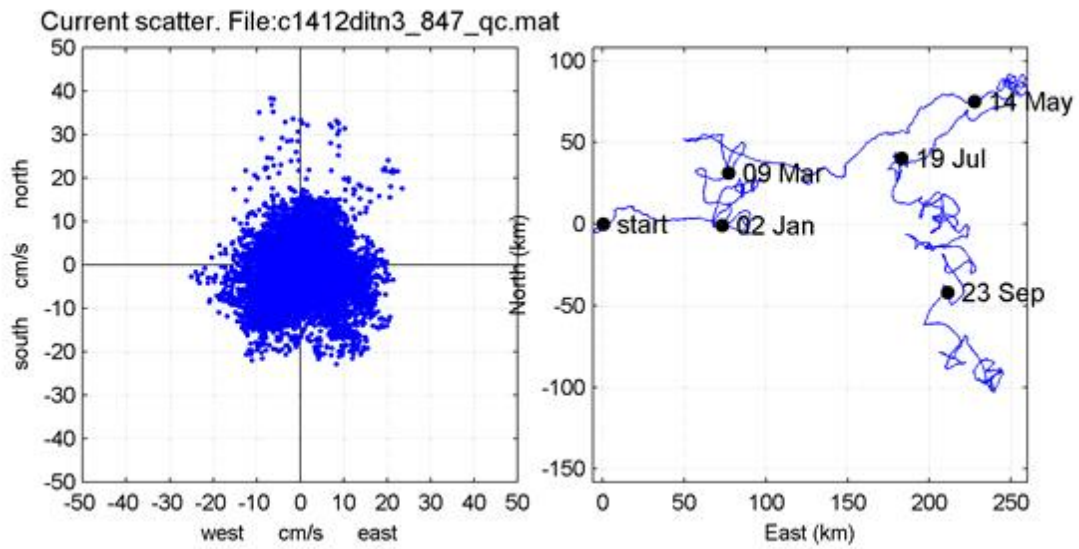


그림 221 하단부 해류 변화 양상

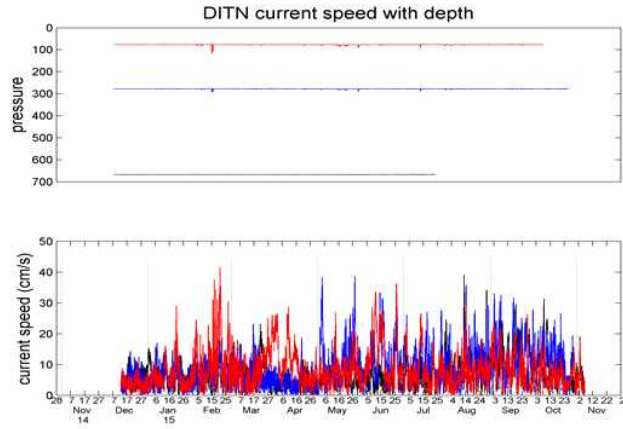


그림 222 깊이에 따른 압력과 해류 속도

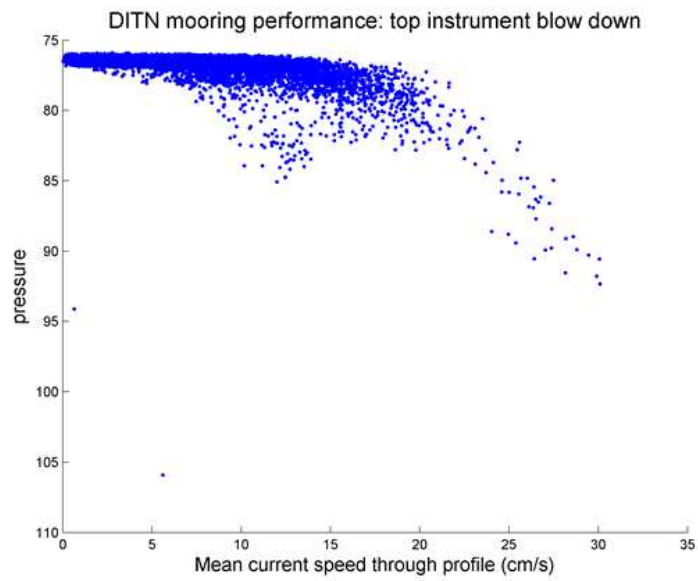


그림 223 해류 속도에 따른 계류장비 높이 변화

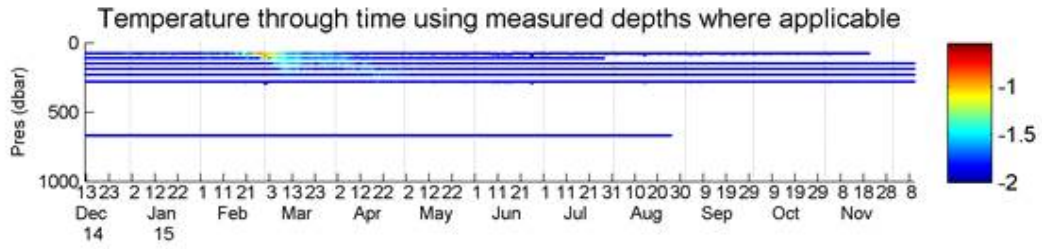


그림 224 깊이별 시간에 따른 수온 변화

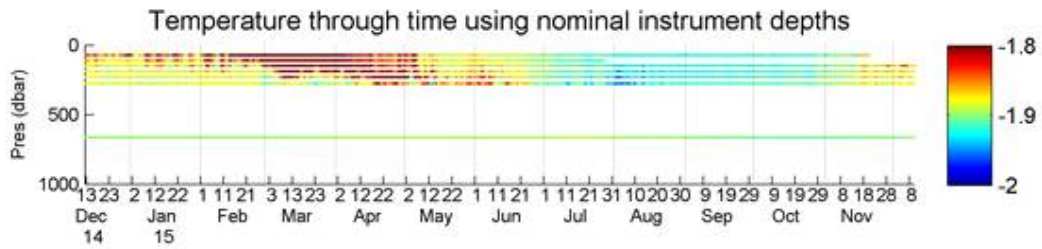
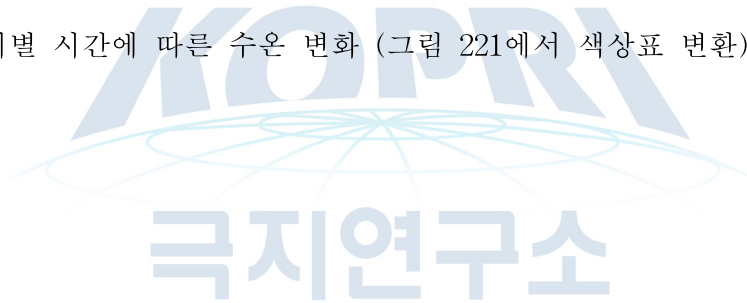


그림 225 깊이별 시간에 따른 수온 변화 (그림 221에서 색상표 변환)



(바) LDEO 해양물리 계류장비 설치

빅토리아랜드에서 테라노바만으로 연중 강하게 불어오는 활강풍은 해수의 대류 현상을 야기시켜 해수면에 활발한 결빙 현상이 생길 수 있게 하고, 이러한 결빙현상으로 인하여 생성된 고염도의 해수는 해양심층수로서 가라앉게 된다. 이러한 현상을 관측하기 위하여 미 Lamont-Doherty Earth Observatory (LDEO)와 공동으로 테라노바만에 해저 계류장비(그림 226)를 설치하였다. 본 계류장비는 높이정보가 매우 중요하기 때문에 타겟 지역을 중심으로 멀티빔 탐사를 실시하여 자세한 해저지형도를 획득하여 위치를 선정하였다 (그림 227)

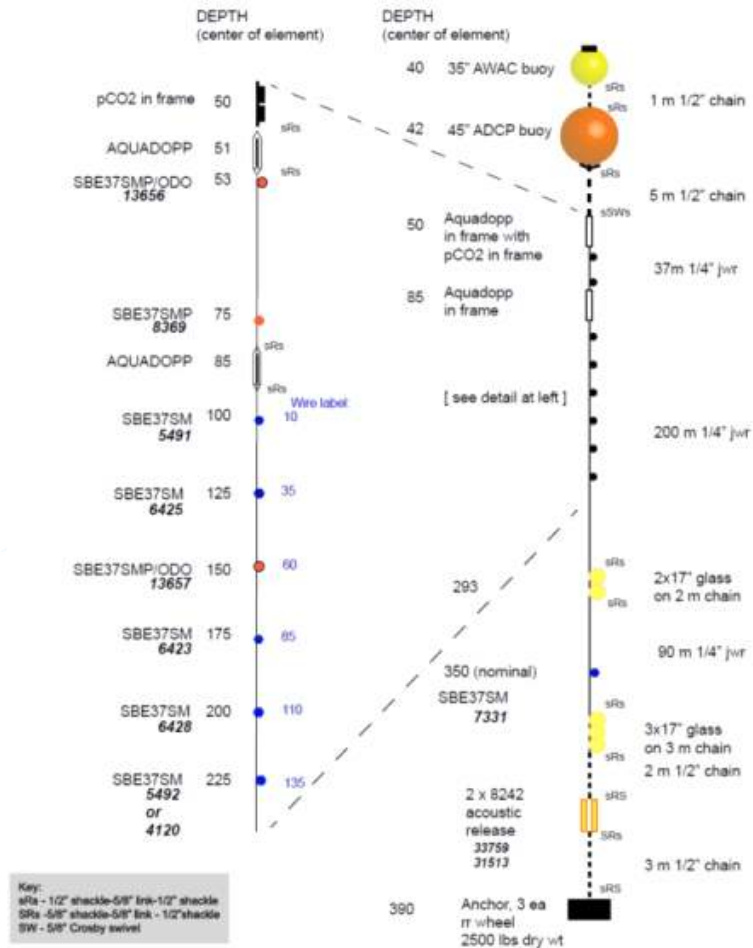


그림 226 LDEO 계류장비 구조

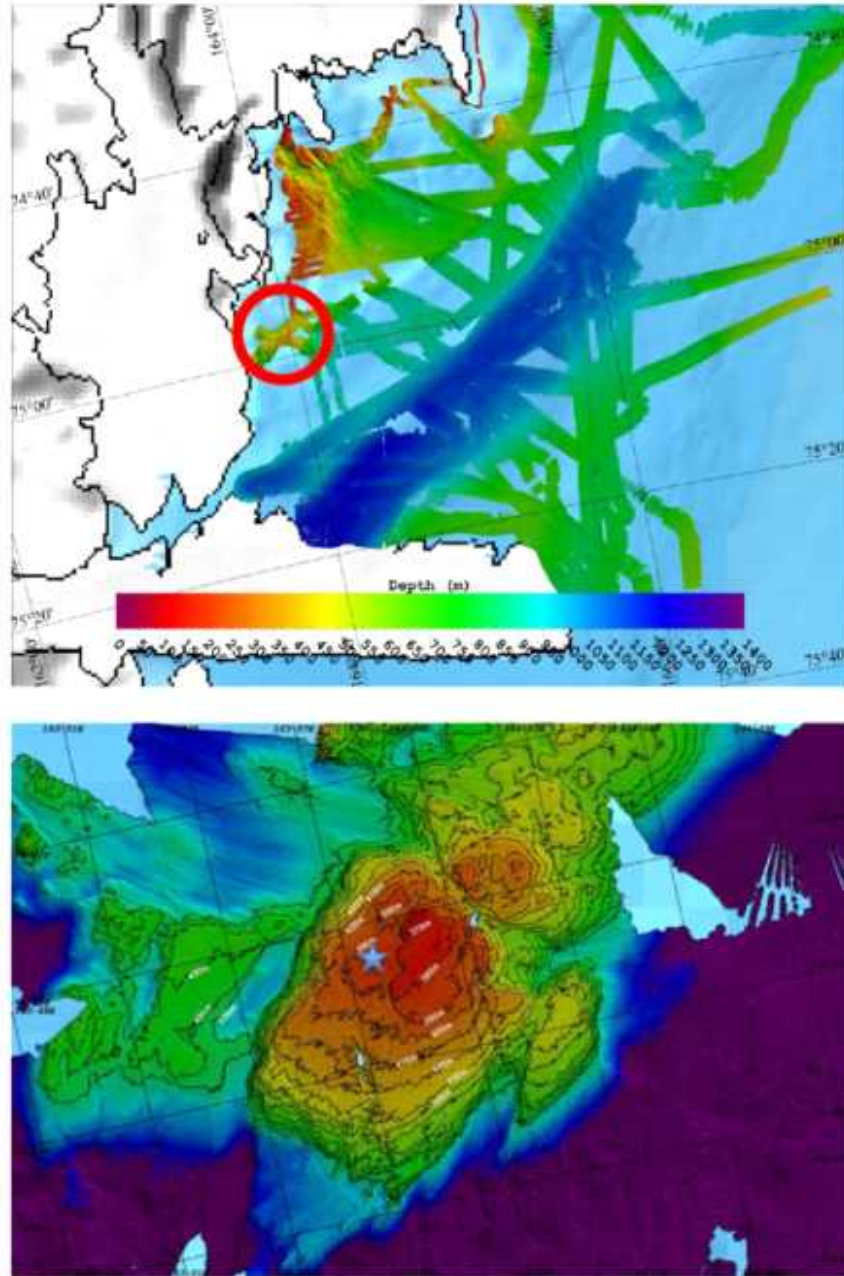


그림 227 멀티빔 탐사를 통한 LDEO 계류장비 설치 위치 선정

(사) CTD와 LADCP 측정

CTD를 이용한 해수의 깊이별 온도와 염도를 비롯한 다양한 생화학적 성분 측정을 통하여 수권의 환경변화 관측과 이들이 생태에 미치는 영향을 연구할 수 있다. 2015/2016 남극 하계탐사에서는 아라온의 CTD (SBE911plus CTD)와 LADCP(Lowered Acoustic Doppler Current Profiler, RDI, 300 kHz)를 이용하여 22 정점을 관측하였다.

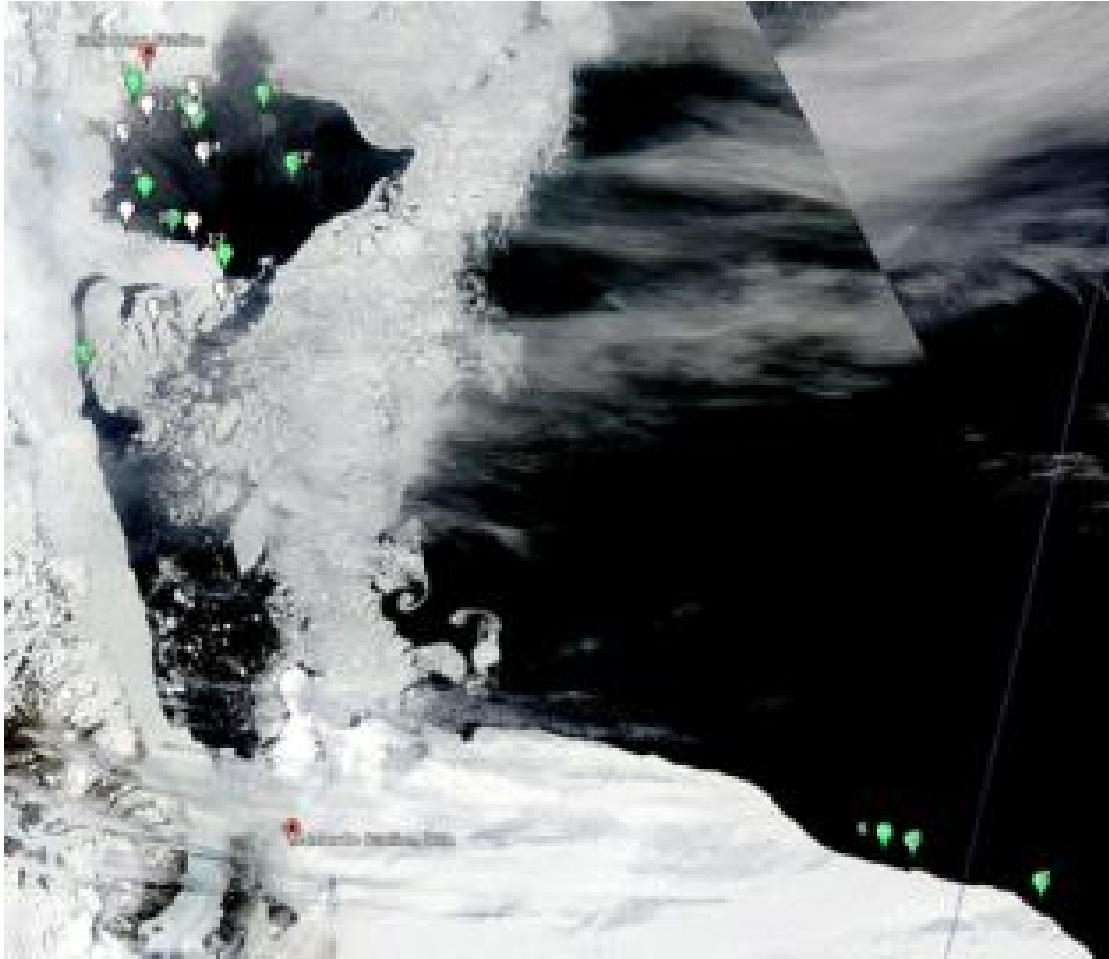


그림 228 CTD와 LADCP 관측 위치도

드라이갈스키 빙설 복단을 따라 4개 지점에서의 수온과 염도 분포는 그림 229와 같다. 육지에서 멀어질수록 표면 수온이 높아지고 염도가 낮아짐을 확인할 수 있다.

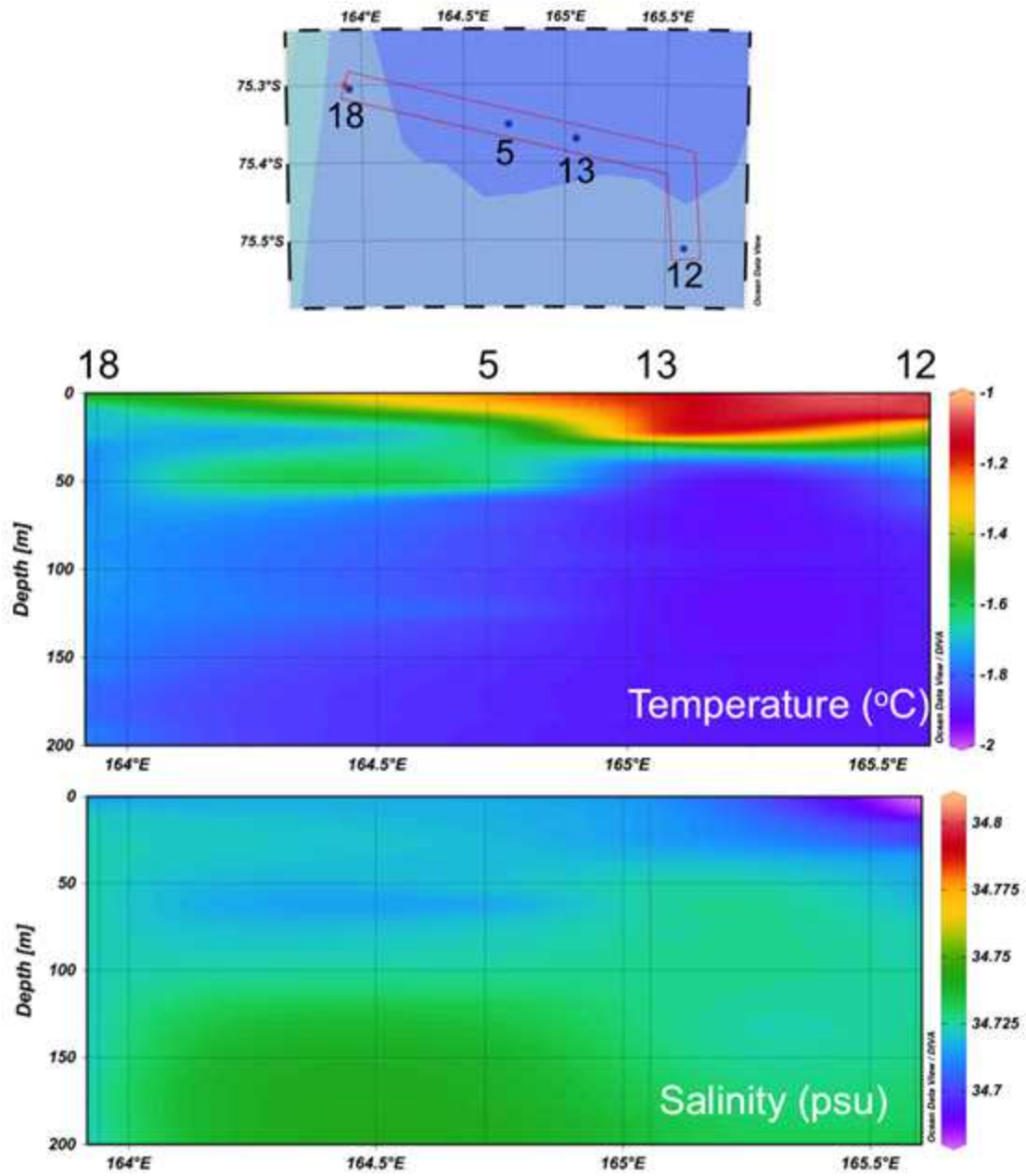


그림 229 드라이갈스키 빙설 주변 CTD 관측을 통해 획득한 온도, 염도 변화

(아) AUV용 멀티빔, SBP 센서, Inertial Navigation System 테스트

드라이갈스키 빙설의 향후 거동을 예측하기 위해서는 하부 용융이 어떻게 일어나고 있는지를 확인하는 것이 무엇보다 중요한데 이를 위해서는 AUV를 이용한 빙설하부 탐사가 필수적이다. 그러나 극지역에서 AUV 탐사는 아직 시험단계로 향후 성공적인 탐사를 위해서는 사전 테스트가 필요하다. 본 탐사에서는 Australian Maritime College(AMC)와 협력하여 AUV용 멀티빔 센서(EdgeTech 6205), SubBottom Profiler(EdgeTech 3100), Inertial Navigation System(IXBlue PHINS)을 테스트하였다. 멀티빔 센서는 아라온 측면에 기둥을 마운팅하여 부착하여 운항하면서 테스트를 수행하였고 SBP는 아라온과 조디악에 각각 마운팅하여 드라이갈스키 빙설 측벽을 대상으로 시험 하였다.



그림 230 아라온에 멀티빔 센서를 부착하여 탐사 수행

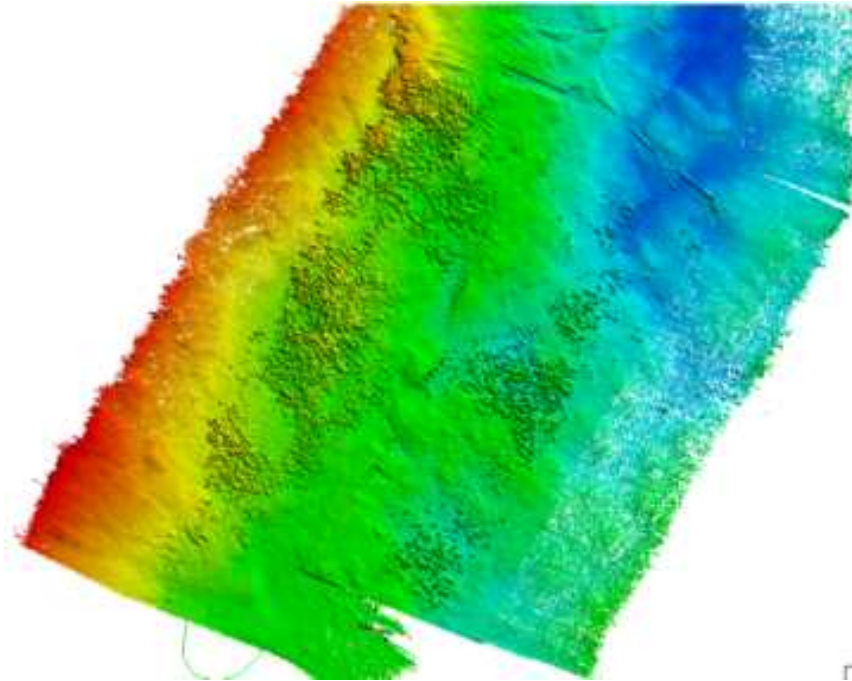


그림 231 멀티빔 센서 테스트 결과



그림 232 조디악에 SBP센서를 부착하여 드라이갈스키 빙설
벽면 탐사를 수행

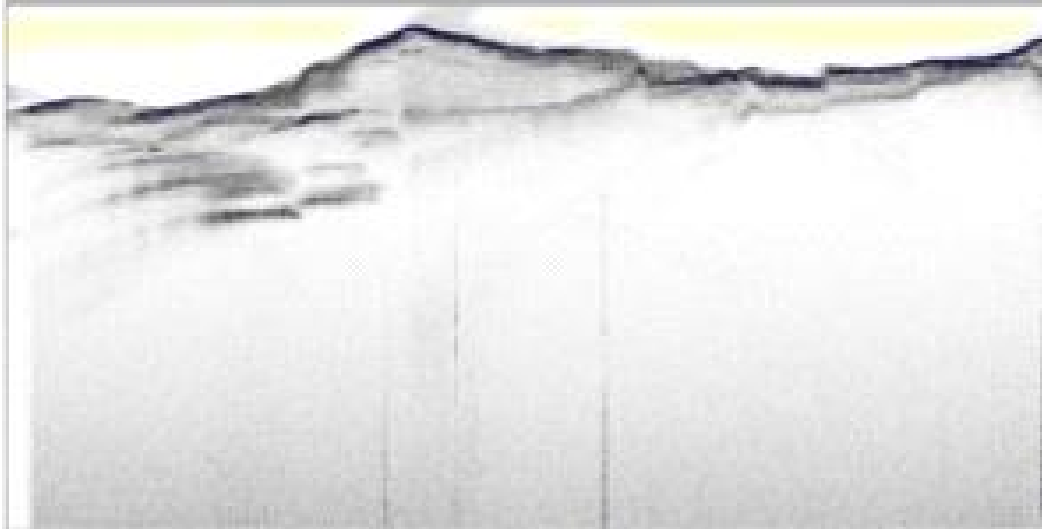


그림 233 SBP를 통해 얻은 빙설 벽면 구조



(3) 2016/2017 남극 현장탐사

장보고 기지 주변의 빙권 변화를 예측하기 위해서는 영향을 미치는 주요 요소 중 하나인 해양환경변화 관측이 필수적이다. 이에 지구물리 연구실에서는 2016/2017 남극 하계탐사 기간 중 아라온을 이용하여 로스해 종합 해양지구물리 탐사를 수행하였다.

(가) 연구활동 내용 요약

기간	2017년 1월 29일 14:00LT ~ 2017년 2월 17일 01:40LT (총: 18.5일)		
조사해역	남극 로스해	선박	IBRV. ARAON
수행 작업	<ul style="list-style-type: none"> - 수중음향관측기 3기 설치 (미국 NOAA 협력) - 난센 빙봉 주변 10개 정점에서 Vertical Profiler 측정 (뉴질랜드 NIWA 협력) - 드라이갈스키 빙설 인근 해양물리 계류장비 1기 회수 후 재설치, 2기 신규 설치 (뉴질랜드 NIWA 협력) - 테라노바만 해양물리 계류장비 1기 신규 설치 (미국 LDEO 협력) - CTD와 LADCP 55개 정점에서 80회 수행 및 해수 채취 - 테라노바만 해저면 지진계 1기 신규 설치 - 단기 해저면 지진계 11기 설치, 탄성과 탐사 수행 후 회수, 자료 획득 (독일 AWI 협력) - UCD-636 클라이더 난센 빙봉 주변 해역 탐사 (미국 UC Davis, 호주 Tasmania 대학 등과 협력) - UBC-Gavia AUV 난센 빙벽 주변과 하부 탐사 수행 		
참여 연구원	극지연구소	이원상, 윤숙영, 황청연, 강승구, 장광일, 엄주영, 이지연, 이민규, 김형준, 김수환	
	미국 NOAA	Lauren Kathleen Roche	
	미국 LDEO	Christopher Zappa, Pierre Dutrieux, Carson Witte,	
	미국 UC Davis	Alex Forrest	
	미국 Delaware 대학	Danielle Haulsee	
	미국 New Hampshire 대학	Cassie Bongiovanni	
	독일 AWI	Mechita Schmidt-Aursch, Wolfram Geissler, Florian Schmid	
	호주 Univ. Tasmania	Damien Gaoithin	

	호주 Blue Ocean Monitoring	Nathan Kemp
	NIWA	Fiona Elliot
조사장비 현황	Multibeam, CTD, LADCP, Jodiac boat, AUV(Gavia), Glider(UCD-636), Turbulence Profiler(VMP250IR), Acoustic transducer & Deck Unit	

(나) CTD와 LADCP 관측

CTD (Conductivity, Temperature and Depth)와 LADCP (Lowered Acoustic Doppler Current Profiler)를 이용하여 해수의 수온과 염분, 해류에 대한 정보를 측정할 수 있어, 빙권과 수권의 상호 작용을 이해하기 위한 물리 해양자료를 제공할 수 있다. 2016/2017 남극하계 탐사에서는 아라온의 CTD (SBE911plus CTD)와 LADCP (RDI, 300 kHz)를 이용하여 55개 정점에서 80번의 CTD를 작업을 수행하여 해수 물리 자료를 획득하였다. 그림 234는 CTD 위치도이고 표 12는 각 CTD 수행 시각과 위치정보이다.

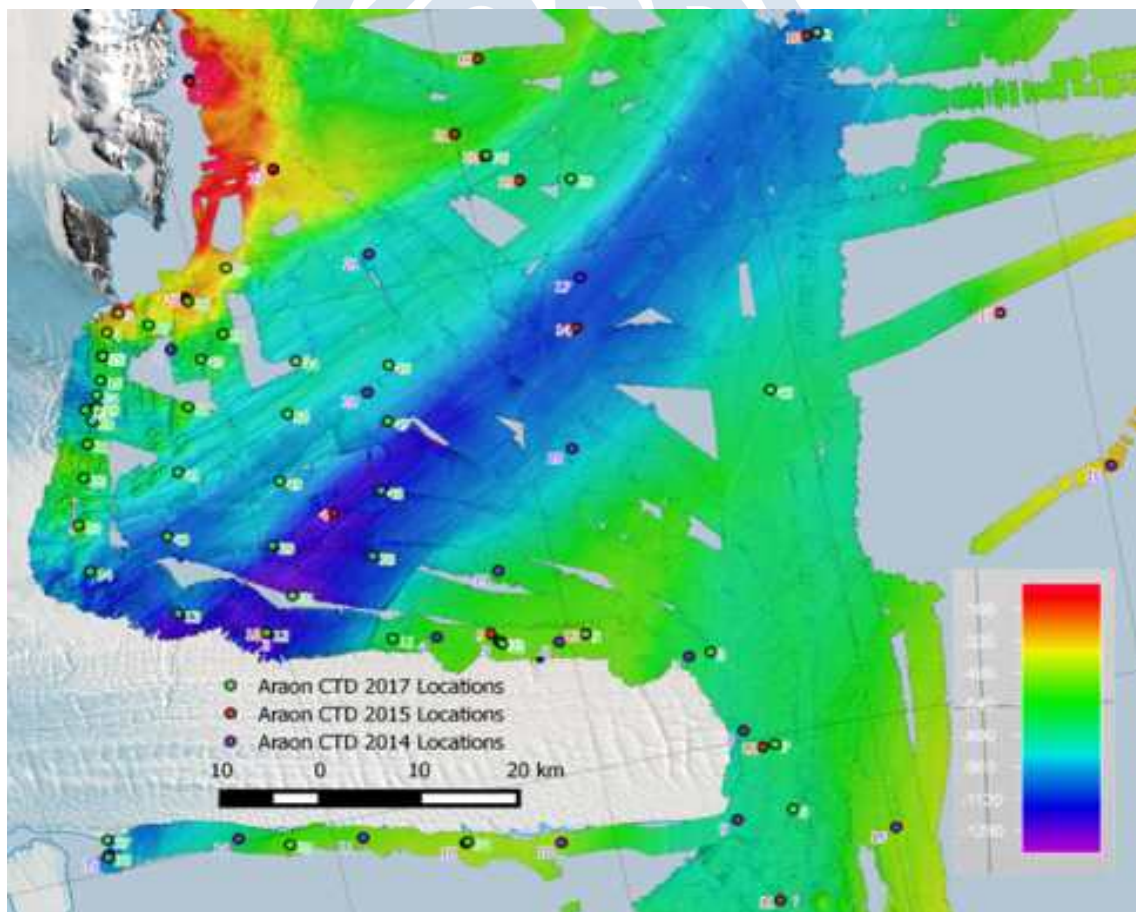


그림 234 CTD와 LADCP 관측 위치도

표 12 16/17 남극 하계탐사에서 수행한 CTD 일자와 시간, 위치 정보

Station	yr/mon/day	hh:mm	Latitude	Longitude	Bot.Depth (m)
1	2017-01-26	15:47	-74.552	167.58	922
2	2017-01-26	20:35	-74.834	166.302	1060
3	2017-01-30	22:11	-74.971	163.708	328
4	2017-01-30	23:57	-74.987	163.653	573
5	2017-01-31	2:56	-75.008	163.618	806
6	2017-02-01	5:33	-75.575	165.651	815
7	2017-02-01	7:00	-75.509	165.636	790
8	2017-02-01	9:42	-75.409	165.479	808
9	2017-02-01	11:13	-75.369	165.054	652
10	2017-02-01	12:36	-75.36	164.75	671
11	2017-02-01	13:56	-75.336	164.375	786
12	2017-02-01	15:33	-75.305	163.94	1225
13	2017-02-01	17:18	-75.269	163.65	1193
14	2017-02-01	19:03	-75.21	163.384	1096
15	2017-02-02	0:08	-75.056	163.511	872
16	2017-02-02	3:55	-75.031	163.589	785
17	2017-02-02	4:58	-75.008	163.617	755
18	2017-02-02	6:07	-75.056	163.546	1063
19	2017-02-02	11:21	-75.056	163.554	1070
20	2017-02-02	15:04	-75.068	163.524	920
21	2017-02-02	16:12	-75.088	163.488	743
22	2017-02-02	17:16	-75.12	163.446	738
23	2017-02-02	18:26	-75.164	163.386	694
25	2017-02-05	9:31	-74.931	165.358	835
26	2017-02-05	22:59	-74.974	163.955	381
27	2017-02-06	22:57	-74.988	163.801	615
28	2017-02-07	0:39	-75.012	164.047	702

29	2017-02-07	2:09	-74.95	164.113	466
30	2017-02-07	3:46	-75.008	163.617	797
31	2017-02-08	8:36	-75.275	164.062	1222
32	2017-02-08	14:08	-75.363	164.755	673
33	2017-02-10	20:00	-77.167	168.33	903
34	2017-02-11	11:18	-75.545	164.468	588
35	2017-02-11	14:35	-75.512	163.837	677
36	2017-02-11	19:02	-75.486	163.185	1080
37	2017-02-12	1:12	-75.469	163.198	1076
38	2017-02-12	20:15	-75.254	164.375	1143
39	2017-02-12	21:45	-75.224	164.036	1143
40	2017-02-12	23:16	-75.193	163.68	1090
41	2017-02-13	0:36	-75.134	163.774	958
42	2017-02-13	2:20	-75.008	163.618	762
43	2017-02-13	4:48	-75.031	163.95	791
44	2017-02-13	7:51	-75.052	164.273	934
45	2017-02-13	10:13	-75.075	164.588	921
46	2017-02-13	16:09	-75.168	165.887	814
47	2017-02-13	19:09	-75.128	164.539	1068
48	2017-02-13	20:35	-75.193	164.458	1187
49	2017-02-13	22:10	-75.164	164.116	995
50	2017-02-13	23:34	-75.102	164.2	905
51	2017-02-14	0:55	-75.074	163.866	769
52	2017-02-14	13:00	-75.008	163.617	800
53	2017-02-14	13:57	-75.008	163.617	800
54	2017-02-14	14:57	-75.008	163.617	800
55	2017-02-14	15:56	-75.008	163.617	800
56	2017-02-14	16:57	-75.008	163.617	800
57	2017-02-14	17:56	-75.008	163.617	800
58	2017-02-14	18:56	-75.008	163.617	800

59	2017-02-14	19:57	-75.008	163.617	800
60	2017-02-14	20:59	-75.008	163.617	810
61	2017-02-14	21:57	-75.008	163.617	808
62	2017-02-14	22:58	-75.008	163.617	807
63	2017-02-14	23:57	-75.008	163.617	808
64	2017-02-15	0:58	-75.008	163.617	808
65	2017-02-15	1:58	-75.008	163.617	808
66	2017-02-15	2:58	-75.008	163.617	809
67	2017-02-15	3:58	-75.008	163.617	808
68	2017-02-15	4:59	-75.008	163.617	807
69	2017-02-15	5:55	-75.008	163.617	800
70	2017-02-15	6:56	-75.008	163.617	800
71	2017-02-15	7:55	-75.008	163.617	800
72	2017-02-15	8:58	-75.008	163.617	800
73	2017-02-15	9:55	-75.008	163.617	804
74	2017-02-15	10:56	-75.008	163.617	808
75	2017-02-15	11:55	-75.008	163.617	810
76	2017-02-15	15:48	-74.893	165.089	840
77	2017-01-29	5:28	-74.648	164.278	206
78	2017-01-29	9:42	-74.641	164.112	237
79	2017-02-06	4:55	-74.676	164.363	400
80	2017-02-06	11:16	-74.658	164.198	393

본 항차에서 수행한 CTD 측정에서 홍미곶제도 난센빙봉 북쪽의 수심 400-600 m에서 supercooled water (약 -2°C 의 초저온수)의 방출을 관측할 수 있었다(그림 235). 그림 236와 237는 본 항차에서 측정한 모든 CTD의 온도-압력 그래프와 염도-온도 그래프이고 초저온수의 존재를 확인할 수 있다.

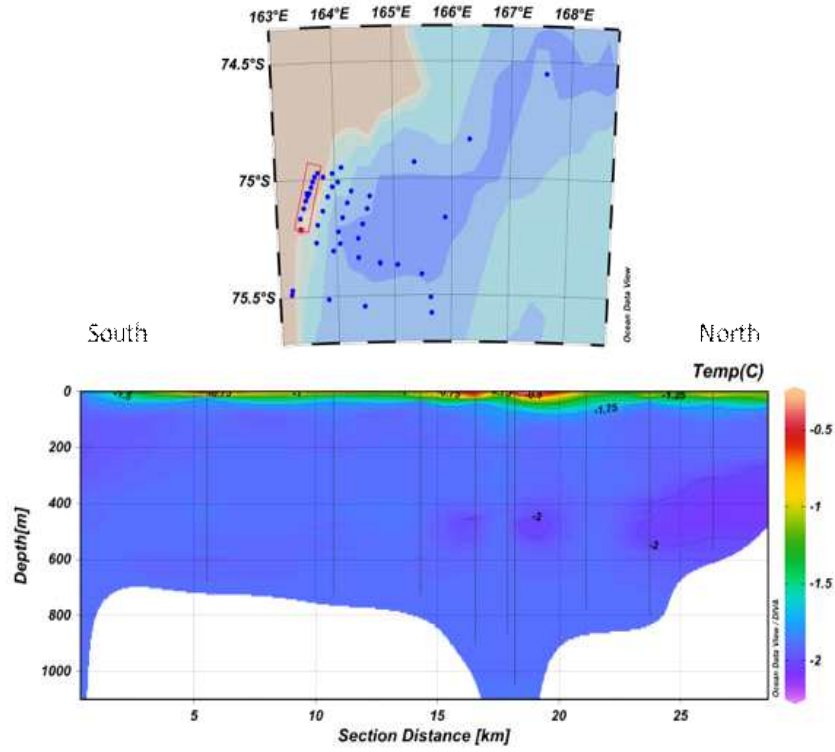


그림 235 난센빙봉 주변 CTD 관측을 통해 획득한 수온 자료

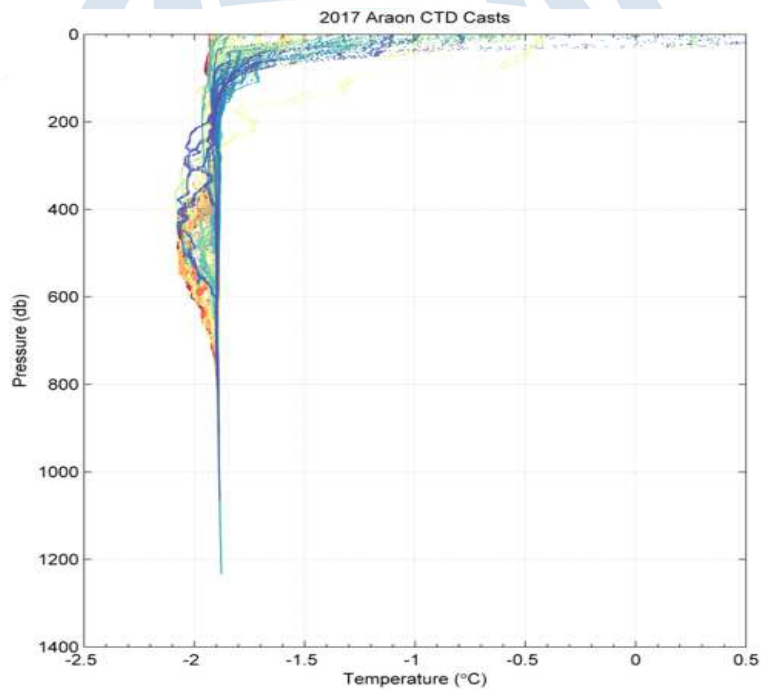


그림 236 2016/17년 남극 하계탐사에서 수행한 모든 CTD의 온도-압력 그래프

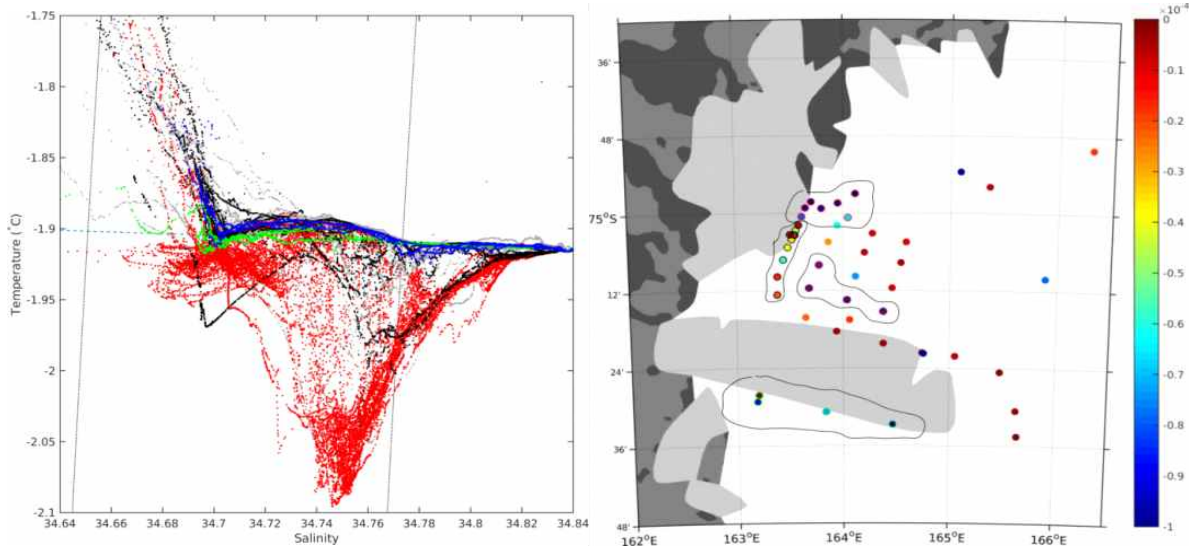


그림 237 왼쪽은 2016/17년 남극 하계탐사에서 수행한 모든 CTD의 염도-온도 그래프이다. 구역별로 다른 색깔로 플롯을 하였는데 빨간색은 난센 빙벽 북부의 빙저용융수 유출이 관측된 지역에서의 측정값이고, 검정색은 난센 빙벽 쪽 구역의 측정값, 녹색은 드라이갈스키 빙설 남단, 파란색은 드라이갈스키 빙설 북쪽의 테라노바만 안쪽에서의 측정값을 나타낸다. 오른쪽그림은 초저온수의 깊이평균값으로 부터의 편차를 나타낸 것으로 색이 파란색에 가까울수록 강한 초저온수가 나타난 곳이다.

해수면 근처의 따뜻한 물을 제외하고는 대부분의 물의 온도는 바다 표면의 해수 용융온도 이하이다. 이는 해수 표면에서 대기로의 열 손실과 그에 따른 해빙 생성, 그리고 해빙이 생성되면서 염분이 농축되어 HSSW(High Salinity Shelf Water)가 생성되면서 나타나는 현상으로 볼 수 있다. 빙하와 빙붕 등에서 지속적으로 용융되어 물이 유입된 곳에서는 해당 깊이의 결빙온도에 가까운 물이 나오게 되는데 CTD 측정 시 200~600m 깊이에서 초저온수가 관측되었다.

우리는 시간에 따른 supercooled water의 방출 변화를 관찰하기 위해 난센 빙벽 앞 CTD yo-yo 정점(그림 238)에서 1시간 간격으로 24회의 CTD 관측을 수행하였다(그림 238).

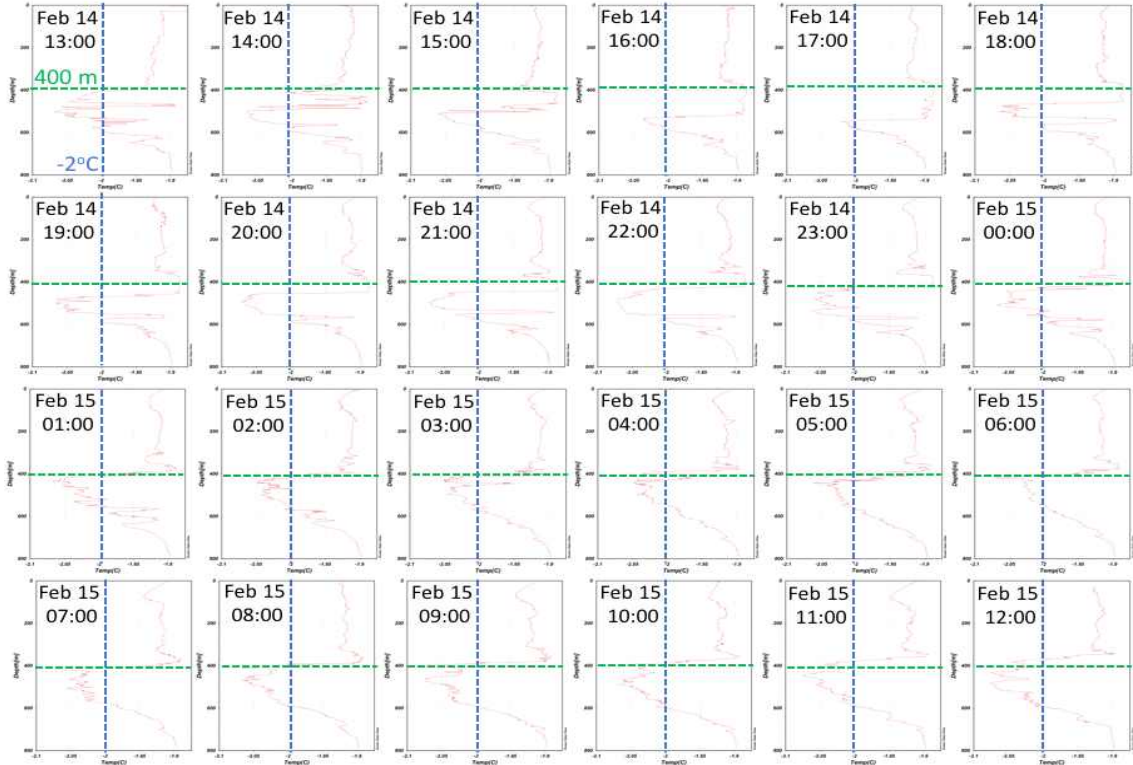


그림 238 난센빙봉에서 CTD yo-yo 관측을 통해 획득한 수온 자료

본 탐사에서 측정된 LADCP는 LDEO에서 제작한 Matlab 기반 소프트웨어를 이용하여 분석중에 있다. 자세한 소프트웨어 정보는 <http://www.ldeo.columbia.edu/~ant/LADCP> 에서 확인할 수 있다. 초기 분석결과에서 테라노바베이 안쪽에서 회오리처럼 도는 흐름이 있음을 확인할 수 있다. (그림 239) 이 흐름은 표면에서 강한 특성이 있고, 북쪽을 향하며, 드라이갈스키 빙설의 남동쪽 끝단에서 시작되어 난센빙봉 북단까지 올라간다.

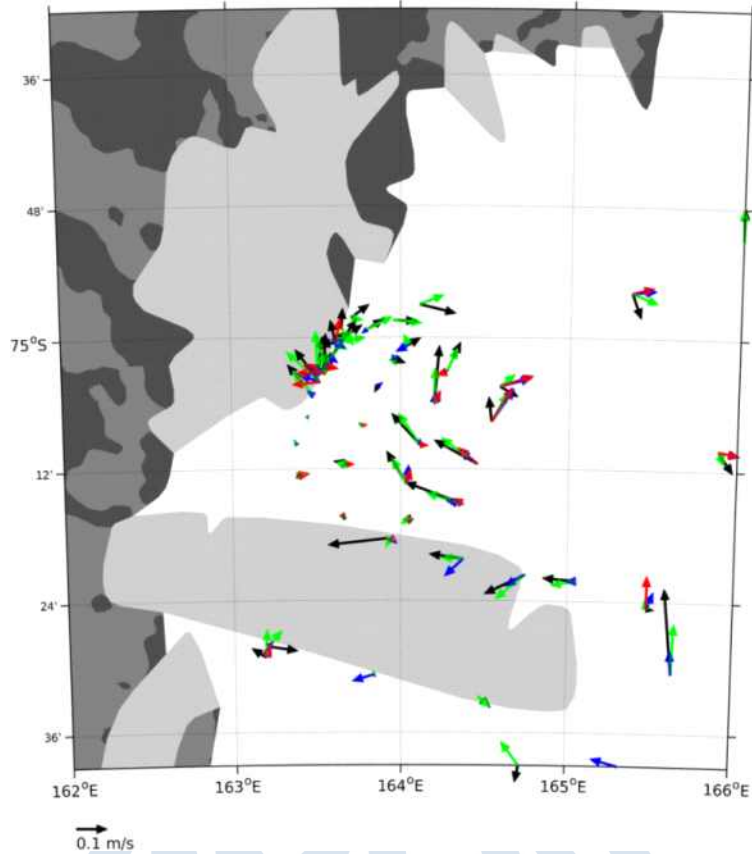


그림 239 LADCP 자료 1차 분석으로 얻은 테라노바만의 조류 방향. 검정색, 녹색, 파란색, 붉은색 화살표는 각각 1-100m, 200-400m, 600-800m, 800-1000m 깊이의 평균 조류를 나타낸다.

(다) Vertical Microstructure Profiler 측정

본 탐사에서는 난센 빙봉 인근의 용빙수의 혼합과 미세한 해수 흐름을 규명하기 위하여 Vertical Microstructure Profiler(VMP)를 이용한 관측을 수행하였다. 본 탐사에서 사용된 VMP는 캐나다 Rockland 사의 VMP250IR 모델로 2개의 shear probe와 2개의 고해상도 온도 측정센서, 1개의 fluorometer, 1개의 미세 conductivity 측정센서, xy축 가속도 측정장치와 압력게이지가 장비 하단에 장착되어 있다(그림 240). 본 장비는 미세한 흐름을 측정하기 때문에 배의 deep positioning(DP) system은 끈채로 바다에 투입해야 한다. 본 장비는 끈에 연결되어 수중에서 자유낙하하듯이 투입되어야 하는데 이를 위해서는 장비가 떨어지는 속도보다 아주 약간 더 빠른 속도(대략 0.6 m/s)로 윈치를 페이아웃해야 한다. 본 장비를 이용하여 수층의 vertical shear를 보다 정확하게 측정하기 위해서는 자유낙하 속도로 내리는 것이 무엇보다 중요하다. 이를 위해 2017년 1월 30일에 자유낙하 속도를 측정하기 위하여 테라노바만에서 두 번의 테스트가 수행되었다. 첫 번째 투입은 모든 센서를 제거하고 압력 센서만을 부착하여 이루어졌다. 투입 시작에서 중요한 점은 최초로 물속에 투입했을 때 장비의 온도가 주변 해수와 평형을 이룰 수 있도록 몇 분 정도 기다린 다음에 다시 표면으로 올린다음에 자유낙하를 180

초 동안 수행하였다. 180초가 지난 후에 VMP를 위해 제작된 hand drill winch를 이용하여 본 장비를 다시 갑판으로 회수하였다. VMP를 다시 랩으로 가져와 데이터를 회수하여 압력 게이지 기록으로부터 깊이를 계산한 결과 이 지역에서의 자유낙하 속도는 0.47m/s 임을 확인하였다. 이는 다른 해역에서보다 느린 속도로 낮은 온도로 인하여 장비의 브러쉬가 단단해져 저항이 커진 결과로 추정된다. 이 다음에는 모든 센서를 장착한 후에 테스트를 수행하였다.



그림 240 본 탐사에서 쓰인 Rockland VMP250IR 장비

본격적인 측정을 위하여 난센 빙벽 앞쪽으로 이동한 후 1월 30일부터 작업을 시작하였다. 작업 위치는 그림 241과 같고 관측 정보는 표 13에 나타나있다.

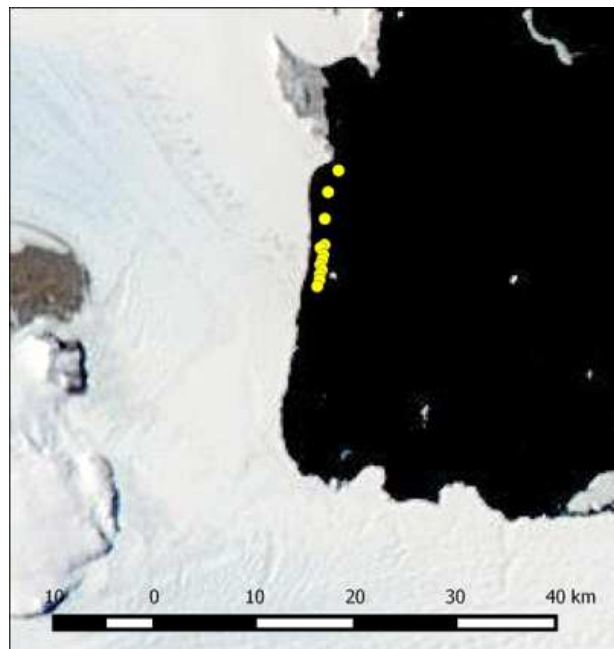


그림 241 난센 빙봉 주변 VMP 측정 정점

표 13 VMP 관측점 정보

Station	Date (UTC)	Ship log (decimal degrees)			GPS (decimal degrees)			Filename	Notes
		Lon. Start	Lat. Start	Lon. end	Lat. end	Lon.	Lat.		
0	30/01/2017 1:54					164.2756	-74.6727	DIT 17180	drop time 200sec, test cast in Terra Nova Bay
1	30/01/2017 22:38	163.708	-74.9706	163.7172	-74.9654	163.7087	-74.9700	DIT 17183	drop time 8min
2	31/01/2017 0:32	163.6534	-74.9865	163.692	-74.98	163.6531	-74.9860	DIT 17184	drop time 16min
3	31/01/2017 2:08	163.6176	-75.0086	163.6464	-74.9977	163.6164	-75.0081	DIT 17185	drop time 14min, strong winds vessel drifting
4	31/01/2017 5:40	163.5883	-75.0309	163.5834	-75.015	163.5898	-75.0304	DIT 17186	Drop time 14min
5	31/01/2017 6:55	163.5734	-75.032	163.5713	-75.0247			DIT 17187	
6	31/01/2017 9:14	163.5743	-75.0388	163.5775	-75.0306	163.5756	-75.0387	DIT 17189	
7	31/01/2017 10:14	163.5671	-75.0432	163.6073	-75.0358	163.5676	-75.0426	DIT 17190	
8	31/01/2017 11:01	163.5601	-75.0471	163.5505	-75.0343	163.5561	-75.0467	DIT 17191	one false start before cast
9	31/01/2017 11:55	163.5549	-75.0517	163.5775	-75.046	163.5561	-75.0514	DIT 17192	drop time 14min, line snagged on ice line under tension for a while. Can't pay out line fast enough. Ask bridge to engage DP half way through descent to stop vessel drifting.
10	31/01/2017 12:34	163.5458	-75.0555	163.5601	-75.0446	163.5446	-75.0548	DIT 17193	upon retrieval drag brush was loose on top of profile, fast descent rate suggests it came off at beginning of profile

그림 242은 VMP 측정 결과값이다. 좌측 상단부터 시계방향으로 1. 좌측은 수직 방향에 대한 tilt/pitch 프로파일, 우측은 VMP 장비의 강하속도, 2. 장비가 내려가면서 측정한 shear 값과 온도 프로파일, 3. 5m 간격으로 측정한 터블런스의 감쇠 그래프와 4. 측정한 shear 값의 오리지널 wavenumber 스펙트럼과 정제 값의 스펙트럼이다. Nasmyth 감쇠 추정값은 검정색으로 표시되어 있다.

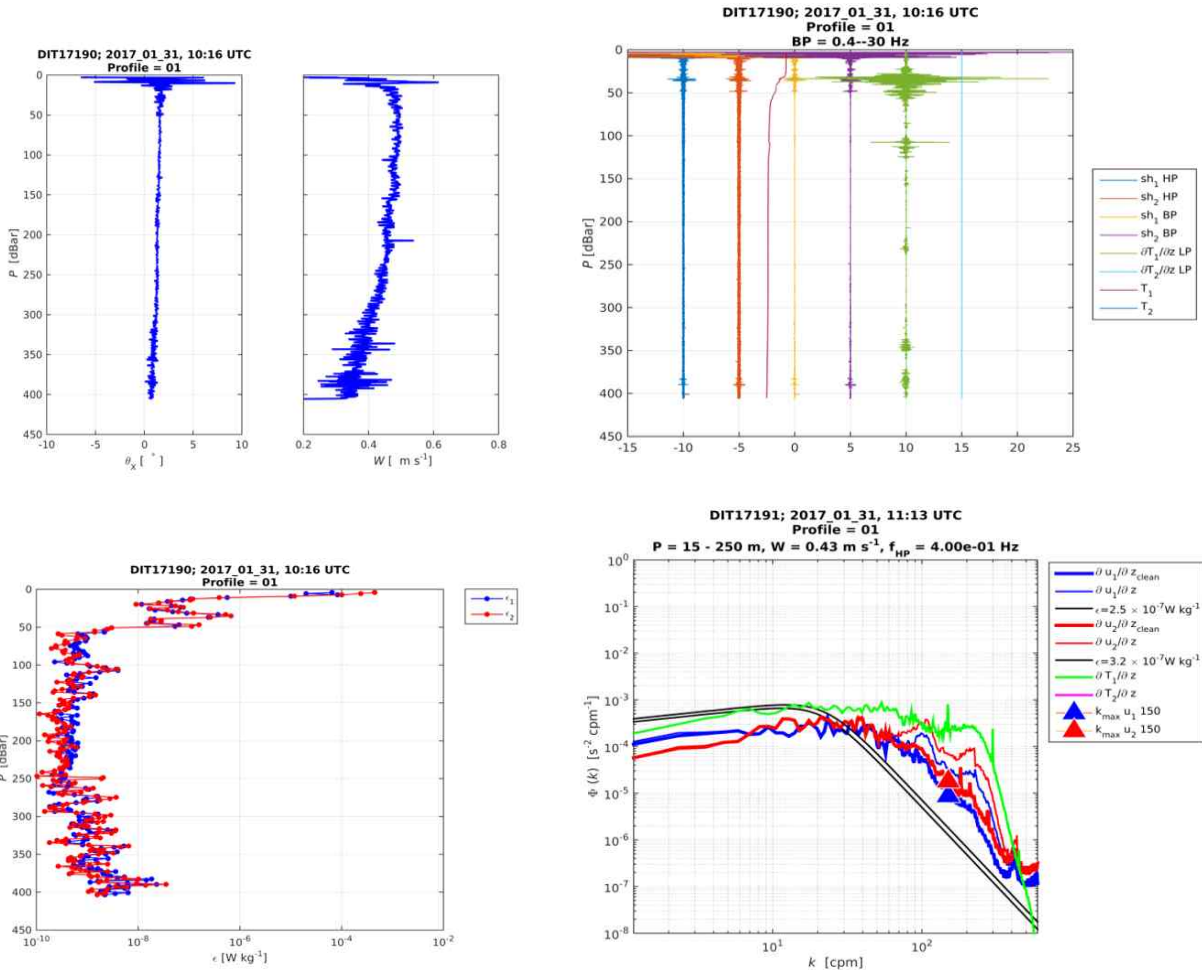


그림 242 VMP 측정 결과와 초기 분석 값

(라) 해양 생물 및 해양 화학

빙하 용빙수에 의한 해양 생태계 영향을 이해하기 위해 기초 생태계를 구성하고 있는 식물 플랑크톤과 미생물 분석을 위한 시료를 채수하였다(그림 243). 식물플랑크톤은 유광대의 2-3 개 수심에서 엽록소 a와 종조성 분석을 위한 시료를 획득하였다. CTD에 부착된 fluorescence 수치(그림 243(우))는 실제 측정한 엽록소 a 값과 비교하여 보정할 예정이다. 미생물은 전체 수층의 5-6개 수심에서 개체수와 종조성 분석을 위한 시료를 획득하였다. 특히 본 탐사에서 관측된 저층 빙하 용빙수(supercooled water) 추적에 위한 미생물 시료를 확보하였다.

해양 화학 분야에서는 해양 생물과 동일한 정점과 수심에서 영양염, 용존유기탄소, 안정동위원소 측정을 위한 시료를 획득하였다.

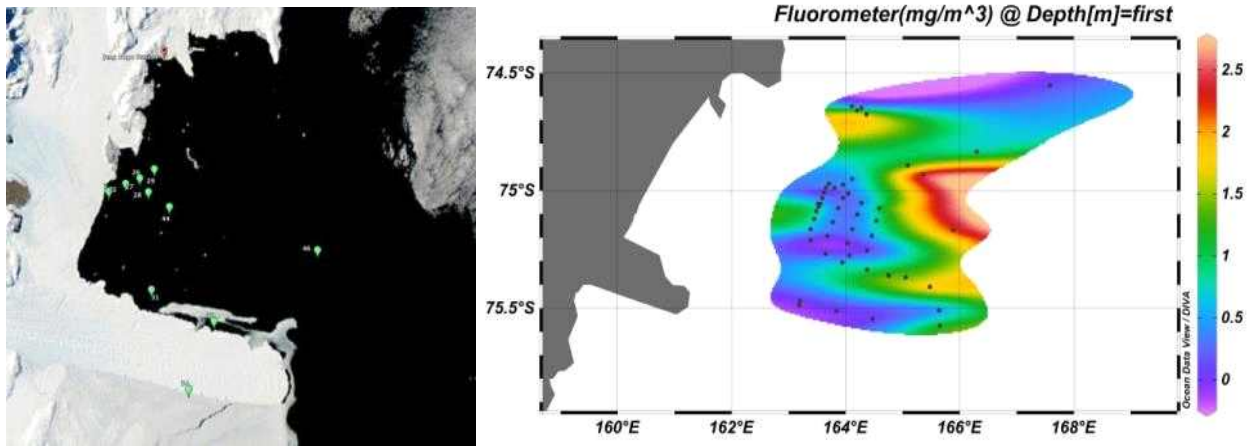


그림 243 해양 생물과 해양 화학 분석 시료의 채수 정점(좌) 및 CTD로 측정된 표층 fluorescence의 분포(우)

(마) NIWA 해양물리 계류장비 회수와 재설치

본 탐사에서는 2015/16 남극 하계 탐사에서 설치한 드라이갈스키 빙설 북부의 DITN 계류장비 1기를 회수 후 재설치하고 2기(DITD, DITS)를 신규로 설치하였다. 설치 위치는 그림 244과 같다.

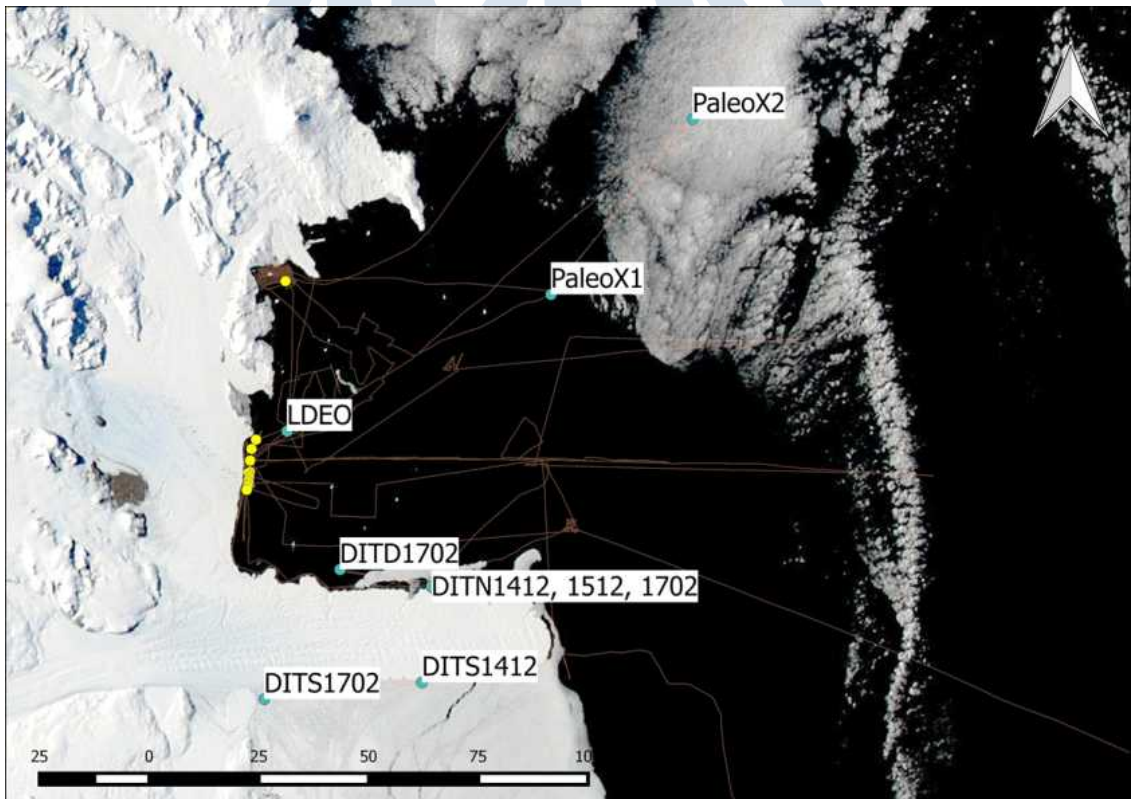


그림 244 해양 계류장비 전체의 위치도, 항적도는 갈색으로 나타나있고 노란색 점은 Vertical Profiler 측정 위치를 나타낸다.

2014/2015년 남극하계 탐사 시 드라이갈스키 빙설의 용융현상과 해류, 해수의 물리적 특성을 관측하기 위하여 NIWA 연구소와 협력하여 2기의 종합 해양물리 관측장비를 드라이갈스키 남쪽과 북쪽에 설치한 후 북쪽에 설치된 DITN은 2015/2016년 남극 탐사에서 회수한 후 재설치를 하였다. 본 탐사에서는 2월 8일에 DITN 설치 위치인 75° 16.542' S, 164° 4.038' E에 방문하여 200 m 떨어진 곳에서 이탈 신호를 보낸 후 성공적으로 장비를 회수하였다. (그림 245)



그림 245 이탈신호를 받고 떠오른 DITN 계류 장비의 부이

이번 항차에서는 시간을 절약하기 위하여 회수한 장비를 재 세팅하여 투입하지 않고 세팅된 장비를 가져와 바로 투입하였다. 연속 CTD 측정을 위한 장비는 SBE-37SMP에서 신 모델인 SBE-37SMs로 교체되었는데 이는 구 장비에 비하여 전력 소모가 줄어 샘플링 간격을 600초에서 120초로 줄인 상태로 2019년 3월까지 구동이 가능하게 되었다. 조류 측정장비 역시 AADI RCM9/11에서 Nortek Aquadopps 로 변경되었다. 어쿠스틱 릴리저는 Sonardyne ORT에서 Bethos R2K 로 변경하여 해빙상황으로 인하여 다음해에 회수를 못하더라도 2년 후까지 안정적으로 동작할수 있도록 세팅하였다. 표 14은 투입 장비의 정보를 보여주고 그림 246는 계류장비 구조를 보여주는 모식도이다.

표 14 DITN 투입 장비 정보

Instrument	SN	Depth rating(m)	Firmware version	Interval (s)	Burst sampling(s)	Instrument start time	Memory expires	Battery expires
SBE-37 SM	15239	1000	V4.1	120	n/a	21/1/2017 1500	1/3/2019	1/7/2020
SBE-37 SM	15240	1000	V4.1	120	n/a	21/1/2017 1500	1/3/2019	1/7/2020
SBE-37 SM	15257	2000	V4.1	120	n/a	21/1/2017 1500	1/3/2019	1/7/2020
SBE-56	4673	1000	V0.96	10	n/a	20/1/2017 1300	1/1/2020	1/1/2020
SBE-56	4851	1000	V0.96	10	n/a	20/1/2017 1300	1/1/2020	1/1/2020
SBE-56	4852	1000	V0.96	10	n/a	20/1/2017 1500	1/1/2020	1/1/2020
SBE-56	4854	1000	V0.96	10	n/a	20/1/2017 1300	1/1/2020	1/1/2020
AADI RCM-9	1256	1000	n/a	3600	n/a	8/2/2017 0800	17/12/2018	8/4/2018
AADI RCM-9	1259	2000	n/a	3600	n/a	8/2/2017 0800	17/12/2018	8/4/2018
AADI RCM-11	342	6000	n/a	3600	n/a	8/2/2017 0800	17/12/2018	8/4/2018
Aquadopp DMIM	13050	6000	3.39	900	60	8/2/2017 1200		11/4/2018
Aquadopp DM	9929	6000	3.37	900	60	8/2/2017 1200		11/4/2018
Aquadopp DM	9930	6000	3.37	900	60	8/2/2017 1200		11/4/2018

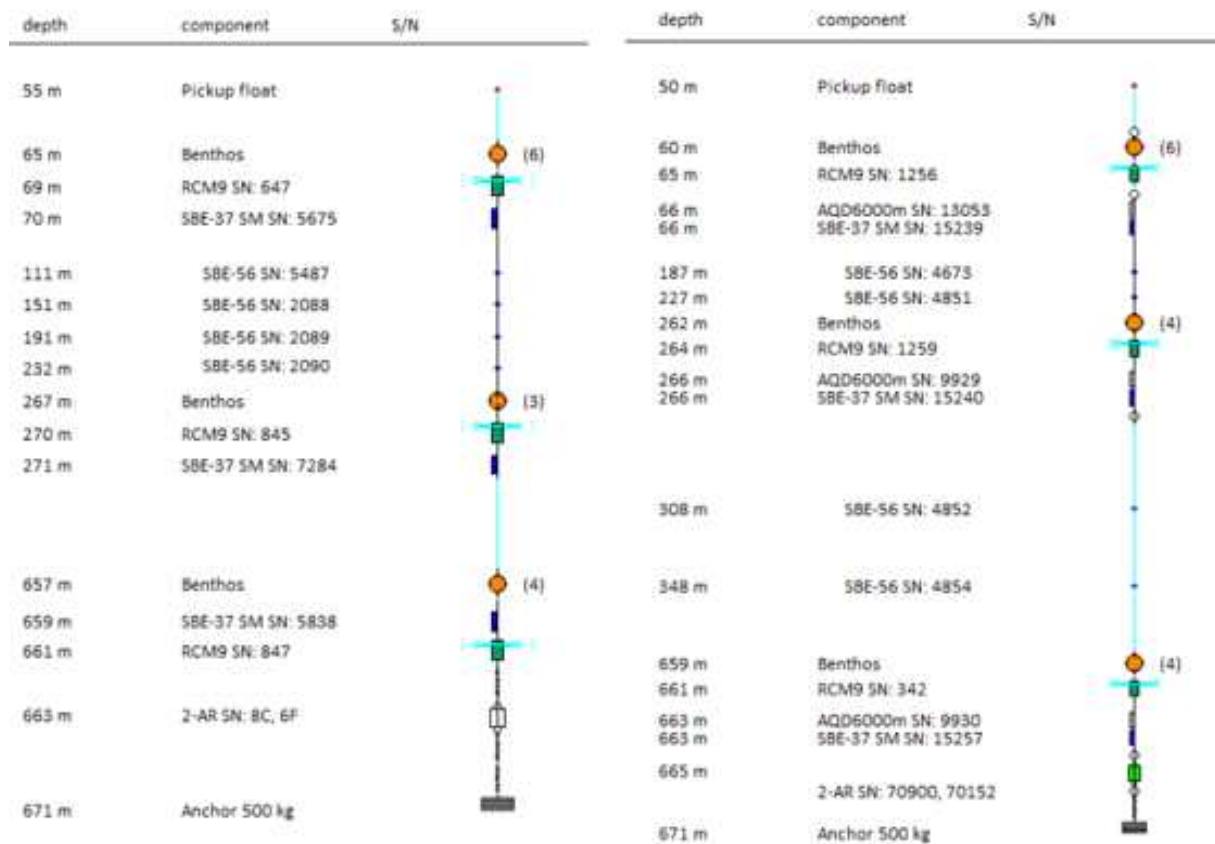


그림 246 사이트에 회수한 장비(좌)와 새롭게 설치한 계류장비(우)의 모식도와 장비 모델명

표 15 DITN에서 회수한 계류장비의 위치 시간 정보

Deployment code	DITN1512	DITN1702
Location	Drygalski Ice Tongue North	Drygalski Ice Tongue North
Project leader	Craig Stevens	Craig Stevens
Deployment operator	Brett Grant	Fiona Elliott
Recovery operator	Fiona Elliott	
Latitude (ddd mm.mmm H)	75° 21.605' S	75° 21.646' S
Longitude (ddd mm.mmm H)	164° 44.918' E	164° 44.788' E
Water depth	671m	671m
Magnetic declination	135.48°	135.78 °
Start time (yyyy/mm/dd HH:MM:SS)	2015/12/14 10:15:00	2017/02/09 00:55:00
Stop time (yyyy/mm/dd HH:MM:SS)	2017/02/08 17:20:00	
UTC offset	+12	+12

표 16 DITN에서 회수한 계류장비와 설치한 계류장비의 메타데이터

DITN1512			DITN1702		
Instrument	Serial number	Depth (m)	Instrument	Serial number	Nominal Depth(m)
AADI RCM-9	647	72*	AADI RCM-9	1256	65
SBE-37SMP	5675	73	Aquadopp	13053	66
SBE-56	5487	112*	SBE-37SM	15239	67
SBE-56	2088	152*	SBE-56	4673	187
SBE-56	2089	192*	SBE-56	4851	227
SBE-56	2090	232*	AADI RCM-9	1259	264
AADI RCM-9	845	271*	Aquadopp	9929	266
SBE-37SMP	7284	272	SBE-37SM	15240	266
SBE-37SMP	5838	655	SBE-56	4852	308
AADI RCM-9	847	656*	SBE-56	4854	348
Sonardyne ORT	8C	663*	AADI RCM-9	342	661
Sonardyne ORT	6F	663*	Aquadopp	9930	663
			SBE-37SM	15257	663
			Benthos R2K	70900	665
			Benthos R2K	70152	665

본 탐사에서는 DITN 설치 후 트라이앵글레이션 기법을 이용하여 정확한 위치를 파악하였다 (그림 247). 이 방법은 음향 응답 속도를 이용해 해저에 설치된 어쿠스틱 릴리저와 트랜스듀서 사이의 거리를 3개 이상 지점에서 계산하여 설치위치를 추정하는 것이다. 계산 결과 계류장비는 75° 21.646' S, 164° 44.788' E 에 위치하는 것으로 확인되었다.

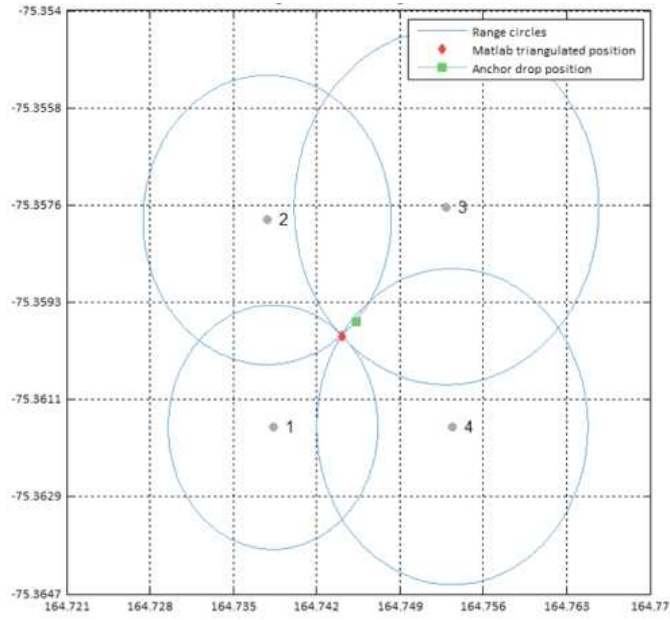


그림 247 트라이앵글레이션 위치결정 작업 결과

올해 회수한 DITN 자료의 초기분석 결과는 그림 248과 249에 나타나 있다.



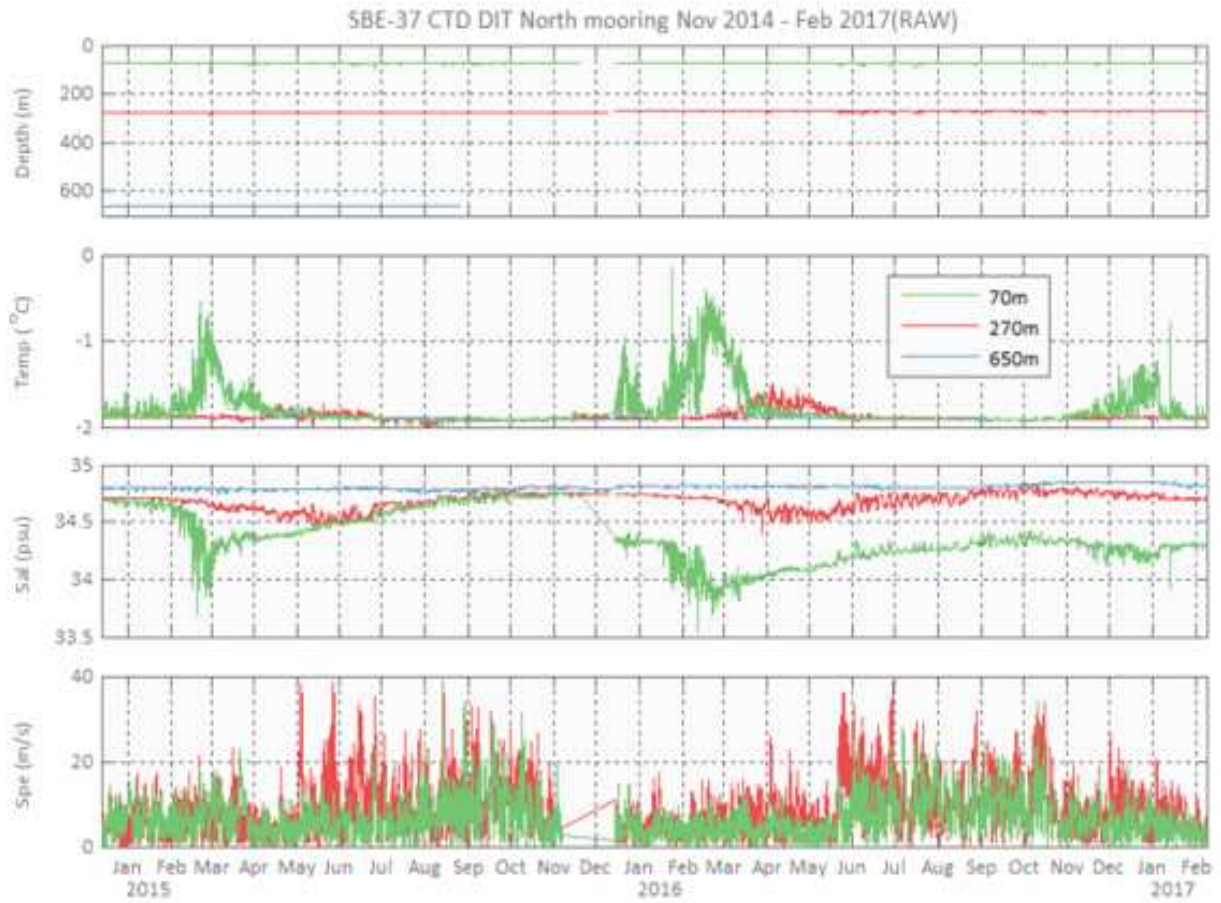


그림 248 DITN 계류장비에서 측정된 온도, 염도, 해류 속도의 시간 그래프. 녹색은 가장 높은 곳인 70 m 깊이에서 측정된 결과 값을 나타내고, 빨간 그래프는 중간의 270 m 깊이에서 측정된 값, 파란색은 가장 깊은 곳인 650 m 깊이에서 측정된 값이다.

Top RCM-9 at 70m, DIT North mooring, Nov 2014 - Feb 2017

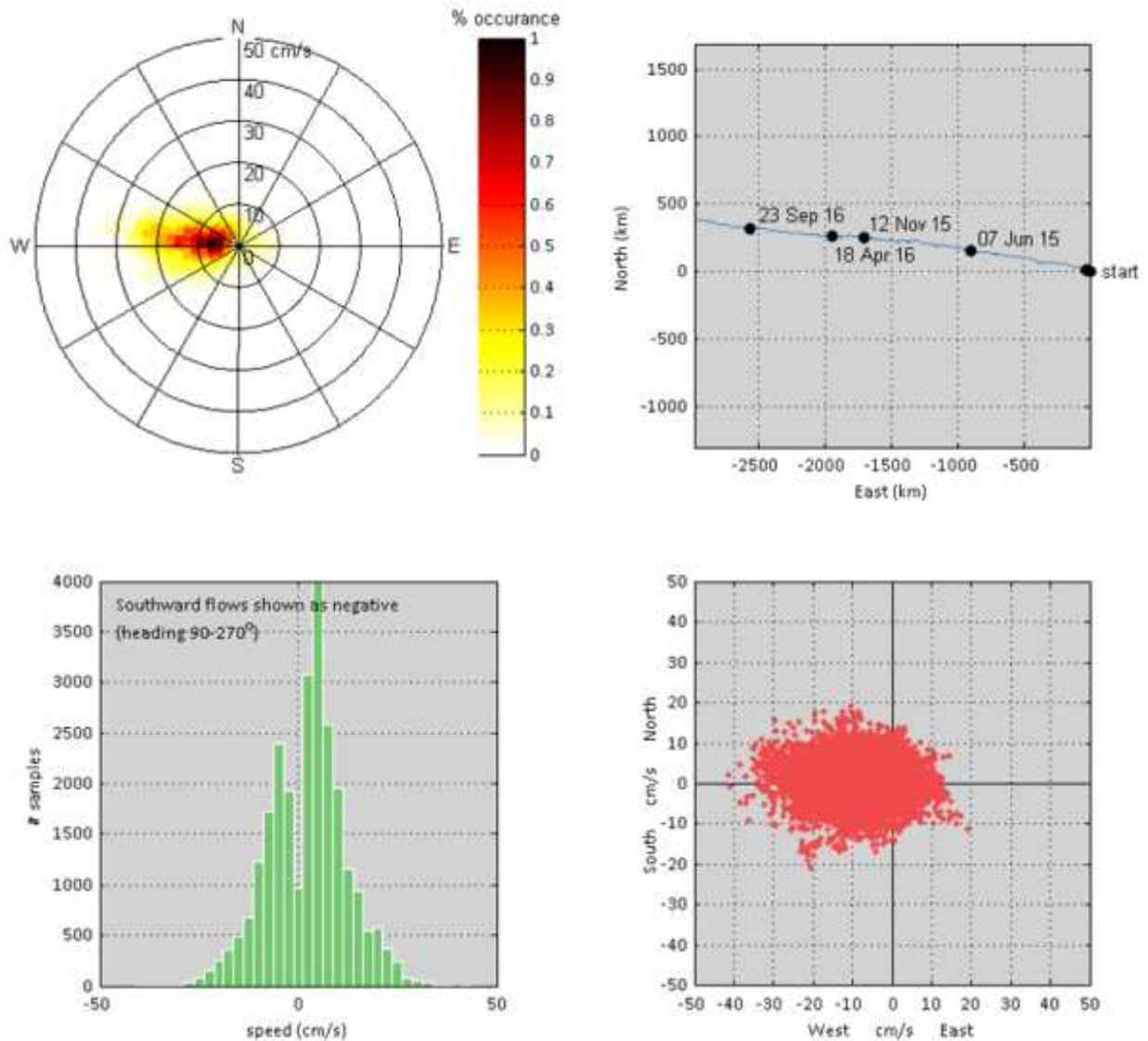


그림 249 2014년 12월부터 2017년 2월까지의 해류 측정자료. 좌측 상단부터 시계방향으로: 1. 해류의 방향과 속도의 빈도를 나타낸 다이어그램, 2. 평균적인 서쪽으로 흐름을 보여주는 누적 흐름 플롯, 3. 속도 분포 그래프, 4. 속도 분포 히스토그램

본 항차에서는 드라이갈스키 하부를 가로지르는 협곡에서의 해류의 흐름과 해수의 물리적 특성을 규명하기 위하여 드라이갈스키 빙설 북쪽의 해저 협곡 깊은곳에 계류장비를 신규로 설치하였다. 이 계류장비는 깊은 곳에서 버틸 수 있는 Nortek aquadopp 해류 측정장비와 Seabird 37-SM, Benthos R2K 어쿠스틱 릴리즈로 구성되어 있다. 측정 장비의 상세 내역과 구조는 표 17와 그림 250과 같고 상세 계류정보는 표 18에 나타나있다.

표 17 DITD 계류 장비에 부착된 장비 구성

Instrument	SN	Depth rating (m)	Firmware version	Interval (s)	Burst sampling(s)	Instrument start time	Memory expires	Battery expires
SBE-37 SM	15273	2000	V4.1	120	n/a	21-1-2017 1500	3/2019	7/2020
Aquadopp DMIM	13041	6000	3.39	900	60	8/2/2017 1200		11/4/2018

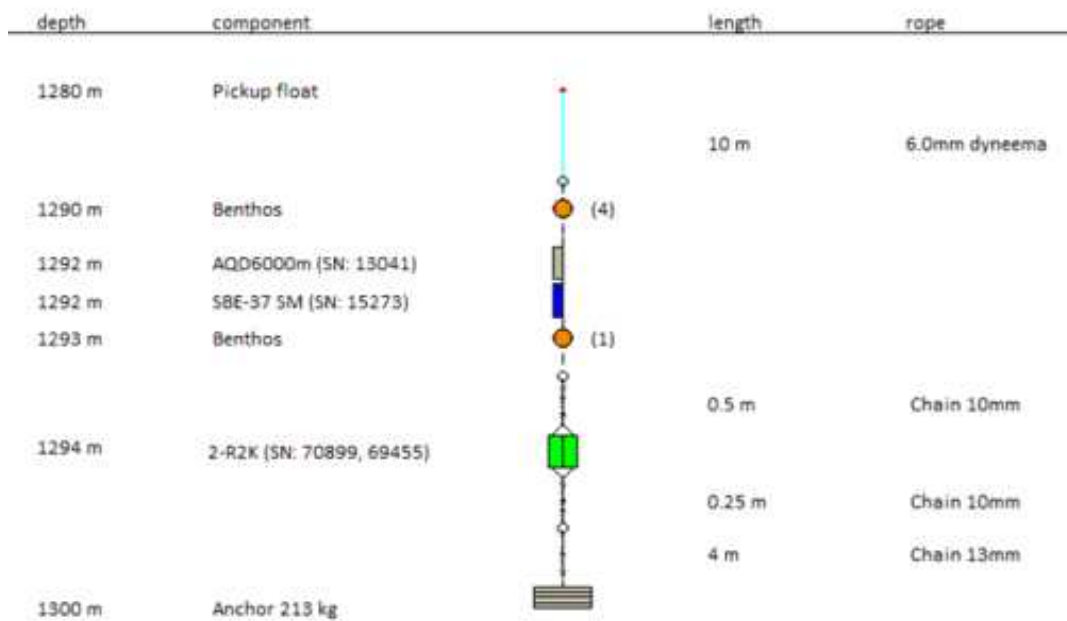


그림 250 DITD 계류장비의 구조 모식도

표 18 DITD 메타데이터

Deployment code	DITD1702
Location	Drygalski Ice Tongue Deep
Project leader	Craig Stevens
Deployment operator	Fiona Elliott
Recovery operator	
Latitude (ddd mm.mmm H)	75° 16.542' S
Longitude (ddd mm.mmm H)	164° 4.038' E
Water depth	1050m
Magnetic declination	135.78 °
Start time (yyyy/mm/dd HH:MM:SS)	2017/02/05 20:09:00
Stop time (yyyy/mm/dd HH:MM:SS)	
UTC offset	+12

DITD를 설치한 후에도 역시 트라이앵글레이션 방법을 이용하여 정확한 위치를 계산하였다. 트라이앵글레이션 결과 계류장비는 75° 16.542' S, 164° 4.038' E (수심 1050 m)에 위치한 것으로 나타난다. 상세 작업 결과는 그림 251에 나타나 있다.

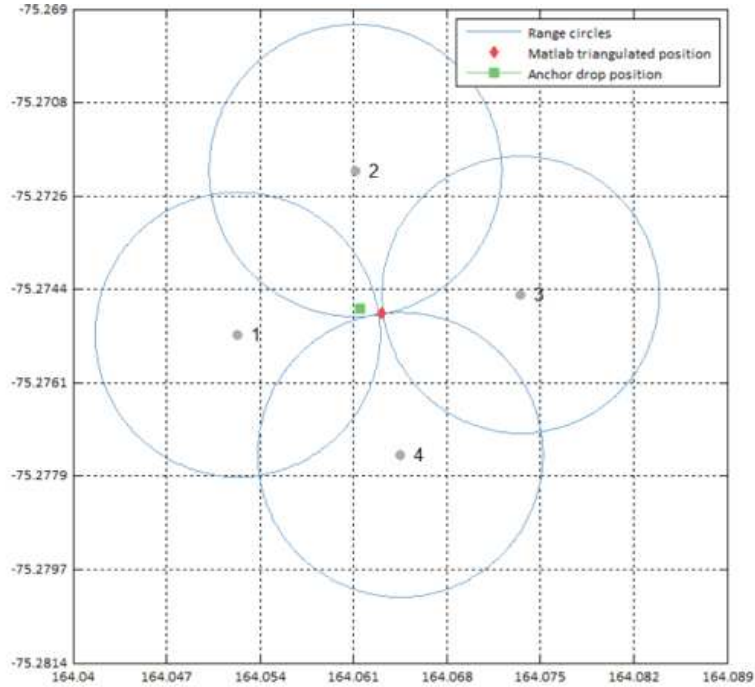


그림 251 DITD 트라이앵글레이션 작업 결과

극지연구소

남쪽에 설치된 DITS는 2014/2015 시즌에 설치된 것으로 2015/2016 시즌에는 해빙으로 인해 접근이 불가능하여 이번 남극 탐사에서 회수를 시도하였다. 이번 남극 탐사 기간 중에도 위성 사진으로는 DITS에 해빙이 덮혀있는 것으로 나왔으나(그림 252) 어쿠스틱 릴리즈의 배터리 유지 기간이 최장 2년이기 때문에 2월 11일에 아라온을 이용하여 쇄빙을 하여 설치 장소에 접근하였다.

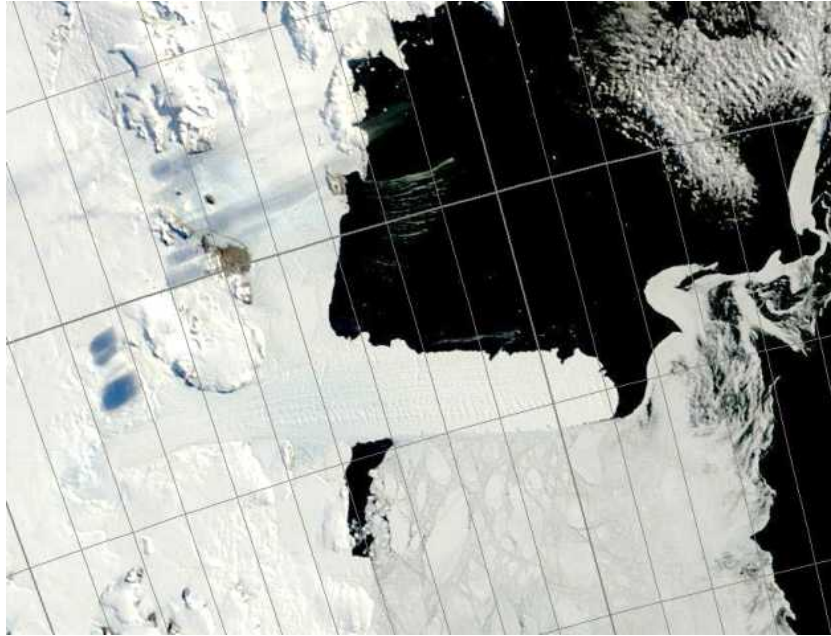


그림 252 2017년 2월 11일의 해빙상황

DITS 설치 위치에 접근 후 트랜스폰더를 내려 Enable 신호를 보냈으나 응답이 돌아오지 않고 이탈 신호 송신후에도 부이가 떠오르지 않았다. 이 주변 해역의 수온이 낮아 음파원격이탈기의 전력소모가 높아 배터리 방전으로 음파원격이탈기가 작동을 하지 못한 것으로 추정된다. 배로 계류장비 주변을 돌면서 로프를 내려 계류장비를 감아서 끌어올려보는 방법도 시도해보고자 하였으나 주변의 해빙에 의해 로프가 배 안쪽으로 말려들어가는 사고가 생길 가능성이 높아 해빙 상황이 좋을 때 회수를 시도해보기로 하였다.

NIWA에서는 해빙이 적은 드라이갈스키 빙설 남쪽 코너에 새 계류장비를 설치하였다. DITS 1702에 부착된 장비 정보는 표 19에 나타나 있고 계류장비 구조도는 그림 253에 나타나 있다. 표 19는 장비 계류 작업 정보가 포함된 메타데이터이고 그림 254는 트라이앵글레이션 작업 결과이다. 계류위치 계산결과는 75° 29.305' S, 163 ° 10.461' E(수심 1080 m)이다.

표 19 DITS 1702 부착 장비 정보

Instrument	SN	Depth rating(m)	Firmware version	Interval (s)	Burst sampling(s)	Instrument start time	Memory expires	Battery expires
SBE-37 SM	7227	2000	V3.1	300	n/a	21/1/2017 1200	1/5/2022	1/7/2024
SBE-37 SM	1627	350	V2.6	300	n/a	21/1/2017 1200	1/11/2018	1/2/2022
SBE-37 SMP	7284	1000	V3.1	600	n/a	12/2/2017 08:00	8/5/2018	7/2024
SBE-56	4855	1000	V0.96	10	n/a	20/1/2017 1300	1/1/2020	1/1/2020
SBE-56	4856	1000	V0.96	10	n/a	20/1/2017 1300	1/1/2020	1/1/2020
SBE-56	4857	1000	V0.96	10	n/a	20/1/2017 1300	1/1/2020	1/1/2020
SBE-56	6464	1000	V0.96	10	n/a	20/1/2017 1300	1/1/2020	1/1/2020
AADI RCM-9	647	1000	n/a	3600	n/a	11/2/2017 1100	17/12/2018	8/4/2018
AADI RCM-9	845	1000	n/a	3600	n/a	11/2/2017 1100	17/12/2018	8/4/2018
AADI RCM-9	847	1000	n/a	3600	n/a	11/2/2017 1100	17/12/2018	8/4/2018

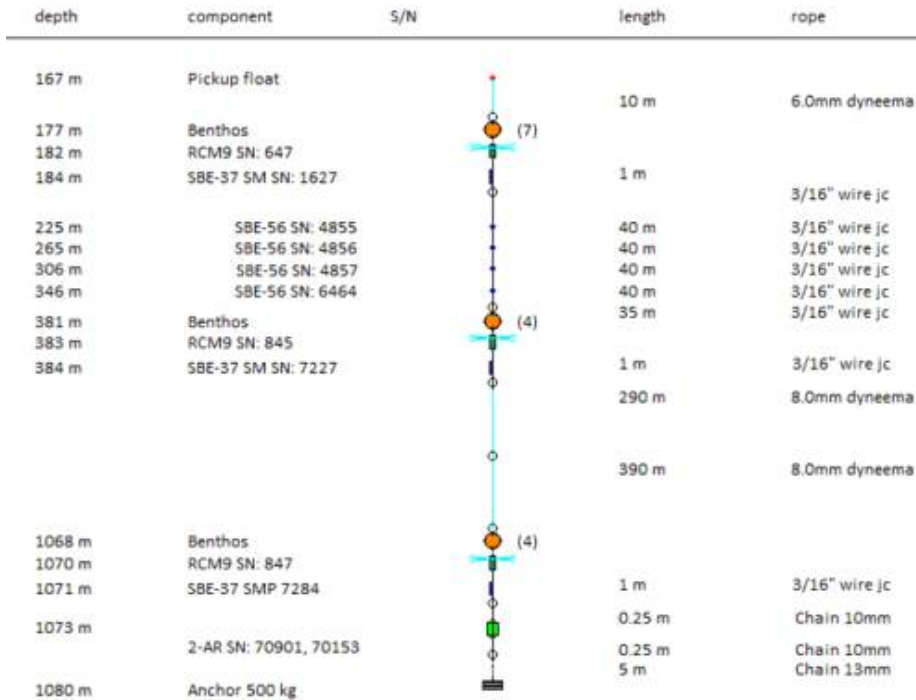


그림 253 2017년 2월 12일에 계류된 DITS 1702 모식도

표 20 DITS 1702 위치 및 시간 정보

Deployment code	DITS1702
Location	Drygalski Ice Tongue South
Project leader	Craig Stevens
Deployment operator	Fiona Elliott
Recovery operator	
Latitude (ddd mm.mmm H)	75° 29.305' S
Longitude (ddd mm.mmm H)	163° 10.461' E
Water depth	1080m
Magnetic declination	135.78 °
Start time (yyyy/mm/dd HH:MM:SS)	2017/02/12 10:28:00
Stop time (yyyy/mm/dd HH:MM:SS)	
UTC offset	+12

표 21 DITS 1702 메타데이터

DITS1702		
Instrument	Serial number	Nominal Depth (m)
AADI RCM-9	647	182
SBE-37SM	1627	184
SBE-56	4855	225
SBE-56	4856	265
SBE-56	4857	306
SBE-56	6464	346
AADI RCM-9	845	383
SBE-37SM	7227	384
AADI RCM-9	847	1070
SBE-37SMP	7284	1071
Benthos R2K	70901	1073
Benthos R2K	70153	1073

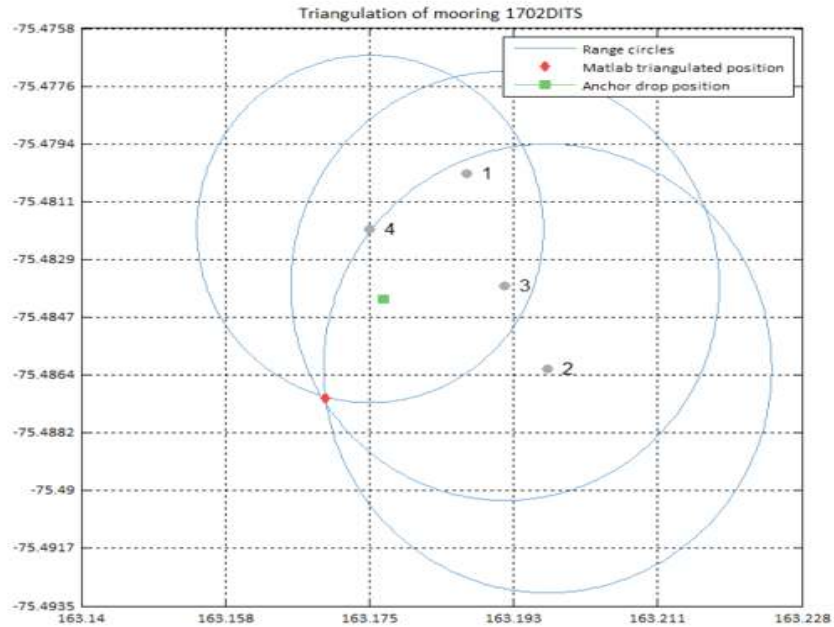


그림 254 DITS 1702 트라이앵글레이션 위치결정 결과

(바) NOAA 수중음향 계류장비 회수와 설치

드라이갈스키 빙설을 비롯한 해양 빙권 기원 신호와 해저 지각활동을 관측하기 위하여 NOAA와 협력하여 2015/2016 남극 탐사시 테라노바만 남쪽에 수중음향 관측기 3기를 설치하였다. 이번 탐사에서는 이들을 회수 후 재 설치하고 북쪽에 신규 관측기 3개를 추가로 설치하였다. 신규로 설치한 관측망 위치정보는 표 22와 같고 그림 255은 계류장비 모식도이다.

표 22 신규로 설치된 테라노바만 북부 수중음향 관측망 정보

Hydrophone SN	Target Location		Multibeam Depth of Target (m)	Angulate Solution		Angulate Depth (m)
	Latitude	Longitude		Latitude	Longitude	
HC20	74 56.3847	165 22.8668	865.1	74 56.378281	165 22.806646	836.8
HC23	74 55.2986	165 22.1589	835.7	74 55.308365	165 22.159536	814
HC25	74 55.9756	165 18.8951	830.2	74 55.991146	165 18.879070	827.7

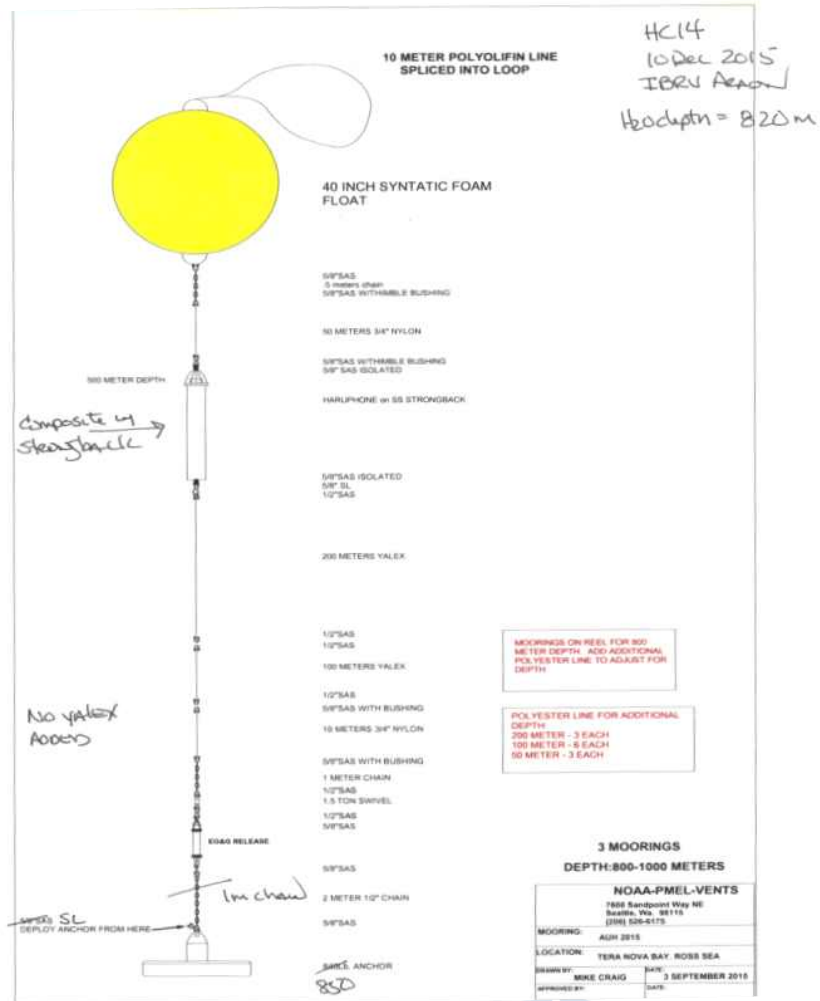


그림 255 수중음향 계류장비 모식도

북부 수중음향 관측망 3기 설치는 2017년 2월 5일 16:30~22:00 사이에 이루어졌고 이어서 트라이앵글레이션 작업을 수행하였다. 그림 256과 257은 설치 작업 사진과 트라이앵글레이션 작업 결과 그림이다.



그림 256 수중음향 관측기 설치 작업

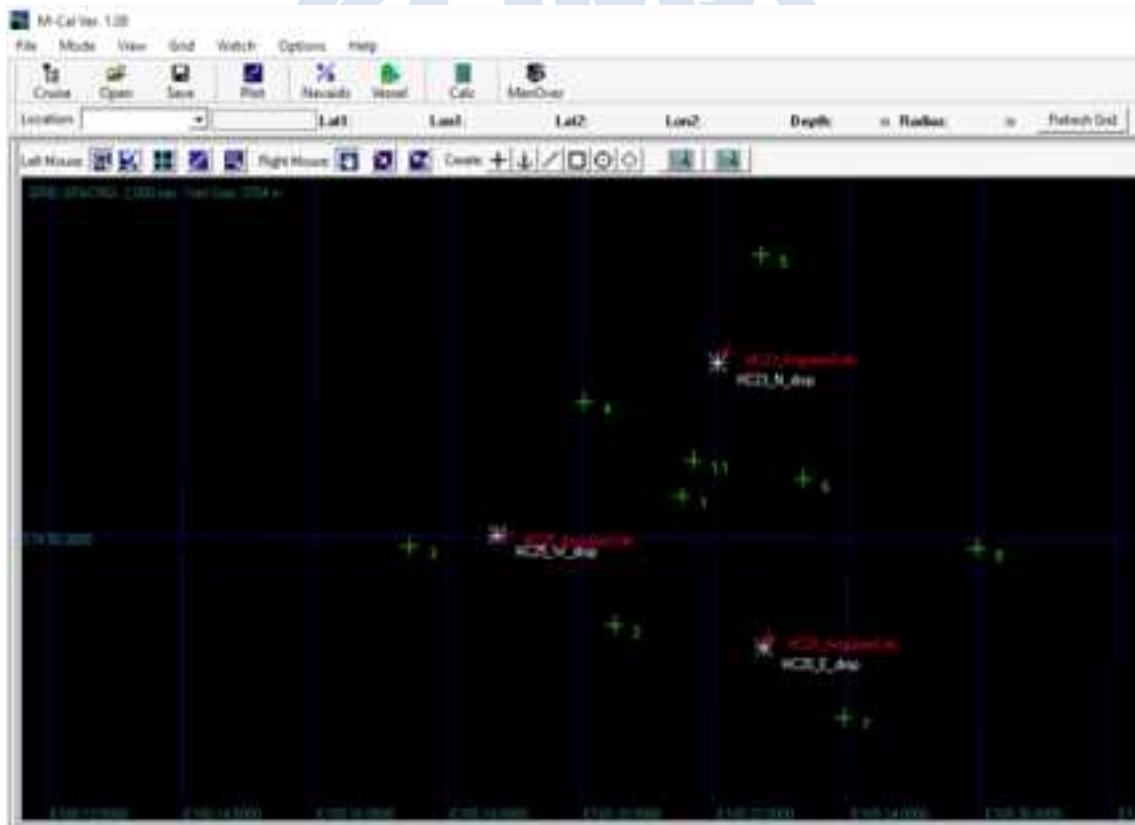


그림 257 트라이앵글레이션 계산 결과. 흰색은 앵커 드롭 포인트이고 붉은 색이 계산 결과이다.

2017년 2월 9일에는 남쪽 수중음향 관측망 3기 회수 작업을 06:00~13:15에 수행하였다. 2015/2016 탐사 시 시간부족으로 트라이앵글레이션 작업을 하지 못하여 본 항차에서 2시간 동안 수행한 후 (그림 258) 약 5시간에 걸쳐 회수작업을 진행하였다. 회수한 남쪽 관측망의 위치는 다음 표 23과 같다.

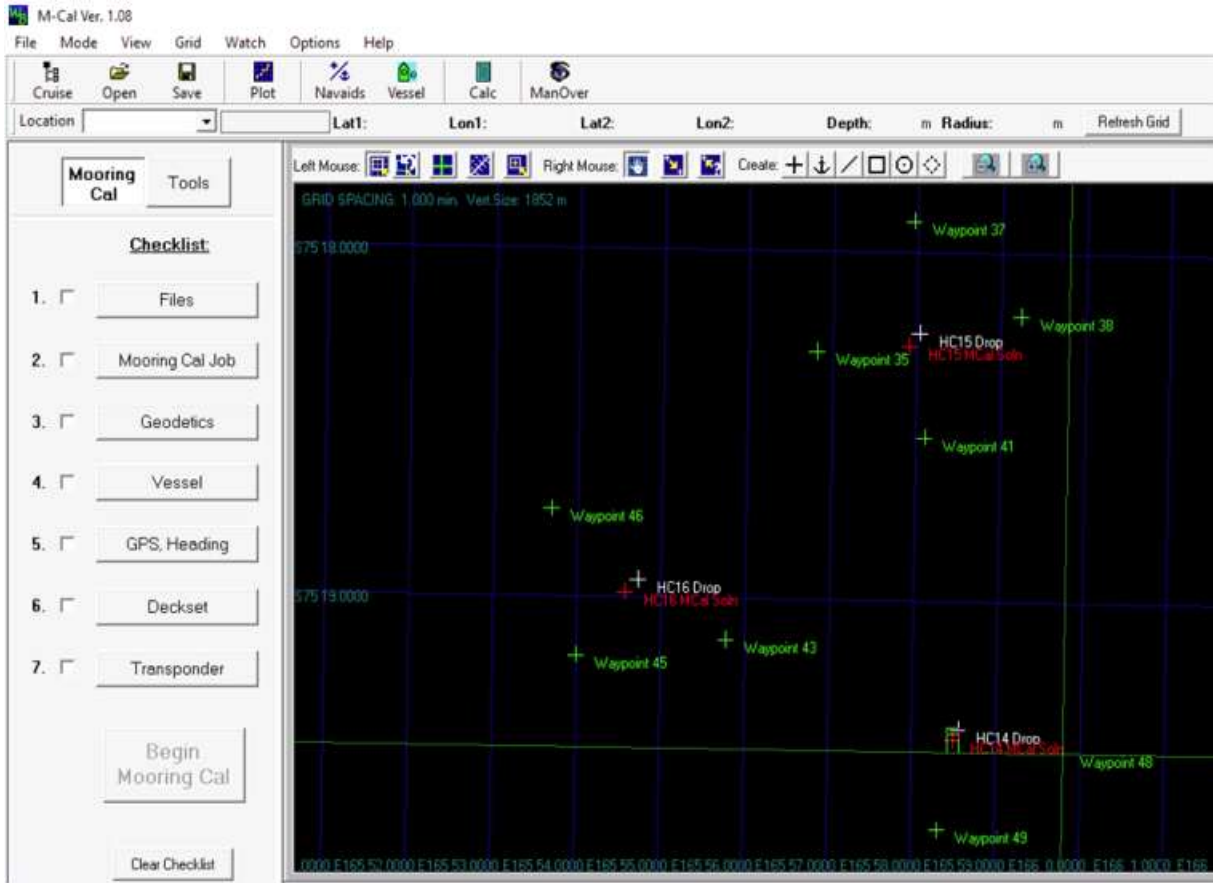


그림 258 2015/2016 시즌에 설치한 남쪽 수중음향 관측망의 트라이앵글레이션 계산결과

표 23 2015/2016 시즌에 설치한 남쪽 수중음향 관측망 위치 정보

Hydrophone SN	Mcal Solution		Mcal Depth (m)	RMS	Multibeam Depth(m) of MCal Soln	Angulate Solution		Ang. Depth (m)
HC14	75 19.4016	165 59.4877	828.5	5.2	837.8	75 19.406071	165 59.467272	807.7
HC15	75 18.2725	165 58.9109	832.4	2.2	849.4	75 18.275731	165 58.916191	812.5
HC16	75 18.9899	165 55.5726	826.8	3.8	843.4	75 18.990207	165 55.594220	804.8

남쪽 수중음향 관측망 재 설치는 2017년 2월 12일 22:30에서 2017년 2월 13일 06:20분까지 이루어졌다. 새롭게 설치한 남쪽 수중음향 관측망의 트라이앵글레이션 작업결과와 설치위치 정보는 각각 그림 256과 표 24에 나타나 있다.

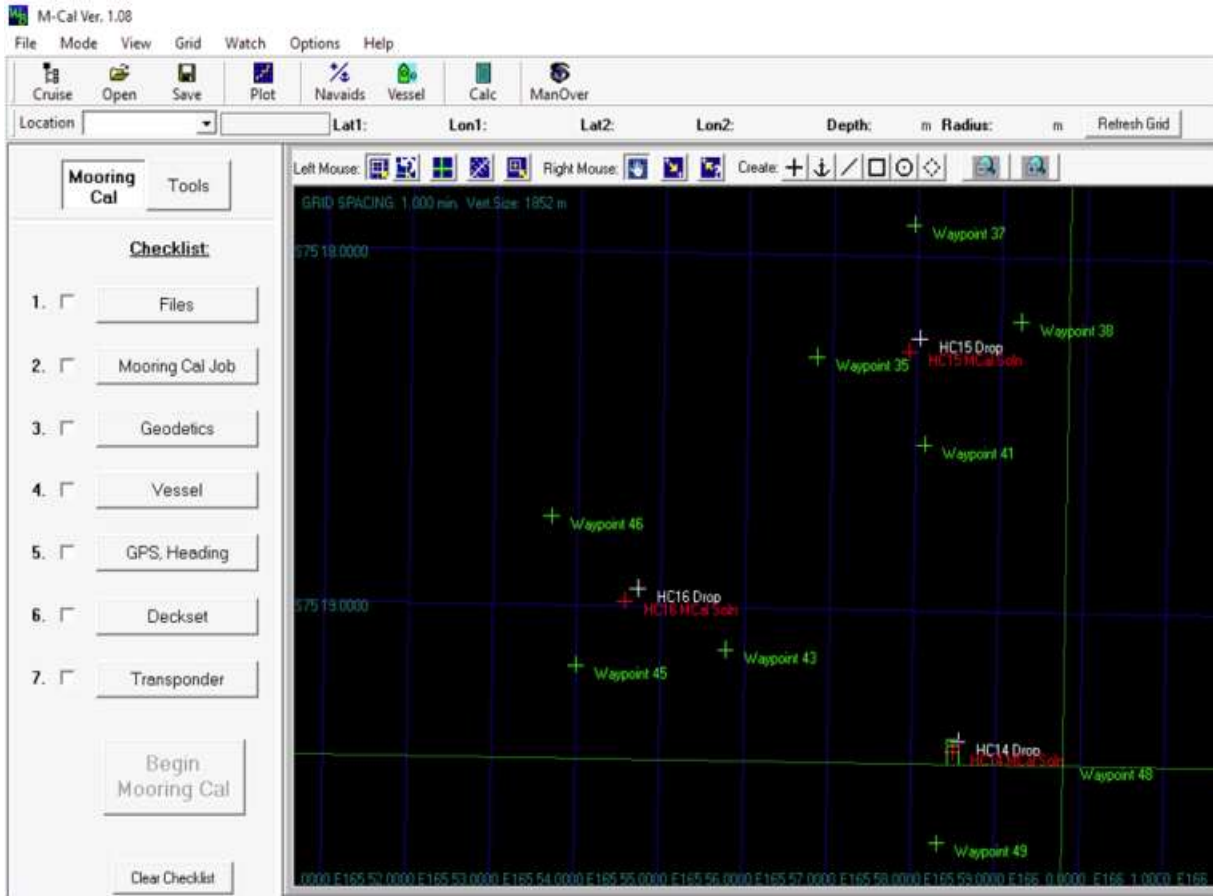


그림 259 2016/2017 시즌에 설치한 남쪽 수중음향 관측망의 트라이앵글레이션 계산결과

표 24 2016/2017 시즌에 설치한 남쪽 수중음향 관측망 위치 정보

Hydrop- hone SN	Target Location		Multibeam Depth of Target (m)	Mcal Solution		Mcal Depth (m)	RMS	Angulate Solution		Ang Depth (m)
HC24	75 19.3711	165 59.5541	838.7	75 19.4316	165 59.5376	821.1	7.1	75 19.430233	165 59.528105	799.6
HC21	75 18.2345	165 59.0339	850.4	75 18.2774	165 58.9592	839.7	3.7	75 18.285807	165 58.953054	815.8
HC30	75 18.9481	165 55.7527	841.2	75 18.9853	165 55.6209	820.2	8.1	75 18.990164	165 55.643776	810.2

(사) 테라노바만 해저면 지진계 설치

이번 남극 하계 탐사에서는 해양 빙권 기원 신호와 해저 지각활동을 관측하고 수중음향 관측을 보완하기 위하여 북부 수중음향 관측망 3기 중앙에 해저면 지진계 1대를 설치하였다. 본 탐사에서 설치한 해저면 지진계는 독일 KUM사에서 제작한 LOBSTER 모델로 장비 정보는 표 25와 같다.

표 25 LOBSTER 해저면 지진계 주요 구성장비 정보

구성 장비	모델명	SN	설명
광대역 해저면 지진계 센서	Nanometrics Trillium Compact in titanium pressure tube	003167	6000m 수심까지 견딜수 있는 티타늄튜브에 내장된 광대역지진계. 전방향 레벨링이 가능함
음파원격이탈기 (Acoustic Releaser)	KUMQUAT K/MT 562	1601349	6000m 수심까지 견딜수 있는 프레스튜브. -5~40 ℃에서 안정적으로 구동, 24개월간 구동 가능
자료기록계	6D6	61607081	KUM사에서 신규개발한 초저전력 (125mW) 자료기록계, 4채널(지진계 3채널, 하이드로폰 1채널),
Hydrophone	HTI-04_PCA/ULF	700033	High Tech사의 하이드로폰, 6000m 까지 작동 가능, 응답 주파수 0.01Hz ~ 8kHz

본 장비는 2017년 2월 5일 23시에 아라온 A 프레임을 이용하여 설치하였고 설치위치는 74° 55.843' S, 165° 21.571' E(수심 840 m)이다. 그림 260은 해저면 지진계 세팅과 설치 로그 시트이다.

LOBSTER STATION-PROTOCOL V1.3

Cruise: ANACMC Project: _____
 Profile: _____ Station: KPOBS03
 Date UTC: _____ Date local: _____

Battery packs: 9 of Li at 10 Volts 48 of _____ at _____ Volts 6D6-SN: 61607021
 two dry packs inserted sealing area checked all screws fixed

Operator: Sukyung

Recorder 6D6 SN: 61607021 Firmware: _____
 TOM SN: _____ format capacity total 129.8 GB
 gain H I Z Y X channels 4 rate 100 Hz
 signals show H Z Y X remarks _____
 trillium levelling: Start 6Hr After

GPS-Sync: GPS-signal okay? GPS date (dd.mm.yyyy) 02.02.2019 time (hh:mm:ss) 04:25:20 (UTC)
 Start Date 02.02.2019 time (GPS) 04:26:52

RECORDING STARTED CHECKED (capacity) OPERATOR: Sukyung

Releaser SN: 1601349 User1: _____ User2: _____
 Release: 650675 Enable: 670314 Disable: 670337 DISABLE?
 ST date: 01.02.2019 UTC time: 00:55 UTC RT date: 31 Jan 2019 UTC time: 01:00 UTC
 Batt 1: 9.86V Batt 2: 9.55V Operator: Sukyung

Prepare on Deck

frame SN: 1509-189 Flag: fixed
 Tube SN: 1611189 fixed all 6 conn.: fixed
 Flash SN: D10-034 switched ON tested
 Radio SN: D10-063 switched ON tested channel A B C D
 Hydrophone SN: 700033 fixed Sonometer: 003167 160.72500 MHz
 Anchor: _____
 bolt material: Titanium added weight: _____ fasten with 4.7 Nm (max 20Nm)

Deployment Date UTC 03.02.2019 Time UTC 10:26
 Operator Sukyung local date 03.02.2019 local time 23:26
 coordinates: lat 74° 55' 33" N long 165° 21' 37" E waterdepth 840 m

그림 260 KPOBS03 설치 로그시트

(아) LDEO 테라노바만 계류장비 수색과 재설치

빅토리아랜드에서 테라노바만으로 연중 강하게 불어오는 활강풍은 해수의 대류 현상을 야기시켜 해수면에 활발한 결빙 현상이 생길 수 있게 하고, 이러한 결빙현상으로 인하여 생성된 고염도의 해수는 해양심층수로서 가라앉게 된다. 이러한 현상을 관측하기 위하여 2015/2016 남극 하계 탐사에서 미 Lamont-Doherty Earth Observatory (LDEO)와 공동으로 테라노바만에 해저 계류장비를 74° 58.27'S, 163° 57.89'E에 설치하였다. 그러나 2016년에 난센 빙붕이 붕괴하면서 생성된 거대한 빙산이 설치위치 위를 지나갔는데 본 장비는 가장 높은 부이가 수면 40m 아래에 존재하여(그림 261) 빙산에 의해 계류장비의 유실 가능성이 높은 상태였다. 이에 2017년 1월 30일에는 2015/2016시즌에 설치한 계류장비를 찾는 작업을 시작하였다.

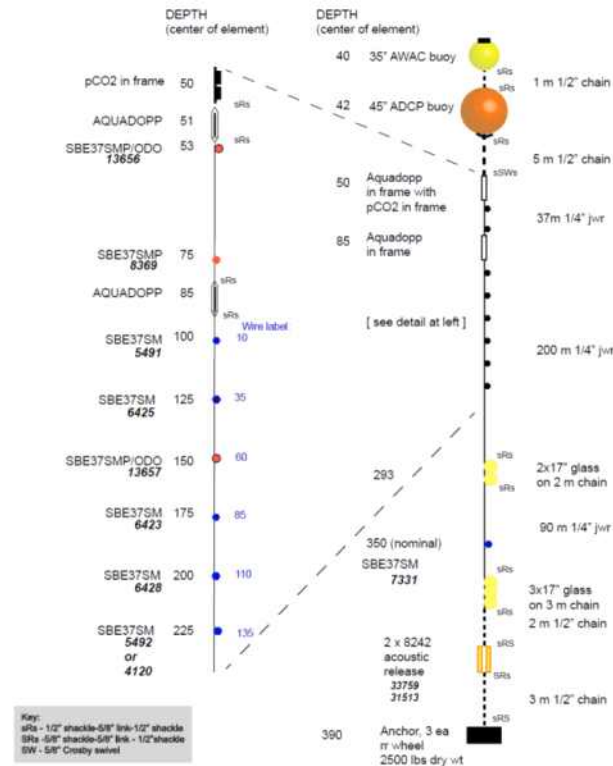


그림 261 2015/2016년에 설치한 LDEO 계류 장비의 구조도. 가장 높은 부분이 해수면 아래 40m 깊이에 위치한다.

극지연구소

LDEO 계류 장비에는 두 개의 자동음향이탈장치가 묶여 있는데 이 둘 중 하나만 작동하여도 체인이 풀리고 계류장비는 떠오르게 된다. 그러나 수차례에 걸친 음향 이탈 신호 송신에도 아무런 응답이 없고 계류장비 역시 떠오르지 않았다. 이에 우리는 위성 사진에서 보여진 빙산이 이동 궤적을 따라 계류장비가 이동했을 가능성이 높은 지역을 선정하였고(그림 262) 대략 3.5 km 간격에서 멈추어 음향이탈 신호를 송신하였다. 그러나 모든 포인트에서 음향응답이 없고 계류장비 역시 떠오르지 않아 LDEO 계류장비는 빙산에 의해 유실된 것으로 판단하고 수색을 중단하였다.

LDEO 에서는 본 장비의 빙산에 의한 유실 가능성을 사전에 염두에 두고 본 탐사에서 계류할 새로운 장비를 준비해왔다. 이 장비는 2015/2016년에 설치 위치와 같은 곳에 재설치 하였다(그림 262). 장비 설치 후에는 다른 계류장비와 마찬가지로 정확한 위치를 확인하기 위하여 트라이앵글레이션 작업을 수행하였다(표 26, 그림 263). 트라이앵글레이션으로 계산한 위치는 74° 58.471'S, 163° 57.674'E 이다(그림 264).

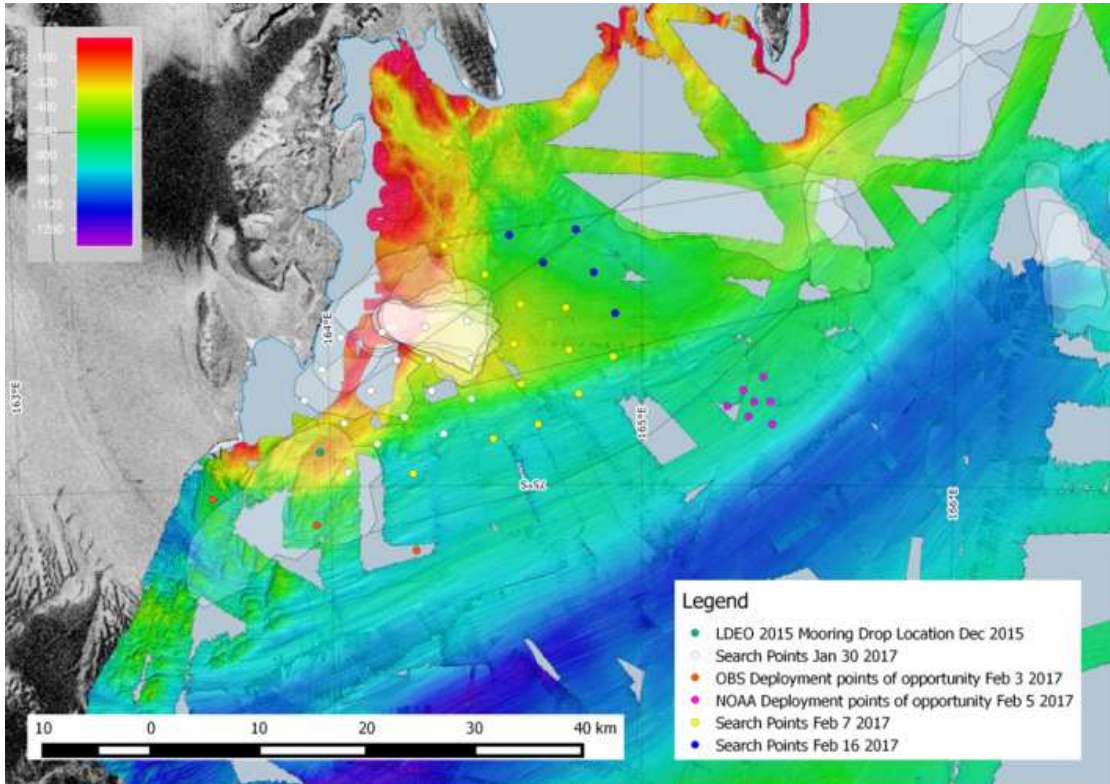


그림 262 계류장비 수색 포인트

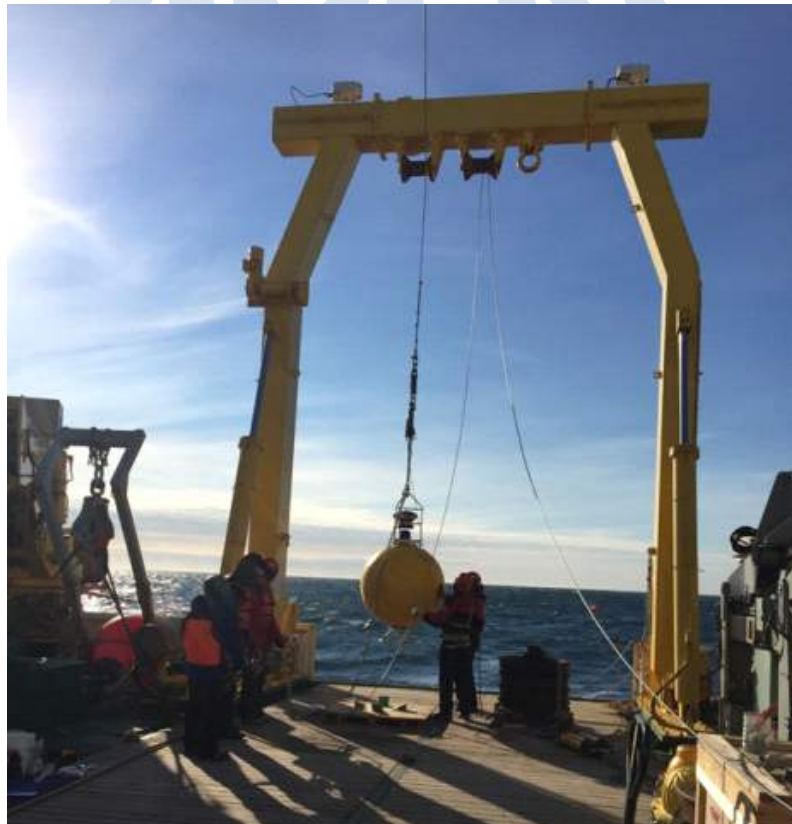


그림 263 2016/2017 테라노바만에 LDEO 계류장비 재설치 모습

표 26 LDEO 무어링 트라이앵글레이션 결과

Lat (DM)	Long (DM)	Slant Range (m)	Transmission Time (s)
-7458.2994	16356.5932	724	0.960
-7458.7518	16356.9359	741	0.988
-7458.6380	16358.6986	700	0.934
-7458.1937	16358.3831	729	0.973

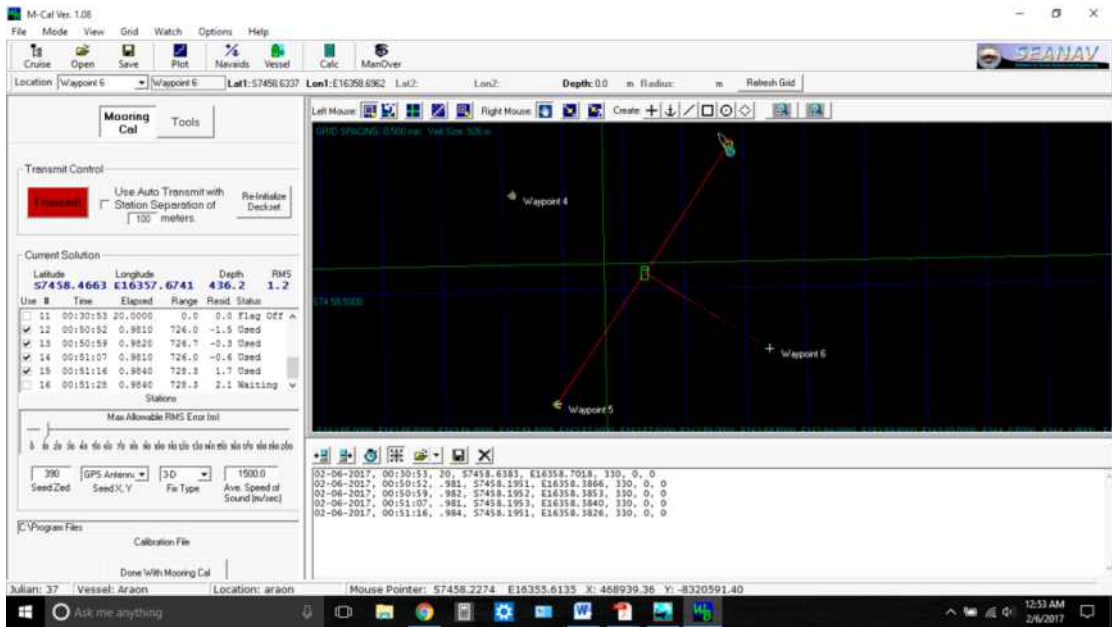


그림 264 M-Cal 프로그램을 이용한 트라이앵글레이션 작업

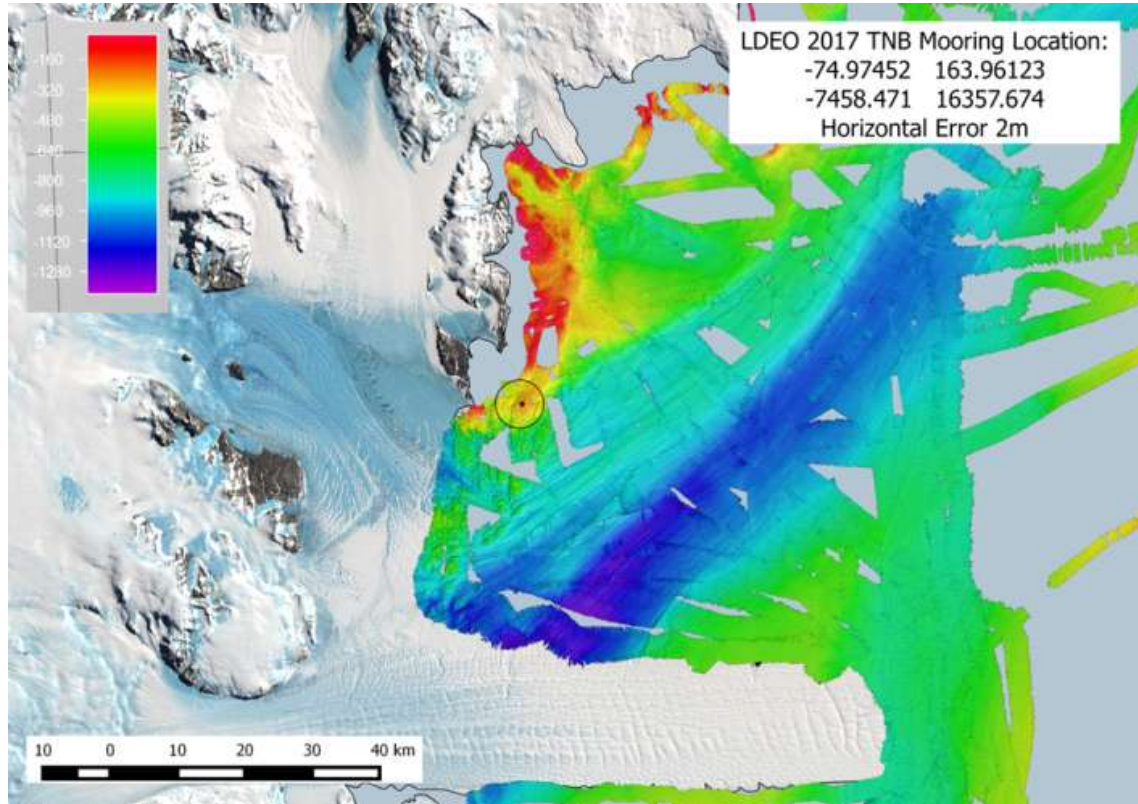


그림 265 트라이앵글레이션으로 계산한 LDEO 계류 위치

(자) 테라노바만 무인 잠수정 탐사

본 사업에서는 아라온을 이용한 해양 탐사의 한계를 극복하고자 글라이더와 AUV 두 개의 무인 잠수정을 투입하여 탐사를 수행하였다. 무인잠수정을 이용한 탐사는 아라온이 접근하기 어려운 지역까지 접근하여 해수의 물리적 특성과 해수 흐름을 보다 면밀히 관측하고 탐사 기간 중 더 많은 횡수의 해수 특성 측정을 수행할 수 있다는 장점이 있다. 본 탐사는 미국의 UC Davis, Columbia Univ., Univ of Delaware, Univ of New Hampshire, 호주 Univ. of Tasmania, Blue Ocean Monitoring사에서 총 6명이 투입되어 수행되었다. 글라이더 UCD-636 탐사의 과학적 목적은 난센 빙벽 앞쪽에서 빙저 용융수에 의해 생성된 초저온수(supercooled water)를 찾고 물리적 특성을 파악하는 것이다. 본 글라이더는 8일간 투입되어 수온, 염도 등을 측정한 뒤 회수되었다. AUV인 UBC-Gavia를 이용한 탐사의 목적은 1) 난센빙붕 하부의 토포그래피를 직접 측정하여 2016년 11월에 수행된 육상 GPR(Ground Penetrating Radar) 탐사와 2017년 2월에 수행한 항공 전자기 탐사 결과에 대한 비교와 보정 자료를 제공하는 것과 2) 난센 빙붕 하부 해수의 물리적 특성(해수의 속도, 온도, 염도)을 관측하는 것이다.

① 탐사 전 준비

남극에서 본격적인 탐사에 앞서 무인잠수정 연구팀은 2017년 1월 29일 장보고 기지로 가서 극지역에서의 운항 테스트와 발라스트(부력) 테스트를 수행하였다(그림 266). 발라스트 테스트를 마친 후 글라이더와 AUV 안전한 투입장소를 정하기 위하여 헬기를 이용하여 주변 해역 정찰을 수행하였다. 이에 주변 해역 정찰 후 관측 위치까지 이동중에 만날 수 있는 리스크를

피하기 위하여 장보고기지 인근이 아닌 테라노바만으로 안쪽에서 글라이더를 투입하기로 결정하였다.

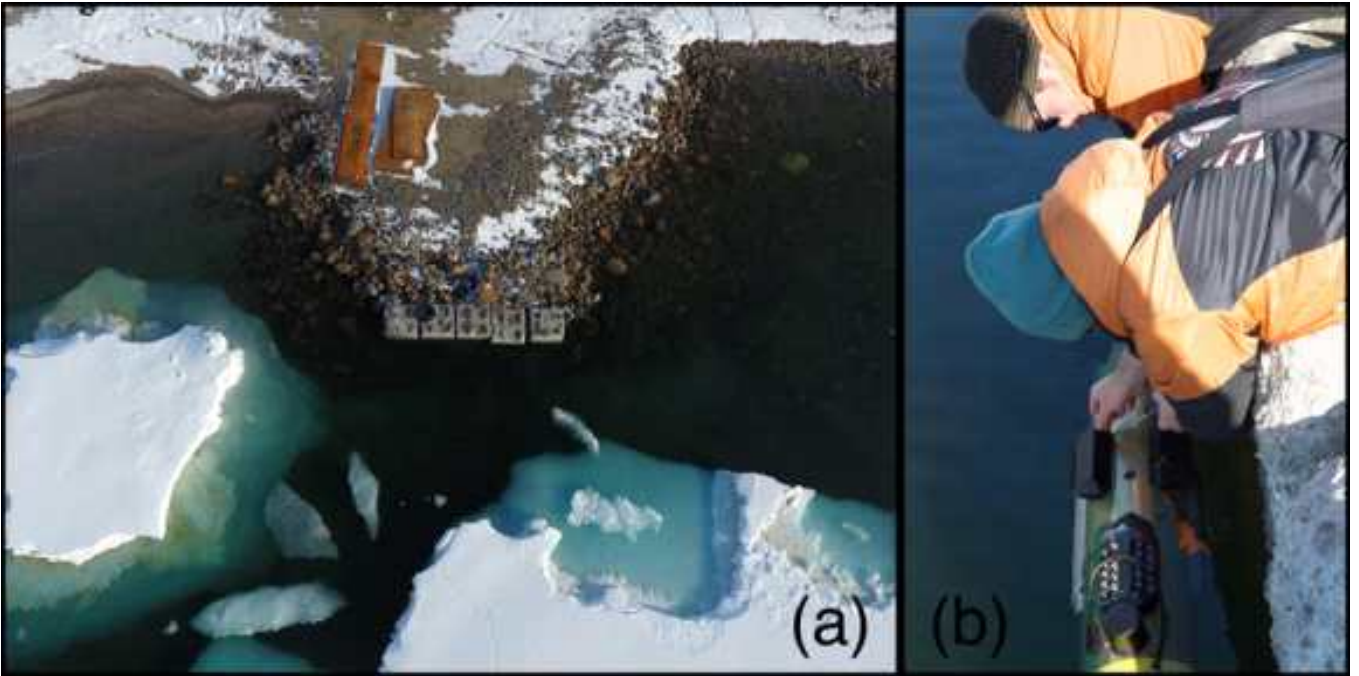


그림 266 (a) 발라스트 테스트 장소인 장보고 기지 구부두 (b) Gavia AUV의 발라스트 조정

② 글라이더 UCD-636 탐사

2017년 1월 27일에는 글라이더 장비가 정상적으로 작동하는지 테스트하였다. TWR Forum 웹페이지에서 다운 받은 4095-FCP.xlsx 체크리스트 파일을 기반으로 기능 테스트를 수행하였고 글라이더의 모든 시스템이 정상적으로 작동함을 확인하였다. 본 장비가 해빙 환경에서 적절하게 작동할 수 있도록 글라이더의 소프트웨어를 7.2 beta 버전으로 업그레이드 하였다. 1월 28일에는 조디악 보트를 이용하여 장보고기지로 글라이더를 이용한 후 freewave와 이리듐 위성을 이용한 통신 테스트를 수행하였고 성공적인 통신이 이루어지는 것을 확인하였다. 이어서 글라이더의 나침반 테스트도 하였으나 주변의 금속물질이 많아 정상적으로 작동하지 않았다. 이에 주변에 인공적인 금속이 없는 곳으로 이동하여 글라이더를 돌리면서 테스트를 수행하였고(그림 267) 그 보정 작업 결과는 표 27과 같다.



그림 267 글라이더 나침반의 방향값 보정 작업

표 27 자석 나침반 값과 보정전의 글라이더 나침반의 방향값(좌)와 보정후의 방향값(우)

Handheld Magnetic Compass	Glider Compass	Handheld GPS (Magnetic) Compass	Glider Compass
0°	0.8°	0°	346°
90°	2.5°	90°	115°
180°	225°	180°	181°
270°	60°	270°	262°

글라이더의 나침반 보정 작업을 마친 후 테스트 운항을 하였다. 아라운에서 freewave를 이용하여 글라이더로 명령을 보내고 조디악에서 글라이더를 끈으로 묶어 운항을 확인하였다. 테스트 운항 결과는 그림 268과 같다.

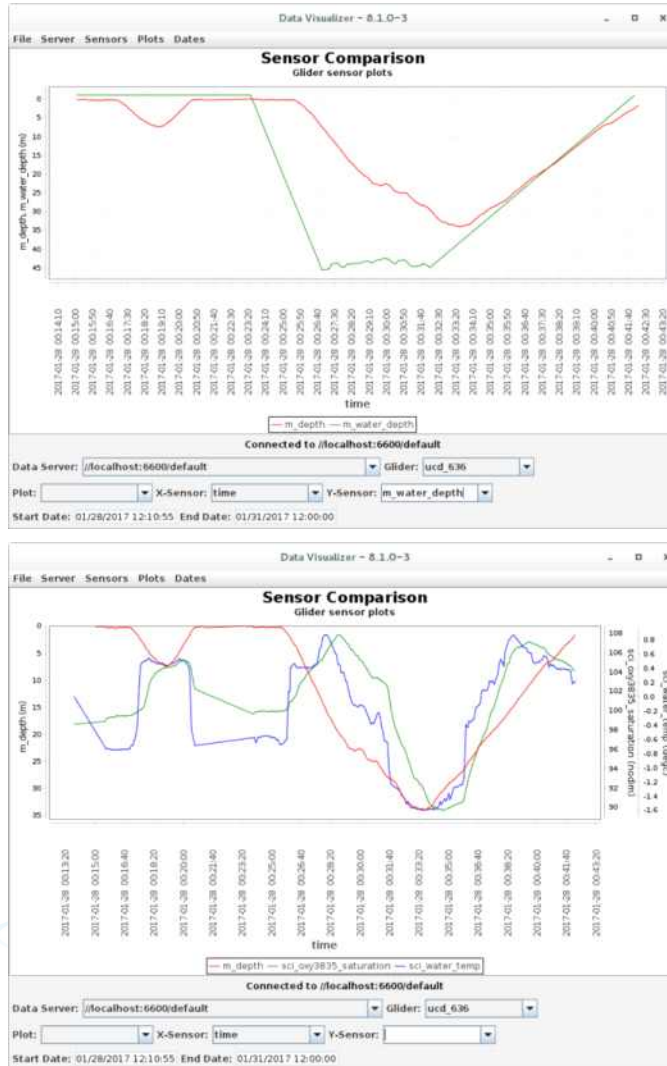


그림 268 글라이더 테스트 운항 결과. 좌측 붉은 색 라인은 글라이더가 잠수한 깊이이고 녹색은 글라이더가 측정한 수심을 나타낸다. 우측은 글라이더에서 측정한 산소 농도(녹색)와 해수의 온도(파란색) 그래프이다.

1월 30일에는 줄을 묶지 않은 상태로 글라이더 테스트를 수행하였다. 이 테스트역시 조디악을 이용해 진행되었다. 이 테스트 항해에서 극지역에서 자남극(magnetic south pole)과 실제 남극 방향의 차이로 인하여 글라이더 운항 방향에서 문제가 있음이 밝혀졌다. 따라서 이를 보정하여 운항 명령을 전송하였다. 본 글라이더는 남극에서 투입에 앞서 해빙지역에서 운항이 적합하도록 소프트웨어 업데이트를 하였는데 이 업데이트의 핵심은 글라이더가 잠수를 마치고 올라올 때 해수면에 해빙이나 빙산으로 인하여 커뮤니케이션에 실패했을 시에도 안전하게 다음 목적지로 운항을 계속할 수 있도록 하고 운항 중에 빙산을 맞닥뜨렸을 시 안전하게 벗어나는 동작을 수행할 수 있도록 하는 것이다. 그림 269은 운항 소프트웨어의 로직모델이다.

1월 31일에는 본격적인 탐사를 위하여 글라이더를 투입하였다(그림 270). 투입된 글라이더는 수차례에 걸친 잠수와 해수면에 올라오는 작업을 반복하면서 임무를 수행하였다. 처음에는 50 m 잠수로 시작하였다가 2월 1일에는 200 m 까지 잠수하여 해양물리 자료를 획득하였다. 글라이더와의 통신은 지속적으로 이루어지다 2017-02-01 00:59 GMT 에 이루어진 통신 이후로 이리듐 통신 서버와 연결이 끊긴데다 freewave 통신 거리에서 벗어나 통신이 되지않는 상태가 지속되었는데 2017-02-02 02:07에는 글라이더 예상 위치 인근으로 접근하여 freewave 통신에 성공하였다. 이리듐 통신 서버는 2017-02-02 05:45 GMT 에 연결이 재개되었다. 본 글라이더는 2월 3일부터 운항에 이상이 발생하였다. 제대로 잠수를 하지 못하는 현상이 발생하였는데 이상 동작은 그림 271와 272과 같다. 2월 6일에는 글라이더의 이상 동작과 빠른 배터리 소모 때문에 글라이더를 예정보다 빠르게 회수하게 되었다. 아라운을 글라이더 인근 위치로 접근한 후에 freewave 통신을 이용하여 회수를 하였다. 글라이더 회수 시에 글라이더의 gps와 이리듐 모듈이 있는 부분에 얼음이 얼어 있는 것을 발견할 수 있었다(그림 273). 이 얼음이 통신을 방해하여 정상적인 동작을 방해한 것으로 추정된다.

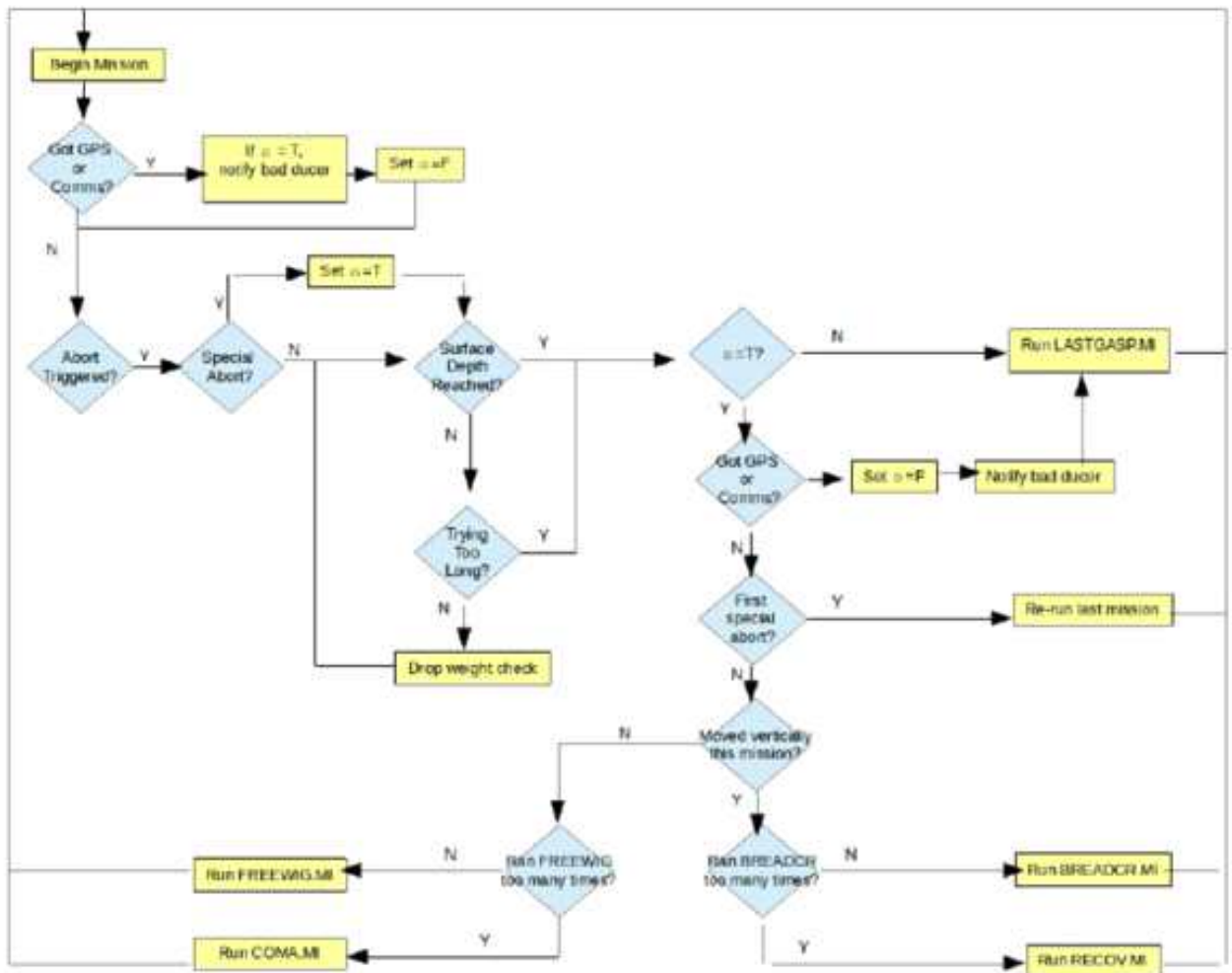


그림 269 해빙 지역에서의 운항 소프트웨어 로직



그림 270 1월 31일 아라온 후갑판에서 글라이더 투입 작업

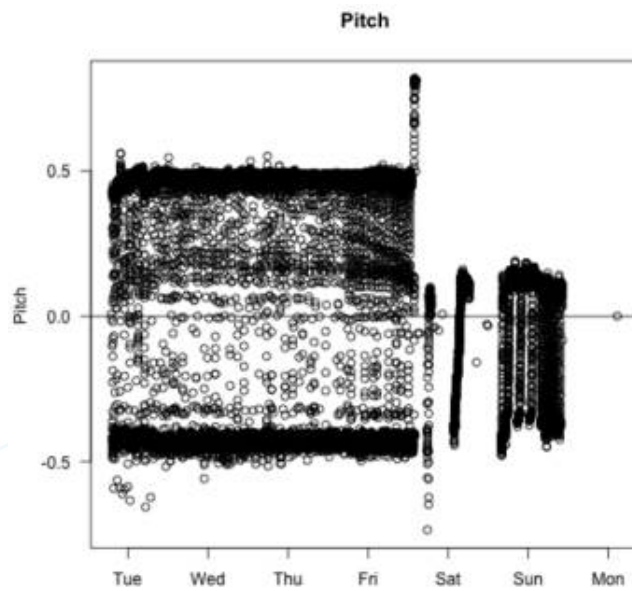


그림 271 글라이더 이상 동작 (Pitch)

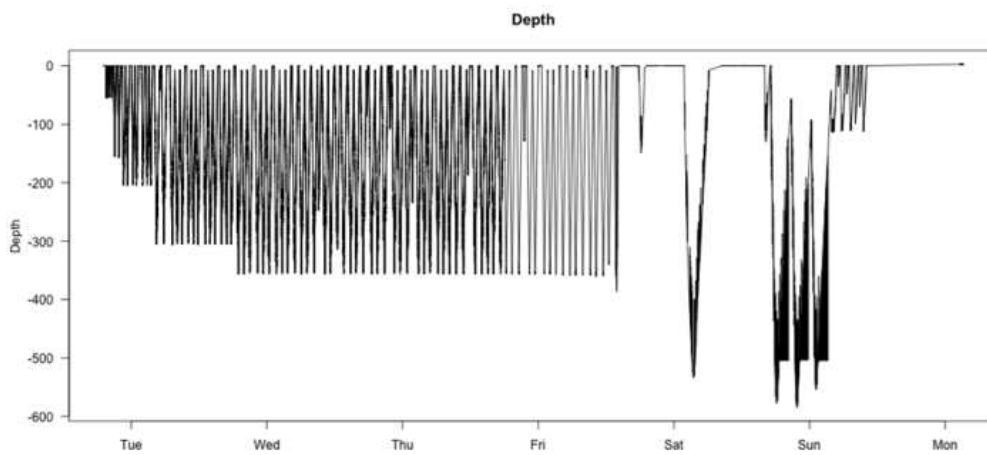


그림 272 글라이더 이상 동작 (잠수 깊이)



그림 273 글라이더 회수 당시 통신 모듈에 얼음이 맺힌 모습

글라이더에서 회수한 운항 항적은 그림 274에, 측정한 온도 프로파일은 그림 275에, 온도-염도 그래프는 그림 276에, 산소와 클로로필 농도 측정결과는 그림 277에서 표시하였다.

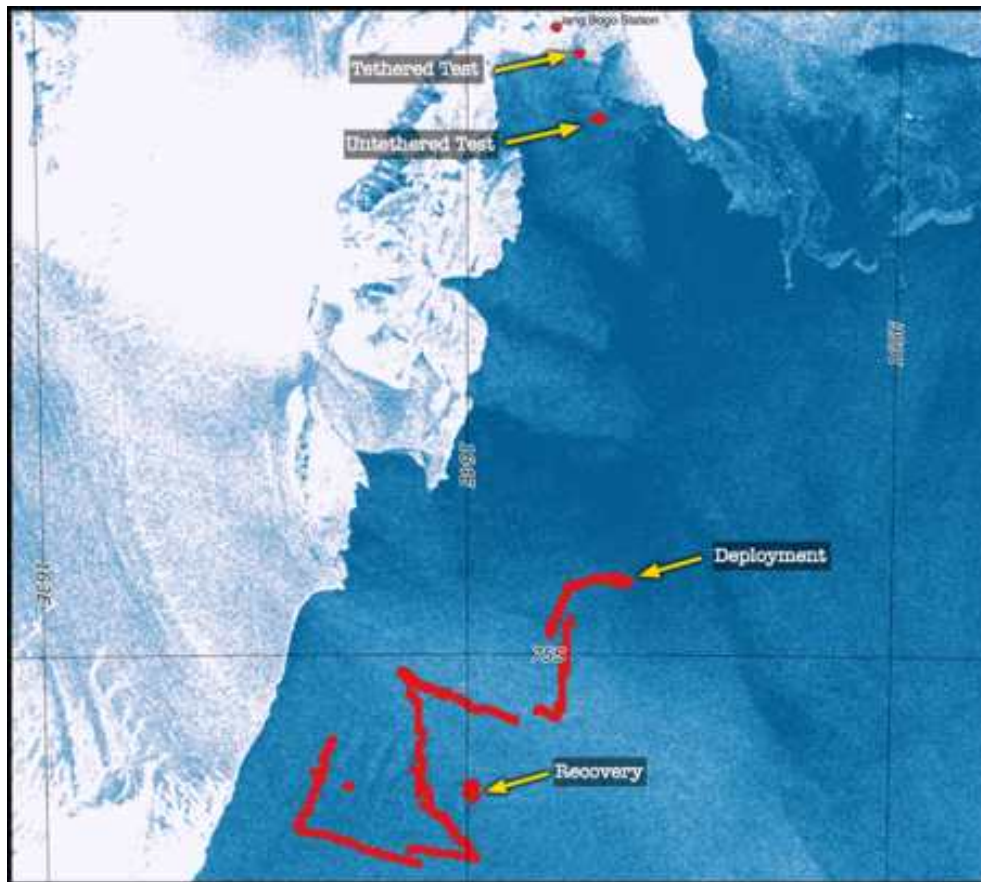


그림 274 글라이더의 테스트 지점과 항적도

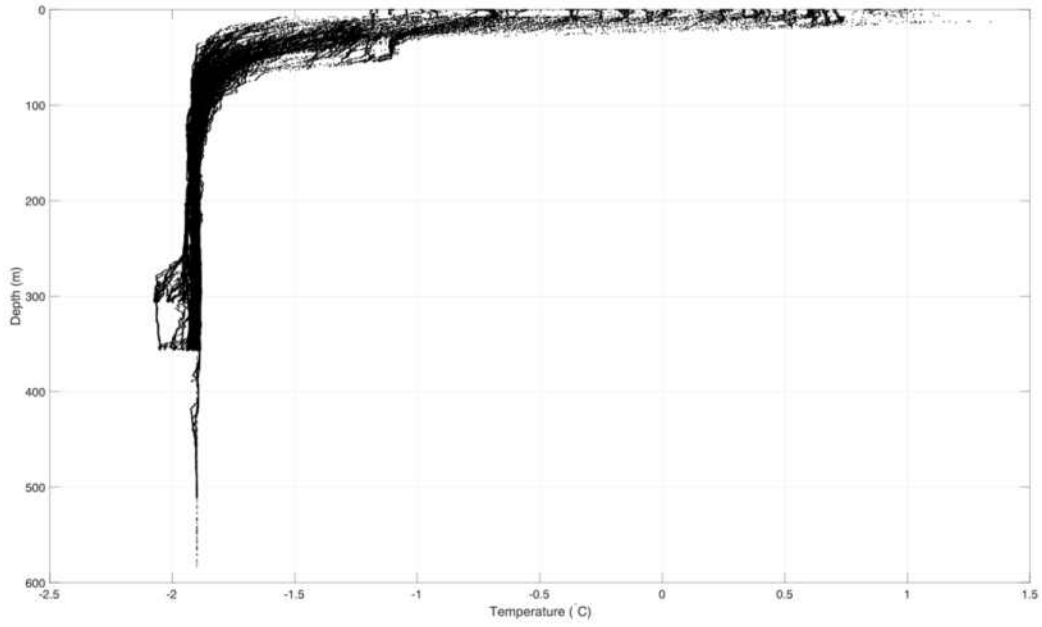


그림 275 글라이더가 측정한 온도 프로파일. 초저온수의 존재를 확인할 수 있다.

KOPRI

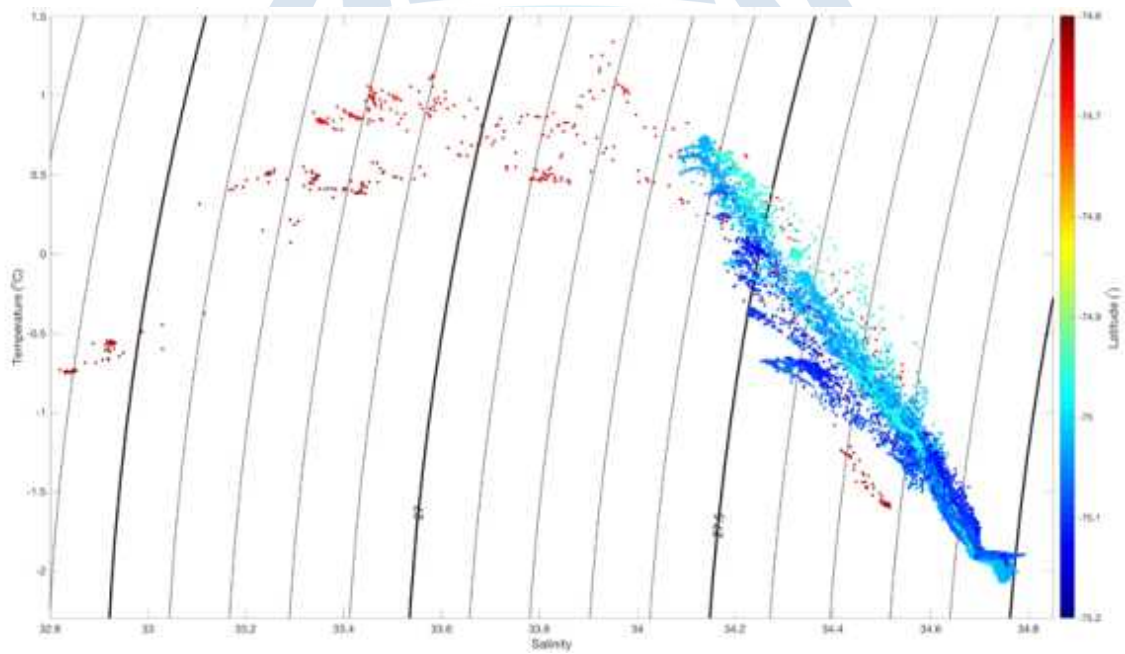


그림 276 글라이더에서 측정한 해수의 온도-염분 다이어그램. 위도는 색깔로 나타냈다.

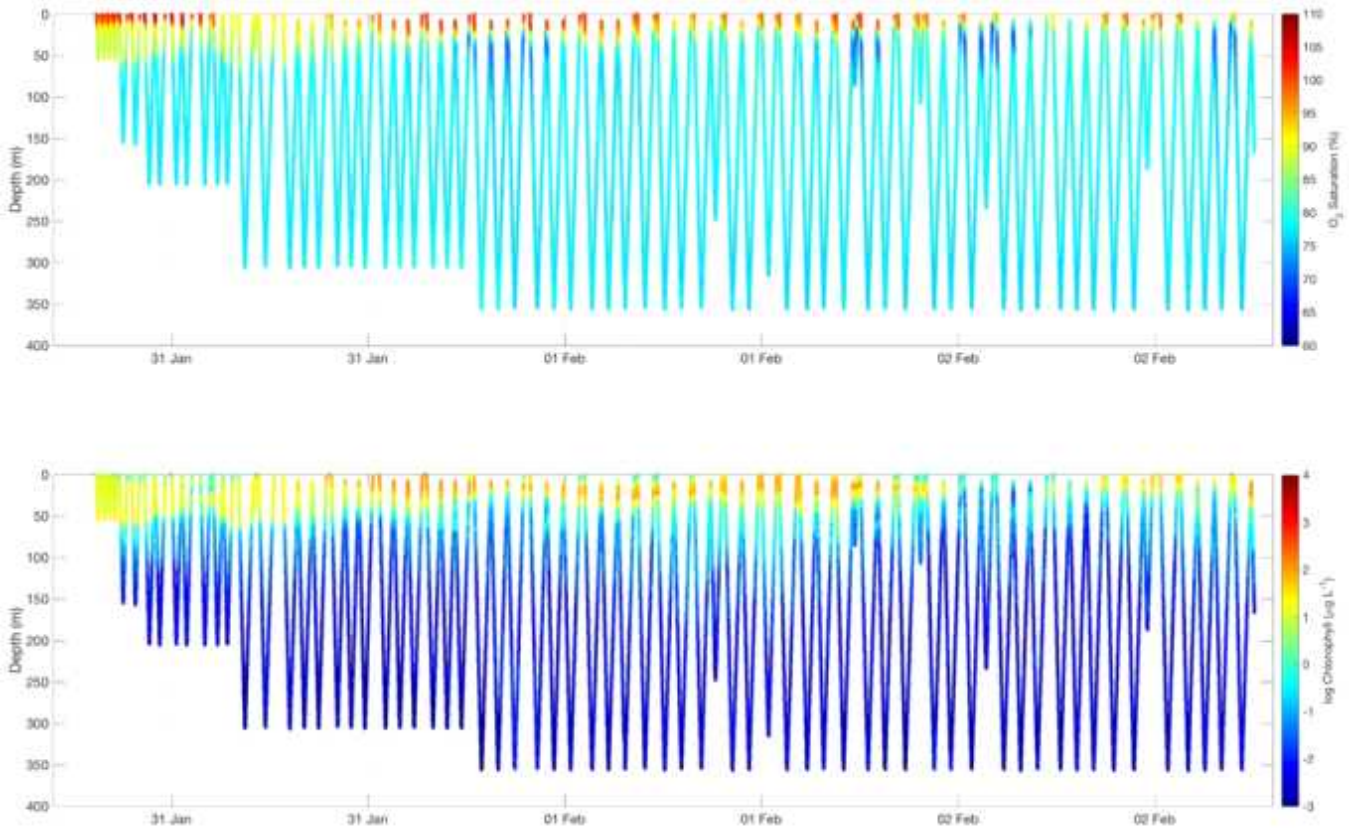


그림 277 글라이더의 잠수 프로파일과 가스 측정값. 위는 산소농도를 색상으로 표시하였고 아래는 클로로필 농도를 색상으로 표시하였다.

극지연구소

③ AUV UBC-Gavia 탐사

본 탐사에서 활용된 Gavia는 극지역 빙봉 하부탐사에 테스트 된 적이 없기 때문에 보다 안전한 탐사를 위하여 줄에 묶어 조디악 보트로 보조하면서 탐사를 수행하였다(그림 278). Gavia 투입은 총 5번에 걸쳐 이루어졌는데 투입 위치는 표 20와 같다. Gavia의 투입은 아라온 크레인을 이용하여 이루어졌고 회수는 Gavia에 연결된 줄을 당겨서 회수하였는데 본체가 얼음 밑에 있을 시에는 얼음으로 인한 손상을 방지하기 위하여 웨이트를 줄에 달아 아래쪽으로 빠져나올 수 있도록 하였다.



그림 278 Gavia 탐사 수행 세팅.

극지연구소

표 28 난센 빙봉 인근 Gavia 투입시 아라운의 위치

Station	Station Mission Name	Latitude	Longitude
1	12	S 75°03.348	E 163° 30.663
2	11a	S 75° 03.050	E 163° 31.299
3	11b	S 75° 03.129	E 163° 31.178
4	13	S 75° 03.478	E 163° 30.245
5	14	S 75° 03.613	E 163° 29.895

2017년 1월 29일에 장보고 기지 앞에서 AUV에 발라스트 작업을 한 후 2월 2일에 테스트를 위한 최초 미션을 수행하였다. 이 테스트에서 AUV는 50 m 깊이까지 다이빙에 성공하였다(그림 279). 두 번째 미션은 육상 GPR 탐사 라인을 따라 난센 빙봉 하부로 200 m 까지 잠수를 하는 것이었으나 이 과정에서는 많은 에러가 발생하여 작업을 중단하였다(그림 280).

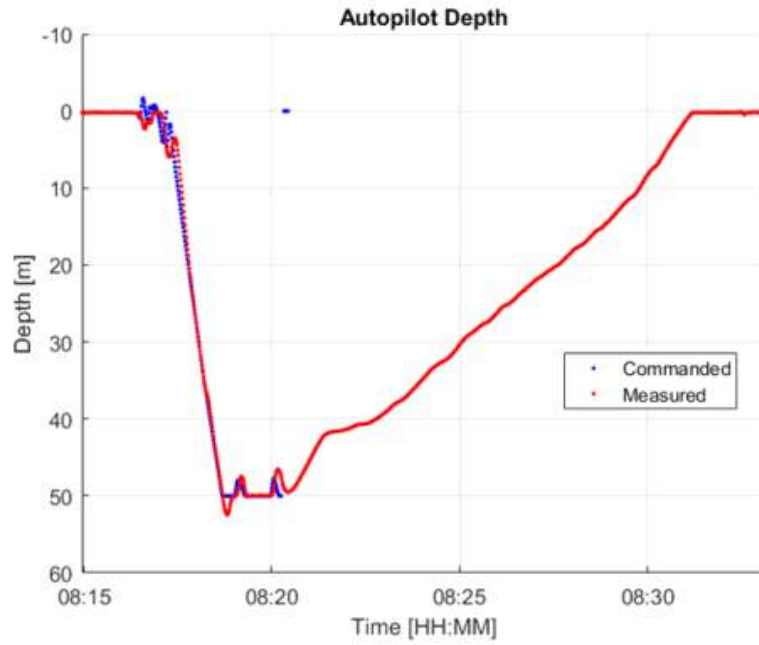


그림 279 2/2에 수행한 첫 번째 Gavia test의 잠수 깊이 로그

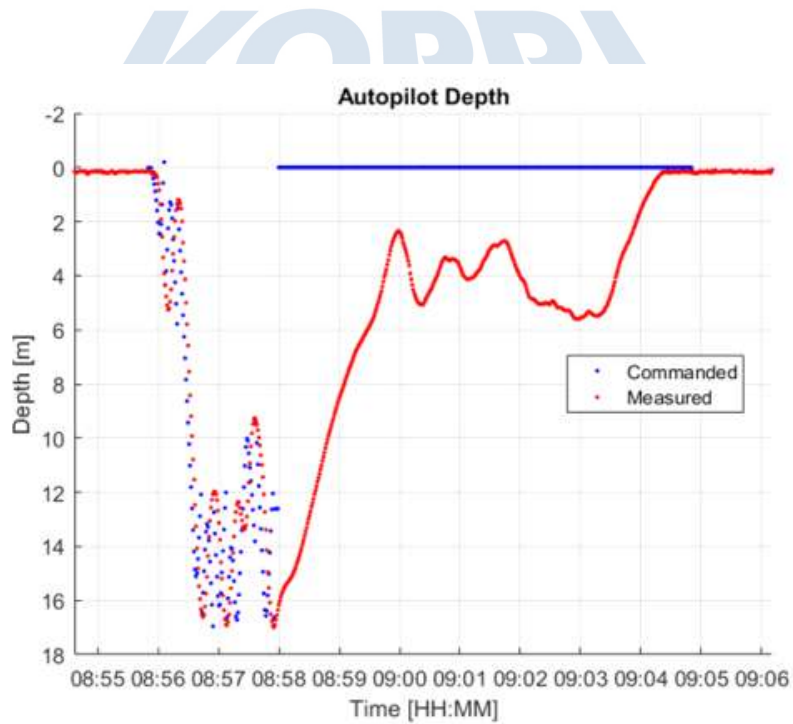


그림 280 2번째 미션에서의 잠수 깊이 로그

3번째 미션 수행 중에는 89 m 까지 잠수에 성공하였으나 이후 에러가 발생하여 회수하였다 (그림 281). 4번째에는 130 m 깊이까지 잠수하여 멀티빔 에코사운더와 ADCP, CTD, OBS(Optical Back-Scatter) 자료 회수에 성공하였다(그림 282).

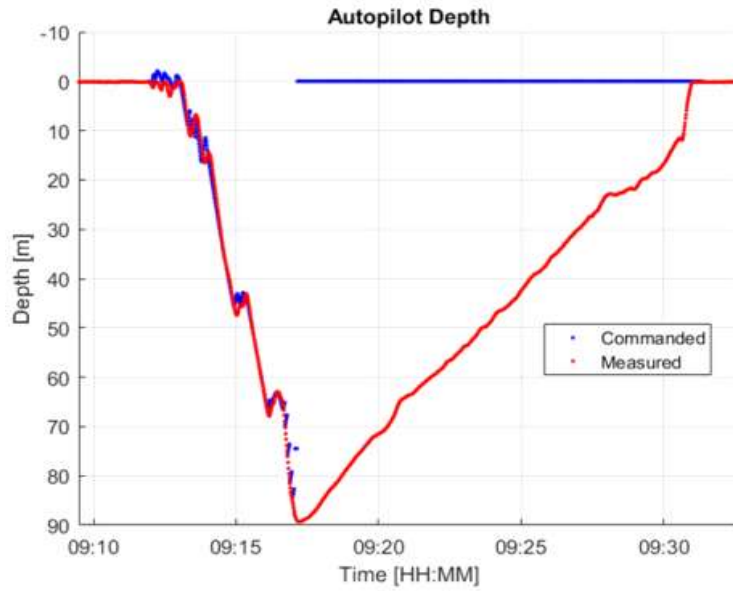


그림 281 3번째 미션 수행에서의 깊이 로그

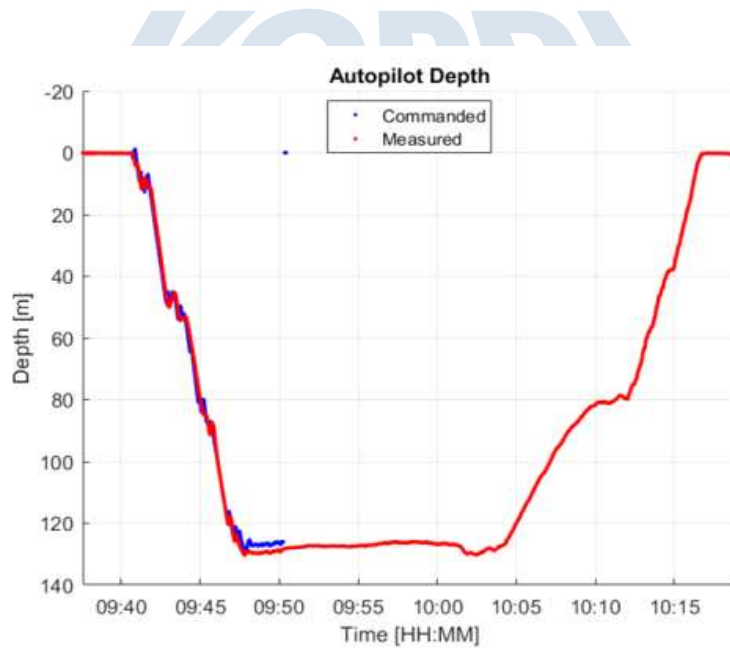


그림 282 4번째 성공적인 미션 수행에서 잠수 로그 파일

이후의 미션 수행에서 AUV 잠수 시 진행 각도가 계속해서 바뀌는 문제로 인하여 안정적인 탐사에 어려움이 있었다. 본 탐사에서는 빙붕 하부를 관측하기 위하여 DVL(Doppler Velocity Log)과 ADCP를 위를 향하게 하였다. AUV는 해저면을 인식하기 위하여 신호를 쏘면서 탐사를 하였는데 강한 반사면을 만나게 되었을 경우 이를 해수면이나 얼음의 표면으로

인식하게 되면서 다시 떠오르는 방향으로 전환을 하는 문제가 있었다. 이에 다시 평의 방향을 아래로 바꾸어 탐사를 수행하였다.

4 번째 미션에서 성공적으로 획득한 난센빙붕 하부의 구조는 그림 283~286에 나타나있다. 이를 육상 GPR과 항공 탐사의 자료 보정에 사용하면 보다 정확한 빙붕 하부 구조를 획득할 수 있을 것으로 기대한다.

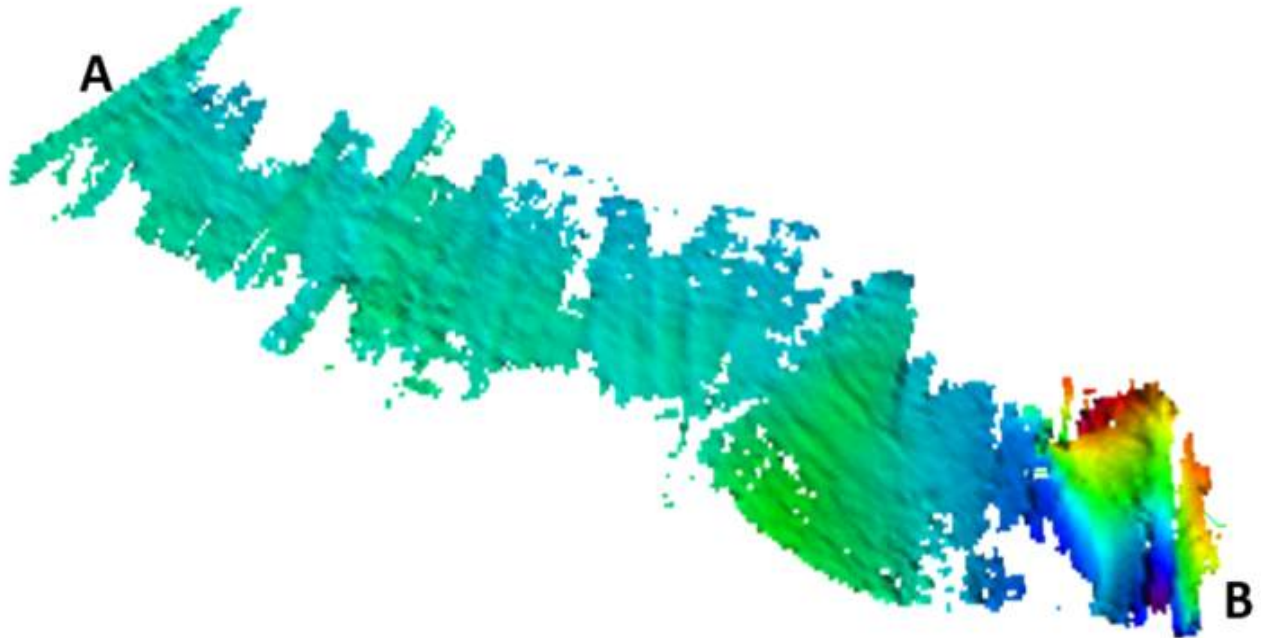


그림 283 4번째 미션 수행에서 멀티빔 자료로부터 획득한 난센빙붕 하부의 구조

극지연구소

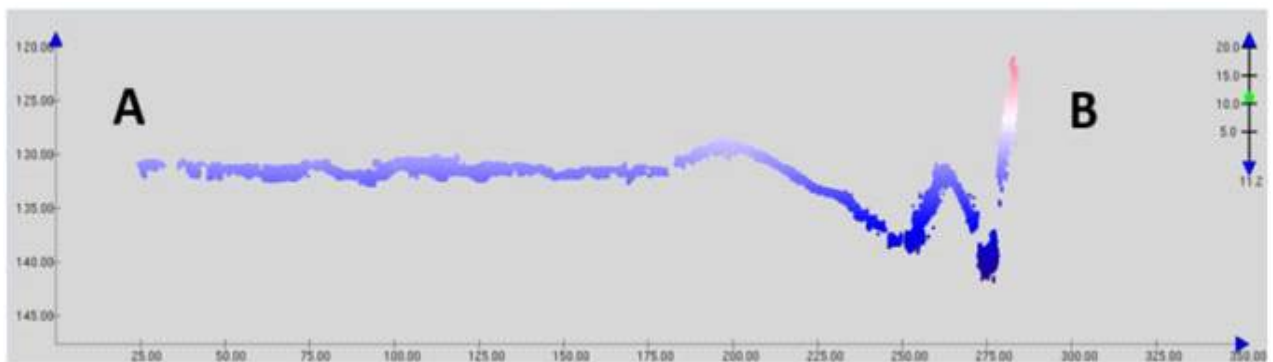


그림 284 4번째 미션 수행으로 얻은 난센 빙붕의 하부 구조 단면도. A는 바다 쪽이고 B는 지반선 방향이다.

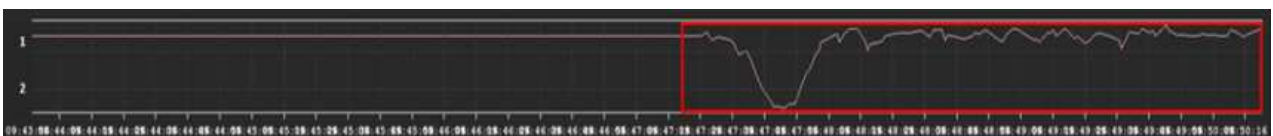


그림 285 Side Scan Sonar(SSS) 결과로부터 얻은 깊이 프로파일 단면도



그림 286 난센 빙봉 하부의 SSS 이미지 캡춰. 좌측은 난센 빙봉 진입 시작지점에서의 하부 이미지고 우측은 트랙라인을 따라 안쪽에서의 하부 이미지이다.

2월 14일에 행해진 탐사에서는 해빙이 생성되기 시작하면서 물속에 해빙 파편들이 부유하고 있었는데(그림 287) AUV의 SSS를 이용하여 이미지를 관측하였다(그림 288).



그림 287 2/14 탐사에서의 해수면 상태와 해저에서의 촬영한 AUV와 해빙 파편들

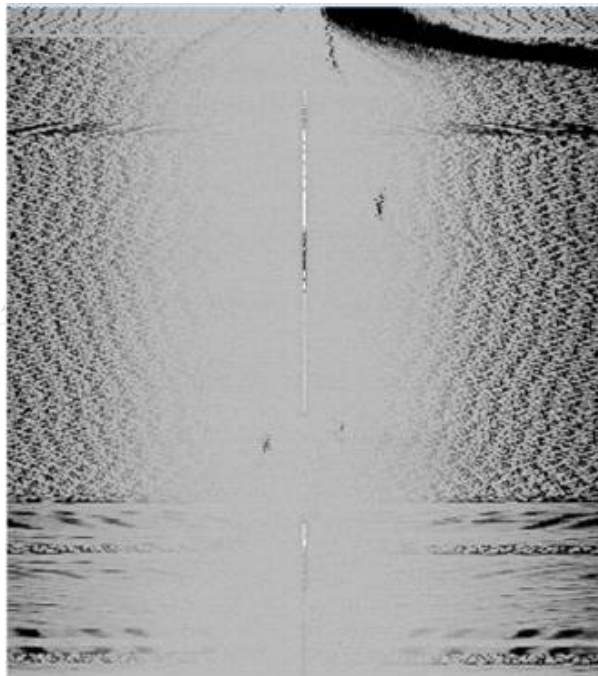


그림 288 2월 14일 탐사에서 획득한 수층의 Sidescan 이미지

④ 아라온을 이용한 난센 빙봉 주변 해역 멀티빔 탐사

본 탐사에서는 2016년에 깨져나간 난센빙봉이 있었던 지역의 해저면을 아라온 멀티빔을 이용하여 탐사를 수행하였다. 이 멀티빔 탐사에서 해저 협곡이 관측되었는데(그림 289) 과거 빙하가 흐르면서 만든 흔적일 가능성을 생각해볼 수 있다.

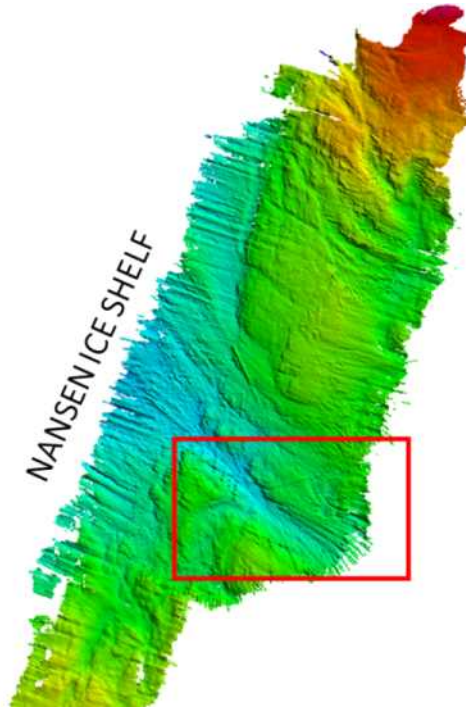


그림 289 멀티빔 탐사를 통해 획득한 난센 빙붕이 깨지면서 새롭게 드러난 해저면의 구조. 빨간 사각형으로 표시된 부분이 발견된 해저협곡이다.

(자) 해저면지진계(OBS)활용 탄성파 탐사

① 탐사개요

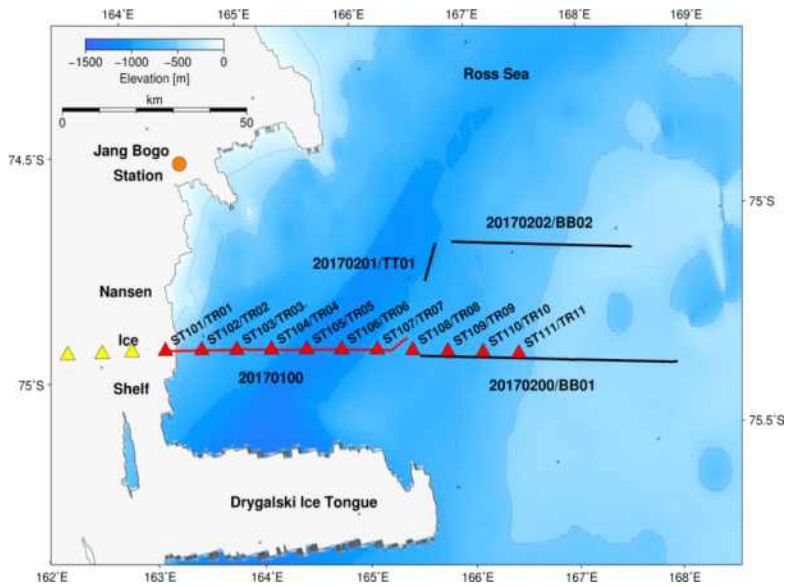
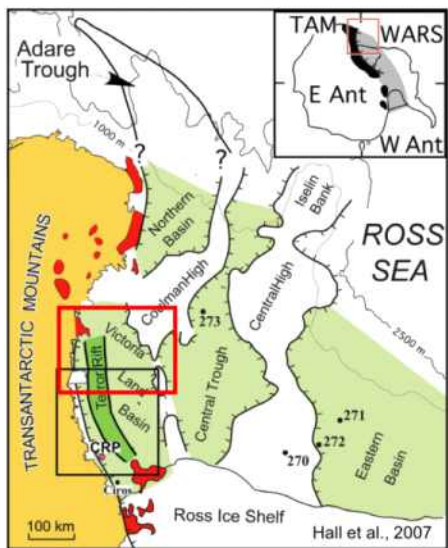


그림 290 탐사지역 및 OBS, MCS 정점정보

서남극 로스해 Victoria Land 분지에 위치한 Terror Rift 부근에서의 심부 지각구조 및 모호면 규명을 위한 OBS 자료 (Wide Angle Seismic Data) 및 고해상도 지각구조 관측을 위한 MCS 자료를 획득하였다. 총 11개 OBS를 10km 간격으로 설치, 아라온호에 탑재된 에어건 시스템을 활용하여 인공음원을 생성하고 모호면까지 탄성파가 전파되어 돌아오는 신호를 해저면 지진계를 통해 관측하는 방법으로 탐사를 진행하였다.

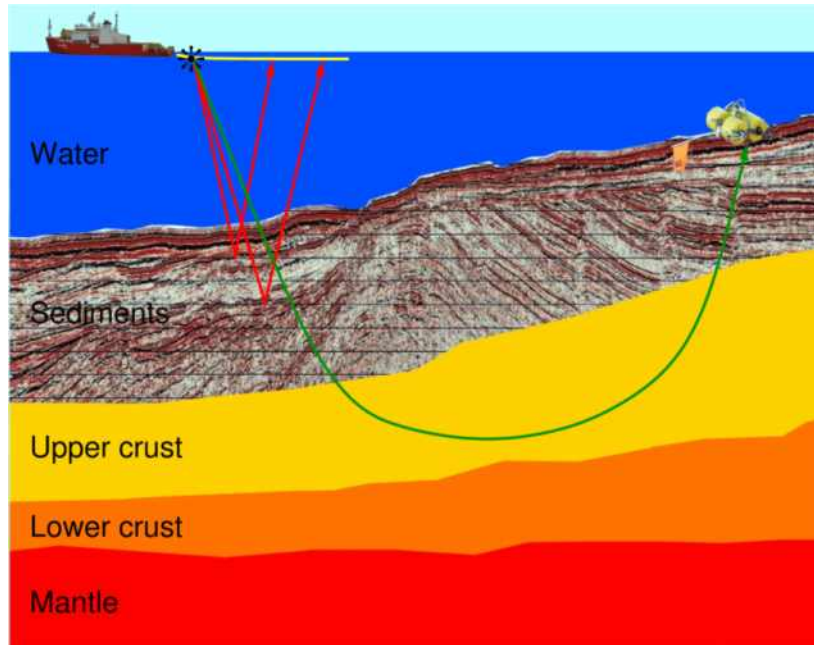


그림 291 2016-2017 남극 로스해 OBS & MCS 탐사 모식도

모호면까지 도달할 수 있는 강력한 인공음원의 생성을 위해 독일 AWI에서 보유한 520 cu·in 용량의 에어건 8개를 아라온의 에어건 프레임에 탑재, 아라온호에서 보유한 컴프레서 용량을 고려하여 10초 간격으로 음원을 생성 (총 볼륨 4160 cu·in)하여 탐사 진행하였으며 1.5 km 길이의 스트리머 (120채널, 12.5 m 간격) 및 에어건(총 볼륨 500 cu·in)을 활용하여 상부 해저지층 및 퇴적구조 규명을 위한 MCS데이터 획득하였다.

② 탐사장비 및 방법

OBS 탐사 (Wide Angle Seismic Survey) : 로스해 Terror Rift 하부 지각구조 및 모호면에 대한 지구물리학적 정보를 관측하기 위해 11개의 OBS 관측정점 (10km 간격)을 설정하고, 각 정점에서 OBS를 설치, 설치가 완료된 후 각 정점을 따라 아라온호에 탑재된 에어건 프레임에 대용량 에어건 8개를 장착하여 음원을 생성, 모호면까지 도달한 탄성파 신호를 기록. 탐사 종료 후 모든 OBS 장비 회수하였다.

OBSERVERS LINE LOG							KOPRI Korea Polar Research Institute	
CLIENT	KOPRI	SEQUENCE NO	1	DATE (UTC)	2017-02-07	NAVIGATION OFFSET APPLIED		
SURVEY AREA	Ross Sea	LINE NAME	OBS SURVEY	TIME (UTC)	-	NRP - Stern	-	
CRUISE NAME	ARA07C	LINE BRG (Grid)	-	JULIAN DAY	-	NRP - COS	-	
DATA		WEATHER		WATCHSTAND (UTC)				
DC SOL	-	WIND SOL	- kts	00:00 - 04:00	Seung-Goo Kang	NRP - CNG	-	
DC EOL	-	WIND EOL	- kts			12:00 - 16:00	COS - CNG	-
SMG SOL	-	SEA STATE SOL	-	04:00 - 08:00		NRP - CMP	-	
SMG EOL	-	SEA STATE EOL	-			16:00 - 20:00	SOURCE VOLUME INFO	
DEPTH SOL	-	SYSTEM		08:00 - 12:00			Gun 1	520 cu.in
DEPTH EOL	-	NaviSystem 1	SeaPath 200			20:00 - 24:00	Gun 2	520 cu.in
FEATHER SOL	-	Multi-Beam	Kongsberg EM122	Gun 3			520 cu.in	
FEATHER EOL	-	SBP	Kongsberg SBP120	Gun 4		520 cu.in		
MAX FEATHER	-	Gravimeter	Micro g Lacoste	Gun 5	520 cu.in			
VESSEL POSITION						Gun 6	520 cu.in	
Time (UTC)		Lat (S / -)	Lon (W / -)	100 sec time shooting interval		Gun 7	520 cu.in	
Start	9:22:04 AM	75°00.5100 S	163°37.0320 E			Gun 8	520 cu.in	
End	4:27:31 PM	75°20.5722 S	168°33.3272 E			Total	4160 cu.in	
STREAMER PARAMETERS			SOURCE PARAMETERS		RECORDING PARAMETERS		ABBREVIATIONS	
No Streamer			Total Volume	4160 cu.in	OBS Recording		SOL Start of Line	
			Work Pressure	150 BAR			EOL End of Line	
			Source Depth	10 m			FGSP First Good Shot Point	
			SOURCE PARAMETERS				Geodesy	
			Ship Speed	5 knot			WGS84	
Interval Time		-	LPS (South)					
NOTES			We stop the survey near station #8, because of sea-ice condition.		SBP raw file			
					SOL	-		
					EOL	-		

그림 292 OBS 탐사 현장기록

극지연구소



그림 293 해저면 지진계 설치 및 회수

표 29 OBS 정점좌표 및 정보

Station	ST101 / TR01	ST102 / TR02	ST103 / TR03	ST104 / TR04	ST105 / TR05	ST106 / TR06	ST107 / TR07	ST108 / TR08	ST109 / TR09	ST110 / TR10	ST111 / TR11
Frame	GT00-024	0906-071	GT00-022	GT00-023	0906-078	GT00-019	GT00-021	0906-070	GT00-025	0906-075	0906-069
Tube	(***) 1312-174	0906-073	(***) 0912-134	0906-080	RR00-013	(***) 0912-136	RR00-014	0906-080	0906-077	RR00-012	0906-069
Recorder	(**) 312173	61607070	61607078	61607079	61607069	61607071	61607077	61607080	61607074	61607076	61607072
Seismometer	0106	3198	3205	3203	3155	3200	3202	3190	3201	0101	3195
Hydrophone	312125	312102	312106	312107	312142	31207805	31207405	312179	312129	31206405	31205605
Releaser	0912216	0912226	0806167	0608137	060279	0912217	051159	051153	0606113	0806173	0912219
Flashlight	U02-071	Y04-020	T10-060	X10-028	U02-096	U02-078	T10-059	U02-077	U02-084	U02-058	U02-054
Radio beacon	A C08-006	B T10-30	D X10-014	A U04-015	B U04-027	C Y04-026	D U04-050	A T10-024	B X10-010	D X10-015	A C08-007
Deploy date (*)	03.02.2017	03.02.2017	04.02.2017	04.02.2017	04.02.2017	04.02.2017	04.02.2017	04.02.2017	04.02.2017	04.02.2017	04.02.2017
Deploy time (*)	22:25 LT	23:25 LT	00:18 LT	01:04 LT	01:45 LT	02:26 LT	03:09 LT	03:55 LT	04:41 LT	05:27 LT	06:10 LT
Deploy lat	75° 00.501' S	75° 01.882' S	75° 03.224' S	75° 04.545' S	75° 05.886' S	75° 07.225' S	75° 08.519' S	75° 09.928' S	75° 11.274' S	75° 12.628' S	75° 13.993' S
Deploy lon	163° 37.125' E	163° 56.918' E	164° 16.126' E	164° 35.127' E	164° 54.468' E	165° 13.698' E	165° 33.274' E	165° 52.756' E	166° 12.041' E	166° 31.631' E	166° 51.300' E
Deploy depth	757 m	790 m	936 m	930 m	1140 m	1108 m	962 m	811 m	806 m	721 m	544 m
Recover date (*)	13.02.2017	13.02.2017	13.02.2017	13.02.2017	14.02.2017	14.02.2017	08.02.2017	14.02.2017	08.02.2017	08.02.2017	08.02.2017
Recover time (*)	16:16 LT	18:40 LT	20:02 LT	22:14 LT	00:34 LT	02:07 LT	07:49 LT	04:02 LT	10:09 LT	11:37 LT	13:10 LT
Recover lat	75° 00.371' S	75° 01.811' S	75° 03.395' S	75° 04.447' S	75° 05.841' S	75° 07.344' S	75° 10.113' S	75° 11.082' S	75° 12.411' S	75° 13.917' S	75° 13.917' S
Recover lon	163° 37.488' E	163° 57.149' E	164° 16.211' E	164° 35.268' E	164° 55.100' E	165° 13.609' E	165° 53.278' E	166° 12.798' E	166° 32.118' E	166° 51.618' E	166° 51.618' E
Recover depth	833 m		946 m	926 m	1138 m	1107 m		816 m	814 m	721 m	540 m
Rec start date	03.02.2017	02.02.2017	02.02.2017	02.02.2017	02.02.2017	02.02.2017	02.02.2017	02.02.2017	02.02.2017	02.02.2017	02.02.2017
Rec start time	02:18:02 UTC	21:25:06 UTC	00:46:49 UTC	00:55:03 UTC	02:14:07 UTC	01:48:35 UTC	01:37:22 UTC	02:04:39 UTC	03:33:48 UTC	02:43:34 UTC	03:10:34 UTC
Rec end date	14.02.2017	14.02.2017	14.02.2017	14.02.2017	14.02.2017	14.02.2017	09.02.2017	14.02.2017	09.02.2017	09.02.2017	09.02.2017
Rec end time	05:37:42 UTC	03:56:32 UTC	03:31:25 UTC	03:41:12 UTC	03:07:49 UTC	03:03:19 UTC	01:27:53 UTC	02:57:02 UTC	01:32:49 UTC	02:41:17 UTC	01:12:12 UTC
Skew	1375 µs	154558 µs	204597 µs	75295 µs	206753 µs	-1235780 µs	173792 µs	396209 µs	77263 µs	-14352 µs	68070 µs
Skew		0.147 ppm	0.195 ppm	0.071 ppm	0.19 ppm	-1.18 ppm	0.287 ppm	0.38 ppm	0.129 ppm	-0.023 ppm	0.11 ppm

(*) LT: Local ship time, New Zealand summer time, UTC +13

(**) MCS data logger

(***) 6000 m tube with 4 kg additional weight



그림 294 Wide Angle Seismic 자료 획득을 위한 대용량 에어건 조립 및 설치

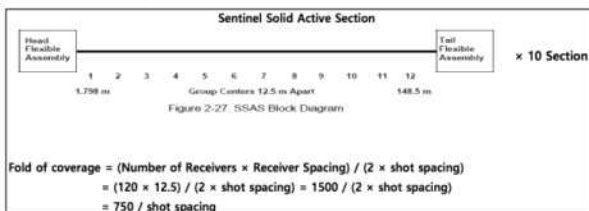
KOPRI Seismic System Air Flow Requirement

Comp' Air Feeling REQUIREMENT		AIR FLOW REQUIREMENT		GUN VOLUME	
Feeling interval	57.248 sec	Shot pressure(bars)	150	4160 in ³	68.16992 liter
Feeling distance	147.26 meter	Volume of the gun(liter)	68.16992	VESSEL SPEED	
		Compressor delivery(Nm ³ /h)	645	5 kn	2.572 m/s

Air Filling Interval of Compressor

$$C = \frac{3.6 \times P \times (V + 0.21)}{F}$$

- C = Firing interval (sec)
- P = Firing pressure (bars)
- V = Volume of the gun (liter)
- F = Compressor delivery (Nm³/h)



KOPRI Seismic fold coverage

Fold of coverage	Shot distance (meter)	Feeling interval (sec)	Availability	Fold of coverage	Shot distance (meter)	Feeling interval (sec)	Availability
1	750.00	291.58	O	26	28.85	11.21	X
2	375.00	145.79	O	27	27.78	10.80	X
3	250.00	97.19	O	28	26.79	10.41	X
4	187.50	72.89	O	29	25.86	10.05	X
5	150.00	58.32	O	30	25.00	9.72	X
6	125.00	48.60	X	31	24.19	9.41	X
7	107.14	41.65	X	32	23.44	9.11	X
8	93.75	36.45	X	33	22.73	8.84	X
9	83.33	32.40	X	34	22.06	8.58	X
10	75.00	29.16	X	35	21.43	8.33	X
11	68.18	26.51	X	36	20.83	8.10	X
12	62.50	24.30	X	37	20.27	7.88	X
13	57.69	22.43	X	38	19.74	7.67	X
14	53.57	20.83	X	39	19.23	7.48	X
15	50.00	19.44	X	40	18.75	7.29	X
16	46.88	18.22	X	41	18.29	7.11	X
17	44.12	17.15	X	42	17.86	6.94	X
18	41.67	16.20	X	43	17.44	6.78	X
19	39.47	15.35	X	44	17.05	6.63	X
20	37.50	14.58	X	45	16.67	6.48	X
21	35.71	13.88	X	46	16.30	6.34	X
22	34.09	13.25	X	47	15.96	6.20	X
23	32.61	12.68	X	48	15.63	6.07	X
24	31.25	12.15	X	49	15.31	5.95	X
25	30.00	11.66	X	50	15.00	5.83	X

그림 295 아라온에 탑재된 컴프레서 용량을 고려한 최적의 발파간격 산정

해저지층 및 퇴적구조 규명을 위한 다중채널 탄성과 탐사 수행하였는데 120채널 스트리머 및 총 볼륨 500 cu.in에어건을 활용하여 OBS 정점을 지나는 탄성과 측선 및 이와 평행한 1개의 측선에 대한 자료 획득하였다.

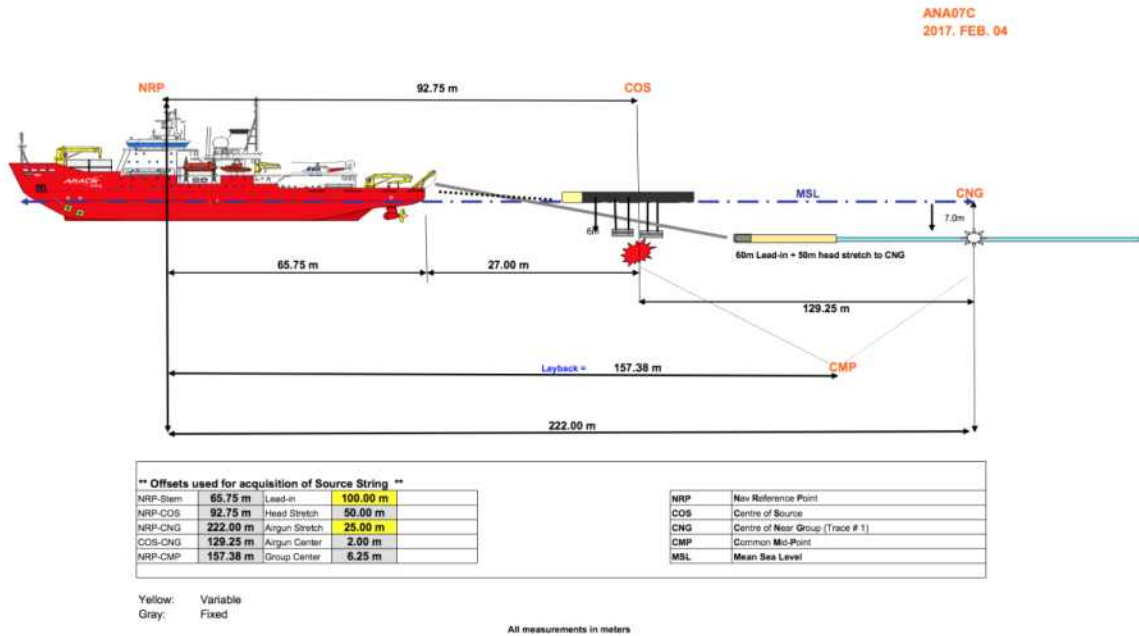


그림 296 다중채널 탄성과 탐사 모식도

OBSERVERS LINE LOG						KOPRI Korea Polar Research Institute	
CLIENT	KOPRI	SEQUENCE NO	1	DATE (UTC)	2017-02-04	NAVIGATION OFFSET APPLIED	
SURVEY AREA	Ross Sea	LINE NAME	BB01 (MCS)	TIME (UTC)	01:27:12~09:02:53	NRP - Stern	-
CRUISE NAME	ANA07C_2017	LINE BRG (Grid)	-	JULIAN DAY		NRP - COS	-
DATA		WEATHER		WATCHSTAND (UTC)		NRP - CNG	-
DC SOL	in 10 m	WIND SOL	- kts	00:00 - 04:00	SEUNG-GOO KANG	COS - CNG	-
DC EOL	in 10 m	WIND EOL	- kts	12:00 - 16:00		NRP - CMP	-
SMG SOL	-	SEA STATE SOL	Big Swell			SOURCE VOLUME INFO	
SMG EOL	-	SEA STATE EOL	Big Swell			Gun 1	250 cu.in
DEPTH SOL	in log file	SYSTEM		04:00 - 08:00		Gun 2	250 cu.in
DEPTH EOL	in log file	NaviSystem 1	SeaPath 200	16:00 - 20:00		Gun 3	
FEATHER SOL	-	Multi-Beam	Kongsberg EM122	08:00 - 12:00		Gun 4	
FEATHER EOL	-	SBP	Kongsberg SBP120	20:00 - 24:00		Gun 5	
MAX FEATHER	-	Gravimeter	Micro g Lacoste		Gun 6		
VESSEL POSITION							
Shotpoints		Lat (S / -)	Lon (W / -)	Good Shot Point (GSP)			
FSP	2001/1037	75.333870 S	168.329641 E	FGSP	2065/1101	Gun 7	
LSP	3417/2453	75.181837 S	165.937505 E	LGSP	3417/2453	Gun 8	
						Total	500 cu.in
STREAMER PARAMETERS		SOURCE PARAMETERS		RECORDING PARAMETERS		ABBREVIATIONS	
Length		1500.00 m	Total Volume	500 cu.in	Record Length	10.0 sec	SOL: Start of Line
Auxiliaries			Work Pressure	150 bar	Recording Delay	50 ms	EOL: End of Line
Shotpoint Interval		50.00 m	Source Depth	6 m	Sample Rate	1 ms	FGSP: First Good Shot Point
		SOURCE PARAMETERS		Polarity		N/A	LGSP: Last Good Shot Point
Group Interval		12.50 m	Ship Speed	5 knot	Low-Cut	3 Hz / 12 dB	WGS84
Number of channels		120	Interval Time	-	High-Cut	206 Hz / 276 dB	LPS (South)
Streamer Depth		7 m	NOTES		Tape Format		SEG-D
Fold of Coverage		15 folds	Lead in cable : 100 m deploy		SBP raw file		
SOL Cable Noise (µB)					SOL		
EOL Cable Noise (µB)					EOL		

그림 297 BB01 다중채널 탄성과 탐사 측선에 대한 현장기록

OBSERVERS LINE LOG						KOPRI Korea Polar Research Institute	
CLIENT	KOPRI	SEQUENCE NO	1	DATE (UTC)	2017-02-04	NAVIGATION OFFSET APPLIED	
SURVEY AREA	Ross Sea	LINE NAME	BB02 (MCS)	TIME (UTC)	14:34:05~20:24:50	NRP - Stern	-
CRUISE NAME	ANA07C_2017	LINE BRG (Grid)	-	JULIAN DAY	-	NRP - COS	-
DATA		WEATHER		WATCHSTAND (UTC)		SOURCE VOLUME INFO	
DC SOL	in 10 m	WIND SOL	- kts	00:00 - 04:00	SEUNG-GOO KANG	Gun 1	250 cu.in
DC EOL	in 10 m	WIND EOL	- kts	12:00 - 16:00		Gun 2	250 cu.in
SMG SOL	-	SEA STATE SOL	Big Swell	04:00 - 08:00		Gun 3	-
SMG EOL	-	SEA STATE EOL	Big Swell			Gun 4	-
DEPTH SOL	in log file	SYSTEM		16:00 - 20:00		Gun 5	-
DEPTH EOL	in log file	NaviSystem 1	SeaPath 200	08:00 - 12:00		Gun 6	-
FEATHER SOL	-	Multi-Beam	Kongsberg EM122		Gun 7	-	
FEATHER EOL	-	SBP	Kongsberg SBP120		Gun 8	-	
MAX FEATHER	-	Gravimeter	Micro g Lacoste	20:00 - 24:00	Total	500 cu.in	
VESSEL POSITION							
Shotpoints		Lat (S / -)	Lon (W / -)	Good Shot Point (GSP)			
FSP	1209	74.942222 S	166.464998 E	FGSP	1211		
LSP	2202	75.049801 S	168.111773 E	LGSP	2202		
STREAMER PARAMETERS		SOURCE PARAMETERS		RECORDING PARAMETERS		ABBREVIATIONS	
Length	1500.00 m	Total Volume	500 cu.in	Record Length	10.0 sec	SOL: Start of Line	
Auxiliaries		Work Pressure	150 bar	Recording Delay	50 ms	EOL: End of Line	
Shotpoint Interval	50.00 m	Source Depth	6 m	Samle Rate	1 ms	FGSP: First Good Shot Point	
		SOURCE PARAMETERS		Polarity	N/A	LGSP: Last Good Shot Point	
Group Interval	12.50 m	Ship Speed	5 knot	Low-Cut	3 Hz / 12 dB	WGS84	
Number of channels	120	Interval Time	-	High-Cut	206 Hz / 276 dB	UPS (South)	
Streamer Depth	7 m	NOTES		Tape Format	SEG-D		
Fold of Coverage	15 folds	Lead in cable : 100 m deploy		SBP raw file			
SOL Cable Noise (µB)				SOL	-		
EOL Cable Noise (µB)				EOL	-		

그림 298 BB02 다중채널 탄성과 탐사 측선에 대한 현장기록

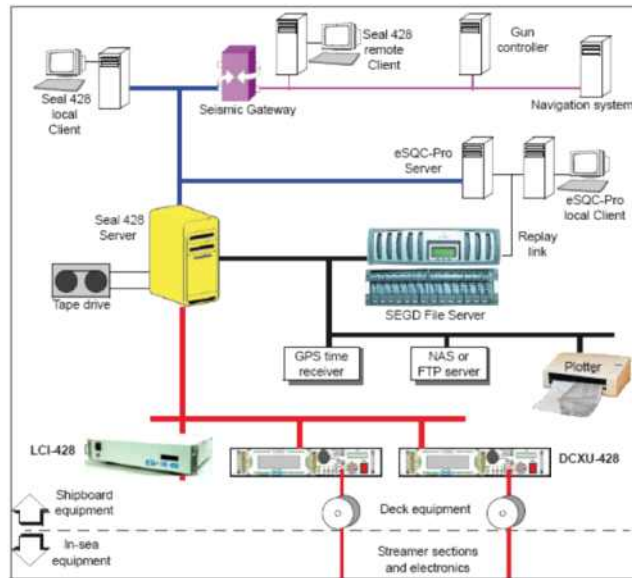


그림 299 탄성과 탐사자료 기록과정

컴프레셔 및 에어건에서 발생된 음압신호는 해수층을 거쳐 해저지층으로 전파되고 해저면을 투과한 후 해저지층구조에 의해 반사 혹은 굴절되어 스트리머에 기록됨. 기록된 신호는 위의 그림 299과 같은 과정을 거쳐 SEG-D 파일형태로 데이터가 기록 되었다.

표 30 탐사장비 및 자료획득 개요

Shot interval	50 m
Channel Number	120
Group Interval	12.5 m
Source Depth	6 m
Streamer Depth	6 m
Fold of Coverage	15 Folds
Pressure / Gun Vol.	120 Bar / 500 cu.in
Recording Length	10 Seconds
Sampling Rate	1 ms
Tape Format	SEG-D

다중채널 탄성과 탐사지역에 대한 지질환경(저심도 수심, 500 ~ 800 m) 및 탐사목적(천부 퇴적구조)을 고려하여 지하 3 km 미만에서의 고해상도 탄성과 단면 획득을 위해 저용량 고주파 에어건을 사용하였으며, 15 fold로 자료처리가 가능하도록 50 m 간격으로 에어건을 발파하여 음원을 생성하고 자료를 기록. 음원 발생을 위한 컴프레셔 압력은 120 bar로 설정하였으며, 에어건과 스트리머 설치깊이는 6m로 동일하게 설정하였다.

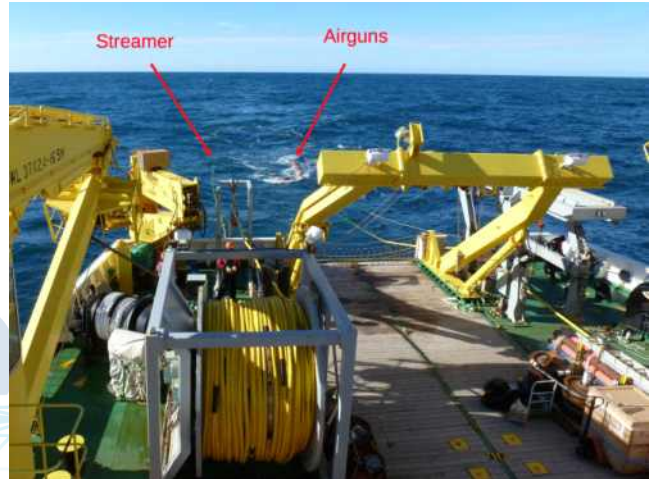


그림 300 다중채널 탄성과 탐사자료 획득을 위한 에어건 및 스트리머 (Streamer) 설치 및 탐사 과정 (상) 다중채널 탄성과 탐사자료 획득을 위한 에어건 장착 및 설치 (하) 스트리머 설치, 탐사 진행 중의 사진

③ 탐사결과

OBS를 활용한 탐사와 다중채널 탄성과 탐사 결과는 그림 301, 302와 같다.

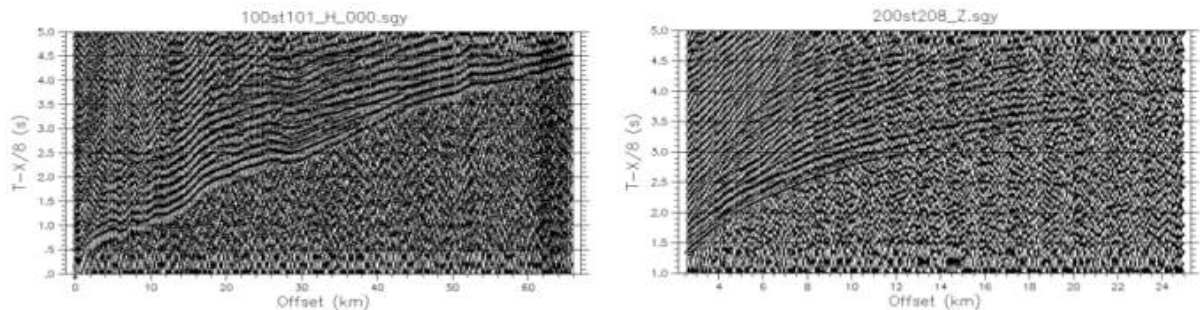


그림 301 OBS 기록된 탄성과 신호 (자료처리 전, Raw Data)

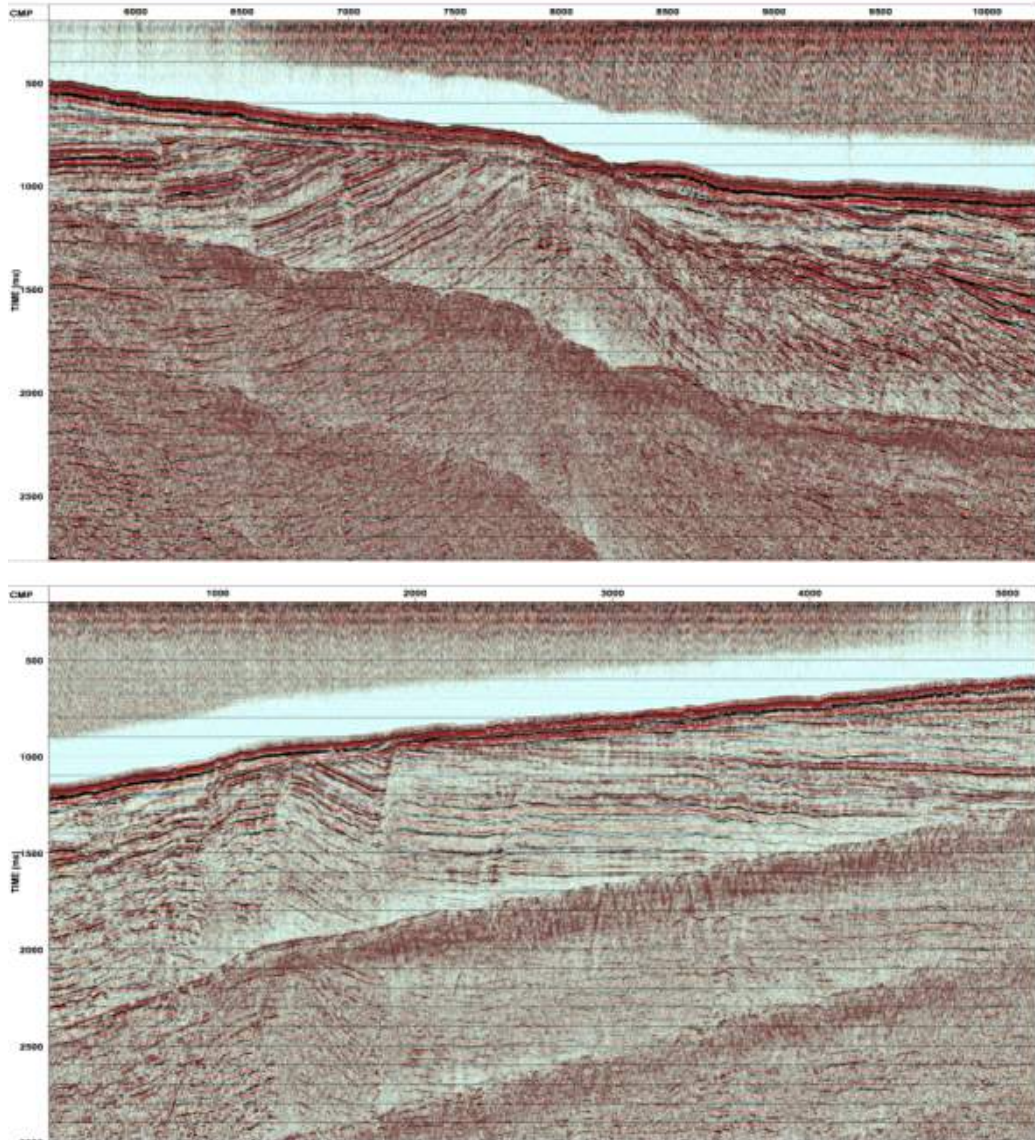


그림 302 탄성과 탐사단면 (Brute Stack images). 상 : OBS 발파측선과 동일한 위치에서 획득한 탄성과 탐사단면 (Brute Stack image, BB01), 하 : OBS 발파측선 북쪽 30 km 떨어진 위치에서 획득한 탄성과 탐사단면 (Brute Stack image, BB02)

④ 특이사항

다중채널 탄성과 탐사 수행 시, 아래 지도에 표시된 위치에 나타난 해빙으로 인해 탐사측선 변경하였다. 본래, OBS 측선과 동일한 150 km의 다중채널 탄성과 탐사측선을 계획하였으나 해빙의 출몰로 인해 탐사계획을 변경하여 기존의 측선에서 30 km 떨어진 위치로 이동하여 기존의 탐사라인과 평행한 BB02 측선을 설정하여 탐사 진행하였다. 당초 총 150 km 측선을 계획하였으나 탐사계획 변경으로 70 km (BB01), 50 km (BB02) 측선 2개 획득하였다.

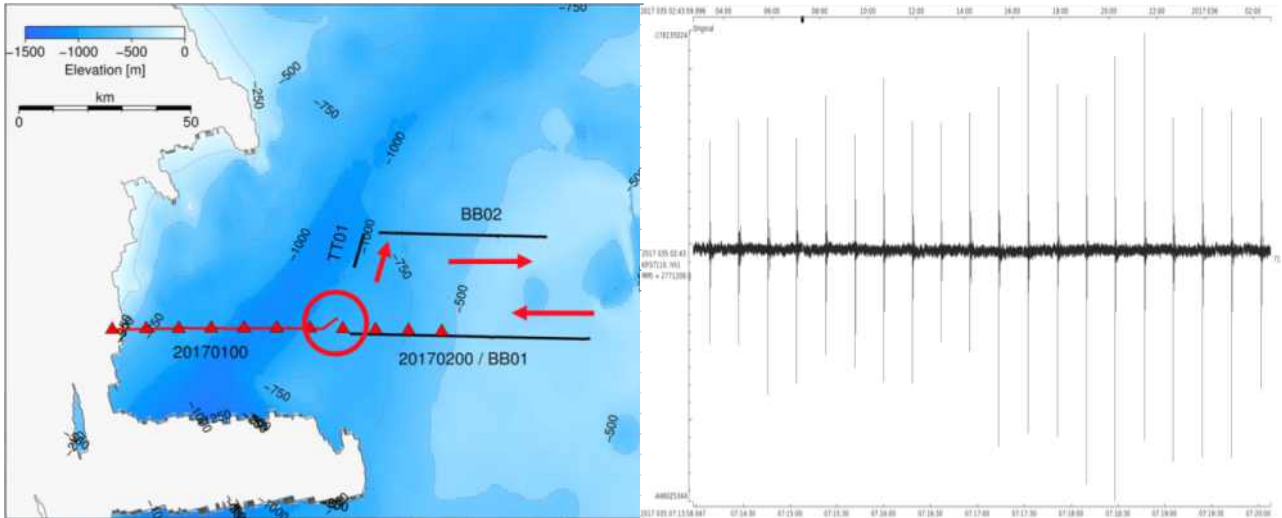


그림 303 다중채널 탄성과 탐사 측선변경 및 해빙상황. 왼쪽 위 : 다중채널 탄성과 탐사 측선 (붉은색 화살표 : 탐사 진행 방향, 붉은색 원 : 해빙출몰지역). 왼쪽 아래 : 해빙상황 (위성사진). 오른쪽 위 : OBS에 기록된 탄성과 탐사 신호 (50m 간격 발파). 오른쪽 아래 : 해빙상황 (해빙출몰지역 선상촬영)

- OBS 탐사 (Wide Angle Seismic Survey) 진행 시 OBS 정점 1번부터 11번을 지나 총 150 km의 탐사측선을 계획하였으나, OBS 정점 8번 부근에 해빙이 관측되어 에어건 시스템 회수하였다. 그러나 긴 회수를 위해 배가 속도를 늦추는 과정에서 관성에 의해 에어건이 배 후면으로 빨리 들어가는 사고가 발생하였고 이 과정에서 에어건 케이블(벨 하우스 케이블)이 손상되었다. 본래, 해빙지역을 지나 다시 탐사를 수행할 계획이었으나 장비의 파손으로 탐사진행 불가능해졌고 OBS 정점 7번 지역까지 자료획득.

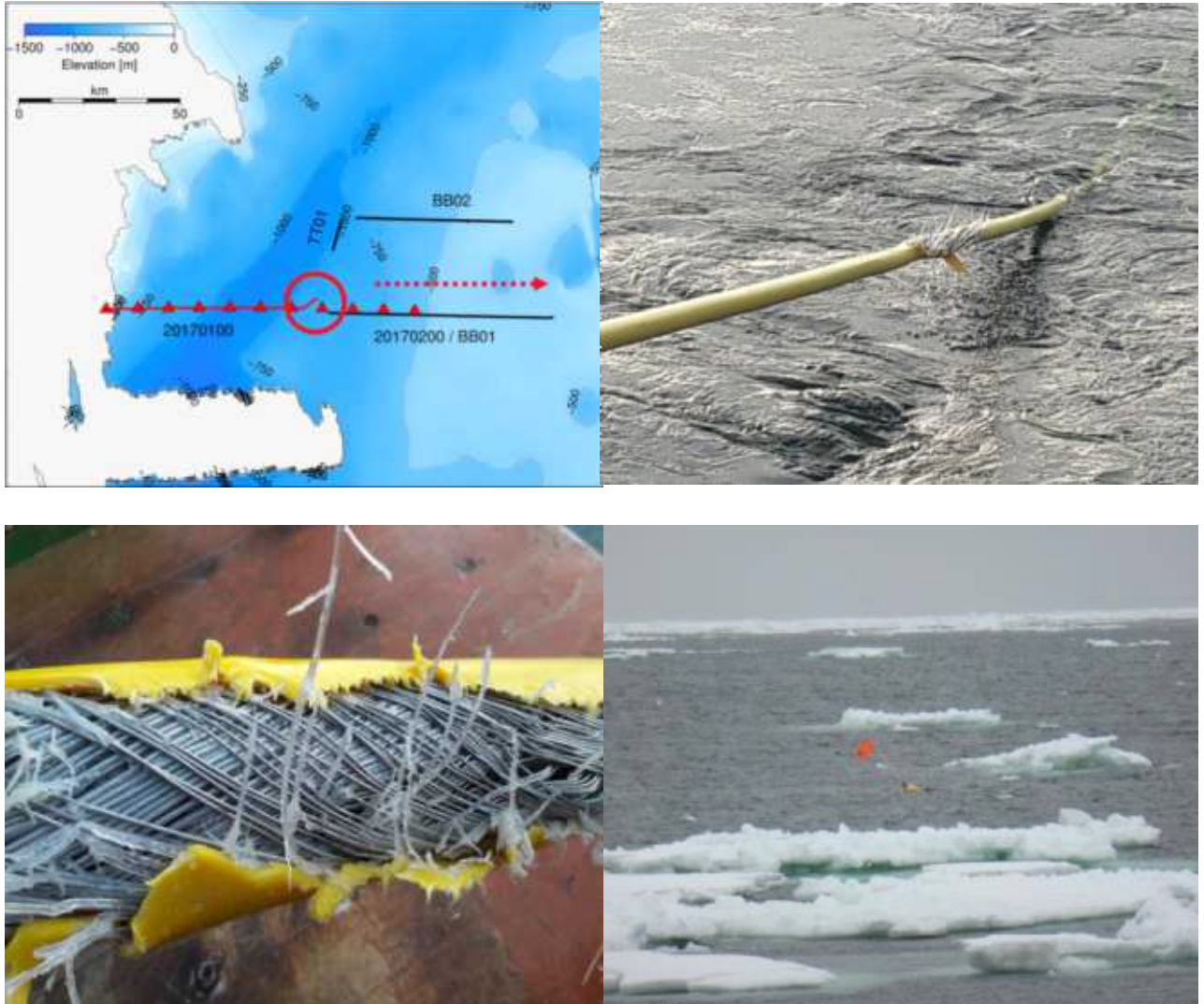


그림 304 다중채널 탄성과 탐사 측선변경 및 해빙상황. 왼쪽 위 : OBS 탐사 측선 (붉은색 원 : 해빙출몰지역, 붉은색 화살표 : 탐사진행방향). 오른쪽 위 : 파손된 벨 하우스 케이블 사진 (1). 왼쪽 아래 : 파손된 벨 하우스 케이블 사진 (2). 오른쪽 아래 : 탐사종료 후 8번 정점에서 회수한 OBS 사진

⑤ 향후, 연구계획

본 탐사에서 획득한 다중채널 탄성과 탐사자료는 정밀한 속도분석, 필터링 및 De Multiple algorithm을 적용하여 노이즈 및 멀티플 요소가 제거된 고해상도의 탄성과 단면 및 구조보정 이미지 획득, 층서해석을 통한 해당지역 지질구조 및 퇴적구조 파악하고자 한다. 또한 OBS자료에 대해서는 파형역산의 적용을 통해 해당지역의 세부적인 속도모형을 제시하고, 이를 해석하여 심부지체구조에 대한 지구물리학적 특성을 규명하는 연구를 수행할 예정이다.

(차) 남극 장보고기지 주변 해수면 마이크로층 미생물 연구

해수면 마이크로층(sea surface microlayer)은 해수와 대기의 경계에 위치한 수 mm 두께의 수층으로 해양과 대기의 물질 교환에 중요한 역할을 담당하는 것으로 알려져 있다(Hardy 1982). 육상에서 기원한 빙하 용빙수의 표층 유입은 국지적으로 해수면 마이크로층을 담수면(freshwater skin; Schlüssel *et al.* 1997)으로 형성할 가능성이 있으나, 남극에서 이에 대한 연구는 알려진 바가 없다. 작년 연구에서는 장보고 주변의 해수면 마이크로층 시료를 확보하여 미생물을 이용한 담수 영향 추정 연구를 수행하였다.

올해 연구에서는 해수면 마이크로층에서 분리한 미생물 중 현재까지 알려진 40여종의 슈도알테로모나스 종들에서는 매우 드물게 무산소 환경에서도 성장하는 세균(PAMC 28425 균주)을 발견하였다. 이 균주에 대한 분자계통유전학(그림 305), 생리·생화학적 특성 분석(표 31)을 수행하였고, 그 결과를 종합하여 신종 세균인 “Pseudoalteromonas neustonica”을 제안하는 논문을 발표하였다(Hwang *et al.* 2016a). 무산소 환경에서 성장할 수 있는 특성은 해수면 마이크로층의 입자성 유기물에서 생성될 수 있는 국지적인 무산소 환경에 적응할 수 있는 특성으로 추측된다. 또한 본 연구에서의 신종 세균은 남극의 극한 환경(저온, 강한 자외선 노출, 담수 유입에 의한 급격한 염분 변화)에 적응하는 세균의 특성 연구를 위한 실험 모델로 활용할 수 있을 것으로 여겨진다.

해수면 마이크로층에서 분리한 세균들에 대한 계통분류학적 분석 중 할로모나스(Halomonas) 종의 분류 체계에 일부 오류가 있음을 발견하였고, 유전체 분석 등 다양한 특성 연구를 수행하여 Halomonas caseinilytica와 Halomonas sinaiensis 종이 동일한 종임을 제안하였다(Hwang *et al.* 2016b).

극지연구소

표 31 장보고 주변 해수면 마이크로층에서 분리한 신종 미생물(*Pseudoalteromonas neustonica*; 1)과 근연한 종들과의 특성 비교

Characteristic	1	2	3	4	5	6	7
Isolation source	Antarctic sea surface microlayer	Antarctic sea ice	Marine diatom	Seawater	Seawater	Marine macroalgae	Seawater
Oxygen requirement	Facultative anaerobe	Strict aerobe	Strict aerobe	Strict aerobe	Strict aerobe	Strict aerobe	Strict aerobe
Temperature range (optimum) (°C)	4–30 (25)	4–35 (25–30)	4–35 (25)	4–40 (25–30)	10–35 (30)	5–35 (30)	10–35 (30)
pH range (optimum)	6.0–9.0 (7.5–8.5)	6.0–8.5 (7.0–7.5)	6.0–8.0 (6.5–7.5)	5.5–9.5 (6.5–7.0)	ND	5.5–8.5	ND
Salt tolerance range (optimum) (% w/v)	1.0–7.0 (1.0–3.0)	0.5–9.0 (0.5–3.0)	0.5–10.0 (0.5–3.0)	1–13 (2)	ND	ND	ND
Hydrolysis of aesculin	–	+	+	+	ND	+	ND
β -Galactosidase	–	–	–	–	+	+	–
Urease	–	–	–	+	+	+	+
Acid production from:							
D-Mannitol	–	–	+	ND	+	+	–
Starch	+	+	–	ND	ND	ND	ND
D-Arabinose, L-rhamnose	–	–	+	ND	ND	ND	–
L-Arabinose, cellobiose, gentiobiose, methyl α -D-mannopyranoside	–	+	+	ND	ND	ND	ND
Utilization of sole carbon sources							
N-Acetyl-D-galactosamine	+	+	–	+	–	–	+
D-Mannose	–	–	–	+	V	+	+
L-Threonine	–	+	+	ND	+	–	V
Trehalose	–	–	–	ND	+	+	V
DNA G+C content (mol%) by genome analysis	39.7	41.2 (38.0–39.0)*	40.8 (40.3)*	(41.8)†	(43–44)*	(40.6–41.7)†	40.8‡ (42–44)*



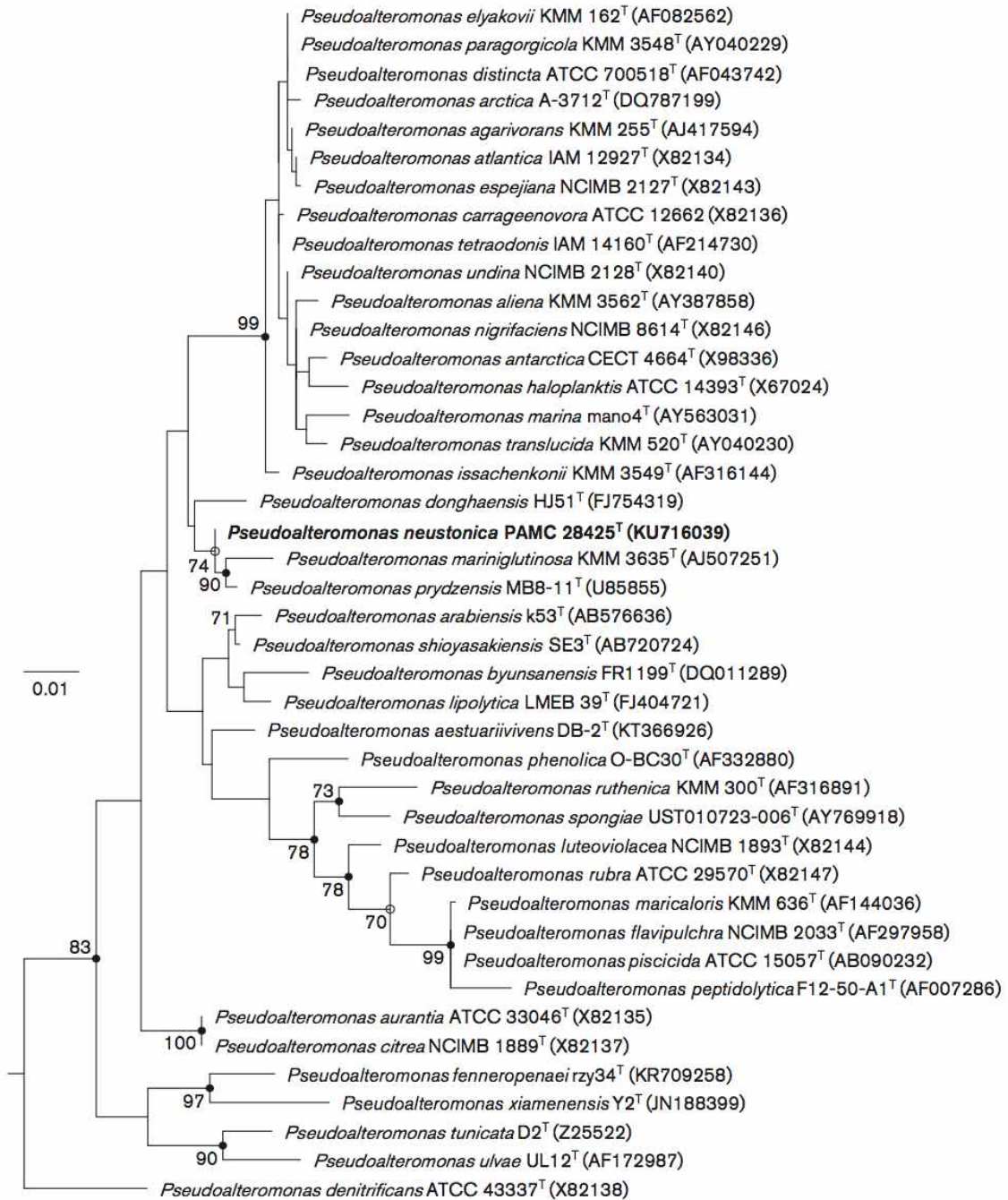


그림 305 장보고 주변 해수면 마이크로층에서 분리한 신종 미생물 (*Pseudoalteromonas neustonica*)의 16S rRNA 유전자 계통수

(4) 2017/2018 남극 현장탐사

(가) CTD와 LADCP 관측

17/18 연도에도 14/15, 15/16, 16/17년 남극 하계 탐사에서와 마찬가지로 CTD(Conductivity-Temperature and Depth)와 LADCP (Lowered Acoustic Doppler Current Profiler)를 이용하여 남극 해수의 수온, 염분, 용존산소 등의 물성 정보와 해류 정보를 획득하였다. 17/18 남극 하계 탐사에서는 아라온 배에 장착되어 있는 SeaBird Electronics사의 SBE911plus CTD와 RDI사의 LADCP (300 kHz)를 이용하여 총 42개 정점에서 44번의 cast를 수행하였다. 표 32과 표 33은 SBE911 plus에 장착된 센서 정보를 정리한 것이며 28번 정점에서부터 primary 수온, 염분 센서를 교체하여 사용하였다. 그리고 그림 306은 CTD/LADCP 관측 정점도이며 표 34은 각 정점에서의 CTD/LADCP 관측 시각과 위치 정보이다. Nansen Ice shelf와 trough 해역에 많은 정점들이 분포한 것을 확인할 수 있다.

표 32 정점 1번부터 27번까지 사용한 CTD 센서 정보

장비명		Serial number	Calibration date
SBE 9 plus	Temperature	6019	2017 Jun. 24
	Pressure	0932	2017 Jul. 06
	Conductivity (Salinity)	4575	2017 Jun. 17
2nd	Temperature	5191	2017 Jun. 24
	Conductivity	3801	2017 Jun. 17
Oxygen		1984	2017 Jun. 16
PAR		1023	2017 Apr. 09
Transmissometer		CST-1734DR	2017 Jul. 25
Altimeter		51676	2015 Nov. 10
Fluorometer		FLRTD-1400	2017 Jun. 17

표 33 정점 28번부터 44번까지 사용한 CTD 센서 정보

장비명		Serial number	Calibration date
SBE 9 plus	Temperature	5929	2017 Jun. 24
	Pressure	0932	2017 Jul. 06
	Conductivity (Salinity)	3759	2017 Jun. 20
2nd	Temperature	5191	2017 Jun. 24
	Conductivity	3801	2017 Jun. 17
Oxygen		1984	2017 Jun. 16
PAR		1023	2017 Apr. 09
Transmissometer		CST-1734DR	2017 Jul. 25
Altimeter		51676	2015 Nov. 10
Fluorometer		FLRTD-1400	2017 Jun. 17

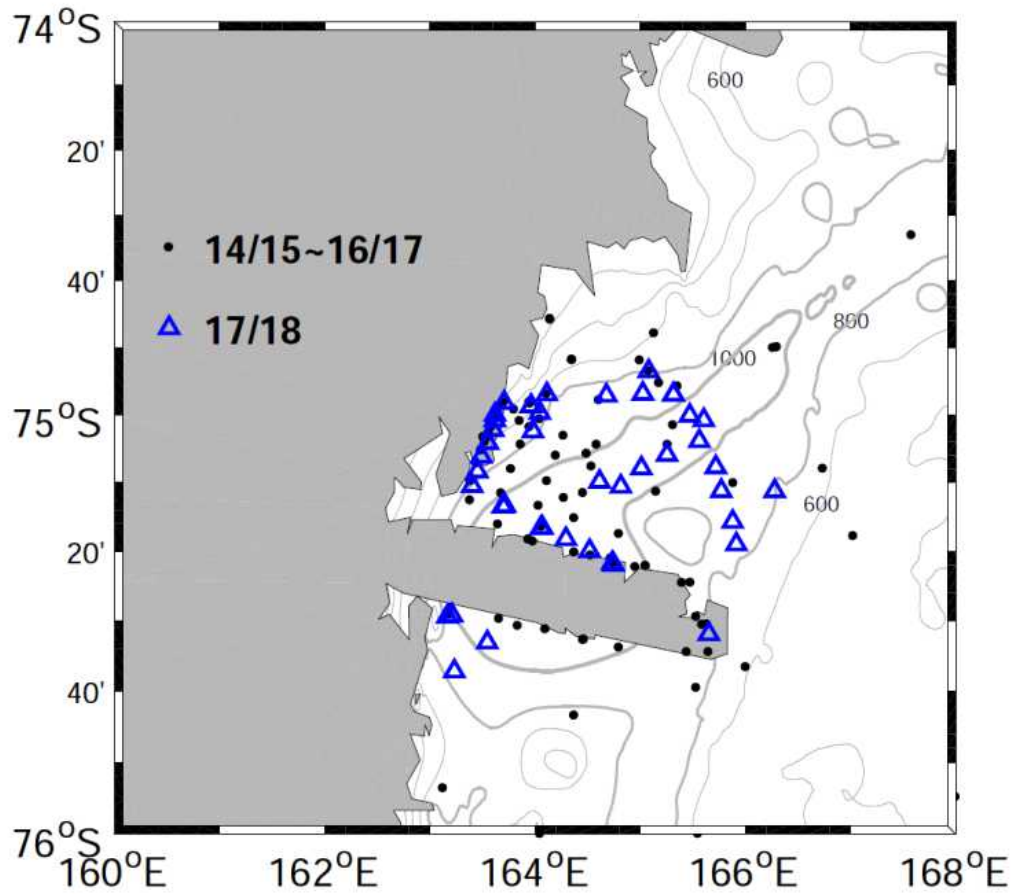


그림 306 14/15~16/17 남극 하계 관측 정점과 17/18 남극 하계 관측 정점도

표 34 17/18 남극 하계 탐사에서 수행한 CTD, LADCP 관측 일자와 시간, 위치 정보

Station	yr/mon/day	hh:mm	Latitude	Longitude	Bot.Depth (m)
1	2018-03-04	9:59	-74.8929	165.081	835
2	2018-03-04	12:46	-75.0023	165.4713	1124
3	2018-03-04	14:38	-75.0651	165.5629	1071
4	2018-03-04	18:11	-75.3166	165.9122	818
5	2018-03-05	0:33	-74.979	163.9632	399
6	2018-03-05	3:58	-74.9791	163.9618	398
7	2018-03-05	5:37	-74.9705	163.7077	333
8	2018-03-05	6:48	-75.0004	163.6203	773
9	2018-03-05	7:53	-75.0139	163.536	748
10	2018-03-05	9:19	-75.0378	163.6029	773
11	2018-03-05	10:32	-75.0698	163.553	769

12	2018-03-05	12:30	-75.1032	163.4911	709
13	2018-03-05	14:16	-75.139	163.4519	823
14	2018-03-05	15:33	-75.1748	163.4031	761
15	2018-03-05	17:16	-75.2243	163.6952	1090
16	2018-03-05	19:22	-75.2766	164.0574	1213
17	2018-03-05	23:12	-75.3608	164.7348	673
18	2018-03-06	6:24	-75.2617	165.8791	819
19	2018-03-06	12:02	-75.188	166.2773	800
20	2018-03-06	14:06	-75.1877	165.7694	802
21	2018-03-06	15:39	-75.1288	165.719	893
22	2018-03-06	15:52	-75.1288	165.719	893
23	2018-03-07	10:51	-75.5299	165.6572	795
24	2018-03-07	18:44	-75.4903	163.1673	1085
25	2018-03-07	21:35	-75.5511	163.5468	686
26	2018-03-07	8:33	-75.4869	163.2118	1074
27	2018-03-08	10:28	-75.6197	163.2337	518
28	2018-03-08	23:53	-75.1322	165.262	1116
29	2018-03-08	1:37	-75.1318	165.0116	1093
30	2018-03-09	3:33	-75.1762	164.8151	1110
31	2018-03-09	7:40	-75.1709	164.6121	1196
32	2018-03-09	23:20	-74.9501	165.3158	857
33	2018-03-09	23:37	-74.9503	165.3165	858
34	2018-03-10	3:30	-74.9499	164.1124	465
35	2018-03-11	5:9	-74.9955	164.0477	615
36	2018-03-11	6:24	-75.0413	163.9808	754
37	2018-03-11	10:07	-75.2234	163.7164	1078
38	2018-03-11	12:33	-75.2763	164.0703	1213
39	2018-03-11	14:37	-75.3039	164.2947	1080
40	2018-03-11	18:33	-75.3323	164.5194	720
41	2018-03-11	22:30	-75.3654	164.7474	670
42	2018-03-11	0:23	-75.0175	165.5808	1110
43	2018-03-13	2:33	-74.9481	165.0258	884
44	2018-03-13	3:52	-74.9529	164.679	914

본 항차에서 21번, 22번 정점은 같은 위치이나 21번째 cast시 CTD winch sensor 문제로 CTD의 deck를 올렸다가 22번째 cast로 재 수행하였다. 또한 32번 정점 역시 33번 정점과 같은 위치인데 32번째 cast시 CTD primary sensor의 confile setup 오류로 deck로 올렸다가 33번째 cast로 재 수행하였다.

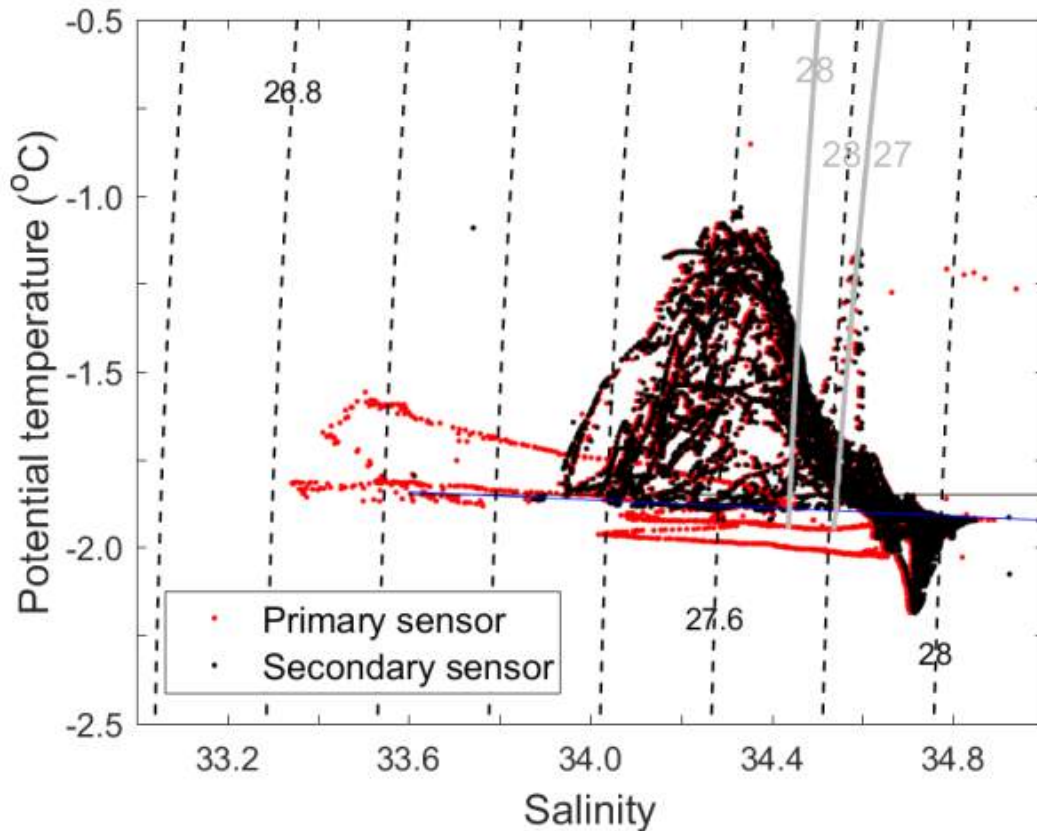


그림 307 17/18 남극 하계 탐사에서 관측한 모든 CTD 자료의 온위-염분 다이어그램.
(검은색 점선은 Potential density를 의미하며 회색 실선은 neutral density를 의미함)

그림 304는 17/18 남극 하계 탐사에서 관측한 테라노바만의 온위 및 염분 분포를 보여준다. 그러나 물성 분석 이전에 Primary(빨강)와 Secondary sensor(검정)간의 차이가 염분 34~34.6, 온위 -1.9°C 이하 범위에서 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 14/15~16/17 남극 하계 탐사 동안의 결과와 비교해보면 secondary sensor를 통해 관측된 온위 및 염분 값이 분석에 더 적합한 것으로 여겨지나 추후 정밀한 자료 처리 후에 다시 살펴봐야 할 것으로 생각된다. 우선 본 보고서에서는 secondary sensor를 통해 관측된 물성 정보를 이용한 수괴 분석 결과만을 언급할 것이다.

그림 305은 secondary sensor로 관측한 온위-염분 다이어그램에 색으로 용존산소 농도를 추가한 것이다. 16/17 하계 관측에서 관측되었던 supercooled water (영하 2°C 이하, 염분 34.4~34.84)가 역시나 확인되었고 supercooled water의 용존 산소 농도도 300 $\mu\text{mol/kg}$ 정도로 상대적으로 높은 것을 확인 할 수 있었다. 참고로 그림에 파란색 실선으로 50dbar 깊이에서의 어는점을 표시하였는데 이 보다 낮은 수온의 수괴가 50dbar보다 깊은 수심에서 발견된다면 이는 대기에 의한 surface cooling이 아닌 다른 요인에 의해 만들어진 수괴라는 것을 의미한다. 즉, 16/17과 17/18 탐사에서 관측된 supercooled water는 빙봉 하부 용융에 의해 만들어진 수괴일 것으로 유추되며 이로 인하여 용존 산소 값도 상대적으로 높게 나타나는 것으로 여겨진다.

또한 Orsi and Wiederwohl [2009] 논문에 따르면 neutral density (회색 실선) 28~28.27 kg/m^3 범위에 존재하는 수괴를 변형된 환남극 심층수(Modified Circumpolar Deep Water)라고 정의하며 해당 수괴가 17/18 남극 하계 탐사에서 잘 관측되었다. 남극 표층 해수 (Antarctic Surface Water) 라고 정의되는 영하 1.85°C 이상, 염분 34.4 이하의 수괴 역시 잘 관측되었다. 마지막으로 가장 깊은 수심에서 관측되는 고염 대륙붕수 (High Salinity Shelf Water)도 잘 확인이 되며 최대 염분은 34.85정도로 16/17 시기에 비해 약 0.02 정도 높게 나타났다. 이는 16/17 관측 시기가 2월이었고 17/18 관측 시기가 3월인 것이 어느 정도 영향을 미친 관측 결과라고 생각된다.

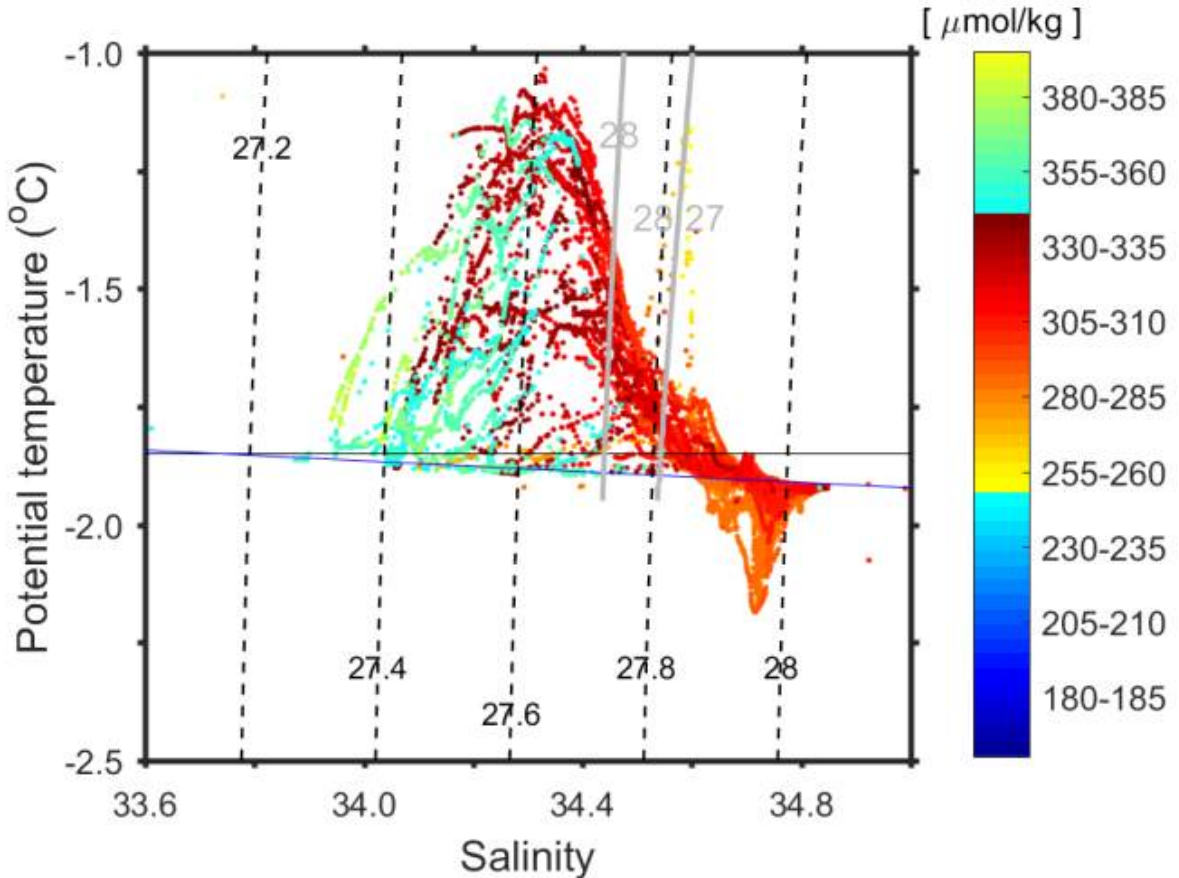


그림 308 17/18 남극 하계 탐사-secondary 센서에서 얻어진 온위-염분 그리고 용존산소 다이어그램.

Supercooled water의 공간 분포를 확인하기 위하여 추가로 그림 306와 같이 -1.95°C (50 dbar에서의 어는점)이하의 수온이 나타나는 수심의 두께를 정점별로 계산하여 정량적으로 표현하여 보았다. 그 결과 난센 빙붕과 드라이갈스키 빙설 남단에서 supercooled water가 두껍게 나타나는 것을 확인할 수 있었으며 흥미로운 것은 외해의 경도 166°E, 위도 75°S 부근에서도 supercooled water 분포가 약 200m 두께로 나타난다는 것이다. 이는 그림 307의 LADCP 결과에서 보여지는 테라노바만에 존재하는 시계 방향으로 순환하는 해류에 의해 난센 빙붕에서부터 외해로 supercooled water가 이동해 간 것으로 유추해 볼 수 있으나 좀 더 정밀한 자료 처리와 자세한 분석이 필요하다.

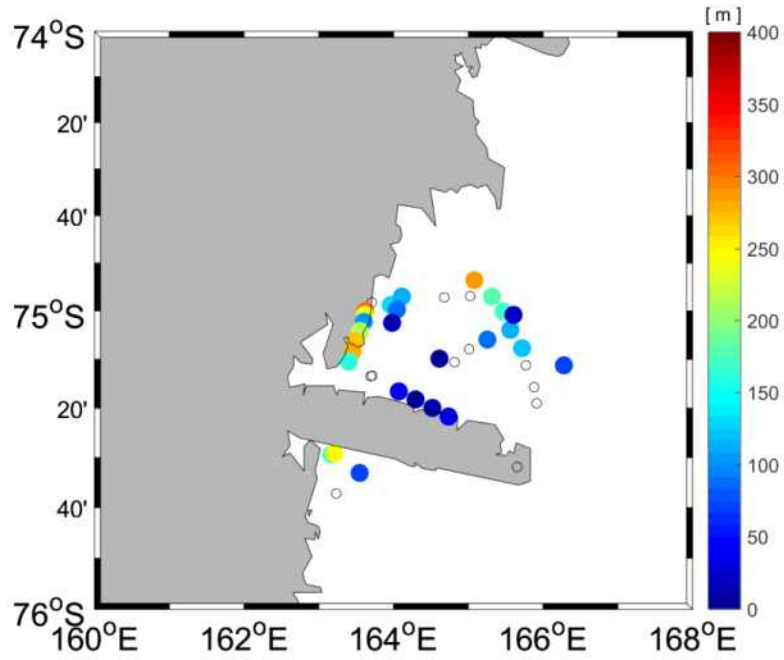


그림 309 정점별 -1.95°C 이하 수온이 나타나는 수심의 두께.(검은 정점은 supercooled water가 관측되지 않았음을 의미함)

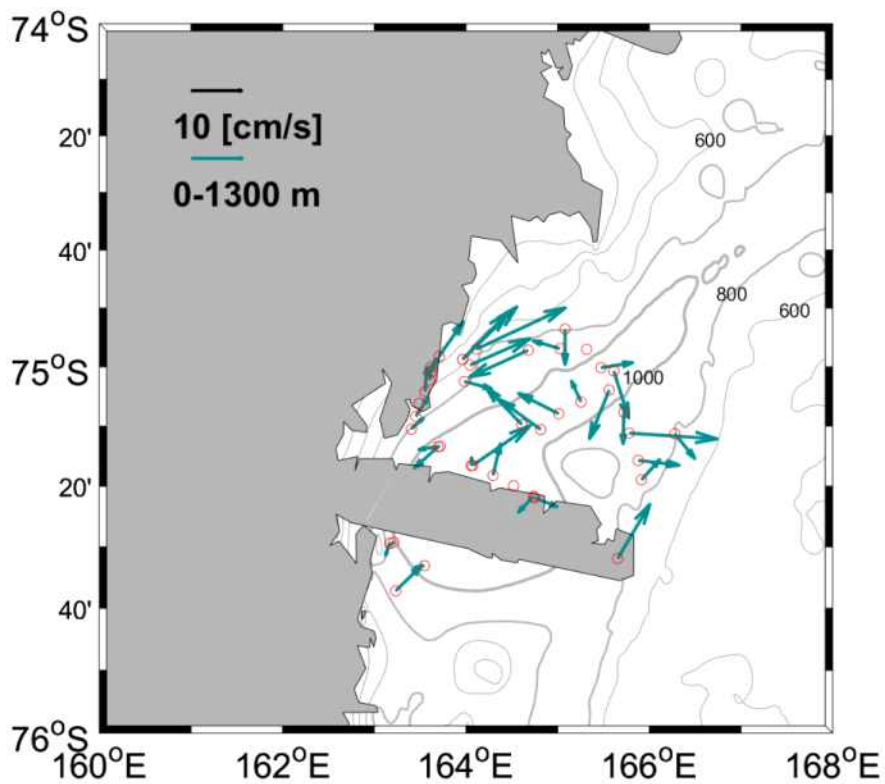


그림 310 LADCP로 관측된 17/18 테라노바만 해류 분포 (전 수심 평균)

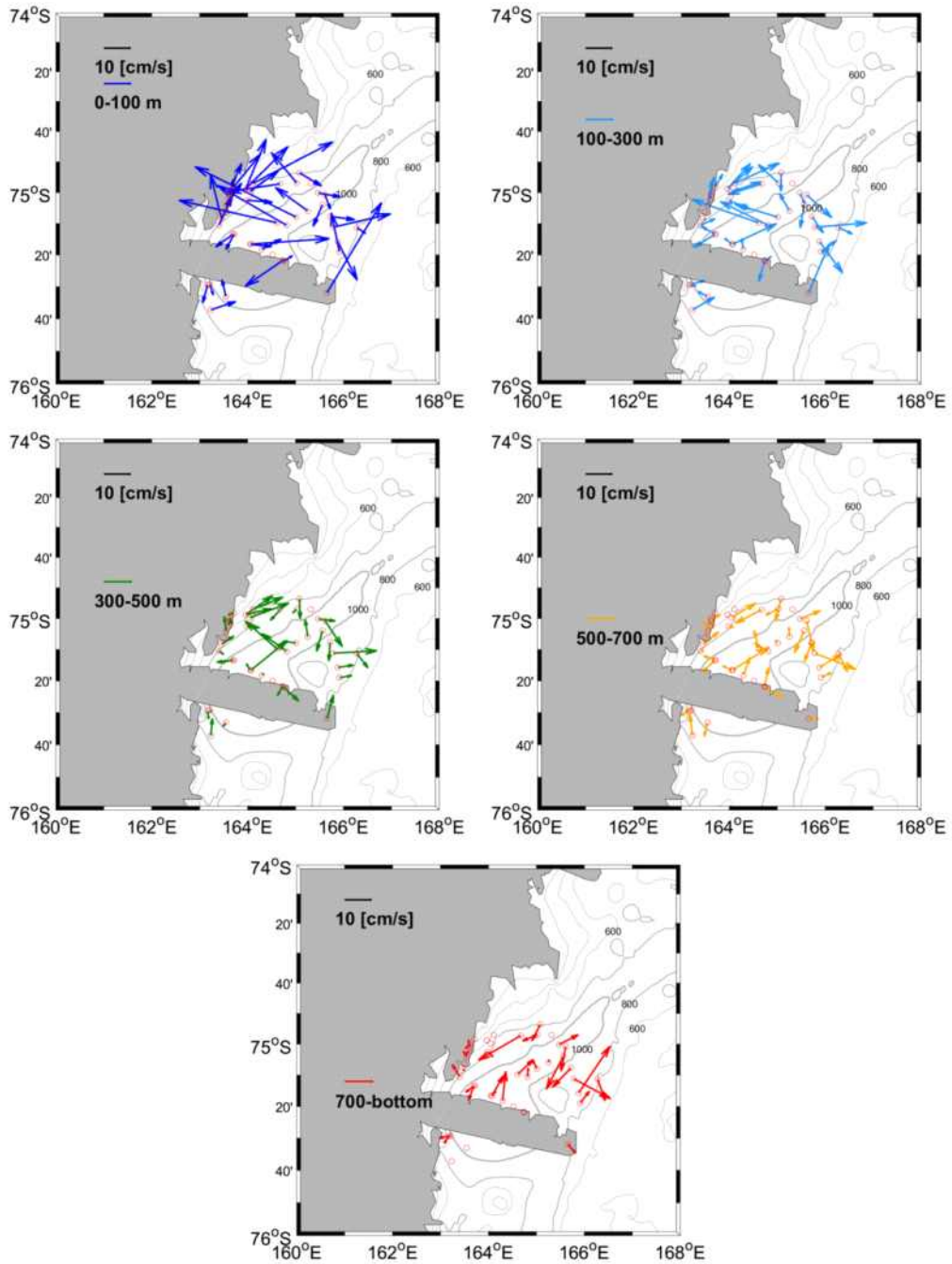


그림 311 LADCP로 관측된 17/18 테라노바만 해류 분포 (수심별 평균)

17/18 남극 하계 탐사 결과 테라노바만에서의 해류 분포는 그림 311과 같았다. 우선, 전 수심 평균된 해류를 통해 난센 빙봉을 따라 북향하는 연안 해류와 trough를 중앙에 두고 외해쪽에서는 남향하는 형태의 흐름이 확인되었다. 즉, 크게는 테라노바만을 중심으로 시계 방향으로 회전하는 모습을 보였다. 또한 trough 중앙에서는 평균 흐름이 약 7-8 cm/s 정도로 예상보다

강하게 나타났으며 trough를 가로지르는 북서향 해류 모습을 보이는 것이 특징적이었다. 반면, 드라이갈스키 빙설을 따라서는 해류 유속이 5 cm/s 이하로 매우 약하게 나타났다. 이러한 해류의 형태는 그림 311과 같이 전 수심에 걸쳐서 거의 동일한 모습을 보였으며 유속은 표층에서부터 300 m 까지가 가장 강하게 나타났고 수심이 깊어질수록 약화되는 모습을 보였다.

현재 아라온에서는 LADCP를 downlooker 1대만 사용 중에 있는데 차후에는 uplooker 1대를 추가로 설치하여 더 양질의 해류 자료를 획득할 수 있도록 할 예정이며 이번 탐사부터 Ship ADCP 자료도 추가로 관측하여서 LADCP 자료 처리에 추가로 사용할 예정이다. 참고로 현재 LADCP 결과는 LADCP 원자료와 CTD자료 그리고 GPS 자료만을 사용한 것이다.

(나) NOAA 협력 수중음향 관측망 회수 및 재설치

드라이갈스키 빙설을 비롯한 해양 빙권 기원 신호와 해저 지각활동을 관측하기 위하여 NOAA와 협력하여 2016/2017 남극 탐사시 테라노바만 남쪽에 수중음향 관측기 6기를 설치하였다. 이번 탐사에서는 이들을 회수 후 재 설치를 계획하였으나 현장 해빙상황이 좋지 않아 1기 회수에 실패하고 5기를 회수하였다 (표 35). 본 탐사에서는 회수 실패에 대비하여 여분의 수중음향관측장비를 1기 준비해왔고 이를 활용하여 6기의 수중음향 관측망 설치에 성공하였다. 이번 시즌에 설치한 수중음향 관측망의 위치와 시기 정보는 표 35와 같다.

그림 312은 이번 시즌에 회수한 관측망의 위치와 새롭게 설치한 관측망의 위치이다. 본 항차는 하계 기간이 지난 3월에 탐사가 수행되어 해빙이 활발하게 생성되었는데 이로 인하여 수차례에 걸친 방문에도 회수를 시도할 수 없었던 상황이 여러 번 반복되었다. (그림 313) 특히 북부 관측망의 경우에는 총 8번 이상의 방문 끝에 2개 회수에 성공하였다. 탐사 기간 중 해빙이 활발하게 생성되어 완전히 해빙이 없는 상황이 존재하지 않아 불가피하게 해빙 빈 공간에서 회수를 시도하였는데 2번 무어링 회수 시 플로트가 떠오른 후 조류에 밀려든 해빙에 갖혀 플로트를 건져내기 매우 어려운 상황이 발생되었다. (그림 314)

Instrument	Latitude (S)	Longitude (E)	Depth (m)	Released (UTC)	Phone On Board (UTC)
HC21 2017 (NOAA 2)	75 18.2774	165 58.9592	839.7	3/6/2018 04:35	3/6/2018 05:10
HC24 2017 (NOAA 3)	75 19.4316	165 59.5376	821.1	3/6/2018 08:52	3/6/2018 09:19
HC30 2017 (NOAA 1)	75 18.9853	165 55.6209	820.2	3/7/2018 07:46	3/7/2018 08:06
HC20 2017 (NOAA 4)	74 56.378281	165 22.806646	858	3/9/2018 19:16	3/9/2018 19:40
HC25 2017 (NOAA 5)	74 55.991146	165 18.879070	884.9	3/12/2018 08:46	3/12/2018 09:10
HC23 2017 (NOAA 6)	74 55.308365	165 22.159536	836	Not Recovered	Not Recovered

표 35 수중음향 관측망 회수 정보

Instrument	Anchor Drop (UTC)	Anchor Drop Location		Target Location		Multibeam Depth (m)	Triangulation Location			Mooring Length (m)	Hydrophone Depth (m)
		Lat (S)	Lon (E)	Lat (S)	Lon (E)		Lat (S)	Lon (E)	Depth (m)		
HC09 2018	3/12/18 07:04	74 58.282	165 04.867	74 58.256	165 05.233	880	74 58.268678	165 04.982953	880	465	465
HC30 2018	3/12/18 08:17	74 59.474	165 07.866	74 57.464	165 08.122	870	74 57.430595	165 08.409012	885	465	470
HC21 2018	3/12/18 13:15	74 58.521	165 09.222	74 58.498	165 09.316	890	74 58.518022	165 09.356328	908	465	493
HC20 2018	3/13/18 12:35	75 20.240	165 27.840	75 20.221	165 27.844	760	Not Triangulated	Not Triangulated	Not Triangulated	415	395
HC25 2018	3/13/18 13:36	75 21.318	165 28.311	75 21.300	165 28.185	780	Not Triangulated	Not Triangulated	Not Triangulated	415	415
HC24 2018	3/13/18 14:31	75 20.852	165 24.470	75 20.832	165 24.326	738	Not Triangulated	Not Triangulated	Not Triangulated	365	473

표 36 수중음향 관측망 설치 정보

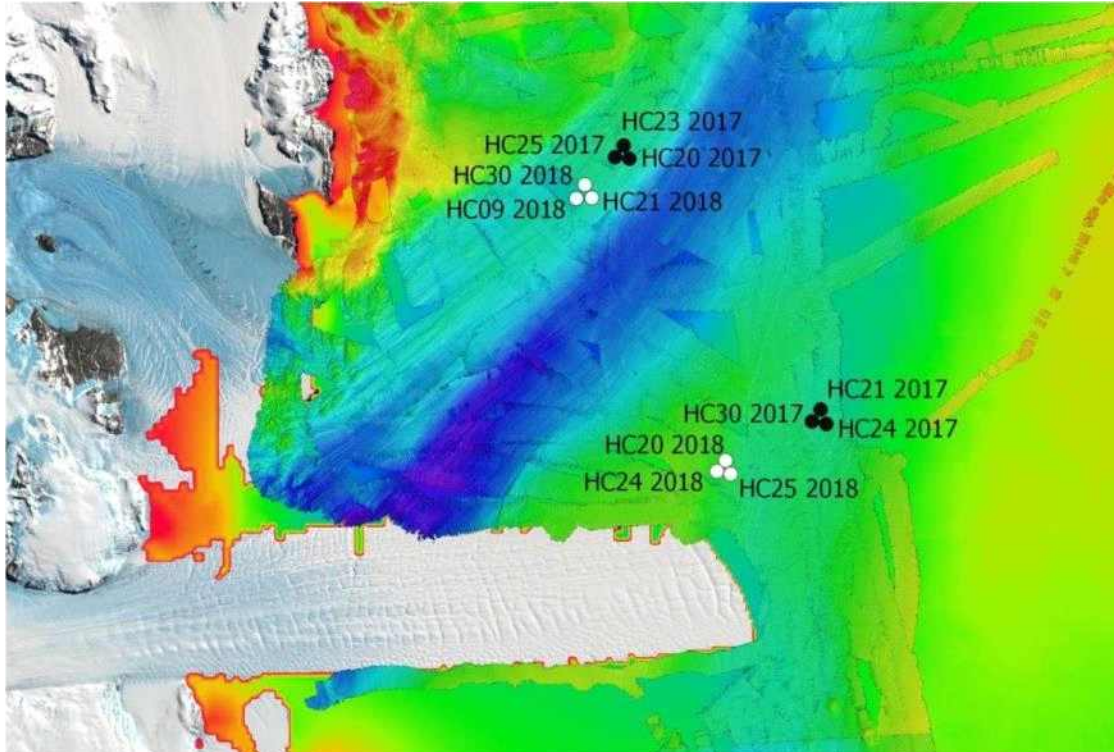


그림 312 16/17 시즌에 설치한 수중음향관측망(검은색 원)과 17/18 시즌에 설치한 관측망(흰색 원)의 위치

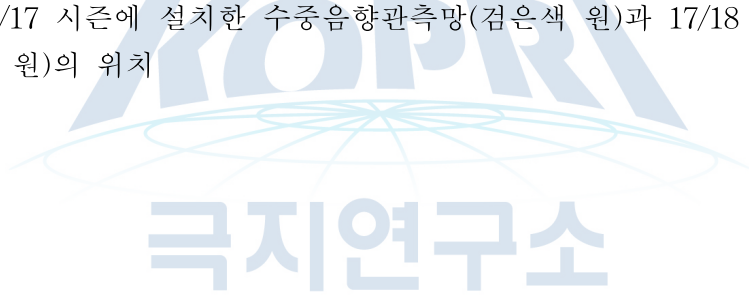




그림 313 회수가 불가능했을 당시 설차 지점의 해빙 상황



그림 314 회수 시 조류에 의해 밀려든 해빙에 플로트가 끼인 상황

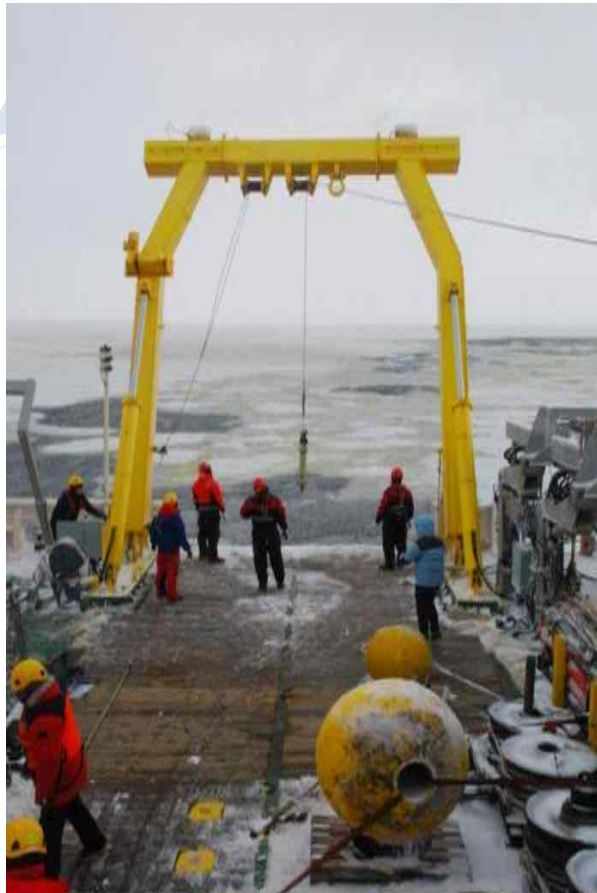


그림 315 3월에는 해빙이 테라노바만에서 활발하게 생성되어 회수시 해빙에 의한 라인
과 장비 손상 위험성이 존재함

(다) NIWA/LDEO 협력 해양물리 계류장비 회수 및 설치

본 탐사에서는 드라이갈스키 빙설의 용융현상과 해류, 해수의 물리적 특성을 관측함으로써 테라노바만 형성과 주변 해수 흐름에 빙설이 미치는 영향을 규명하고자 2016/17 남극 하계 탐사에서 설치한 드라이갈스키 빙설 주변의 계류장비 3기, DITN, DITD, DITS를 회수 후 재설치하였다. DITN 사이트(드라이갈스키 빙설 북부)에서 3월 6일 회수(그림 316)한 후 12일에 재설치한 장비 정보와 모식도는 표 37과 그림 317에 각각 나타나있다.



그림 316 2018년 3월 6일에 수행된 DITN 회수작업

표 37 DITN에 부착된 센서 정보

Instrument	SN	Depth rating (m)	Firmware version	Interval (s)	Burst sampling (s)	Instrument start time	Memory expires	Battery expires
SBE-37 SM	15239	1000	V4.1	120	n/a	21/1/2017 1500	1/3/2019	1/7/2020
SBE-37 SM	15240	1000	V4.1	120	n/a	21/1/2017 1500	1/3/2019	1/7/2020
SBE-37 SM	15257	2000	V4.1	120	n/a	21/1/2017 1500	1/3/2019	1/7/2020
SBE-56	4673	1000	V0.96	10	n/a	20/1/2017 1300	1/1/2020	1/1/2020
SBE-56	4851	1000	V0.96	10	n/a	20/1/2017 1300	1/1/2020	1/1/2020
SBE-56	4852	1000	V0.96	10	n/a	20/1/2017 1500	1/1/2020	1/1/2020
SBE-56	4854	1000	V0.96	10	n/a	20/1/2017 1300	1/1/2020	1/1/2020
AADI RCM-9	1256	1000	n/a	3600	n/a	8/2/2017 0800	17/12/2018	8/4/2018
AADI RCM-9	1259	2000	n/a	3600	n/a	8/2/2017 0800	17/12/2018	8/4/2018
AADI RCM-11	342	6000	n/a	3600	n/a	8/2/2017 0800	17/12/2018	8/4/2018
Aquadopp DMIM	13050	6000	3.39	900	60	8/2/2017 1200		11/4/2018
Aquadopp DM	9929	6000	3.37	900	60	8/2/2017 1200		11/4/2018
Aquadopp DM	9930	6000	3.37	900	60	8/2/2017 1200		11/4/2018

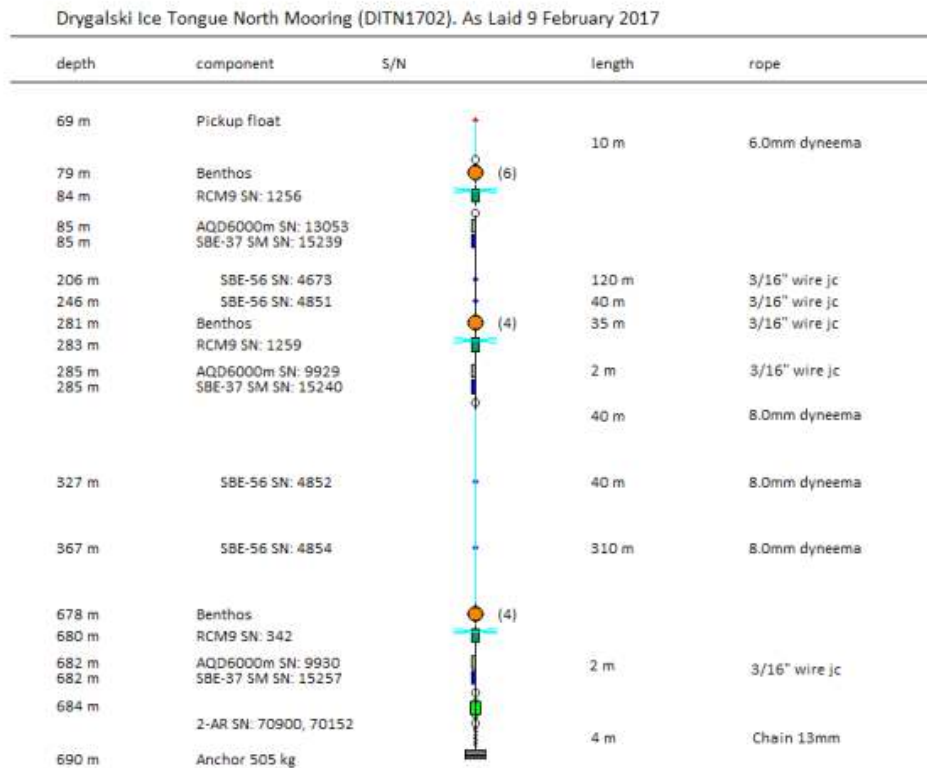


그림 317 DITN 계류장비 모식도

표 38 DITN 메타데이터 정보

Deployment code	DITN1512	DITN1702
Location	Drygalski Ice Tongue North	Drygalski Ice Tongue North
Project leader	Craig Stevens	Craig Stevens
Deployment operator	Brett Grant	Fiona Elliott
Recovery operator	Fiona Elliott	Fiona Elliott
Latitude (ddd mm.mmm H)	75° 21.605' S	75° 21.646' S
Longitude (ddd mm.mmm H)	164° 44.918' E	164° 44.788' E
Water depth	671m	671m
Magnetic declination	135.48°	135.78 °
Start time (yyyy/mm/dd HH:MM:SS)	2015/12/14 10:15:00	2017/02/09 00:55:00
Stop time (yyyy/mm/dd HH:MM:SS)	2017/02/08 17:20:00	TBD
UTC offset	+12	+12

DITD는 드라이갈스키 북쪽 협곡 중앙 깊은 곳에 2017년 2월 8일에 설치한 후 2018년 3월 6일에 회수, 3월 10일에 재설치한 해양계류 장비로 해빙 생성후에 염분이 농축되어 생기는 무거운 성질의 심층수가 드라이갈스키 하부를 가로지르는 협곡을 따라 어떻게 흘러나가는지를 관측하기 위하여 설치되었다. 장비 정보와 모식도는 다음과 같다.

표 39 DITN에 부착된 센서 정보

Instrument	SN	Depth rating (m)	Firmware version	Interval (s)	Burst sampling (s)	Instrument start time	Memory expires	Battery expires
SBE-37 SM	15273	2000	V4.1	120	n/a	21-1-2017 1500	3/2019	7/2020
Aquadopp DMIM	13041	6000	3.39	900	60	8/2/2017 1200		11/4/2018

depth	component	S/N	length	rope
1278 m	Pickup float		10 m	6.0mm dyneema
1289 m	Benthos	(4)		
1292 m	RCM9			
1293 m	AQD6000m			
1293 m	SBE-37 SM			
1293 m	Benthos	(1)		
			0.5 m	Chain 10mm
1294 m	2-AR		0.25 m	Chain 10mm
			4 m	Chain 13mm
1300 m	Anchor 213 kg			

그림 318 DITD 장비 모식도

해빙이 적은 드라이갈스키 빙설 남쪽 코너에 2017년 2월 12일에 설치된 DITS 계류장비는 2018년 3월 8일에 회수와 재계류가 이루어졌다. DITS 계류장비의 센서 정보와 모식도는 각각 표 40와 그림 319에 나타나있다. 드라이갈스키 빙설 남쪽 지역은 로스해에서 북쪽으로 올라오는 해류로 인하여 해빙이 모여드는 지역으로 접근이 쉽지 않으나 강한 활강풍이 육지에서 불어올 경우 해빙이 동쪽으로 밀려나가게 된다 (그림 320).

표 40 DITN에 부착된 센서 정보

Instrument	SN	Depth rating (m)	Firmware version	Interval (s)	Burst sampling (s)	Instrument start time	Memory expires	Battery expires
SBE-37 SM	7227	2000	V3.1	300	n/a	21/1/2017 1200	1/5/2022	1/7/2024
SBE-37 SM	1627	350	V2.6	300	n/a	21/1/2017 1200	1/11/2018	1/2/2022
SBE-37 SMP	7284	1000	V3.1	600	n/a	12/2/2017 08:00	8/5/2018	7/2024
SBE-56	4855	1000	V0.96	10	n/a	20/1/2017 1300	1/1/2020	1/1/2020
SBE-56	4856	1000	V0.96	10	n/a	20/1/2017 1300	1/1/2020	1/1/2020
SBE-56	4857	1000	V0.96	10	n/a	20/1/2017 1300	1/1/2020	1/1/2020
SBE-56	6464	1000	V0.96	10	n/a	20/1/2017 1300	1/1/2020	1/1/2020
AADI RCM-9	647	1000	n/a	3600	n/a	11/2/2017 1100	17/12/2018	8/4/2018
AADI RCM-9	845	1000	n/a	3600	n/a	11/2/2017 1100	17/12/2018	8/4/2018
AADI RCM-9	847	1000	n/a	3600	n/a	11/2/2017 1100	17/12/2018	8/4/2018

Drygalski Ice Tongue South Moorinf DITS1702. As Laid February 2017

depth	component	S/N	length	rope
167 m	Pickup float		10 m	6.0mm dyneema
177 m	Benthos			
182 m	RCMS SN: 647			
184 m	SBE-37 SM SN: 1627		1 m	3/16" wire jc
225 m	SBE-56 SN: 4855		40 m	3/16" wire jc
265 m	SBE-56 SN: 4856		40 m	3/16" wire jc
306 m	SBE-56 SN: 4857		40 m	3/16" wire jc
346 m	SBE-56 SN: 6464		40 m	3/16" wire jc
381 m	Benthos		35 m	3/16" wire jc
383 m	RCMS SN: 845			
384 m	SBE-37 SM SN: 7227		1 m	3/16" wire jc
			290 m	8.0mm dyneema
			390 m	8.0mm dyneema
1068 m	Benthos			
1070 m	RCMS SN: 847			
1071 m	SBE-37 SMP 7284		1 m	3/16" wire jc
1073 m			0.25 m	Chain 10mm
	2-AR SN: 70901, 70153		0.25 m	Chain 10mm
1080 m	Anchor 500 kg		5 m	Chain 13mm

그림 319 DITS 무어링 모식도

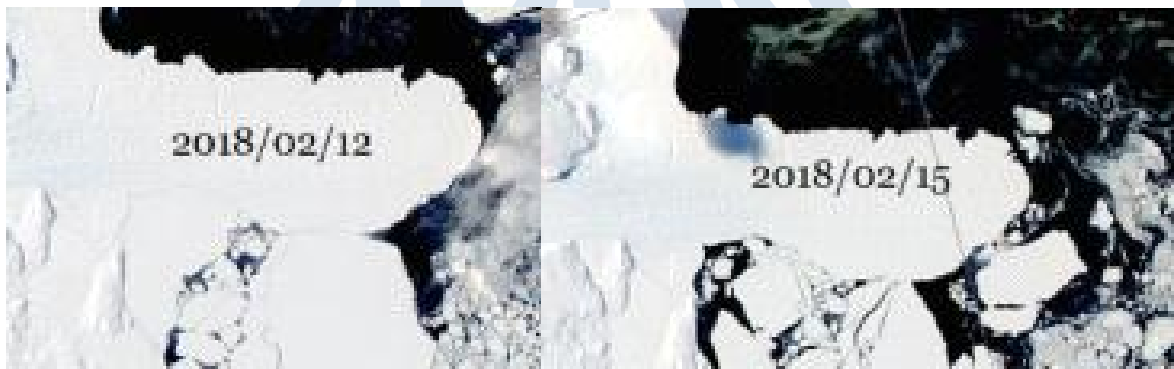


그림 320 드라이갈스키 남쪽 활강풍이 불기 전(좌)과 활강풍이 불어서 해빙이 밀려난 후(우)

본 탐사에서는 해빙 위성사진을 매일 체크하여 경로가 열린 것으로 보인 3월 7일에 남쪽으로 접근을 시도하였고 8일에 계류 지점에 도착하였다. 3월 8일 오전 7시 도착 당시 심한 안개와 최고 속도 50노트에 달하는 강풍이 불어 작업을 시작하지 못하고 주변에서 CTD 작업을 수행하면서 바람이 약해지기를 기다리다 오후 3시 반경에 작업을 시작, 1시간만에 회수를 완료하였다 (그림 321).



그림 321 도착 당시의 평균 45 노트, 최고 50 노트에 달하는 풍속과 짙은 안개로 선수 크레인이 흐리게 보이는 현장 상황



그림 322 2018년 3월 8일에 수행된 DITS 회수작업

DITS 채투입은 1시간 동안 투입장비 세팅 준비를 마치고 오후 6시 경에 시작되어 3시간동안 수행되었다. 투입 과정 중에 어쿠스틱릴리저 윗부분과 계류장비를 연결하는 부위가 절단되어 계류장비가 앵커와 어쿠스틱릴리저 없이 바다로 나가는 사고가 발생하였다(그림 323). 본 사고의 정확한 원인은 현재 확실하게 알 수는 없지만 1) 부품 불량 2) 영하 24도에 달하는 초

저온 환경에서의 금속의 경화로 인한 파손 3) 초 저온에서 자유롭게 회전할 수 있도록 도와주는 스윙블이 얼어붙어 비틀림에 의한 절단을 원인으로 유추할 수 있다.



그림 323 DITS 투입당시 연결 부속품 절단

무어링 모식도에서 보듯이 본 계류장비는 어쿠스틱 릴리저 3m 위에 플로트가 달리는 구조로 이 부분이 가라앉지 않고 떠 있어 플로트를 다시 회수할 수 있었고 (그림 324) 이를 다시 절단된 부품을 교체하여 어쿠스틱 릴리저와 다시 연결하였다 (그림 325).



그림 324 재 회수된 계류장비 하부의 플로트



그림 325 부품 교체후 재 연결된 무어링

무어링 재 투입시에는 끊어졌던 연결부위에 보다 적은 강도의 텐션이 걸리도록 픽업 포인트를 어쿠스틱 릴리저 위쪽 마스터 링크로 변경하여 투입을 시도하여 계류를 완료하였다 (그림 326). DITS 계류작업은 영하 24도의 강 추위에 3시간이 넘는 시간동안 야외에서 이루어졌는데 이 과정에서 연구원 및 갑판원들이 극심한 추위와 작업 후 체력저하를 호소하였다. 계류작업은 중간에 중단이 불가능하여 저체온증을 막기 위한 휴식시간을 가지기 어려운 만큼 사전에 보온성이 탁월한 피복을 갖춰입는 것이 중요하다. 본 탐사에서는 영하 20도 밑으로 내려가는 경우가 빈번하게 발생하였는데 이번 경우처럼 낮은 시기에 탐사를 수행할 경우 기본적으로 지급되는 피복보다 보온성이 좋은 피복을 필요함을 체감하였다.



그림 326 어쿠스틱 릴리저 투입

빅토리아랜드에서 테라노바만으로 연중 강하게 불어오는 활강풍은 해수의 대류 현상을 야

기시켜 해수면에 활발한 결빙 현상이 생길 수 있게 하고, 이러한 결빙현상으로 인하여 생성된 고염도의 해수는 해양심층수로서 가라앉게 된다. 이러한 현상을 관측하기 위하여 2015-16 남극 하계 탐사에서 미 Lamont-Doherty Earth Observatory (LDEO)와 공동으로 테라노바만에 해저 계류장비를 설치하였으나 난센빙붕 붕괴로 생긴 큰 빙산에 의해 계류장비가 유실되었고 16/17 남극 하계 탐사시 동일한 장비를 동일한 위치 74° 58.471'S, 163° 57.674'E에 재설치 하였다. 본 탐사에서는 3월 5일에 본 장비를 회수하였다. 계류 장비 회수시 해빙이 생성되어 얇은 판 케이크 아이스가 분포하고 있었으며 플로트가 떠오르는 데에는 지장이 없다고 판단되어 회수를 수행하였다 (그림 328).

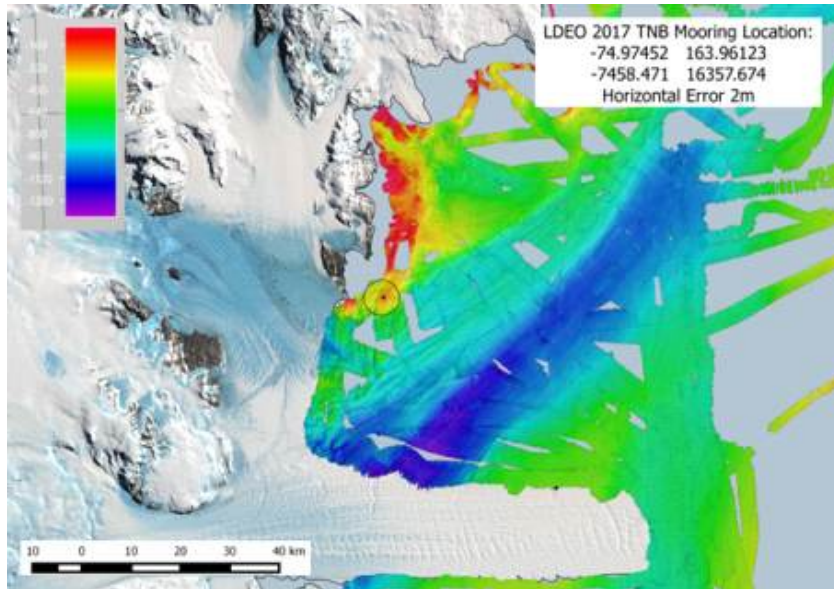


그림 327 16/17년도에 설치하여 본 항차에서 회수한 계류장비의 위치



그림 328 회수 당시 해빙 상황

해빙 생성과 연동되어 생성되는 고염도의 무거운 해양심층수는 깊은 곳을 따라서 이동하는

성질이 있다. 이를 관측하기 위하여 테라노바만을 가로지르는 협곡에 해류와 해양물성을 측정할 수 있는 계류장비 TNBD를 (-75.0112°, 165.5562°)에 설치하였다(그림 329). 당초에는 극지환경연구부에서 설치하고자 했던 퇴적물 채집 계류장비에 해양물리 센서를 추가하여 설치하고자 하였으나 해빙으로 인하여 계류장비 회수와 설치가 불가능해져 배에 있던 여분의 장비들을 조합하여 계류장비를 설계하였다. 앵커와 어쿠스틱릴리저는 NOAA에서 여분으로 준비해온 것을 사용하였고 센서는 LDEO의 장비를, 부력을 주는 플로트는 NIWA와 극지연구소의 것을, 회수 시 선을 잡는 용도의 목줄과 플로트는 극지연구소의 것을 사용하였다. 본 계류장비의 모식도는 그림 330과 같고 센서 장비 정보는 표 41에 표시되어 있다.

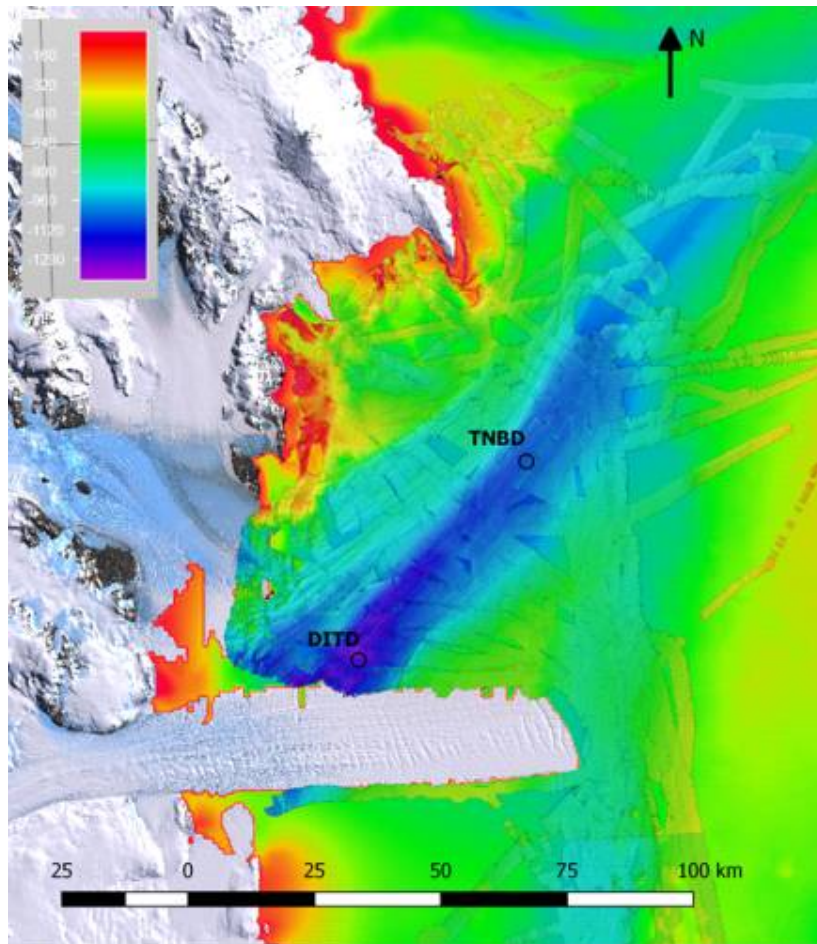


그림 329 TNBD 계류장비 설치 위치

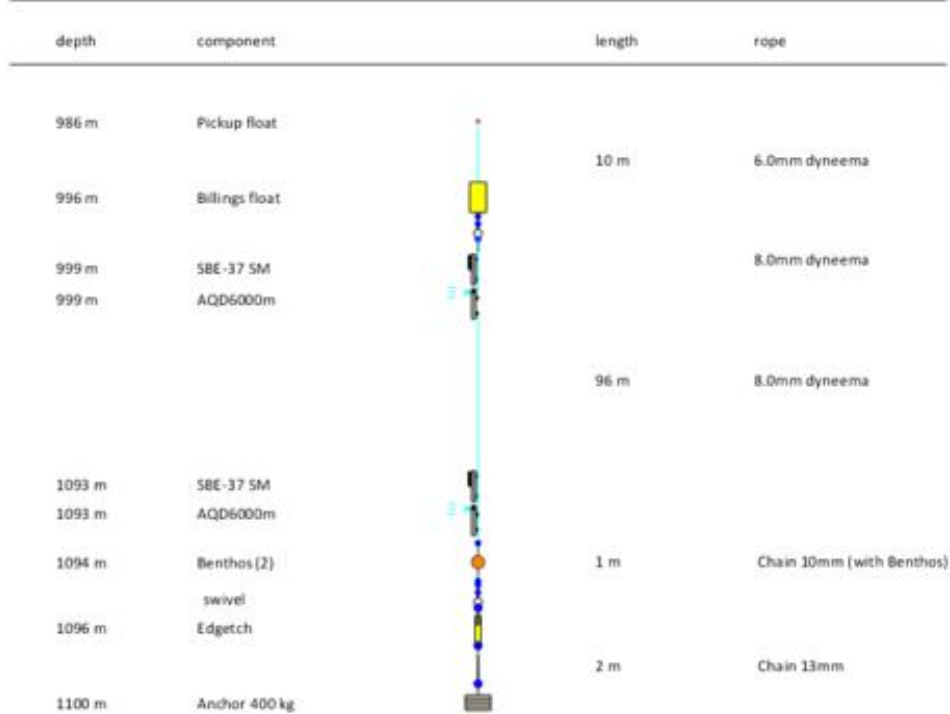


그림 330 TNBD 계류장비 모식도

극지연구소

표 41 TNBD 에 부착된 센서 세팅 정보

Height Above Seabed (m)	Measurement Interval (s)	Averaging Interval (s)	Measurement Load (%)	Vertical Precision (cm/s)	Horizontal Precision (cm/s)	Battery Life (days)	Owner	s/n
10	900	60	13	0.8	0.5	770	LDEO	6162
100	1800	60	13	0.8	0.5	770	LDEO	2231
Height Above Seabed (m)	Sampling Interval (s)		Battery Life (days)	Model	Owner	s/n		
10	180		620	37-SMP	LDEO	15241		
100	60		800	37-SM	LDEO	7141		

(라) 해저면 지진계 회수 및 설치

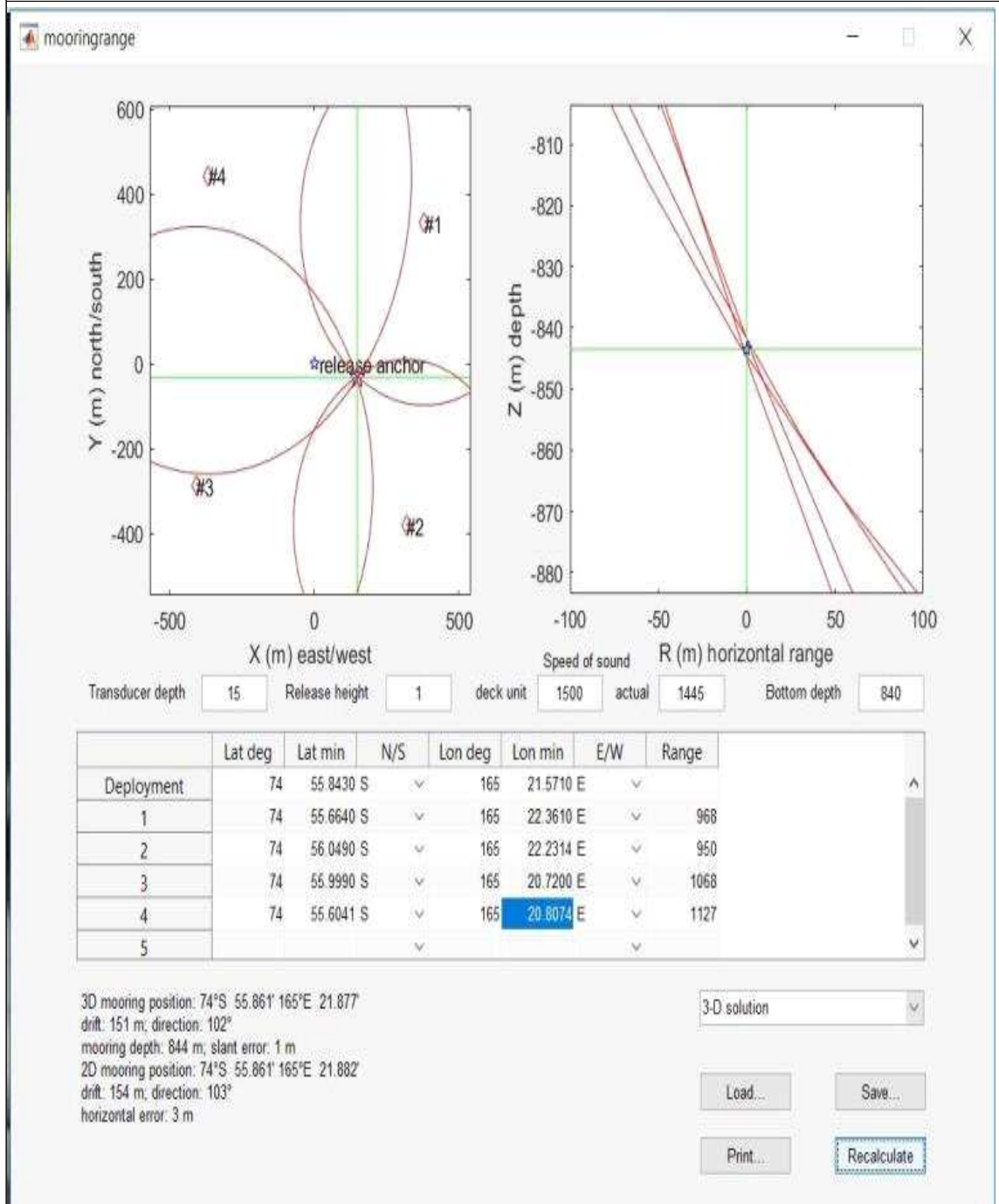
이번 남극 하계 탐사에서는 해양 빙권 기원 신호와 해저 지각활동을 관측하고 수중음향 관측을 보완하기 위하여 남극 테라노바만 지역에 해저면 지진계 3기를 설치하고 2016/2017 시즌에 수중음향 관측을 보완하기 위하여 북부 수중음향 관측망 3기 중앙에 설치하였던 해저면 지진계 1기를 회수하였다. 본 탐사에서 설치한 해저면 지진계는 독일 KUM사에서 제작한 NAMMU 모델로 기존 모델인 Lobster를 업그레이드한 모델이다. OBS 장비 정보는 아래와 같다.

표 42 OBS 주요 구성장비 정보 (Lobster Model *)

구성장비	모델명	SITE	S/N	설명
광대역 해저면 지진계 센서 (Seismometer)	Nanometrics Trillium Compact in titanium pressure tube	O181	003167*	6000m 수심까지 견딜수 있는 티타늄튜브에 내장된 광대역 지진계. 전방향 레벨링 가능.
		O182	1709024	
		O183	1709023	
		O184	1709022	
음파원격이탈기 (Acoustic Releaser)	KUMQUAT K/MT 562	O181	1601349*	6000m 수심까지 견디는 티타늄 튜브. -5~40℃에서 24개월간 안정적으로 구동가능.
		O182	1707365	
		O183	1707366	
		O184	1312315	
자료기록계 (Recorder)	6D6	O181	61607081*	초저전력(125mW)으로 4채널(지진계 3채널, 하이드로폰 1채널)까지 기록가능.
		O182	61607104	
		O183	61607103	
		O184	61607108	
하이드로폰 (Hydrophone)	HTI-04 PCA/ULF	O181	700033*	High Tech 사의 하이드로폰, 6000m 까지 작동가능, 응답 주파수 0.01Hz~8kHz
		O182	700058	
		O183	700056	
		O184	700057	

OBS Model	Lobster	Cruise	ANA08C	Station No	O181
요약	본 장비 2016/2017 탐사 시 시간 부족으로 트라이앵글레이션 작업을 하지 못하여 본 항차에서 1시간 동안 수행한 후 2018년 3월 11일 20시 29분 (UTC)에 아라운 3Ton Crane을 이용하여 회수하였다.				

2016/2017 시즌에 설치한 O181 OBS의 트라이앵글레이션 계산결과



O181 OBS Recovery 프로토콜 시트

LOBSTER STATION-PROTOCOL V1.3

Cruise: ANA01C

Project:

Profile:

Station: KPOBS03 (OBS 181 for ANA01C)

Date UTC:

Date local:

Battery-packs: 6 of Li at 10 Volts 48 of _____ at _____ Volts 6DG-SN: 61607081
 two dry packs inserted sealing area checked all screws fixed

Operator: Sukyung

Recorder 6DG SN: 61607081

Firmware:

TOM SN:

format capacity total 127.8 GB

gain

H Z Y X

channels 4 rate 100 Hz

signals show

H Z Y X

remarks:

trillium levelling:

Stave 6Hr After

GPS-Sync: GPS-signal okay? GPS date (dd.mm.yyyy) 02.02.2017 time (hh:mm:ss) 04:25:20 (UTC)

Start Date 02.02.2017 time (GPS) 04:26:52

RECORDING STARTED CHECKED (capacity) OPERATOR: Sukyung

Releaser SN: 1601349

User1:

User2:

Release: 650675

Enable: 670314

Disable: 670317

DISABLE?

ST date: 01.02.2017 UTC

time: 00:55 UTC

RT date: 31. Jan 2017 UTC

time: 01:00 UTC

Batt 1: 9.86V

Batt 2: 9.55V

Operator: Sukyung

Prepare on Deck

frame SN: 1509-189

Flag:

fixed

Tube SN: 1611189

fixed

all 6 conn.:

fixed

Flash SN: D10-024

switched ON

tested

Radio SN: D10-063

switched ON

tested

channel

A B C D

Hydrophone SN: 700033

fixed

Serial number: 003167

160.72500 MHz

Anchor:

bolt material: Titanium

added weight:

fasten with

4.7 Nm (max 20Nm!)

Deployment

Date UTC

05.02.2017

Time UTC

10:26

Operator: Sukyung

local date

05.02.2017

local time

23:26

coordinates:

lat 74° 55' 34" N (S)

long 165° 21' 57" W (E)

waterdepth 240 m

Recovery: First Release

Date UTC

07 MAR 2018

Time UTC (UTC)

19:55:00 (Release security)

Operator: Tyler / Anthony

local date

local time

20:11:00 (Sun-fare)

Recovery: on surface

local date

local time

20:29:00 (on deck)

Recovery: on deck

local date

local time

coordinates:

lat 74° 55' 34" N (S)

long 165° 21' 57" W (E)

waterdepth 906 m

Recorder

GPS okay

date 11 MAR 2018 time 00:29:38 (Stew determination completed)

skew

recorded data

26.1 GB

no errors errors:

100 sps. Stew determination completed: -6534582 /s (-0.189 ppm)

downloaded to:

Triangulation - Range 1: 968m Range 2: 900m Range 3: 1008m Range 4: 1128m

10 MAR 2018 19:28:00 Range Start → 19:50:00 Release finished

(found 240m away from ship)

Flash/Audio Beacon: 0-mg unstable / operated (Flash) / piercane inside.
(Bath) not water

AR - water infiltration, internal pressure / Stew broken

O181 Documentary Photography



OBS RECOVERY



OBS RECOVERY



OBS RECOVERY



OBS RECOVERY



OBS ON THE DECK



OBS ON THE DECK

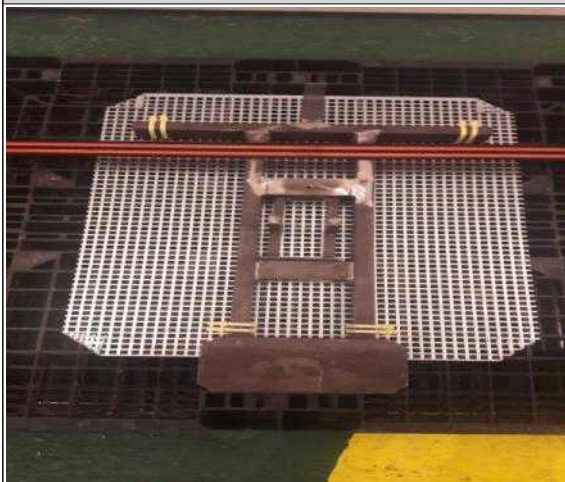
OBS Deployment

OBS Model	NAMMU	Cruise	ANA08C	Station No	O182
요약	본 장비 2018년 3월 5일 03시 42분(UTC)에 아라온 A-Frame을 이용하여 설치하였고 설치위치는 75° 05.245'S, 163° 38.571'E, 수심 895m 지점이다. 탐사 일정이 촉박하여 트라이앵글레이션 작업을 하지 못하였다.				

O182 OBS 세팅 & 설치 프로토콜 시트

NAMMU STATION PROTOCOL						
- Cruise :	ANA08C		- Date and Time :	UTC 05 MAR 2018 03:42:00		
- Station No:	O182 (OBS 182)		- Date and Time :	LOCAL 05 MAR 2018 16:42:00		
- Project :	DE 18050 (KOPRI)					
Instrumentation					Operator: Jiyoon Min	
- Seismometer S/N :	1709024	- Acoustic Releaser S/N :	1707365-224531	- Frame S/N :	170031	
- Hydrophone S/N :	700058	- Flasher S/N, tested :	F05-033 <input checked="" type="checkbox"/>	- Anchore Type :	NAMMU-1Y-Bay-4230	
- 6DS Recorder S/N :	61602104	- Beacon S/N, tested :	F05-078 <input checked="" type="checkbox"/>	- Anchore added Weight :	NONE	
- Recorder Tube S/N :	1781024	- Beacon Channel :	140.785			
Acoustic Releaser					Operator: Jiyoon Min	
- Release Code/Ping tested	224531 <input checked="" type="checkbox"/>	- ST date (dd.mm.yyyy) :	05 MAR 2018 UTC	- ST time (hh:mm:ss) :	03:42:58 UTC	
- Enable Code/Ping tested	203522 <input checked="" type="checkbox"/>	- RT date (dd.mm.yyyy) :	25 JAN 2020 UTC	- RT time (hh:mm:ss) :	10:00:00 UTC	
- Disable Code/Ping tested	203542 <input checked="" type="checkbox"/>	- Battery 1 :	9.98 / 9.01 volts			
- Disable?	<input checked="" type="checkbox"/>	- Battery 2 :	9.52 / 9.00 volts (Voltage tester/field terminal)			
Programming					Operator: Jiyoon Min	
- Battery	80 cells of Alkaline <input type="checkbox"/> or Lithium <input checked="" type="checkbox"/>		at 17.3 Volts	- Sealing area checked	<input checked="" type="checkbox"/>	
- SD card	S/N: 120102	- Capacity / Format :	127.8 GB <input checked="" type="checkbox"/>			
- GPS connection	15min. stabilization <input checked="" type="checkbox"/>	- Sync date(dd.mm.yyyy) :	05 MAR 2018 UTC	- Sync time (hh:mm:ss) :	09:54:10 UTC	
- Setting (website 10.0.0.1) - Channels No. :	4		- Channels Signal checked :	H <input checked="" type="checkbox"/> X <input checked="" type="checkbox"/> Y <input checked="" type="checkbox"/> Z <input checked="" type="checkbox"/>		
- Sampling Rate :	250 SPS		- Gain checked :	H <input checked="" type="checkbox"/> X <input checked="" type="checkbox"/> Y <input checked="" type="checkbox"/> Z <input checked="" type="checkbox"/>		
- Recorder 6DS, Hydrophone signal checked	<input checked="" type="checkbox"/>					
- Comments :	ANA08C-O182-61602104-120102-05MAR2018-NAMMU-JIYOON					
- Recorder 6DS Firmware :	V01.1.2.2 B0# (2012.01.27)					
- Recording started	- Start Date (dd.mm.yyyy) :	05 MAR 2018 UTC	- Start Time (hh:mm:ss) :	09:56:45 UTC		
Check on Deck					Operator: Jiyoon Min	
- Hydrophone fixed	<input checked="" type="checkbox"/>	- Flag fixed	<input checked="" type="checkbox"/>	- Headbuoy stopper removed	<input checked="" type="checkbox"/>	
- Seismometer fixed	<input checked="" type="checkbox"/>	- Flash light on	<input checked="" type="checkbox"/>	- Weight of Bolt (Titanium 40g/steel 80g) checked	<input checked="" type="checkbox"/>	
- Releaser fixed	<input checked="" type="checkbox"/>	- Radio beacon on	<input checked="" type="checkbox"/>	- A-frame <input checked="" type="checkbox"/> 3-tons crane <input type="checkbox"/>		
- All clamps fixed	<input checked="" type="checkbox"/>	- Anchor fastened with (5Nm max) <input checked="" type="checkbox"/>				
Deployment					Operator: Jiyoon Min, Sehyun	
- Date (dd.mm.yyyy) :	05 MAR 2018 UTC		- Time (hh:mm:ss) :	23:57:00 UTC		
- Coordination	- Latitude :	75° 5.245' N (S)	- Longitude :	163° 38.571' E (W)		
- Water Depth :	895 m					
Recovery					Operator :	
- Release (1st trial)	- Date (dd.mm.yyyy) :	_____ UTC		- Time (hh:mm:ss) :	_____ UTC	
- Time on surface :	_____ UTC	- Time on deck	_____ UTC	- Water Depth :	_____ m	
- Coordination	- Latitude :	N/S		- Longitude :	E/W	
Data read out					Operator :	
- Skew (connected GPS)	<input type="checkbox"/>	- Date (dd.mm.yyyy) :	_____ UTC		- Time (hh:mm:ss) :	_____ UTC
- Recorded data :	_____	- Downloaded to	_____			
- No errors	<input type="checkbox"/>	- Errors :	_____			

O182 Documentary Photography



ANCHOR & SAND METAL SHEET



OBS SETTING IN THE LAB



OBS SETTING ON THE POOP DECK



OBS SETTING ON THE POOP DECK



OBS DEPLOYMENT BY A-FRAME



OBS DEPLOYMENT BY A-FRAME

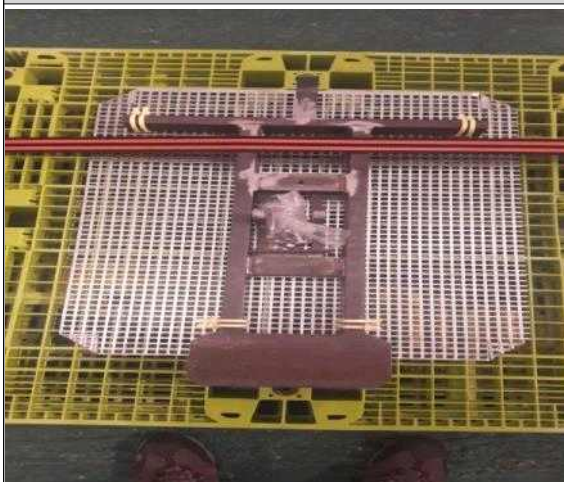
OBS Deployment

OBS Model	NAMMU	Cruise	ANA08C	Station No	O183
요약	본 장비 2018년 3월 6일 06시 21분(UTC)에 아라온 A-Frame을 이용하여 설치하였고 설치위치는 75° 11.467'S, 166° 16.310'E, 수심 808m 지점이다. 탐사 일정이 촉박하여 트라이앵글레이션 작업을 하지 못하였다.				

O183 OBS 세팅 & 설치 프로토콜 시트

NAMMU STATION PROTOCOL					
Cruise : <u>ANA 08C</u>		Date and Time : <u>UTC 06 MAR 2018 06:21:00</u>			
Station No. : <u>O183 (OBS183)</u>		LOCAL : <u>19:21:00</u>			
Project : <u>PE18050 (KOPRI)</u>					
Instrumentation					Operator : <u>Jiyoun</u>
Seismometer S/N : <u>1209022</u>	Acoustic Releaser S/N : <u>1207366-220372</u>	Frame S/N : <u>170030</u>			
Hydrophone S/N : <u>200056</u>	Flasher S/N, tested : <u>F05-032</u> <input checked="" type="checkbox"/>	Anchore Type : <u>NAMMU 1Y-Baug-4230</u>			
6D6 Recorder S/N : <u>61602103</u>	Beacon S/N, tested : <u>F05-062</u> <input checked="" type="checkbox"/>	Anchore added Weight : <u>NONE</u>			
Recorder Tube S/N : <u>1209023</u>	Beacon Channel : <u>159.480</u>				
Acoustic Releaser					Operator : <u>Jiyoun</u>
Release Code/Ping tested : <u>224522</u> <input checked="" type="checkbox"/>	ST date (dd.mm.yyyy) : <u>06 MAR 2018</u> UTC	ST time (hh:mm:ss) : <u>07:17:20</u> UTC			
Enable Code/Ping tested : <u>203645</u> <input checked="" type="checkbox"/>	RT date (dd.mm.yyyy) : <u>26 JAN 2020</u> UTC	RT time (hh:mm:ss) : <u>20:00:00</u> UTC			
Disable Code/Ping tested : <u>203666</u> <input checked="" type="checkbox"/>	Battery 1 : <u>9.12, 9.99</u> volts				
Disable? <input checked="" type="checkbox"/>	Battery 2 : <u>9.09, 9.60</u> volts	(Voltage tester/Lead terminal)			
Programming					Operator : <u>Jiyoun</u>
Battery : <u>50</u> cells of Alkaline <input type="checkbox"/> or Lithium <input checked="" type="checkbox"/> at <u>17.3</u> volts	Sealing area checked <input checked="" type="checkbox"/>				
SD card : S/N : <u>120101</u>	Capacity / Format : <u>127.8 GB</u> <input checked="" type="checkbox"/>				
GPS connection : 15min. stabilization <input checked="" type="checkbox"/>	Sync date(dd.mm.yyyy) : <u>06 MAR 2018</u> UTC	Sync time (hh:mm:ss) : <u>10:08:02</u> UTC			
Setting (website 10.0.0.1) : Channels No. : <u>4</u>	Channels Signal checked : <u>H X Y Z</u> <input checked="" type="checkbox"/>				
Sampling Rate : <u>250 Sps</u>	Gain checked : <u>H X Y Z</u> <input checked="" type="checkbox"/>				
Recorder 6D6, Hydrophone signal checked <input checked="" type="checkbox"/>	Humidity/Temperature : <u>19 / 19.5</u> °C				
Comments : <u>ANA08C - O183_61602103_120101_06MAR2018 - MINIKRU - JIYEON</u>	FORMER SAMPLE: 201803060101_06MAR2018_06MAR2018_06MAR2018_OPERATOR				
Recorder 6D6 Firmware : <u>Ver. 1.2.2 (2017-01-27)</u>	Recording started : Start Date (dd.mm.yyyy) : <u>06 MAR 2018</u> UTC	Start Time (hh:mm:ss) : <u>10:09:23</u> UTC			
Check on Deck					Operator : <u>Jiyoun</u>
Hydrophone fixed <input checked="" type="checkbox"/>	Flag fixed <input checked="" type="checkbox"/>	Headbuoy stopper removed <input checked="" type="checkbox"/>			
Seismometer fixed <input checked="" type="checkbox"/>	Flash light on <input checked="" type="checkbox"/>	Weight of Bolt (Titanium 40g/steel 80g) checked <input checked="" type="checkbox"/>			
Releaser fixed <input checked="" type="checkbox"/>	Radio beacon on <input checked="" type="checkbox"/>	A-frame 5t 3-ton crane <input type="checkbox"/>			
All clamps fixed <input checked="" type="checkbox"/>	Anchor fastened with (5Nm max.) <input checked="" type="checkbox"/>				
Deployment					Operator : <u>Jiyoun</u>
Date (dd.mm.yyyy) : <u>06 MAR 2018</u> UTC	Time (hh:mm:ss) : <u>11:50:00</u> UTC	Water Depth : <u>808</u> m			
Coordination : Latitude : <u>75° 11.467</u> N/S	Longitude : <u>166° 16.310</u> E/W				
Recovery					Operator :
Release (1st trial) : Date (dd.mm.yyyy) : _____ UTC	Time (hh:mm:ss) : _____ UTC	2nd after _____ min			
Time on surface : _____ UTC	Time on deck : _____ UTC	Water Depth : _____ m			
Coordination : Latitude : _____ N/S	Longitude : _____ E/W				
Data read out					Operator :
Skew (connected GPS) <input type="checkbox"/>	Date (dd.mm.yyyy) : _____ UTC	Time (hh:mm:ss) : _____ UTC			
Recorded data : _____	Downloaded to : _____				
No errors <input type="checkbox"/>	Errors : _____				

O183 Documentary Photography



ANCHOR & SAND METAL SHEET



OBS SETTING IN THE LAB



OBS SETTING ON THE POOP DECK



OBS SETTING ON THE POOP DECK



OBS DEPLOYMENT BY A-FRAME



OBS DEPLOYMENT BY A-FRAME

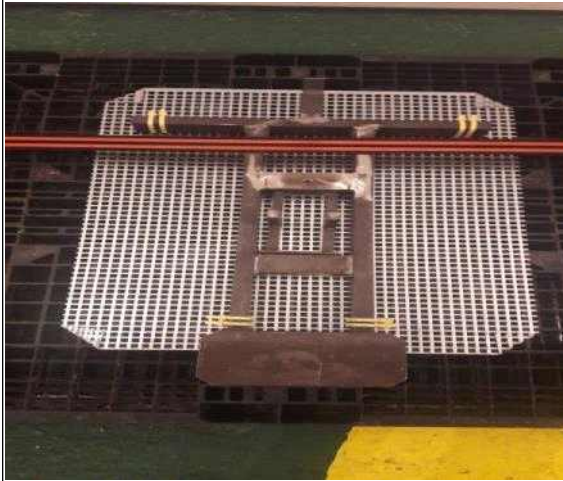
OBS Deployment

OBS Model	NAMMU	Cruise	ANA08C	Station No	O184
요약	본 장비 2018년 3월 7일 06시 15분(UTC)에 아라온 3Ton Crane을 이용하여 설치하였고 설치위치는 75° 31.863'S, 165° 39.430'E, 수심 809m 지점이다. 탐사 일정이 촉박하여 트라이앵클레이션 작업을 하지 못하였다.				

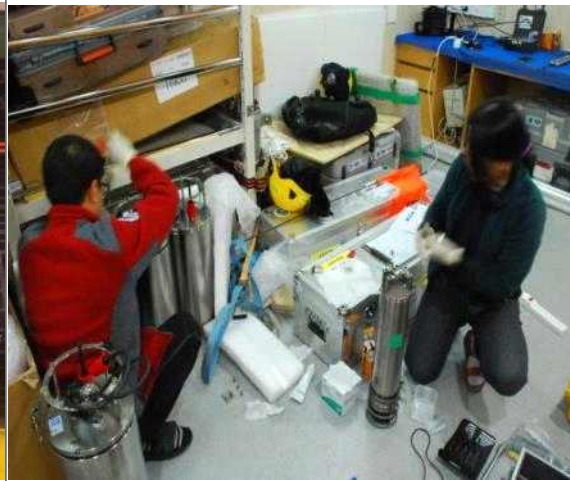
O184 OBS 세팅 & 설치 프로토콜 시트

NAMMU STATION PROTOCOL					
Cruise : <u>ANA08C</u>		Date and Time : <u>UTC 07 MAR 2018 06:15:00</u>			
Station No. : <u>O184 (OBS184)</u>		LOCAL : <u>19:15:00</u>			
Project : <u>PE1800 (KOPRI)</u>					
Instrumentation					Operator : <u>Jiyeon Minkyu</u>
Seismometer S/N : <u>120922</u>	Acoustic Releaser S/N : <u>131215-526622</u>	Frame S/N : <u>120032</u>			
Hydrophone S/N : <u>20052</u>	Flasher S/N, tested : <u>F05-081</u> <input checked="" type="checkbox"/>	Anchore Type : <u>NAMMU-1Y-Buoy-4230</u>			
SD6 Recorder S/N : <u>61602108</u>	Beacon S/N, tested : <u>F05-022</u> <input checked="" type="checkbox"/>	Anchore added Weight : <u>NONE</u>			
Recorder Tube S/N : <u>1209022</u>	Beacon Channel : <u>160, 225</u>				
Acoustic Releaser					Operator : <u>Jiyeon Minkyu</u>
Release Code/Ping tested : <u>526622</u> <input checked="" type="checkbox"/>	ST date (dd.mm.yyyy) : <u>07 MAR 2018 UTC</u>	ST time (hh:mm:ss) : <u>06:15:13</u> UTC			
Enable Code/Ping tested : <u>502210</u> <input checked="" type="checkbox"/>	RT date (dd.mm.yyyy) : <u>26 JAN 2020 UTC</u>	RT time (hh:mm:ss) : <u>10:00:00</u> UTC			
Disable Code/Ping tested : <u>502233</u> <input checked="" type="checkbox"/>	Battery 1 : <u>9.84, 9.86</u> Volts				
Disable? : <input checked="" type="checkbox"/>	Battery 2 : <u>9.05, 9.43</u> Volts	(Voltage across brand terminal)			
Programming					Operator : <u>Jiyeon Minkyu</u>
Battery : <u>80</u> cells of Alkaline <input type="checkbox"/> or Lithium <input checked="" type="checkbox"/> at <u>12.2</u> Volts	Sealing area checked : <input checked="" type="checkbox"/>				
SD card : <u>S/N: 120099</u>	Capacity / Format : <u>12.8 GB</u> <input checked="" type="checkbox"/>				
GPS connection : <u>15min. stabilization</u> <input checked="" type="checkbox"/>	Sync date(dd.mm.yyyy) : <u>07 MAR 2018 UTC</u>	Sync time (hh:mm:ss) : <u>07:53:54</u> UTC			
Setting (website 10.0.1) : Channels No. : <u>4</u>	Channels Signal checked : <u>H <input checked="" type="checkbox"/> X <input checked="" type="checkbox"/> Y <input checked="" type="checkbox"/> Z <input checked="" type="checkbox"/></u>				
Sampling Rate : <u>250 SPS</u>	Gain checked : <u>H <input checked="" type="checkbox"/> X <input checked="" type="checkbox"/> Y <input checked="" type="checkbox"/> Z <input checked="" type="checkbox"/></u>				
Recorder SD6, Hydrophone signal checked <input type="checkbox"/>	Humidity/Temperature : <u>45 % / 22.5 C</u>				
Comments : <u>ANA08C - O184 - 61602108 - 120099 - 07 MAR 2018 - MINKYU - JIYEON</u>	<small>MINIMUM STARTUP ANALOG STARTING (SD6/SD6/10.0.1) SD6/SD6/10.0.1/10.0.1/10.0.1/10.0.1</small>				
Recorder SD6 Firmware : <u>Ver 1.2.2 (2018-01-27)</u>					
Recording started : Start Date (dd.mm.yyyy) : <u>07 MAR 2018 UTC</u>	Start Time (hh:mm:ss) : <u>07:54:36</u> UTC				
Check on Deck					Operator : <u>Jiyeon Minkyu</u>
Hydrophone fixed : <input checked="" type="checkbox"/>	Flag fixed : <input checked="" type="checkbox"/>	Headbuoy stopper removed : <input checked="" type="checkbox"/>			
Seismometer fixed : <input checked="" type="checkbox"/>	Flash light on : <input checked="" type="checkbox"/>	Weight of Bolt (Titanium 40g/steel 80g) checked : <input checked="" type="checkbox"/>			
Releaser fixed : <input checked="" type="checkbox"/>	Radio beacon on : <input checked="" type="checkbox"/>	A-frame <input type="checkbox"/> 3-tons crane <input checked="" type="checkbox"/>			
All clamps fixed : <input checked="" type="checkbox"/>	Anchor fastened with (5Nm max.) : <input checked="" type="checkbox"/>				
Deployment					Operator : <u>Jiyeon Minkyu</u>
Date (dd.mm.yyyy) : <u>07 MAR 2018 UTC</u>	Time (hh:mm:ss) : <u>10:17:30</u> UTC	Water Depth : <u>809</u> m			
Coordination : Latitude : <u>75°31.863 N (S)</u>	Longitude : <u>165°39.430 E (W)</u>				
Recovery					Operator :
Release (1st trial) : Date (dd.mm.yyyy) : _____ UTC	Time (hh:mm:ss) : _____ UTC	2nd after _____ min			
Time on surface : _____ UTC	Time on deck : _____ UTC	Water Depth : _____ m			
Coordination : Latitude : _____ N/S	Longitude : _____ E/W				
Data read out					Operator :
Skew (connected GPS) : <input type="checkbox"/>	Date (dd.mm.yyyy) : _____ UTC	Time (hh:mm:ss) : _____ UTC			
Recorded data : _____	Downloaded to : _____				
No errors : <input type="checkbox"/>	Errors : _____				
<p>✓ Acoustic Release Test Comments (Dry lab)</p> <p>When shooting the ping to AR, AR reply 15 ping for both ways, vertical and horizontal way but the lever changes normally.</p>					

O184 Documentary Photography



ANCHOR & SAND METAL SHEET



OBS SETTING IN THE LAB



OBS SETTING ON THE POOP DECK



OBS SETTING ON THE POOP DECK



OBS DEPLOYMENT BY 3TON
CRANE



OBS DEPLOYMENT BY 3TON
CRANE

(마) 해양 생물 및 화학 시료 채취 및 분석

난센빙봉에서 유출되는 빙하 용빙수(supercooled water)에 의한 주변 수층의 해양 생태계 변화를 이해하기 위해 난센빙봉 및 주변 해역 8개 정점에서 수층별(6개 수심) 생물 및 영양염 분석을 위한 시료를 확보하였다(그림 331).

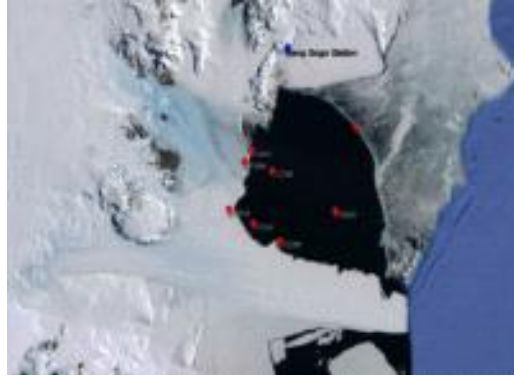


그림 331 해양 생물과 화학 분석 시료 확보 정점

난센빙봉 주변 빙하 용빙수 및 해수의 영양염을 분석한 결과 수심 400-800 m에서 인산염(PO_4^{3-}), 규산염($Si(OH)_4$) 그리고 질산염(NO_3^-)+아질산염(NO_2^-)의 농도가 주변 수층의 해수보다 뚜렷하게 낮은 농도를 보였고, 암모늄(NH_4^+) 농도는 주변 수층의 해수보다 높은 농도를 보였다(그림 332). 이러한 결과는 빙하 용빙수가 주변 해역의 생태계에 영향을 미칠 가능성을 보여주는 것으로, 주변 해역의 모니터링을 통해 생물 군집의 변화 영향을 살펴보는 것이 필요할 것으로 여겨진다.

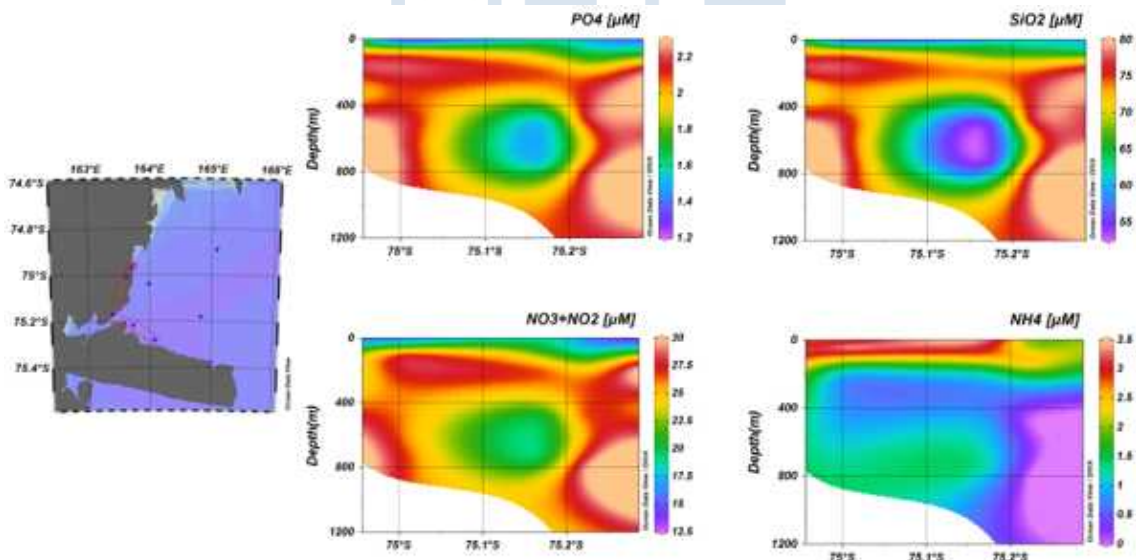


그림 332 난센빙봉 주변 빙하 용빙수 및 해수의 영양염 분석 자료

해수의 용빙수 유입을 확인하기 위해 리튬과 물 안정 동위원소를 이용한 수문 분리를하고자 하였다. 용빙수의 의해서 만들어 진다고 유추되는 super cooled water가 발견되는 수심은 대략 400-500m이고 CTD Profile을 이용하여 온도 변화가 있는 곳을 중점으로 하여 해수 채집을 수행하였다. 10지역으로 각 지역에서 CTD profile을 이용하여 해수 온도 변화 -2.0℃ 이하인 지점을 중심으로 채수를 수행하였다. CTD를 이용하여 해수 채집 후 0.2um membrane filter로 여과후 1L 산바틀과 125ml 바틀에 각각 소분하였다. 1L 산바틀의 경우 리튬 동위원소 분석을 위해 질산을 이용하여 pH 2로 맞추는 후 보관하였다. 모든 시료는 아라온 내부 냉장 창고에 보관하였다. 본 탐사중 대기 온도가 -20 내외로 낮은 경우가 빈번하여 해수가 올라오면서 어는 현상이 발생하였다.

해수 뿐 아니라 해양 대기 중의 수증기 동위원소도 수분의 기원지 추적이나 물순환을 이해하는데 사용될 수 있기 때문에 이동 항해 동안 저온채집방법을 이용하여 이동 항해 중에 총 5번의 수증기 포집을 수행하였다. 포집한 수증기는 녹인 후 냉장 보관하였다. 아라온에 보관된 시료는 4항차 연구가 끝나고 광양 부두에 시료가 들어오면 이화여자 대학교로 운반하여 분석을 수행할 예정이다.



(5) 2018/2019 남극 현장탐사

(가) 연구활동 내용 요약

- 조사기간 : 2018.12.31. ~ 2019.01.15. (16일)
- 조사지역

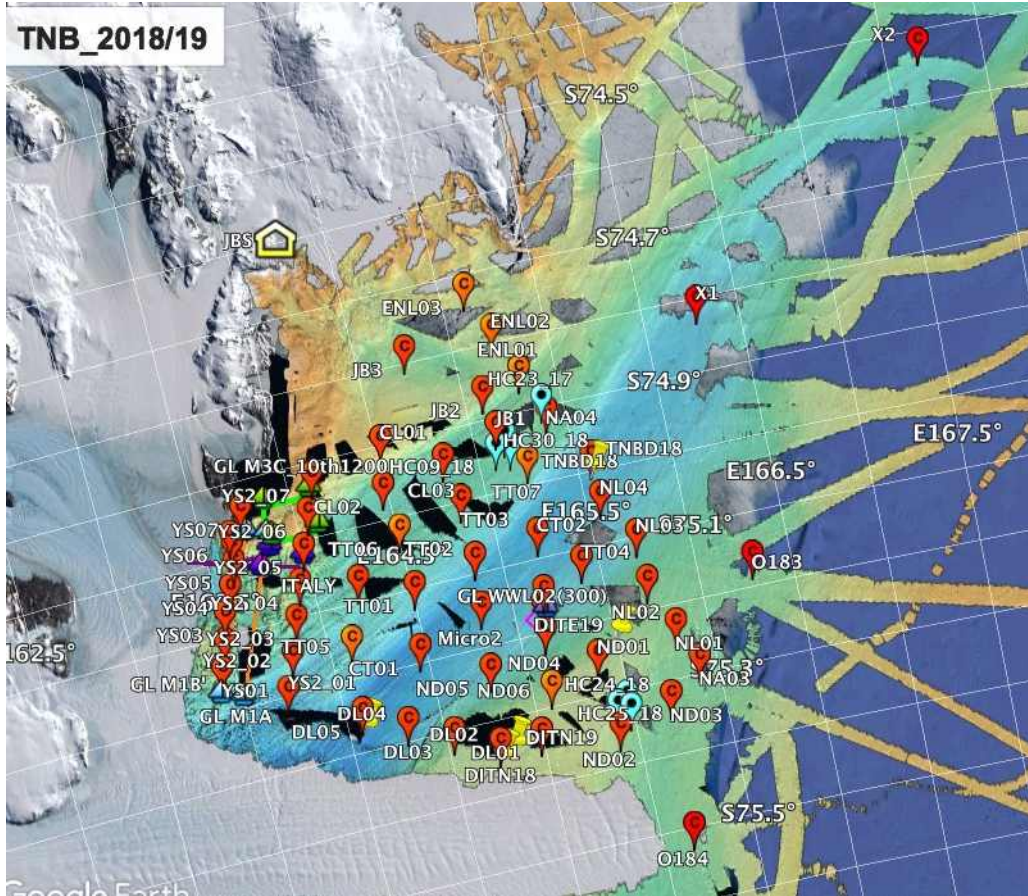


그림 333 장보고 기지 주변 테라노바만과 인근 로스해 관측지점

(나) CTD와 LADCP 관측

본 탐사에서는 2019년 1월 1일부터 1월 14일까지 (14일간) 총 65개 정점에서 CTD/LADCP 관측을 수행하였다. 관측정점은 그림 334, 표 43과 같다

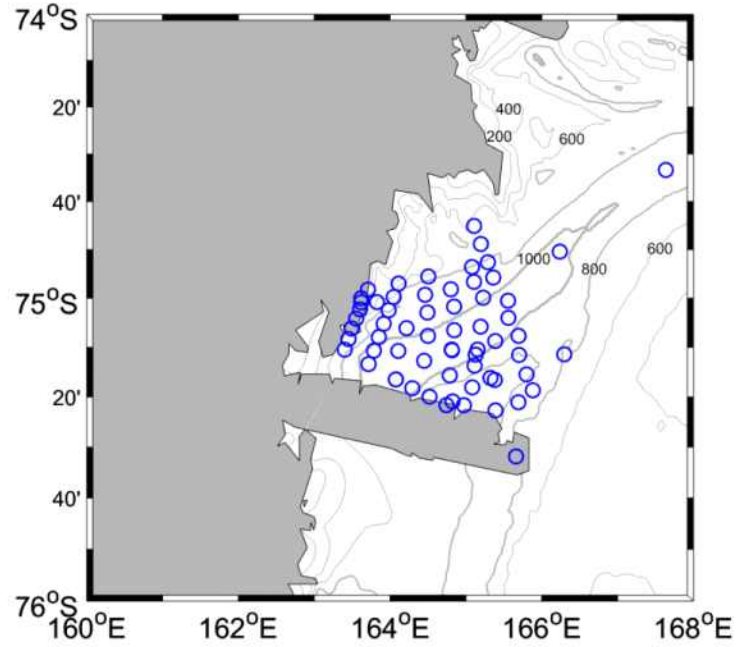


그림 334 18/19 남극 하계 테라노바 만 CTD/LADCP 관측 정점

표 43 관측 정점 정보

CTD 및 정점명	관측 일시	위도	경도	LADCP 파일명
CTD01(X2)	2019-01-01 3:13	-74.556137	167.636457	LADCP_ANA09001
CTD02(X1)	2019-01-01 13:13	-74.84032	166.238013	LADCP_ANA09002
CTD03(NA04)	2019-01-01 22:18	-74.92934	165.3606	LADCP_ANA09003
CTD04(CT02)	2019-01-02 4:32	-75.0968	165.193422	LADCP_ANA09004
CTD05(Micro2)	2019-01-02 6:35	-75.17618	164.814718	LADCP_ANA09005
CTD06(CT01)	2019-01-02 8:36	-75.212113	164.449113	LADCP_ANA09006
CTD07_DL05(DITD)	2019-01-02 17:31	-75.274903	164.074442	LADCP_ANA09007
CTD08(DL04)	2019-01-02 20:39	-75.30408	164.293708	LADCP ANA09008
CTD09(DL03)	2019-01-02 22:17	-75.332337	164.519893	LADCP_ANA09009
CTD10(DL01)	2019-01-03 0:33	-75.360785	164.972845	LADCP_ANA09010
CTD11(O184)	2019-01-03 6:30	-75.530717	165.661147	LADCP_ANA09011
CTD12(DL02,DITN18)	2019-01-03 11:44	-75.360632	164.743298	LADCP_ANA09012
CTD13(YS2-01)	2019-01-03 16:51	-75.223343	163.716397	LADCP_ANA09013
CTD14(YS-01)	2019-01-03 20:11	-75.17467	163.402233	LADCP_ANA09014
CTD15(YS-02)	2019-01-03 21:44	-75.138982	163.451595	LADCP_ANA09015
CTD16(YS-03)	2019-01-03 23:05	-75.103072	163.491543	LADCP_ANA09016
CTD17(YS04)	2019-01-04 2:08	-75.069707	163.552818	LADCP_ANA09017

CTD18(YS05)	2019-01-04 3:26	-75.038108	163.604287	LADCP_ANA09018
CTD19(MICRO01)	2019-01-04 4:42	-75.014033	163.619288	LADCP_ANA09019
CTD20(YS06)	2019-01-04 5:54	-75.00036	163.61968	LADCP_ANA09020
CTD21(YS07)	2019-01-04 7:04	-74.9706	163.707973	LADCP_ANA09022
CTD22(YS2-07)	2019-01-04 8:36	-74.949863	164.112062	LADCP_ANA09023
CTD23(YS2-06)	2019-01-04 9:46	-74.99574	164.047865	LADCP_ANA09024
CTD24(YS2_05)	2019-01-04 11:42	-75.041122	163.980943	LADCP_ANA09025
CTD25(YS2_04)	2019-01-04 13:09	-75.08687	163.915888	LADCP_ANA09026
CTD26(CL01)	2019-01-04 18:28	-74.92551	164.504523	LADCP_ANA09028
CTD27(CL02)	2019-01-04 20:03	-74.988332	164.461433	LADCP-ANA09029
CTD28(CL03)	2019-01-04 21:45	-74.969473	164.801125	LADCP-ANA09030
CTD29(JB1)	2019-01-04 23:24	-74.943815	165.106318	LADCP-ANA09031
CTD30(TNBD)	2019-01-05 1:42	-75.008565	165.55552	LADCP-ANA09032
CTD31(JB2=JB1)	2019-01-05 5:40	-74.893102	165.08079	LADCP_ANA09033
CTD32(GL M3)	2019-01-05 9:05	-75.013283	163.82696	LADCP_ANA09034
CTD33(YS2-03)	2019-01-05 14:17	-75.132102	163.851198	LADCP-ANA09035
CTD34(YS2-02)	2019-01-05 15:49	-75.177873	163.78649	LADCP-ANA09037
CTD35(ITALY)	2019-01-05 18:19	-75.101715	164.217158	LADCP_ANA09038
CTD36(DITD19)	2019-01-06 9:02	-75.274527	164.077497	LADCP_ANA09040
CTD37(DITN19)	2019-01-06 16:01	-75.348322	164.823568	LADCP-ANA09041
CTD38(ND2)	2019-01-06 18:06	-75.378215	165.389525	LADCP_ANA09042
CTD39(ND3)	2019-01-06 19:40	-75.350893	165.691513	LADCP_ANA09044
CTD40(NL04)	2019-01-08 16:16	-75.066997	165.560232	LADCP_ANA09045
CTD41(NL03)	2019-01-08 18:04	-75.128065	165.694117	LADCP_ANA09046
CTD42(NL02)	2019-01-08 19:45	-75.192365	165.701043	LADCP_ANA09048
CTD43(NL01)	2019-01-08 21:31	-75.2578	165.798963	LADCP_ANA09049
CTD44(NA03)	2019-01-08 22:43	-75.311	165.882207	LADCP_ANA09050
CTD45(ND01)	2019-01-09 0:37	-75.276332	165.38084	LADCP_ANA09051
CTD46(ND05)	2019-01-09 4:11	-75.260988	164.787007	LADCP_ANA09053
CTD47(ND04)	2019-01-09 5:51	-75.228563	165.114768	LADCP_ANA09054
CTD48(ND01)	2019-01-11 1:15	-75.269728	165.324117	LADCP_ANA09055
CTD49(O183)	2019-01-11 6:55	-75.190398	166.296737	LADCP_ANA09056
CTD50(EK60 cal)	2019-01-12 12:32	-75.174167	164.812485	no LADCP
CTD51(Glider)	2019-01-12 12:37	-75.176728	164.81612	LADCP_ANA09057
CTD52(TT04)	2019-01-12 14:32	-75.14553	165.386918	LADCP_ANA09058
CTD53(TT02)	2019-01-12 19:00	-75.108815	164.84585	LADCP_ANA09059

CTD54(TT03)	2019-01-12 21:07	-75.028605	164.843727	LADCP_ANA09060
CTD55(TT01)	2019-01-12 23:12	-75.128118	164.499177	LADCP_ANA09061
CTD56(WWL01)	2019-01-13 8:54	-75.19157	165.128523	LADCP_ANA09062
CTD57(WWL02)	2019-01-13 10:24	-75.174318	165.155055	LADCP_ANA09063
CTD58(ND06)	2019-01-14 1:21	-75.301352	165.083528	LADCP_ANA09064
CTD59(TT05)	2019-01-14 3:41	-75.178888	164.108492	LADCP_ANA09065
CTD60(TT06)	2019-01-14 5:34	-75.048862	164.492585	LADCP_ANA09066
CTD61(TT07)	2019-01-14 8:16	-74.998293	165.227275	LADCP2_ANA09001
CTD62(ENL01)	2019-01-14 10:03	-74.87669	165.28943	LADCP2_ANA09002
CTD63(ENL02)	2019-01-14 12:03	-74.813912	165.196905	LADCP2_ANA09003
CTD64 (ENL03)	2019-01-14 12:29	-74.751387	165.107335	LADCP2_ANA09004

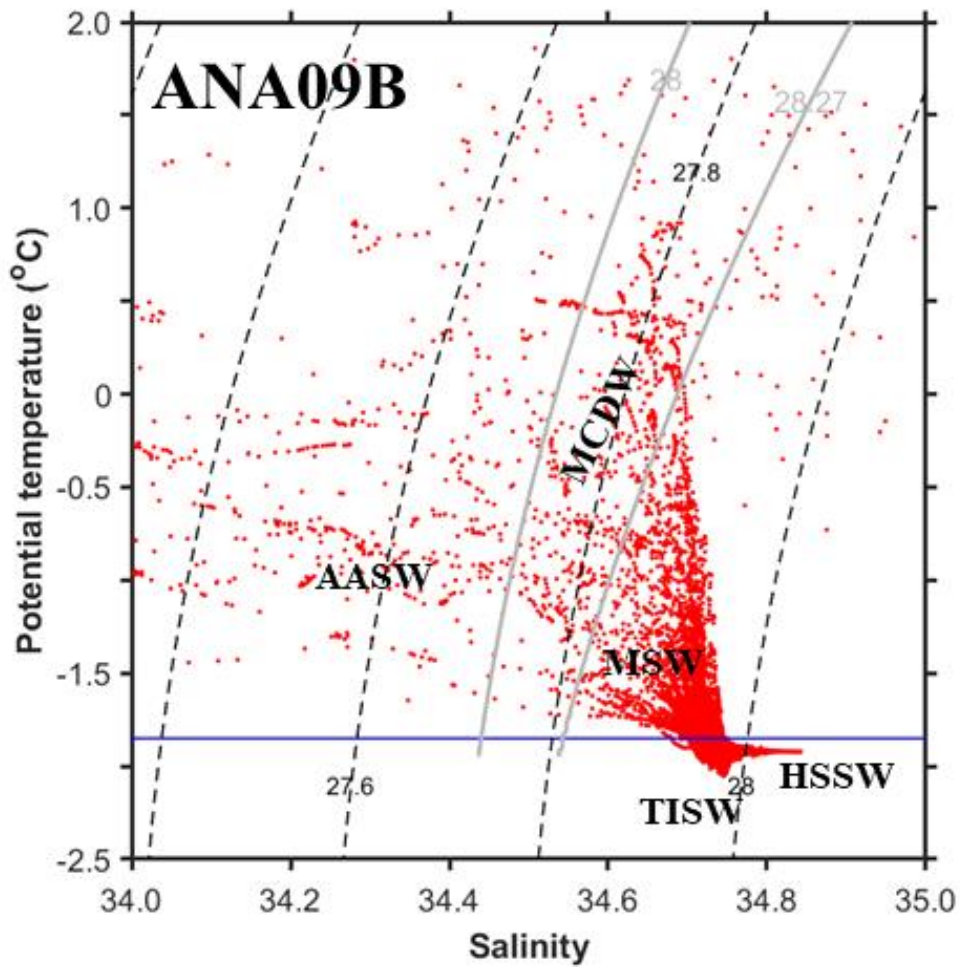


그림 335 18/19 남극 하계 CTD 관측 수온 염분 다이어그램

18/19 남극 하계 테라노바 만 관측에서는 기존에서와 유사하게 남극표층수(Antarctic Surface Water), 변형 순환심층수(Modified Circumpolar Deep Water), 변형 대륙붕수(Modified Shelf Water), 고염 대륙붕수(High Salinity Shelf Water), 테라노바 만 빙붕수(Terra Nova Bay Ice Shelf Water) 등이 발견되었다. 그림 336과 337은 과거 수온-염분 관측 결과와의 비교 그림이다. 17/18(파랑), 16/17(검정) 남극 하계 관측은 각각 3월과 2월에 수행되었으며 반면, 18/19(빨강), 14/15(자홍), 15/16(초록) 남극 하계 관측은 각각 1월과, 12월, 12월에 수행되었다. 관측 연도를 무시하고 관측 달만을 고려하였을 때 겨울철에서 여름철 즉, 12월에서 1, 2, 3월로 시기가 지나면서 상층이 심층에 비해서 가벼워지고 성층화가 강화되는 것을 확인할 수 있다. 즉, 3월에 관측이 수행되었던 17/18 관측에서 가장 큰 밀도 구배를 보였다. 수온-염분 다이어그램을 확대하여 고염 대륙붕수(High Salinity Shelf Water)의 최고 염분을 비교해본 결과 $34.80(14/15) > 34.81(15/16) > 34.83(16/17) > 34.85(17/18) > 34.845(18/19)$ 로 나타났다. 즉, 18/19 남극 하계 관측에서 발견된 고염 대륙붕수의 최고 염분은 16/17 관측 때보다는 크나 17/18 관측 때보다는 낮았다. 테라노바 만 빙붕수의 경우 16/17, 17/18 관측에서 발견된 것보다 상대적으로 온도가 높고 염분이 높은 것으로 확인되었다.

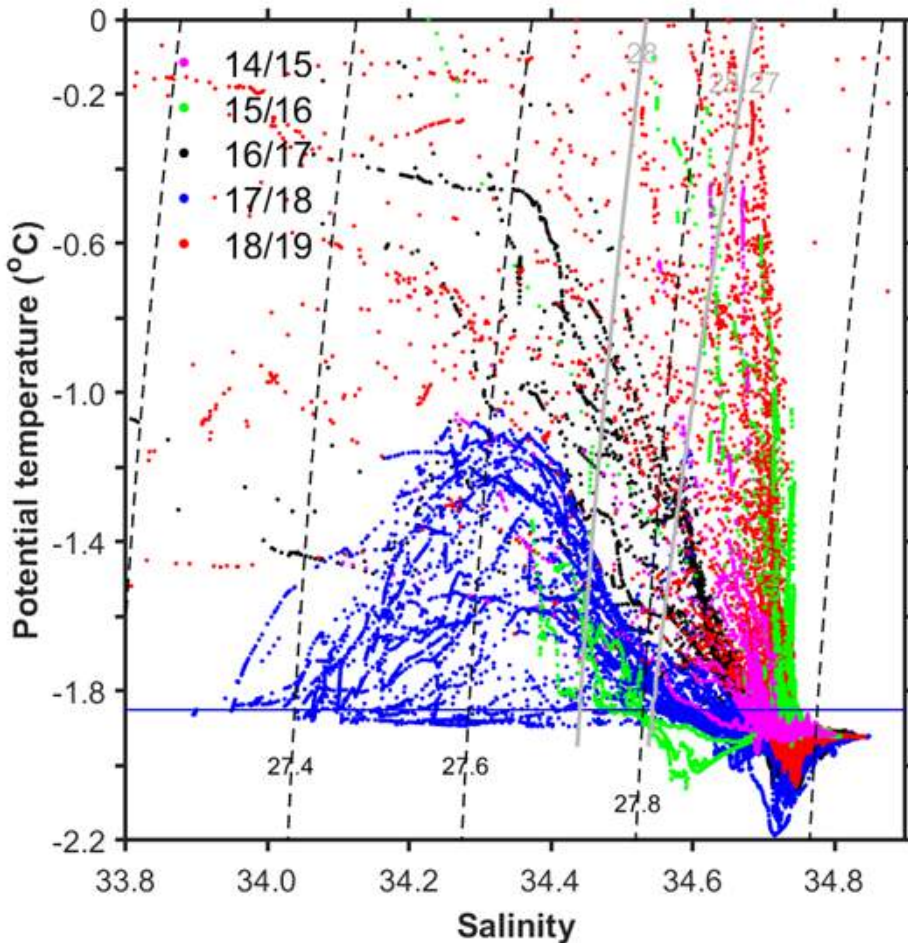


그림 336 과거와의 수온-염분 다이어그램 비교 1

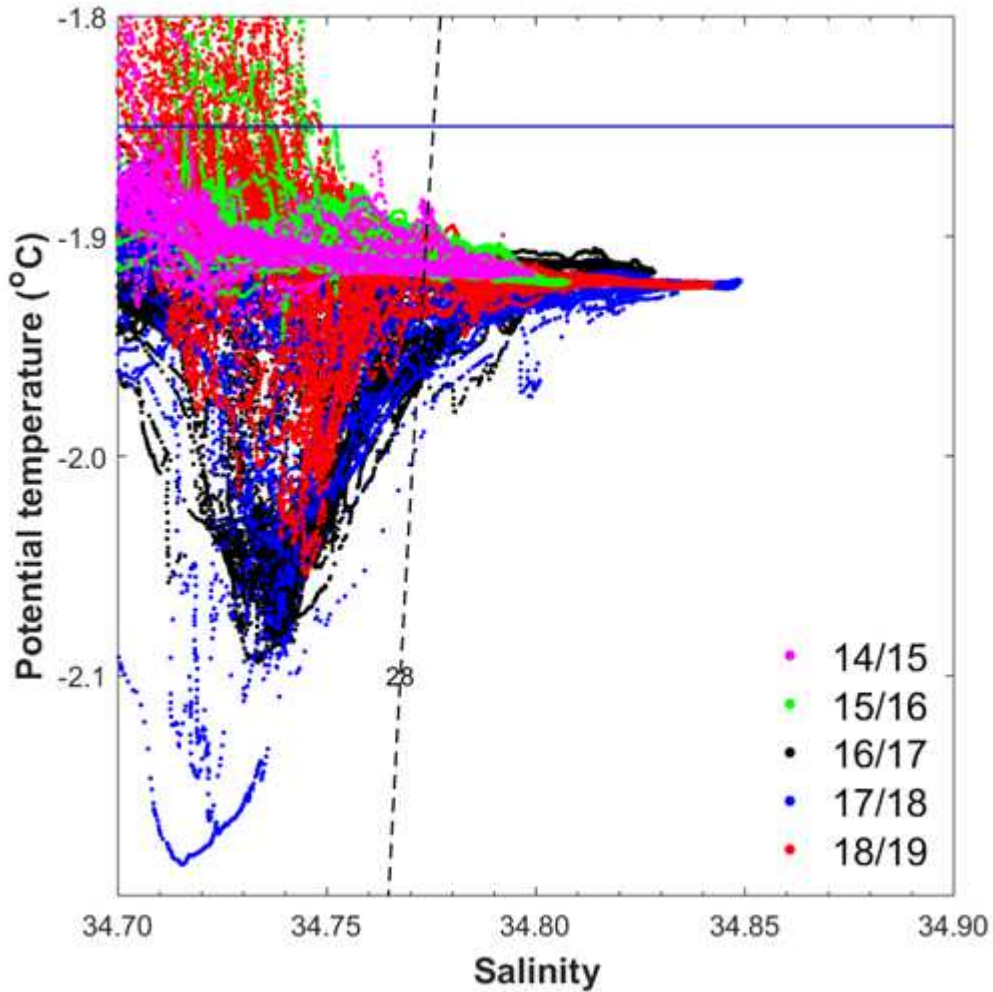


그림 337 과거와의 수온-염분 다이어그램 비교 2

그림 338의 과거와의 염분 수직 프로파일을 비교해 본 결과 수온-염분 다이어그램에서 확인되었듯이 800 m 아래 quasi-homogeneous layer의 염분(고염 대륙붕수에 해당하는 층)이 17/18 시기 다음으로 높은 것을 확인하였다. 또한 평균 수직 프로파일에서 달에 따라 염분 구배가 커짐을 확인할 수 있었다. 그림 339에서 과거와의 온위 수직 프로파일을 비교해 본 결과 16/17, 17/18 관측에서 발견된 테라노바 만 빙봉수에 비해 약 200 m보다 높은 수심에서 발견됨. 또한 수온-염분 다이어그램에서 확인한 것처럼 온위 값도 약 0.1°C 정도 높게 나타났다.

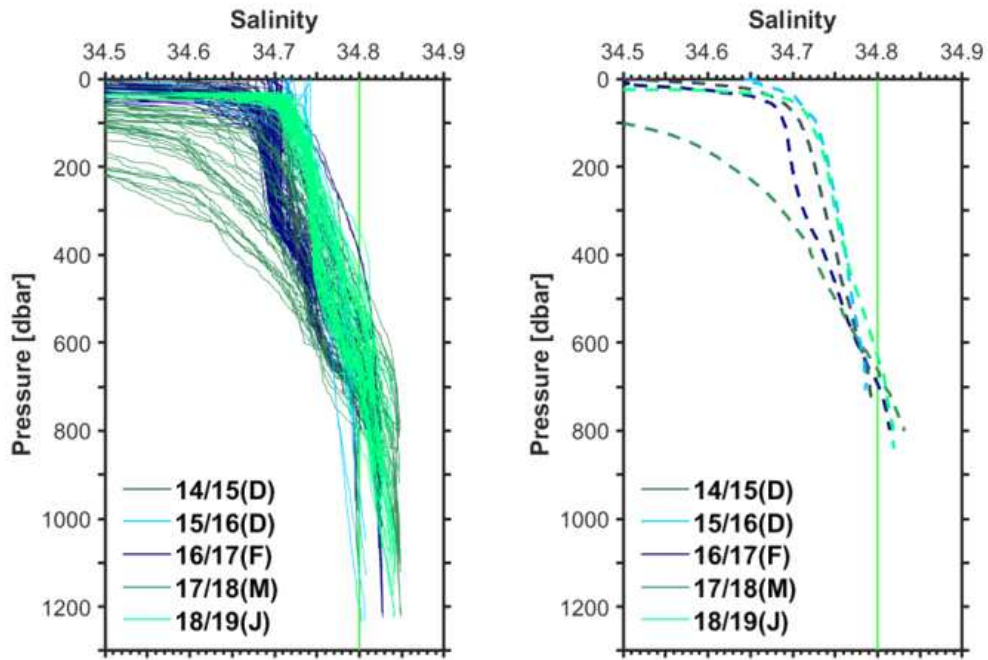


그림 338 과거와의 염분 수직 프로파일 비교

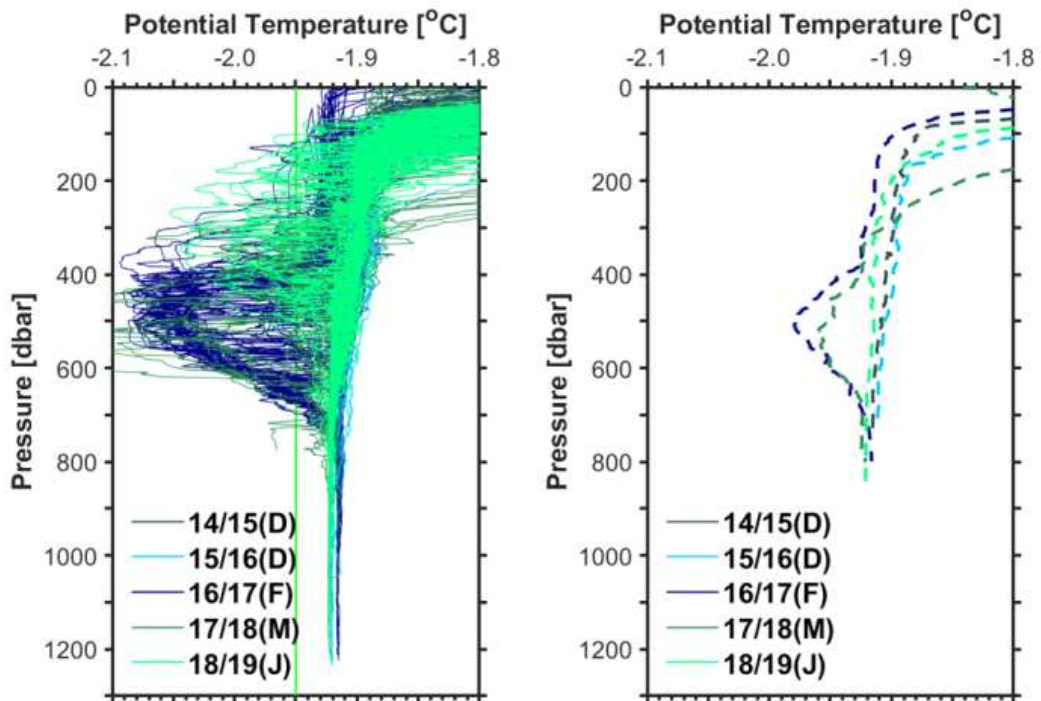


그림 339 과거와의 온위 수직 프로파일 비교

그림 339의 수온 수직 프로파일에서 확인되었듯이 온난층이 약 100-200 m 수심에서 발견되었다. 발견 정점은 주로 테라노바 만의 동부 지역에 위치하고 있다. 과거 수온 프로파일과 비교 결과 (그림 340) 해당 온난층은 18/19 남극 하계 관측에서 처음 발견되었다.

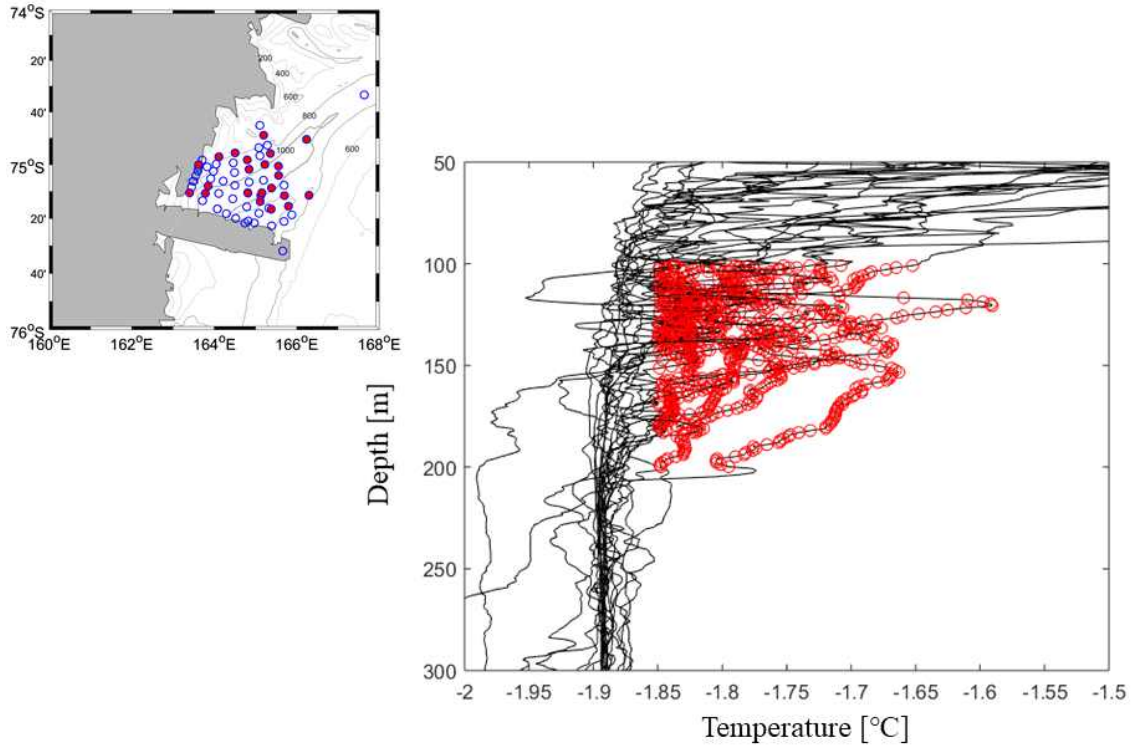


그림 340 18/19 남극 하계 관측에서 관측된 온난층의 공간 및 수직 분포

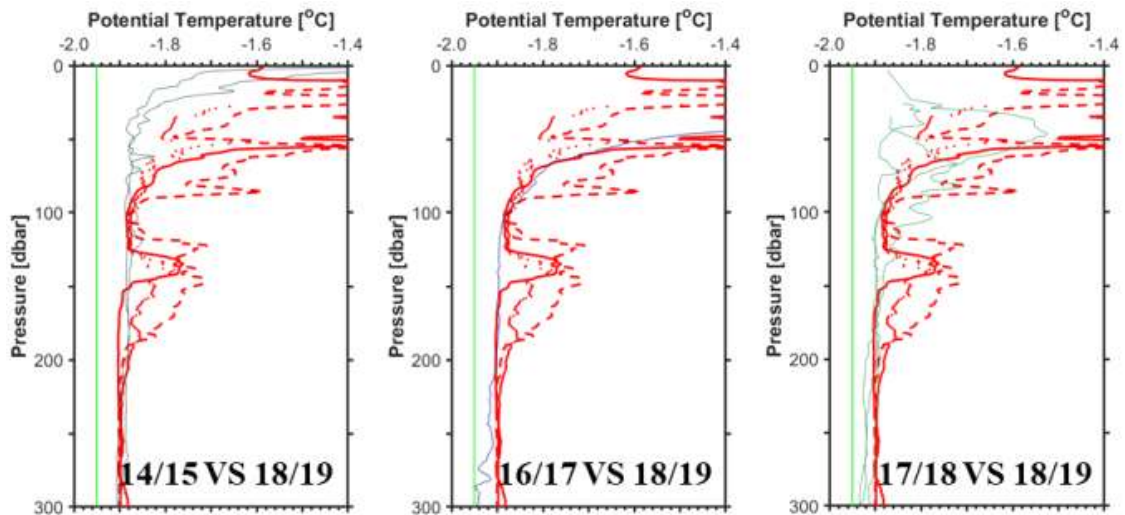


그림 341 과거와의 온난층 비교

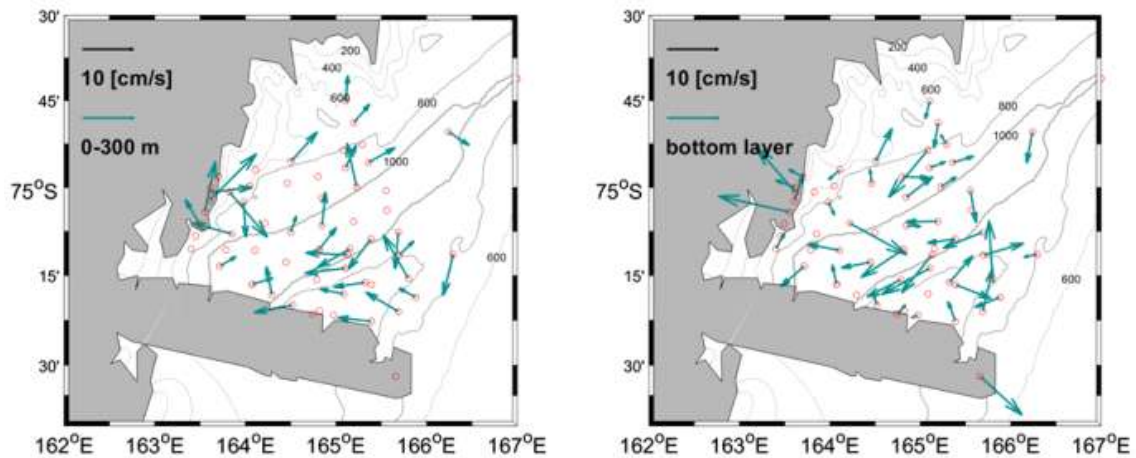


그림 342 LADCP 관측 상층 유속 및 심층 유속 평균

그림 342는 LADCP 관측 결과로 상층(0-300m)의 경우, 깊은 분지 지역을 기준으로 테라노바만 동부에서는 남서향 하는 흐름이 확인되었고 서부에서는 북동향 하는 흐름이 주로 관측되었으며 깊은 분지 지역 상층에서도 북동향 하는 흐름이 주로 확인되었다. 심층의 경우, 난센 빙봉 근처에서는 빙봉 하부로 들어가는 흐름이 확인되었고 깊은 분지 지역의 경우 왼쪽으로 치우쳐서 남서향 하는 흐름을 확인할 수 있었다.

(다) NOAA 협력 수중음향 관측망 회수

본 탐사에서는 드라이갈스키 빙설을 비롯한 해양 빙권 기원 신호와 해저 지각활동을 관측하기 위하여 NOAA와 협력하여 테라노바만에 설치한 수중음향 관측기 6기를 회수하였다. (그림 343) 이중 한 개는 2016/17 시즌에 설치한 것으로 2017/18 남극하계 탐사시 해빙으로 회수에 실패한 수중음향 관측기이며 나머지 5개는 2017/18년에 새롭게 설치한 장비이다. 북부 수중음향 관측망 4기는 1월 2일에 전수 회수에 성공하였으나 남쪽 수중음향관측망은 해빙으로 덮여있어 여러차례에 걸친 방문 끝에 1월 13일에 HC24, HC25는 해빙 속에서 회수에 성공하였고 HC20은 두꺼운 해빙으로 회수가 불가능하여 다음연도 항차에서 회수할 예정이다. 회수 시간 정보는 표 44과 같다.

수중음향 관측기를 안전하게 회수하고 위치결정에 활용하기 위해서는 정확한 설치위치를 파악하는 것이 중요하다. 따라서 일반적으로 장비를 투입한 후에 음향신호를 이용하여 삼각측량(triangulation)을 하여 정확한 위치를 파악한다. 테라노바만 북부 수중음향 관측망은 2017/18 시즌에 설치 직후 삼각측량을 통해 정확한 위치를 계산하였으나 남부 수중음향관측망은 시간상의 이유로 삼각측량을 하지 못하였다. 이에 1월 13일에는 남쪽 수중음향관측망의 삼각측량을 실시하였고 그 결과는 표 45과 같다.

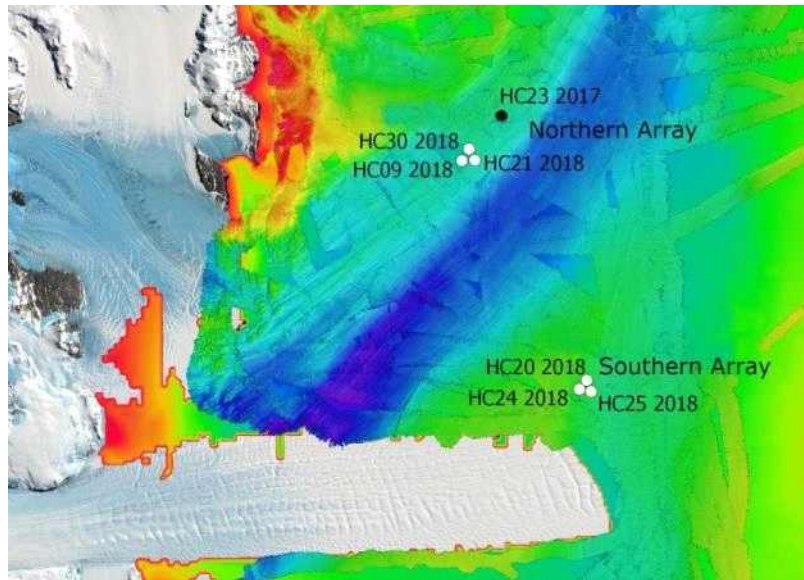


그림 343 수중음향 관측기 설치 위치

표 44 수중음향 관측기 회수 시간

Mooring	Array	Date	Released	Inst On Deck	Recovery Time
HC21	Northern	02Jan19	7:19	7:50	0:31
HC09	Northern	02Jan19	8:30	9:00	0:30
HC30	Northern	02Jan19	9:30	9:49	0:19
HC23 '17	Northern	02Jan19	10:25	10:45	0:20
LDEO/NIWA	NA	05Jan19	16:25	16:50	0:25
HC24	Southern	13Jan19	17:15	17:44	0:29
HC25	Southern	13Jan19	19:25	19:47	0:22

표 45 수중음향 관측기 위치 삼각측량 결과

AUH	Anchor Drop Location (S,E)		M.B. Depth (m)	Survey Location (S,E)		Survey Depth (m)	Mooring Length (m)	AUH Depth (m)
HC09	74 58.282	165 4.867	880	74 58.268678	165 4.982953	880	465	465
HC30	74 59.474	165 7.866	870	74 57.430595	165 8.409012	885	465	470
HC21	74 58.521	165 9.222	890	74 58.518022	165 9.356328	908	465	493
HC20	75 20.240	165 27.84	760	<u>75 20.2365</u>	<u>165 27.7260</u>	<u>721</u>	415	395
HC25	75 21.318	165 28.311	780	<u>75 21.311</u>	<u>165 28.140</u>	<u>759</u>	415	415
HC24	75 20.852	165 24.47	738	<u>75 20.842</u>	<u>165 24.240</u>	<u>715</u>	365	473

본 탐사에서 회수된 수중음향 관측기 6기에서 5기에서는 성공적으로 자료가 획득 되었으나 1기는 자료가 기록되지 않았다. 이 5기에서 총 9,387 파일, 0.25 T 용량에 달하는 자료를 획득하였다. 상세 자료 정보는 표 46와 같다.

표 46 획득 수중음향 자료 정보

AUH	Size [GB]	# Files	First File	Last File	Rec Days	A.Bat [V]	D.Bat [V]
HC09	47.8	1792	3/11/2018	1/3/2019	298	11.07	9.50
HC21	47.7	1787	3/11/2018	1/2/2019	297	11.03	10.35
HC23	56.6	2120	2/19/2017	2/6/2018	352	11.08	1.70
HC24	49.2	1844	3/13/2018	1/13/2019	306	11.01	10.23
HC25	49.2	1844	3/12/2018	1/13/2019	307	10.23	10.95
HC30	0	0	NA	NA	0	12.86	5.60
Totals	250.5	9387	--	--	1560	--	--

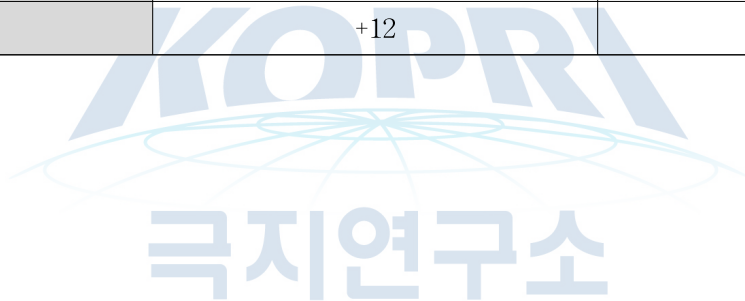
(라) NIWA 협력 해양물리 계류장비 회수 및 설치

드라이갈스키 빙설의 용융현상과 해류, 해수의 물리적 특성을 관측함으로써 테라노바만 형성과 주변 해수 흐름에 빙설이 미치는 영향을 규명하고자 2017/18 남극 하계 탐사에서 설치한 드라이갈스키 빙설 주변의 계류장비 3기 DITN, DITD, DITS와 테라노바만 깊은 계곡에 설치한 TNBD를 회수하고자 하였으나 해빙으로 인하여 DITS를 제외한 나머지를 회수에 성공하였으며 DITN과 DITD를 재설치 하였다.

DITD는 드라이갈스키 북쪽 협곡 중앙 깊은 곳에 2018년 3월 10일에 설치한 후 2019년 1월 3일에 회수, 1월 6일에 재설치한 해양계류 장비로 해빙 생성후에 염분이 농축되어 생기는 무거운 성질의 심층수가 드라이갈스키 하부를 가로지르는 협곡을 따라 어떻게 흘러나가는지를 관측하기 위하여 설치되었다. 장비 정보와 모식도는 다음과 같다.

표 47 DITD 계류장비 정보

Deployment code	DITD1803	DITD1901
Location	Drygalski Ice Tongue Deep	Drygalski Ice Tongue Deep
Project leader	Craig Stevens	Craig Stevens
Deployment operator	Fiona Elliott	Fiona Elliott
Recovery operator	Fiona Elliott	
Latitude (ddd mm.mmm H)	75° 16.584' S	75° 16.597' S
Longitude (ddd mm.mmm H)	164° 4.213' E	164° 4.198' E
Water depth (m)	1212	1212
Magnetic declination	136.42°	
Start time (yyyy/mm/dd HH:MM:SS)	2018/03/10 14:47:00	2019/01/06 20:10:00
Stop time (yyyy/mm/dd HH:MM:SS)	2019/01/03 07:04:00	
Deployment duration (days)	299	
UTC offset	+12	+12



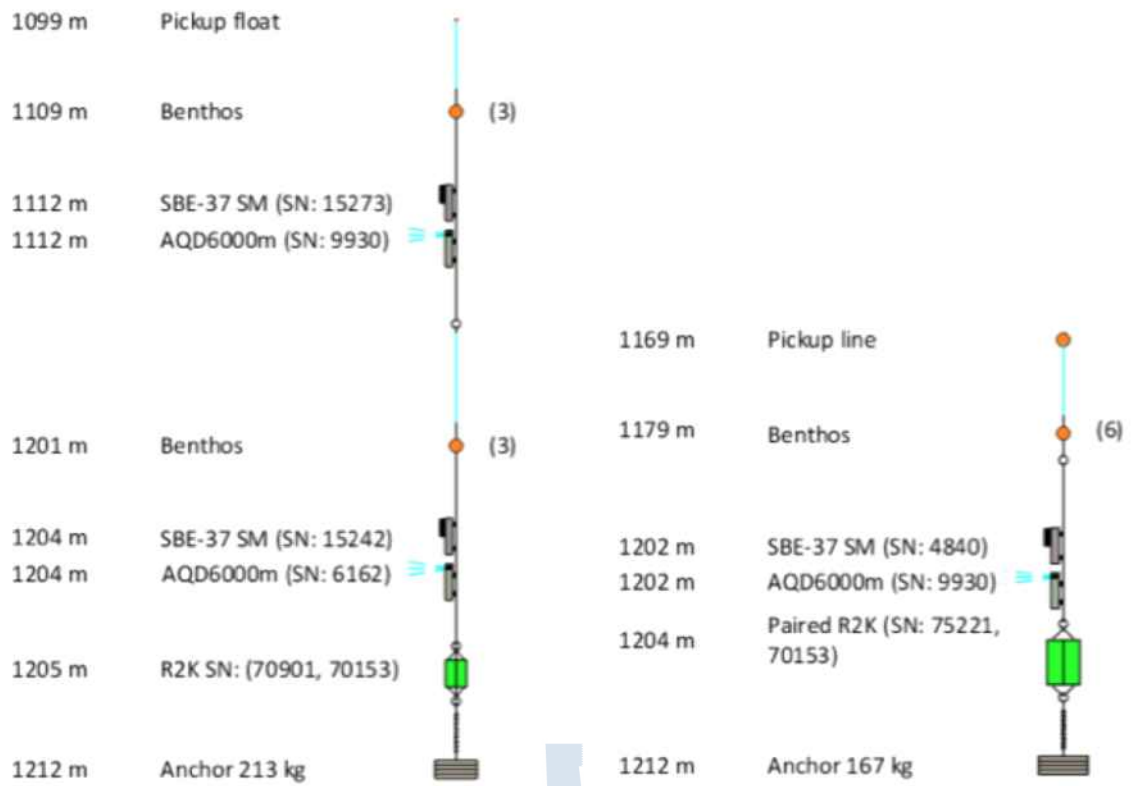


그림 344 2018년에 설치하여 2019년 1월에 회수한 DITD18장비 모식도(왼쪽)와 본항차에서 설치한 DITD19 장비 모식도 (오른쪽)

극지연구소

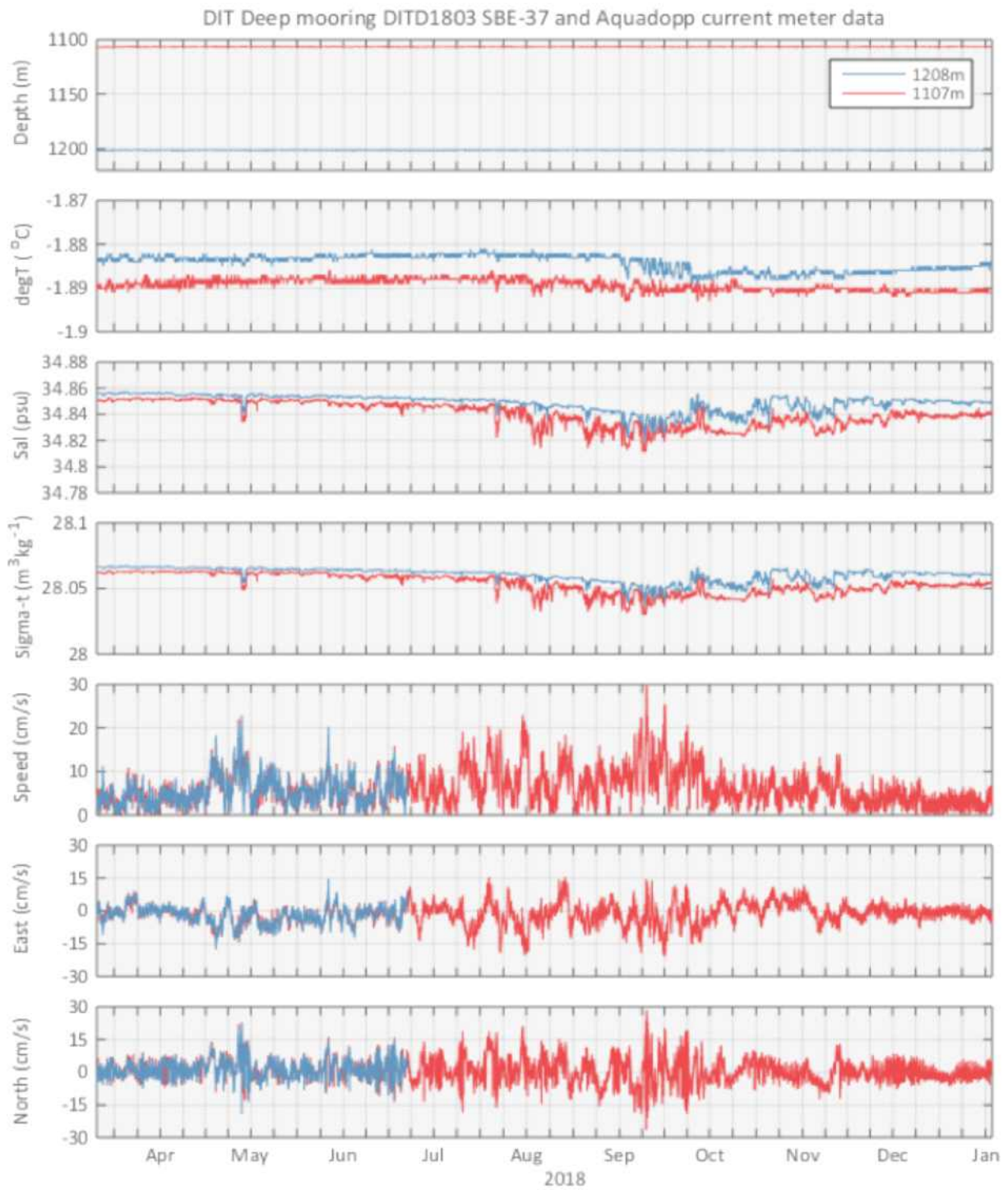


그림 345 본 항차에서 회수된 DITD18 자료 1차 분석 결과

DITN 사이트(드라이갈스키 빙설 북부)에서 1월 4일 회수한 후 6일에 재설치한 장비 정보와 모 식도는 다음과 같다.

표 48 DITN 계류장비 정보

Deployment code	DITN1803	DITN1901
Location	Drygalski Ice Tongue Deep	Drygalski Ice Tongue Deep
Project leader	Craig Stevens	Craig Stevens
Deployment operator	Fiona Elliott	Fiona Elliott
Recovery operator	Fiona Elliott	
Latitude (ddd mm.mmm H)	75° 21.660' S	75° 20.914' S
Longitude (ddd mm.mmm H)	164° 44.581' E	164° 48.951' E
Water depth (m)	670	674
Magnetic declination	135.58°	135.58°
Start time (yyyy/mm/dd HH:MM:SS)	2018/03/12 09:45:00	2019/01/06 20:10:00
Stop time (yyyy/mm/dd HH:MM:SS)	2019/01/04 01:15:00	
Deployment duration (days)	298	
UTC offset	+12	+12

극지연구소

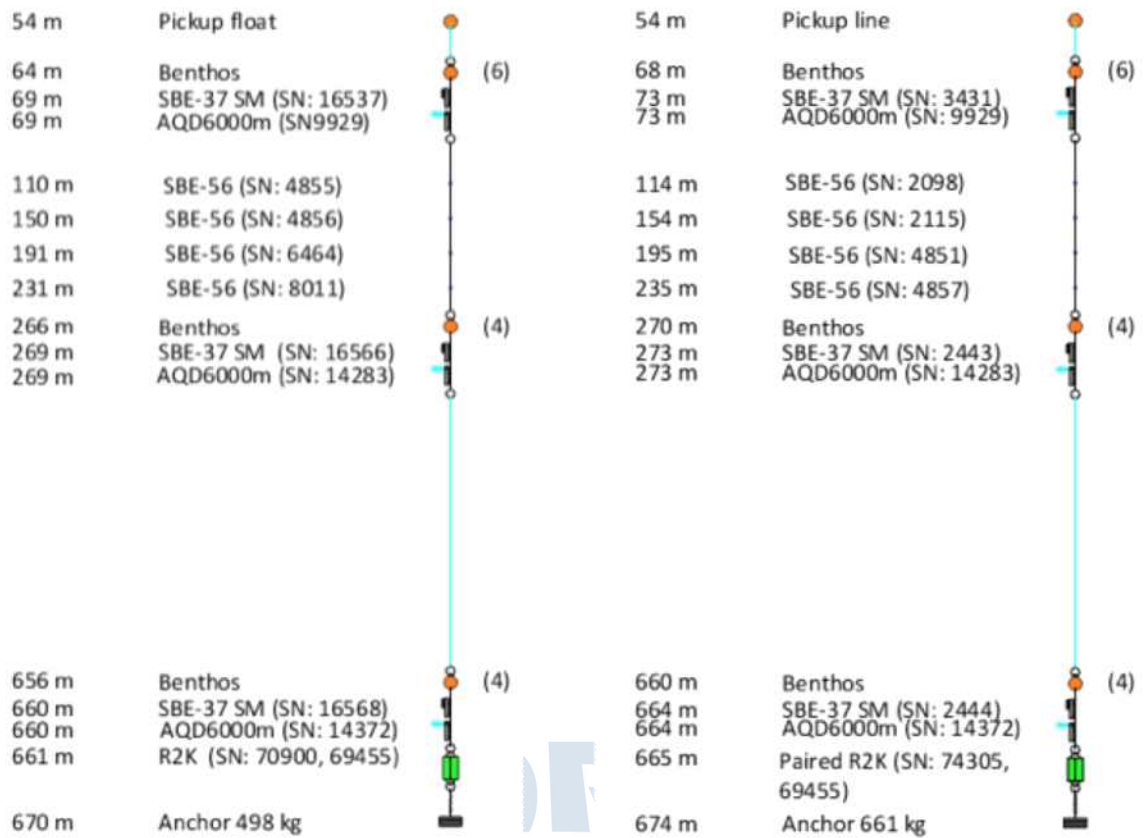


그림 346 2018년에 설치하여 2019년 1월에 회수한 DITN18장비 모식도(왼쪽)와 본 항차에서 설치한 DITN19 장비 모식도 (오른쪽)

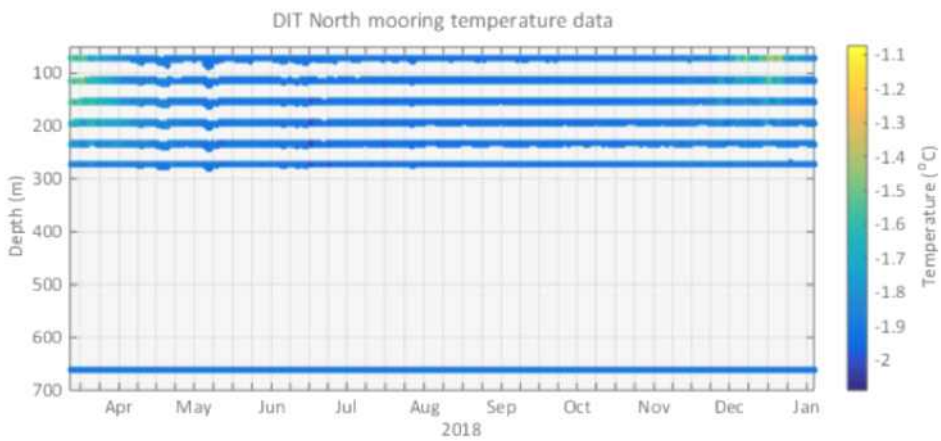
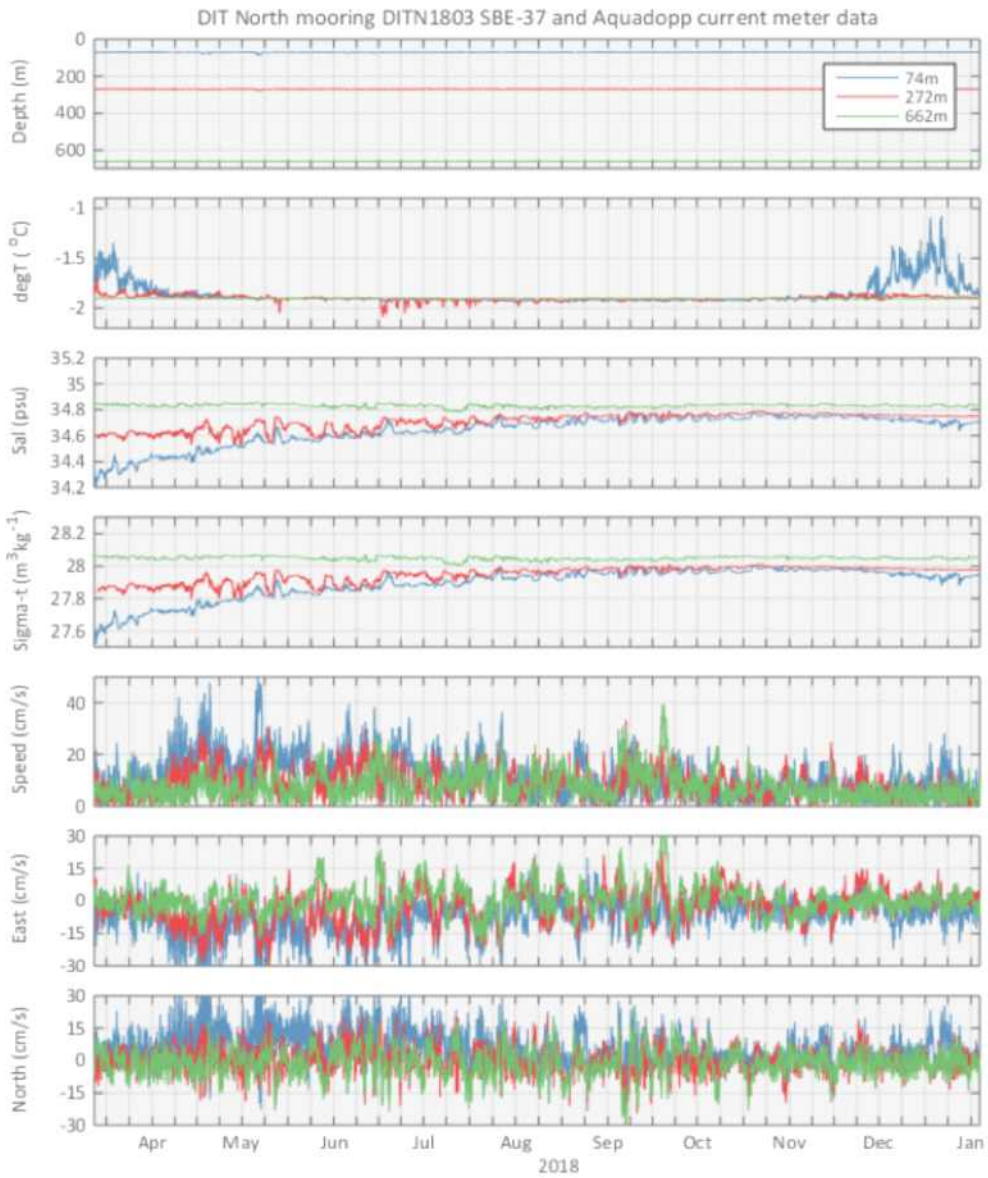


그림 347 본 항차에서 회수된 DITN18 자료 1차 분석 결과

해빙 생성과 연동되어 생성되는 고염도의 무거운 해양심층수의 특성을 테라노바만을 가로지르는 협곡에 해류와 해양물성을 측정할 수 있는 계류장비 TNBD는 NOAA/NIWA/LDEO/KOPRI 네 기관의 장비를 조합하여 2018년에 설치한 것으로 2019년 1월 5일에 회수하고 재 설치는 하지 않았다. 장비 정보와 모식도와 데이터 1차 분석결과는 다음과 같다.

표 49 TNBD 계류장비 정보

Deployment code	TNBD1803
Location	Terra Nova Bay Deep
Project leader	Chris Zappa
Deployment operator	Carson Witte
Recovery operator	Fiona Elliott
Latitude (ddd mm.mmm H)	75° 0.672' S
Longitude (ddd mm.mmm H)	165° 33.372' E
Water depth	1120m
Magnetic declination	136.42°
Start time (yyyy/mm/dd HH:MM:SS)	2018/03/13 10:40:00
Stop time (yyyy/mm/dd HH:MM:SS)	2019/01/05 15:27:00
Deployment duration (days)	298
UTC offset	+12

극지연구소

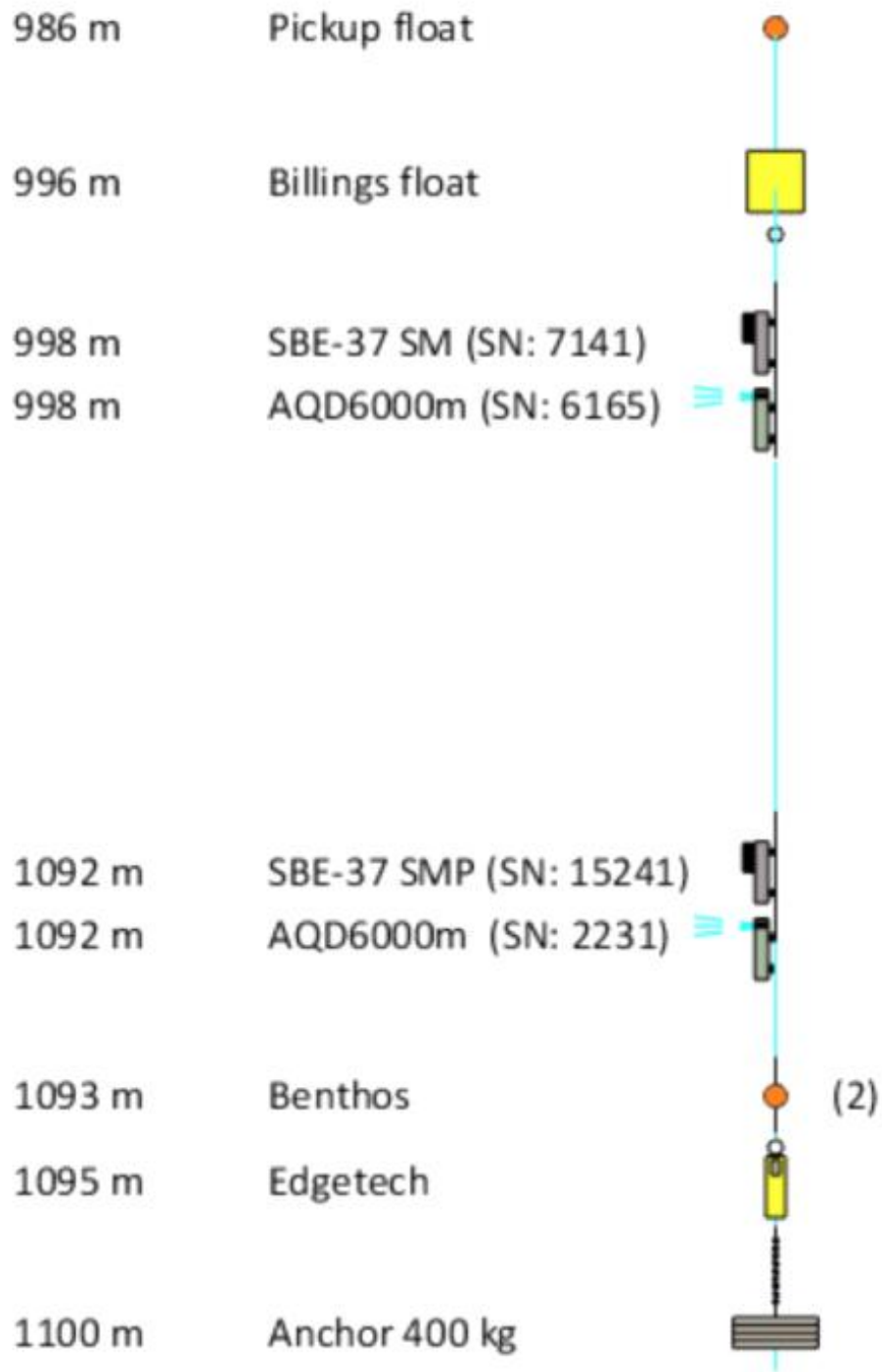


그림 348 2018년 3월에 설치하여 2019년 1월에 회수한 TNBD장비 모식도

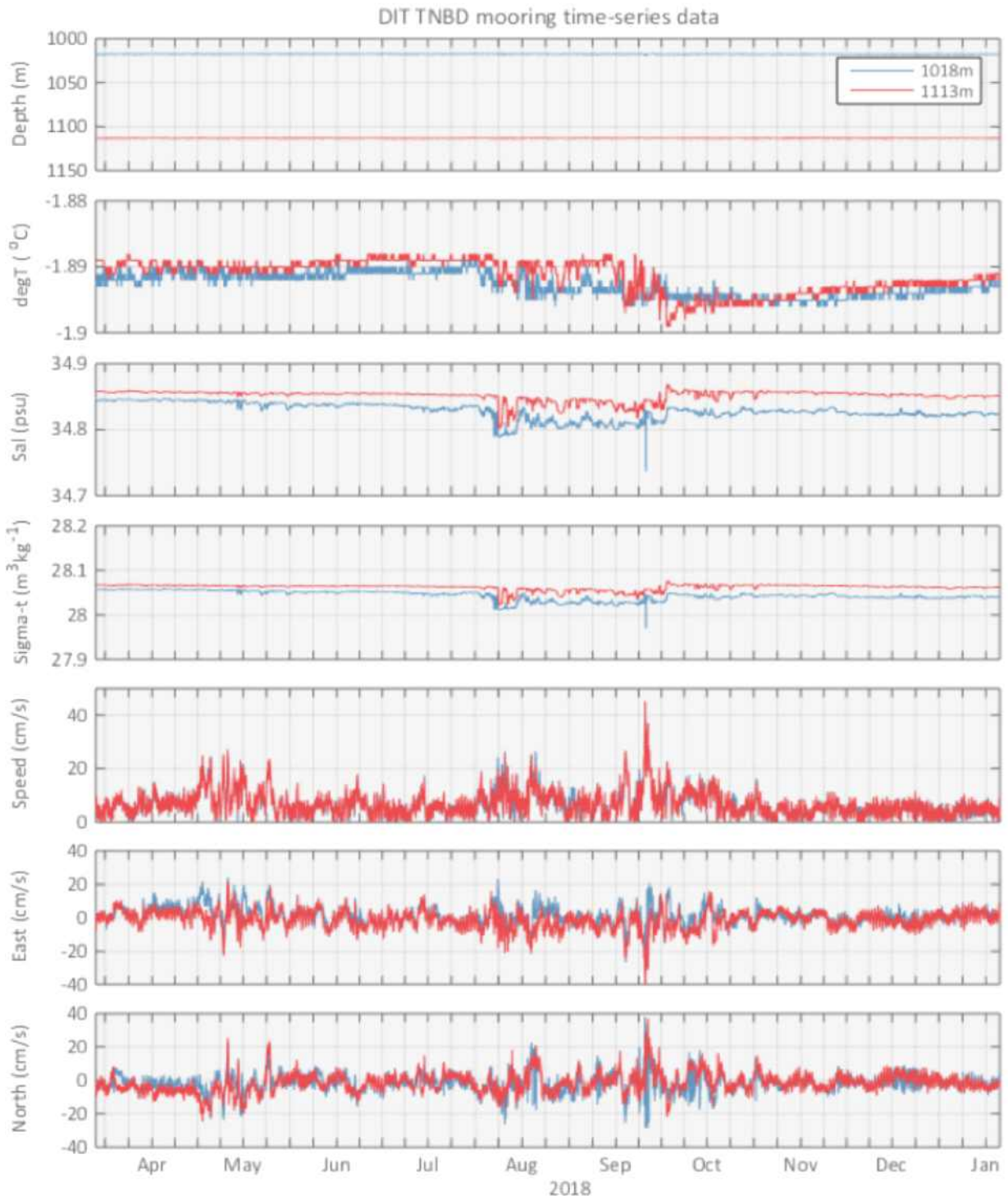


그림 349 본 항차에서 회수된 TNBD 자료 1차 분석 결과

(라) UC Davis 협력 Glider 탐사

UC Davis와 함께한 무인잠수정 Glider 탐사는 아라온이 접근하기 어려운 지역까지 접근하여 해수의 물리적 특성과 해수 흐름을 보다 면밀히 관측하고 탐사 기간 중 더 많은 횡수의 해수 특성을 측정하기 위해 수행하였다. 글라이더 UCD-636 탐사의 첫 번째 목적은 빙저 용융수에 의해 생성된 초저온수(supercooled water)를 찾고 글라이더에 부착한 열 교환과 혼합 과정을 이해하고자 함이다. 이를 위해 글라이더에는 해수의 온도, 염도, 클로로필, 산소포화도를 측정할 수 있는 센서와 난류를 측정할 수 있는 Rockland 사의 MicroRider1000 장비가 부착되었다.

글라이더 사전 준비를 위해 글라이더 팀과 극지연구소 연구원은 2018년 12월 30일 장보고 기지에서 글라이더 나침반 보정을 수행하였으며 (그림 350) 보정 결과는 표 50와 같다.



그림 350 장보고 기지주변 육상에서 이루어진 글라이더 나침반 보정 작업

표 50 글라이더 나침반 보정 작업 결과

Compass (deg.)	Glider (deg.)	Deviation (deg.)
22	21	1
27	29	-2
77	77	0
108	106	2
124	132	-8
173	177	-4
218	218	0
222	221	1
270	261	9
299	292	7
319	298	21
350	338	12

글라이더 탐사를 시작하기 전에는 부력을 맞추기 위해 테스트 미션을 수행하고 테스트미션 결과 값을 확인 후 회수하여 추 조정을 하고 재투입하는 과정이 필요하다. 여러 번에 걸친 회수와 재투입을 원활하게 수행하며 글라이더에 부착된 정밀 장비인 MicroRider 파손을 막기 위해 투입과 회수는 조디악으로 이루어졌다 (그림 351).

첫 번째 글라이더 탐사는 난센 빙벽을 따라 평행하게 운항하며 용빙수의 분포와 거동을 관측하고자 2018년 12월 31일 23:55 (local time)에 시작되었다. 글라이더는 난센 빙봉과 드라이갈스키 빙봉이 만나는 지점인 75° 12.544'S, 163° 31.644'E 에서 투입되어 25 km 가량 북쪽으로 운항을 한 이후에 다시 남쪽으로 내려와 2019년 1월 2일에 75° 11.692'S, 163° 31.762'E에서 회수하였다. 그림 352는 첫 번째 탐사의 계획된 경로(붉은 선)과 실제 운항경로(검은선)이다. 실제 운항 경로가 계획된 경로와 다르게 좌우로 많이 틀어졌음을 확인할 수 있는데 이는 빙봉 앞쪽에서의 해류에 의해 글라이더가 밀리면서 경로를 유지하기 어려웠기 때문으로 추정된다. 첫 번째 글라이더 탐사가 끝나고 글라이더를 회수하였을 때 글라이더의 방향을 조절하는 역할을 하는 꼬리부분 방향타가 손상된 것을 확인하였다 (그림 353). 이는 줄을 묶고 수행한 테스트 미션 중에 줄이 걸려서 손상을 일으킨 것으로 추정하는데 현장에 여분의 부품이 없어 아라온 기관실과 전자장의 도움으로 수리하여 연구를 진행하였다. 그림 354과 355는 첫 번째 미션에서 관측한 수온, 염도, 클로로필, 산소포화도이다. 그림 356은 가장 강한 초저온수가 관측된 인익스프레서블 섬 인근에서의 온도, 염도, 난류 분산율 그래프이다. 수층의 온도차가 큰 경계부에서 분산율이 높아지는 것을 확인할 수 있다. 그림 357는 측정된 분산율을 바탕으로 만든 분산율 프로파일이다.

두 번째 글라이더 탐사는 난센빙봉 채널 하부에서 초저온수 분출과 관련된 해수 특성을 관측하기 위하여 수행되었다 (그림 358). 두 번에 걸친 테스트 미션을 수행한 후 빙봉으로 접근하는 transit 미션을 2019년 1월 7일에 12:47 LT에 시작하여 1월 8일 19:45 LT에 빙봉 아래로 들어가는 Under-ice 미션을 시작하였다.

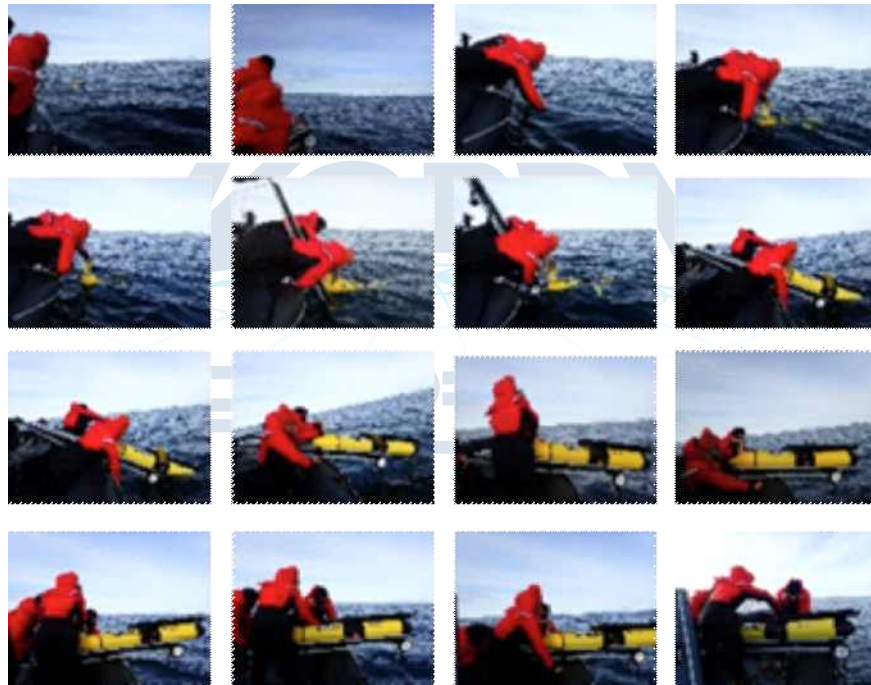


그림 351 글라이더 투입을 위해 조디악보트를 내리는 과정(위)과 글라이더 회수작업 (아래)

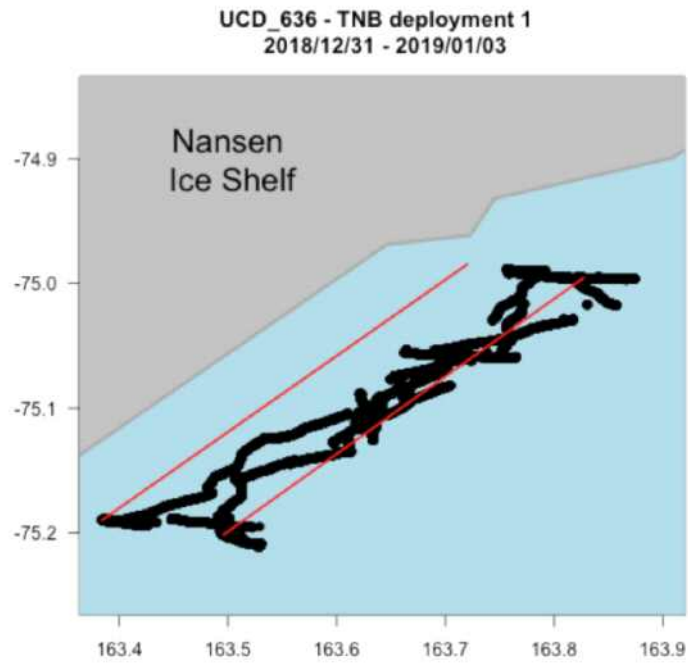


그림 352 난센 빙벽을 따라서 수행된 글라이더 첫 번째 미션 루트. 붉은색은 계획된 루트이고 검은색은 실제 글라이더 이동 경로



그림 353 첫 번째 미션 후에 손상된 글라이더 꼬리 방향타(digifin)

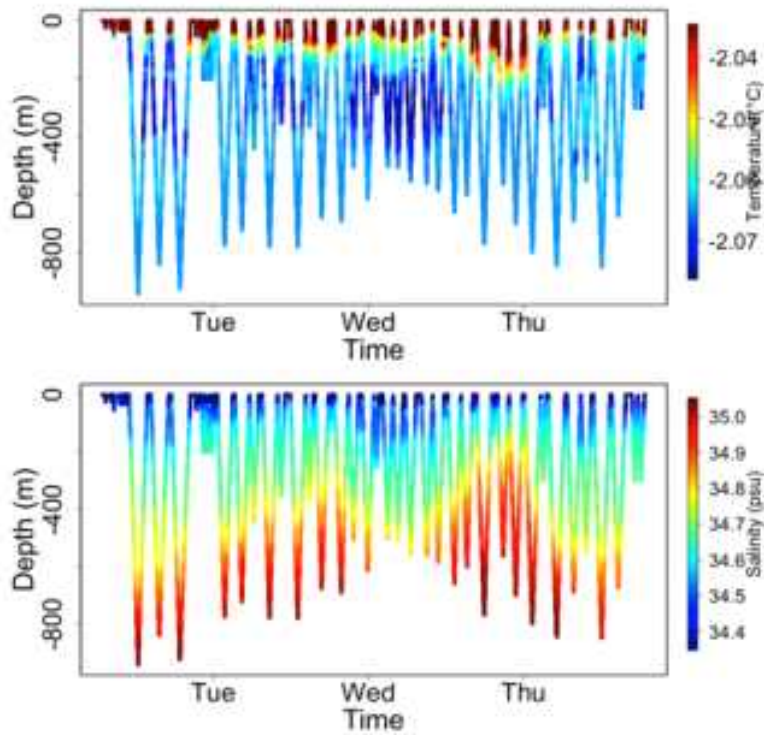


그림 354 첫 번째 미션에서 획득한 온도(상) 염분(하) 관측 자료. 시간은 UTC 기준 시간이다

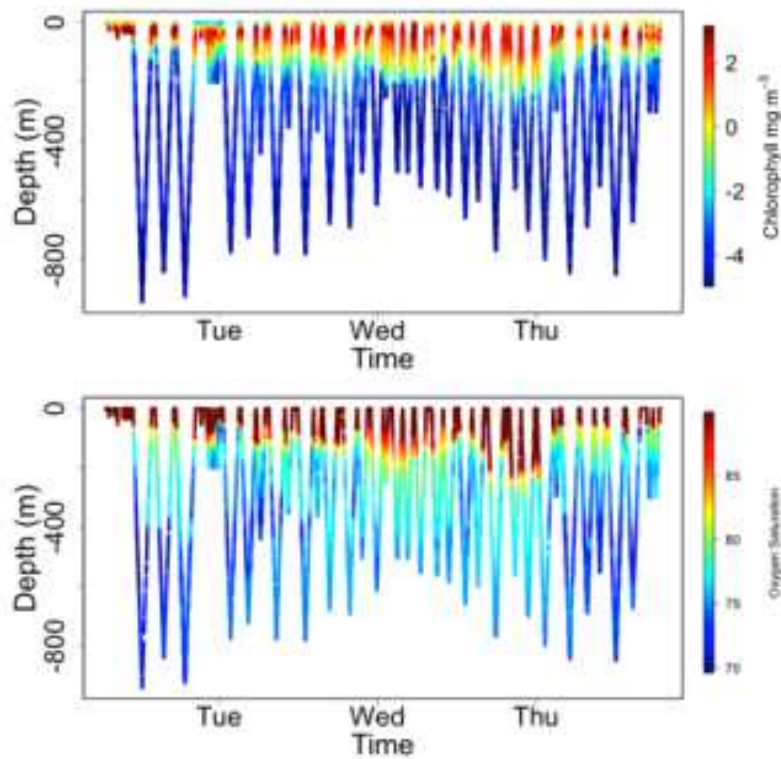


그림 355 첫 번째 미션에서 획득한 클로로필(상) 산소포화도(하) 관측 자료

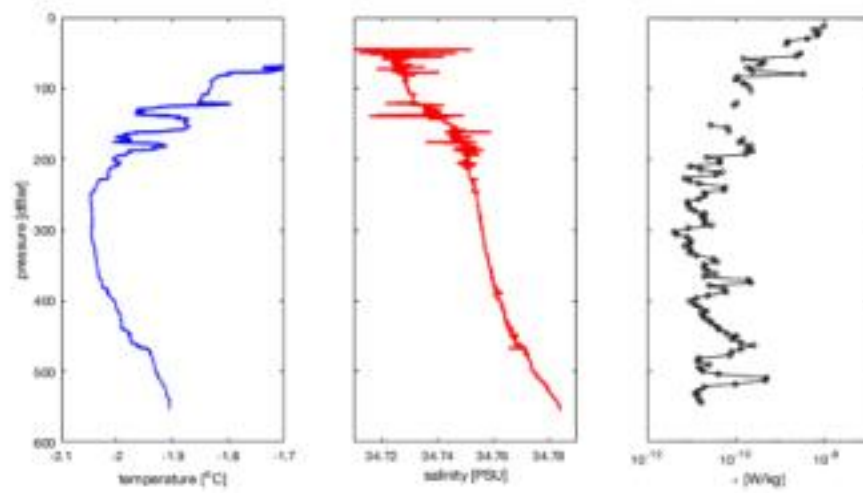


그림 356 첫 번째 미션 중 가장 강한 초저온수가 나온 Inexpressible Island의 온도(파란색), 염분(빨간색), 난류 분산율(검정색)

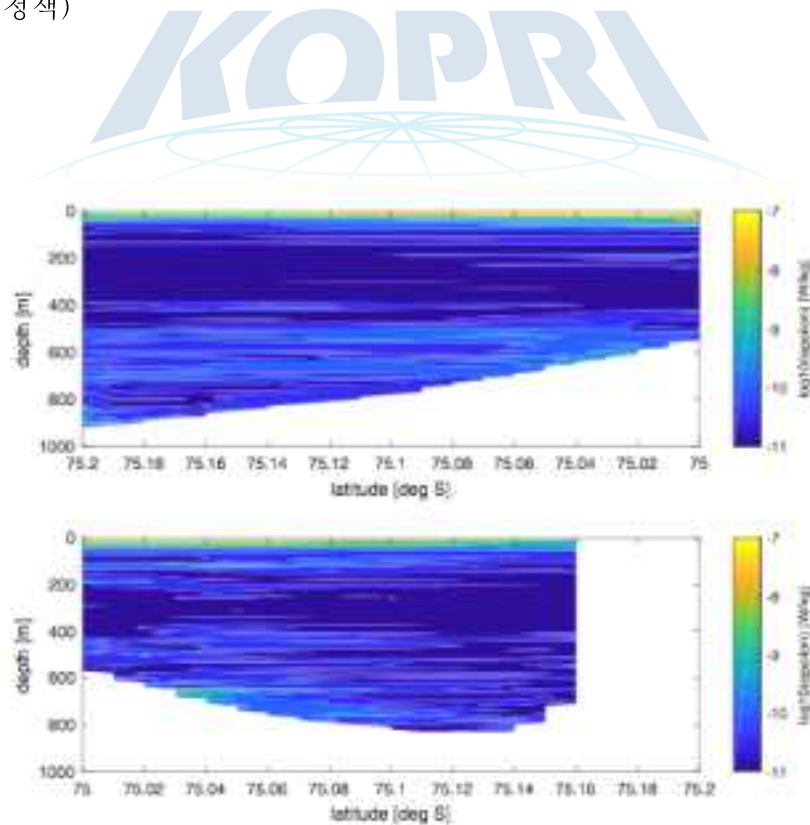


그림 357 첫 번째 미션에서 관측한 난류 분산율, 상단은 북쪽으로 운항 시의 프로파일이고 하단그림은 남쪽으로 운항 시 관측한 프로파일이다

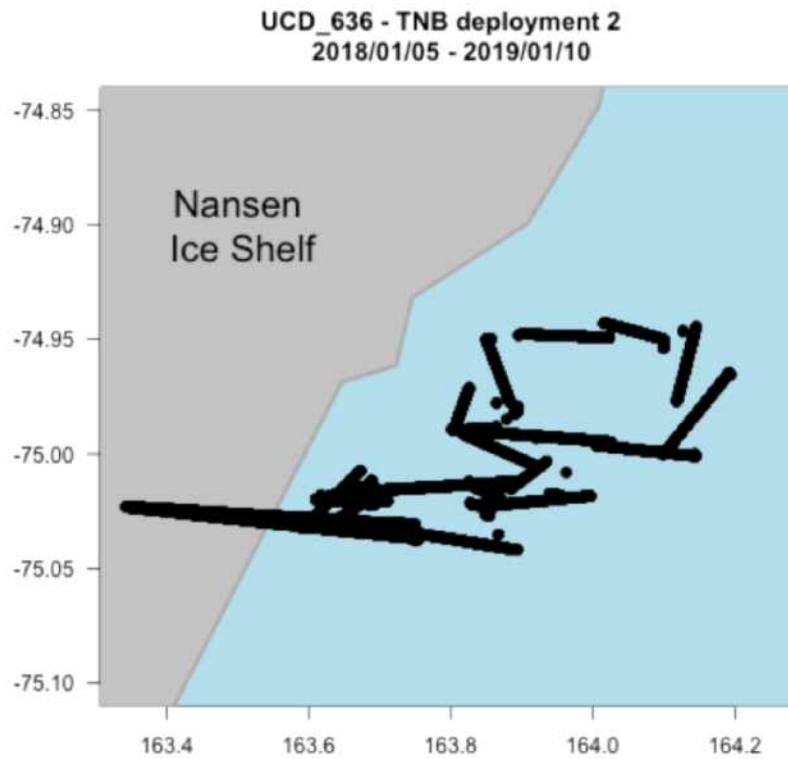


그림 358 난센 빙붕 하부 탐사를 위한 두 번째 미션 운항 경로

극지연구소

난센 빙붕 하부 탐사가 끝난 후 글라이더를 회수하지 않고 북쪽으로 이동하여 강한 활강풍이 불어오는 지역에서 고염분 대륙붕수 생성과 관련된 해수 특성을 관측하기 위한 박스모양으로 탐사를 수행하였다 (그림 358). 그림 359과 360는 두 번째 미션에서 관측한 수온, 염도, 클로로필, 산소 포화도이고 그림 361은 난센 빙붕 하부에서 관측한 수온 프로파일이다. 그림 362는 박스모양 탐사에서 관측된 수온 프로파일이다.

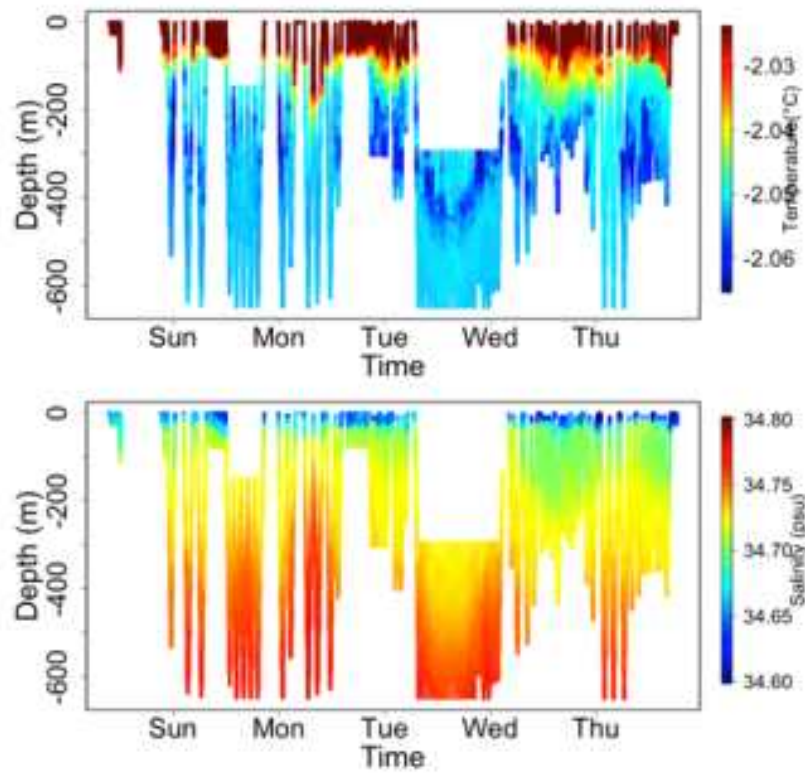


그림 359 두 번째 미션에서 획득한 온도(상) 염분(하) 관측 자료

극지연구소

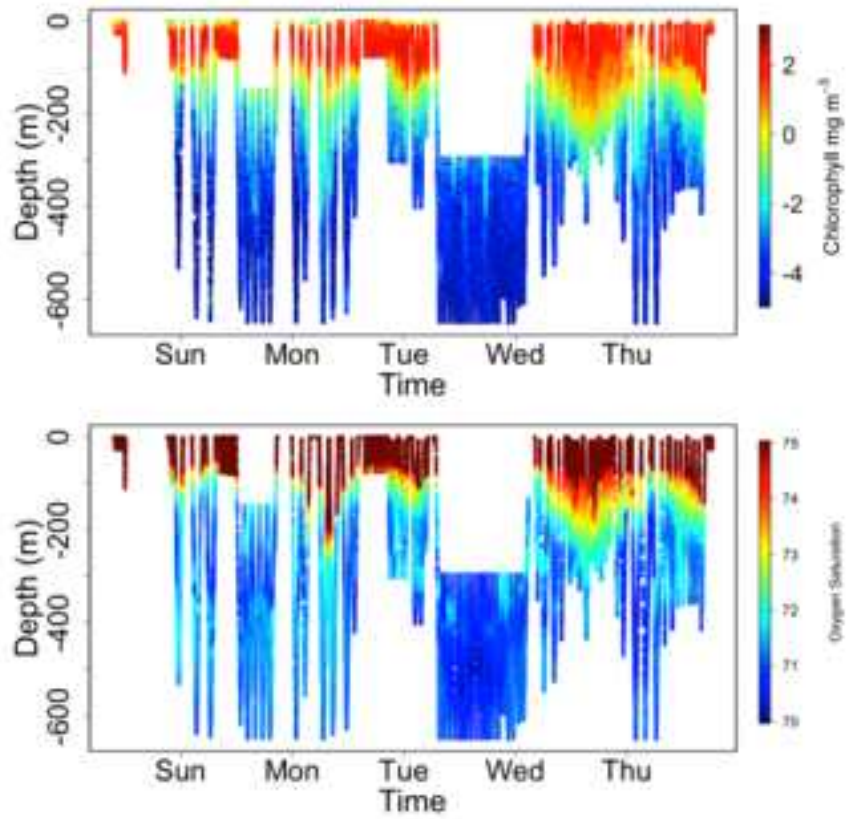


그림 360 두 번째 미션에서 획득한 클로로필(상) 산소포화도(하) 관측 자료

극지연구소

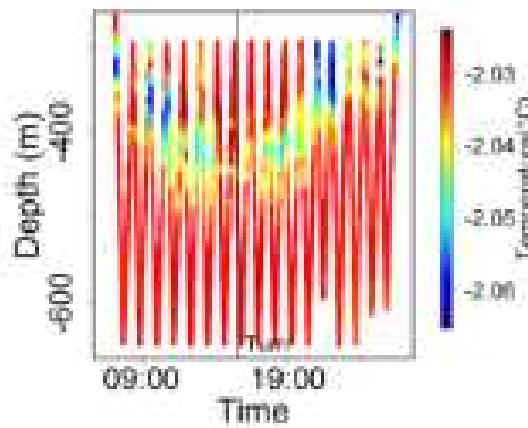


그림 361 난센 빙붕 하부의 온도 프로파일

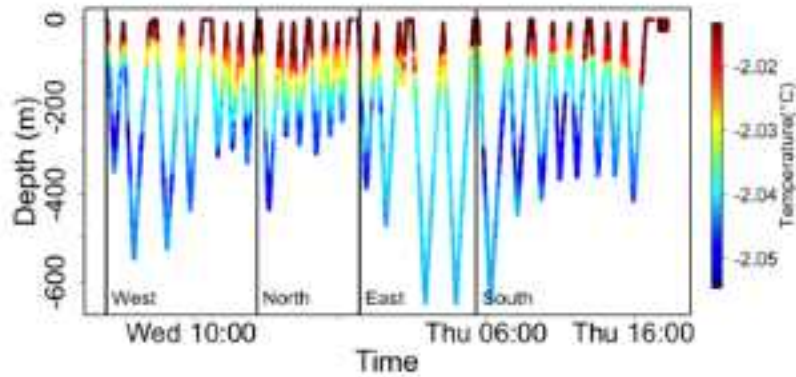


그림 362 두 번째 미션 후반부 박스 미션에서 관측한 수온 프로파일

아래의 CTD 관측에서는 과거에 관측되지 않았던 온난층이 관측되었는데, 이를 확인하기 위하여 글라이더 세 번째 미션을 2019년 1월 13일 22:00 LT부터 1월 14일 4:40 LT에 수행되었으며 그 경로는 그림 363과 같다. 타겟 지역은 아래에서 온난층이 관측된 CTD 지점을 주변으로 얼음이 없는 지역을 설정하였다. 그림 364와 365는 세 번째 미션에서 관측한 수온, 염도, 클로로필, 산소포화도 그래프이다. 150 m 깊이에서 온난층을 발견하였으며 이 온난층은 온도가 높음에도 불구하고 산소포화도가 높은 것을 확인할 수 있다.

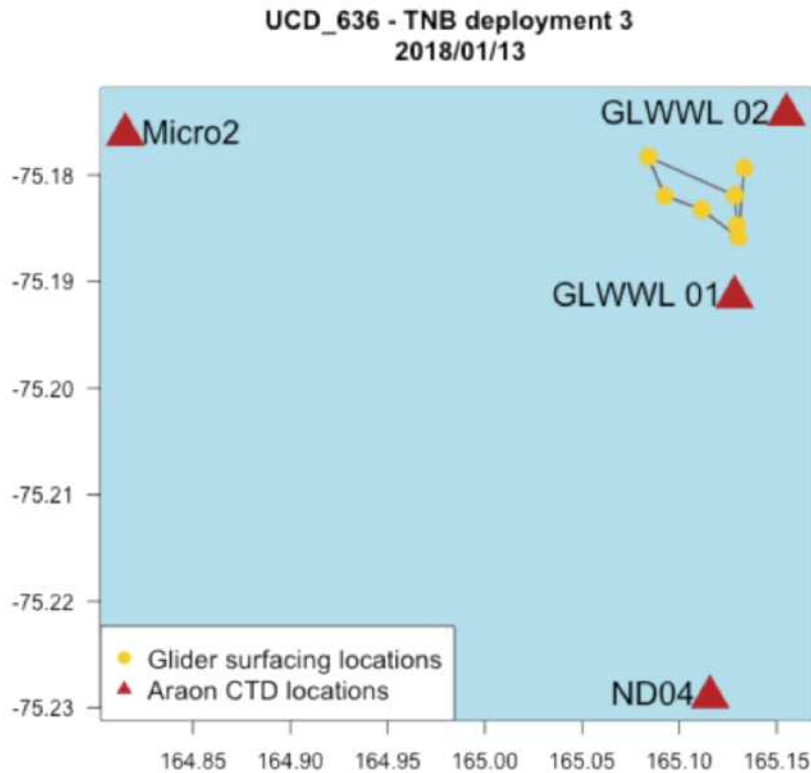


그림 363 온난층 관측을 위한 글라이더 세 번째 미션 탐사 경로

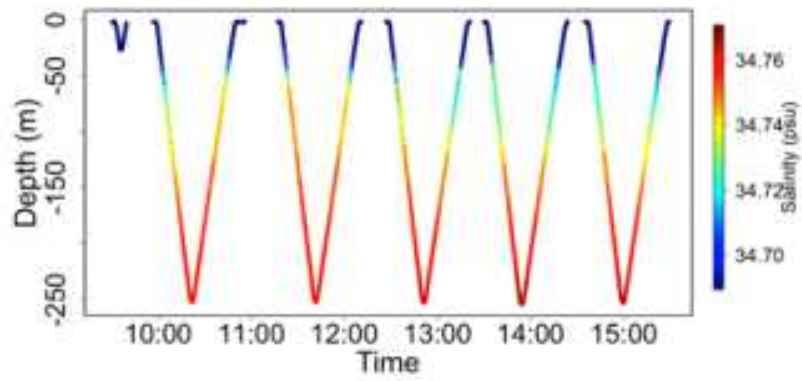
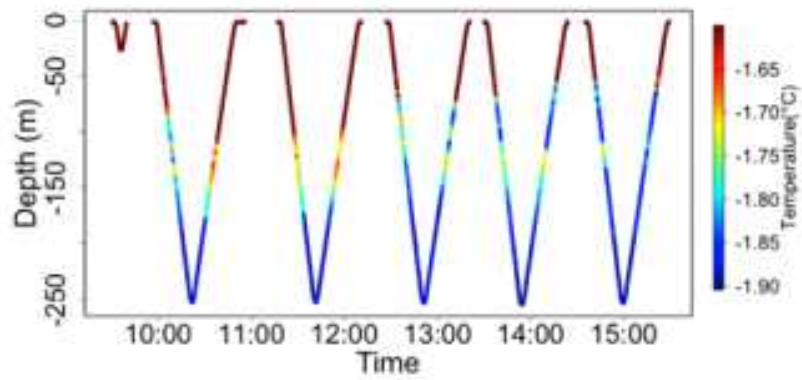


그림 364 세 번째 미션에서 획득한 온도(상) 염분(하) 관측 자료

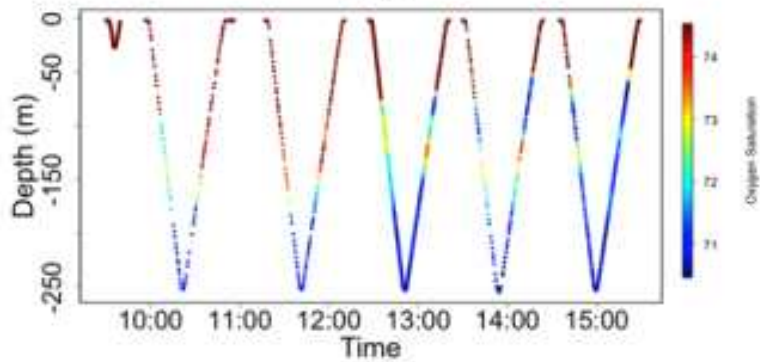
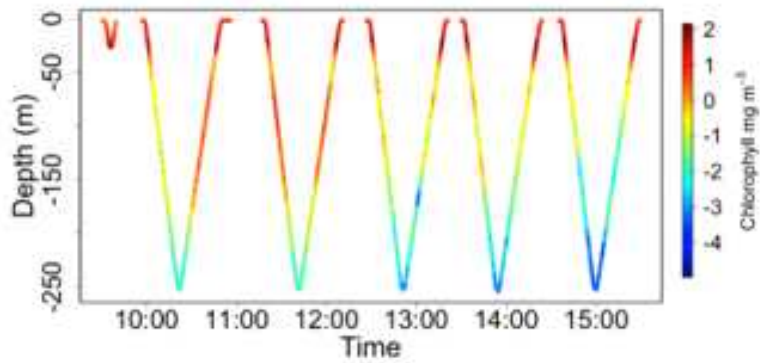


그림 365 세 번째 미션에서 획득한 클로로필(상) 산소포화도(하) 관측 자료

다. 관측자료 Quality Control

표 51 남극 탐사 획득 해양 자료 및 품질 관리 (Quality Control) 현황

관측 시기	획득 해양 자료	품질 관리 (QC) 현황	KPDC doi
2014. 12. 11 ~ 12. 16 (ANA05A, 14/15)	23개 정점 CTD, LADCP 자료	QC 완료	CTD: https://dx.doi.org/doi:10.22663/KOPRI-KPD C-00001062.1 LADCP: https://dx.doi.org/doi:10.22663/KOPRI-KPDC-00001064.1
2015. 12. 08 ~ 12. 15 (ANA06A, 15/16)	22개 정점 CTD, LADCP 자료	QC 완료	CTD: https://dx.doi.org/doi:10.22663/KOPRI-KPD C-00000601.1 LADCP: https://dx.doi.org/doi:10.22663/KOPRI-KPDC-00001061.1
	DITN mooring 회수 자료 (약 1년 계류)	QC 완료	https://dx.doi.org/doi:10.22663/KOPRI-KPDC-00001060.1
2017. 01. 26 ~ 02. 15 (ANA07C, 16/17)	53개 정점 CTD, LADCP 자료	QC 완료	CTD: https://dx.doi.org/doi:10.22663/KOPRI-KPD C-00001063.1 LADCP: https://dx.doi.org/doi:10.22663/KOPRI-KPDC-00001065.1
	DITN mooring 회수 자료 (약 1년 계류)	QC 완료	https://dx.doi.org/doi:10.22663/KOPRI-KPDC-00000749.1
2018. 03. 04 ~ 03. 13 (ANA08C, 17/18)	42개 정점 CTD, LADCP 자료	QC 완료	CTD: https://dx.doi.org/doi:10.22663/KOPRI-KPD C-00000895.1 LADCP: https://dx.doi.org/doi:10.22663/KOPRI-KPDC-00000896.1
	DITS mooring 회수 자료 (약 1년 계류)	QC 완료	https://dx.doi.org/doi:10.22663/KOPRI-KPDC-00000897.1
	DITN mooring 회수 자료 (약 1년 계류)	QC 완료	https://dx.doi.org/doi:10.22663/KOPRI-KPDC-00000898.1
	DITD mooring 회수 자료 (약 1년 계류)	QC 완료	https://dx.doi.org/doi:10.22663/KOPRI-KPDC-00000906.1
2018. 12. 31 ~ 2019. 01. 15 (ANA09B, 18/19)	65개 정점 CTD, LADCP 자료	QC 완료	CTD: https://dx.doi.org/doi:10.22663/KOPRI-KPDC-00001165.1 LADCP: https://dx.doi.org/doi:10.22663/KOPRI-KPDC-00001166.1

			64.1
	TNBD mooring 회수 자료 (약 1년 계류)	QC 완료	https://dx.doi.org/doi:10.22663/KOPRI-KPD C-00001167.1
	DITN mooring 회수 자료 (약 1년 계류)	QC 완료	https://dx.doi.org/doi:10.22663/KOPRI-KPD C-00001166.1
	DITD mooring 회수 자료 (약 1년 계류)	QC 완료	https://dx.doi.org/doi:10.22663/KOPRI-KPD C-00001168.1

2014년부터 총 5회에 걸친 남극 하계 관측을 통해 획득한 해양 자료들은 모두 품질 관리를 완료하였다. Korea Polar Data Center(KPDC)에서는 위 표에 첨부된 doi를 통해 해당 자료들의 Metadata 정보를 확인할 수 있다. 품질 관리가 완료된 위 해양 자료들은 테라노바 만의 빙상-해양 상호작용 연구 뿐 아니라 빙상-해양 모델을 발전시키는데 유용하게 사용될 것이다.

(1) CTD 자료의 품질 관리 (QC) 시행 방법

모든 관측에서 CTD (Conductivity-Temperature-Depth) 장비는 Sea-Bird Electronics (SBE)사의 SBE 9plus CTD를 사용하였다. CTD는 이름에서처럼 기본적으로 해수의 전기전도도, 수온, 수심을 측정하는 해양 장비이다. 본 장비에 다른 센서들을 추가로 부착할 경우 용존산소, 광(光)양, 엽록소 형광, 탁도, pH, 질산염 농도 등의 추가적인 해수 특성을 측정할 수 있다. ARAON의 CTD는 수온과 전기전도도 센서가 dual (Primary, Secondary로 불림)로 장착되어 있으며 용존산소, 광양, 엽록소 형광, 탁도를 측정할 수 있는 센서가 추가로 장착되어 있다.

(가) 관측 전후 검보정 실시

CTD의 전기전도도 센서의 경우 시간이 지날수록 참값에 비해 낮은 값을 측정하게 되고 수온 센서의 경우 시간이 지날수록 참값과의 오차가 증가하기 때문에 우선은, 관측 전과 후에 수온과 전기전도도 센서를 검보정 할 필요가 있다. 검보정은 자료 처리 과정 중 센서를 통해 얻어지는 수온, 전기전도도 값이 참값에 가깝게 측정될 수 있도록 내부 함수의 상수값을 변형시켜주는 과정을 의미한다. 관측 당시의 정확한 전기 전도도와 수온 값을 얻기 위해서는 관측 전후 검보정 상수 값들을 이용, 아래 식에서 *slope*와 *offset* 값을 계산한다.

- ① $(corrected\ conductivity) = slope \times (computed\ conductivity) + offset$
- ② $(corrected\ temperature) = slope \times (computed\ temperature) + offset$

SBE사에서는 전기전도도는 *slope* 값을 통해 보정하기를 권장(*offset*은 0으로 고정)하고, 수온은 *offset* 값을 통해 보정하기를 권장 (*slope*는 1로 고정) 한다. 전기전도도의 경우 관측 전후 전기전도도 값 간의 *slope*는 다음과 같이 계산한다.

$$\textcircled{3} \text{ postslope} = \frac{\sum_{i=1}^n (\alpha_i)(\beta_i)}{\sum_{i=1}^n (\alpha_i)(\alpha_i)} \quad (\text{postslope} < 1)$$

$$\textcircled{4} \text{ slope} = 1 + (b/n)[(1/\text{postslope}) - 1]$$

위 식에서 α 는 관측 이후 검보정 상수를 이용하여 처리한 전기전도도 값을, 그리고 β 는 관측 전 검보정 변수를 이용하여 처리한 전기전도도 값을 의미한다. i 는 1부터 n 까지의 관측 정점의 수심을 의미한다. 그리고 b 는 관측 전 장비 보정 시기와 관측 시작 시기 간의 시간 차이 (day)를 n 은 관측 전과 관측 후 보정 시기 간의 시간 차이 (day)를 의미한다. ③, ④를 통해 계산된 *slope*를 ①에 넣어 주어 관측 시기 때의 정확한 전기전도도 값을 계산하게 된다.

수온의 경우는 관측 전후 수온 값을 이용해 *offset*을 다음과 같이 계산한다.

$$\textcircled{5} \text{ residual} = \text{instrument temperature} - \text{bath temperature}$$

$$\textcircled{6} \text{ offset} = b \times (\text{residual}/n)$$

위 식에서 *instrument temperature*는 관측 후 보정으로 얻어진 수온 값이고 *bath temperature*는 관측 전 보정 변수에 따라 계산된 수온 값이다. 둘의 차이를 *residual*로 정의하고 이 값에 관측 전 보정 시기와 관측 시기간의 시간 차이(day)를 곱하고 관측 전과 관측 후 사이의 시간 차이(day)로 나눠주면 *offset* 값을 계산할 수 있으며, ②로부터 관측 시기의 정확한 수온 값을 얻을 수 있다.

각 정점별 자료로 위의 계산을 수행한 뒤 계산된 *slope*와 *offset* 값을 모두 평균 내어 하나의 *slope*와 *offset* 값을 얻어낸 뒤 이 값들을 적용하여 관측 전후 검보정을 수행하였다. 아래 표는 관측 시기별 수온, 전기전도도, 용존산소 센서의 검보정 시기를 나타낸 것이고 관측별로 사용된 *slope*와 *offset* 값을 기입한 것이다.

<탐사 시기별 관측 전후 검보정 시기와 계산된 *slope*, *offset* 값>

a) 14/15 탐사 (2014. 12. 11 ~ 12. 16)

	sensor	serial #	관측 전 보정 시기	관측 후 보정 시기	<i>slope</i> (S) <i>offset</i> (O)
Primary	SBE3F (수온)	4995	2014. 05. 08	X	미적용
	SBE4C (전기전도도)	3586	2014. 05. 08	X	미적용
	SBE5T (압력)	1008	2014. 06. 09	X	미적용
Secondary	SBE3F (수온)	5111	2014. 05. 08	X	미적용
	SBE4C (전기전도도)	3587	2014. 05. 08	X	미적용
	SBE43 (용존산소)	1614	2012. 05. 26	X	미적용

b) 15/16 탐사 (2015. 12. 08 ~ 12. 15)

	sensor	serial #	관측 전 보정 시기	관측 후 보정 시기	<i>slope (S)</i> <i>offset (O)</i>
Primary	SBE3F (수온)	6019	2015. 07. 16	2017. 06. 24	<i>O</i> : 0.0002
	SBE4C (전기전도도)	4415	2015. 07. 07	2017. 06. 20	<i>S</i> : 1.00002770
	SBE5T (압력)	1241	2015. 08. 05	2017. 07. 07	
Secondary	SBE3F (수온)	5111	2014. 05. 08		
	SBE4C (전기전도도)	3587	2014. 05. 08		
	SBE43 (용존산소)	3190	2015. 07. 29	2017. 06. 30	

c) 16/17 탐사 (2017. 01. 26 ~ 02. 15)

1-5번 cast	sensor	serial #	관측 전 보정 시기	관측 후 보정 시기	<i>slope (S)</i> <i>offset (O)</i>
Primary	SBE3F (수온)	5191	2016. 02. 19	2017. 06. 24	<i>O</i> : 0.0003
	SBE4C (전기전도도)	3759	2016. 02. 19	2017. 06. 20	<i>S</i> : 0.99991710
	SBE5T (압력)	0932	2016. 03. 03	2017. 07. 06	
Secondary	SBE3F (수온)	5378	2016. 02. 19	2017. 06. 24	<i>O</i> : 0.0003
	SBE4C (전기전도도)	3801	2016. 02. 09	2017. 06. 20	<i>S</i> : 0.99991524
	SBE43 (용존산소)	1984	2016. 02. 23	2017. 06. 16	

6-76번 cast	sensor	serial #	관측 전 보정 시기	관측 후 보정 시기	<i>slope (S)</i> <i>offset (O)</i>
Primary	SBE3F (수온)	6019	2015. 07. 16	2017. 06. 24	<i>O</i> : 0.0008
	SBE4C (전기전도도)	4415	2015. 07. 07	2017. 06. 20	<i>S</i> : 1.00010379
	SBE5T (압력)	1241	2015. 08. 05	2017. 07. 07	
Secondary	SBE3F (수온)	5929	2016. 02. 26	2017. 06. 24	<i>O</i> : -0.0002
	SBE4C (전기전도도)	4575	2016. 03. 11	2017. 06. 20	<i>S</i> : 1.00011865
	SBE43 (용존산소)	3190	2015. 07. 29	2017. 06. 30	

d) 17/18 탐사 (2018. 03. 04 ~ 03. 13)

	sensor	serial #	관측 전 보정 시기	관측 후 보정 시기	<i>slope (S)</i> <i>offset (O)</i>
Primary	SBE3F (수온)	6019	2017. 06. 24	X	미적용
	SBE4C (전기전도도)	4575	2017. 06. 20	X	미적용
	SBE5T (압력)	0932	2017. 07. 06	X	미적용
Secondary	SBE3F (수온)	5191	2017. 06. 24	X	미적용
	SBE4C (전기전도도)	3801	2017. 06. 20	X	미적용
	SBE43 (용존산소)	1984	2017. 06. 16	X	미적용

e) 18/19 탐사 (2018. 12. 31 ~ 2019. 1. 15)

1-2번 cast	sensor	serial #	관측 전 보정 시기	관측 후 보정 시기	<i>slope (S)</i> <i>offset (O)</i>
Primary	SBE3F (수온)	4995	2017. 11. 22	X	미적용
	SBE4C (전기전도도)	3586	2017. 11. 22	X	미적용
	SBE5T (압력)	1008	2017. 11. 30	X	미적용
Secondary	SBE3F (수온)	5111	2017. 11. 22	X	미적용
	SBE4C (전기전도도)	3576	2017. 11. 22	X	미적용
	SBE43 (용존산소)	1614	2017. 11. 16	X	미적용

3번 cast	sensor	serial #	관측 전 보정 시기	관측 후 보정 시기	<i>slope (S)</i> <i>offset (O)</i>
Primary	SBE3F (수온)	4995	2017. 11. 22	X	미적용
	SBE4C (전기전도도)	3586	2017. 11. 22	X	미적용
	SBE5T (압력)	1008	2017. 11. 30	X	미적용
Secondary	SBE3F (수온)	5111	2017. 11. 22	X	미적용
	SBE4C (전기전도도)	3576	2017. 11. 22	X	미적용
	SBE43 (용존산소)	3434	2016. 12. 03	X	미적용

3-65번 cast	sensor	serial #	관측 전 보정 시기	관측 후 보정 시기	<i>slope (S)</i> <i>offset (O)</i>
Primary	SBE3F (수온)	4995	2017. 11. 22	X	미적용
	SBE4C (전기전도도)	3586	2017. 11. 22	X	미적용
	SBE5T (압력)	1008	2017. 11. 30	X	미적용
Secondary	SBE3F (수온)	5111	2017. 11. 22	X	미적용
	SBE4C (전기전도도)	3576	2017. 11. 22	X	미적용
	SBE43 (용존산소)	3231	2015. 09. 25	X	미적용

참고로 14/15, 17/18, 18/19 시기에는 센서의 관측 후 검보정이 수행되지 않아서 관측 전후 검보정을 실시하지 못하였다. 또한 용존산소 자료의 경우도 해수 샘플을 통해 직접 적정한 용존산소 값과 비교를 해서 검보정을 해야 하지만 14/15, 15/16, 16/17, 17/18, 18/19 시기 모두 해수 샘플에서 직접 용존산소 값을 적정하지 않아 용존산소 절대값 사용에는 주의해야 한다. 특히, 14/15 시기의 경우 관측 시기와 용존산소 센서 검보정 시기 간의 약 2년 차이가 존재하므로 용존산소 절대값의 신뢰도가 매우 떨어진다. 18/19 시기의 경우, 용존 산소 센서를 3번 교체하였는데 최종 사용한 센서의 검보정 시기가 2015년으로 용존산소 절대값의 신뢰도 역시 매우 떨어진다.

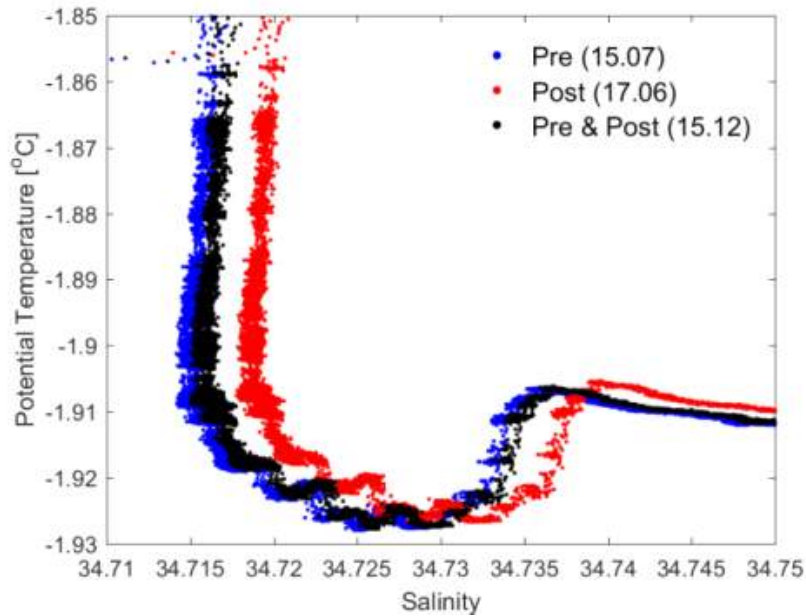


그림 366 관측 전후 검보정 적용 결과 예시 (15/16 탐사)

관측 전후 검보정을 적용하면 그림 366과 같은 결과를 얻을 수 있다. 그림 366은 15/16 탐사 때의 온위-염분 다이어그램으로 파란색 그래프는 관측 전 검보정 상수값을 이용해 처리한 결과, 빨간색 그래프는 관측 후 검보정 상수값을 이용해 처리한 결과, 검정색 그래프는 관측 전후 검보정을 적용해 처리한 결과에 해당한다. 그림에서 보듯이 관측 전후 검보정이 적용된 온위-염분 다이어그램이 관측 전과 관측 후 그래프의 사이에 위치하고 있는 것을 확인할 수 있으며 이는 관측 전후 검보정 적용으로 관측 시기 때의 정확한 수온, 염분 절대값이 얻어졌음을 의미한다.

(나) SBE data processing 프로그램 처리

관측 전후 검보정 적용은 관측 시기 때의 정확한 수온 및 염분 값을 얻기 위한 과정이라면 SBE data processing 프로그램을 이용한 CTD 자료 처리는 자료에 포함되어 있는 여러 오차 성분들을 제거하는 작업에 해당한다. CTD 원시자료는 hex 파일 (binary) 형태로 획득되고 원시자료를 SBE사에서 제공하는 SBE data processing 프로그램을 이용, 그림 367의 과정을 거쳐 처리하였다.



그림 367 SBE data processing 프로그램 처리 순서

과정들에 관하여 설명하면, 우선 Data conversion은 CTD 원시자료를 .cnv 형식(ascii 파일)으로 바꿔주는 과정에 해당한다. 본 과정에서는 장비 구성 및 센서의 보정 상수 등의 정보를 담은 .con 파일 지정(CTD cast별로 관측시 생성됨)이 필요하며 1초당 24번의 관측(24Hz)을 통해 얻은 원시자료를 텍스트 형태로 직접 확인할 수 있다. 또한 Data conversion 과정에서 얻은 자료를 이용하여 관측 전후 검보정을 통한 *slope*, *offset* 값을 계산한다.

Section 과정은 CTD관측시 센서들이 안정화 되고 펌프가 켜질 때까지 수심 30m 부근에서 대기하면서 얻어진 자료와 관측 완료 후 물 밖으로 CTD가 올라왔을 때 얻어졌던 자료들을 전기전도도 그래프를 통해 확인하여 해당 자료들을 제거하는 과정이다. 압력과 전기전도도 그래프를 확인하여 안정화 이전 자료와 물 밖에서 얻어진 자료들을 제거한다(그림 368 오른쪽 그림에서 파란색 원이 자료를 자르는 위치를 의미).

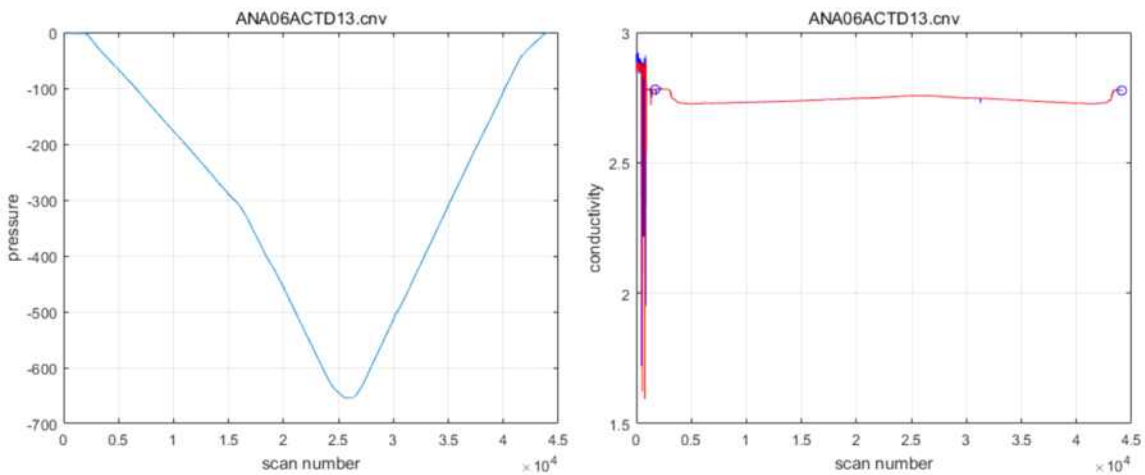


그림 368 scan number에 따른 압력과 전기전도도 예시 그래프

<Section 과정에서 뽑아낸 시기별 정점별 안정화된 scan number 구간>

a) 14/15, 15/16, 16/17

14/15			15/16			16/17		
Cast #	start	end	Cast #	start	end	Cast #	start	end
1	3210	26030	1	3000	28500	1	4070	52460
2	1590	55340	2	1500	31000	2	2410	50000
3	3110	90440	3	2290	30040	3	2040	28510
4	4200	48800	4	1970	81600	4	1200	39490
5	3160	45220	5	2410	53500	5	5400	63790
6	3380	57500	6	1530	60400	6	2000	50800
7	2930	49370	7	1720	55800	7	1500	53200
8	5200	70500	8	1600	53000	8	2400	49100
9	4070	55930	9	2500	49200	9	2000	43000
10	3520	53000	10	2500	41600	10	1900	44500

11	4320	47070	11	1800	52500	11	3800	50500
12	2950	42000	12	1600	56800	12	1750	71980
13	4720	90900	13	1920	43800	13	7830	75850
14	3460	68000	14	2340	65720	14	7280	70510
15	4300	42200	15	1670	45400	15	1590	53500
16	2590	46100	16	2300	72600	16	2830	51090
17	2170	66900	17	3500	51090	17	3110	49840
18	4910	60560	18	2120	69850	18	6690	67000
19	3800	52000	19	2400	64800	19	1850	62340
20	2850	70140	20	1090	42250	20	5720	59600
21	2410	57000	21	1850	60240	21	7000	50900
22	2740	39770	22	1590	53500	22	6150	52600
23	5000	52740				23	1900	45600
						24	13000	69770
						25	5040	56000
						26	3050	46000
						27	5720	61700
						28	7500	62020
						29	7080	49000
						30	8220	58200
						31	4870	84000
						32	6690	59500
						33	7500	73500
						34	9000	58000
						35	7500	51000
						36	13000	75490
						37	1700	64600
						38	3000	66500
						39	1700	67200
						40	1750	62000
						41	5080	60890
						42	5190	53900
						43	3250	51090
						44	2660	67000
						45	3110	57400
						46	15760	73640
						47	2000	63000
						48	6750	72900
						49	8790	68470
						50	2500	52600
						51	2010	48790
						52	4210	53150
						53	8000	51500
						54	3000	49600
						55	5000	53500
						56	5000	51200
						57	4900	53800
						58	4900	55400
						59	3800	52000
						60	1170	50000
						61	3660	52000

		62	5000	51400
		63	5000	52000
		64	4000	51000
		65	3000	50500
		66	2840	50000
		67	4000	50000
		68	3500	50000
		69	10000	70000
		70	8000	56500
		71	6720	56300
		72	5000	52000
		73	7000	55800
		74	7000	52500
		75	5000	59290

b) 17/18, 18/19

17/18			18/19		
Cast #	start	end	Cast #	start	end
1	4720	92290	1	13960	112660
2	9000	81400	2	12330	85495
3	7980	85750	3	12625	74955
4	8390	79000	4	10265	82400
5	3790	63310	5	9305	93515
6	5590	53720	6	9885	83200
7	2010	44760	7	14480	96605
8	10240	64000	8	12005	80475
9	8750	74930	9	12765	72180
10	9750	62200	10	23920	89485
11	9590	64500	11	11870	68945
12	1210	67180	12	21210	73050
13	10000	66140	13	14180	88760
14	1560	73450	14	14480	86160
15	1200	78430	15	10565	71800
16	8000	82350	16	7985	74275
17	10000	57900	17	12490	68845
18	7280	69400	18	10080	72875
19	1600	60080	19	9005	73575
20	8750	70600	20	8255	65505
21	3500	8000	21	6580	42525
22	2120	73640	22	7535	50565
23	1380	76400	23	8015	73085
24	1520	113500	24	12070	71775
25	2500	74930	25	13340	93715
26	1350	80560	26	11640	65130
27	1100	55230	27	10295	73680
28	2500	90670	28	8465	71745
29	11300	82840	29	8915	68550
30	1350	84920	30	8970	92170
31	3000	92280	31	7405	80110
32	2200	8400	32	5950	60650

33	10780	73800	33	12335	74000
34	5000	48950	34	8700	90690
35	26000	77600	35	8680	72260
36	12330	83240	36	7710	88155
37	8410	90100	37	12110	61960
38	5000	98200	38	12300	68825
39	6000	81100	39	11500	69600
40	4000	59990	40	8980	79950
41	6000	55800	41	13305	76955
42	5000	86000	42	5780	77930
43	5000	70320	43	8770	67505
44	3000	69210	44	7785	65295
			45	18960	80110
			46	10240	74940
			47	8630	69540
			48	11320	75780
			49	7125	60990
			50	3065	24635
			51	12150	45190
			52	10045	92910
			53	10070	82900
			54	10830	70930
			55	13940	83080
			56	5670	76770
57	8600	41710			
58	15560	71670			
59	8790	75450			
60	11900	73400			
61	10720	73615			
62	10230	67570			
63	9735	58500			
64	7440	56210			
65	15180	78500			

Wild edit 과정은 자료 중에서 비정상적인 자료 일명, bad data를 bad flag로 지정하여 다음 과정들에서 제외시키는 것이다. 본 과정에서는 일정 개수(보통 100개)의 자료를 한 구간(block)으로 지정하여 각 구간에서의 평균과 표준편차를 계산, 데이터와 평균의 차이가 표준편차의 2배 이상일 경우 일차로 해당 자료를 제거하고 이후 표준편차의 20배 이상일 경우 이차로 해당 자료를 제거하는 과정을 거친다.

Filter 과정은 CTD를 내릴 때 배의 pitching (앞뒤 흔들림), rolling (양옆 흔들림) 때문에 생기는 계단 모양의 불규칙적인 자료를 필터를 통해 제거하는 것이다. 이 과정에서는 압력에 대해서만 0.15초 저주파 필터를 적용해 자료를 평활화 (smoothing) 한다. SBE9plus CTD 장비는 1초에 24번의 자료를 얻는제 0.15초 저주파 필터를 적용할 경우 약 4개 정도의 압력 자료 내에서의 변동을 제거하게 된다.

Loop edit 과정은 CTD 장비의 하강 속도를 기준으로 하강 속도가 0.25m/s보다 느릴 때의 자료를 제거하는 것이다. 본 과정을 통해서서는 해수 채수 과정에서 특정 수심에 CTD 장비가 머물러 있으면서 관측된 자료들을 주로 제거한다.

Align CTD 과정은 CTD 장비가 수온과 전기전도도를 측정할 때 센서의 반응 시간 차이로 인해 생기는 오차를 보정하는 것이다. 수온과 전기전도도를 고주파 필터 한 후 시간차(time lag)를 주면서 어떤 시간차에서 가장 높은 연관성을 가지는지 판단하여 수온과 전기전도도 간의 시간차 값을 결정한다. SBE9plus 장비가 자체적으로 시간차를 보정하도록 이미 0.073초를 일괄적으로 적용한 상태이므로 SBE사에서는 Align CTD 과정을 안 거치는 것을 추천하나 이는 관측 환경에 따라 다를 수 있으므로 본 CTD 자료 QC에는 적용을 하였다. Align CTD 과정은 주로 수온 약층과 같이 수온 변화가 급격한 층에서 매 정점마다 이루어지며 SBE data processing manual 상에서 제시한 Align CTD 과정에 필요한 식들을 MATLAB 코드로 옮겨 자체적으로 적용을 하였다.

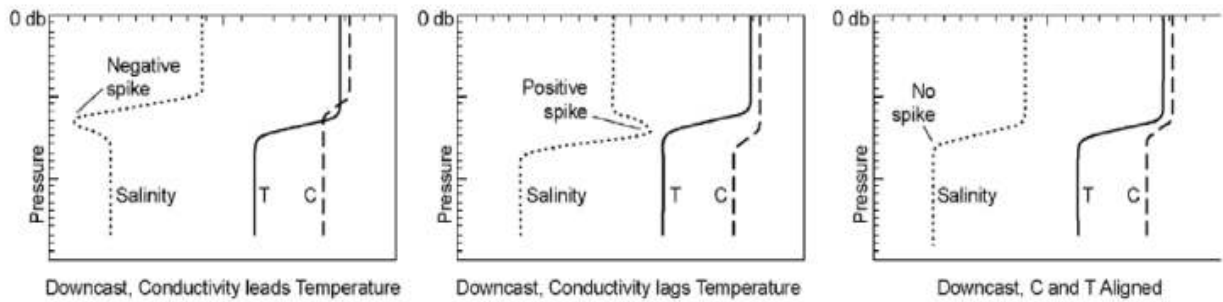
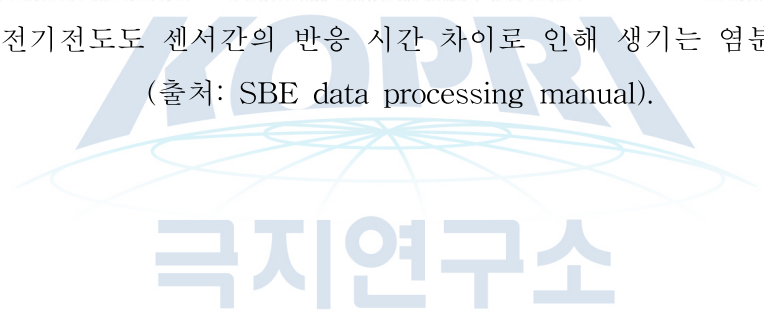


그림 369 수온과 전기전도도 센서간의 반응 시간 차이로 인해 생기는 염분 스파이크 예시 (출처: SBE data processing manual).



<Align CTD 과정에서 뽑아낸 시기별 정점별 수온과 전기전도도 센서 간 반응 시간차 (time lag, 초) (-0.01의 의미는 전기전도도 자료를 0.01초 앞당겨줘야 한다는 의미)>

a) 14/15, 15/16, 16/17

14/15			15/16			16/17		
Cast #	Primary	Secondary	Cast #	Primary	Secondary	Cast #	Primary	Secondary
1	-0.01	-0.02	1	-0.01	-0.03	1	-0.02	-0.07
2	0	0	2	-0.01	-0.03	2	-0.01	-0.05
3	-0.02	-0.03	3	0	0	3	-0.01	-0.06
4	-0.01	-0.01	4	0	0	4	-0.02	-0.07
5	-0.02	-0.03	5	-0.01	-0.01	5	-0.02	-0.07
6	0	-0.01	6	-0.02	-0.04	6	-0.01	0
7	-0.01	-0.02	7	-0.02	-0.04	7	-0.01	0.01
8	-0.01	-0.01	8	-0.02	-0.03	8	-0.02	0
9	-0.02	-0.03	9	-0.03	-0.03	9	-0.01	-0.01
10	-0.02	-0.01	10	-0.01	-0.03	10	-0.02	0.01
11	-0.02	-0.03	11	-0.04	-0.05	11	-0.04	-0.01
12	-0.02	-0.03	12	-0.01	-0.01	12	-0.01	-0.01
13	-0.01	-0.01	13	0	0	13	-0.01	0

14	-0.02	-0.04	14	-0.01	-0.03	14	0	0
15	0	-0.03	15	0	-0.01	15	-0.02	-0.01
16	-0.01	0	16	-0.01	-0.03	16	-0.01	-0.01
17	-0.01	0	17	-0.02	-0.03	17	-0.01	-0.01
18	-0.01	0.06	18	-0.01	-0.02	18	0	-0.01
19	-0.02	0.04	19	-0.01	-0.01	19	-0.02	-0.01
20	-0.02	0.04	20	0	-0.02	20	-0.01	-0.01
21	-0.02	0.05	21	-0.01	-0.03	21	-0.02	0
22	-0.02	0.11	22	-0.01	-0.03	22	0	-0.01
23	-0.01	0.01				23	-0.02	-0.02
						24	-0.01	-0.01
						25	0.05	-0.02
						26	-0.02	-0.02
						27	-0.02	-0.01
						28	0	0
						29	0	0
						30	-0.01	-0.01
						31	0	0
						32	-0.01	-0.01
						33	0	0
						34	-0.03	0
						35	0	-0.01
						36	0	-0.01
						37	0	-0.01
						38	-0.01	0
						39	0.01	0.01
						40	0	0
						41	0	0
						42	-0.01	0
						43	0	0
						44	0	0
						45	0	0
						46	-0.02	0
						47	0	-0.01
						48	-0.01	0
						49	0	-0.01
						50	-0.02	-0.01
						51	0	0
						52	0	0.01
						53	-0.01	0
						54	-0.01	0
						55	-0.01	0
						56	-0.01	-0.01
						57	-0.01	0
						58	0	0
						59	-0.01	0
						60	-0.01	0
						61	-0.01	0.04
						62	-0.01	0
						63	-0.01	0
						64	-0.01	0.01

		65	-0.02	0
		66	-0.02	0
		67	-0.01	0.02
		68	-0.01	0
		69	-0.01	-0.01
		70	-0.01	0
		71	-0.01	0
		72	0	0.13
		73	0	0
		74	-0.01	-0.02
		75	0	0.02

b) 17/18, 18/19

17/18			18/19		
Cast #	Primary	Secondary	Cast #	Primary	Secondary
1	-0.01	0	1	-0.05	-0.02
2	0.98	0	2	-0.02	-0.03
3	-0.9	0.02	3	-0.04	-0.02
4	-0.01	0	4	-0.03	-0.03
5	0	0.03	5	-0.04	-0.02
6	0	0	6	-0.03	-0.02
7	-0.01	0	7	-0.04	-0.02
8	-0.03	0	8	-0.04	-0.03
9	-0.01	0	9	-0.02	-0.01
10	-0.01	0.02	10	-0.03	-0.02
11	-0.03	0	11	-0.04	-0.02
12	-0.02	0.01	12	-0.04	-0.02
13	-0.02	-0.01	13	-0.03	-0.03
14	-0.03	0	14	-0.03	-0.03
15	-0.01	0	15	-0.03	-0.02
16	-0.01	0	16	0	0
17	-0.04	-0.01	17	-0.03	-0.04
18	-0.02	0	18	-0.03	-0.02
19	-0.01	-0.01	19	-0.03	-0.03
20	-0.03	0	20	-0.04	-0.02
21	0	NaN	21	-0.03	-0.02
22	-0.02	-0.01	22	-0.02	-0.02
23	-0.01	0	23	-0.03	-0.02
24	-0.08	-0.02	24	-0.03	-0.01
25	-0.19	-0.01	25	-0.02	-0.01
26	-0.01	0	26	-0.03	-0.03
27	-0.01	0.02	27	-0.03	-0.03
28	-0.02	-0.01	28	-0.03	-0.02
29	0	0	29	-0.04	-0.02
30	-0.01	-0.01	30	-0.04	-0.03
31	-0.01	-0.01	31	-0.03	-0.03
32	0	NaN	32	-0.04	-0.04
33	-0.02	-0.01	33	-0.04	-0.02

34	-0.04	-0.01	34	-0.03	-0.03
35	0	0.01	35	-0.04	-0.03
36	0	-0.01	36	-0.03	-0.03
37	-0.01	-0.01	37	-0.03	-0.02
38	-0.02	-0.01	38	-0.03	-0.03
39	-0.02	-0.01	39	-0.02	-0.05
40	-0.01	-0.01	40	-0.04	-0.02
41	-0.01	-0.01	41	-0.04	-0.04
42	-0.02	-0.02	42	-0.03	-0.03
43	-0.01	0.01	43	-0.04	-0.02
44	-0.02	-0.01	44	-0.03	-0.02
			45	-0.03	-0.03
			46	-0.03	-0.02
			47	-0.03	-0.04
			48	-0.02	-0.01
			49	-0.01	-0.01
			50	-0.03	-0.02
			51	-0.01	-0.01
			52	-0.04	-0.03
			53	-0.03	-0.03
			54	-0.04	-0.03
			55	-0.04	-0.03
			56	-0.01	0
			57	-0.03	-0.01
			58	-0.02	-0.02
			59	-0.03	-0.04
			60	-0.03	-0.03
			61	-0.03	-0.02
			62	-0.03	-0.03
			63	-0.03	-0.03
			64	-0.01	-0.01
			65	-0.03	-0.02

CellTM 과정은 열 관성 (thermal lag) 효과에 의한 오류를 보정하는 것이다. 열 관성효과는 CTD가 따뜻한 해수에서 차가운 해수로 이동할 때 CTD에 남아있는 잔류 열로 인해 측정되는 해수의 온도가 원래보다 상승하는 것을 의미한다. 이러한 온도 상승은 전기전도도의 상승을 유발시켜 참 값보다 높은 염분 값이 산출되게 된다. 본 과정에서는 정해진 공식에 따라 전기전도도에 대한 보정치를 계산하여 대입하게 되는데 이 때 사용되는 보정치 값이 thermal anomaly amplitude (α)와 thermal anomaly time constant (β)이고 SBE사에서 추천하는 값은 $\alpha = 0.03$, $\beta = 7$ 이다. 그러나 이 보정치 적용의 적합성에 관해서는 많은 연구들이 진행되었고 본 CTD QC 과정에서는 CTD 장비를 내릴 때와 올릴 때 염분 값의 차이를 최소로 하는 α 와 β 를 정점별로 각각 계산하여 적용해야 한다는 Morison 등[1994] 논문을 참고하였다. 이 역시 Align CTD 과정과 마찬가지로 SBE data processing manual 상에서 제시한 CellTM 과정에 필요한 식들을 MATLAB 코드로 옮겨 자체적으로 적용하였다. 본 과정을 통해 계산한 α 와 β 값이 각각 0.045, 26보다 큰 값이 계산되거나 CellTM을 적용한 뒤의 염분 프로파일이 내릴 때와 올릴 때의 염분 프로파일의 중간 위치가 아닌 구조를 왜곡시키는 모습을 보일 경우는 SBE에서 추천한 $\alpha = 0.03$, $\beta = 7$ 보정치 값을 사용하였다.

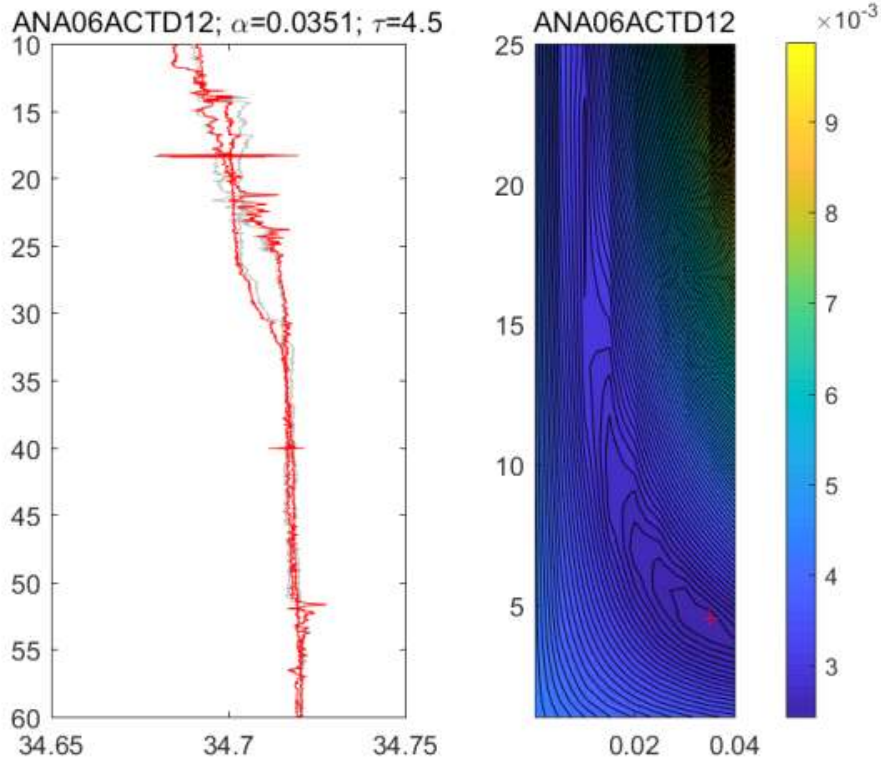


그림 370 CTD 장비를 내릴 때와 올릴 때 염분 값의 차이를 최소로 하는 α , β 값을 이용, CellTM 과정을 적용한 예시.

그림 370의 오른쪽 그림은 α , β 에 따른 CTD 장비를 내릴 때와 올릴 때 염분 값의 차이를 보여주는 것으로 $\alpha = 0.0351$, $\beta = 4.5$ 일 때 염분 차이가 최소가 되는 것을 확인할 수 있다. 이 값들을 적용하여 CellTM 과정을 적용하면 내릴 때와 올릴 때 염분 값의 차이가 줄어들게 된다(CellTM 적용 시 회색 그래프에서 빨강색 그래프로 변형됨).

<CellTM 과정에서 뽑아낸 시기별 정점별 α , β 값 >

a) 14/15, 15/16, 16/17

14/15					15/16					16/17				
#	Primary		Secondary		#	Primary		Secondary		#	Primary		Secondary	
	a	β	a	β		a	β	a	β		a	β	a	β
1	0.0201	3.5	0.03	7	1	0.0401	9.5	0.0151	15.5	1	0.0251	6.5	0.0051	17.5
2	0.0351	2.5	0.0251	5.5	2	0.0151	25	0.0151	15	2	0.0151	25	0.0051	25
3	0.0201	9	0.0301	2	3	0.0101	25	0.0101	19.5	3	0.0401	5.5	0.0301	4.5

4	0.0301	25	0.0201	25	4	0.0101	25	0.0351	25	4	0.0351	8.5	0.0251	6.5
5	0.0251	25	0.0051	16	5	0.0301	25	0.0401	2	5	0.0201	13	0.0251	8
6	0.03	7	0.03	7	6	0.0301	25	0.03	7	6	0.0301	9	0.0401	6.5
7	0.0401	1.5	0.0401	2	7	0.03	7	0.0401	5.5	7	0.0151	22.5	0.0201	17
8	0.0001	15	0.0401	1	8	0.0401	3	0.0401	1	8	0.0401	5.5	0.0401	10
9	0.03	7	0.03	7	9	0.03	7	0.03	7	9	0.0401	22	0.03	7
10	0.03	7	0.03	7	10	0.0001	23.5	0.0401	1	10	0.03	7	0.03	7
11	0.0401	1.5	0.0351	1	11	0.0401	8.5	0.0151	25	11	0.0401	14	0.0351	25
12	0.0401	5.5	0.03	7	12	0.0351	4.5	0.0401	1.5	12	0.0401	11	0.0401	11
13	0.03	7	0.03	7	13	0.0101	22	0.0051	25	13	0.03	7	0.03	7
14	0.0401	4.5	0.0401	5.5	14	0.0401	2.5	0.0251	3	14	0.0401	24.5	0.0401	23.5
15	0.03	7	0.03	7	15	0.0151	14	0.0101	21.5	15	0.0401	8	0.0251	13
16	0.0201	23	0.0151	25	16	0.03	7	0.03	7	16	0.0151	7.5	0.0201	9.5
17	0.0301	2.5	0.0401	1	17	0.0401	5.5	0.0401	4	17	0.0201	25	0.0351	10
18	0.0401	23.5	0.03	7	18	0.03	7	0.03	7	18	0.0301	8	0.0401	5.5
19	0.0101	25	0.0401	4.5	19	0.0051	6	0.03	7	19	0.0401	5.5	0.0401	5
20	0.0201	18.5	0.0401	17	20	0.0401	6.5	0.0401	5	20	0.0401	6.5	0.0401	4.5
21	0.0401	1	0.0401	12.5	21	0.0401	6.5	0.0401	6	21	0.0151	23.5	0.0101	20.5
22	0.03	7	0.0401	5	22	0.0101	25	0.0101	25	22	0.0201	7.5	0.0151	21.5
23	0.0401	5.5	0.0401	16						23	0.0351	7	0.0401	5.5
										24	0.0201	2	0.0101	4
										25	0.03	7	0.0401	7
										26	0.0201	25	0.0201	25
										27	0.0401	23.5	0.0401	8
										28	0.0201	9	0.0401	5
										29	0.0201	15	0.0351	4
										30	0.0251	25	0.03	7
										31	0.0101	19	0.0051	25
										32	0.0351	7.5	0.0151	25
										33	0.03	7	0.0151	12.5
										34	0.03	7	0.03	7
										35	0.03	7	0.0051	20
										36	0.0401	10	0.0401	10.5
										37	0.0401	3.5	0.0401	2.5
										38	0.0201	25	0.0251	18.5
										39	0.03	7	0.03	7
										40	0.0401	2.5	0.0401	3.5
										41	0.03	7	0.03	7
										42	0.03	7	0.0351	7.5
										43	0.03	7	0.0351	8.5
										44	0.03	7	0.03	7
										45	0.0201	18	0.0401	10
										46	0.0151	25	0.0201	9.5
										47	0.0401	8.5	0.0401	21
										48	0.0251	25	0.0401	15.5
										49	0.03	7	0.03	7
										50	0.03	7	0.0401	1.5
										51	0.0101	14	0.03	7
										52	0.03	7	0.0401	5
										53	0.0401	1.5	0.0351	4
										54	0.03	7	0.03	7
										55	0.0251	24.5	0.03	7
										56	0.03	7	0.03	7
										57	0.0401	2.5	0.0401	2.5
										58	0.03	7	0.03	7
										59	0.0401	23.5	0.0001	5.5
										60	0.0401	4.5	0.0001	3
										61	0.0401	9	0.0401	6.5
										62	0.03	7	0.0101	12

		63	0.03	7	0.03	7
		64	0.0401	2.5	0.0401	2.5
		65	0.0401	19	0.0201	25
		66	0.03	7	0.03	7
		67	0.03	7	0.03	7
		68	0.0051	25	0.0351	25
		69	0.0101	25	0.0201	25
		70	0.0201	19.5	0.0251	25
		71	0.0151	25	0.0151	3.5
		72	0.0151	25	0.03	7
		73	0.0101	25	0.03	7
		74	0.0401	1.5	0.03	7
		75	0.03	7	0.03	7

b) 17/18, 18/19

17/18					18/19				
#	Primary		Secondary		#	Primary		Secondary	
	a	β	a	β		a	β	a	β
1	0.03	7	0.03	7	1	0.0101	1	0.0101	1
2	0.03	7	0.03	7	2	0.03	7	0.0401	6
3	0.0001	3.5	0.03	7	3	0.03	7	0.03	7
4	0.03	7	0.03	7	4	0.0351	1.5	0.03	7
5	0.03	7	0.03	7	5	0.0401	2	0.0401	2.5
6	0.0151	3	0.03	7	6	0.0401	2	0.0301	2.5
7	0.0401	6	0.0201	22.5	7	0.03	7	0.0151	25
8	0.0201	25	0.03	7	8	0.0251	5.5	0.0151	14
9	0.0201	25	0.0201	20.5	9	0.0401	1.5	0.0151	25
10	0.0401	11.5	0.03	7	10	0.0401	8.5	0.0401	8
11	0.0201	14.5	0.0151	25	11	0.0401	7.5	0.0401	5.5
12	0.0201	17	0.03	7	12	0.0351	4.5	0.0351	5.5
13	0.0101	16.5	0.03	7	13	0.0101	25	0.0101	25
14	0.0401	2	0.03	7	14	0.0301	1	0.0401	1.5
15	0.0401	3	0.0401	5	15	0.0401	2	0.0051	25
16	0.03	7	0.0401	6.5	16	0.0101	14.5	0.03	7
17	0.0051	6	0.03	7	17	0.0151	21	0.0201	14
18	0.03	7	0.0251	11.5	18	0.0201	8	0.0151	12
19	0.0401	1.5	0.03	7	19	0.0151	13.5	0.0401	4.5
20	0.03	7	0.03	7	20	0.0201	9	0.0201	10
21	NaN	NaN	NaN	NaN	21	0.0251	7	0.0251	6
22	0.03	7	0.03	7	22	0.0151	9	0.0201	8
23	0.0401	8.5	0.03	7	23	0.0201	11.5	0.0351	5.5
24	0.0051	6	0.0401	6.5	24	0.0201	9	0.0201	9
25	0.0401	3	0.0151	6	25	0.0401	2.5	0.0151	15
26	0.0401	4	0.0351	8	26	0.0151	8	0.0101	20
27	0.0401	3	0.03	7	27	0.03	7	0.0401	1.5
28	0.03	7	0.03	7	28	0.03	7	0.03	7
29	0.03	7	0.03	7	29	0.0101	25	0.0101	25
30	0.0301	25	0.03	7	30	0.03	7	0.03	7
31	0.03	7	0.03	7	31	0.03	7	0.03	7
32	NaN	NaN	NaN	NaN	32	0.0151	12	0.0301	7
33	0.03	7	0.03	7	33	0.0151	19.5	0.0201	9
34	0.0401	9	0.0401	15.5	34	0.0401	13.5	0.0301	24.5
35	0.03	7	0.03	7	35	0.0201	8.5	0.0101	18
36	0.03	7	0.03	7	36	0.0151	9	0.0401	4.5
37	0.0401	14	0.0401	14.5	37	0.0051	1	0.03	7
38	0.03	7	0.03	7	38	0.0351	1	0.03	7
39	0.03	7	0.03	7	39	0.0401	2.5	0.0401	9
40	0.03	7	0.03	7	40	0.03	7	0.03	7

41	0.03	7	0.0051	8.5	41	0.03	7	0.0401	23.5
42	0.0401	11.5	0.0401	12	42	0.0151	3	0.0401	2
43	0.03	7	0.03	7	43	0.03	7	0.0101	25
44	0.03	7	0.03	7	44	0.03	7	0.03	7
					45	0.03	7	0.03	7
					46	0.0151	25	0.0151	20
					47	0.0401	24	0.03	7
					48	0.0101	25	0.03	7
					49	0.0401	5	0.0351	9
					50	0.0101	17	0.0101	19
					51	0.03	7	0.0401	18.5
					52	0.0301	4	0.0401	3.5
					53	0.0051	25	0.0051	25
					54	0.0101	21	0.0101	25
					55	0.0251	7	0.0251	5.5
					56	0.03	7	0.03	7
					57	0.0101	25	0.0101	10
					58	0.03	7	0.03	7
					59	0.0401	13	0.0401	15
					60	0.0101	23.5	0.0101	21
					61	0.0101	25	0.0151	12
					62	0.0101	25	0.0151	22.5
					63	0.0101	1	0.0301	1
					64	0.0051	25	0.0051	25
					65	0.0351	5	0.0151	14

CellTM 과정 이후 Bin average 과정을 통해 압력 1dbar 간격으로 전체 자료들을 평균하고 Derive 과정을 통해서 온위, 염분, Potential density, 용존산소 포화도, 수중 음속 등의 변수들을 추가로 계산하여 뽑아낸다. 마지막으로 Ascii out 과정을 통해서 자료 처리 과정에서 포함되었던 bad flag, header 등의 불필요한 정보를 제거하고 원하는 변수와 column label 등 원하는 정보만 추가하여 최종적인 ascii file 형태로 자료를 얻어내게 된다.

e) 밀도 역전 자료 및 이상 자료 값 제거

관측 전후 검보정을 적용하고 SBE data processing 순서에 따라 처리된 CTD 자료들은 추가적으로 온위-염분 다이어그램과 밀도 profile을 확인하여 제거되지 않은 이상 자료 값이나 밀도가 역전된 수심의 자료 값을 제거하였다. 참고로 밀도 역전은 두 수심 간의 밀도 차이가 0.0001 kg/m^3 (수온이 0.0002°C , 염분이 0.0001 변했을 때 생기는 밀도 변화) 이상이 날 경우를 기준으로 하였다. 그림 371은 CTD 원시자료와 QC 적용 후 온위-염분 다이어그램을 비교한 것으로 이상 자료 값들이 제거되고 일부 프로파일들은 QC 과정에서 제거된 것을 확인할 수 있다.

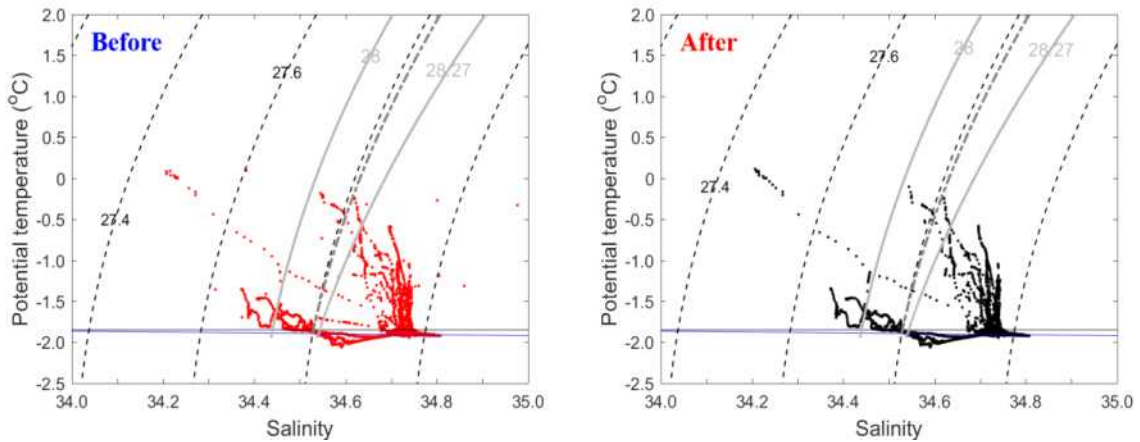


그림 371 15/16 CTD 원시자료(Before)와 QC 적용 후(After) 온위-염분 다이어그램 비교

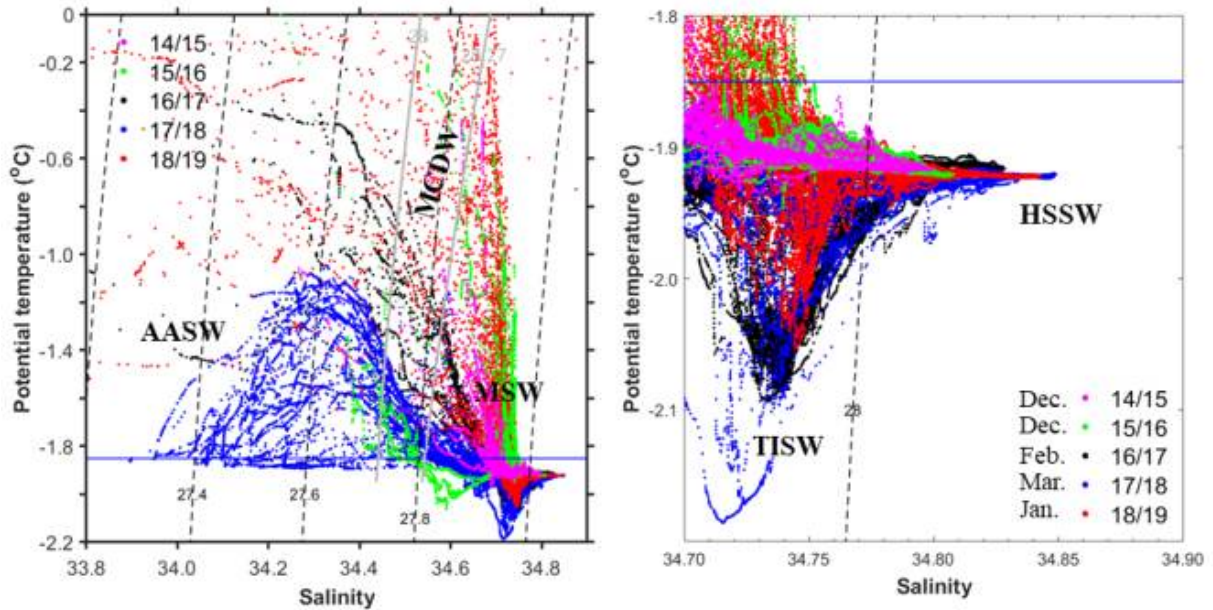


그림 372 QC 완료 CTD 자료를 이용한 5개년 동안의 온위-염분 다이어그램

QC가 완료된 CTD자료를 이용해서는 그림 372과 같이 테라노바 만의 물성 분석이 가능하다. 5개년 동안 테라노바 만에서는 표층부터 AASW (Antarctic Surface Water, 남극 표층수), MCDW (Modified Circumpolar Deep Water, 변형 환남극 심층수), MSW (Modified Shelf Water, 변형된 대륙붕수), TISW (Terra Nova Bay Ice Shelf Water, 테라노바 만 빙붕수), HSSW (High Salinity

Shelf Water, 고염분 대륙붕수)를 확인할 수 있었다. 그리고 관측 시기에 따라 온위-염분 구조가 확연히 다른 것(특히, 상층 저밀도 수심)을 확인할 수 있다.

(2) LADCP 자료의 품질 관리 (QC) 시행 방법

LADCP는 Lowered Acoustic Doppler Current Profiler의 약자로 LADCP를 CTD frame에 함께 장착하여 내림으로써 전 수심의 유속 자료를 얻을 수 있는 장비이다. CTD 자료와 마찬가지로 모든 관측에서 LADCP 자료가 함께 얻어졌다.

(가) LDEO (Lamont-Doherty Earth Observatory) 소프트웨어 처리

LADCP 자료 처리에는 크게 shear method (하와이 대학교 E. firing 개발)와 velocity inversion method (LDEO의 A.M. Thurnherr 개발)가 사용되는데 관측된 모든 LADCP 자료는 가장 많이 통용되어지고 있는 velocity inversion method를 사용한 LDEO 소프트웨어(9번째 버전)로 처리하였다. LDEO 소프트웨어를 이용한 LADCP 자료 처리에는 LADCP 원시 자료와 1Hz 간격으로 bin average된 CTD 자료 그리고 GPS 자료가 사용되었다.

LDEO 소프트웨어는 역시 MATLAB 코드로 이루어져 있으며 총 17 단계로 코드가 구성되어 있다. 단계 구성은 다음과 같다. 1: Load LADCP data, 2: Fix LADCP-data problems, 3: Load GPS data, 4: Get Bottom-track data, 5: Load CTD profile, 6: Load CTD time series, 7: Find surface and sea bed, 8: Apply pitch/roll corrections, 9: Edit data, 10: Form super ensembles, 11: Remove super-ensemble outliers, 12: Re-form super ensembles, 13: Re-load SADC data, 14: Calculate inverse solution, 15: Calculate shear solution, 16: Plot results and show warnings, 17: Save output. 소프트웨어의 전체적인 단계는 자료를 불러들인 후 자료의 에러 값을 제거하고 velocity inversion method를 이용 유속을 계산하는 형태로 이루어져 있다. 그림 373은 LDEO 소프트웨어를 통해 LADCP 자료를 처리하여 얻어낸 동서방향 유속 U(빨간색), 남북방향 유속 V(초록색)의 프로파일을 보여준다.

Station : ANA09B cast #9 Figure 1

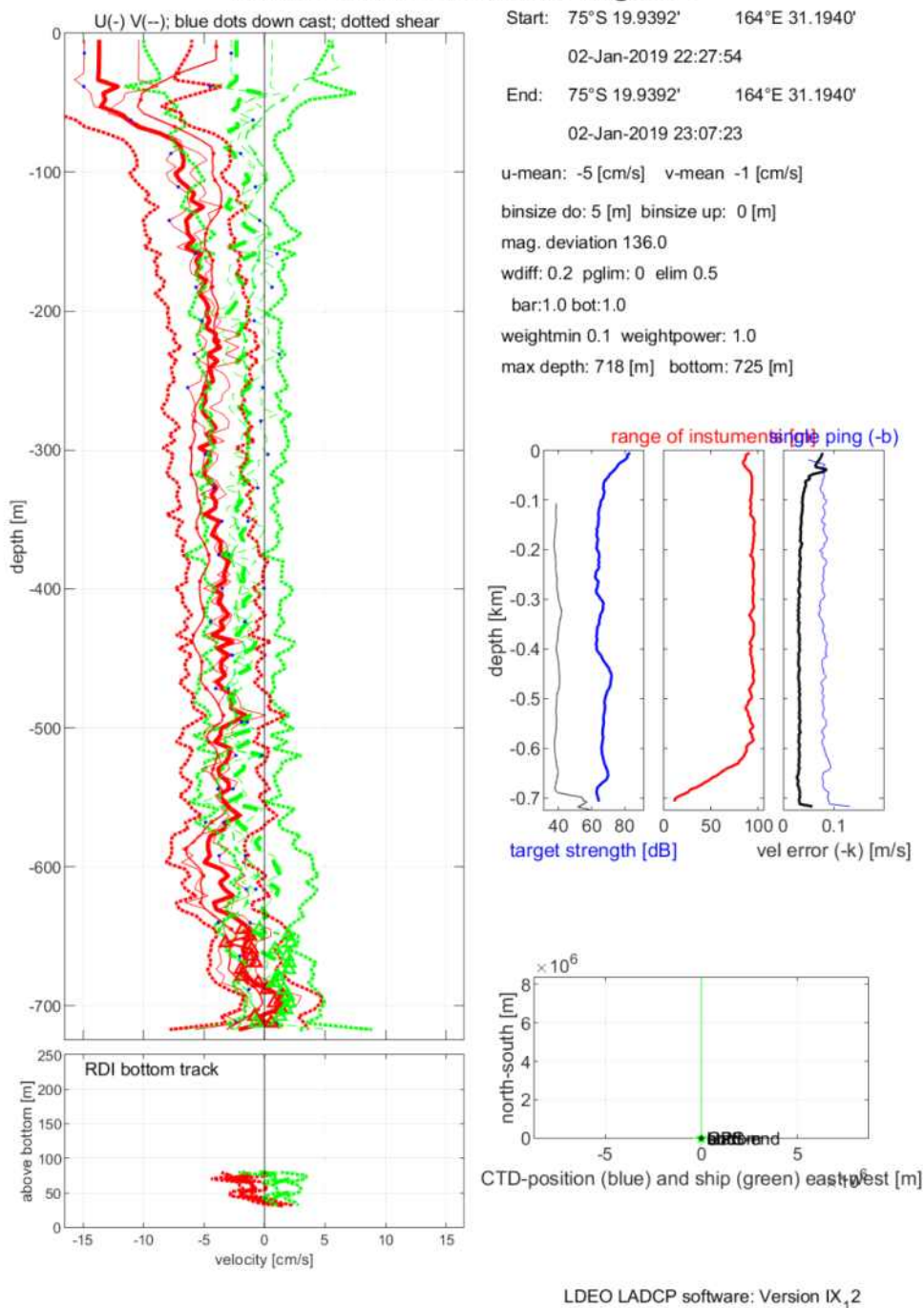


그림 373 LDEO 소프트웨어를 이용한 18/19 탐사 9번째 cast LADCP 자료 처리 결과 예시

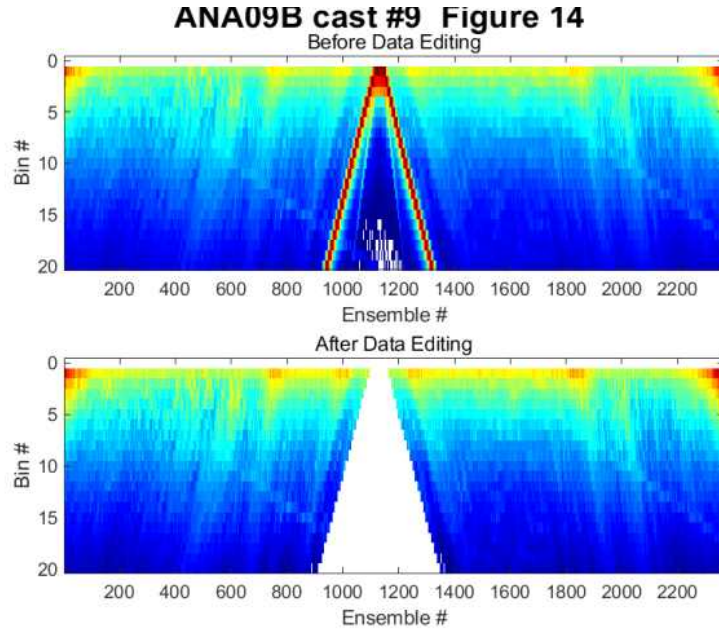


그림 374 LADCP 자료 QC 이전(위 그림)과 이후(아래 그림) Ensemble과 Bin 번호에 따른 신호 세기 예시

또한 그림 375와 같이 LDEO 소프트웨어를 통해 처리된 LADCP 최종 자료에는 바닥 수심(1100 Ensemble 근처)에서 얻어진 신호 세기가 매우 강하게 나타나는 자료들이 제거된 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 bottom track 유속도 그림 376의 왼쪽 아래 그림과 같이 더욱 정밀하게 얻을 수 있다.

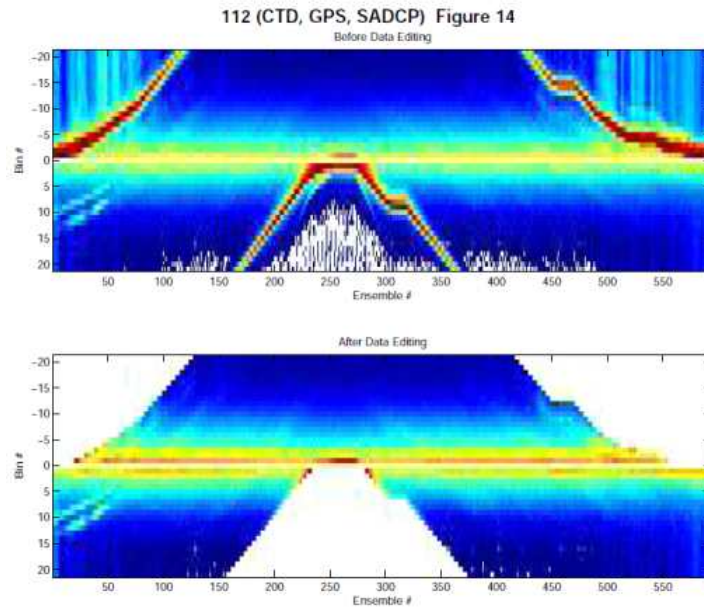


그림 375 Uplooker LADCP 및 bottom tracking을 할 경우의 Ensemble과 Bin 번호에 따른 신호 세기 (출처: LDEO data processing manual)

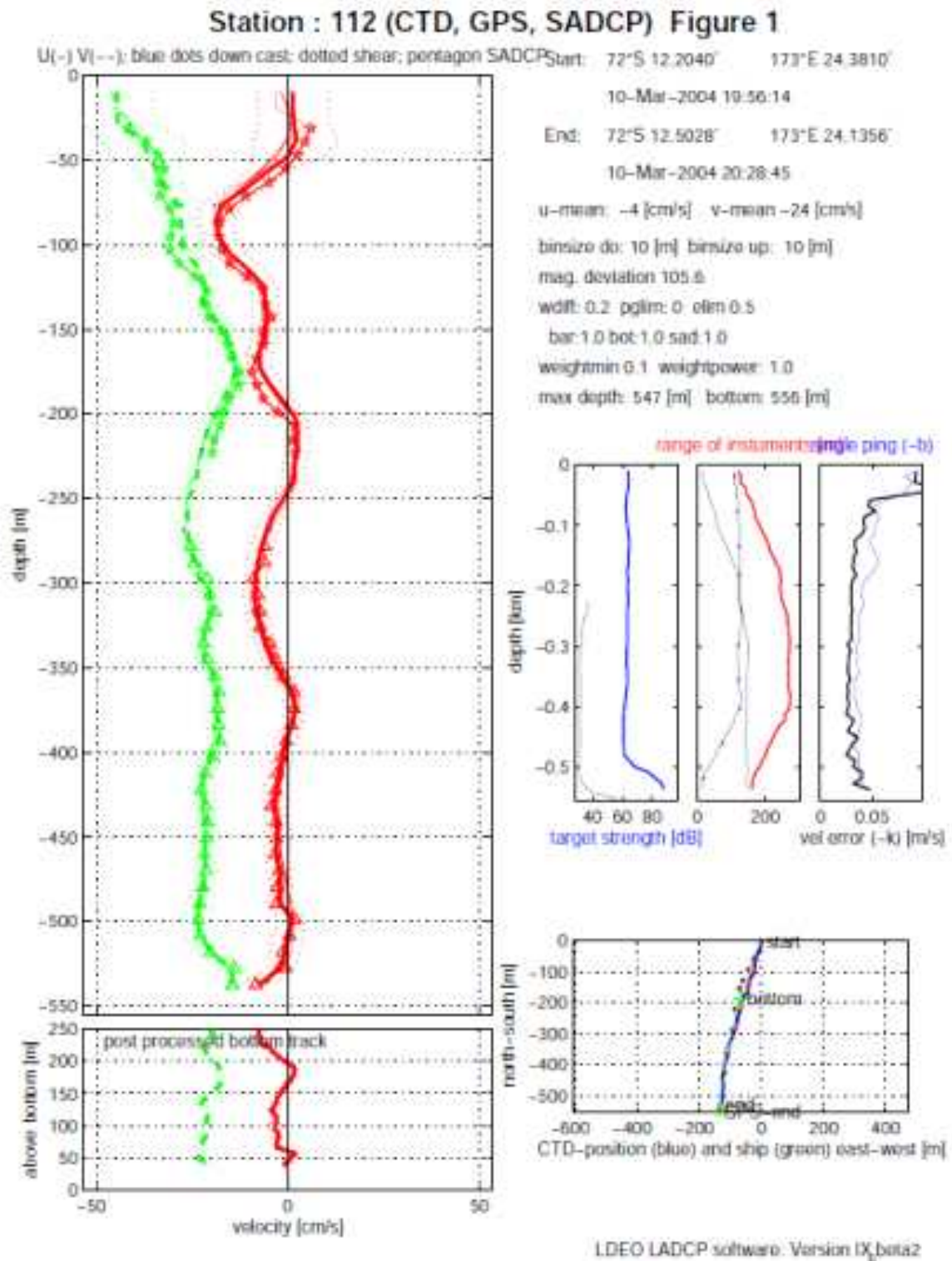


그림 376 Uplooker LADCP 및 SADC를 자료를 사용하고 bottom tracking을 할 경우의 개선된 모습의 유속 프로파일 모습 (출처: LDEO data processing manual)

현재 ARAON에는 downlooker LADCP 1대만이 장착되어 있는데 만약 uplooker LADCP를 추가로 장착하고 바닥 수심에서 약 5분간 대기하는 bottom tracking 실시 및 SADCP 자료를 LDEO 소프트웨어에 추가로 사용하면 그림 374, 그림 375와 같은 결과를 얻을 수 있다. 즉, 유속 값이 가지는 에러 값이 매우 줄어들고 바닥 수심에서 많은 넓은 bin 범위를 가지는 Ensemble을 많이 얻을 수 있어 (그림 372) bottom track 유속 역시 더욱 정밀하게 얻을 수 있다 (그림 376 왼쪽 아래 그림). 따라서 앞으로 LADCP자료의 더욱 정밀한 품질 관리를 위해 ARAON에 Uplooker LADCP를 추가할 필요가 있다.

(나) 조석 모델을 통한 조류의 유속 제거

처리된 LADCP 유속에는 해류의 유속 뿐 아니라 조류에 의한 유속도 포함이 되어 있기 때문에 해류 연구를 위해서는 조석 성분을 제거해줘야 한다. 조류 성분 제거를 위해 고해상도의 조석 모델인 CATS2008 (Circum-Antarctica Tidal Simulation model) [Padman *et al.*, 2002; King *et al.*, 2011]을 사용하였다.

CATS2008: Model Summary

Date:	August 15, 2017
Model type:	Inverse (data assimilation)
Grid:	4-km uniform polar stereographic (centered at 71°S, 70°W)
Constituents:	M ₂ , S ₂ , N ₂ , K ₂ , K ₁ , O ₁ , P ₁ , Q ₁ , Mf, Mm
Units:	z (surface height; meters); u,v (currents; cm/s); U,V (transports; m ² /s)
Coordinates:	Currents and transports are East (u,U) and north (v,V) components

그림 377 CATS 모델 정보

CATS2008 모델은 총 10개의 조석 성분을 고려하여 조류를 계산하며 관측 시간과 정점 위치 정보를 넣어주면 해당 시기와 정점에서 조류의 유속 값을 얻어 낼 수 있다. Tide Model Driver (TMD) toolbox를 추가로 사용하여 MATLAB을 통해 CATS2008 모델을 실행하였다. 참고로 조류의 평균적인 유속을 계산해 본 결과 14/15 시기의 평균 조류 유속은 0.009 m/s이고 15/16 시기는 0.015 m/s, 16/17 시기는 0.009 m/s, 17/18 시기는 0.009 m/s, 18/19 시기는 0.008 m/s로 그 크기는 매우 작게 나타났다.

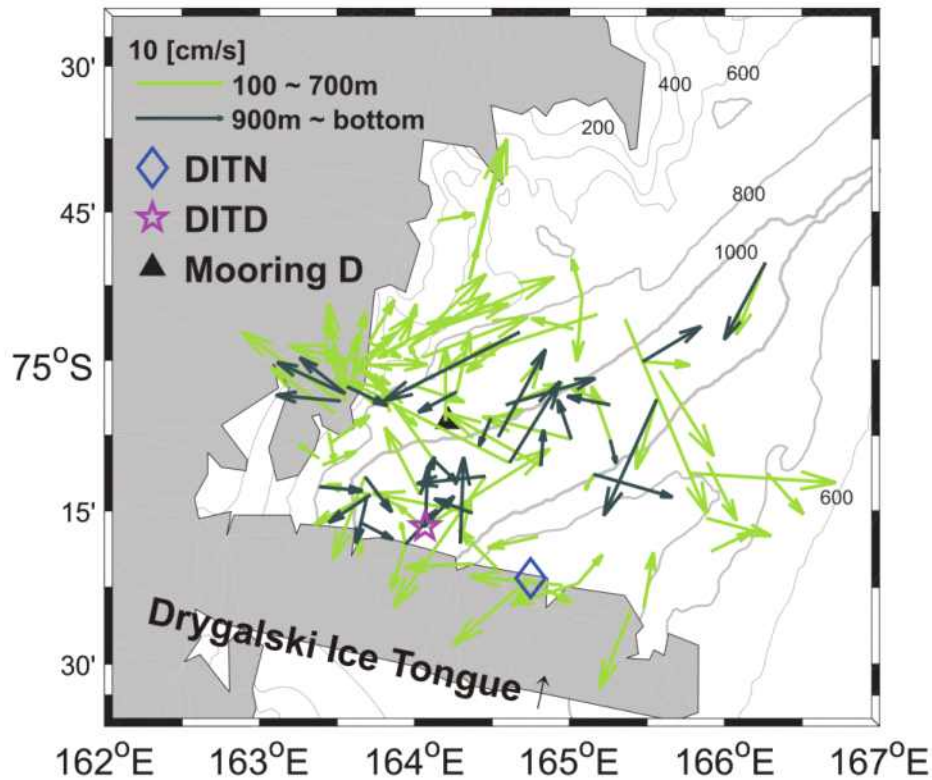


그림 378 QC 완료 LADCP 자료를 이용한 테라노바 만의 유속 분포

극지연구소

QC 완료한 LADCP 자료로 여름철 테라노바 만의 유속 분포를 확인할 수 있다. 여름철에는 닫힌 순환 형태는 아니지만 드라이갈스키 빙설과 난센 빙봉 연안을 따라 시계 방향의 해류를 확인할 수 있고 난센 빙봉 앞에서는 빙봉 하부로 유입되는 해류가 100-700 m, 그리고 바닥 유속에서도 확인이 된다. 또한 드라이갈스키 분지의 깊은 수심에서도 시계 방향(trough 서쪽: 북동향, trough 동쪽: 남서향)의 순환이 확인되었다.

(3) 해양 계류 자료의 품질 관리 (QC) 시행 방법

해양 계류 자료는 표 52과 같이 얻어졌으며 ASCII 형태로 자료들을 모두 전환 한 뒤 주로 해양 계류선 계류 전후 CTD 자료를 이용한 QC 작업을 수행하였다.

표 52 해양 계류 자료 기간 및 관측 변수 정보

해양 계류선명	자료 기간	관측 변수	비고
DITN	2014. 12 ~ 2015. 12	수온, 염분, 유속 @ 70, 270, 660 m	

	2015. 12 ~ 2017. 02	수온, 염분, 유속 @ 70, 270, 660 m	
	2017. 02 ~ 2018. 03	수온, 염분, 유속 @ 70, 270, 660 m	
	2018. 03 ~ 2019. 01	수온, 염분, 유속 @ 70, 270, 660 m	
DITD	2017. 02 ~ 2018. 03	수온, 염분, 유속 @ 1200 m	
	2018. 03 ~ 2019. 01	수온, 염분, 유속 @ 1200 m	
DITS	2017. 02 ~ 2018. 03	수온, 염분, 유속 @ 170, 380, 1070 m	
TNBD	2018. 03 ~ 2019. 01	수온, 염분, 유속 @ 1000, 1090 m	

(가) 자료별 ASCII 변화 소프트웨어 사용

수온 염분 자료는 Sea Bird Electronic Instruments(SBE)의 SBE 37, SBE 56 장비로 관측하였고 유속 자료는 Doppler Current meter RCM9, Aquadopp current meter 장비로 관측하였다. SBE 장비로 관측된 자료의 경우 우선은 SeatermV2 소프트웨어를 이용하여 binary 자료를 ascii 형태로 변환한다. RCM9 장비의 경우 DSU(Data Storage Unit)에 자료가 저장되어 있으므로 DSU reader 소프트웨어를 이용 우선 binary 자료를 다운받고 이를 MATLAB 코드를 이용 QC를 진행한다. Aquadopp 자료의 경우 Aquadopp program을 통해 자료를 다운받은 뒤, 역시 MATLAB 코드를 이용 QC를 진행한다. 코드 상에는 자료 변환, magnetic declination 보정, 시간 보정, U, V 유속 계산 등의 정보들이 포함되어 있다.

표 53 Aquadopp current meter 자료 read MATLAB 코드 예시

```

read_aquadopp> function [imd,time,param] = read_aquadopp(FILENAME,declination)
read_aquadopp>
%-----
-----
read_aquadopp> % function [imd,time,param] = read_aquadopp(FILENAME,declination)
read_aquadopp> %
read_aquadopp> % Reads Aquadopp single point current meter data file
read_aquadopp> %
read_aquadopp> % Inputs:
read_aquadopp> %   magnetic declination
read_aquadopp> %   .dat filename
read_aquadopp> %
read_aquadopp> % 1  Month                (1-12)
read_aquadopp> % 2  Day                  (1-31)
read_aquadopp> % 3  Year
read_aquadopp> % 4  Hour                  (0-23)
read_aquadopp> % 5  Minute                (0-59)
read_aquadopp> % 6  Second               (0-59)

```



```

read_aquadopp> % 7 Error code
read_aquadopp> % 8 Status code
read_aquadopp> % 9 Velocity (Beam1|X|East) (m/s)
read_aquadopp> % 10 Velocity (Beam2|Y|North) (m/s)
read_aquadopp> % 11 Velocity (Beam3|Z|Up) (m/s)
read_aquadopp> % 12 Amplitude (Beam1) (counts)
read_aquadopp> % 13 Amplitude (Beam2) (counts)
read_aquadopp> % 14 Amplitude (Beam3) (counts)
read_aquadopp> % 15 Battery voltage (V)
read_aquadopp> % 16 Soundspeed (m/s)
read_aquadopp> % 17 Soundspeed used (m/s)
read_aquadopp> % 18 Heading (degrees)
read_aquadopp> % 19 Pitch (degrees)
read_aquadopp> % 20 Roll (degrees)
read_aquadopp> % 21 Pressure (dbar)
read_aquadopp> % 22 Pressure (m)
read_aquadopp> % 23 Temperature (degrees C)
read_aquadopp> % 24 Analog input 1
read_aquadopp> % 25 Analog input 2
read_aquadopp> % 26 Speed (m/s)
read_aquadopp> % 27 Direction (degrees)
read_aquadopp> %
read_aquadopp> % Outputs:
read_aquadopp> %
read_aquadopp> % History:
read_aquadopp> % 2010-Nov-25 CLS Ross Ice Shelf
read_aquadopp> % 2018-Feb-23 FE Rewritten for new instruments
read_aquadopp> %
read_aquadopp> % NIWA Moorings
read_aquadopp> % 2010-Nov-25
read_aquadopp>
%-----
-----
read_aquadopp>
read_aquadopp> %% Select data file
read_aquadopp> if nargin == 0
read_aquadopp> [filename,pathname] = uigetfile({'*.dat'},'Choose an aquadop .dat file to
load');
read_aquadopp> if pathname==0, disp('No file chosen, reading cancelled'), return, end
read_aquadopp> FILENAME = [pathname filename];
read_aquadopp> end

```

```

read_aquadopp> [pathname, name, ~] = fileparts(FILENAME);
read_aquadopp>
read_aquadopp>
read_aquadopp> %% Import header file
read_aquadopp> % If present read in header file
read_aquadopp> HDR_FILENAME = fullfile(pathname,[name '.hdr']);
read_aquadopp> if exist(HDR_FILENAME,'file')
read_aquadopp>     displink2folder(HDR_FILENAME, 'Reading in header file: ',
HDR_FILENAME)
read_aquadopp>     [meta] = read_aquadop_header(HDR_FILENAME);
read_aquadopp>     imd.snstr = strtrim(meta.serial_number(4:end)); % Remove 'AQD' string
from serial_number
read_aquadopp>     imd.model = 'aquadopp';
read_aquadopp> end
read_aquadopp>
read_aquadopp>
read_aquadopp> %% Import data file
read_aquadopp> [fid,mes] = fopen(FILENAME);
read_aquadopp> if fid==-1
read_aquadopp>     error(mes)
read_aquadopp> end
read_aquadopp>
read_aquadopp> % Read file
read_aquadopp> formatstring = repmat('%f',1,27);
read_aquadopp> C = textscan(fid,formatstring);
read_aquadopp>
[month,day,year,hour,minute,seconds,error_code,status_code,vel1,vel2,vel3,amp1,amp2,amp3,voltage,
soundspeed,soundspeed_used,...
read_aquadopp>     heading,pitch,roll,pressure_db,pressure_m,temperature,an1,an2,speed,direction]
= deal(C{:});
read_aquadopp> time = datenum(year,month,day,hour,minute,seconds);
read_aquadopp> fclose(fid);
read_aquadopp>
read_aquadopp> % Convert directions to true
read_aquadopp> dirt = mod((direction + declination),360);
read_aquadopp> hdgt = mod((heading + declination),360);
read_aquadopp>
read_aquadopp> % Convert Speed to cm/s
read_aquadopp> speed = speed * 100;
read_aquadopp>
read_aquadopp> % Calculate speed east and north from the current speed and direction

```

```

read_aquadopp> e = speed.*sin((pi/180)*dirt);
read_aquadopp> n = speed.*cos((pi/180)*dirt);
read_aquadopp>
read_aquadopp> dectext = ['Direction corrected using declination of ' num2str(declination) '
degrees'];
read_aquadopp> disp(dectext)
read_aquadopp> if ~isfield(imd,'notes') || isempty(imd.notes{1})
read_aquadopp>     imd.notes(1,1) = {dectext};
read_aquadopp> else
read_aquadopp>     imd.notes(end+1,1) = {dectext};
read_aquadopp> end
read_aquadopp>
read_aquadopp>
read_aquadopp> %% Save data to .dat file
read_aquadopp> % (1) Direction
read_aquadopp> param(1).name = 'dirt';
read_aquadopp> param(1).longname = 'Direction';
read_aquadopp> param(1).unit = 'degT';
read_aquadopp> param(1).data = dirt;
read_aquadopp> param(1).fmat = '%.4f';
read_aquadopp>
read_aquadopp> % (2) Speed
read_aquadopp> param(2).name = 'spe';
read_aquadopp> param(2).longname = 'Speed';
read_aquadopp> param(2).unit = 'cm/s';
read_aquadopp> param(2).data = speed;
read_aquadopp> param(2).fmat = '%.4f';
read_aquadopp>
read_aquadopp> % Temperature
read_aquadopp> param(3).name = 'tem';
read_aquadopp> param(3).longname = 'Temperature';
read_aquadopp> param(3).unit = 'deg';
read_aquadopp> param(3).data = temperature;
read_aquadopp> param(3).fmat = '%.4f';
read_aquadopp>
read_aquadopp> % Pressure
read_aquadopp> param(4).name = 'pre';
read_aquadopp> param(4).longname = 'Pressure relative';
read_aquadopp> param(4).unit = 'dBar';
read_aquadopp> param(4).data = pressure_db;
read_aquadopp> param(4).fmat = '%.4f';

```

```

read_aquadopp>
read_aquadopp> % Heading
read_aquadopp> param(5).name = 'hdgt';
read_aquadopp> param(5).longname = 'Heading true';
read_aquadopp> param(5).unit = 'degT';
read_aquadopp> param(5).data = hdgt;
read_aquadopp> param(5).fmat = ' %.4f';
read_aquadopp>
read_aquadopp> % Pitch
read_aquadopp> param(6).name = 'pitch';
read_aquadopp> param(6).longname = 'Pitch';
read_aquadopp> param(6).unit = 'deg';
read_aquadopp> param(6).data = pitch;
read_aquadopp> param(6).fmat = ' %.4f';
read_aquadopp>
read_aquadopp> % Roll
read_aquadopp> param(7).name = 'roll';
read_aquadopp> param(7).longname = 'Roll';
read_aquadopp> param(7).unit = 'deg';
read_aquadopp> param(7).data = roll;
read_aquadopp> param(7).fmat = ' %.4f';
read_aquadopp>
read_aquadopp> % U
read_aquadopp> param(8).name = 'u';
read_aquadopp> param(8).longname = 'East component of velocity';
read_aquadopp> param(8).unit = 'cm/s';
read_aquadopp> param(8).data = e;
read_aquadopp> param(8).fmat = ' %.4f';
read_aquadopp>
read_aquadopp> % V
read_aquadopp> param(9).name = 'v';
read_aquadopp> param(9).longname = 'North component of velocity';
read_aquadopp> param(9).unit = 'cm/s';
read_aquadopp> param(9).data = n;
read_aquadopp> param(9).fmat = ' %.4f';
read_aquadopp>
read_aquadopp> % W
read_aquadopp> param(10).name = 'w';
read_aquadopp> param(10).longname = 'Up component of velocity';
read_aquadopp> param(10).unit = 'cm/s';
read_aquadopp> param(10).data = vel3;

```



```

read_aquadopp> param(10).fmtat = ' %.4f';
read_aquadopp>
read_aquadopp> % BV
read_aquadopp> param(11).name = 'volt';
read_aquadopp> param(11).longname = 'Battery voltage';
read_aquadopp> param(11).unit = 'V';
read_aquadopp> param(11).data = voltage;
read_aquadopp> param(11).fmtat = ' %.2f';
read_aquadopp>
read_aquadopp> % amplitude 1
read_aquadopp> param(12).name = 'amp1';
read_aquadopp> param(12).longname = 'Amplitude beam 1';
read_aquadopp> param(12).unit = 'counts';
read_aquadopp> param(12).data = amp1;
read_aquadopp> param(12).fmtat = ' %.2f';
read_aquadopp>
read_aquadopp> % amplitude 2
read_aquadopp> param(13).name = 'amp2';
read_aquadopp> param(13).longname = 'Amplitude beam 2';
read_aquadopp> param(13).unit = 'counts';
read_aquadopp> param(13).data = amp2;
read_aquadopp> param(13).fmtat = ' %.30f';
read_aquadopp>
read_aquadopp> % amplitude 3
read_aquadopp> param(14).name = 'amp3';
read_aquadopp> param(14).longname = 'Amplitude beam 3';
read_aquadopp> param(14).unit = 'counts';
read_aquadopp> param(14).data = amp3;
read_aquadopp> param(14).fmtat = ' %.30f';
file 2: C:\Users\elliottf\OneDrive - NIWA\Mfiles\mtech\inst\aquadop\read_aquadop_header.m
read_aquadop_header> function [meta] = read_aquadop_header(FILENAME)
read_aquadop_header>
%-----
-----
read_aquadop_header> % function [meta] = read_aquadop_header(FILENAME)
read_aquadop_header> %
read_aquadop_header> % Reads Aquadopp single point current meter header file
read_aquadop_header> %
read_aquadop_header> % Inputs:
read_aquadop_header> % .hdr filename
read_aquadop_header> %

```

```

read_aquadop_header> % Outputs:
read_aquadop_header> % meta - structure
read_aquadop_header> %
read_aquadop_header> % History:
read_aquadop_header> % 2018-Feb-23 FE
read_aquadop_header> %
read_aquadop_header> % NIWA Moorings
read_aquadop_header> % 2018-Feb-23
read_aquadop_header>
%-----
-----

read_aquadop_header>
read_aquadop_header> [fid] = fopen(FILENAME,'rt');
read_aquadop_header> if fid < 0
read_aquadop_header>     error(['Could not open header file: ' FILENAME])
read_aquadop_header> end
read_aquadop_header>
read_aquadop_header> lineno = 0;
read_aquadop_header> tline = [];
read_aquadop_header> meta = [];
read_aquadop_header>
read_aquadop_header> while isempty(strfind(tline,'Data file format'))
read_aquadop_header>     lineno = lineno + 1;
read_aquadop_header>     tline = fgetl(fid);
read_aquadop_header>
read_aquadop_header>     if ~isempty(tline) && ~strcmp(tline(1:5),'-----') &&
~strcmp(tline(1),' ') % filter empty strings and spacers
read_aquadop_header>         if ~isempty(strfind(tline,' ')) && ~strcmp(tline(1),' ')
read_aquadop_header>             % This is probably information
read_aquadop_header>             loc = strfind(tline,' ');
read_aquadop_header>             varName = lower(strrep(strrep(strtrim(tline(1:loc(1))),
',','_'),' ',''));
read_aquadop_header>             varName = strrep(varName,'(',''); %, '(, ')',
read_aquadop_header>             varName = strrep(varName,')',''); %, '(, ')',
read_aquadop_header>             varValue = strtrim(tline(loc(1):end));
read_aquadop_header>             if strcmp(varName,'serial_number') &&
isfield(meta,'serial_number')
read_aquadop_header>                 % There are two serial number fields
read_aquadop_header>                 varName = 'serial_number_head';
read_aquadop_header>             end
read_aquadop_header>             meta.(varName) = varValue;

```

```

read_aquadop_header> elseif ~isempty(strfind(tline,' '))
read_aquadop_header> % Another line for the same varName
read_aquadop_header> loc = strfind(tline,' ');
read_aquadop_header> varValueB = strtrim(tline(loc(1):end));
read_aquadop_header> meta.(varName) = [meta.(varName) ', ' varValueB];
read_aquadop_header> end
read_aquadop_header> end
read_aquadop_header> end
read_aquadop_header> disp(' ')
read_aquadop_header> disp('Metadata')
read_aquadop_header> disp('-----')
read_aquadop_header> disp(['Time of first measurement: ' meta.time_of_first_measurement])
read_aquadop_header> disp(['Time of last measurement: ' meta.time_of_last_measurement])
read_aquadop_header> disp(['Number of measurements: ' meta.number_of_measurements])
read_aquadop_header> disp(['Measurement interval: ' meta.measurement_interval])
read_aquadop_header> disp(['Average interval: ' meta.average_interval])
read_aquadop_header> disp(['Coordinate system: ' meta.coordinate_system])
read_aquadop_header> disp(['Diagnostics measurements: ' meta.diagnostics_measurements])
read_aquadop_header> disp(['Comments: ' meta.comments])

```

자료 처리 이후에는 그림 379와 같이 관측된 해류의 시계열을 확인할 수 있다.

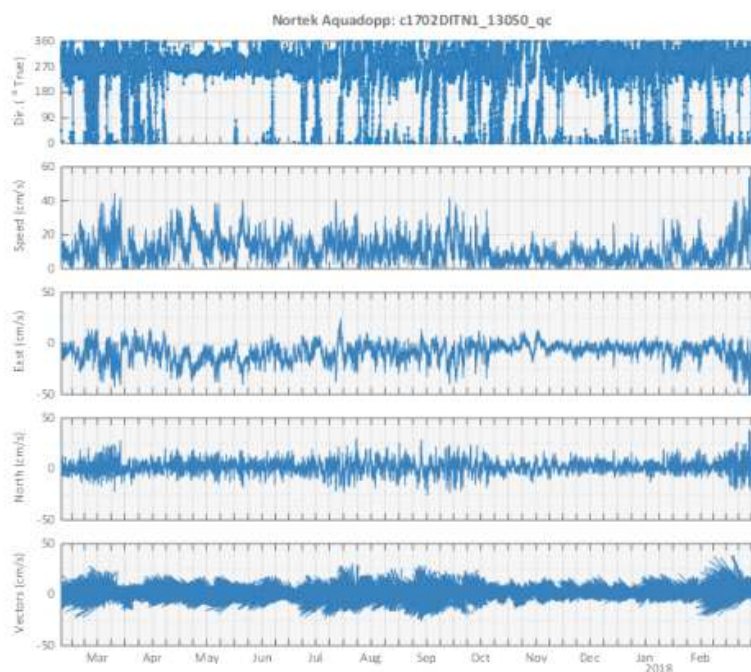


그림 379 Aquadopp current meter 자료 처리 후 유속 자료 시계열 예시

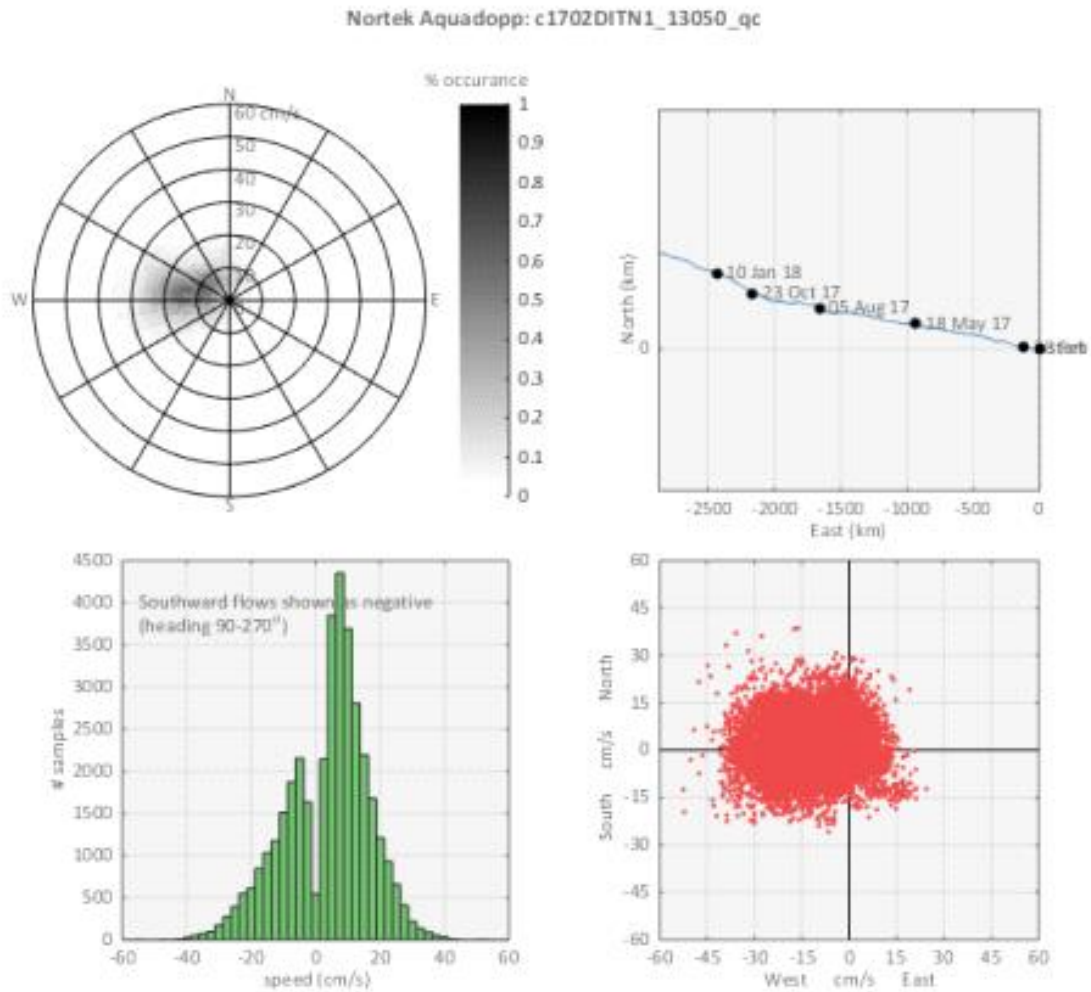


그림 380 Aquadopp current meter 자료 처리 후 유속 자료 통계

Aquadopp과 RCM에서 관측된 해류 유속은 모두 수 cm/s로 정상적으로 처리되었고 그림 381와 같은 통계 분석을 결과를 통하여 계류선에서 얻어진 유속 자료의 정상, 비정상 여부와 평균적인 유속 방향 등을 파악 할 수 있었다.

(나) 해양 계류선 계류 전후 CTD 자료 활용 QC

유속 자료는 그림 381, 382와 같이 전체적인 시계열과 간단한 통계치를 확인한 뒤 눈에 띄는 비정상 값이 보이는 경우가 없어 MATLAB 파일 형태로 저장을 하였다. 다음 ASCII 변환된 수온, 염분 자료는 우선, 압력 자료를 기반으로, 압력 값이 표준편차보다 3배 이상 차이 나는 경우에 해당하는 시기들을 전체 자료에서 제거하였다. 이후 시계열을 직접 확인하면서 튀는 값들을 제거하는 작업을 거쳤다. 마지막으로 계류선 설치 전 후에 얻어진 CTD 자료를 이용하여 염분 및 수온의 절대값을 보정하였다. 예를 들어, 그림 379에서처럼 계류선에서 얻어진 염분 값과 염분 시계열이 얻어진 수심에서의 CTD 값을 서로 비교하여 보정하는 방식이다. 특히, 2015. 12 ~ 2017. 02 기간 동안에

DITN 계류선의 가장 깊은 수심에서 관측된 압력 값은 사용이 불가능하여 기존에 계획된 압력 667 dbar로 염분값을 계산하였으며 CTD 자료 값과 비교하여 심층 염분 시계열의 -0.01만큼을 평행 이동 하였다. 유속 자료와 마찬가지로 QC 완료 이후에는 MATLAB 파일 형태로 저장하였다.

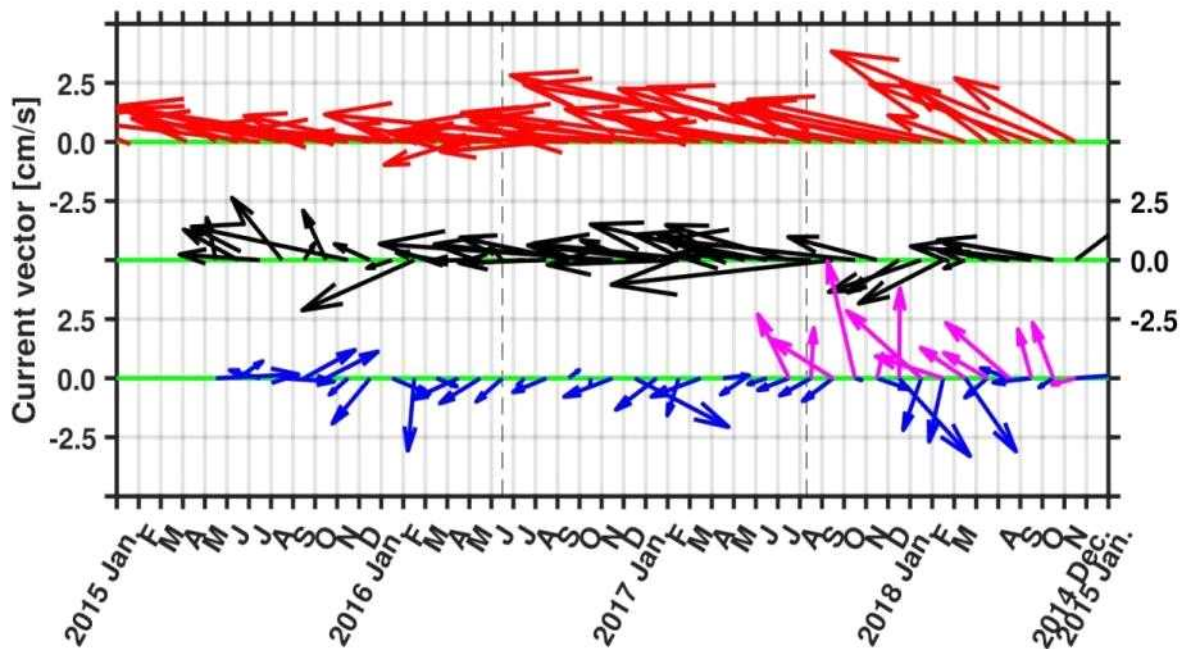


그림 381 QC 완료된 DITN, DITD 계류선 수심별 월평균 유속 분포 (Red: DITN 70 m, Black: DITN 270 m, Blue: DITN 660 m, Magenta: DITD 1200 m)

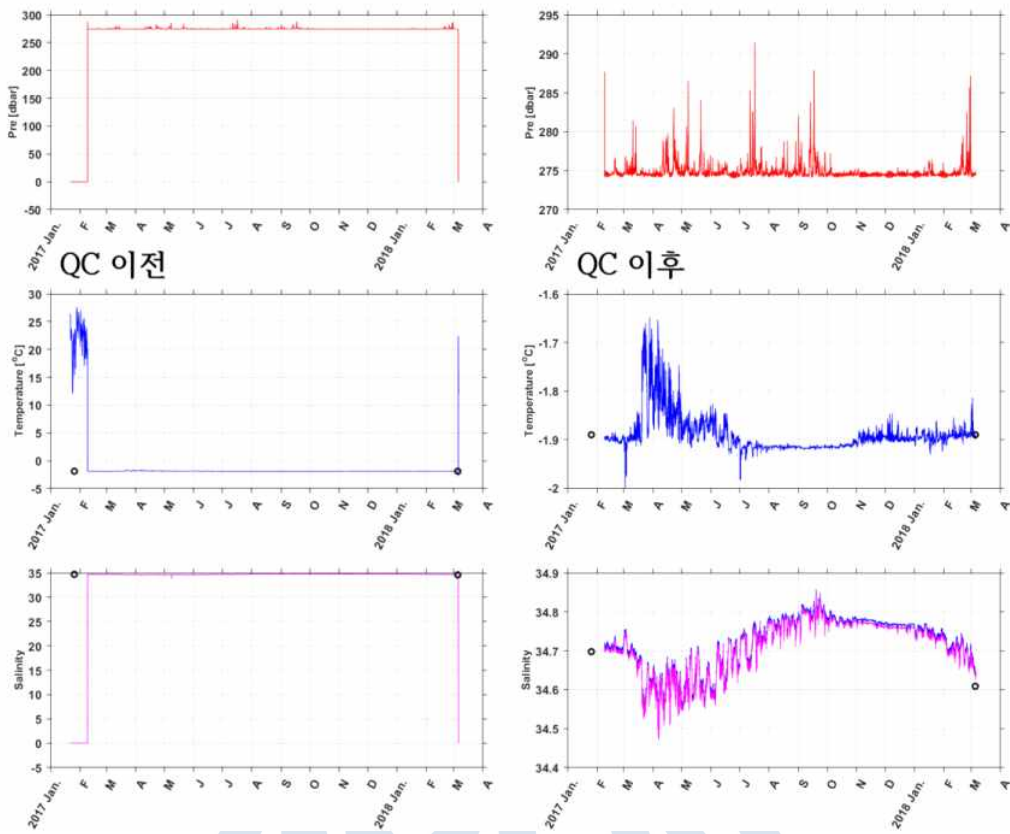


그림 382 DITN 3번째 leg(2017.02 ~ 2018.03) 기간 SBE37(#15240) 자료의 QC 전후 압력, 수온, 염분 시계열 모습 비교 예시

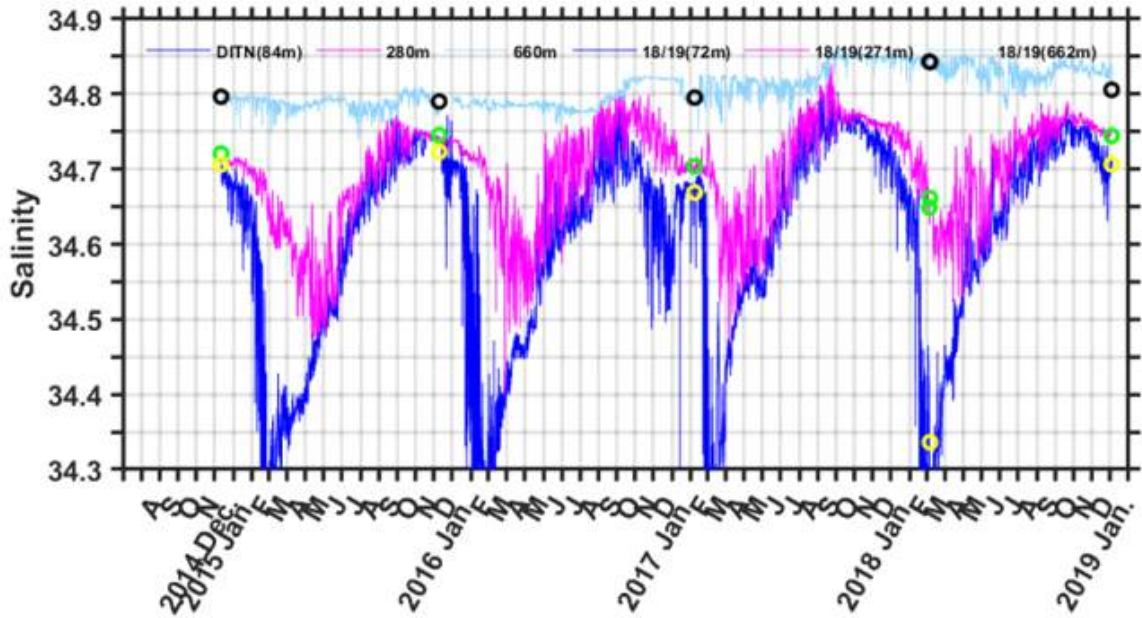


그림 383 QC 완료된 DITN 계류선 수심별 염분의 시계열과 검보정에 사용된 CTD자료 그림

(4) SADCPC 자료 획득과 자료 처리 방법

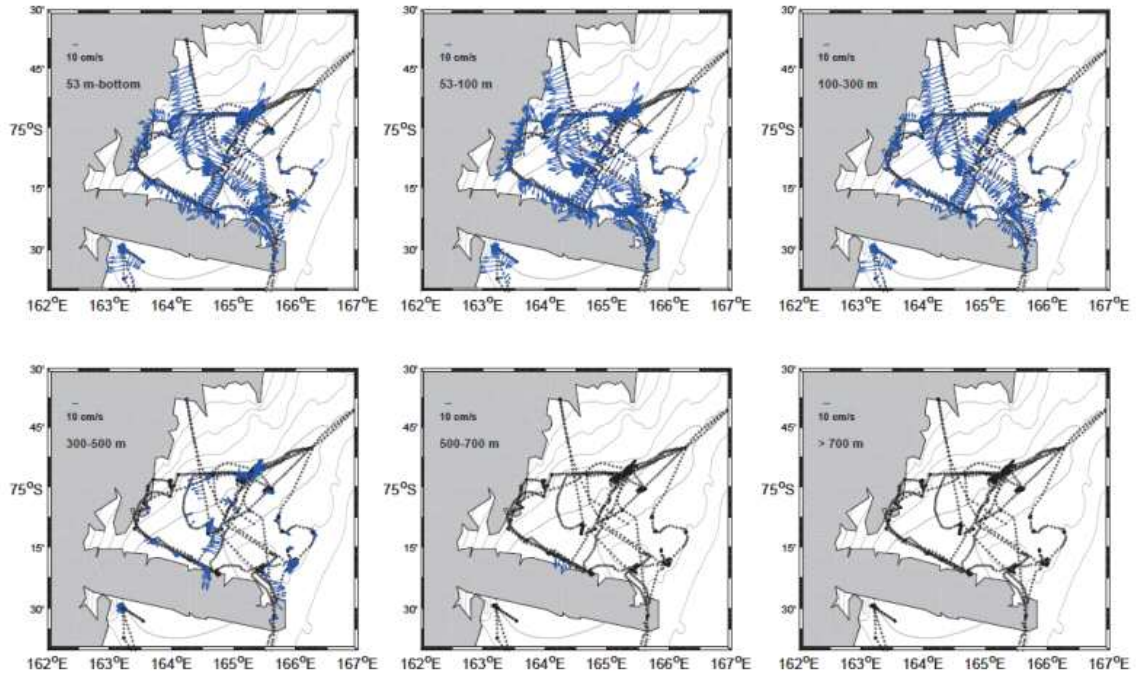


그림 384 17/18 관측에서 얻어진 SADCPC 자료를 통한 수심별 평균 유속 분포(파랑)와 아라운의 이동 경로(검정) 예시

쇄빙선 아라운의 바닥에는 Shipboard ADCP (SADCPC)가 설치되어 있으며 Teledyne RD Instruments에서 제공하는 VmDas (Vessel mount Data Acquisition system)을 통해 17/18, 18/19 관측에서 SADCPC 자료를 획득하였다. LADCP(38 kHz)와의 동일한 관측을 위하여 SADCPC 역시 38 kHz로 관측하였으며, 16 m blank depth, 32 m bin size 설정으로 관측을 수행하였다(first bin: 53 m, last bin: 1620 m). SADCPC 자료는 아라운 운항 중에 얻어지므로 운항 경로의 해류 유속을 확인할 수 있다는 장점이 있으나 선속이 8 knot 이하로 유지될 경우에만 좋은 품질의 SADCPC 자료를 얻을 수 있어 아라운이 쇄빙을 할 때에는 자료 품질이 좋지 못하다는 단점이 있다.

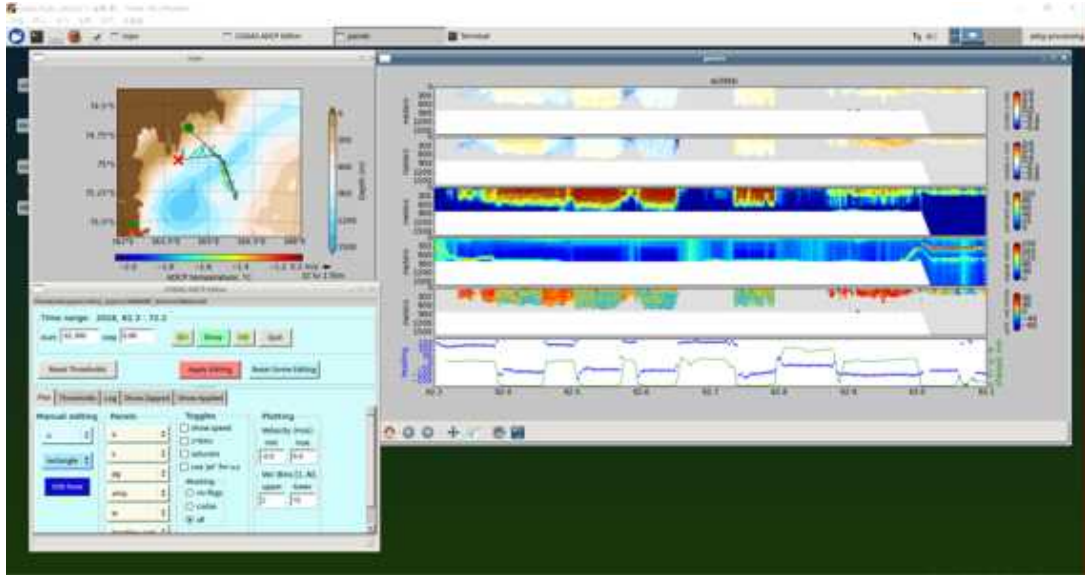


그림 385 CODAS 프로그램을 이용한 SADCPC 자료 처리 화면

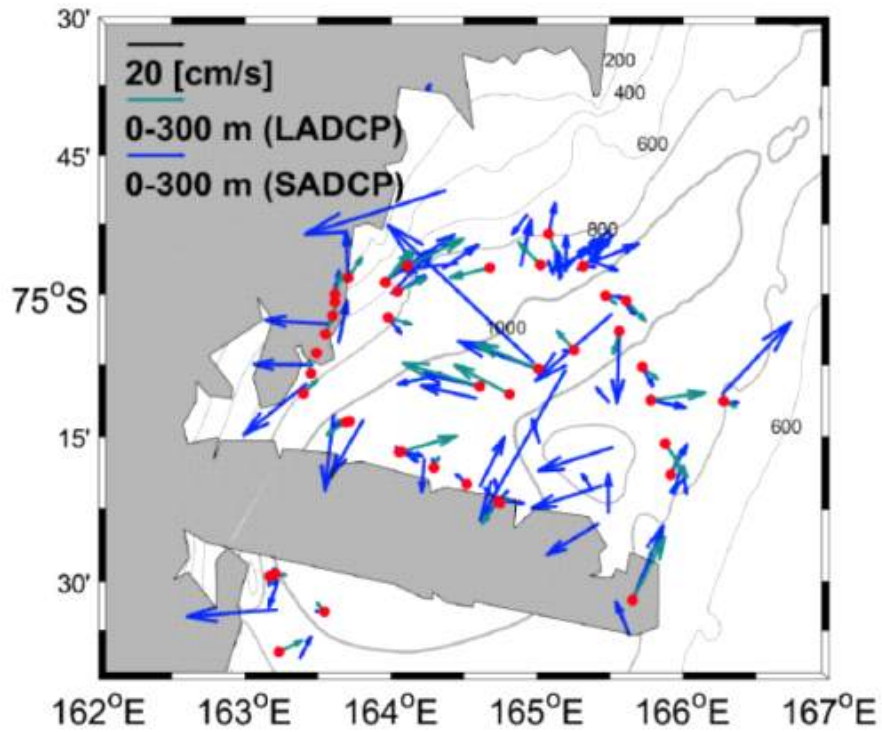


그림 386 17/18 관측에서 얻어진 LADCP 자료와 SADCPC 자료간의 상층 유속 비교

VmDas로 얻어진 자료를 관측할 경우 확장자가 ENR, ENS, ENX, LTA, N1R, N2R, NMS, VMO, STA, TXT와 같은 파일들이 얻어진다. 이들 자료들을 모두와 오픈 소스인 프로그램인 CODAS(Common Ocean Data Access System)을 이용하여 SADCPC자료를 처리하며 그림 382는

CODAS 프로그램을 이용하여 SADCP 자료를 처리하는 화면을 보여준다. CODAS 프로그램으로 SADCP 자료를 처리한 뒤에는 MATLAB 파일로 저장이 되며 17/18, 18/19관측에서 얻어진 SADCP 자료 모두를 처리하였다. 처리된 자료는 mat 확장자 형태로 저장되는 load_getmat.m 코드를 이용하여 불러 들일 수 있다.

QC 완료된 SADCP 자료는 LADCP 자료와의 상호 비교를 통한 테라노바 만 유속 분포 파악에 큰 도움이 될 수 있으나 쇄빙선의 특성상 해빙 조건에 따라 아라온이 빠른 선속으로 이동 할 때가 많아 현재로서는 SADCP 자료를 유속 참고 자료 정도로 사용할 것을 추천한다. 그림 386에서 보는 것처럼 위치별로 LADCP 자료와 방향 및 유속 차이가 나는 지점들이 존재하는 것을 확인할 수 있다.



라. 신규 탐사 기술 개발과 활용

(1) 자기지전류(Magnetotellurics, MT) 탐사 기술 개발

- MT 탐사는 전자탐사 중의 하나로써 현존하는 전기, 전자탐사법 중에서 가장 큰 가탐 심도를 가지고 있어 주로 심부탐사에 이용된다. 본 연구에서는 남극 빅토리아랜드 장보고기지 주변 빙권의 변화 진단, 원인 규명 및 거동 예측을 위해 아래와 같은 MT 탐사 기술 개발을 수행하였다.

① 극지 환경용 MT 모니터링 측정 장치 시제품 개발

극지 지표면에 걸리는 접촉 저항은 일부 M-Ohm에 도달할 수 있어 이러한 높은 접촉 저항 문제를 해결하기 위해 증폭기를 활용하는 기술 개발

② 극지 환경은 일반적으로 매우 낮은 온도이므로, 이러한 환경에서도 운용 가능토록 MT 탐사 기술 개발에 바탕을 둔 탐사기 시제품 개발

③ 개발 시제품 성능

0.5 W 이하의 저전력 소모 및 전기장/자기장 전극 5채널(Ex, Ey, Hx, Hy, Hz) 사용 가능

표 54 MT 장치 시제품 성능

Index	Specification
A to D conversion	24 bit
Frequency range	DC to 10 kHz
Max. storage (compact flash card)	16 Gbytes
Max. continuous sampling rate	5 k samples/sec
Max. burst mode sampling rate	20 k samples/sec
Max. burst mode data points	80 k points
Synchronization error	Less than 0.2 u sec
Power consumption	Less than 0.5 W total
Size	27 x 25 x 12 (cm)
Weight	Less than 5 kg

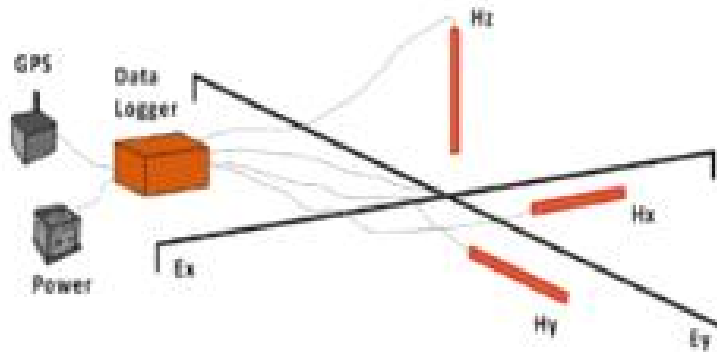


그림 387 MT 측정 방식 모식도

④ 현장 적용 예비 MT 탐사

- 인천 송도 일대 (갯벌 환경이라 비교적 conductive한 특성을 가짐)
- Data quality를 확인하기 위한 예비 탐사
- 비저항대 특성에 따른 측정자료 파악 가능



그림 388 예비 탐사 위치



그림 389 예비 MT탐사 현장 전경



그림 390 예비 MT 탐사 및 개발 장비 세팅 모습

극지연구소

- 예비 MT 탐사 결과, 전기비저항 및 위상 결과값을 도출하였음
- 저주파수 대역에서의 위상 변화는 약간 나타나지만, 전반적으로 장비 측정은 안정적이고 정밀한 결과를 나타내는 것을 확인하였음
- 시계열 자료 E-field 및 H-field 결과는 비교적 안정적인 양상을 나타냈음
- 예비 MT 탐사를 통해 극지 환경에서도 활용 가능성이 충분함을 사전 파악할 수 있었음

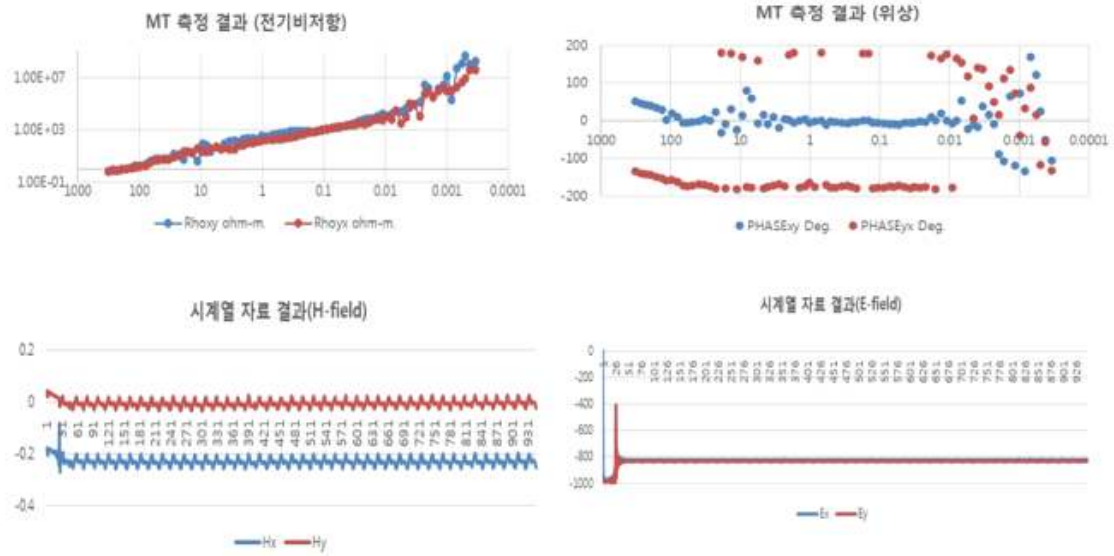
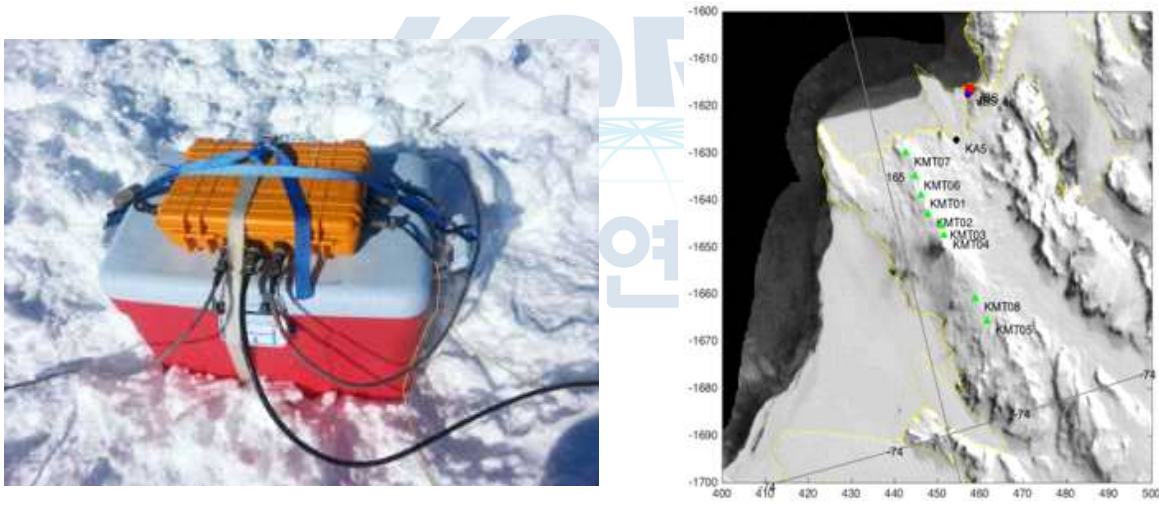


그림 391 예비 MT 탐사 결과

e. 남극 멜버른 화산 부근에서의 개발 시제품 현장 적용



(b) MT 장치 개발 시제품 남극 설치 모습

(c) MT 장치를 이용한 남극 측정 위치 맵

그림 392 MT 장치 개발 시제품 및 남극 적용 모습

⑤ 남극 멜버른 화산 하부 마그마 거동 양상을 보다 장기적·지속적으로 관측하기 위해서는 MT 모니터링 장비 제작이 필요하게 되었으며, 전기장 측정을 위해 사용되는 비분극 전극은 토양 환경에 한정되어 사용되기에, 극지 환경에는 적용 자체가 어려움이 있어 극지 환경에서 활용 가능한 전극(튜브 모양으로 고안된 티타늄 메쉬 재질의 전극)을 자체 제작하여 사용하였음. 다만, 전극이 천부에 매설되는 한계로 극지 외부환경의 전기적 잡음에 취약한 양상을 보여 극지 환경용 MT 모니터링 전극 개발이 필요하게 됨



그림 393 티타늄 메쉬 전극 매설

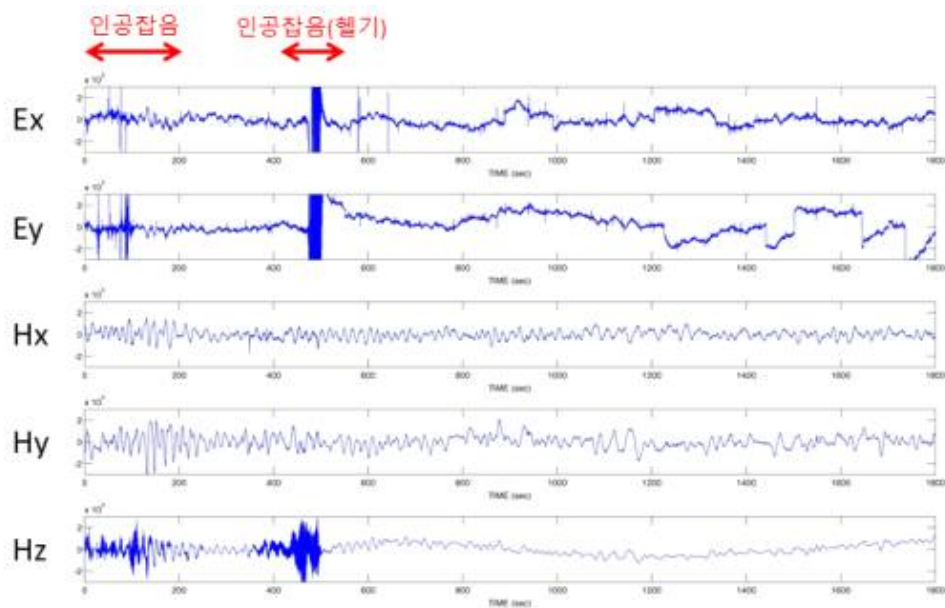


그림 394 남극 멜버른 화산 부근에서 수행된 MT 탐사 결과

⑥ MT 모니터링 장비 시제품 제작 및 현장 적용

MT 모니터링 장비 시제품 제작을 통해 측정 장비 민감도로 인해 발생할 수 있는 데이터 손실 및 잡음을 최소화하고, 보다 장시간의 주기적인 누적 데이터를 확보함으로써, 멜번 화산 하부 마그마 거동 양상을 지속적으로 관측하기 위함

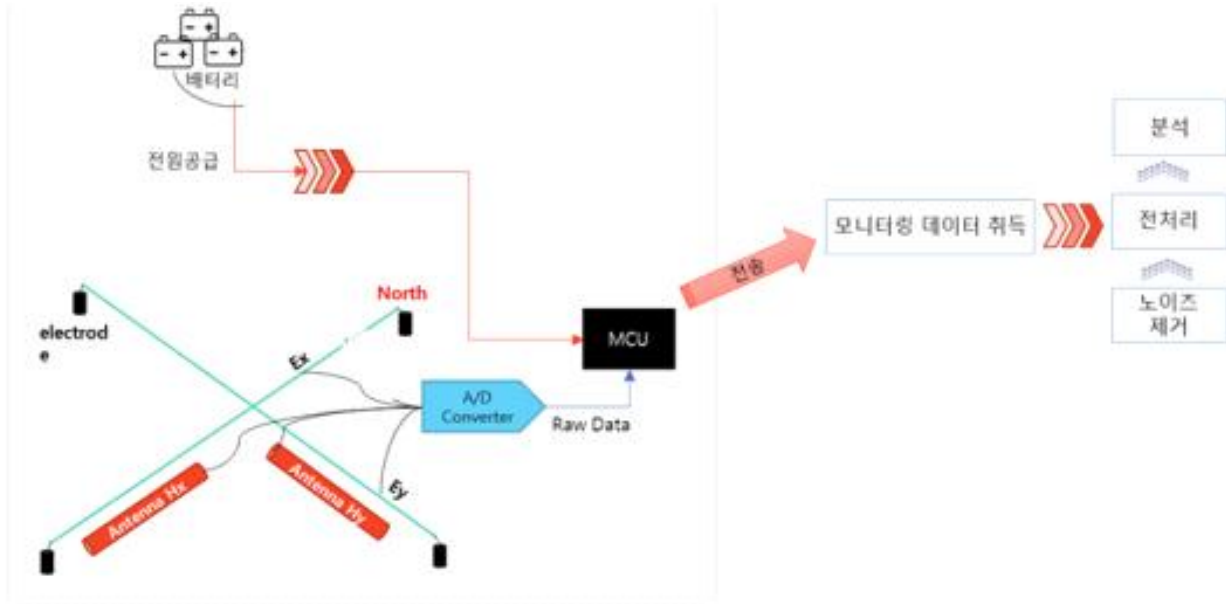


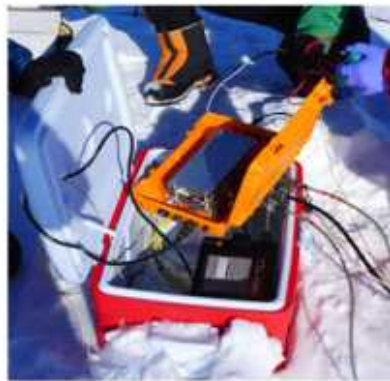
그림 395 MT 모니터링 장비 시제품 구성 모식도

- MT 모니터링 시제품 성능은 최대 10 kHz 데이터 샘플링이 가능함
- 측정 시 최소 전력 소모 및 대기전력 기능을 통해 장기간의 모니터링 가능토록 설계
- 1년 사용 시, 모니터링 전력은 약 8.76 A 소모됨

- 24bit 4 channel MT system
- Sampling rate: Max. 10 kHz
- Frequency range: 10 kHz – 1000s
- Low power consumption: < 1 W



- 대기전력 1mA로 stand by 및 예약된 시간에 시스템 작동하도록 세팅
- 1년 사용시, Monitoring power : 8.76A (약 9A)
- 따라서 100Ah의 배터리로 약 90% 이상을 데이터 취득에 사용 가능



[MT monitoring]

그림 396 MT 모니터링 장비 시제품 성능 및 현장 설치모습

- MT 모니터링 장비 현장 설치 위치

극지연구소

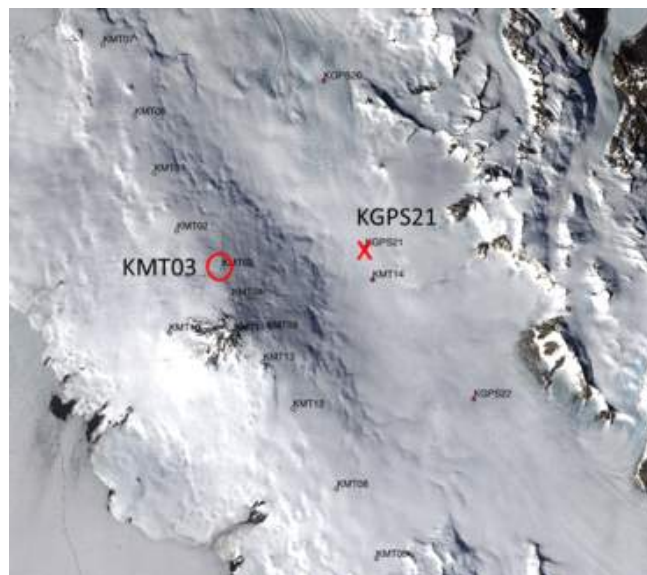


그림 397 MT 모니터링 장비 현장 설치 위치

- 멜번화산 KMT03 측정
- : 하부에 고전도성 매질 존재(마그마 챔버) 추정
- : 모니터링 모드로 설치함
- : 배터리: 100 Ah 1개
- : Sampling frequency: 500 Hz
- : 측정간격: 7 hours/day -> 약 200-300일 측정 가능 예상

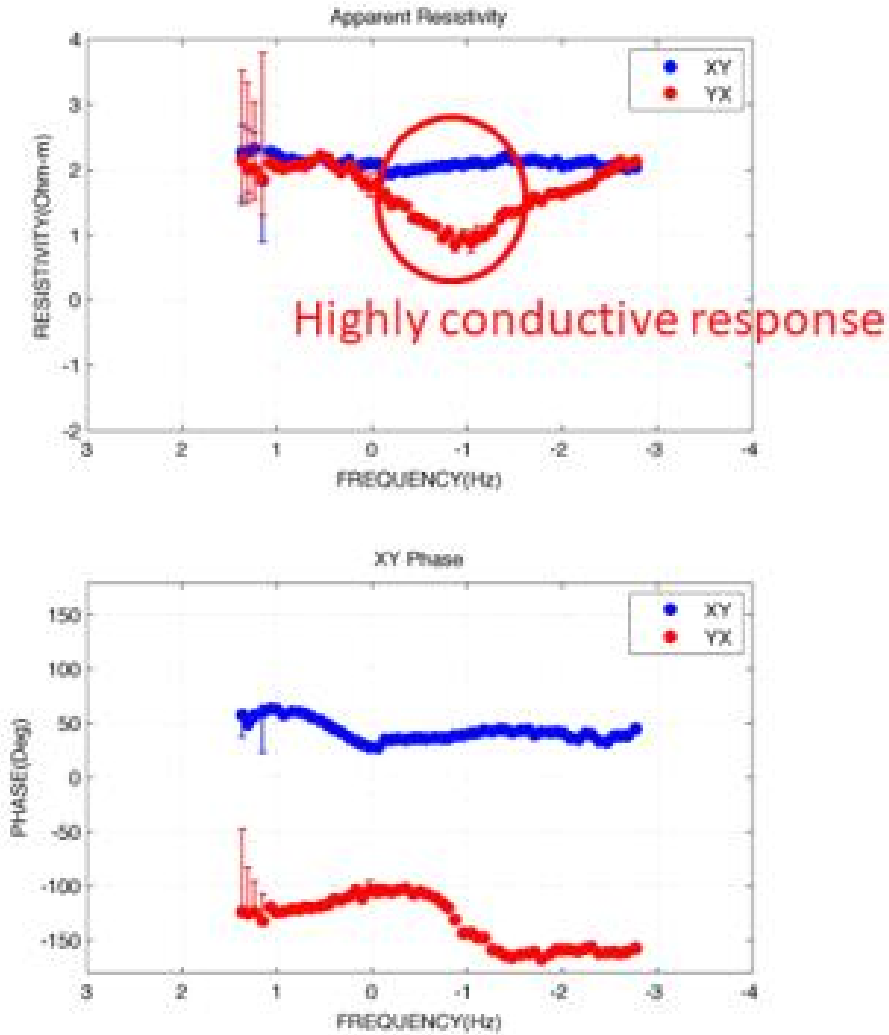


그림 398 MT 관측 결과

- 캠벨지역 KGPS21 측정
- : 하부에 빙저수 유동이 있을 것으로 예상되어 테스트를 수행한 결과, 주변 크레바스로 인해 전기장 측정이 정상적이지 않아 부적합

(2) 극지 환경용 MT 모니터링 전극 개발

① 극지 환경용 MT 모니터링 전극 온도변화 모델링

극지 환경에서 발생하는 분극 현상에 의한 전기장 데이터 잡음 영향을 감소시키기 위해, 비분극 전극을 활용한 새로운 전극시스템을 개발함으로써 탐사결과 정확도를 높이고자 함

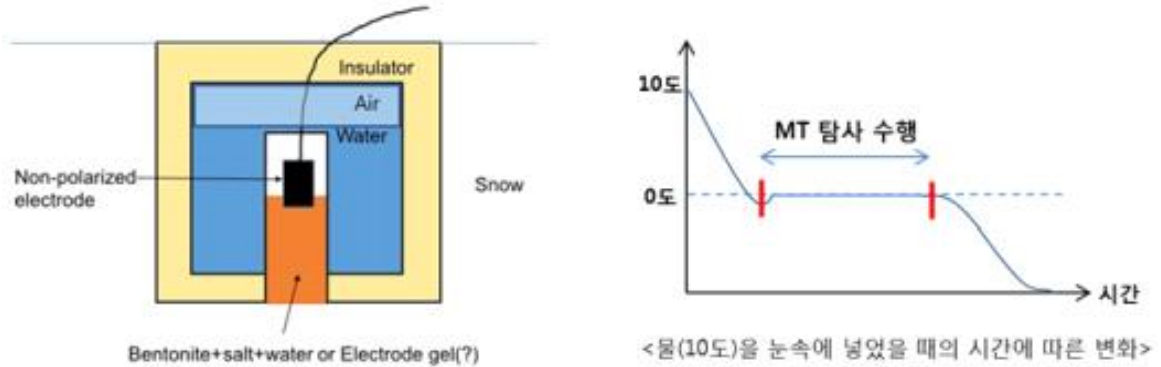


그림 399 빙하용 전극시스템 모식도

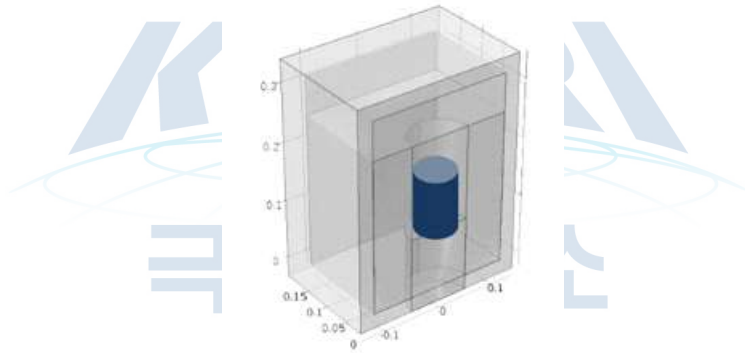


그림 400 3차원 모식도

- 극지 환경에서의 전극시스템 내외부 온도 변화 및 안정화 모델링
- FEM(Finite Element Method) 기법을 이용한 전극시스템 위치별 열량 변화 파악
- 시간에 따른 온도변화 그래프 결과, 극지 환경에서 최대 5-6일 적용 가능할 것으로 분석

FEM modeling
 Cylindrical symmetry
 Heat transfer with phase change
 Time-dependent problem

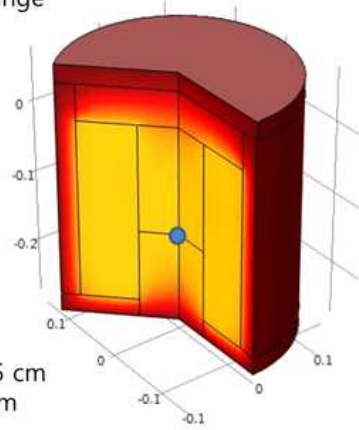
Initial Temp. : 5 degC
 Snow Temp. : -10 degC

Water cylinder diameter: 25 cm
 Water cylinder height: 25 cm
 Insulator thickness: 2.5 cm

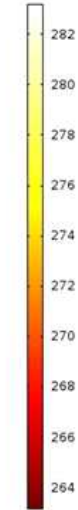


● Point for the evaluation of temperature time series

Time=36 h Surface: Temperature (K)

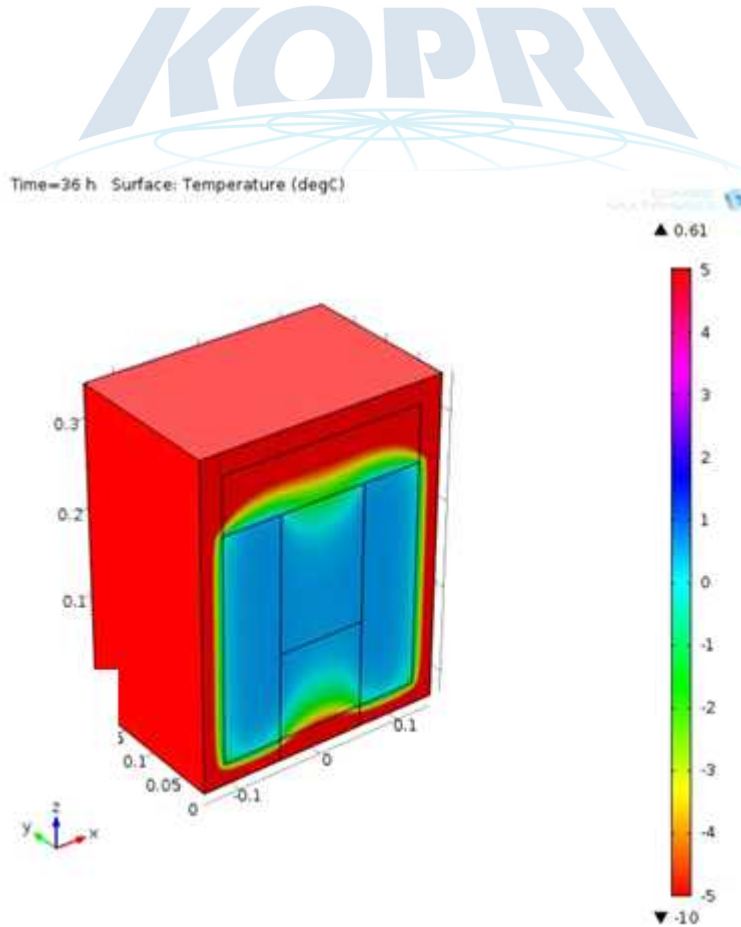


▲ 273



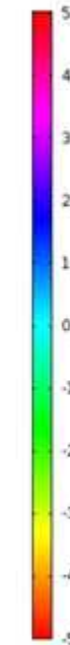
▼ 263

그림 401 FEM 모델링을 통한 온도 변화 모델링



Time=36 h Surface: Temperature (degC)

▲ 0.61



▼ -10

그림 402 36시간 이후의 온도 변화

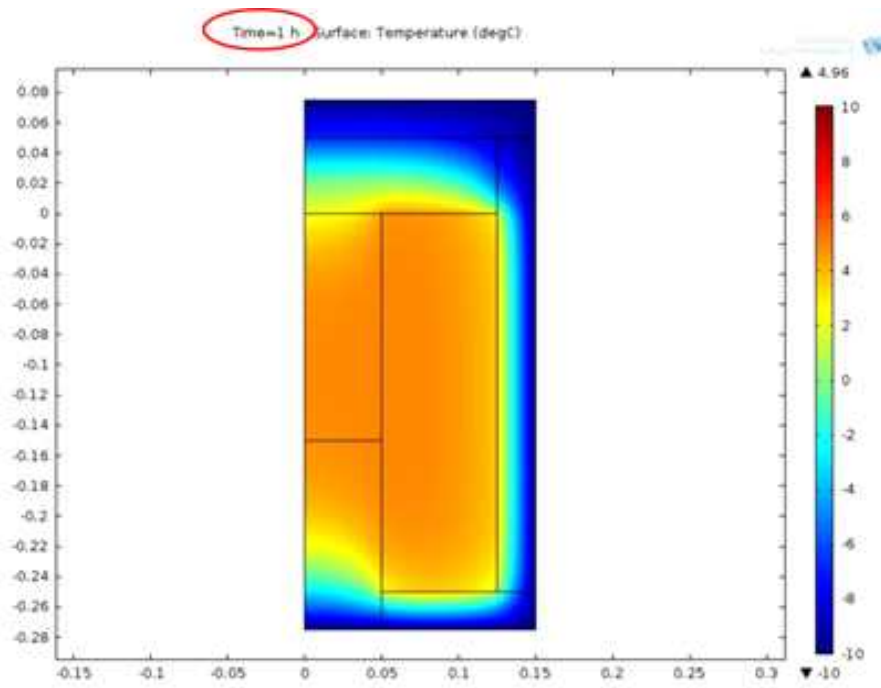


그림 403 1시간 이후의 전극 내부 온도 변화

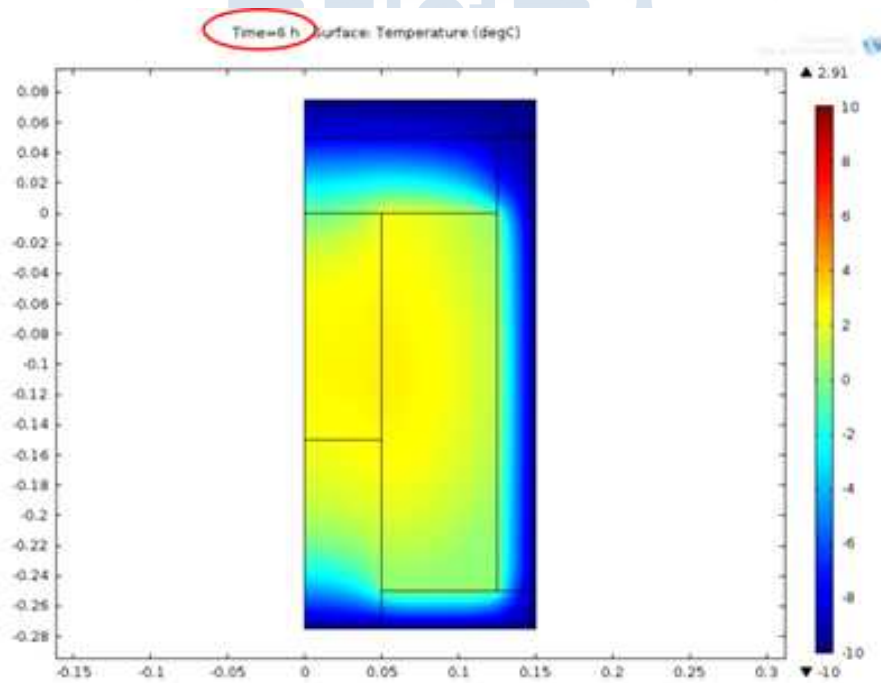


그림 404 6시간 이후의 전극 내부 온도 변화

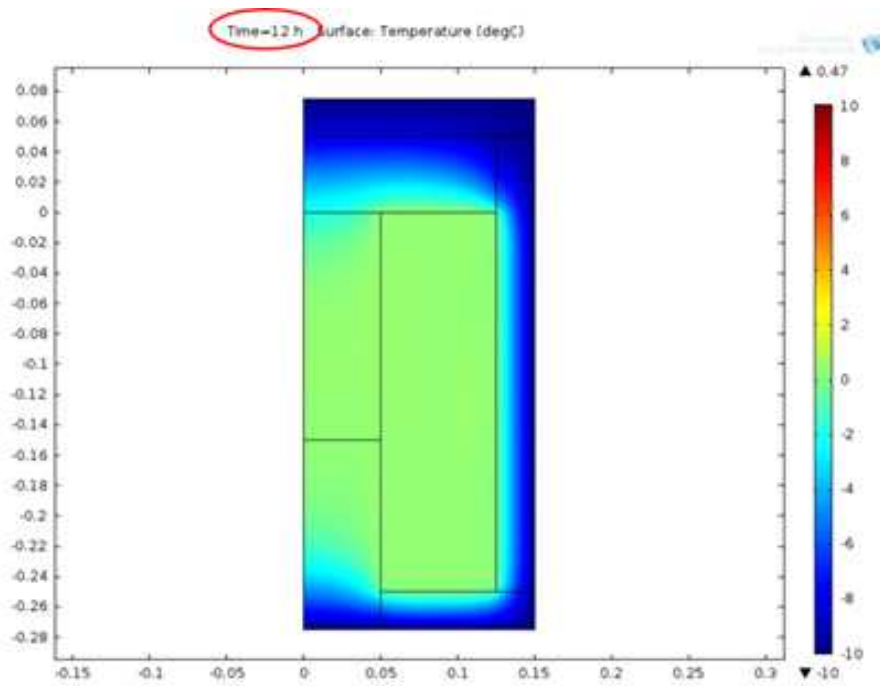


그림 405 12시간 이후의 전극 내부 온도 변화

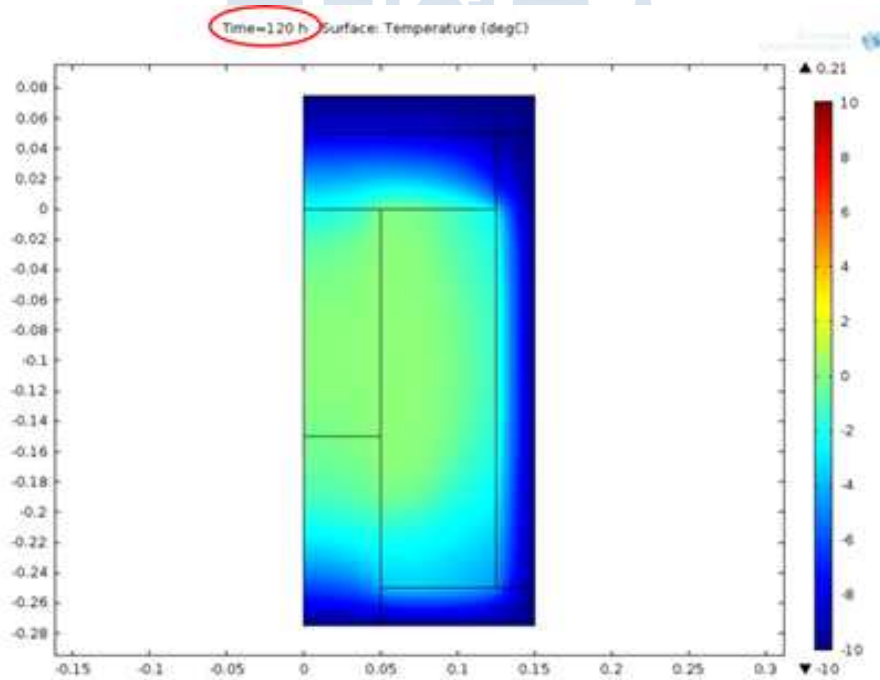


그림 406 120시간 이후의 전극 내부 온도 변화

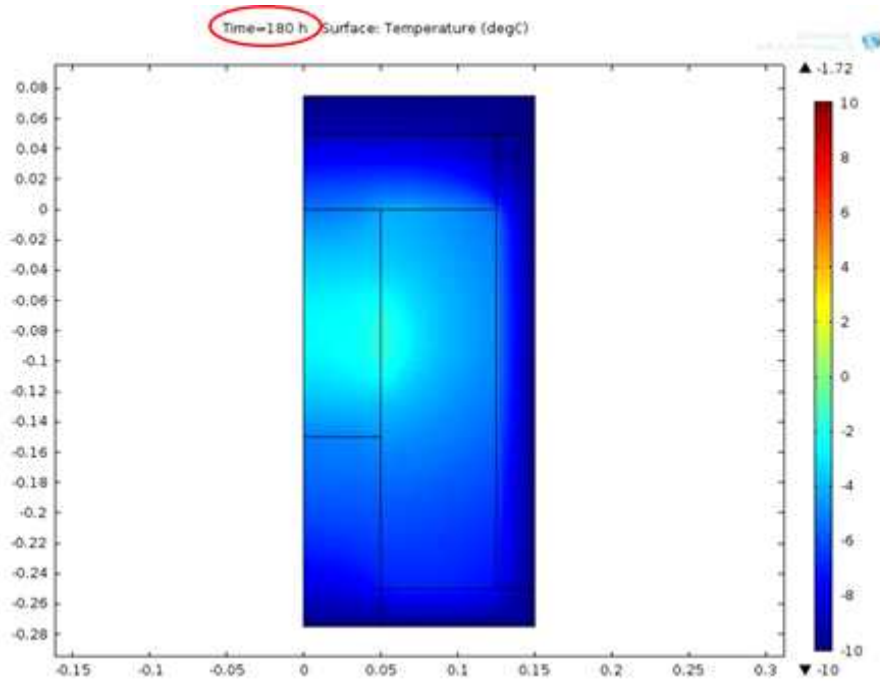


그림 407 180시간 이후의 전극 내부 온도 변화

Center temperature

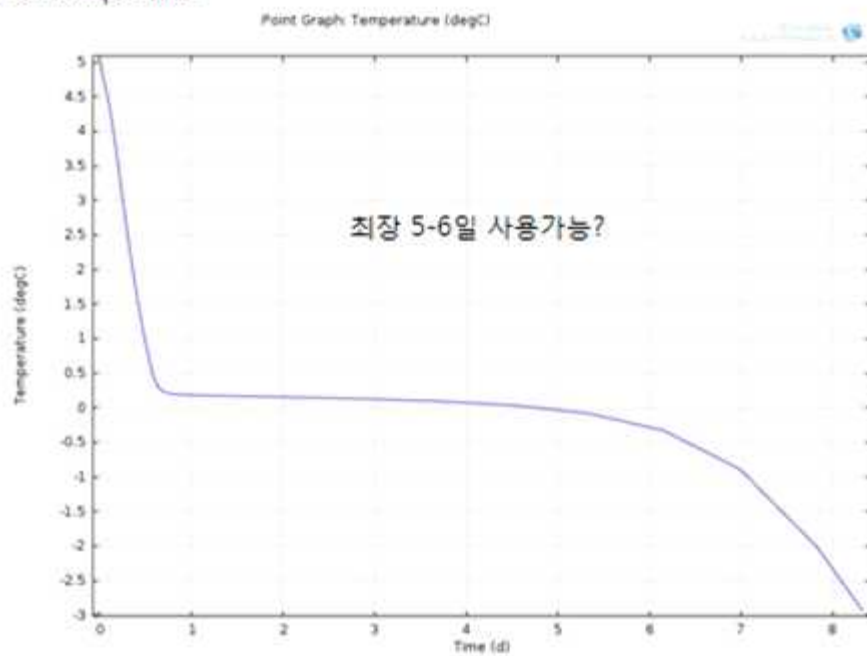


그림 408 시간 변화에 따른 전극시스템 온도 변화 그래프

② 오거 방식의 극지 환경용 전극 장치 개발

- 티타늄 메쉬를 표면에 설치함으로써 표면에 유기되는 정전압의 영향을 많이 받는 한계성을 지니고 있음

: 빙하 표면의 눈 입자가 바람에 의해 이동할 때 전하를 띄게 됨

: 대전된 입자들은 빙하 표면에 정전압을 형성하게 되고 바람의 강약에 따라 표면에 전압의 변화를 유도함

: 눈 입자에 의해 발생하는 전압에 의해 빙하 표면에 설치된 MT 전극에 전류가 유도되

어 전기 잡음으로 작용함

: 이 전기 잡음은 다른 전기적 잡음이 없는 남극 환경에서 가장 큰 문제임

- 극지 환경에서의 전극시스템 온도변화 모델링 결과를 활용한 전극 장치 개발 수행

- 전기적 잡음 회피 방법으로 전극을 깊이 매설하는 방식을 고안함

: 2-3m 깊이에 매설할 수 있어야 함

: 현장에서 단시간에 매설하여야 함

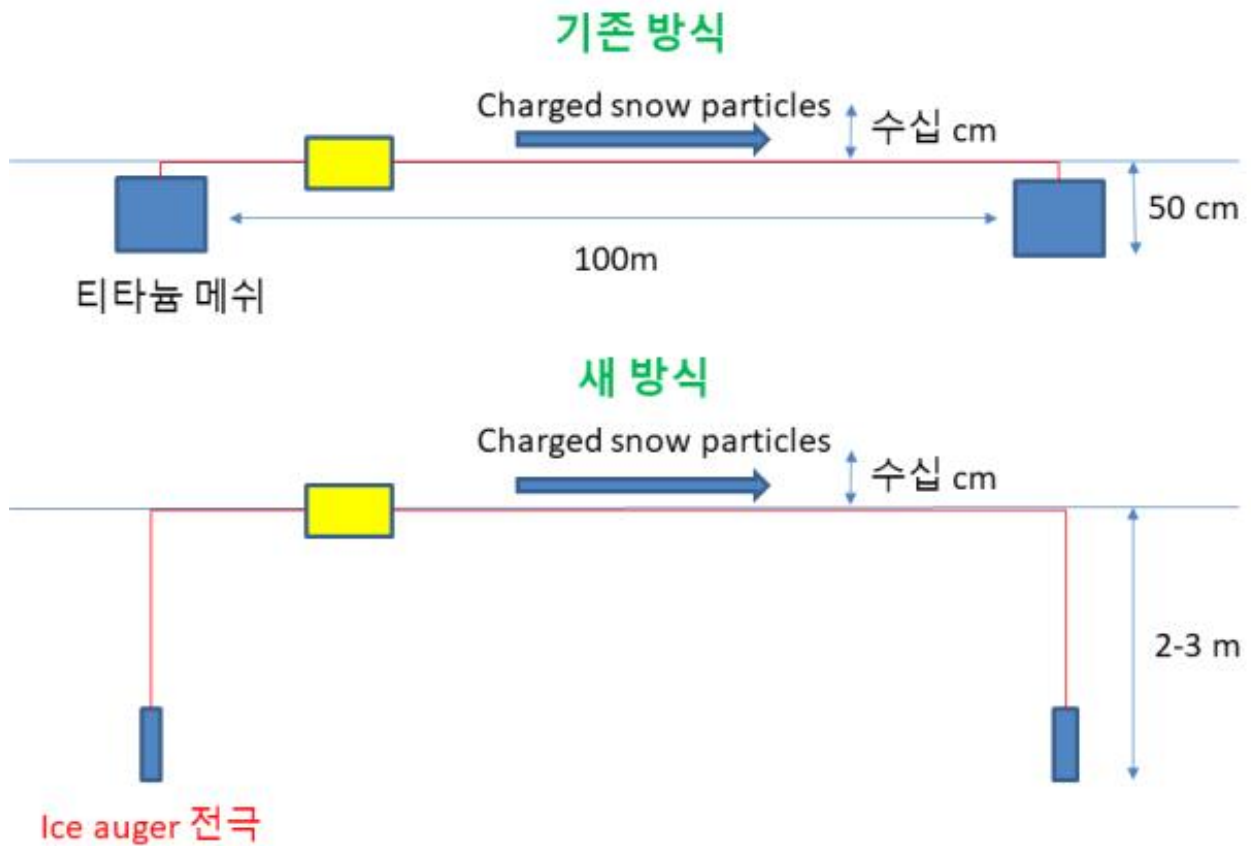


그림 409 극지 환경용 전극별 설치 방식 비교

- 전극은 크게 Ice drill bit, Ice auger, 비전도봉, 전선 등으로 구성됨
- Ice auger 자체가 전도체 기능을 수행하며, 비전도봉 안으로 전선이 연결되어 지표에 위치한 MT 모니터링 장비와 연결되는 구조
- 상부에서 전기드릴을 이용함으로써 Ice auger 방식의 개발 전극 장치를 2-3m 깊이에 설치·회수 가능

- 새 전극 디자인 개요
 - Ice auger 형태의 전극
 - 전도체(ice auger) + 비전도봉
- 전극 구성
 - Ice drill bit
 - Ice auger
 - 비전도봉
 - auger에 결합 가능
 - 내부에 전선 삽입
 - 상단에 연결커넥터 설치
 - 전선
 - 전선 피복 파손을 막을수 있는 보호관 사용 필요
 - 연결 커넥터
- 필요 현장 장비
 - 전기드릴
 - 전기드릴 어댑터
 - Ice auger
- 현장 설치 방법
 - 전기드릴과 Ice auger를 이용하여 2-3m 천공
 - 제작한 전극을 전기드릴을 이용하여 삽입
 - 전선 연결
- 참고
 - Ice auger: kovacsicedrillingequipment.com 참조



그림 410 오거 방식의 전극장치 모식도

- 일반 전기드릴을 이용하여 1차로 드릴링을 수행함
- 1차 드릴링 후 파여져 있는 잔여물을 통과하여 오거 방식의 전극장치를 2-3m 깊이에 매설
- 오거 방식의 전극장치 설치 후 하부 오거로부터 연결되는 전선을 지표에 위치한 MT 모니터링 시스템과 직접 연결

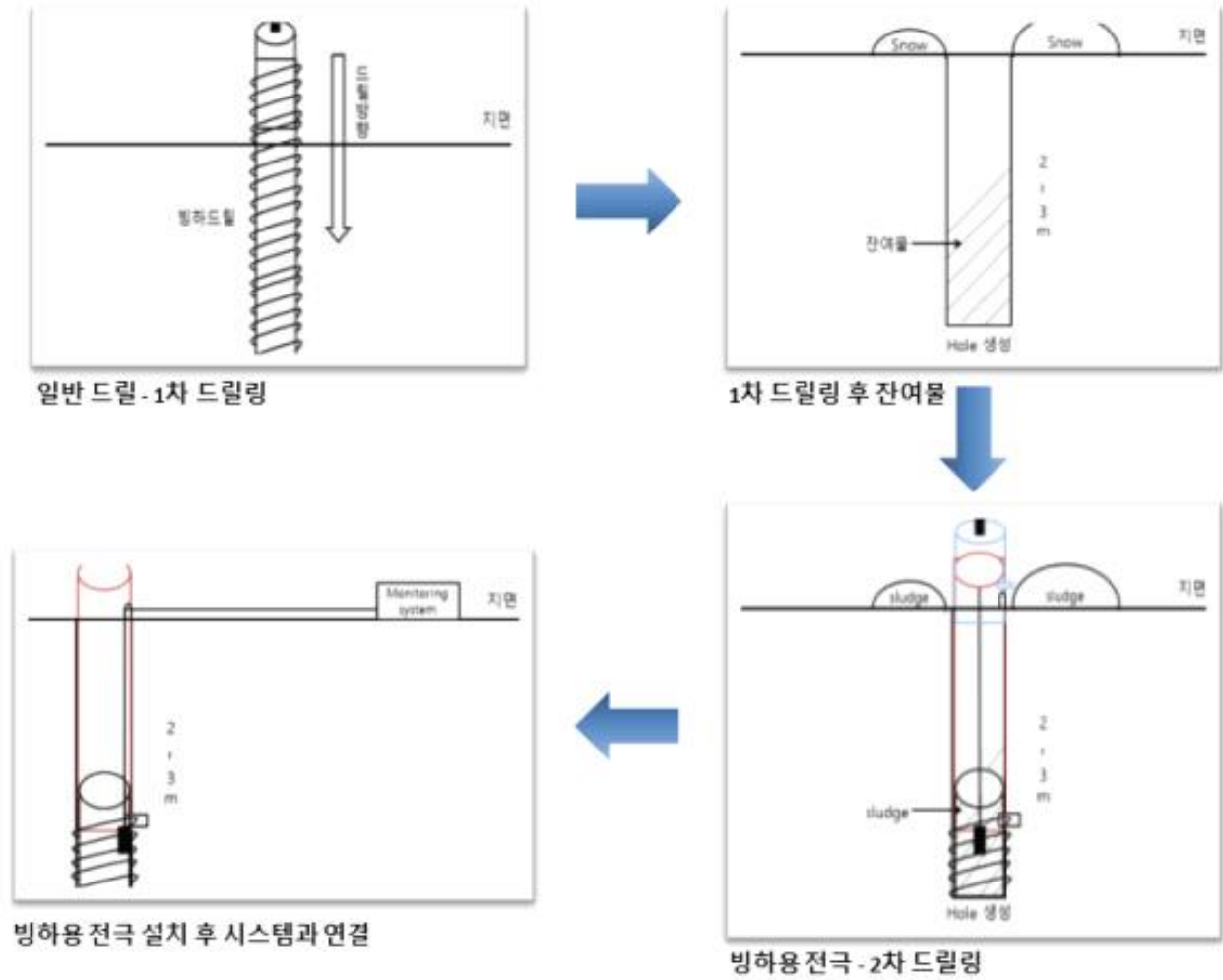


그림 411 오거 방식의 전극장치 현장 적용 시나리오

- 오거 방식의 전극장치 모식도와 동일한 제품을 이용하여 3차원 설계도를 구성한 결과
- 상부 Drill adaptor 부분은 외부 덮개가 탈부착이 가능하므로 현장 상황에 따라 사용자가 조정 가능함
- 하부는 Ice auger 및 Ice drill bit의 기능을 최대화시킬 수 있도록 강력하게 체결하여 고정시켜 놓았음

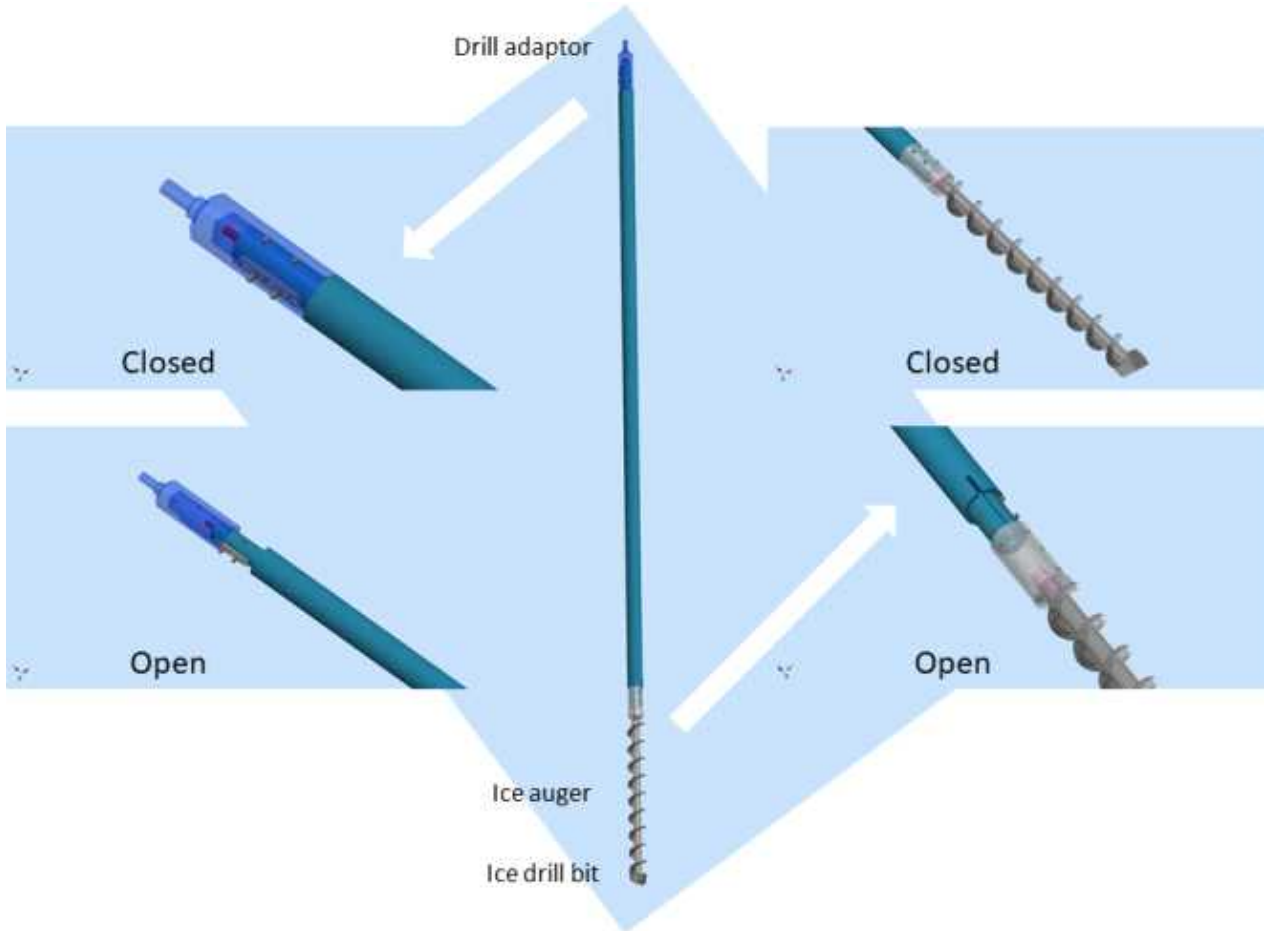


그림 412 오거 방식의 전극장치 3차원 설계도



그림 413 전극장치 개발 모습 - 세부

- 오거 방식의 전극장치 모식도 및 3차원 설계도에 충실함으로써 극저 환경에서 설치·회수가 가능한 전극 장치를 개발 완료함
- 개발한 전극장치 개수: 4 set (전기장 측정용 Ex, Ey 총 4 개)



그림 414 전극장치 개발 모습 - 전체

(3) MT 모니터링 자료처리 소프트웨어 개발

- MT 모니터링 장비로부터 취득된 시계열 데이터의 가공 및 프로세싱을 위한 MT 모니터링 소프트웨어 제작

- GUI 구성 설계도와 같이, 필수 기능 위주로 구성되어 있음

: 자기장 및 전기장 측정 값(시계열 데이터) 표현

: 파일 불러오기 및 저장하기

: 데이터 프로세싱 옵션

: 전기비저항 및 위상 값 표현



그림 415 GUI 구성 설계도



그림 416 GUI 제작 구성

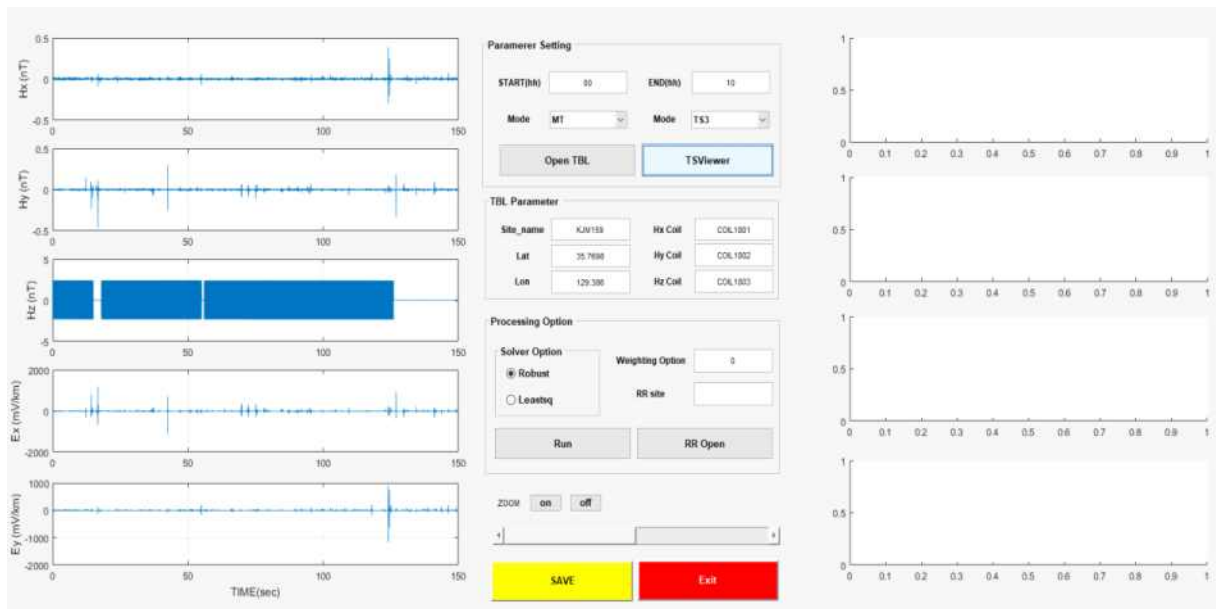


그림 417 MT 모니터링 소프트웨어 화면

- 자기장(H_x , H_y , H_z) 및 전기장(E_x , E_y) 시계열 데이터 좌측부에 결과 도출
- 시계열 데이터 시각화 기능으로 Zoom In, Zoom Out 기능 구현
- 시간 설정에 따른 원하는 시간 대역에서의 시계열 데이터 확인 가능
- 전기비저항 및 위상 값 우측부에 결과 도출하여 그래프로 바로 확인 가능
- 현장 사용자의 편의성 및 시각적 단순화를 중심으로 제작한 MT 모니터링 소프트웨어

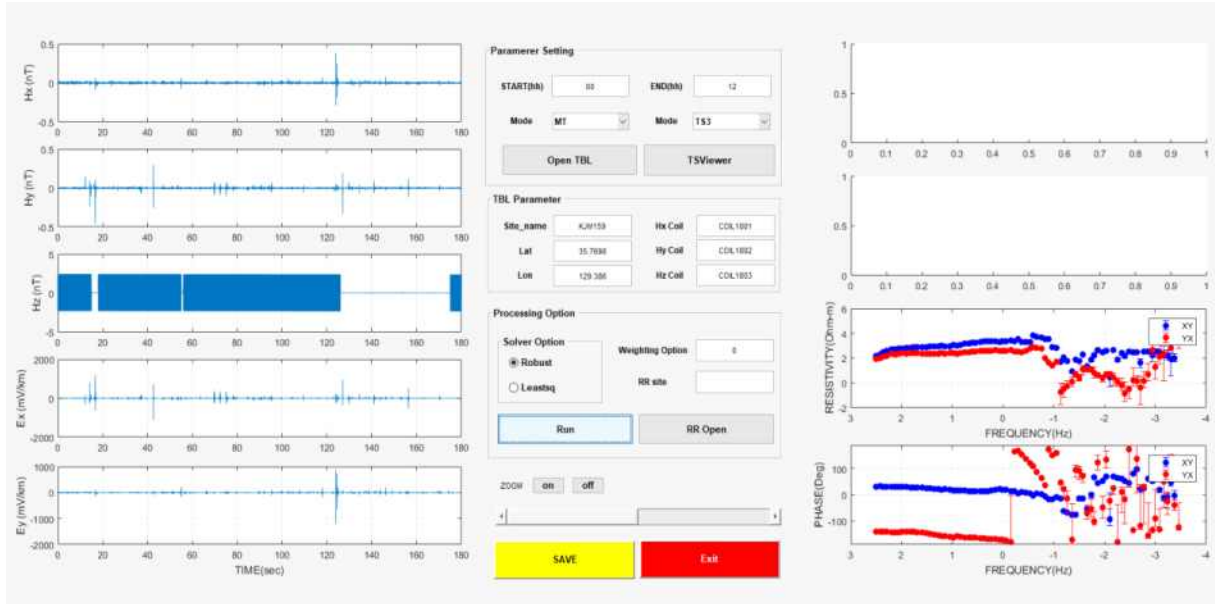


그림 418 MT 모니터링 소프트웨어 구동 모습



3. 장보고기지 주변 빙권 시스템 거동 파악 및 상호관계 규명

가. 빙저호 거동 규명

(1) 빙저호 위치 및 크기 결정

(가) 인공위성 고도계 자료 분석

데이비드 빙하의 거동 기작을 규명하기 위하여 데이비드 상류에 존재하는 빙저호들의 거동에 대하여 살펴보고자 한다. 데이비드 빙하 상류(grounding line으로부터 약 100km 이상) 지역에는 현재 6개의 빙저호가 존재하는 것으로 알려져 있다(Smith *et al.*, 2009). ICESat 인공위성 고도계 자료를 관측을 수행한 2003년에서 2008년사이 최대 약 1 km³(D1)의 부피 변화가 발생하였다. 이 시기에 D4-D6는 빙저수가 채워지는 경향이 나타났으며, D2-D3에는 배수 현상이, D1에서는 다시 부피가 증가하는 경향이 나타났다(그림 420). D2와 D3에서 배출된 빙저수는 D1으로 흘러들어가는 것으로 보이나, ICESat 트랙의 부족으로 인하여 산출된 부피 변화량의 정확도는 낮은 편이다.

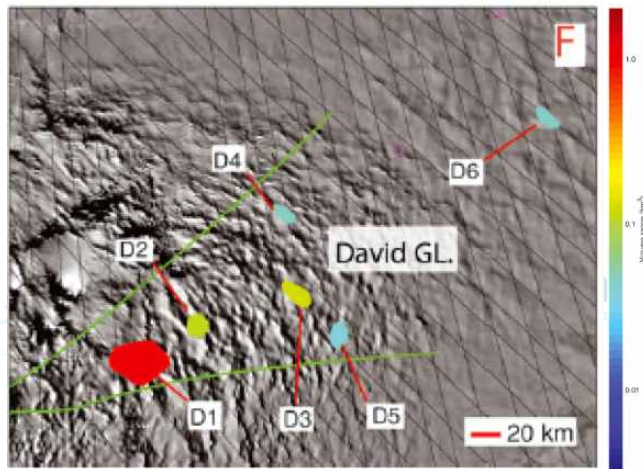


그림 419 데이비드 빙하 상류 빙저호의 분포 (Smith *et al.*, 2009)

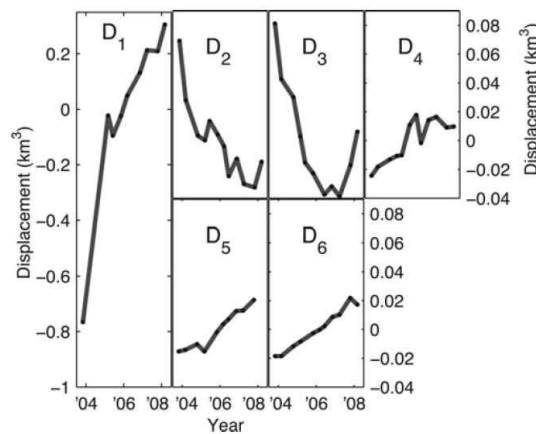


그림 420 데이비드 빙하 빙저호의 부피 변화 시계열자료 (Smith *et al.*, 2009)

이 연구에서는 데이비드 빙하 빙저호들의 보다 정확한 위치 및 크기를 산출하고 서로 간의 상관관계를 파악함으로써 빙저수의 거동 특성을 규명하고자 한다. 기존 ICESat 자료의 재해석과 최근 관측을 수행하고 있는 유럽 연합의 Cryosat-2 인공위성 고도계 자료를 이용하여 과거 빙저호의 거동 양상을 파악하고, GPS 관측 결과를 바탕으로 빙저호들의 상관관계를 파악하는 것을 목표로 한다. ICESat 반복 트랙 방법을 이용하여 표면고도 변화를 산출하는 경우 지형 기복의 영향을 제거하는 것이 무엇보다 중요하다. 그러나 복잡한 지형 기복을 가지는 지역에서는 정확한 수치 지형 모델(DEM)이 존재하지 않아 정확도가 낮은 실정이었다. 최근 Cryosat-2의 자료를 기반으로 매우 고해상도의 수치 지형 모델이 산출됨에 따라 ICESat 자료 해석의 정확성을 보다 높일 수 있다. 아래 그림은 Cryosat-2 기반의 수치 지형 모델을 제거한 ICESat 표면고도 관측값을 보여준다. 트랙의 중앙부에 약 10m에 달하는 고도 변화가 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이러한 방법으로 빙저호 D1과 D2주변의 ICESat 표면 고도 변화 자료를 산출하였다. D3-D6 지역에서는 Cryosat-2 자료의 정확성이 떨어지고 (SARin 모드 자료 부재) 기지로 부터의 거리가 멀어서 연구지역으로 적당하지 않으므로 D1과 D2 빙저호가 주요 연구 대상이다.

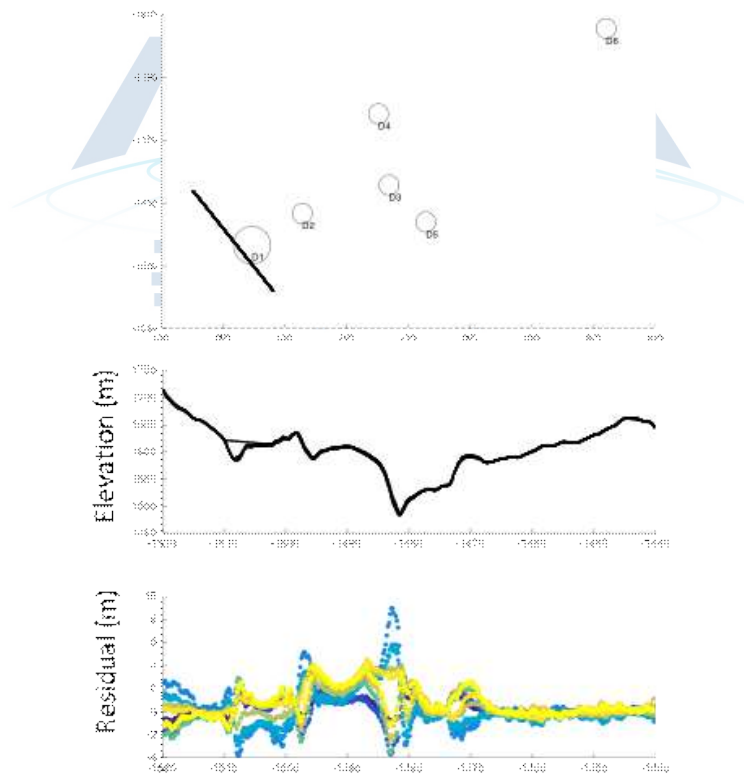


그림 421 (상) 빙저호(원) 및 ICESat 트랙(직선)의 위치. (중) 트랙을 따라 관측된 표면고도. (하) 수치지형모델에 의해 지형 효과가 제거된 표면 고도 잔차

아래 그림은 D1 및 D2 빙저호 주변의 ICESat 트랙을 따라 계산출된 고도 변화량을 나타낸다. 빙저호 부근지역일 가능성이 있는 높은 고도 변화량 관측지역이 기존 연구(Smith *et al.*, 2009)의 결과와 대체적으로 일치함을 볼 수 있다. 하지만 기존 연구에서 탐지되지 않았던 D1 빙저호의 인근 지역에서 높은 고도 변화량이 관측되며 기존 D1 빙저호의 경계와 분리되어 있음을 알 수 있다. 또한 기존 D1 빙저호 경계 내부의 측선들의 거리가 상당히 멀리 떨어져 있어 ICESat 측선을 따라 나타나는 이상대들이 직접적으로 연결되어 있는지는 의문이다. D1 빙저호 지역과 D2 빙저호 지역의 고도 변화량은 서로 다른 부호를 가지므로 D2에서 배출된 빙저수가 D1 빙저호로 흘러들어갈 가능성이 높다.

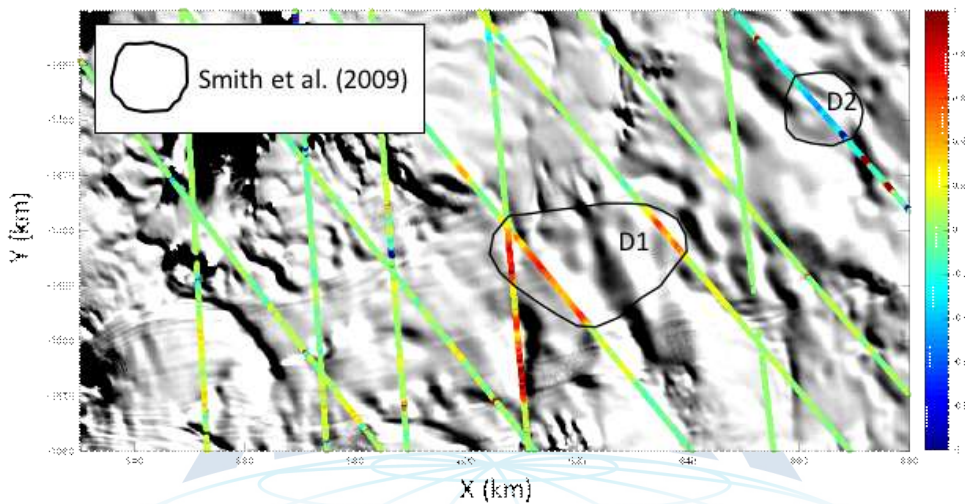


그림 422 빙저호 D1과 D2 주변의 ICESat 평균 고도 변화량 (2003년-2009년). 단위는 m/yr임

ICESat 인공위성 고도계의 뒤를 이어 극지를 관측하고 있는 Cryosat-2 인공위성 고도계는 ICESat과는 달리 레이더를 송신원으로 사용한다. 일반적으로 ESA에서 제공하는 L2 자료를 이용하여 표면고도 변화를 산출할 수 있는데 데이비드 빙하 지역과 같이 지형기록이 심한 지역에서는 균일한 자료 획득이 어렵다. 이러한 단점을 극복하기 위하여 이 연구에서는 Swath 처리 기법(Gray *et al.*, 2013)을 구현하여 Cryosat-2 자료를 빙저호 탐지에 활용하였다. Swath 기법을 이용하여 데이비드 빙하 빙저호 지역의 수치 고도 모델을 작성한 결과, 2016/2017 하계기간에 수행된 항공 탐사에서 획득된 레이저 고도계 자료와 비교할 경우, 기존 수치 고도 모델(BEDMAP2, Cryosat-2 L2, ICESat)에 비하여 현저히 개선된 결과를 제공한다. 즉, Swath 기법을 통한 빙하 표면 고도 변화 탐지가 기존 기법에 비하여 현저히 정확도가 향상될 수 있음을 의미한다.

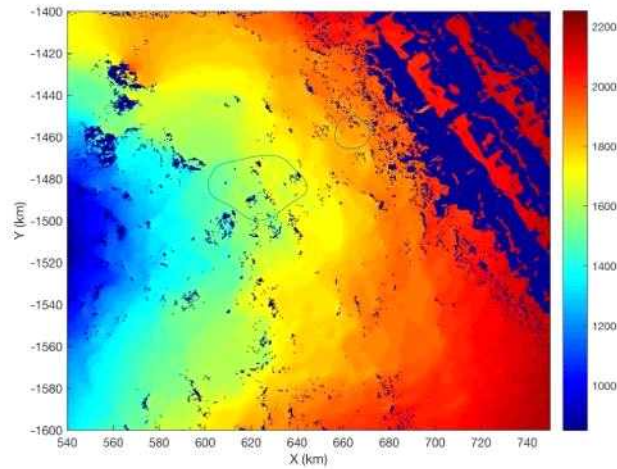


그림 423 Cryosat-2 Swath 기법을 이용한 데이비드 빙하 빙저호 지역 정밀 수치 고도 모델

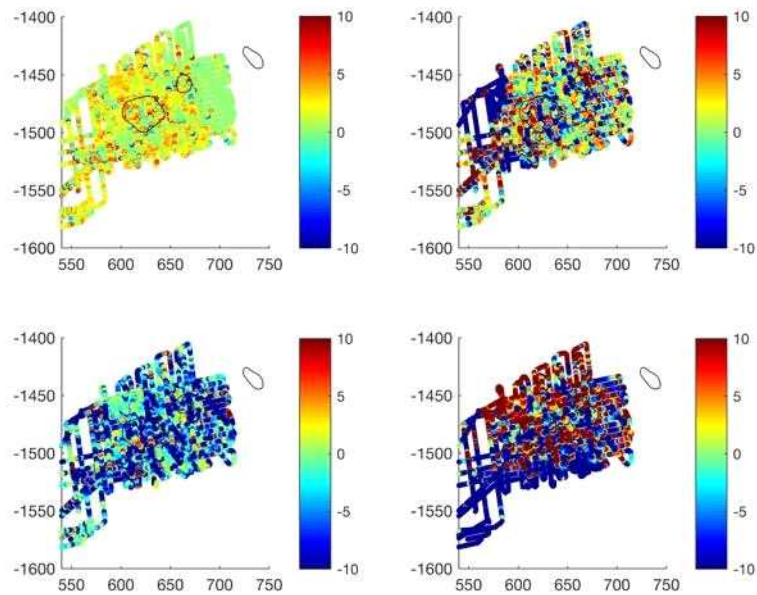


그림 424 수치 고도 모델(DEM)과 항공 레이저 고도계 탐사 자료의 비교: (좌상) Cryosat-2 Swath 기법 DEM, (우상) BEDMAP2 DEM, (좌하) Cryosat-2 L2 DEM, (우하) ICESat DEM

표면 고도의 시간에 따른 변화를 탐지하기 위하여 1년간의 자료를 이용하여 6개월 간격으로 수치 고도 모델을 작성하였으며, 2011년에서 2017년까지 시간에 따른 고도 변화(dh/dt)를 선형 회귀 분석을 통하여 산출하였다. ICESat(2003-2009년)에 의한 발견되었던 D1 빙저호 지역에서는 뚜렷한 고도 변화가 관측되지 않는다. 반면, D2 빙저호로 알려진 지역의 상류에서 뚜렷한 양의 고도 변화가 관측되고 있다. 이 지역에서는 연간 1m이상의 빙저호의 수위가 상승하고 있는 것으로

보인다.

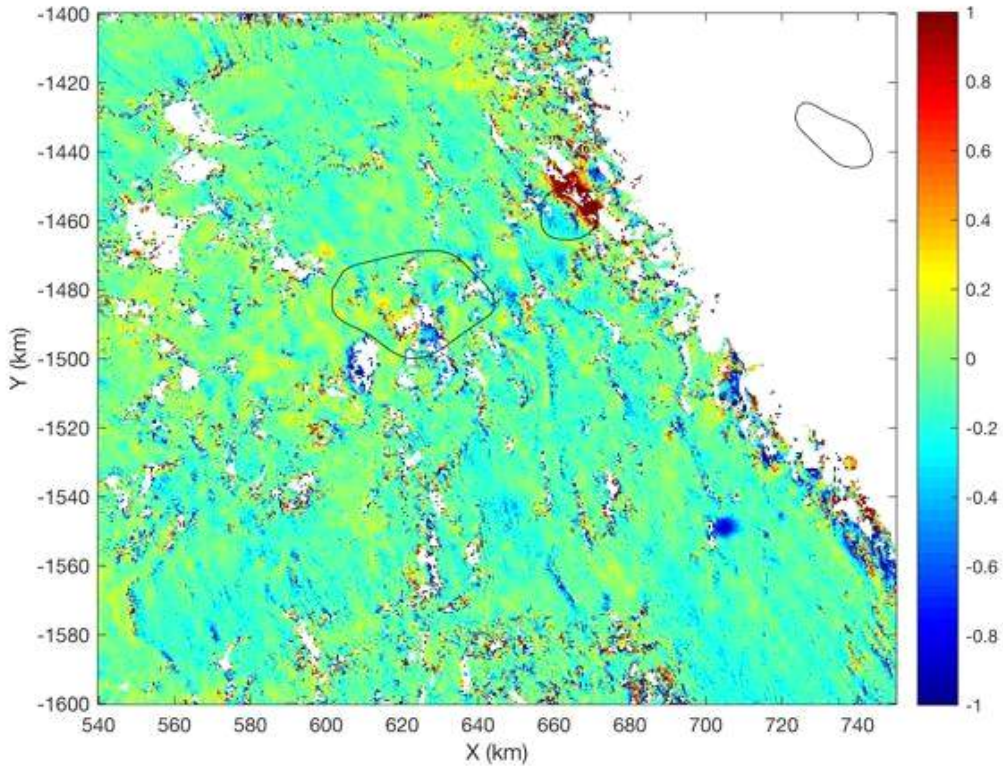


그림 425 데이비드 빙하 빙저호 지역 표면 고도 변화(단위 m/yr). D2 빙저호 지역에서 뚜렷한 수위변화 관측됨

(나) 항공레이더 탐사를 통한 빙저 기반암 고도 분석

빙저호의 수위 변화 탐지와는 별도로 빙저 기반암을 정확히 산출하여 빙저 수리포텐셜 구조를 분석하여 빙저호의 위치와 크기 결정에 활용하였다. 이를 위하여 2016/2017년 하계기간 중 헬리콥터를 이용하여 레이더 탐사, 레이저 고도계 탐사, 중력 탐사 등을 수행하였다. 탐사 자료 중 데이비드 빙하 빙저호 지역을 분석하여 빙하 두께와 빙저 기반암 고도를 산출하였다. 기존 D1 빙저호로 알려진 지역은 크게 두 개의 분지로 구성되어 있으며 D1 빙저호의 동쪽 지점에도 깊은 분지가 존재한다. 기존 D2 빙저호로 알려진 지역도 기반암의 고도가 낮으며 상류로 더욱 연장되어 있는 특성을 보인다. 특히, 수리 포텐셜 지도에서는 D2 빙저호의 상류 방향으로 낮은 포텐셜을 가지는 지역이 존재하여 빙저수가 항상 부족하기에 적합한 환경인 것으로 판단되며, Cryosat-2 Swath 기법에서 포착된 큰 수위 변화 지역과 일치한다.



그림 426 헬리콥터 항공 지구물리 탐사 시스템 (미국 UTIG와 공동 탐사 수행); 빙하투과 레이더, 레이저 고도계, DSLR 카메라 탑재

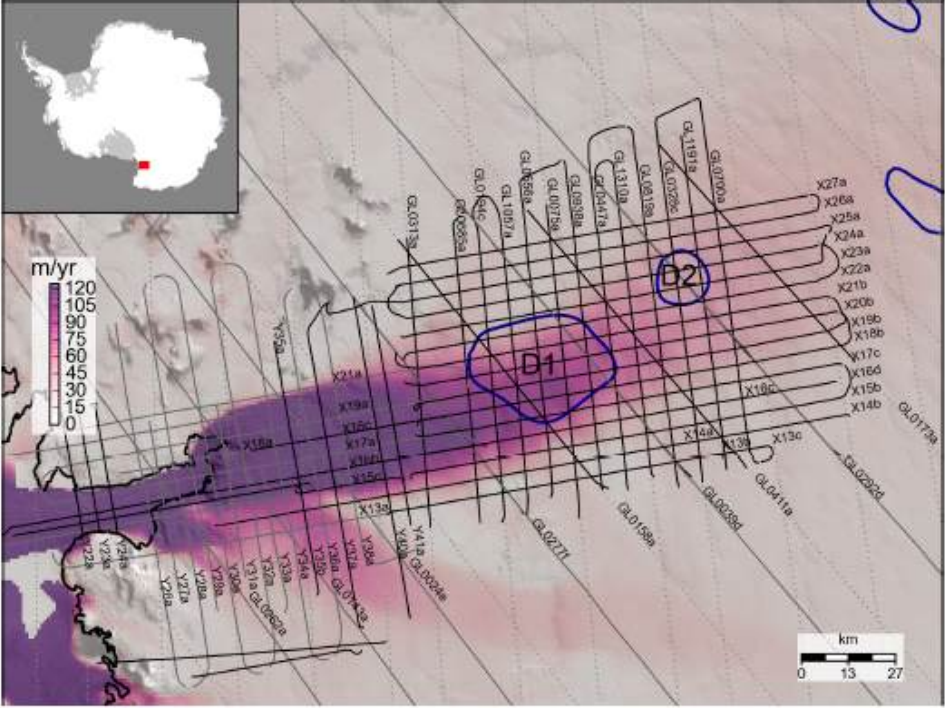


그림 427 데이비드 빙하 지역 헬리콥터 레이더 탐사 측선 (흑색선)

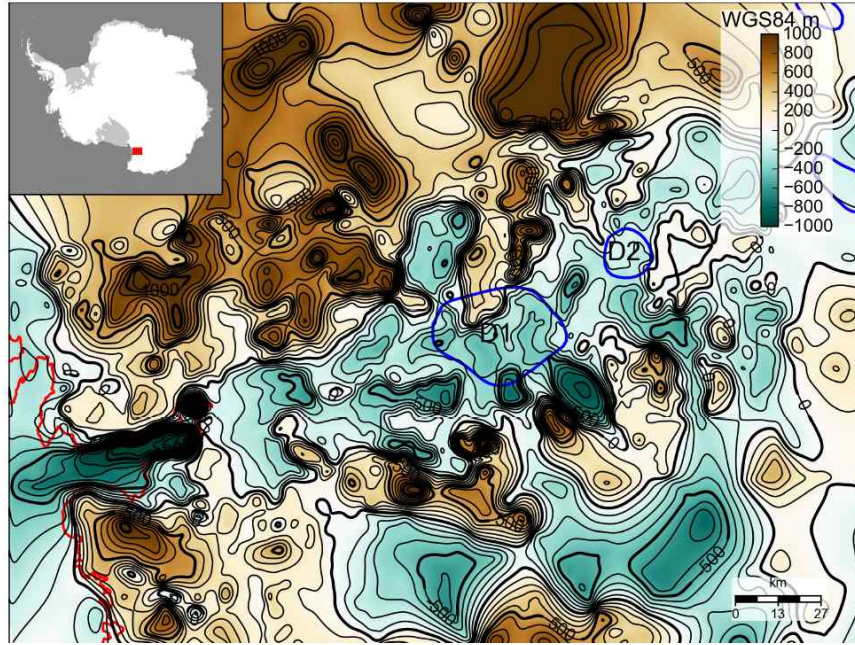


그림 428 헬리콥터 레이더 탐사를 통해 규명된 데이비드 빙하 빙저 기반암 고도

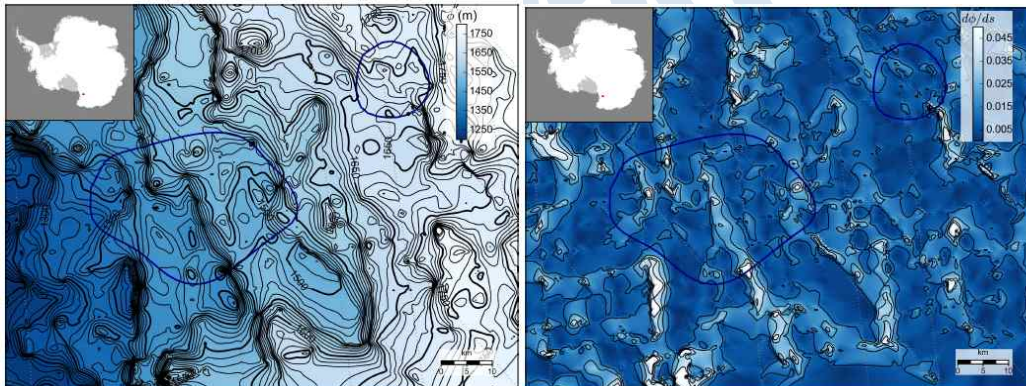


그림 429 D1 및 D2 지역 (좌) 수리포텐셜 분포 및 (우) 수리포텐셜 경사

(다) 빙저호의 위치와 크기

ICESat 및 Cryosat-2 자료를 통한 표면 고도 변화와 헬리콥터 레이더 탐사를 통하여 얻어진 빙저 기반암 형태를 기반으로 빙저호의 위치와 크기를 결정하였다. 수리포텐셜이 국지적으로 낮은 값을 가져서 빙저수가 축적될 수 있는 지역을 결정하고 이들 지역에서 ICESat 혹은 Cryosat-2 고도계 관측에서 유의미한 고도 변화가 관측되는 지역만을 빙저호로 정의하였다. 기존 연구에서 D1으로 알려진 빙저호 지역은 최소 3개의 빙저호로 분할되어 있는 것으로 추정되며 이들은 비슷한 형태의 고도변화를 가지고 있어서 서로 연결성이 좋은 빙저호들인 것으로 생각된다. D2 빙저호의 경우, 기존 빙저호의 위치와 크기는 자료 부족으로 인해 부정확한 것으로 보이며, 이번 연구결과로는 보다 상류쪽으로 치우친 형태이며, 기존 D2 빙저호 거동으로 추정되었던 ICESat 고도 변화 지역은 실제 빙저호의 주변 지역의 고도 변화인 것으로 파악된다.

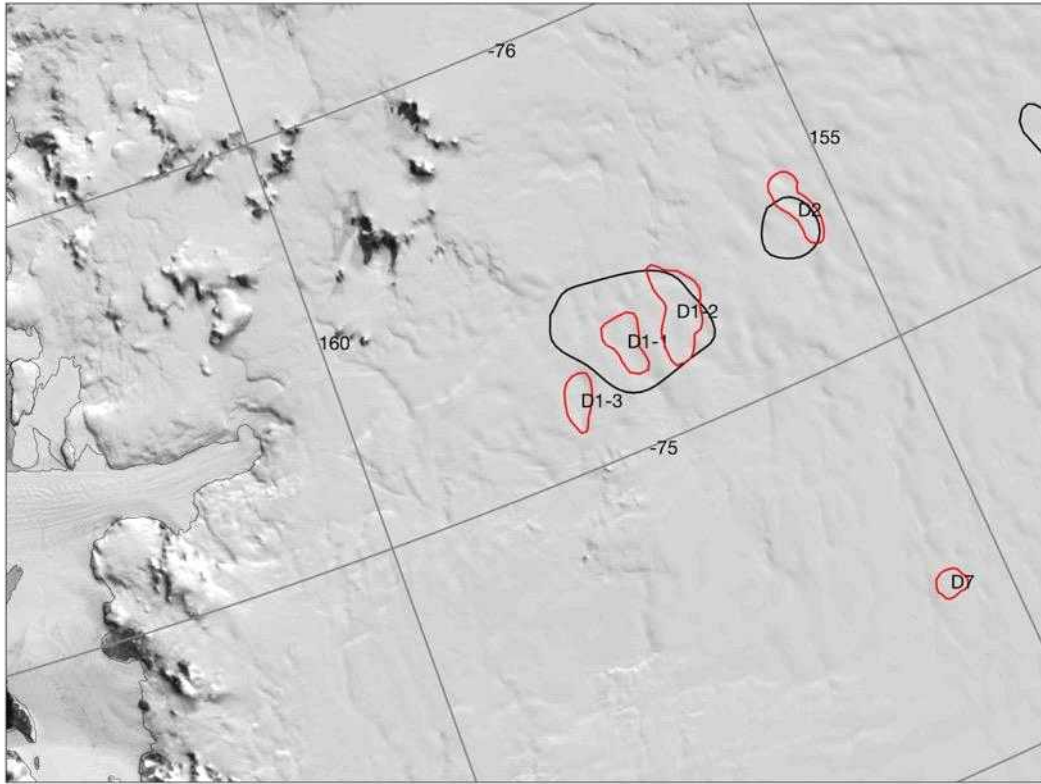


그림 430 인공위성 고도계와 수리퍼텐셜로부터 추정되는 데이비드 빙하 빙저호 분포



Lake	Latitude (deg)	Longitude (deg)	Area (km ²)
D1-1	-75.248	157.309	114
D1-2	-75.268	156.782	221
D1-3	-75.162	157.912	83
D2	-75.367	155.376	124
D7	-74.431	155.498	46

표 55 데이비드 빙하 빙저호의 위치와 크기

(2) 빙저호 수량변화 모니터링

(가) 인공위성 고도계 자료 분석

데이비드 빙하 빙저호 중 D1 빙저호들은 ICESat 인공위성 고도계에서 뚜렷한 고도 변화가 관측된다. D1 빙저호들은 2003년-2009년 사이에 지속적인 수위 상승이 발생하였다. 지속적인 증가 양상은 모두 비슷하며, D1-3 빙저호의 수위 증가율이 가장 크다. 빙저호의 면적을 고려할 경우 각 빙저호들은 7년간 약 0.4-0.5 km³의 수량이 각각 증가하였다. 이 빙저호들은 Cryosat-2 고도계를 통해서도 정확한 수량 변화가 감지되지 않는다.

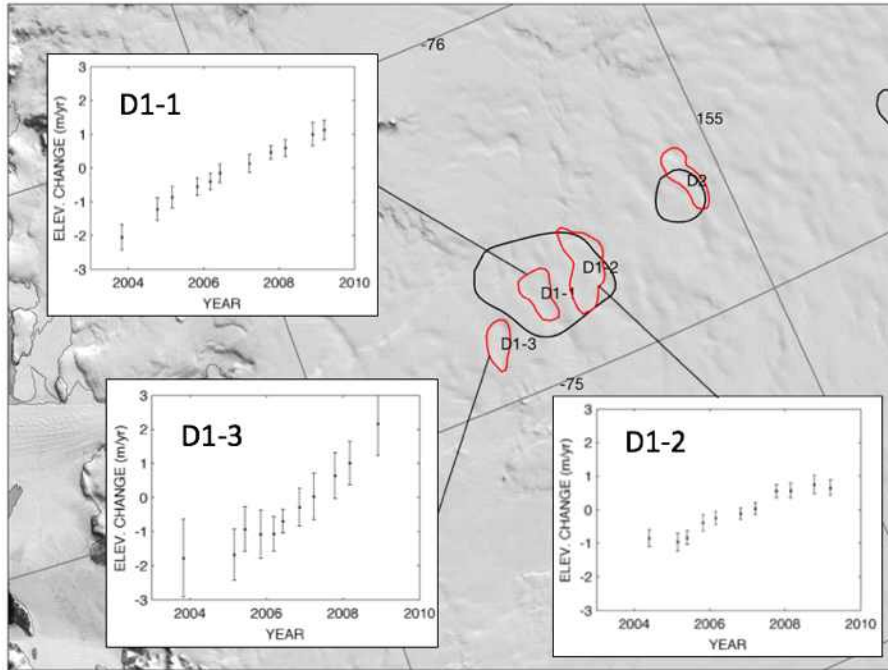


그림 431 ICESat 고도계로 관측된 D1 빙저호들의 평균 고도 변화

Cryosat-2 고도계로는 D2 및 D7 빙저호의 고도변화가 관측된다. D2 빙저호는 가장 큰 고도 변화를 나타내는데 연간 최대 약 2.9m의 수위 변화가 관측되며, 연간 평균 1.32m의 수위가 상승하였다. 2011년-2018년 기간동안 약 1.15 km³의 수량이 증가한 것으로 보인다. 새로 발견된 D7 빙저호는 2015년 이전 연간 약 0.5m의 수위 상승이 지속되었으나, 2015년-2016년 기간에 약 7m에 달하는 급격한 수위 하강이 발생하였다. 만약 주기적인 급수와 배수가 발생하는 빙저호라고 한다면 약 14년의 주기로 배수가 이루어질 것으로 예상된다.

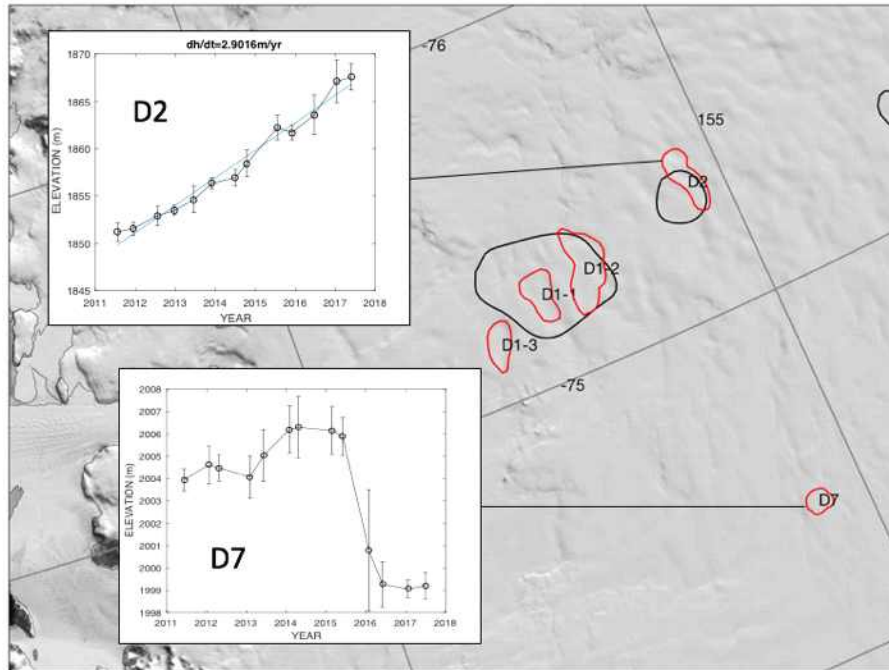


그림 432 Cryosat-2 고도계로 관측된 D2 및 D7 빙저호의 최대 고도 변화

(나) 헬리콥터 레이저 고도계 자료 분석

D1 빙저호의 경우, Cryosat-2 자료의 정확도가 낮아서 고도 변화 감지가 어려우며, D2 빙저호의 경우, ICESat 고도계 자료가 존재하지 않기 때문에 해당시기의 고도 변화를 살펴보기가 어렵다. 이러한 단점을 보완하는 측면에서, 헬리콥터 레이저 고도계 자료를 ICESat 측선을 따라 획득하였으며, 이 자료와 ICESat 고도계 자료를 비교하여 장시간에 걸친 고도 변화를 살펴보았다. 아래 그림들은 ICESat 측선과 동일한 궤도를 따라 획득된 헬리콥터 레이저 고도계 자료와 ICESat 고도계 자료의 차이를 보여준다. 예를 들어, GL0328 측선의 경우, D2 빙저호의 가장자리를 지나는 측선이다. ICESat과 헬리콥터 고도계 자료의 차이가 음의 값을 나타내므로 시간에 따라 고도가 증가하고 있음을 나타낸다. 기존 빙저호 위치에서는 2005년과 2008년 사이에 차이가 있는 반면, 기존 빙저호 위치보다 상류에서는 2005년과 2008년의 차이는 없으나, 2016/2017에 측정된 헬리콥터 레이저 고도와는 큰 차이를 보이는 것으로 보아 D2 빙저호가 2008년 이후 기존 빙저호 위치에서 상류 쪽으로 확장된 것으로 생각된다.

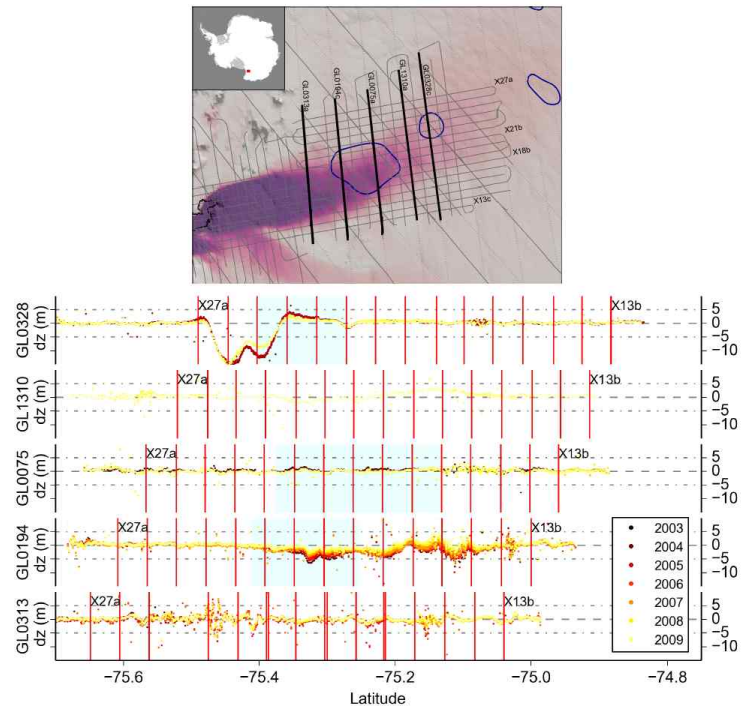


그림 433 ICESat 고도계 자료와 헬리콥터 고도계 자료의 차이

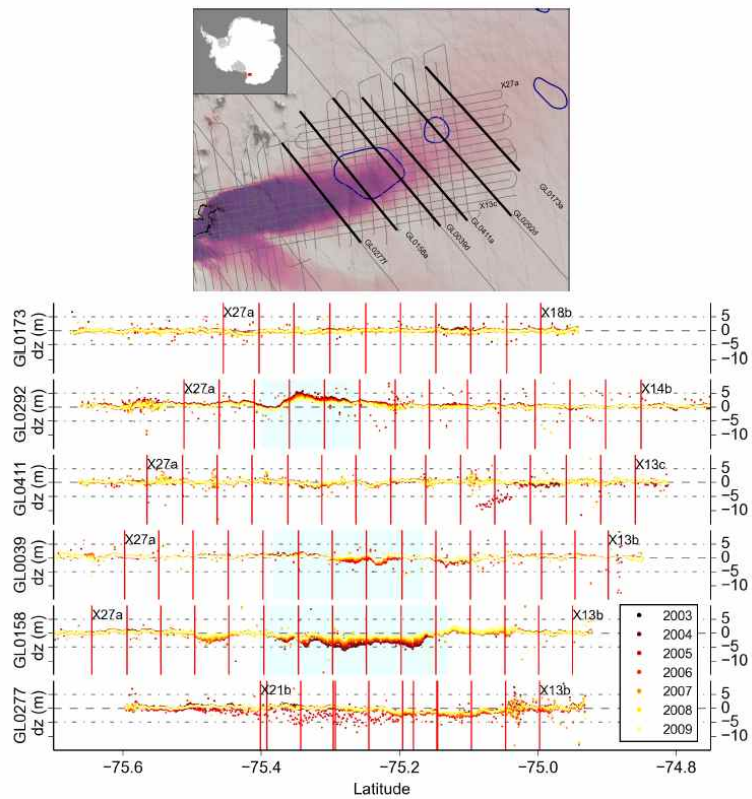


그림 434 ICESat 고도계 자료와 헬리콥터 고도계 자료의 차이

(다) GPS 고도 변화 분석

인공위성 고도계 자료의 검증과 고해상도의 시간에 따른 고도 변화를 관측하기 위하여 D1 및 D2 빙저호 지역을 중심으로 GPS를 설치하여 고도 변화 및 빙하 속도 변화를 관측하였다. 듀얼밴드 GPS 수신기(Topcon GRS-1)를 사용하였으며, 일일 2-4회 1시간동안 GPS 신호를 기록하였다. GPS 자료처리는 CSRS-PPP를 통하여 정적 모드로 위치를 결정하였다. GPS 측점의 고도 자료는 GPS 회수시 측정된 적설량을 이용하여 표면고도로 변환하였으며, 지형 기복을 고려하기 위하여 해당 지역의 DEM(REMA)으로부터 GPS 궤적의 고도 변화를 산출하여 GPS 표면고도 변화에서 제거하였다. 전반적으로 빙저호 지역으로 추정되는 지역에서 큰 고도 변화가 관측되며, 가장 큰 고도 변화를 보이는 곳은 KGPS18 측점으로 연간 약 1.74m가 상승하였다. 이 측점은 새로 확정된 D2 빙저호 내에 위치하는 곳으로 Cryosat-2 관측 자료에서 나타나는 고도 상승과 거의 유사하다. 고도 상승률은 시간에 따라 둔화되고 있어 향후 상승을 멈추거나, 급격한 배수가 발생할 가능성이 있다. D1 지역에서는 D1-3 빙저호에 위치한 KGPS11 측점에서 가장 큰 음의 고도 변화가 관측되는데, ICESat 관측자료에서 나타나는 양의 고도변화와 반대의 결과이며, Cryosat-2 관측자료에서 나타나는 D1-3 근처의 음의 고도변화와는 일치하는 결과이다. D1-1 빙저호 내에 위치한 KGPS06 (2015-2016) 및 KGPS13(2016-2019)은 서로 다른 방향의 고도 변화를 보이는데 이는 서로 다른 시기에 관측이 이루어졌기 때문이거나, 빙저호 중앙부와 주변부의 차이에 의한 것일 가능성도 있다.

KOPRI

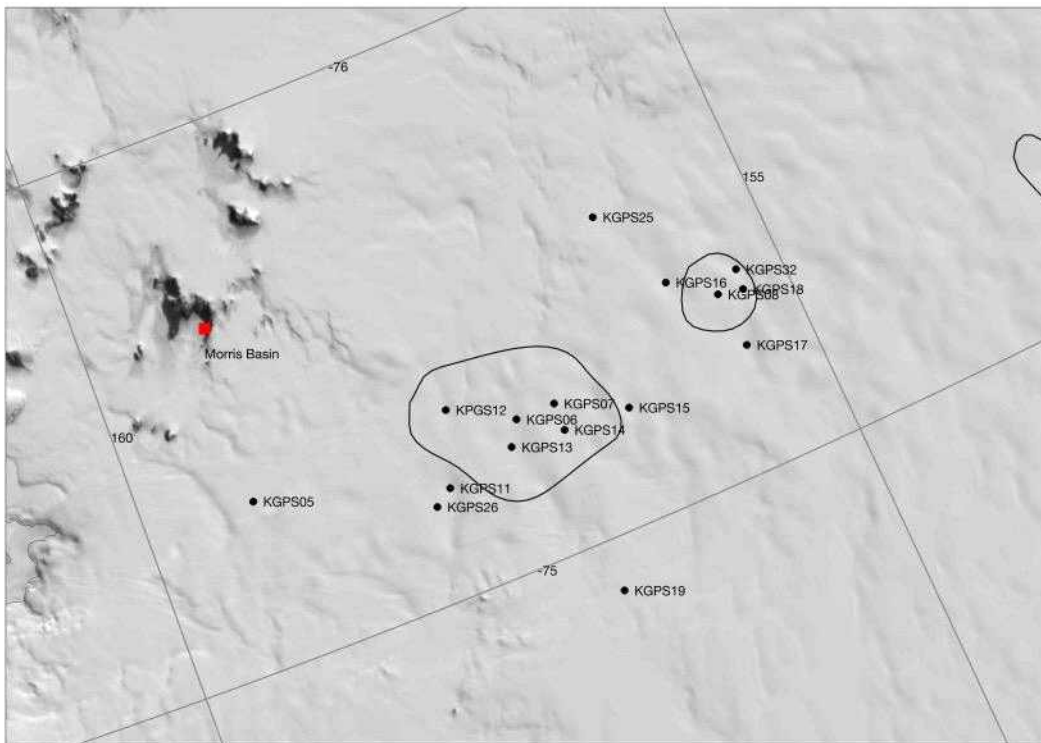


그림 435 데이비드 빙저호 지역에 설치된 GPS 측점

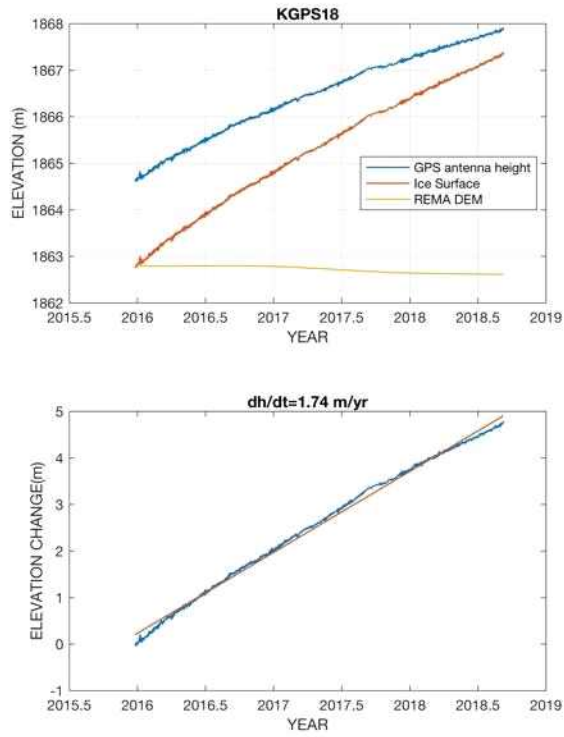


그림 436 D2 빙저호에 위치한 KGPS18 측점의 고도 변화

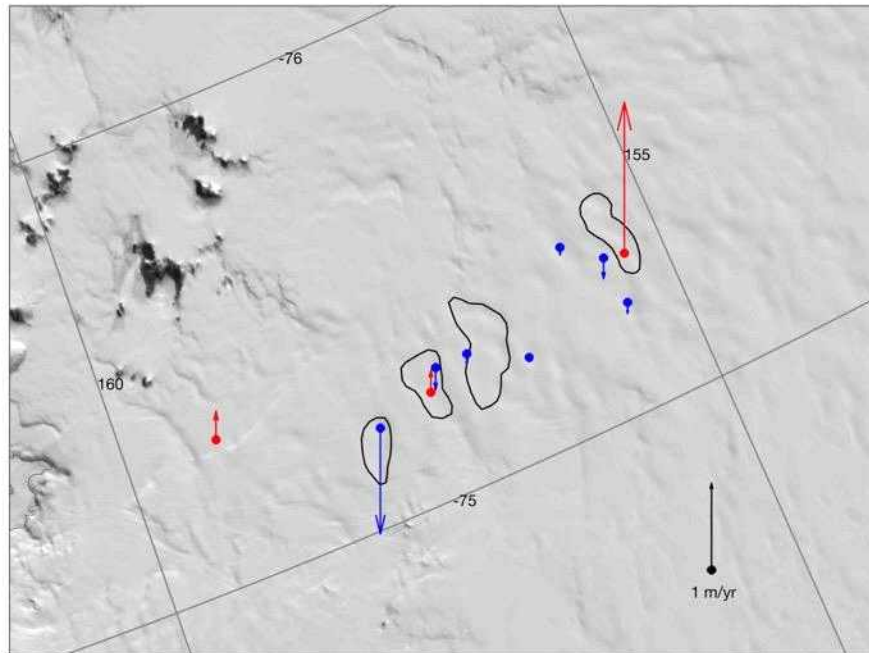


그림 437 GPS로 관측된 빙저호 지역 고도 변화율. 적색화살표: 양의 고도변화율, 청색화살표: 음의 고도 변화율

(3) 빙저 수문망 거동예측 수치모델을 통한 수문 구조 영상화

(가) 빙저수문망 모델

① 남극 빙상 하부 수문흐름

극 지방에서 빙권 하부의 수문 흐름을 관측 하는 것은 오랫동안 도전적인 영역이었다. 특히, 남극 지역과 같은 경우 두꺼운 빙상으로 덮여 있어 표면으로부터 하부로 물의 유입이 거의 없고, 빙상의 두께 또한 최대 4km에 달하여 매우 제한적인 관측 자료만의 획득이 가능하다. 이러한 이유로 인한 기존 남극 탐사 자료의 부족으로 빙저호 및 빙저 수문망의 거동 예측연구는 매우 제한되게 이루어져 왔다. 하지만, 최근 본 과제를 기반으로 한 장보고기지 주변 빙하의 수문인자 관측 자료가 누적되고 있어 지구물리 탐사 자료, 인공위성 자료, GPS 자료 등을 활용한 보이지 않는 빙저 수문망 흐름의 해석 가능성이 증대되고 있다.



그림 438 남극 빙저 수문망: 남극의 두꺼운 빙상 아래에는 다양한 형태로 물이 흐르고 있으며, 이러한 물의 흐름은 상부 빙권 거동 속도 증가 및 감소의 직접적인 원인으로 작용함

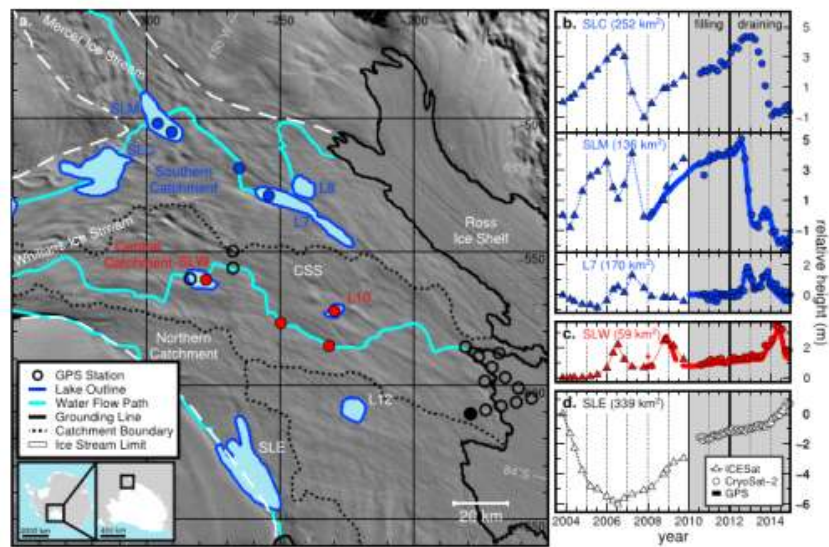


그림 439 GPS 고도변화 및 인공위성 고도계 자료를 활용한 남극지역 수문 변동 주기 연구 사례 (Fricker *et al.*, 2014)

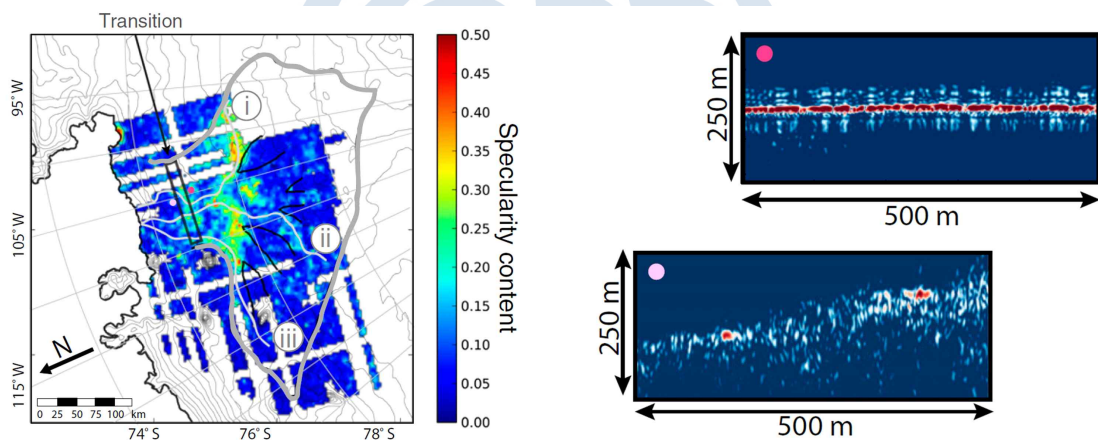


그림 440 항공레이더 탐사 자료 기반 빙저 수문망 형태 및 빙저수 부존 예측지역 규명 사례(Schroeder *et al.*, 2013)

- (수문 변동성 관측) 현재, 남극 하부의 빙저호를 포함한 수문망 구조 및 흐름 연구는 직접적인 탐사 기반의 관측보다는 앞서 기술한 간접적인 접근법을 통한 해석이 주를 이루고 있다. 이는 빙저 수문망 진화 구조 해석에 크게 기여하고 발전해오고 있으나 각 연구 방법별 시공간적 규명 측면에서 한계점이 존재한다. GPS 관측을 통하여 빙상 표면고도의 시계열 변화를 통하여 빙저호의 변동성을 예측하는 경우 시간적인 변동 자료를 획득할 수 있으나, 제한된 관측점에서만 자료를 획득할 수 있으므로 입체적인 공간 변화 해석에 한계가 있다. 인공위성 고도계 자료를 통한 빙저호 탐사의 경우 공간 및 시간적 관측을 포함하기는 하나, 시간 및 공간 해상도 두 가지 모두의 측면에서 한계점이 있다. 또한, 항공 레이더 탐사 등을 통하여 획득한 자료는 빙저면 세부 지형의 개선 및 이를 통한 공간적인 수문구조의 해석이 가능하나 탐사 순간의 공간분포이기 때문에 시간적 변화 측면에

서의 해석이 어렵다. 따라서, 이러한 자료들의 장단점을 보완하기 위해 통합적 자료 해석의 측면에서 빙저호 변화 및 빙저수문망 변동성이 연구되어야 하며, 빙저수문망 수치모델을 통하여 관측 자료에 대한 검증 및 해석이 동반되어야 한다.

- (빙저수문망의 시공간적 변동성) 남극 빙상 하부에 존재하는 물은 수리포텐셜 구배⁶¹⁾에 따라 흐르게 된다. 일반적으로 단순화된 수문흐름모델의 경우 정적인 물의 흐름, 즉, 빙저면에 존재하는 물의 압력 에너지를 상부 빙상이 누르고 있는 압력과 같다고 가정하고 수문흐름을 모의하나, 실제 빙상 아래에서는 빙상 하부용융(basal melting)의 변동과 빙저수 유출량의 변동성으로 인해 빙저수의 압력에너지가 동적으로 변하기 때문에 수문흐름 또한 시공간적으로 변하며 흐르게 된다.

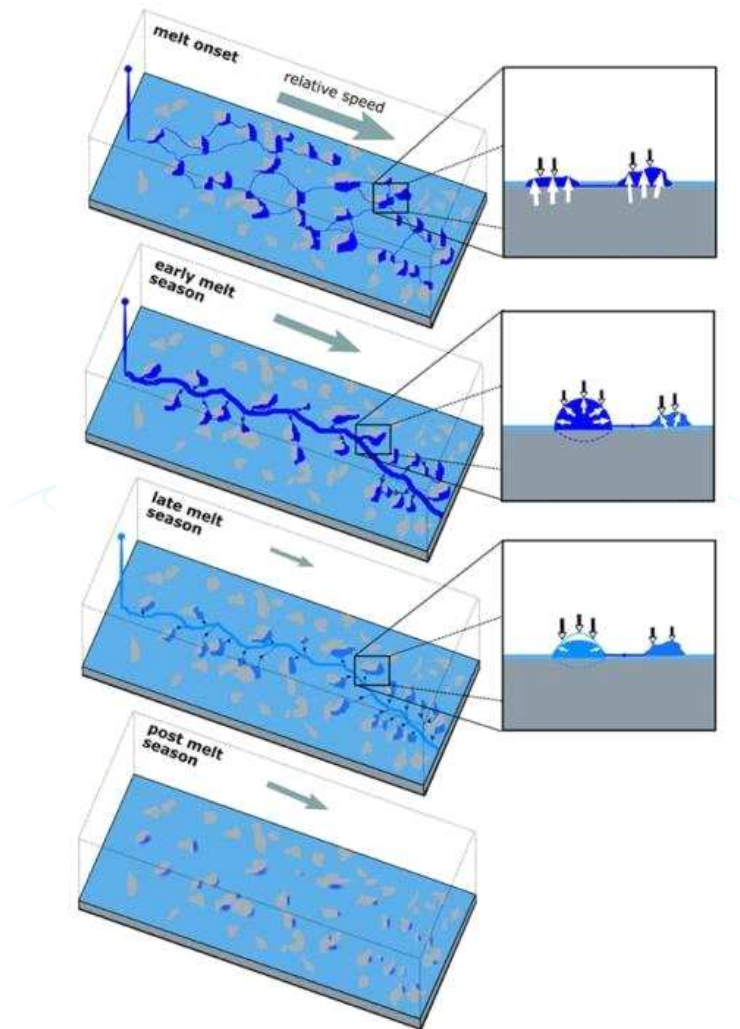


그림 441 빙저수문망 흐름의 동적 변동성: 빙하하부 물의 용융(혹은 지표수유입) -> 빙상 하부 물의 압력 증가 -> 빙상표면고도 증가 -> 채널확장 -> 빠른 유량 배수 -> 채널 닫힘 -> 반복 (Davison *et al.*, 2019)

61) 상부빙상이 누르는 압력 포텐셜과 빙권-암권 경계면의 위치 포텐셜 합인 기울기

(빙저수문망 흐름의 구조 및 형태) 빙상 하부에서 어떠한 형태로 물이 흐르는지는 상부에 누르고 있는 빙상이 누르는 압력, 빙권과 암권사이의 지열 및 마찰로 인한 빙저 용융으로 인한 물의 생성, 하부 매질의 형태(암반, 미고결층) 등의 복합적인 요인과 연관되어 나타난다.

남극 빙상 하부의 흐름은 실제적으로는 시공간적으로 복잡하게 변동하며 흐르지만, 초기의 모델은 지하수 모델에서 기원하여 해당 지역의 수리전도도 특성 및 수리포텐셜의 구배의 곱에 따라 정적으로 흐른다고 가정하였다. 이후, 유역의 경계에 존재하는 고립된 큰 규모의 빙저호 외에도 빙저수문의 주 흐름유역을 따라 존재하며 물의 흐름이 변동성이 있는 활동성 빙저호의 존재가 보고되면서, 물이 단순히 정체되어있는 것이 아닌 빙상 아래서 흐르고 있다는 것이 발견된다. 빙저 용융(basal melting)으로 생성된 물은 내부 압력 등의 조건에 따라 빠르게 배출되는 채널흐름(Channelized flow), 넓고 얇은 형태로 천천히 배출되는 분산흐름(distributed flow), 그의 중간 형태로 알려진 canal flow 형태의 흐름이 동적으로 변하며 나타난다(Flowers *et al.*, 2015).

물이 주 흐름 통로를 통해 빠르게 효율적으로 배수되는 흐름을 채널 흐름으로 정의하며 R-channel, Nye channel 등이 이에 속한다. 또한, 얇고 넓은 면적의 빙권-암권 경계면을 천천히 흐르는 물을 분산흐름으로 정의하며 세부적으로는 sheet 흐름/cavity 흐름/ 지하수 유동처럼 공극을 통해 물이 흐르는 공극 흐름으로 나누어진다. 채널흐름의 경우 물의 집중된 공간을 통해 빠르게 흐르는 기작이기 때문에 효율적 흐름(efficient flow) 분산흐름의 경우 넓은 면적을 천천히 흐르는 흐름이기 때문에 비효율적 흐름(inefficient flow)라고 부르기도 한다.

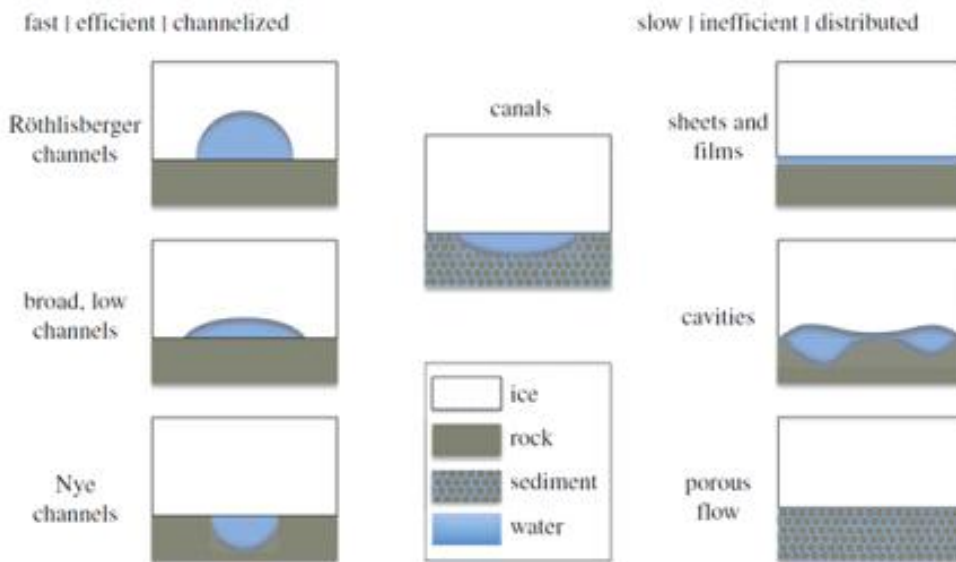


그림 442 빙권-암권 경계에서 생성되는 다양한 수문흐름 구조(Flowers *et al.*, 2015)

빙저수문망의 진화가 빙권 변화 원인규명 측면에서 중요한 이유는 분산흐름의 경우 물이 천천히 넓은 지역을 흐르는 특성상 빙저수 압력이 높아지기 때문에 빙권과 암권사이의 마찰력을 줄여주어 빙권의 흐름을 가속화시키는 역할을 하고, 채널 흐름의 경우 내부의 물을 빠르게 유출시켜 얼음과 암반의 접촉면을 증가 시키는 역할을 하기 때문에 유효 압력⁶²⁾을 증가시키는 방향으로 역할을

하게 되어 빙하의 이동속도를 줄이게 된다. 따라서 물의 흐름의 시공간적인 진화를 파악하는 것은 그것 자체로 뿐만 아니라 빙권의 변동에 대한 연계연구에서도 중요한 측면을 가진다.

② 모델의 발전

빙저수문망 모델의 경우 초기에는 단순한 지하수 모델의 형태로부터 시작하여 채널흐름과, 분산흐름을 구분하여 두 가지 요소간 상호작용을 수치모델로 구현하여 빙저수문의 변동성을 더욱더 정확하게 모사하기 위해서 발전되어 왔다. 모델 도메인 또한 단순한 빙상형태를 가정한 빙저하천모델(synthetic model)로부터 시작하여 현장의 실제 지형을 반영하고 입력 및 출력인자 또한 단순한형태(homogenous/constant)에서 현실적인 관측값들(heterogeneous/time variable)을 적용하며 현실과 유사한 수문흐름을 구현하는 방향으로 발전해왔다.

대부분 빙저수문망 모델 적용은 연주기의 수문 변화가 활발한 그린란드 빙하 지역의 현장 연구에 많이 활용되어 왔으며, 일부 부분적인 수문현상들을 관측 자료와 연계하여 구현하긴 하였으나, 모델의 물리기작들이 실제의 빙상 하부 수문망 변동을 구현하느냐에 대해서는 아직까지 미흡한 점이 존재한다. 이러한 점들을 지속적으로 보완하고 빙저수문망 흐름을 신뢰도 있게 모사하기 위해 다양한 수문모델들이 개발되어 왔고, 이러한 기 개발된 수문모델의 출력값에 불확실성에 대해서 비교하고자 최근 SHMIP(Subglacial Hydrolog Model Intercomparison Project)가 수행된 바 있다.

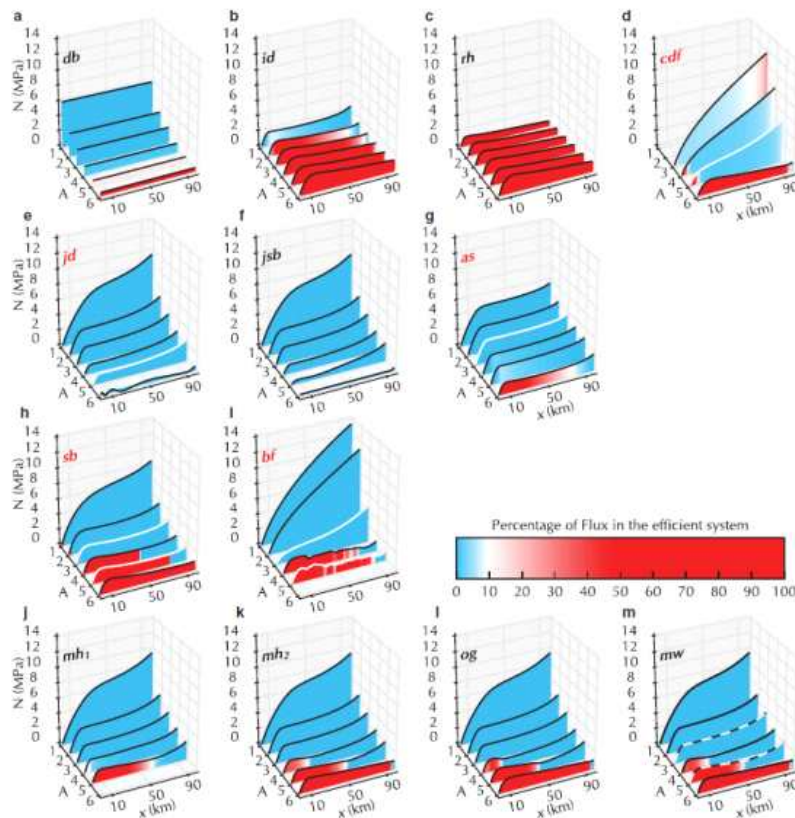


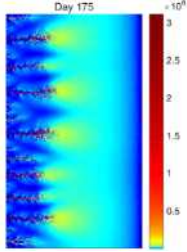
그림 443 SHMIP 프로젝트에서 활용된 빙저수문망 모델들의 출력 값(유효압력과 흐름형태) 비교(de Fluerian *et al.*, 2018)

62) 빙상이 누르는 압력과 내부 빙저수압의 차이

이를 통해 모델의 상호 주요 출력 값인 유출량(discharge), 유효압력(effective pressure) 등을 단순한 형태의 도메인에서 비교하여 모델 마다 어떠한 특성을 보이는지를 분석하였다. 대체적으로 유량이 낮은 흐름 조건에서는 모델들 간에 비교적 유사한 결과 값들이 나왔으나, 유량 유입이 큰 조건, 복잡한 지형에서의 모델, 단 시간 내의 수문변동을 구현하기 위해서는 많은 모델의 보완이 필요한 것으로 나타났다. 채널흐름을 구현하지 않고 sheet flow 만 구현하는 시스템과 같은 경우 유량이 낮은 경우에 sheet-channel interaction 모델과 유사한 결과 값을 얻었으나, 유량의 유입, 변동성이 큰 경우에는 반드시 채널 흐름과 분산흐름을 동시에 구현할 수 있는 모델이 필요하며, 앞으로 모델의 물리기작 또한 장기적으로 보완되어야 할 필요성이 있다.

표 56 주요 수문망 모델

빙저수문 모델	모델명	관련논문	모델 특성 (장단점)	모델 사례
1	water film model	(Le brocq <i>et al.</i> , 2009)	<ul style="list-style-type: none"> - 빙상하부 물의 흐름이 얇은 필름 형태의 흐름임을 가정한 모델 - 단순하나 동적인 변동성을 표현하기 어려움 	
2	two layer (sheet-till) model	(Buelor <i>et al.</i> , 2014)	<ul style="list-style-type: none"> - 물의 흐름이 가능한 layer와 물을 저장하는 till layer를 가정한 두 개의 층의 흐름을 구현 - PISM 모델에 탑재 	
3	double-continuum model	(de Fluerian <i>et al.</i> , 2014)	<ul style="list-style-type: none"> - fast (efficient) flow 와 slow (inefficient) flow 시스템의 유량 교환을 상대적으로 적은 계산 비용으로 구현 - Elmer-ICE 탑재 - 개별 채널의 생성 및 변화를 구현하지는 못함 	
4	GlaDS model	(Werder <i>et al.</i> , 2013)	<ul style="list-style-type: none"> - 모델의 요소(element)에서는 sheet flow를 모델의 격자(edge)에서는 channel flow를 구현함으로써 수문 변동성을 가장 현실적으로 구현 - 현장 실측 규모 연구 적용에 적합 - Elmer-ICE 탑재, ISSM 탑재예정 	

5	SHaKTI model	(Sommers <i>et al.</i> , 2018)	<ul style="list-style-type: none"> - 하나의 지배방정식으로 2가지(sheet, channel) 흐름을 모두 구현하도록 설계 - Reynolds number에 따른 laminar to turbulent regime 구현 - ISSM 탑재 	
---	--------------	--------------------------------	--	---

③ GlaDS 모델

GlaDS(Glacier Drainage System) 모델의 경우 현재까지 개발되어 있는 모델 중 수문의 변동성 모의의 측면에서 가장 현실적으로 모사할 수 있도록 개발된 모델이다 (Werder *et al.*, 2013). GlaDS 모델은 앞서 기술했던 분산 흐름(distributed flow)를 모델 격자의 요소(element)에서 구현하고 주변 격자의 모서리(edge)에서 채널 흐름(channelized flow)의 생성 소멸을 구현함으로써 빙상 하부의 빙저호 진화 및 수문망의 생성 소멸 흐름을 비교적 잘 구현 할 수 있다.

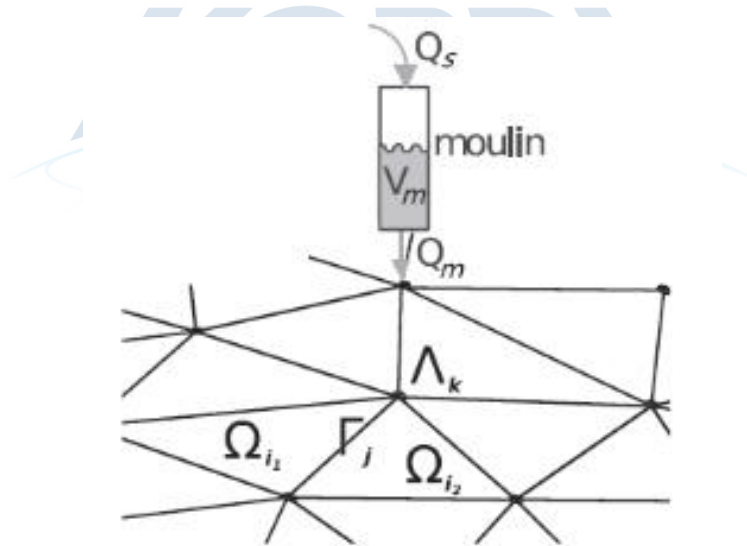


그림 444 GlaDS 모델의 격자망: sheet flow의 경우 요소(element)에서, channel flow의 경우 주변의 모서리(edge)에서 흐름이 구현되며 두 개의 흐름 성분은 압력조건에 따라 상호 유량을 교환함

분산흐름(distributed flow or sheet flow)의 질량 보존식과 같은 경우 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h_e}{\partial t} + \nabla \cdot q = M$$

h : 빙저수문의 두께(water layer thickness)(m), h_e : 유효저장층의 두께(effective storage thickness)(m), q : 유량(discharge)(m²/s), M = 빙저용융량(basal melting)(m/s), t : 시간(s)

채널 흐름과 같은 경우 반구의 R-채널이 얼음의 용융에 의한 열림과 얼음의 변형에 의한 닫힘을 모사한다.

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial s} = \frac{\Xi - \Pi}{\rho_w L} + m_c,$$

S : 채널단면 면적(m²), Q : 채널을 통해 흐르는 유량(m³/s) s : 채널 방향을 따른 수평거리 (m) L : 잠열(latent heat)(J/kg) m_c : 분산흐름으로부터 채널흐름으로 전달되는 유량 Ξ : 에너지 소산(W/m) Π : 현열(W/m)

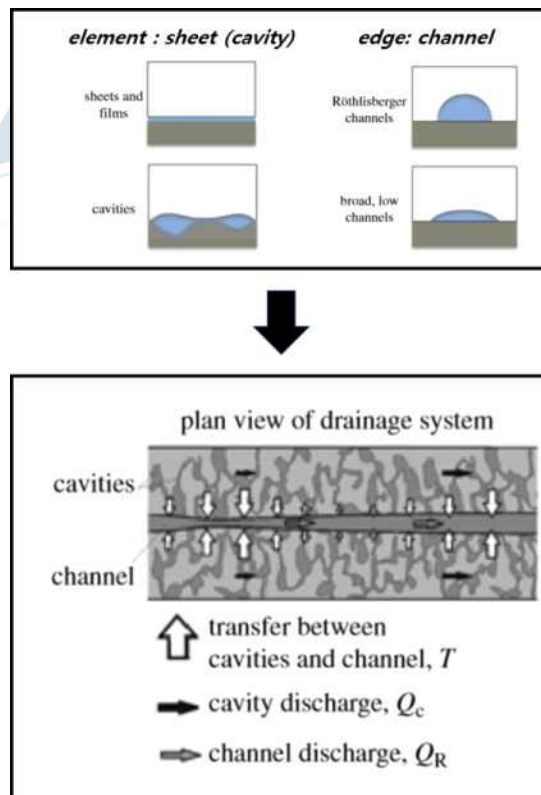


그림 445 빙저 수문망 흐름에서 두가지 흐름 요소의 상호작용을 보여주는 모식도

수문 변동성 모델과 같은 경우 연주기의 변동성을 보이는 그린란드 지역과는 달리 관측 부재로

남극 지역에서는 적용 사례가 적다. 모델을 통한 연구는 시공간적 진화의 측면에서 모든 지역에서 시간에 따른 산출값을 얻을 수 있다는 장점이 있으나, 남극빙저수분망과 같이 직접 관측자료가 부족하고, 대표적인 입력인자(빙저용융량 및 수리전도도 등)에 대한 신뢰성 있는 값을 산정하는 것이 불가능하므로 신뢰를 담보하기 힘들다. 이러한 이유로 남극에서의 수문변동성 모델의 적용 결과들은 제한되게 보고되고 있다.

(GlaDS 모델의 남극 적용사례) 다만, 검증, 보정을 위한 현장 관측자료의 확보(GPS 및 인공위성 고도계 자료) 및 경계조건 개선자료(항공레이다 탐사 기반 지형개선자료, 공간적 수문분포 해석)들과 융합하여 활용될 경우, 빙저수분망 수치모델을 통하여 어느 정도 의미 있는 결과를 산출한 사례가 있다. 다음 남극 Recovery Ice stream 빙저수분망 모의 사례에서 보듯이 실제 유역 도메인 모델에서 수문만 변동성을 모의하여 빙상 표면에서의 유입수 없이도 빙저면 내부 기작만으로 빙저호 유량이 주기성을 가지고 변동할 수 있다는 것을 규명하였다.

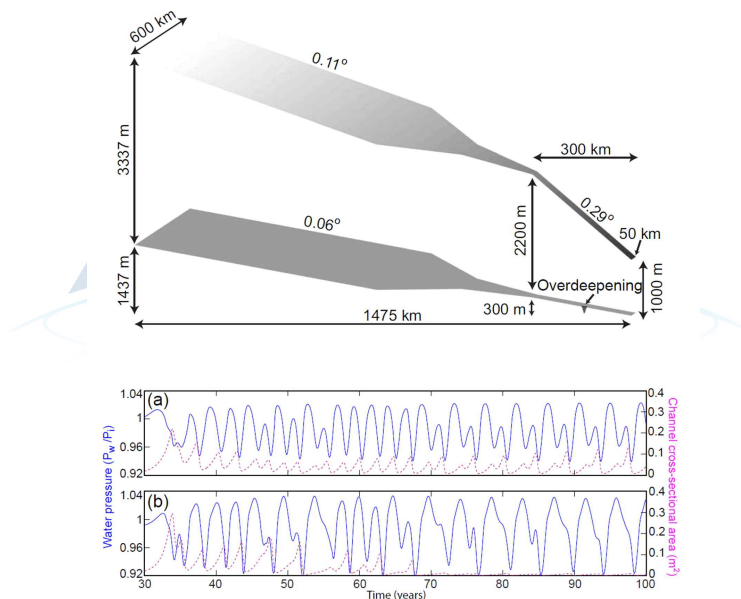


그림 446 남극 Recovery Ice stream 을 개념화한 수치모델 도메인에서 빙저수분망 모델을 수행하여 표면수의 유입 없이도, 빙저 용융량의 급격한 유입이 있는 하류지역에서 채널의 생성과 소멸로 인한 빙저호의 filling & drainage의 주기성이 만들어 질수 있다는 것이 규명되었음 (Dow *et al.*, 2016)

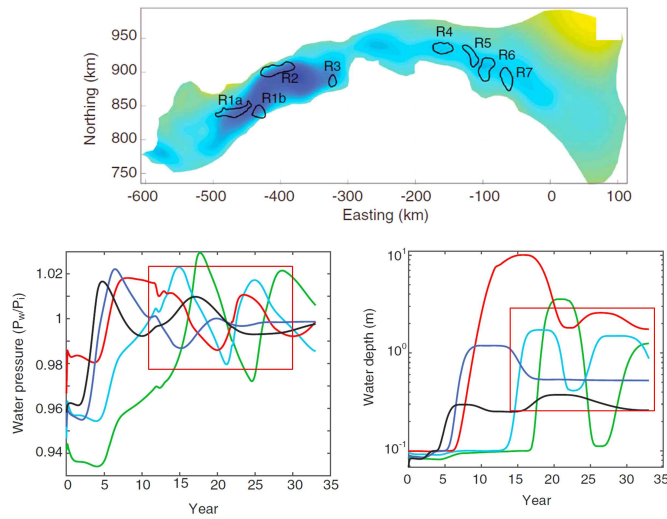


그림 447 Recovery Ice stream에서 빙저수문 변동성 연구: 실제 유역규모의 수치모델 도메인을 구축하여, 인공위성고도계(ICESat)자료 와 연계하여 빙저수문 변동성을 해석하고자 하였음(Dow *et al.*, 2018)



④ 테라노바만 주요 빙하 지역에 빙저수문망 수치모델의 적용

국내 연구에서는 아직 해당 수문 변동성 모델을 적용한 사례까지는 없었다. 하지만, 남극 빙저 수문망의 현실적인 구현은 향후 빙상 동역학 모델과의 연계(빙상 하부의 마찰력과 빙저수의 존재 및 흐름의 관계성) 측면에서 필수적이다. 현재의 수문모델은 아직 초기단계이므로 정량적 측면에서 높은 신뢰도를 담보할 수는 없지만 부분적인 측면에서 의미 있는 결과 도출이 가능하였다. 앞으로 장기적인 수문망 연구방법 (변동성 모델 - 육상 GPS, 인공위성 고도계, 항공레이다 탐사 등) 개선 및 통합시 좀 더 신뢰도 있는 결과물을 도출 할 수 있을 것이다.

본 연구에서는 장보고기지 주변 빙하의 빙저수문망의 변동성을 표현하기 위해서 가장 현실적으로 실제 유역규모(catchment scale)의 시공간적 수문모델을 표현할 수 있는 GlaDS(Glacier Drainage System) 모델을 활용하였다. 앞서 기술했던 것처럼, 주요입력인자의 불확실성으로 인해 모델의 출력값 또한 불확실성이 존재하나 입력인자별 민감도 분석, 현장 관측 자료와의 비교, 현장 물리탐사를 통해 개선된 빙저 지형 요소 반영 등을 통하여, 수문망 변동성 수치 모델에서 의미있는 결과를 도출 하였다. 다음 챕터에서는 해당 수문모델을 장보고기지 주변 대표적인 빙하인 데이비드 빙하와 캠벨 빙하에 대한 모델 적용결과를 기술하고, 앞으로의 장기적인 활용방안과 연구방향에 대해서 제시하고자 한다.

(나) 데이비드 빙하 수문 거동 수치모델 연구

① 빙저수문망 모델 구축

(모델 격자망 구축) 본 연구에서는 데이비드 빙하 지역의 수문 모델을 구축 하였다. 모델의 격자는 삼각형 격자로 구성되며, 주요 관측 거점 빙저호 주변 및 빙저수가 바다로 배출되는 지반선 근처의 경우 세밀한 격자망을 구성하고자 하였다. 구성된 격자망의 특성은 element edge 길이가 최소 229 m(빙저호 및 지반선 지역)의 세밀한 격자에서부터, 나머지 지역은 계산의 효율성을 위하여 최대 6114 m의 edge 길이를 가지는 격자망으로 구성하였다.

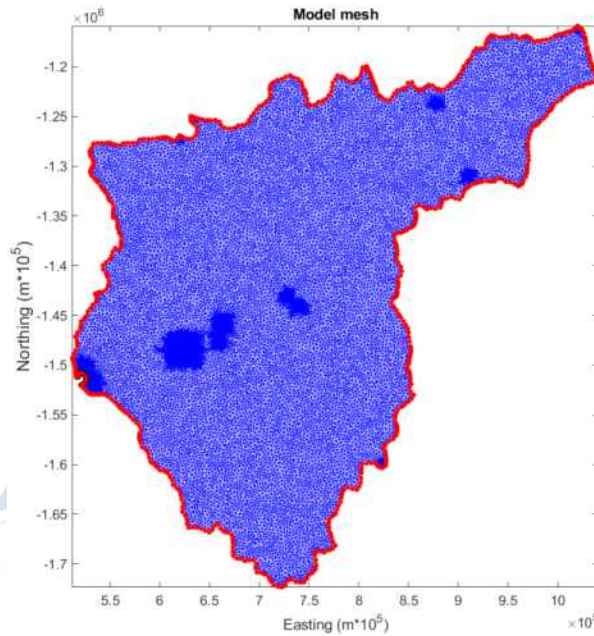


그림 448 데이비드 빙하지역에 구축된 빙저수문 모델 격자망: 지반선 및 주요 관측 빙저호 지역에 세밀한 격자망을 구성하였음

격자를 세밀하게 구성한 지역은 본 과제에서 새롭게 발견된 D2 빙저호, 그리고, ICESat 인공위성 고도계 자료를 통하여 확인된 남극 활동성 빙저호 인벤토리(Antarctic Active Subglaciallake inventory)(Smith *et al.*, 2009)에서 보고된 D1, Ds2, Ds5 빙저호 지역에 초점을 맞추어 세밀한 격자망을 구성하였다. 그림의 빙저호 D2와 빙저호 David_s1은 같은 지역을 도시하기 때문에 빙저호 D2만 본 리포트에 표시하였다.

또한, 극지연구소 탐사결과 발견된 빙저호 D7의 경우, 본 모델에서 세밀한 격자를 구성하여 모델을 구동하였을 때, 수치모델 결과로는 빙저 수문의 두께가 두꺼워지는 현상을 관찰하지 못했기 때문에 모델 수행의 효율성을 위해 해당 지역은 분석에서 제외하였다. 마찬가지로, 빙저호(David_s3, s4)지역도 본 모델 결과로는 빙저 수문 두께가 변동하는 패턴을 보이지는 않았으므로 본 연구에서는 주로 빙저호 D1, D2(David_s1) 지역에서의 빙저호 수문 변동성을 위주로 분석 하도록 한다. 본 모델에 사용된 지반선 위치와 같은 경우 InSAR를 통해 도출된 다음 논문 (Rignot *et al.*, 2011)의 지반선 자료를 활용하였다.

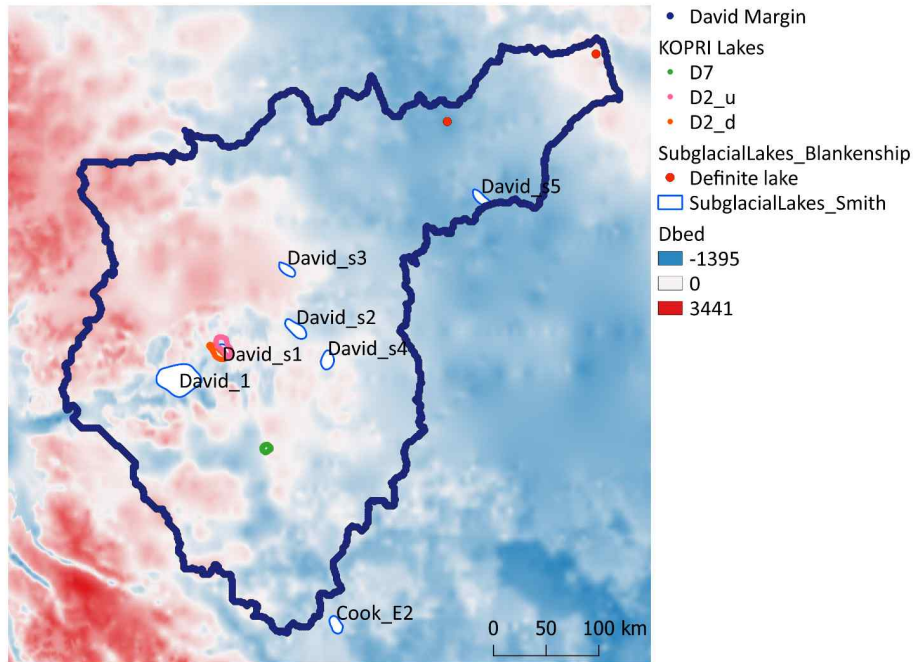


그림 449 데이비드 빙하 영역의 주요 빙저호 위치: 빙저하부 지형의 경우 해수면 고도 기준으로 해수면보다 높은 지역은 붉은색, 해수면 보다 낮은 지역은 푸른색의 진하기로 도시하였음

(빙저면 지형) 본 GlaDS 모델의 입력인자로 활용된 빙상 하부 지형과 빙상표면 고도 지형의 경우 UTIG-KOPRI 탐사에서 획득한 IPR 자료를 활용하여 주요 빙하천 지역의 빙저흐름을 개선하였으며, 이외의 주변 지역은 기존의 남극 지형 자료인 Bedmap2(Fretwell *et al.*, 2013)의 빙하 하부 지형 및 빙하표면 고도자료를 활용하여 개선된 지형자료를 생산하였다. 수치모델의 안정적인 구동을 위하여 현장탐사로 개선된 지역과, 기존 지형자료의 경계지역은 smoothing을 통하여 지형의 급격한 변동을 줄여 전체적인 도메인을 구성하였다. 구축된 모델의 빙저 지형의 경우 최소 고도 해수면 기준 - 996 m에서 최대 고도 1981 m asl. 로 구성되어 있으며, 표면 고도의 경우 최소 203 m에서 최대 2758 m asl. 값을 나타내었다.

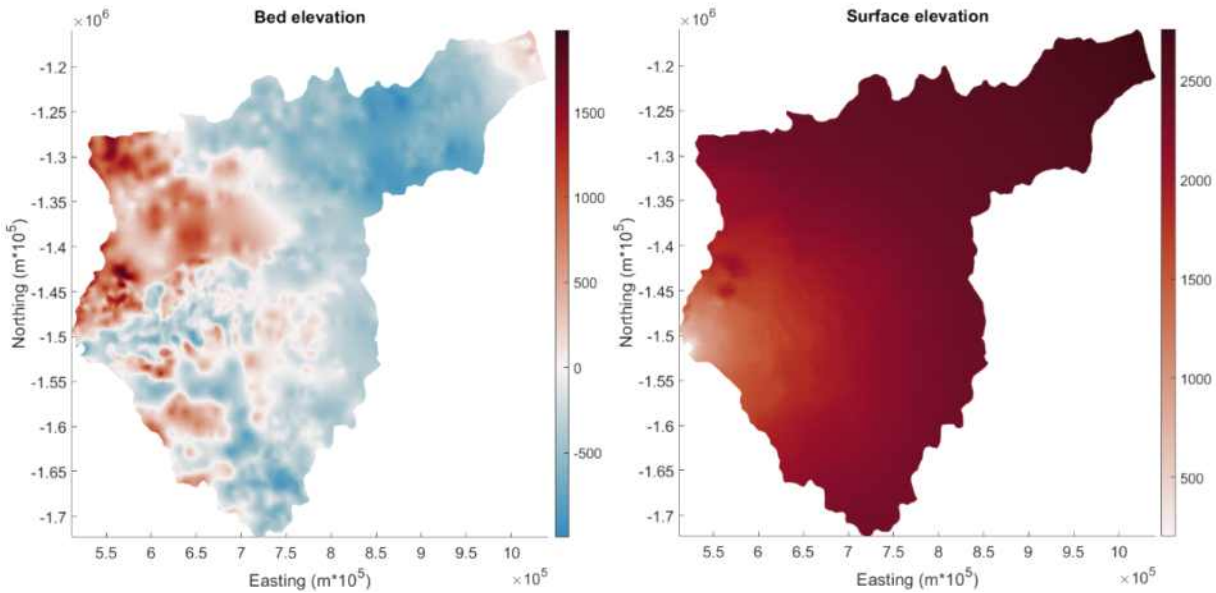


그림 450 빙저수문모델에 활용된 데이비드 빙하 하부 지형(좌) 및 표면 고도(우)(m)

(입력인자 및 모델 구동) 수치 모델의 경우 정류 모델(steady state)을 먼저 구동하여 부정류 모델의 초기값을 도출하였다. 초기에 40년 기간의 모델 수행 결과 출력인자들이 수렴하였으며 이를 부정류모델(transient model)의 초기조건(initial condition)으로 활용하였다. 부정류모델의 경우, 초기 조건에서 빙저용융량(basal melting)값과 수리전도도 값을 조정 한 후 27년기간 동안의 추가적인 모델을 수행하며 데이비드 빙하지역 빙상하부의 시공간적 수문 특성을 도출하였다. 모델의 입력인자에 따른 수문반응도를 규명하기 위하여 빙저용융량의 경우 몇몇 조건에 따른 민감도 분석을 수행하였다. 수행된 테스트 입력인자의 경우 정류 모델에서 빙하 하부용융량을 0.5 mm/a, 1 mm/a 2가지 경우의 조건에서 구동하였으며, 이때 나온 결과값을 초기값으로 적용하여 부정류모델에서는 0.5 mm/a의 경우 5 mm/a 로, 1 mm/a의 경우 8 mm/a로 하부용융량을 증가시켜서 27년 모델 구동 이후의 수문 특성값을 도출하였다. 또, 하나의 빙하 하부 흐름을 결정하는 주요인자인 분산흐름 수리전도도(sheet conductivity)(Ks)의 경우 1.1×10^{-3} , 1×10^{-4} , 그리고 $1 \times 10^{-5} \text{ m}^{7/4} \text{ kg}^{-1/2}$, 채널 수리전도도(Channel conductivity)(Kc)의 경우 5×10^{-2} , $5 \times 10^{-3} \text{ m}^{3/2} \text{ kg}^{-1/2}$ 조건일 경우 수문흐름의 반응을 모의하였다.

② 주요 결과

㉞ (빙저수문망 두께(water layer thickness)) 변화 모의

[Case A : Ks($1 \times 10^{-4} \text{ m}^{7/4} \text{ kg}^{-1/2}$), Kc($5 \times 10^{-2} \text{ m}^{3/2} \text{ kg}^{-1/2}$), 빙저용융량(8mm/a)]

본 연구결과에서는 대표적인 세 가지 경우에 대한 모델 결과값을 비교 분석하였다. Case A의 경우 빙저용융량을 초기조건 1 mm에서 점진적으로 8 mm/a로 증가시키고 Ks($1 \times 10^{-4} \text{ m}^{7/4} \text{ kg}^{-1/2}$), Kc($5 \times 10^{-2} \text{ m}^{3/2} \text{ kg}^{-1/2}$) 조건에서 모델을 구동하여 빙저수의 두께분포를 도출하였다. 도메인 내에서 빙저호의 두께가 최대 48 m 까지 나타나는 것을 모델 결과를 통하여 확인 할 수 있었다. 빙저호 _D1 과 David_s2의 지역의 경우는 본 모델의 민감도 분석 결과들에서 지속적으로 가장 두꺼운 수

문 두께를 가장 높게 나타나는 지역이었다. 기존의 인공위성 자료 분석 및 본 과제를 통해 도출된 빙저호 추정지역과 수치 모델 결과를 비교해 보았을 때, 모든 빙저호 지역에서 관측과 모델 결과가 일치하게 나타나지는 않았다. 다만, 이 특정 두 빙저호(D1, David_s2)에서 항상 두꺼운 빙저호가 지속적으로 형성되는 것으로 모델 결과 나타나는 것으로 보아 해당지역의 높은 빙저수의 존재가능성을 지시해준다. Case A의 수리전도도 및 빙저용융량 조건에서, 빙저호_D1 지역 내와 같은 경우 최대 17.9 m 심도의 빙저호가 형성되는 것으로 나타났으며, David_s2의 경우 최대 9.3 m, D2_u의 경우 최대 0.5 m, David_s5의 경우 최대 1.08 m 의 수문 심도가 호수 경계 내에서 각각 나타났다.

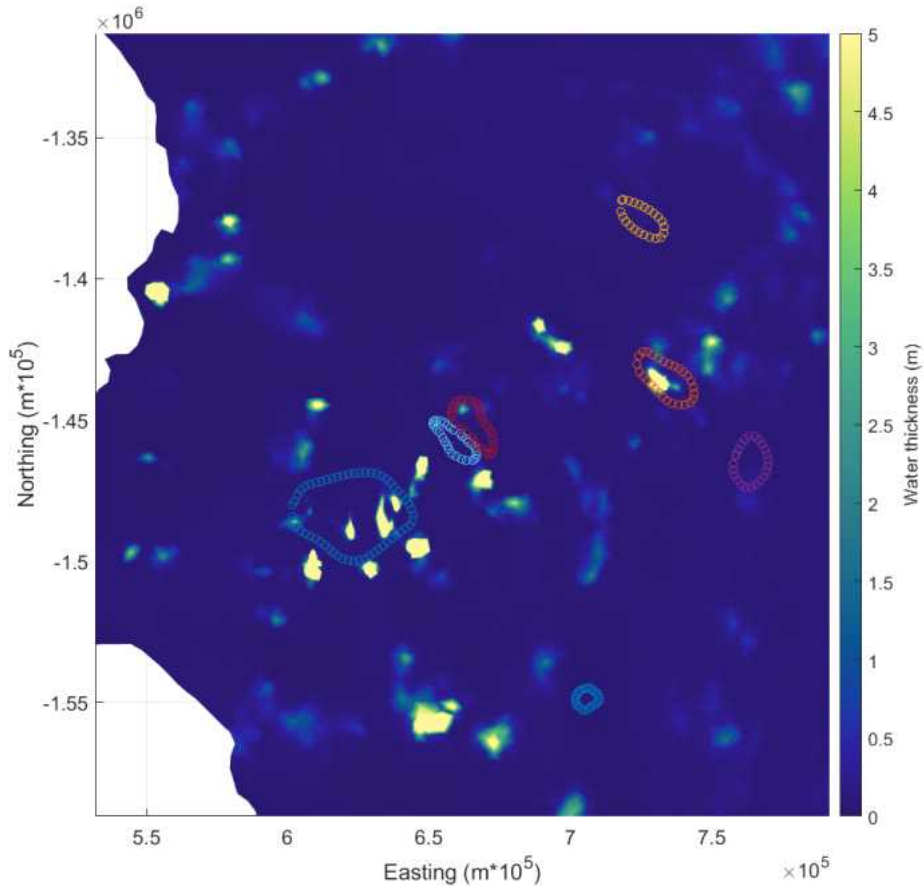


그림 451 빙저수문망 두께 결과 [Case A : $Ks(1 \times 10^{-4} \text{ m}^{7/4} \text{ kg}^{-1/2})$, $Kc(5 \times 10^{-2} \text{ m}^{3/2} \text{ kg}^{-1/2})$, 빙저용융량 (8mm/a)]: 가시성을 위해 최대값 5m의 범위에서 공간 분포값을 도시하였음

[Case B : $Ks(1 \times 10^{-5} \text{ m}^{7/4} \text{ kg}^{-1/2})$, $Kc(5 \times 10^{-2} \text{ m}^{3/2} \text{ kg}^{-1/2})$, 빙저용융량(5mm/a)]

Case B의 경우 빙저 용융량과 Ks (sheet conductivity)가 Case A보다 낮은 조건에서 모델을 수행하였다. 이 경우 빙저호_D1 경계 내에서 최대 7.3 m의 빙저호가 생성되는 것으로 나타나는 반면, 빙저호_David_s2의 경우 최대 3.2 m의 심도의 빙저호가 형성되었다. 모델 구역 전체의 경우 최대 10.5m의 수문두께가 나타났으며 최대 수문 두께가 나타난 지역은 Case1 모델에서 최대값이 나타나는 지역과 같은 위치임을 확인할 수 있었다. 수문 두께(water sheet thickness)가 두껍게 나타나는

위치의 경우 빙저 지형의 영향으로 모델 Case와 상관없이 같은 지역에 나타났으나 수문 두께의 값은 수리전도도 및 빙저 용융량 조건에 따라 차이가 나타나는 것을 확인 할 수 있었다.

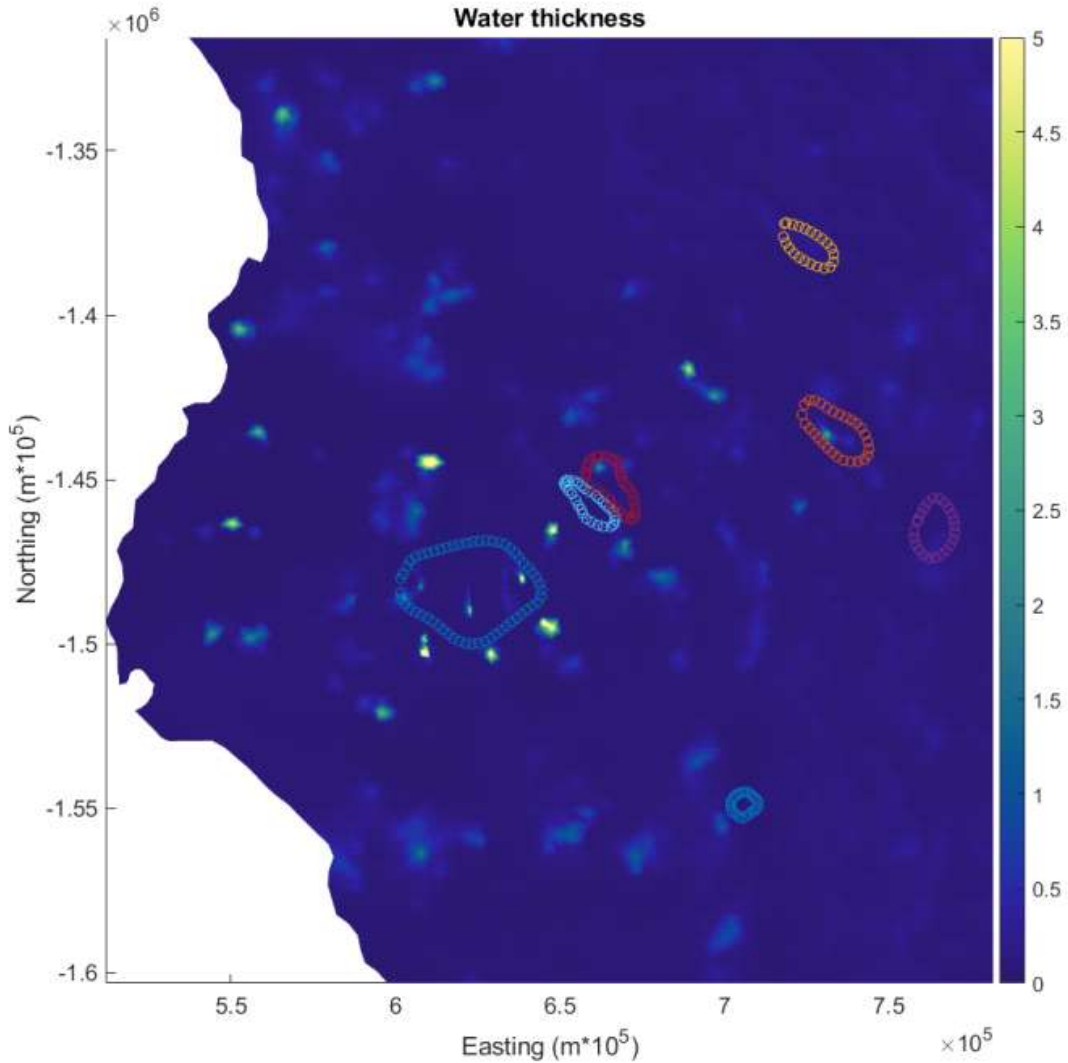


그림 452 빙저수문망 두께 결과 [Case B : $K_s(1 \times 10^{-5} \text{ mH kg}^{-1/2})$, $K_c(5 \times 10^{-2} \text{ m}^{3/2} \text{ kg}^{-1/2})$, 빙저용융량 (5mm/a)]: 가시성을 위해 최대값 5m의 범위에서 공간 분포값을 도시하였음

빙저수 압력(water pressure) 변화

아래 그림은 Case C에 대한 빙저수의 압력분포를 도시한 것이다. 데이비드 빙하 대부분의 유역에서, 빙저수 압력값은 상부 빙하의 압력(overburden ice pressure)값의 0.9 ~ 1의 범위에서 나타나는 것을 확인 할 수 있었다. 모델 결과 두꺼운 빙저호가 생성되었던 빙저호_D1, David_s2, 및 David_s5의 경우는 1.0 ~ 1.035의 수문 압력을 가지는 것으로 나타난 반면, 국지적으로 일부지역에 빙저호가 생성된 D2의 경우 0.96 ~ 1의 범위의 수문 압력이 나타났다. 전체 모델 유역 중 가장

높은 수문 압력이 나타난 지역은 좌표상 552700m, -1404000m 지역으로 다른 Case B의 모델에서 가장 높은 수문두께가 나타나는 지역과 일치하는 지역임을 확인할 수 있었다.

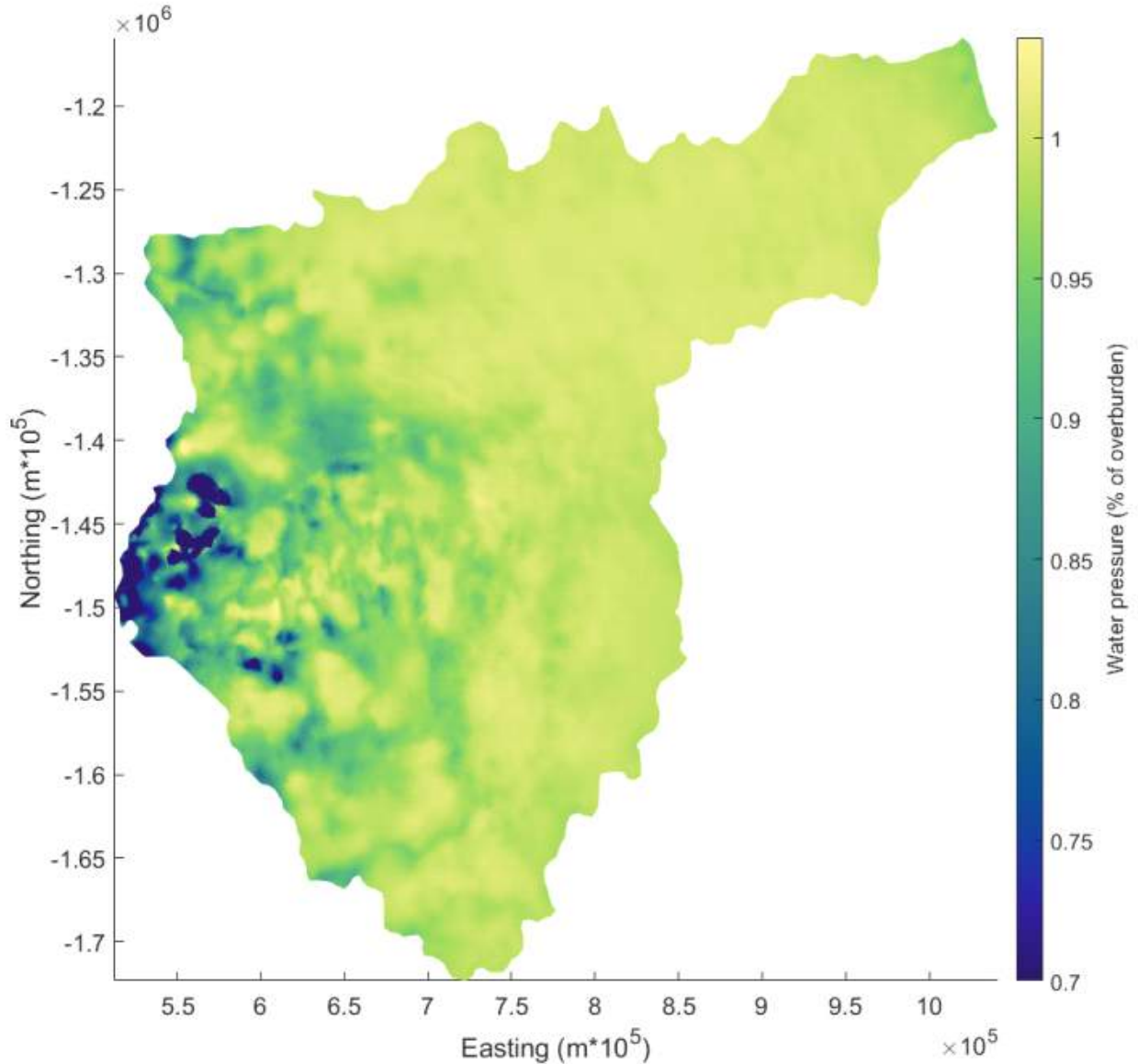


그림 453 빙상압력 대비 빙저수 압력분포 [Case C : $K_s(1 \times 10^{-4} \text{ m}^{7/4} \text{ kg}^{-1/2})$, $K_c(4 \times 10^{-2} \text{ m}^{3/2} \text{ kg}^{-1/2})$, 빙저용융량 (8mm/a)]

항공레이다 탐사 기반 반사도(Specularity) 값과 모델 결과값의 비교

반사도(Specularity) 값은 빙저수의 존재 및 흐름 형태를 추정하는 간접적인 인자로 활용된다. 본 연구에서 해당 값은 UTIG의 항공 레이더 탐사 값을 기반으로 하여 도출이 되었으며 반사도 값은 0 과 1사이의 값으로 나타나는데 해당 값은 빙상 하부 물의 존재와 강한 상관관계가 있기 때문에 본 모델에서의 출력값(빙저수 두께 및 유효압력)과 비교를 수행하였다. 그림에서 반사도 값이 0.4 이상을 나타내는 지역의 경우 물의 존재가능성을 지시해주는데 반사도가 높게 관측된 지점의 위치는 모델 결과 높은 수문압력을 가지는 지역과 비교적 일치하는 경향을 보였다.

- 데이비드 빙하 유역 탐사자료의 경우 항공레이더 관측 데이터가 빙저수_D1 과 D2지역을 포함

하고 있기 때문에 아래 그림과 같이, 관측값과 모델값의 공간적 상관관계를 비교하기 위하여 반사도가 0.4 이상의 값을 가지는 지역과 빙저수 두께의 공간적 분포를 겹쳐서 도시하였으며, 또한, 반사도 값과 수문 압력(water pressure) 값을 동시에 도시하여, 공간적 상관성을 분석해 보았다.

빙저호_D1의 경우 빙저호 경계내 대부분의 지역에서 반사도(specularity)가 0.4가 넘는 값으로 나타났으며 일부 지역은 0.6 이상으로 나타나는 것으로 보아 해당 지역의 빙권-암권경계면에서 물의 강한 존재 가능성을 지시해준다. 경계 내 일부 지역은 또한, 높은 빙저수의 압력값이 도시되며 반사도 또한 0.4이상으로 나타나 역시 높은 물의 존재가능성을 유추할 수 있다.

빙저호_D2의 경우 모델 결과 기반으로 보았을 때, 상시적으로 물이 존재하지는 않는 것으로 나타났으며, 반사도 값 또한 특정 1개의 포인트에서만 0.4 이상의 값이 나타나는 것으로 관측되었다. 빙저호_D2의 경계내 모든 지역에 물이 존재하지는 않았으나, 모델에서 빙저수 두께가 부분적으로 두껍게 나오는 특정 위치가 있었는데, 이를 레이다 탐사 분석 자료와 비교 해본 결과, 부분적으로 나타나는 반사도가 0.4가 넘는 지역과 일치하는 것을 확인하였다. 이는 빙저호_D2 경계 내 전체 지역은 아니더라도 해당 지역에 부분적인 물의 존재가능성을 지시해주고 있다.

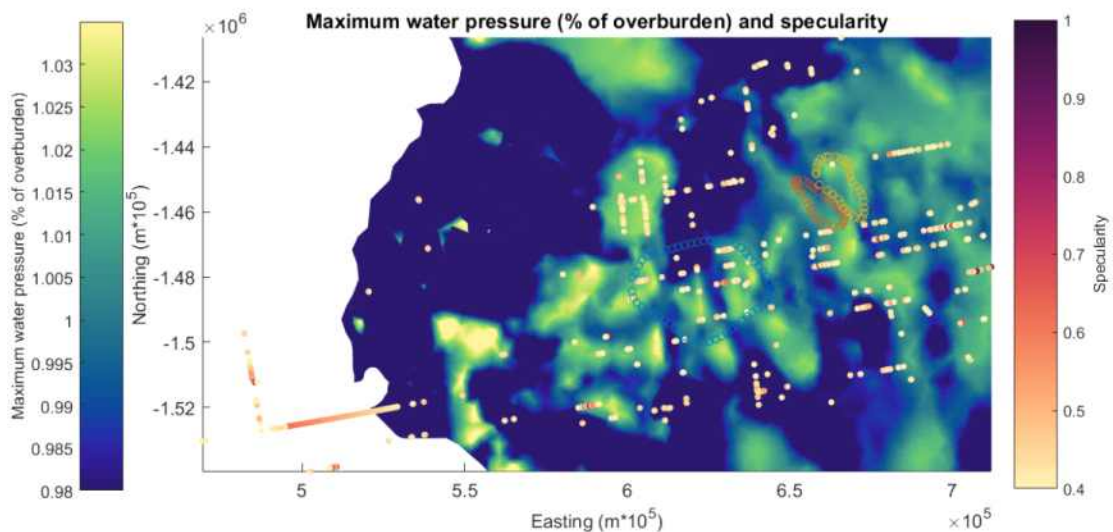


그림 454 빙저수 압력 및 반사도(specularity) 공간분포 비교 [Case A : $Ks(1 \times 10^{-4} \text{ m}^{7/4} \text{ kg}^{-1/2})$, $Kc(5 \times 10^{-2} \text{ m}^{3/2} \text{ kg}^{-1/2})$, 빙저용융량 (8mm/a)]: 반사도 0.4 이상의 지역의 위치와 빙저호_D1, D2u, D2d 경계를 함께 도시하였음

채널유출량(Channel discharge)

빙저면의 물의 흐름이 분산 흐름(sheet flow)의 형태로 흐르다가 주변에서의 빠른 유량의 유입으로 수문의 압력이 높아져 물의 빠른 흐름(efficient flow)이 형성되는 경우 채널 흐름이 활성화되어 상부 빙하천에서 지반선으로 빠르게 물이 흐르는 기작이 나타난다. Case A, B의 채널 형성 모델 결과를 분석해보면, 주로 빙하천의 하류 지역에 주로 채널망이 형성되는 것을 확인 할 수 있다.. 형성된 채널망의 경우 지반선 근처로 갈수록 더욱 넓은 면적의 채널로 통합되는 것으로 나타났으며, 지반선 근처에 도달하여서는 크게 3개의 주요 채널이 형성되어 발달되는 것을 모델 결과 확인 할 수 있었다.

형성된 채널 중 가장 좌측에 존재하는 채널 흐름에서 유량이 작았으며, 모델의 입력조건에 따라 생성되지 않는 경우도 있었으나, 유역 중앙부에서 지반선으로 유출되는 흐름 및 우측에서 유출되는 채널의 흐름의 경우 모든 모델의 조건에서 형성됨을 알 수 있었다. 최대 채널 유량의 경우 Case A의 경우 $15.8 \text{ m}^3/\text{s}$ 로 Case B의 경우는 이보다 훨씬 적은 $1.22 \text{ m}^3/\text{s}$ 로 나타났다.

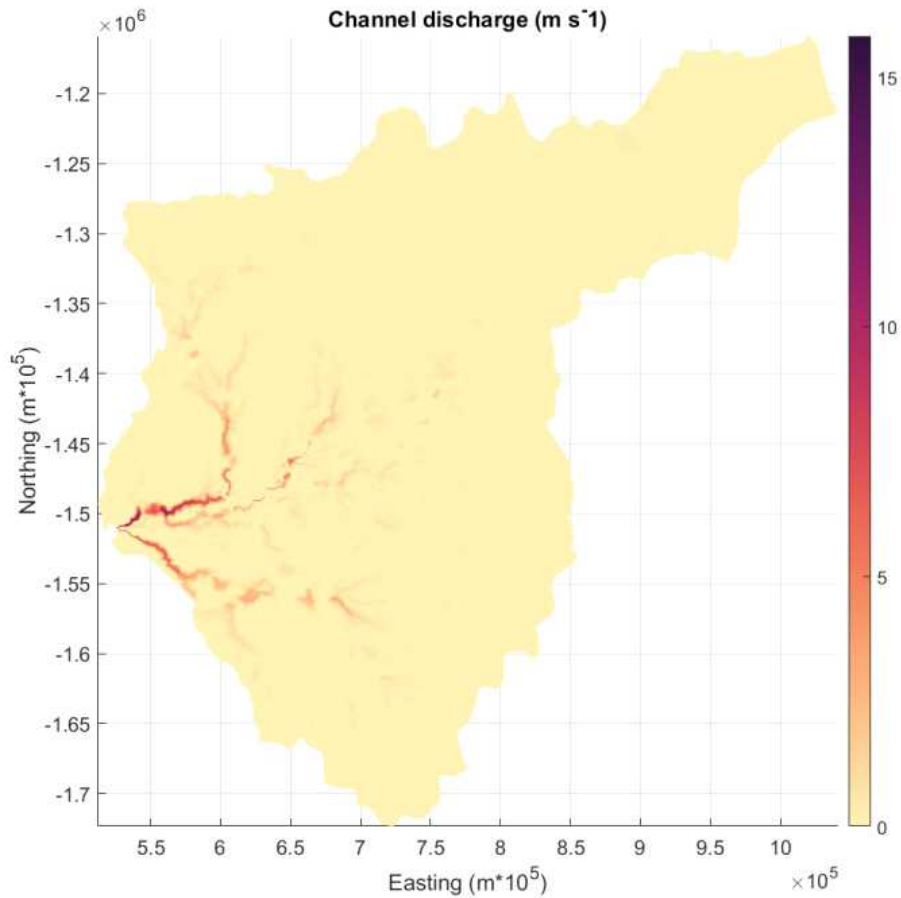


그림 455 유역 내 채널형성 분포도 [Case A : $K_s(1 \times 10^{-4} \text{ m}^{7/4} \text{ kg}^{-1/2})$, $K_c(5 \times 10^{-2} \text{ m}^{3/2} \text{ kg}^{-1/2})$, 빙저용융량 (8mm/a)]

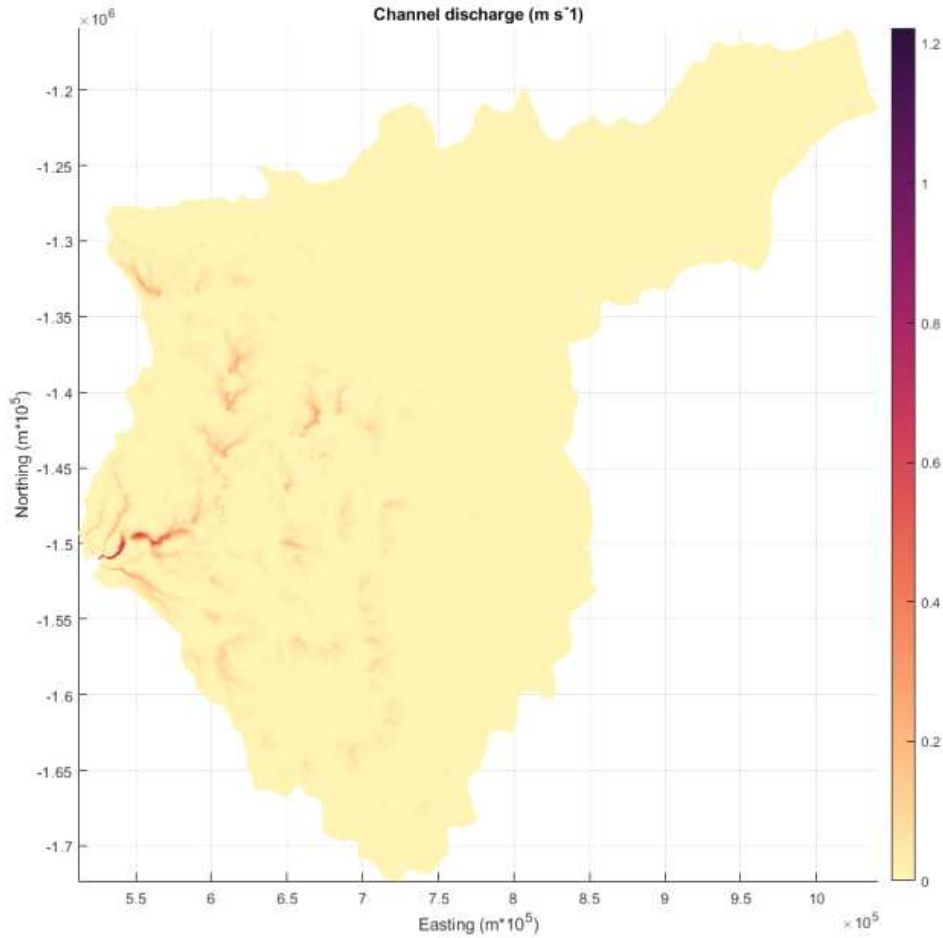


그림 456 유역 내 채널형성 분포도 [Case B : $K_s(1 \times 10^{-5} \text{ m}^{7/4} \text{ kg}^{-1/2})$, $K_c(5 \times 10^{-2} \text{ m}^{3/2} \text{ kg}^{-1/2})$, 빙저용융량 (5mm/a)]

지반선의 빙저수 유출 위치 및 드라이갈스키 빙설 하부 채널위치의 상관성

모델의 채널 유출량은 입력값 조건에 따라 크게 변화하는 양상을 보였으나, 채널이 생성되는 위치에서는 일치되는 결과를 얻을 수 있었다. 이는 빙저용융량(basal melting)이 제대로 반영되지 않았을 경우 채널 유출량은 신뢰하기 어려우나 채널이 생성되는 위치는 꽤나 신뢰성이 있다는 것을 알 수 있다. 본 수문망 모델에서 도출된 채널이 지반선으로 유출되는 곳의 위치는 지반선에서 이어지는 드라이갈스키 빙설 하부 채널의 생성 위치와 정확히 일치하는 것으로 확인 할 수 있다.

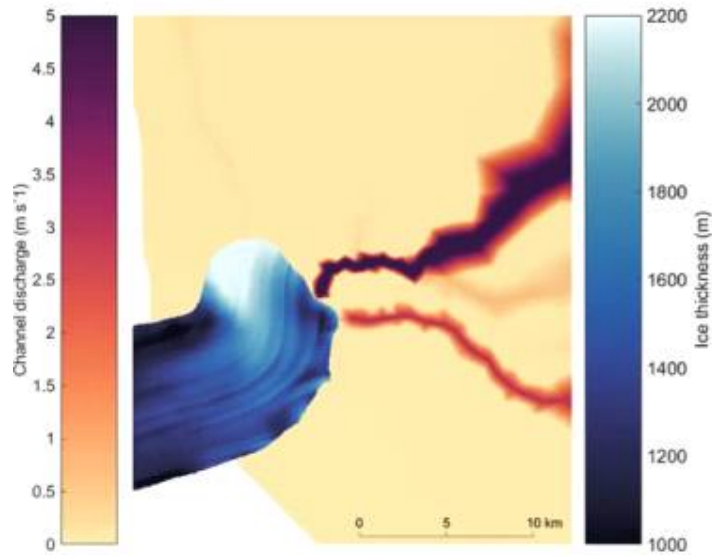


그림 457 CASE A 모델 결과 지반선으로 빠져나가는 주요 흐름 채널의 위치

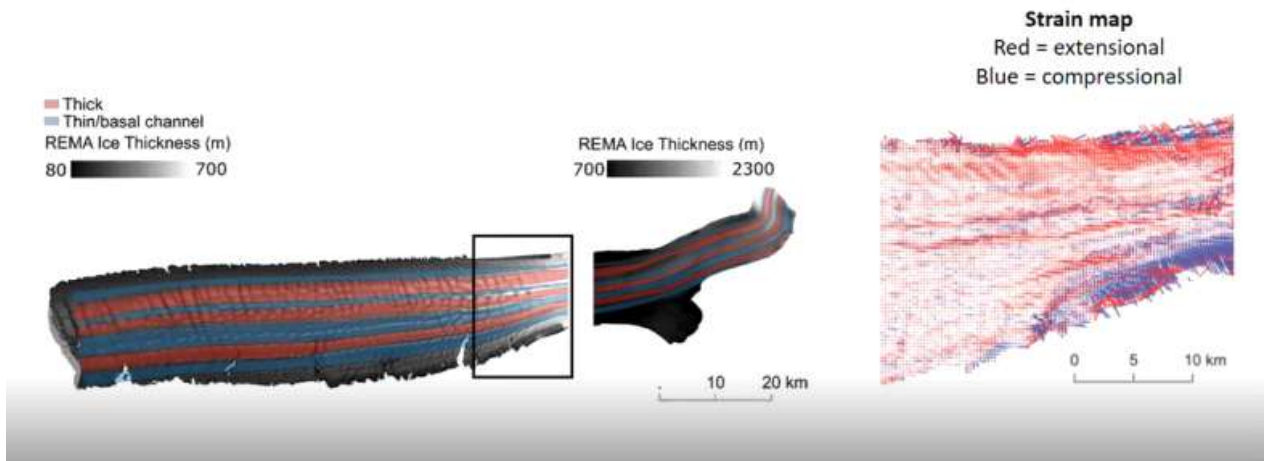


그림 458 REMA 고도 자료에서 드라이갈스키 빙설의 두꺼운 부분과 빙설하부 채널분포

또한, 드라이갈스키 빙설 가장자리의 갈라진 지역을 보면, 빙설 하부 채널이 생성된 지역(즉, 두께가 얇은 지역)까지 단열(fracture)이 확장 되고 빙설이 두꺼워지는 지역까지 확장되지 않는 것으로 보아 빙설하부의 채널 분포는 빙설의 가장자리에서 생성된 단열의 확장을 제한하는 역할을 하는 것으로 추정된다.

③ 논의

본 연구에서는 GlaDS 모델을 데이비드 빙하 수문변동성 연구에 적용하였다. 빙저 지형의 경우 항공레이다 탐사 자료를 활용하여 지형을 개선시켜 반영하였으나 빙저용융률 값의 경우는 신뢰도가 낮기 때문에 다양한 사례를 구동해보고 해당 입력값에 따라 모델의 반응을 확인하는 것이 중요하다.

모델에서 다양한 수리전도도 및 빙저용융량에 대한 모델의 반응을 본 결과 대체적으로 모델의 빙저호가 생성되는 위치, 채널이 생성되는 위치, 유효압력분포도 등의 공간적 분포는 대체적으로 일관성 있는 값을 나타내었다. 하지만, 빙저호의 두께, 채널 유량 등 정량적인 값의 경우는 모델의 입력값에 따라 상당한 차이가 발생함을 알 수 있었다. 이는 현재의 경계 및 입력조건으로는 정성적인 흐름 결과물에 대해서는 신뢰할만하나, 아직 정량적인 분석 및 활용에 대해서는 한계점이 있다는 것을 지시해준다.

향후, 빙저용융량 인자에 대한 확실한 제한이 있다면, 모델의 정확도를 높이는 데 도움이 될 것이다. 또한, 빙저수문 요소의 특성(예, 수리전도도 인자들)을 추정하기 힘들기 때문에 다양한 조건에서 모델의 구동특성을 확인하고 현장 관측요소와 비교할 필요가 있다. 대표적인 비교값으로는 물의 존재여부를 반영하는 IPR 자료의 반사도 값이 있으며, 육상 GPS 관측에서 도출된 속도 및 고도 변화기반의 수문 변동성 분석 자료도 있을 것이다. 불확실성이 큰 빙저수문망 흐름의 경우 단일 접근법으로 해석하기 보다는 다양한 방법으로 도출된 수문흐름 요소를 통합하여 해석하는 것이 신뢰도를 높이는 데 도움을 줄 것이라고 판단된다.

(다) 켈벨빙하 수문 거동 수치모델 연구

켈벨 빙하(74°25' S 164°22' E)는 장보고기지 인근에 위치하고 있는 소규모 빙하로, 약 110 km 길이, 20 km 폭을 가지는 좁고 긴 형태의 빙하천 주변에 활화산인 멜번 화산이 위치하고 있다. 켈벨 빙하에는 2016년부터 빙하의 주 흐름선을 따라 GPS 5기를 운영 중에 있으며, 이를 활용하여 빙하의 이동속도와 고도변화를 실시간으로 관측해 오고 있다.

또한, 16/17 하계탐사기간에 항공레이다 탐사를 수행하여 빙하천 하류의 지형을 일부 개선할 수 있는 탐사 측선 자료를 획득하였다. 본 연구지역에 위치한 멜번 화산의 영향으로 주변의 지열류량이 높아 주변 빙저면에서 용융으로 생성되는 물의 양이 다른 지역보다 높을 것으로 추정된다. 켈벨 빙하 빙저수문망 수치모델연구에서는 획득된 레이더 탐사자료를 활용하여, 일부 빙저 지형을 개선하고, 멜번 화산주변의 높은 빙저용융량을 가정하여 하부 빙저수문망이 어떻게 진화하는지를 모의하였다.

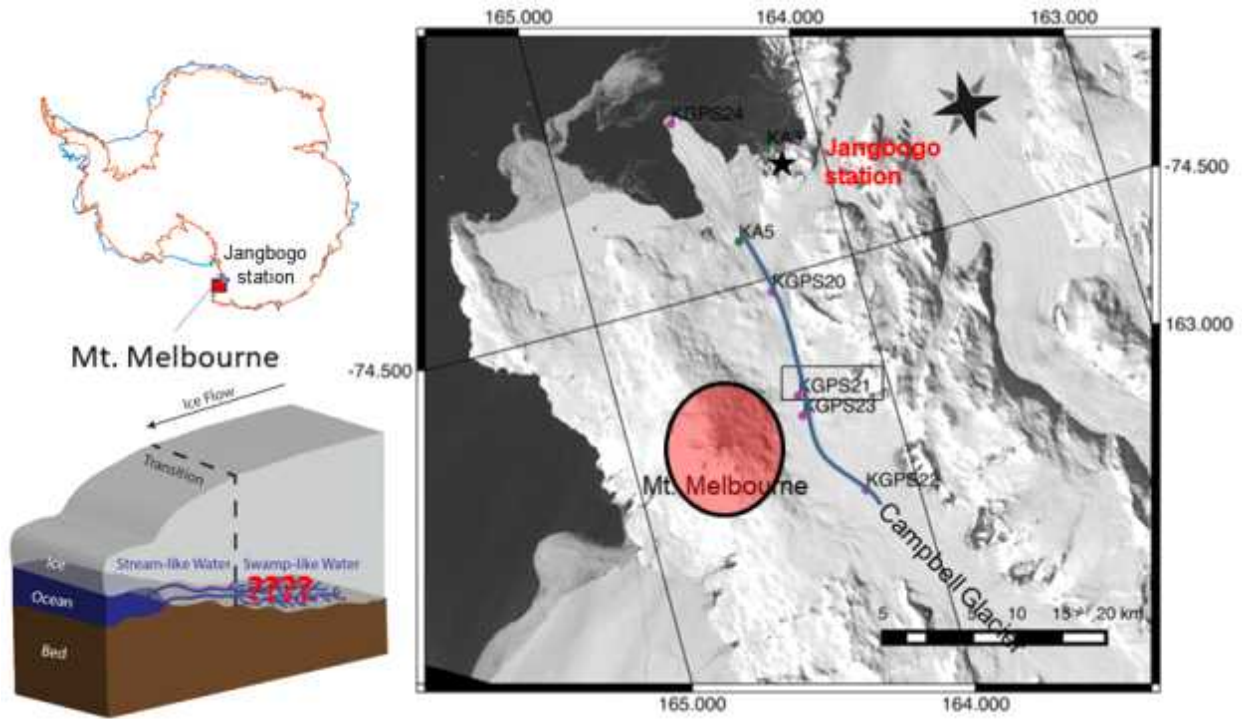


그림 459 장보고기지 및 캠벨 빙하의 위치. 빙하천 흐름 지역을 따라 GPS 5기를 설치하여 표면고도와 속도의 시계열 자료를 획득 하고 있음

① 모델 구축

(모델 격자망 구축) 캠벨 빙하는 좁고 긴 형태의 소규모 빙하로서 빙하의 하류지역에 육상 GPS 관측망이 운영 중이며 빙저용융량의 유입으로 인한 수문 변동성이 예측되는 지역이다. 따라서, 모델 격자를 구축할 때 하류지역에 세밀한 격자망의 도메인을 구성하였다. 격자망의 노드(node)의 개수는 15399, 모서리(edge)의 개수 45325(최대길이 990 m, 최소길이 143 m), 요소의 최소면적(9,500 m³) 최대면적(250,000 m³)으로 구성하였다. 이를 활용하여 멜번 화산에서의 높은 지열로 인해 주변의 빙권-암권 경계면에서 빙저용융(basal melting)이 활발히 일어날 경우 빙저수문망 변동성에 어떠한 영향을 미치는지를 분석하였다.

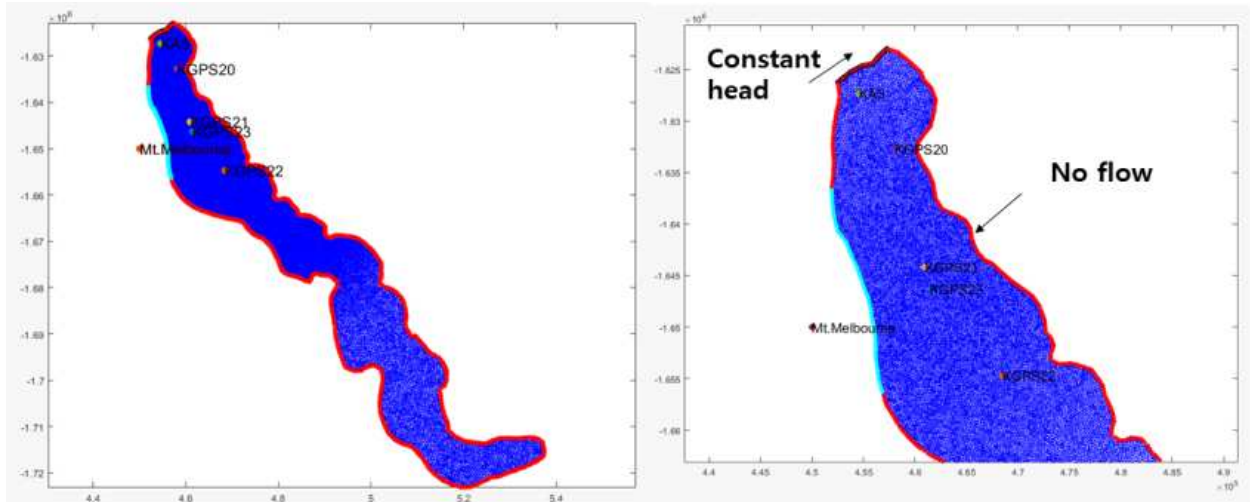


그림 460 캠벨 빙하 빙저수문망 격자망 구성 및 경계조건

(빙상 하부 지형) 연구 지역과 같은 경우 좁고 긴 형태의 빙하로 기존의 Bedmap2 기반 빙저 지형과 같은 경우 영국-이탈리아 ISODYN/WISE 프로젝트(2005/06)를 기반으로 한 캠페인 자료를 주로 활용하여 구축이 되어 있으나, 활용된 탐사 측선이 빙하천 주 흐름 라인에 국한되어 있어 상대적으로 부정확하다. KOPRI-UTIG(16/17) 항공레이다 캠페인을 통하여 캠벨빙하 하류(downstream)지역에 추가적인 측선 자료를 확보 할 수 있었으며, 이를 활용하여 Mass conservation 접근법 (Morlighem *et al.*, 2011)을 통하여 기존의 자료와 결합하여 해당 모델의 빙저 수문망모델에 적합한 지형 데이터를 확보하였다.

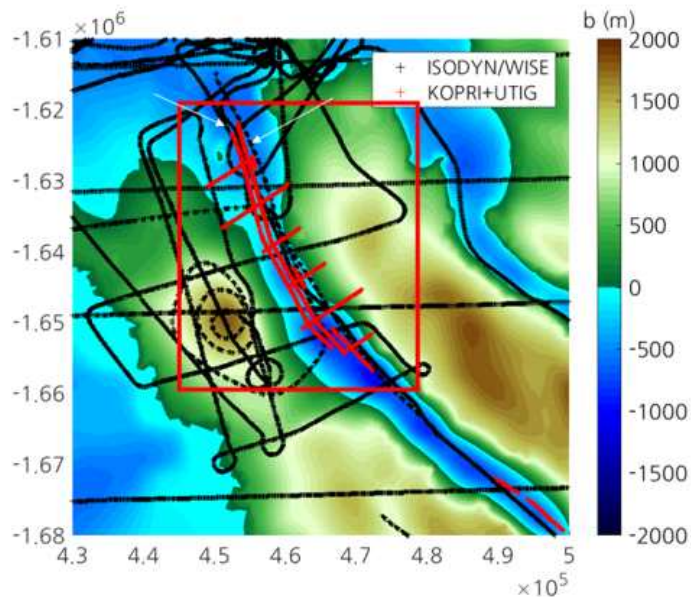


그림 461 16/17 하계남극 탐사에서 수행한 캠벨빙하 KOPRI-UTIG 항공 레이더 탐사 측선

신뢰도 있는 빙저수문 모델의 구축을 위해서 가장 중요한 입력요소 중 하나는 물의 에너지 포텐셜의 크기와 밀접한 연관이 있는 빙저 지형의 정확한 반영이고, 또, 하나는 빙저면에서 열과 마찰로 인해 생성되고 있는 빙저 용융량 인자 일 것이다. 본 모델에서는 16/17 남극 하계탐사를 통해 개선된 빙저지형 자료를 활용하였으며, 빙저 지형은 아래 그림과 같다. 개선된 빙저지형은 기존 지형과 전반적인 형태는 유사하였다. 전반적으로 하류의 빙저면 고도가 기존 bedmap2 지형보다 낮아져서 빙하의 두께가 전반적으로 두꺼워진 것을 확인 할 수 있다. 또한, 지반선으로부터 약 25 km 상류지역에 기존 자료의 경우 빙저면 고도가 일부 높았던 지역이 존재하였으나 개선된 지형에서는 해당 부분의 고도가 현격히 낮아진 것을 확인 할 수 있었다. 이러한 모델입력 지형의 변화들은 실제 수문흐름을 구현하는데 도움을 줄 수 있을 것이다.

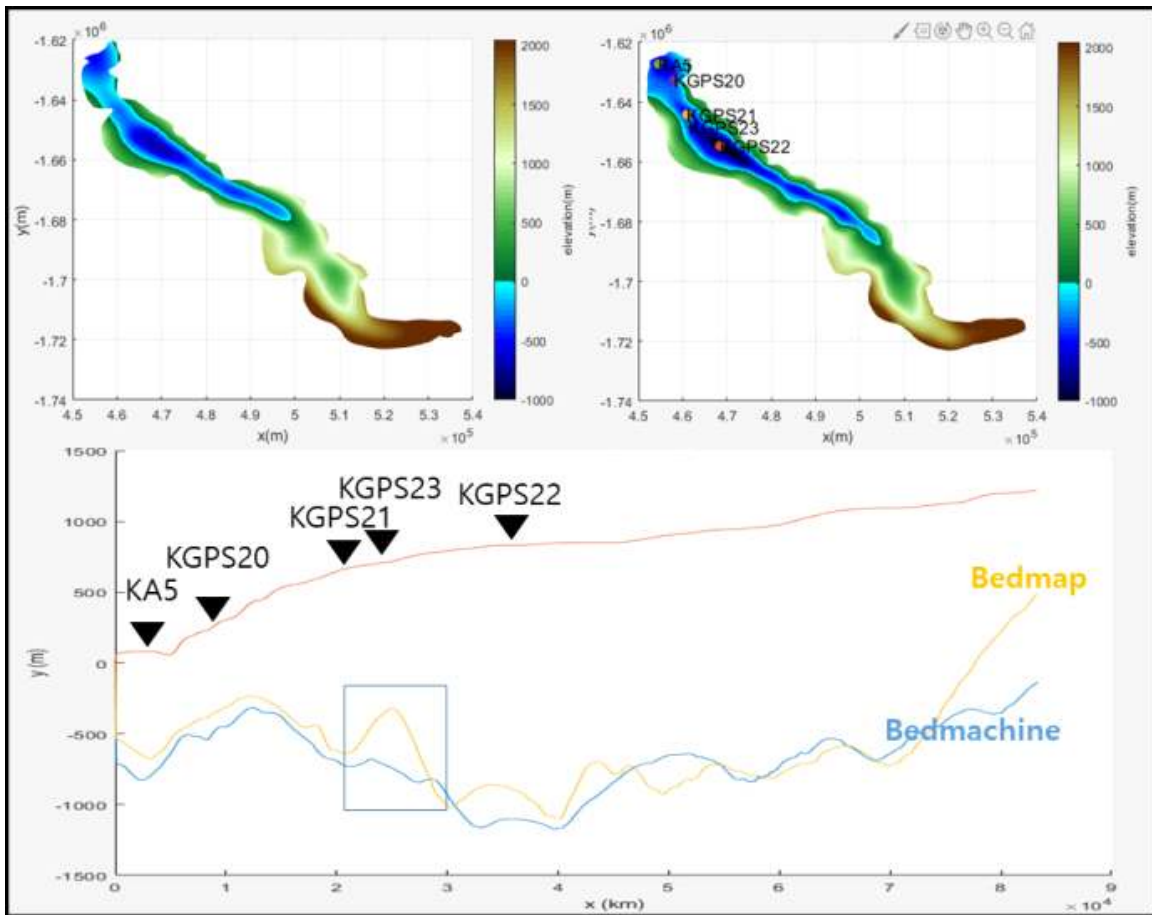


그림 462 캄벨빙하 빙저지형 (좌상) 기존 Bedmap2 기반 빙저지형 고도 공간 분포 (우상) 개선된 Bedmachine2 기반 빙저지형 공간분포 (하) 주 흐름 방향을 따라 도출된 두 가지 지형간의 비교

(입력 인자) 모델에서 수문망 상부 빙상의 두께는 빙상표면고도와 빙저지형고도의 차로 계산이 되며 이는 빙상의 하부에 흐르는 물을 누르고 있는 압력 포텐셜을 결정한다. 빙상의 두께와 같은 경우 KGPS22 관측점 주변에서 약 1850 m 로 가장 두꺼운 것으로 나타났으며, 모델 수행 도메인의 주변 경계면은 빙상 두께가 200 m가 되는 곳을 기준으로 하여 설정하였다. 빙저면의 미끄러짐 속도 값은 (Mouginot *et al.*, 2012) 연구에서 도출된 빙하속도 값의 0.9를 곱한 값을 빙저면 미끄러짐

속도로 가정하여 입력 값으로 활용하였다. GlaDS 모델에서 미끄러짐 속도 분포는 유효 압력값과 연관되어 빙저수분두께(water sheet thickness)의 증가속도(opening ratio)와 관계가 있어 해당 공간적 분포값들을 입력인자로 활용하였다.

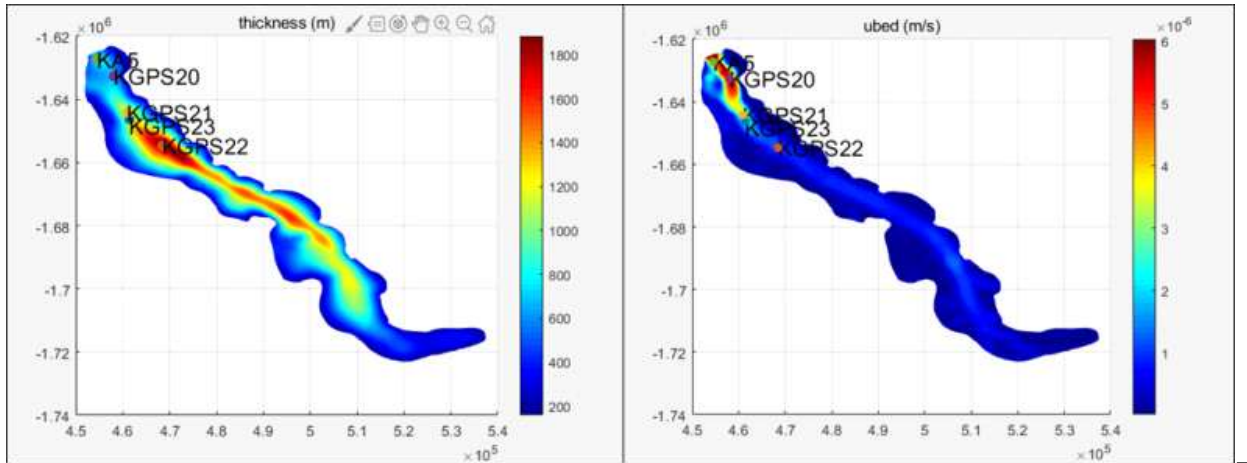


그림 463 (좌) 모델에서 수문망 상부 빙상(overburden ice)의 두께 분포 (우) 모델에서 가정된 빙저면 미끄러짐 속도 분포

(모델구동) 부정류모델(transient model)의 초기 입력값을 구하기 위하여 채널 수리전도도 (K_c)($1e^{-3}(m^{3/2} kg^{-1/2})$), 분산흐름 수리전도도(K_s)($1e^{-5}(m^{7/4} kg^{-1/2})$), 그리고 빙저용융량(m)(basal melting)(0.5 mm/a)로 균질한 용융량을 가정한 조건에서 100년 기간의 모델을 구동하였다. 해당 모델에서 도출된 결과값을 초기 입력인자로 선정하여 아래와 같은 수문변동 조건을 반영시켜서 각 조건별로 수문 변동특성이 어떻게 달라지는 지를 모의 하였다.

표 57 부정류 모델 수문특성 및 빙저용융량 입력인자

Parameter	Case A	Case B	Case C
K_c ($m^{3/2} kg^{-1/2}$)	$1e^{-3}$	$7e^{-3}$	$2e^{-2}$
K_s ($m^{7/4} kg^{-1/2}$)	$1e^{-5}$	$1e^{-5}$	$1e^{-5}$
m (mm / y)	1 mm/a (background melting) + (max 10mm/a) additional melting from Mt.Melbourne		
Run period (year)	100		

(부정류모델) 부정류 모델에서는 채널의 수리전도도 특성에 따라서 수문변동성이 어떻게 진화하는지를 규명하기 위해 표와 같은 조건에서 모델을 수행하였다. 정상류 모델에서 도출된 초기 입력

값으로부터 전체 모의지역 빙저용융량을 1 mm/a 로 멜번 화산지역주변에는 최대 10 mm/a 의 빙저용융량으로 점진적으로 증가시키며 화산지역에서 멀어질수록 용융량이 적어지는 가우시안 분포 형태의 빙저용융량 분포 입력값을 가정하였다.

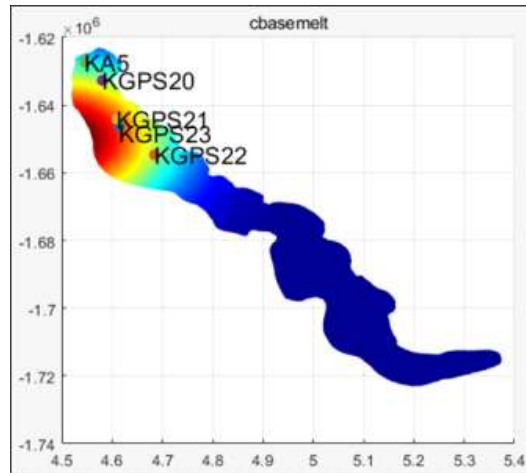


그림 464 부정류 모델에서 입력된 빙저용융량 분포. 멜번화산 주변에 고열류량을 가정하여 빙저 용융량이 주변지역보다 큰 것으로 가정하였음(배경값: 1 mm/a, 최대값: 10 mm/a)

② 주요 결과

㉞ 부정류 모델을 위한 초기입력인자 도출

수문망 모델의 초기 입력인자 도출을 위해서 100년간의 정류 모델을 수행하였다. 그 결과 수문망 두께는 주 흐름지역에서 약 0.02 m 정도의 분산흐름이 나타나는 것으로 모의되었고, 빙저면 지형고도가 주변에 비하여 낮은 지역인 KA5, KGPS22 관측점에서 0.08 m 이상의 상대적으로 두꺼운 수문층이 존재하는 것으로 나타났다. 유효압력값($P_i - P_w$)의 경우는 지반선 근처일부를 제외하고 0 이상이 나왔으며, 모델의 최종결과에서는 채널이 생성되지 않았다. 해당 모델에서의 유효압력분포, 수문두께 및 수리포텐셜 값을 초기조건으로 하여, Case A, B, C에 수문특성인자를 입력 값으로 한 부정류모델을 구동하여, 채널생성의 특성에 의한 수문진화 양상에 대하여 모의하였다.

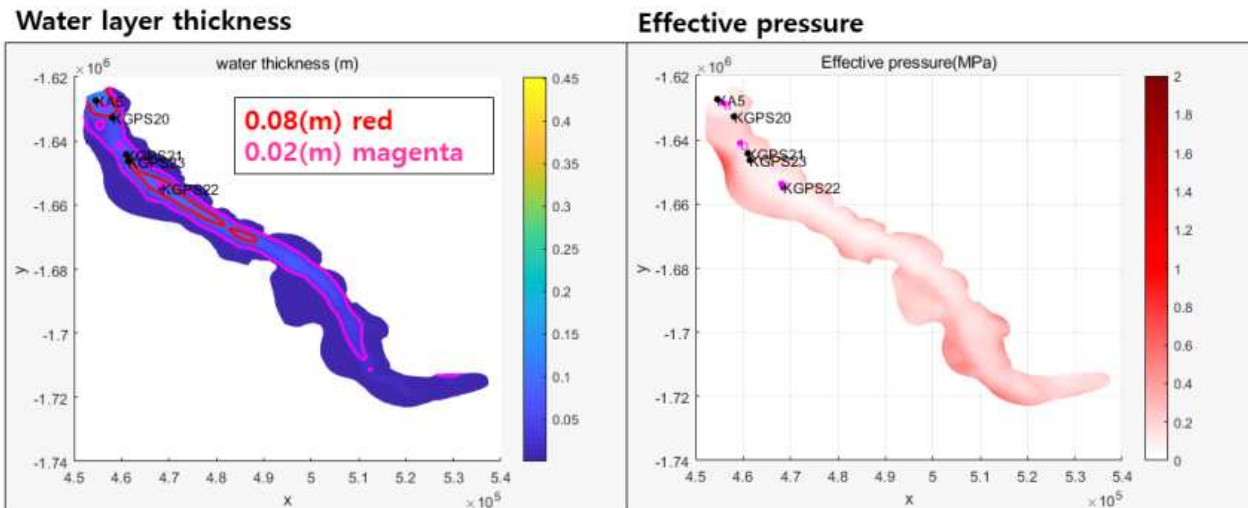


그림 465 정류모델에서의 초기 빙저수문망 두께 및 유효압력값 분포

㊤ 빙저수문망 두께(water layer thickness) 변화

모델의 민감도 분석을 수행한 결과 Case A, B, C 3가지 채널 수리전도도 경우에 따라 나타나는 빙저수문 두께의 결과는 다음과 같았다. 기본적으로 채널의 수리전도도가 낮을수록 빙저면에 존재하는 물의 압력이 높아서(즉, 유효압력이 낮아서) 채널이 생성되더라도 물이 빠져나가는데 시간이 걸리기 때문에 지형이 낮은 곳에 두꺼운 빙저수가 존재할 가능성이 높다.

- 아래 그림은 모델의 구동후 빙저호의 변동성 여부를 나타낸다. 채널수리전도도가 가장 낮은 Case A의 경우 KA5 관측점에서 1.2 m, KGPS22 관측점에서 0.8 m, KGPS21 지점에서 약 0.4 m의 빙저호가 생성된 후, 모델 구동이 끝날때까지 지속적으로 유지되는 것을 확인 할 수 있다. 반면, Case B의 경우는 모델 초기에 KA5 (0.7 m), KGPS22 (0.4 m), KGPS21 (0.2 m) 깊이의 두께의 빙저수 흐름이 형성 되었으며, 이후 KGPS21 지점 주변에 수리전도도가 높은 채널흐름이 활성화 됨에 따라 주변에 형성된 두꺼운 수층이 사라지는 것을 모의하였다. 채널의 수리전도도가 가장 높은 Case C의 경우 KA5 (0.4 m), KGPS22 (0.2 m)의 빙저수문 두께가 형성되었으나, KGPS21 지점과 같은 경우에는 모델 구동기간동안 빙저호가 형성되지 않았다. 이는 수문에 두께가 두꺼워지기 전에 높은 수리전도도의 채널이 생성되어 물이 배수되어 빙저호의 생성을 막기 때문으로 판단된다.

채널 수리전도도에 따른 수문반응성을 비교해 본 결과 KA5, KGPS22와 같은 경우는 채널수리전도도 값에 따라 빙저호의 심도는 차이가 있으나 지속적으로 해당지역에 물이 축적되는 것을 모의할 수 있었다. 해당 지역의 경우 지형적으로 움푹 들어간 형태로 수리포텐셜이 주변보다 낮아 물이 모이기 좋은 위치로 간주된다. 하지만, 다른 지역의 경우 채널의 수리전도도 조건에 따라 빙저호 형태의 수문두께가 형성되는 경우, 형성되었다가 사라지는 경우, 그리고 형성되지 않았던 경우로 구분되었다. 특히, KGPS21 주변과 같은 경우는 그러한 특징이 두드러지게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 다른 관측점처럼 지형이 주변보다 낮은 지역이 아니지만, 특정 수리전도도 조건에 따라서는 해당위치에 물이 축적되는 경우가 있어 변동성이 심한 것으로 파악된다. 빙저호의 형성은 유효압력의 변화를 유발하며 이로 인해 채널흐름이 형성되는데 채널이 형성되어도 물의 배수가 충분치 않

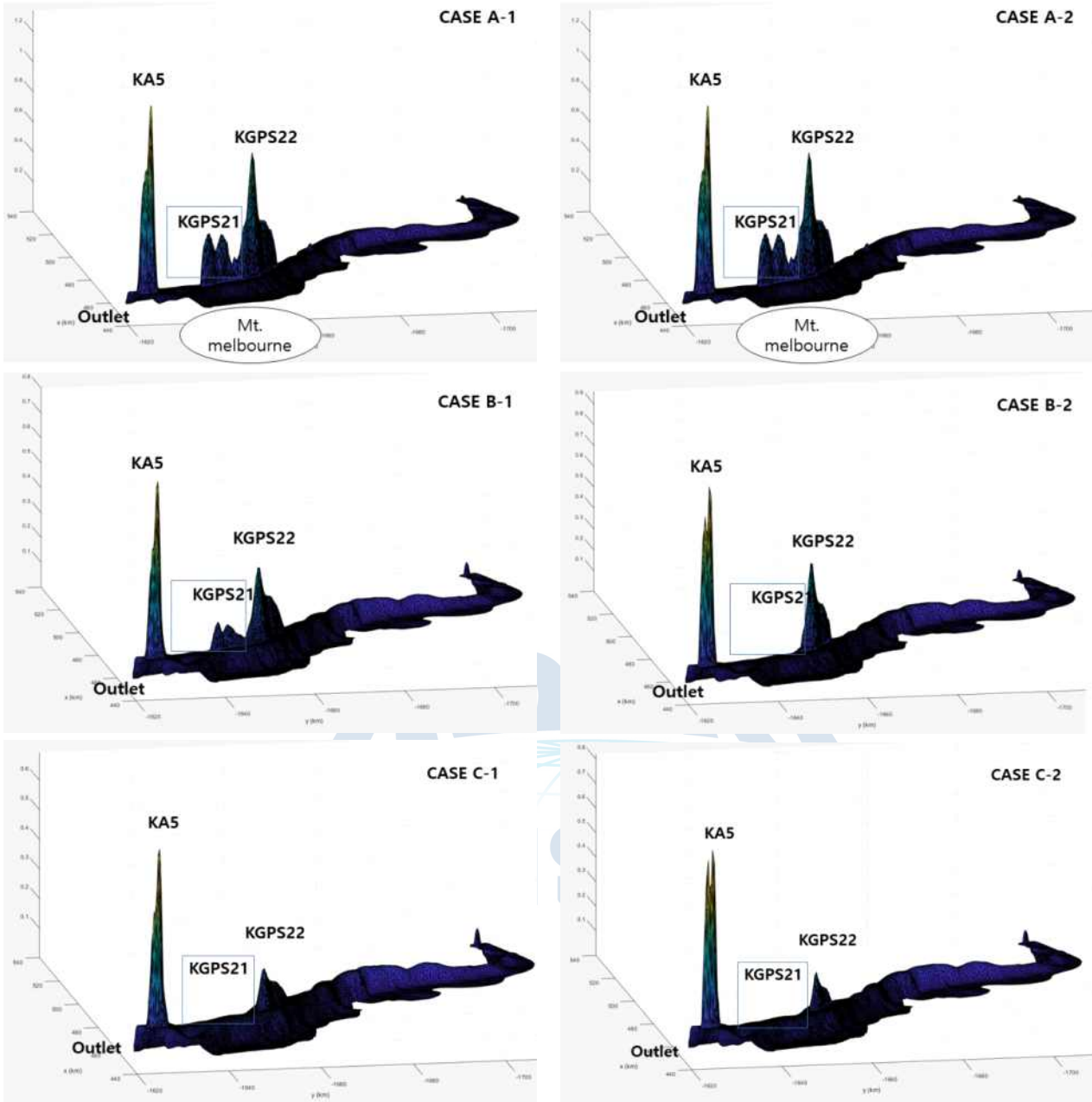


그림 466 Case A ($K_c=1e-3$), B ($K_c=7e-3$), C ($K_c=2e-2$)에서 모델의 구동에 따른 수문 변화. A-1, B-1, C-1은 모델구동 20년 후 결과, A-2, B-2, C-2는 부정류모델의 최종 결과 값을 나타냄

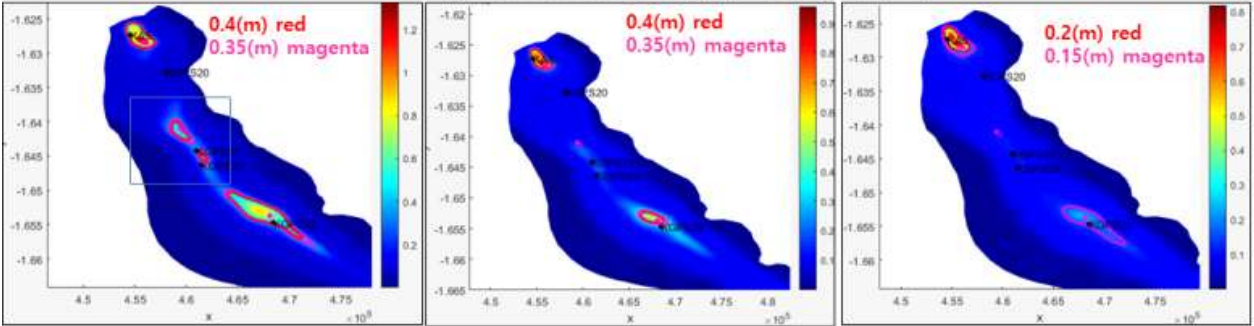
을 경우 두꺼운 형태의 수문이 형성되었다. Case A처럼 KGPS21 지역에 소규모의 빙저호가 형성된 경우에 유효압력 또한 0 이하의 값을 가지는 지역이 같은 곳에 발생함을 모델결과 확인할 수 있었다.

CASE A (Kc(1e-3))

CASE B (Kc(7e-3))

CASE C (Kc(2e-2))

모델 기간 동안 빙저수문 최대 두께 (m)



유효압력 (Effective pressure) (MPa)

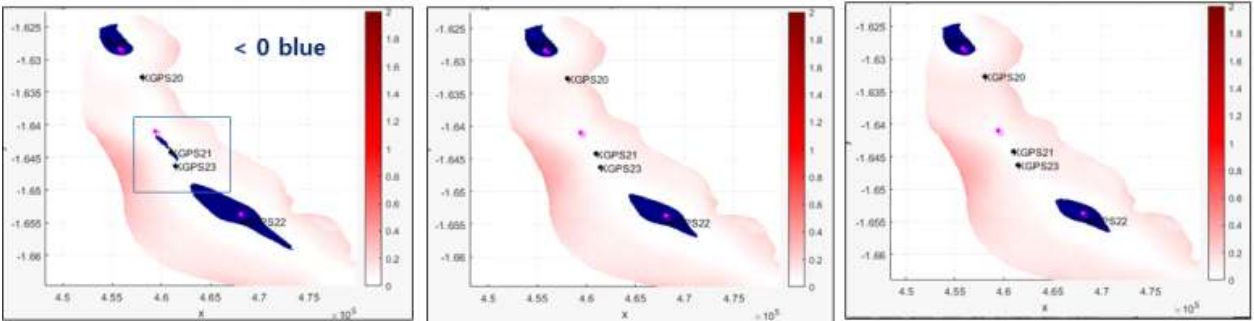


그림 467 모델 기간동안 각 Case별 빙저수문 최대 두께 분포 및 유효압력 분포

크지역연구소

빙저수문 두께의 변동성을 보기 위해 모델기간 동안 수문두께 최대값에서 모델 최종값의 차를 도시해 보았다. Case B의 경우 KA5와 KGPS22지역에서 0에 가까운 값을 보이는 이유는 빙저수문의 두께가 점진적으로 증가하다가 최종 수치가 특정값으로 수렴하기 때문에 최대값과 최종값이 거의 차이가 없기 때문이다. 반면, KGPS21과 같은 경우 앞서 기술했던 이유처럼 Case B의 경우 빙저호가 생성되었다가 KGPS21근처에 아래와 같은 채널이 집중적으로 활성화 된 이후 수문의 두께가 줄어들어 최종적으로는 빙저호가 사라지게 되는 변동성을 보여주게 된다. 아래 그림에서 KGPS22의 경우 호수의 주변부에 미세한 채널들이 형성되는 것을 볼 수 있는데 이는 주변에서 생성된 물이 KGPS22 빙저호로 유입되기 때문에 생기는 것이라고 판단된다. 이로 인해 KGPS22 빙저호 내에 유효압력이 낮아지게 되면 빙하 하류로 많은 유량의 흐름이 형성이 되어 KGPS21 하류 지역으로 집중적인 흐름의 채널이 활성화된다. 따라서, KGPS21지역과 같은 경우 멜변화산 등 주변 열, 마찰 조건에 의한 빙저용융량 생성 및 유량 유입 여부에 민감한 영향을 받는다는 것이 모델 결과 나타났다.

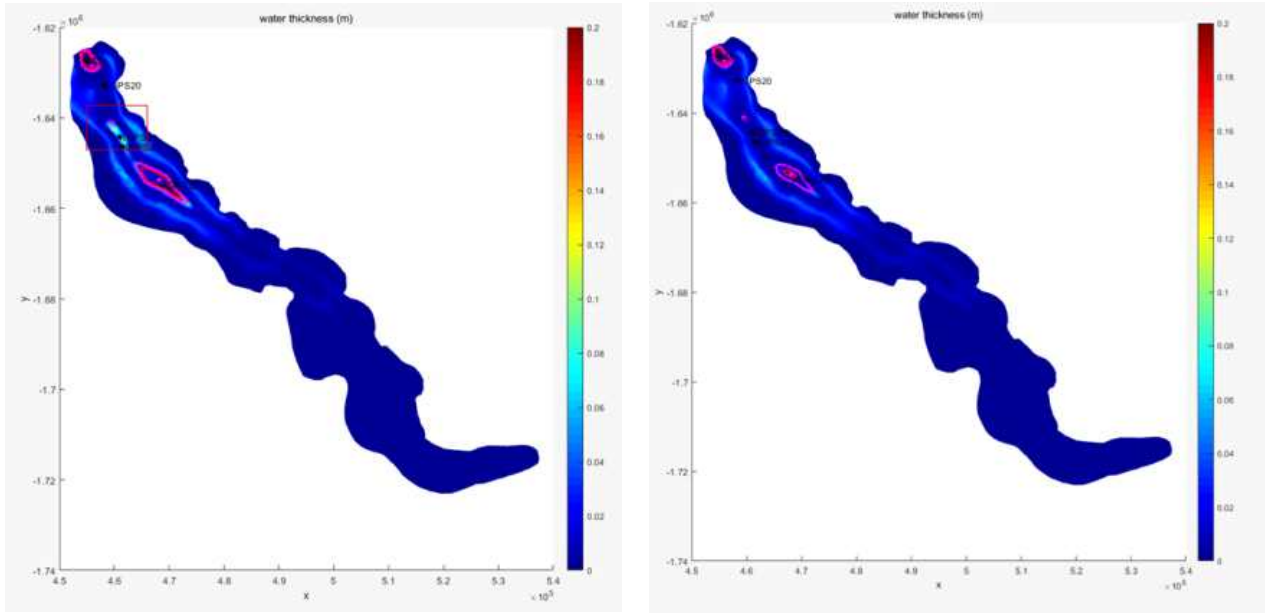


그림 468 빙저수문 두께 변동성 (모델 기간중 최대수치 - 모델최종수치) (좌) CASE B (우) CASE C

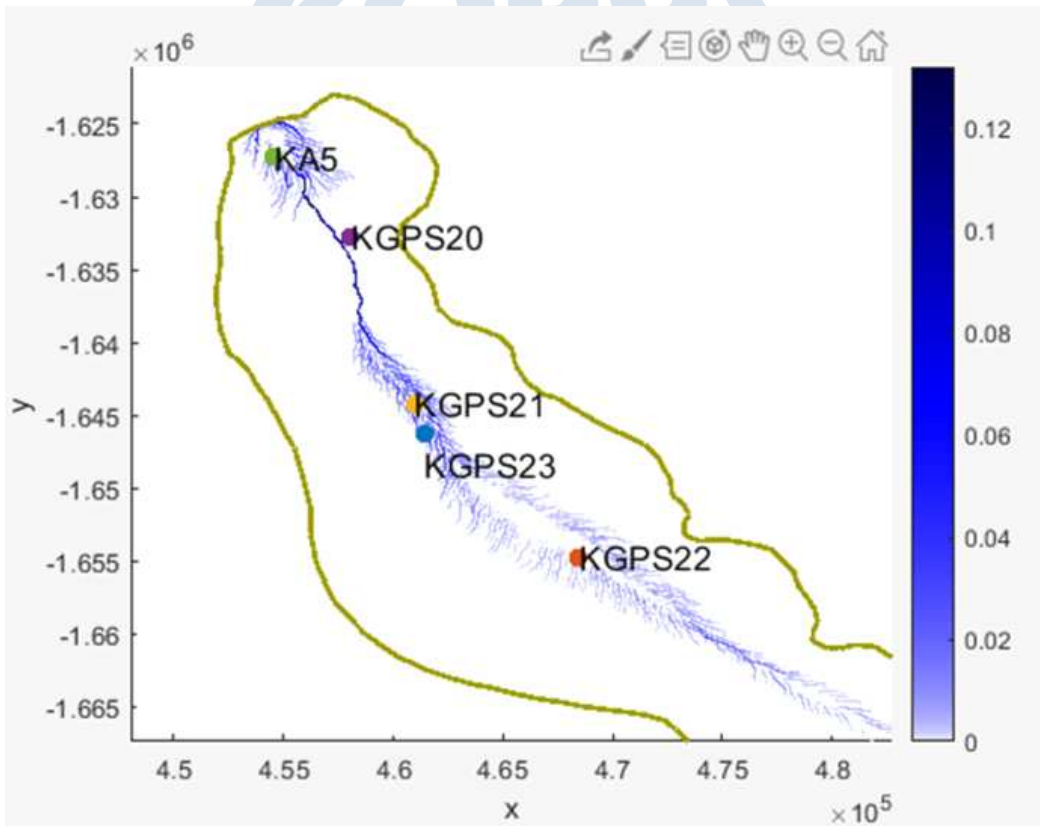


그림 469 부정류모델에서의 채널 흐름 생성 분포 형태

③ 논의

캠벨 빙하 지역에 수문 변동성을 모의하기 위하여 채널의 수리전도도 및 빙저용융량 불균질성 분포를 고려하여 GlaDS 수치모델을 활용하여 빙저수문망 모델을 수행하였다. 그 결과 KA5, KGPS22 지점에서는 지속적으로 두꺼운 빙저수문망 두께와 낮은 유효압력값이 모의되었다. 반면, KGPS21 지역의 경우 채널수리 전도도 및 빙저 용융량 조건에 따라 빙저수층이 생성/소멸되기도 하는 변동성을 보였는데 이는 해당 지역 근처로 채널이 밀집되어 생성될 때 물이 효율적으로 배수 되기 때문임을 모델 결과를 통해 확인하였다. 현재까지 결과로는 GPS에서 관측된 시간적 수문 변동성을 모델로 직접적으로 확인하는 데는 어려움이 있었으나, GPS 탐사 결과도 KGPS21지역에서 수문흐름으로 인한 변동성이 가장 큰 것을 지시해 주고 있어 향후 분석을 통하여 이를 규명할 필요성이 있을 것이다.

(라) 종합

본 연구에서는 GlaDS 모델을 활용하여 빙상 하부의 수문 시공간적 변동성 구현 가능성을 데이비드 빙하 사례와, 캠벨 빙하 사례를 통해서 확인하였다.

데이비드 빙하 사례에서는 항공 레이더 탐사자료 기반의 수문공간분포와 수치모델 결과값을 비교하여, 일부 빙저호 지역에서 관측값을 모델로 구현하였고, 빙저수 압력증가로 인한 채널의 형성이 빙하 하류 지반선으로 연결되어 드라이갈스키 빙설 하부의 채널로 연결되는 기작을 확인하였다.

캠벨 빙하 사례에서는 빙저용융량의 분포와 채널수리 전도도의 조건에 따른 빙저호의 두께 변동성을 규명하였다. 특히, 멜번 화산에서 고지열류량으로 인한 높은 빙저용융량을 가정한 경우 주변의 유효압력을 낮추고 채널의 생성을 유발하여, 빙저호의 채워짐과 배수 기작에 영향을 미침을 규명하였다. 특히, 특정지역(KGPS21)주변 과 같은 경우 채널의 활성화는 빙저호의 생성/소멸에 밀접하게 관여할 수 있다는 것을 확인하였다.

부분적으로 모델이 현상을 비교적 잘 구현해내기도 하였으나, 부정확한 입력인자가 많고 모델의 물리기작 검증이 아직 미진하여, 민감도 분석측면에서 보수적으로 접근하여 해석해야할 필요성이 있다. 수치 모델을 활용한 수문변동 연구와 같은 경우 기존에는 개념모델 위주, 혹은 그린란드 지역에 국한되어 많이 수행이 되었으나 남극과 같은 경우 관측자료의 부재 및 모델 입력인자의 합리적인 반영 측면에서 아직까지 많은 불확실성이 존재한다. 이는 수문물리기작의 개선 및 관측, 검증자료의 지속적인 확보를 통하여 해결해 나가야 할 문제이다.

시공간적인 빙저수문 변동모델의 경우 도출되는 빙저 유효압력 변화값의 경우 빙저면 미끄러짐과 상관관계가 있어 빙권 거동을 조절하는 중요한 인자로 작용한다. 빙저수문망 문제를 현장규모의 도메인에 적용해 본 결과 모델 결과를 관측값을 정확하게 구현하는 데는 무리가 있었다. 첫 번째 원인은 빙저 하부지형의 부정확성 요인으로 장기적인 탐사를 통한 정밀 지형의 확보로 개선해 나갈 수 있을 것이다. 두 번째로는 빙저 용융량의 불확실성요인이다. 빙저용융량의 경우 남극 전체의 지열류량 분포맵을 기반으로 도출할 수 있으나, 기존 출간된 자료들 사이에도 수치 차이가 커 불확실성이 존재하고 소규모 빙하지역에서 지열류량의 불균질성을 구현할 정도로 고해상도의 자료는 아니다. 따라서, 기존의 지열류량 자료의 현실적으로 모델에 반영하여 빙상동역학 모델 기반의 마찰열을 고려하여 모델의 입력인자로 반영해야할 것이다. 셋째로는 모델의 수문 변동 물리기작의 불확실성이다. GlaDS 모델과 같은 경우 채널의 형성을 R-채널 형성 기작을 기반으로 만들어진다.

남극의 경우 빙상하부 매질이 퇴적층일 경우, 혹은 단단한 암반일 경우 채널이 생성되는 기작이 다를 수 있으나 모델에서는 이를 반영하지 못한다. 따라서, 수리전도도값 분포의 불균질성 반영 혹은 다양한 물리기작을 모델에 반영할 수 있게 된다면 좀더 현실적인 모델 구현이 가능할 것으로 생각한다.

향후, 레이더 탐사를 통한 수문구조 확인, 빙저 용융량을 도출할 수 있는 관측 요소 추가, 채널-분산흐름을 구현하는 물리적 기작의 개선, 현장관측 기반의 경계조건 입력 조건 도출을 통하여 모델의 정확도를 개선해 나가야 할 것으로 생각된다.

나. 남극 빙하 거동 규명

(1) 빙하 이동속도 관측

(가) 장보고기지 주변의 빙하 이동 속도

빙하의 이동속도는 주로 인공위성 InSAR 기법, 광학영상의 매칭을 이용한 속도 추정 기법 등을 통해 주로 관측된다. 아래 그림은 InSAR기법을 통해 산출된 장보고기지 주변 빙하 이동속도를 도시한 것이다(Rignot *et al.*, 2017). 가장 속도가 빠른 지역은 데이비드 빙하에서 드라이갈스키 빙설로 전환되는 지반선 부근으로 약 1km/yr의 속도를 나타낸다. 드라이갈스키 빙설에서는 바다쪽으로 갈수록 점진적으로 속도가 증가하여 빙설 끝에서는 약 700m/yr의 속도로 이동한다. 이 지역들을 제외하면 약 200m/yr이내의 속도를 나타내고 있다.

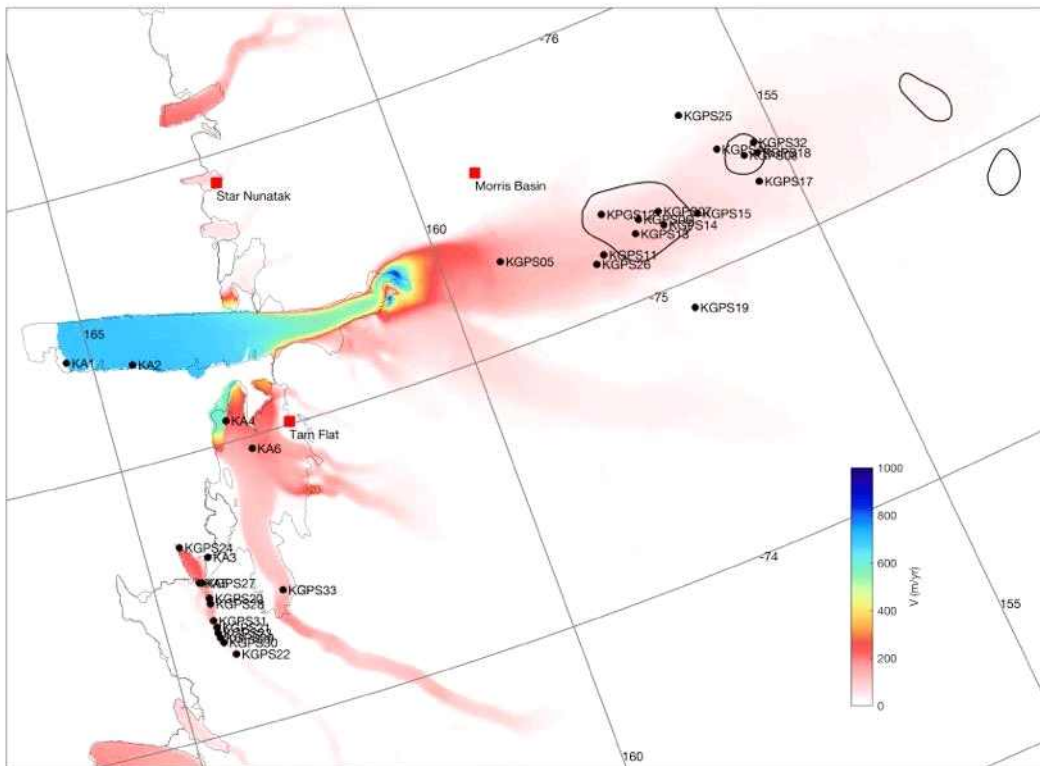


그림 470 데이비드 지역 빙하 이동속도 (MEaSURES, Rignot *et al.*, 2017)

GPS 현장 실측에서 관측되는 빙하의 이동속도는 InSAR 기법에 의해 산출된 속도와 최대 15m/yr의 차이를 나타내지만 평균적으로 5.7m/yr의 속도차이를 나타내어 InSAR기법의 정확도인 평균 약 5m/yr와 비슷하다. GPS와 InSAR의 속도 차이가 많이 나는 지역은 드라이갈스키 빙붕과 난센 빙붕, 캠벨 빙하이다. 드라이갈스키 빙설의 경우 빙설 진행의 수직한 방향으로의 이동속도 변화가 크기 때문이며, 난센 빙붕의 경우 2016년 거대 빙산의 이탈에 따른 속도 변화인 것으로 보인다. 캠벨 빙하의 경우, 빙하의 속도가 주기적으로 변화하는 특성을 가지는데 이에 따라 관측시기에 따라 속도가 다르게 관측되기 때문이다. 속도 차이가 크게 나는 지역은 주로 시간에 따른 속도 변화가 있는 지역으로 이 지역을 중심으로 장기적인 모니터링을 통해 빙하 거동 변화를 연구할 필요가 있다.

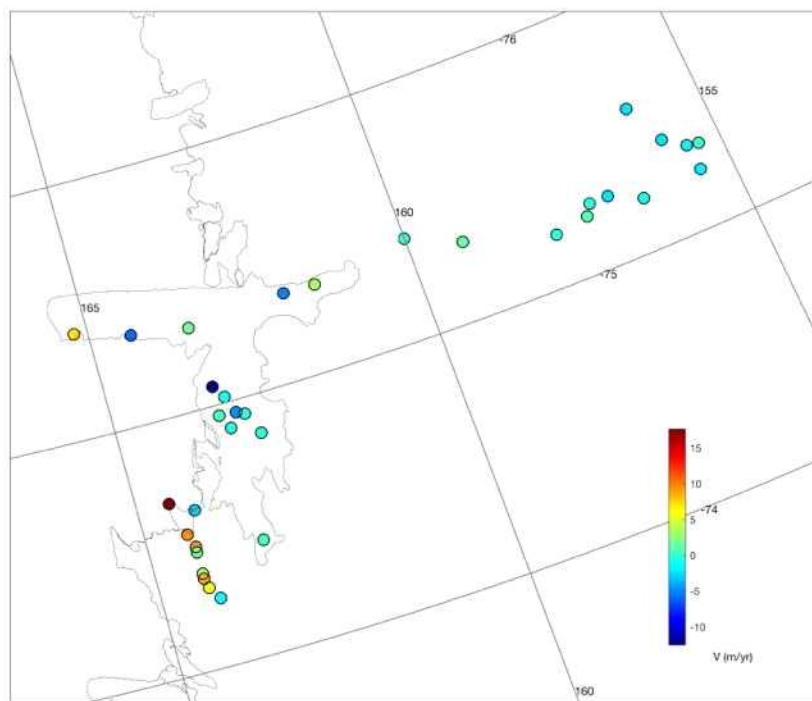


그림 471 GPS 관측 빙하 속도와 InSAR 관측 빙하 속도의 차이 (GPS-InSAR)

(나) 드라이갈스키 및 난센 빙붕의 속도 변화

드라이갈스키 빙설에는 총 5측점의 GPS 관측이 수행되었다. 2013년 관측된 GPS 속도의 잔차를 살펴보면 속도 변화는 빙설의 회전성분으로 대부분 설명될 수 있다. 회전의 중심은 만(bay)에서 바다로 진출하는 경계에 위치하고 있다. 회전 성분의 진폭은 회전 중심에서 멀어질수록 증가하는 양상이며, 그 증가 양상은 cantilever beam에 의 진폭 변화와 유사하다. 이는 외부 힘의 변화에 따른 탄성 변형이 속도 변화의 주요인임을 나타낸다.

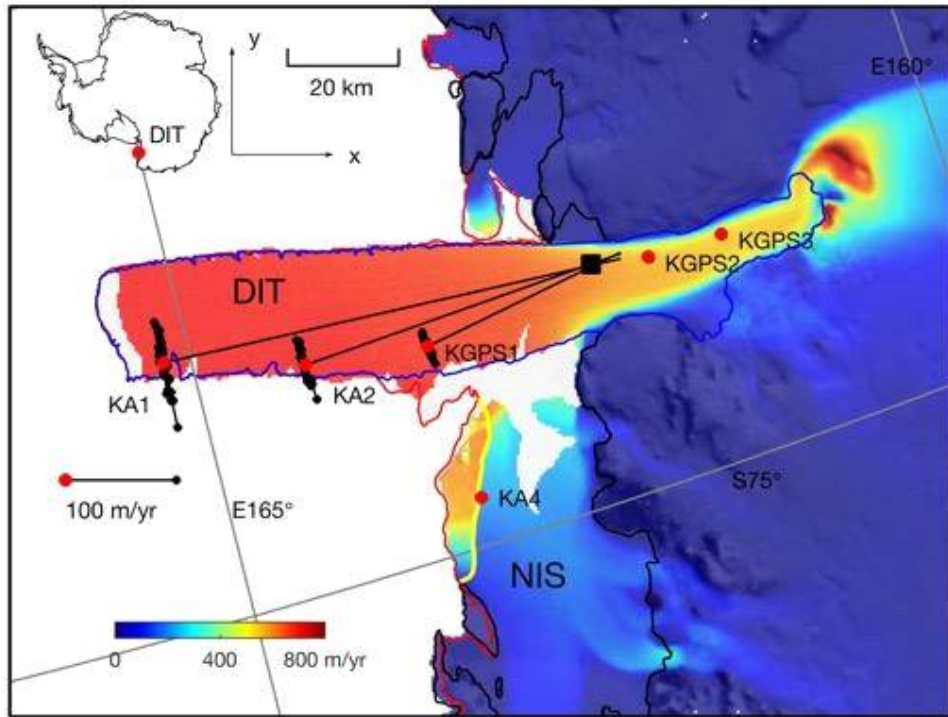


그림 472 2013년에 관측된 드라이갈스키 빙설위의 GPS 위치와 GPS 속도의 잔차(GPS 속도 - 평균속도)

2016년 난센 빙봉에서 떨어져 나간 C-33 빙산은 길이 약 30km, 폭이 약 10km에 달한다. 드라이갈스키 빙설에 위치한 KA2 측점의 이동 양상을 살펴보면 C-33 빙산의 붕괴와 함께 속도가 약 5%, 이동 방향이 약 10도 정도 변화였다. 이러한 변화는 지난 15년 이내에 가장 크게 변한 것으로 난센 빙봉의 거동이 드라이갈스키 빙설의 거동에 밀접한 관계를 가지고 있음을 의미한다. C-33 빙산의 붕괴 이후 드라이갈스키 빙설은 속도가 감소하고 북쪽 방향으로 선회한 것처럼 보인다. 이는 드라이갈스키 빙설에 작용하는 북쪽 방향 힘을 C-33 빙산이 일정부분 지탱하고 있었다는 것을 의미한다. 하지만 속도가 감소한 것은 걸로 나타나는 현상이다. 이동 속도 성분을 평균적인 흐름 방향 성분과 회전 성분으로 분해할 경우, 흐름 방향 성분이 오히려 약 2% 정도 증가하는 것을 볼 수 있다. 즉, C-33 빙산 부분이 드라이갈스키 빙봉의 전진을 일정부분 막고 있었는데, 빙산이 떨어져 나가면서 저항력이 줄어들면서 드라이갈스키 빙설의 흐름 방향 속도가 증가한 것으로 해석될 수 있다. 빙설의 흐름 방향 속도 증가는 C-33 붕괴 이전 약 6개월 전부터 발생하고 있으며, 이는 C-33 빙산이 붕괴 약 6개월 전부터 가속되고 있었던 것과 무관치 않아 보인다. 이 지역 수중 음향 자료에서 빙산 붕괴 이전에 빙진 신호가 집중적으로 발생하는 것과 일치하며, 빙산의 붕괴가 수개월에 걸쳐 진행되고 있었음을 의미한다.

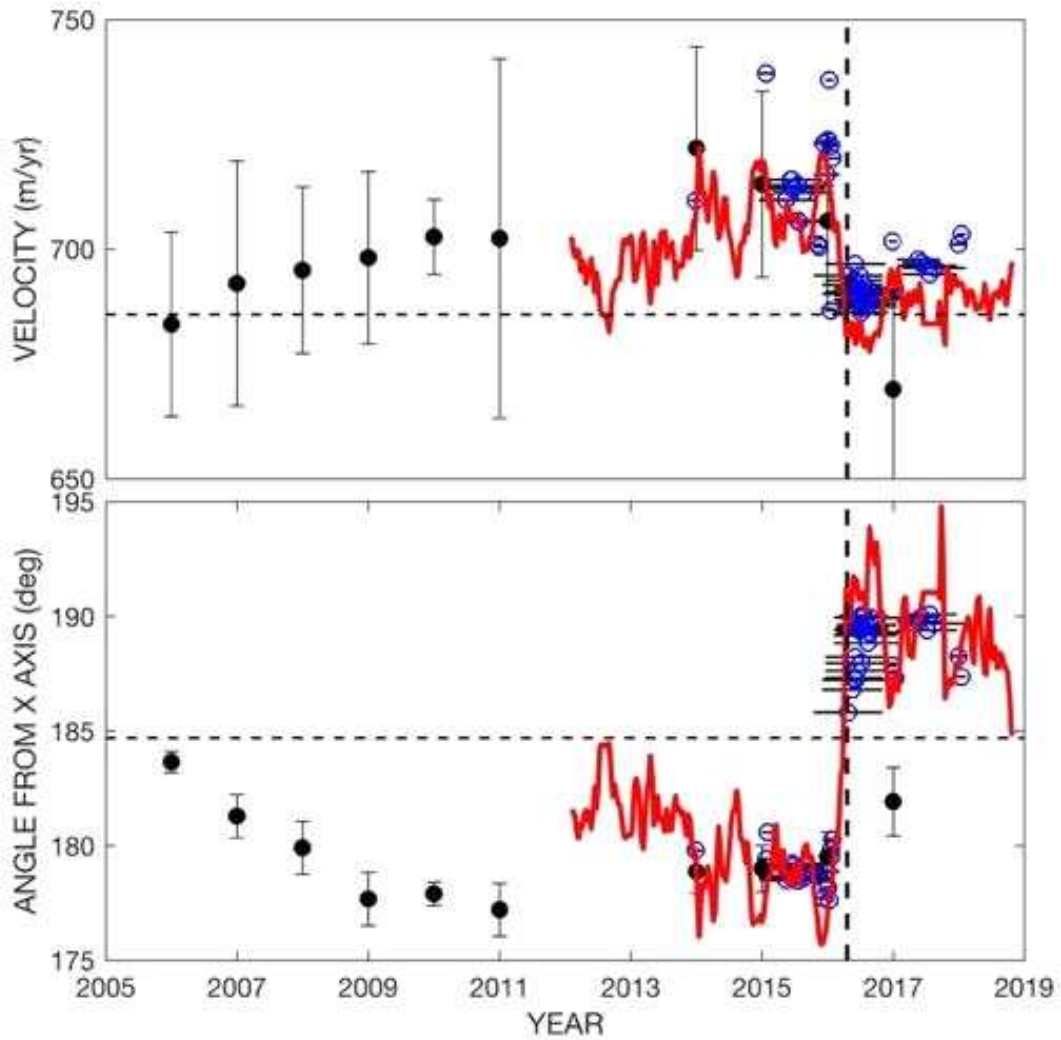


그림 473 KA2 측점에서의 GPS 관측자료(적색선), GoLIVE 속도 자료(Scambos *et al.*, 2016), InSAR 속도 자료(Mouginot *et al.*, 2017)의 비교. (상) 이동 속도 및 (하) 이동 방향

C-33 빙산의 붕괴를 전후로 난센 빙봉의 속도 변화를 살펴보면, C-33 빙산은 크랙이 급격히 발달하지 시작한 2014년부터 속도가 증가하기 시작하였으며, C-33 빙산에 인접한 난센 빙봉 지역은 속도가 감소하는 것이 GoLIVE 속도 자료(Scambos *et al.*, 2016)와 KA4 GPS 측점에서 공통적으로 관측된다. 난센 빙봉의 전단부는 드라이갈스키 빙설과 접촉하여 드라이갈스키 빙설을 지탱하고, 속도를 늦추는 역할을 하고 있는데 C-33 빙산을 형성한 크랙이 발달하면서 드라이갈스키 빙설로부터의 응력이 C-33 빙산에 주로 전달되어 C-33 빙산의 속도는 증가한 반면, 난센 빙봉은 응력 전달이 이루어지지 않음에 따라 속도가 감소하는 경향을 나타내는 것으로 생각된다.

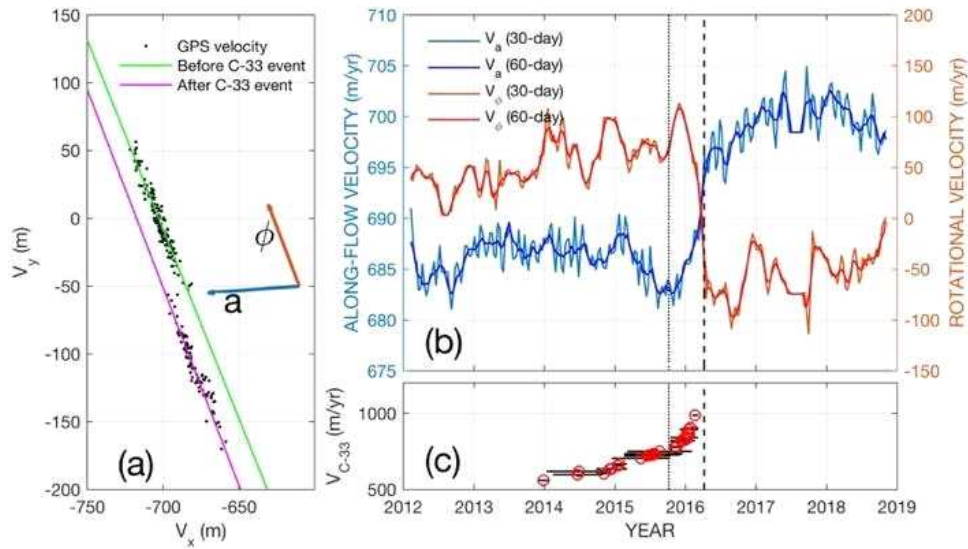


그림 474 KA2 측점 속도 성분의 분해. (a) 좌표계 상의 속도 성분 변화, (b) 평균 흐름 방향과 회전 방향으로 분해된 속도 성분, (c) 난센 빙봉 C-33 빙산의 속도 변화

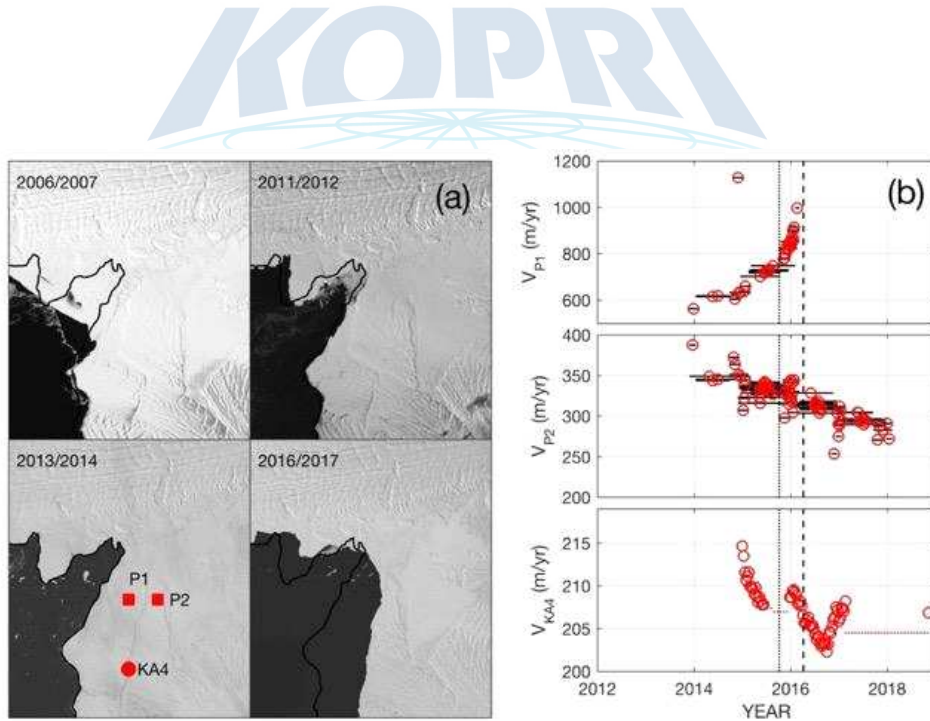


그림 475 (a) 시간에 따른 난센 빙봉의 변형 모습을 보여주는 Landsat 인공위성 영상과 (b) 난센 빙봉위의 세 지점에서 관측되는 빙봉 속도 변화

결론적으로, 드라이갈스키 빙설과 난센 빙봉에서 관측되는 속도 변화는 C-33 빙산이 형성과 붕괴에 밀접한 관련을 가지고 있는 것이 관측되었다. 그 상호 작용은 3 단계의 과정으로 요약될 수

있는데, 첫째, C-33 빙산이 형성되기 이전에는 난센 빙붕이 드라이갈스키 빙설을 지탱하여 남쪽 방향으로 휘어지게 하는 작용을 하며, 속도가 빠른 드라이갈스키 빙설의 운동 에너지가 난센 빙붕에 전달되어 드라이갈스키 빙설의 속도는 감소하고 난센 빙붕의 전단부는 속도가 증가하는 상태를 유지하게 된다. 둘째, 난센 빙붕 전단부의 속도가 증가함에 따라 C-33 빙산을 형성한 크랙이 발달하기 시작하면 드라이갈스키 빙설의 운동에너지는 C-33 빙산에 해당하는 전단부에 주로 전달되어 크랙을 발달시키는데 에너지가 소모된다. 따라서 크랙 상류의 난센 빙붕 지역에서는 속도가 감소하게 된다. 셋째, 빙산이 빙붕으로부터 떨어져 나가게 되면 드라이갈스키 빙설의 운동에너지가 더 이상 빙산에 전달되지 않기 때문에 드라이갈스키 빙설의 속도가 증가한다. 즉 드라이갈스키 빙설을 지탱하고 저항력으로 작용하던 빙산이 없어짐에 따라 드라이갈스키 빙설은 가속되고, 난센 빙붕 방향으로 휘어지게 되는 과정을 겪는다. 앞으로 시간이 흐르면, 다시 첫째 과정이 반복어 난센 빙붕의 전단부는 속도가 다시 증가할 것으로 예상된다.

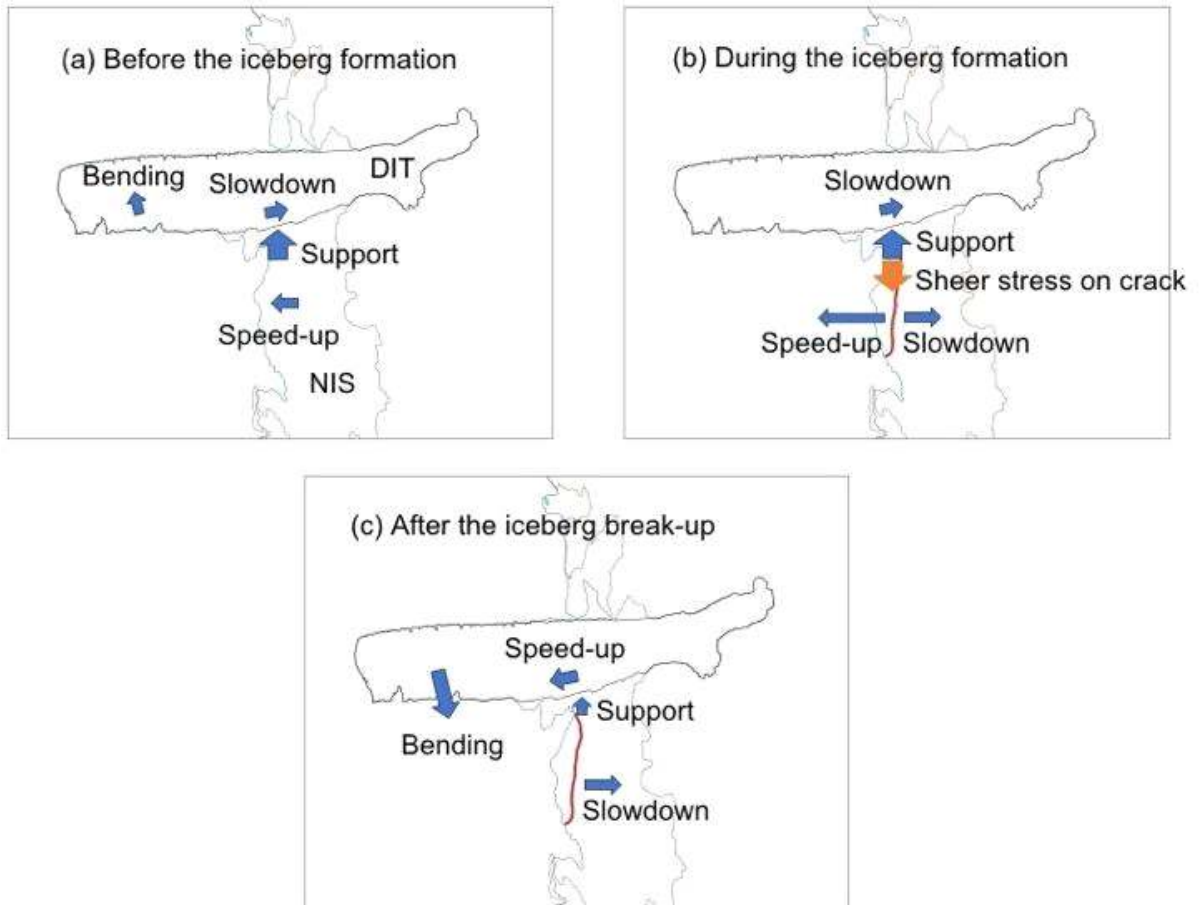


그림 476 드라이갈스키 빙설과 난센빙붕의 상호 작용

(2) 장보고 기지 주변 빙하지진관측 현황

장보고 기지 기반 광대역 지진관측망에서 관측된 지진자료 중에서 2016년도 발생한 국지지진을 선별하였다. 국지지진 선별을 위하여 연속지진파형에서 long-term average와 short-term average의 비(STA/LTA)를 계산하여 그 값이 4이상, 그리고 4개 이상의 관측소에서 관측이 되었을 경우, 국지지진으로 간주하여 자동으로 지진파형의 DB를 형성하였다. 자동으로 추출된 지진자료는 계기보정과 2-9Hz band pass 필터를 이용하여 신호대 잡음비(signal-to-noise ratio)를 높였고, 그 후에 다시 초동 P파의 도달 시간을 측정하여 정확한 발생 위치를 결정하였다.

지진원 위치를 결정하기 위해서 “Non-linear, earthquake location program (NLLoc)” 소프트웨어를 사용하였다. NLLoc 프로그램은 속도 모델, 지진파의 주행 시간, 그리고 확률론적 분포와 비선형 지진원위치 결정을 수행하여 3차원으로 진원의 위치와 그 오차 범위를 나타낼 수 있는 팩키지로 구성되어 있다. 기본적으로 Grid search 방법을 이용하여 지진원의 위치와 진원시를 역산한다. 지진파의 도달 시간에 대한 오차 분석과 지진파의 주행시간은 Gaussian 분포로 가정하여 수행하고, 관측된 지진파의 도달시간과 계산된 주행시간간의 maximum likelihood방법으로 진원시간을 역산하는 방법을 이용하고 있다

NLLoc 소프트웨어는 Tarantola and Valette (1982)과 Tarantola (1987)이 소개한 확률론적 분포를 이용한 역산방법으로 지진원의 위치를 결정한다 [Tarantola and Valette, 1982; Moser *et al.*, 1992; Lomax *et al.*, 2000]. 진원의 위치 $x = (x, y, z)$ 와 진원 시 T는 알 수 없는 인자로, 관측된 지진파의 도달 시간 (t) 그리고 속도모델을 이용하여 이론적으로 계산된 주행시간을 \mathbf{h} 로 표시한다. Tarantola and Valette (1982)는 만일이론적인 주행시간과 관측된 지진파 도달시간이 covarian matrices C_t 와 C_T 를 가지는 Gaussian 불확실성을 갖는다면, PDF (Probability Density Function)은 진원 시 T에 대하여 적분함으로 진원위치 인자에 대한 오차 PDF $\sigma(x)$ 을 구할 수 있다.

$$\sigma(x) = K \rho(x) \exp \left[-\frac{1}{2} g(x) \right],$$

$$g(x) = [\hat{t}_0 - \hat{h}(x)]^T [(C_t + C_T)]^{-1} [\hat{t}_0 - \hat{h}(x)]$$

여기에서 K는 normalization factor, $\rho(x)$ 는 모델 인자에 대한 전단계의 밀도 함수, 그리고 $g(x)$ 는 L2 misfit function를 나타낸다. \hat{t}_0 는 관측된 시간에서 weighted mean를 제거한 벡터, 그리고 \hat{h} 는 이론적인 주행시간에서 해당하는 weight mean을 제거한 벡터를 나타낸다. Weight 는 아래와 같이 표시된다.

$$w_i = \sum_j w_{ij}; \quad w_{ij} = [(C_t + C_T)^{-1}]_{ij}$$

NLLoc 소프트웨어는 Grid search 방법을 이용하여 진원 위치에 대한 PDF를 계산하는데, Grid search 방법은 계산하는 시간을 많이 소요되지만, 진원 위치가 될 수 있는 모든 경우를 계산하기 때문에 다중의 진원 위치에 대한 해를 계산할 수 있다.

본 연구에서는 진원 위치를 역산하는 Grid search 방법으로 Oct-tree sampling algorithm를 사

용하였다. Oct-tree 방법은 초기 grid 갯수를 작게 시작하여 계산된 에라 $\sigma(x)$ 가 가장 작은 cell에 대하여 반복으로 grid를 세분화하여 PDF값이 가장 높은 지점(x,y,z)를 구하는 방법이다. 그림 477에서 보여주는 것과 같이 지진원의 위치가 확률론적 분포로 cell i로 수렴되면 이는 대략적으로 $P_i = V_i PDF(x_i)$ 나타낼 수 있으며, 여기서 V_i 는 cell의 부피 그리고 x_i 는 cell 중앙의 좌표를 나타낸다.

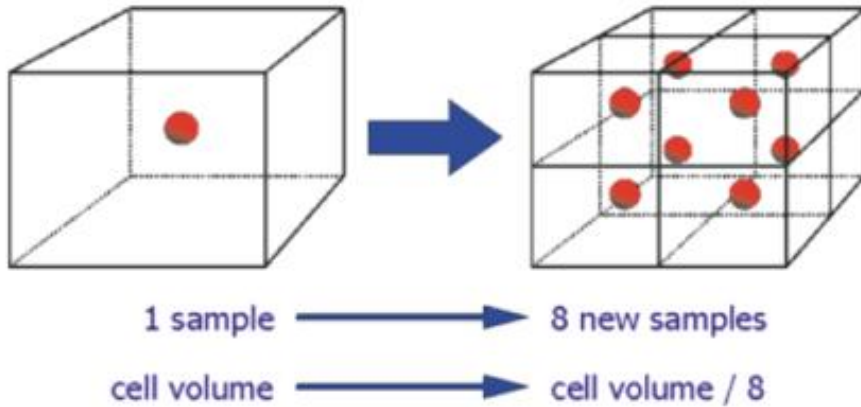


그림 477 Oct-tree 방법의 간략한 도식

그림 496는 실제 PDF가 9개의 cell 중앙에 존재하는 경우 (그림 478A) oct-tree방법으로 어떻게 PDF값에 도달하는 지를 보여주고 있다. 일단 각 cell에 대하여 개산을 하고 세부적으로 나누어 지는 과정이 그림 478(B) - 그림 478(F)으로 나타내고 있다.

- STA/LTA를 이용하여 자동으로 선별한 9,154개 이벤트에서 manual picking으로 진원의 위치가 결정된 2,669개의 지진원의 위치는 그림 479에 보여진다. 지진원은 데이비드 빙하 상류 지역과 멜번 화산 주변, 2개의 그룹으로 나눌 수 있다.

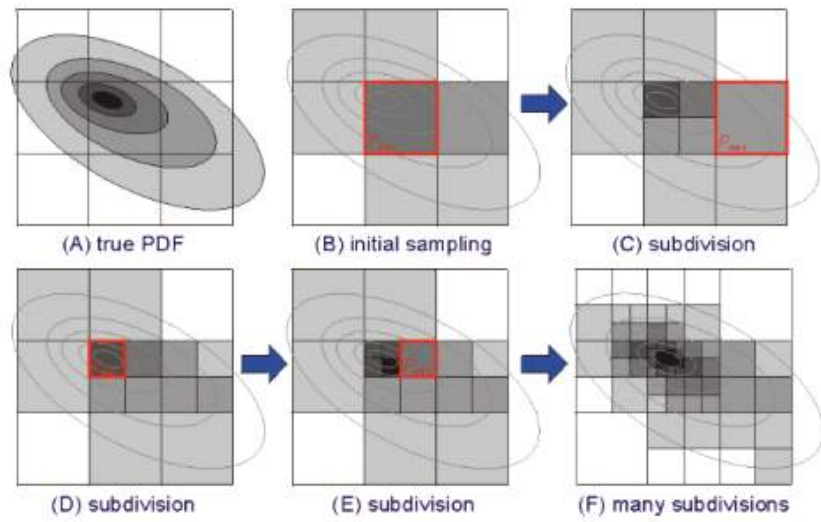


그림 478 Oct-tree 방법을 이용하여 계산된 PDF 결정 과정



그림 479 2016년도 관측된 장보고 기지 주변 빙진, 화산 기원 및 단층 지진원 위치

- 이중 멜번화산 주변에서 관측된 지진은 일반적인 지진파형과는 다르게 저주파수 대역에서 대다수의 에너지가 분포고 있다. 이러한 저주파수 특성은 일반적인 단층에 의한 진원이 아니라 멜번화산 하부에 존재하는 마그마의 움직임에 의한 지진임을 유추할 수 있다.

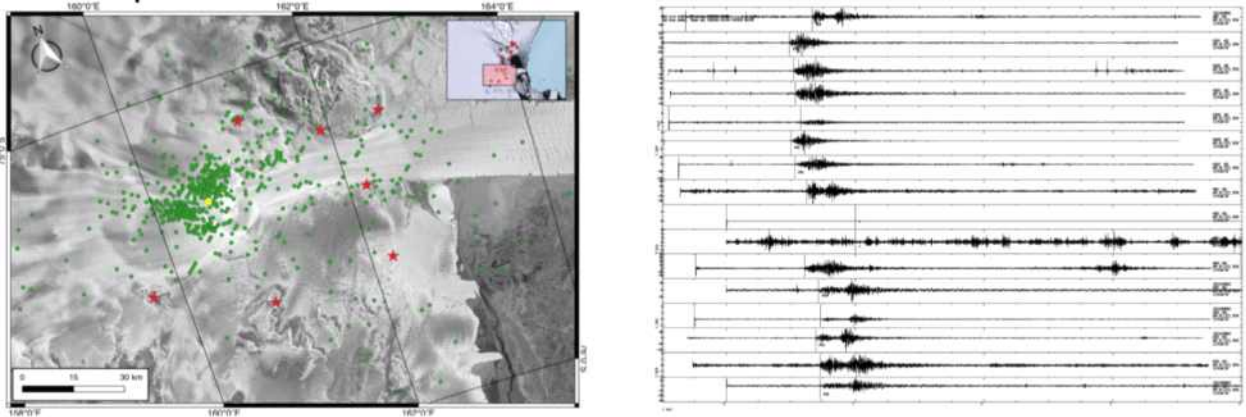


그림 480 데이비드 빙하 상부에서 발생한 지진원의 위치. 대부분의 지진은 데이비드 빙하가 빠르게 이동하는 지역에서 발생하고 있음.

- 두 번째 진원 그룹인 데이비드 빙하 상부의 지진원은 데이비드 빙하가 빠르게 움직이는 지역으로 빙하 하부가 지각과의 마찰에 의해서 발생하는 것으로 규모에 비하여 주주파수가 낮은 특징을 보인다(<10Hz). 연간 관측되는 지진원의 개수가 많고 신호의 세기가 약하여 국지 지진에 대한 분석은 많은 시간과 인력이 필요하다.

(2) 빙상 질량수지 추정

지난 20여 년간 남극의 평균 얼음 질량 감소는 약 70 Gton/yr (Shepherd *et al.*, 2012)로 그린랜드 (약 200Gton/yr)의 1/3 수준에 불과하다. 하지만, 질량 감소가 매년 약 14.5Gton/yr² (Rignot *et al.*, 2011)로 가속되고 있음이 밝혀지고 있어 가까운 미래 해수면 상승에 가장 큰 역할을 할 것으로 예상된다. 이러한 예상은 남극 얼음 질량 감소가 전적으로 얼음 유출량 (ice discharge, D)의 증가 (빙하 이동 속도 증가 또는 지반선의 후퇴)에 의한 효과임을 가정한 것으로, 표면 질량 수지 (surface mass balance, SMB)가 고려되지 않은 것이다. D는 영년 변화를 하기 때문에 현재의 증가분이 향후 수십 년간 지속적으로 남극 빙하 질량 감소에 영향을 미치게 된다. 반면, SMB는 빙하 표면에 축적되는 강설의 양에 의해 결정되며, 강설은 짧게는 계절적 변동 길게는 10년 이상 주기의 변동을 하기 때문에, 남극 빙하 감소와 그에 따른 해수면 상승 예측에 잡음 요소로 작용할 수 있다. 관측된 남극 빙하 손실의 가속 신호에는 D와 SMB의 효과가 모두 반영되어 있어서, SMB를 보정 하여 D의 증가분만을 추출하는 것이 중요하다. 인공위성을 통해 남극 질량 변화를 자세히 관측하기 시작한 지난 수십 년 동안 SMB가 감소를 하였다면, 관측되는 남극 얼음 질량 감소에서 D의 증가에 의한 효과는 예상보다 작을 것이며, SMB가 증가를 하였다면 반대로 D에 의한 질량 감소가 더 심각할 것이다. 이번 연구에서는 2003년부터 2013년까지 GRACE. 중력 위성이 관측한 남극 질량 변화를 분석하여 SMB와 D에 의한 질량 손실을 분리하였다. 서남극의 경우 남극 질량 손실이 점점 가속되는 곳으로 알려져 있는데, 이중 SMB가 약 50% 이상 기여를 하고 있음을 밝혀냈다. 장보고

기지가 있는 빅토리아 랜드 지역은 빙하 감소의 가속 신호가 뚜렷하지 않아, 서남극에 비해 상대적으로 빙하 손실에 의한 해수면 상승 효과가 크지 않은 것으로 확인이 되었다.

(가) 방법

남극의 질량 수지는 SMB와 D에 의해 다음과 같이 결정이 된다.

$$\Delta M_{T_0}^T = \int_{T_0}^T SMB dt - \int_{T_0}^T D dt \quad (1)$$

이 때, $\Delta M_{T_0}^T$ 은 T_0 와 T 시간 동안 질량 변화량이다. SMB는 표면 강설, 표면 녹음, 승화 등등과 같은 여러 현상들에 의해 결정이 되지만, 남극의 경우는 강설에 의한 현상으로 근사할 수 있다. 따라서 관측된 M에서 SMB의 효과를 빼면 D에 의한 질량 감소량이 결정된다. 이번 연구에서는 SMB를 위해 ERA-Interim (Simmons *et al.*, 2007)의 남극 강설 자료를 사용하였다. M은 GRACE 인공 위성 관측을 통해 파악할 수 있는데, 남극의 경우 해안선 인근에서 발생하는 질량 감소가 leakage error를 유발시켜 남극의 질량 변화를 저평가하게 만든다. 바다는 질량 변동이 육지에 비해 매우 작은 지역이기 때문에, 남극 해안의 큰 질량 변동이 인공위성 중력 자료의 저해상도에 인해 많은 부분 바다의 신호로 분석이 되어 실제 남극 질량 감소 신호를 정확히 규명하기 어렵다. 이를 극복하기 위해, 분지별 (그림 481) 질량 변화 평균값을 forward modeling (FM) (Chen *et al.*, 2013)방법으로 계산하여 leakage 효과를 최소화하고, 각 분지별 질량 변화를 계산하였다.

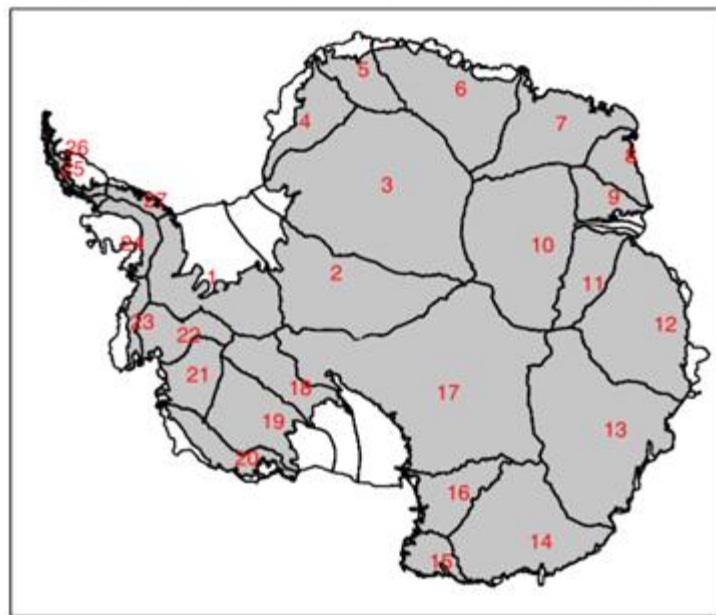


그림 481 남극 분지

(나) 결과

그림 482는 FM 방법을 통해 구한 남극 전체 질량 변화 (a)와 각 분지별 연간 질량 변화율(b)이

다. 2003-2013년 동안 남극은 평균 -162 GTon/yr 의 질량 손실을 보여준다. 특히, 서남극과 남극 반도에 질량 손실이 매우 큼을 알 수 있다. 동남극의 경우는 오히려 질량이 증가를 하고 있으며 장보고 기지가 있는 빅토리아 랜드의 경우는 질량 변동이 매우 작음을 알 수 있다.

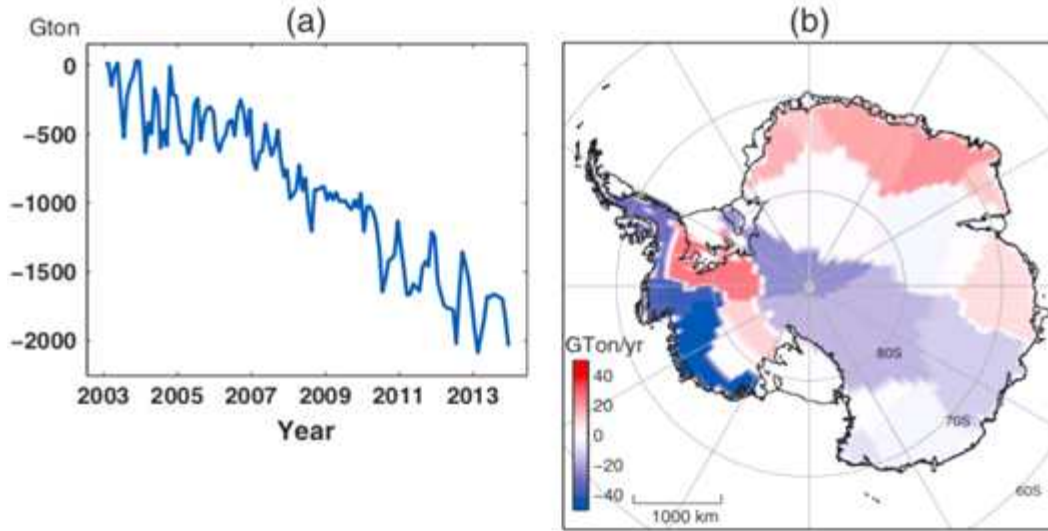


그림 482 (a) 남극 전체 빙하 감소량 (b) 각 분지별 감소율

그림 482에서 보여준 얼음 질량 변화의 선형 성분을 제거하고 난 후 잔여 성분을 분지별로 구분하여 그림 483(파란색)에 제시하였다.

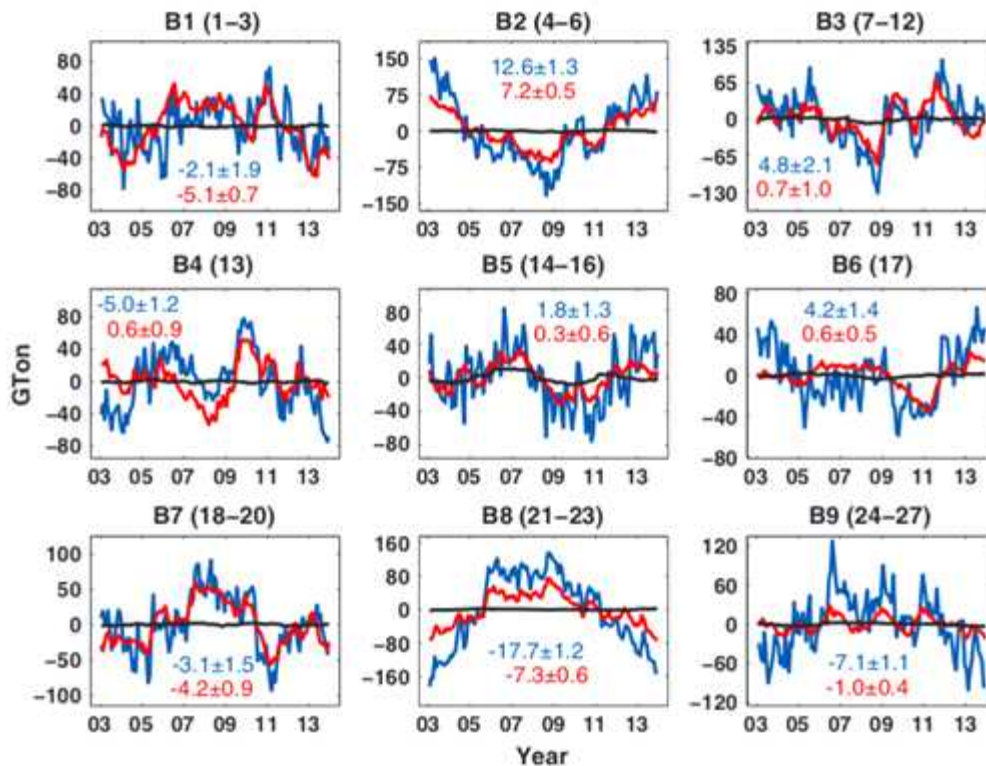


그림 483 선형성분이 제거된 각 분지별 GRACE 관측값(파란색)과 SMB(빨간색)

음의 가속 성분을 보이는 분지 (B1,B7,B8,B9)는 얼음 질량 감소가 가속되는 곳이다. 반면 양의 가속 성분을 보이는 분지 (B2,B3,B6)는 얼음 질량이 증가를 하고 있음을 의미한다. 그렇지 않은 곳은 3-4년 주기의 경년 변동을 보여주고 있다. 서남극과 남극 반도는 음의 가속 성분을 보여주고 동남극은 반대로 양의 가속 성분을 보여준다. 빨간색은 SMB의 효과를 계산한 것으로 GRACE가 관측한 얼음 질량 변동과 유사한 신호를 보여주고 있다. 이를 통해, 남극 질량 변동의 선형 성분 이외에 가속 및 가속 그리고 경년 변화 성분은 SMB에 의해 크게 영향을 받고 있음이 확인된다.

GRACE 관측 자료의 경우 SMB에서는 확인되지 않은 고주파 변동이 관측 된다. 이는, 단순히 위성 자료의 관측 잡음일 수도 있으며, 또는 남극 대기압 변화에 의한 질량 변화 효과일 수도 있다. GRACE 관측 자료에서 남극의 얼음 질량을 도출하기 위해서 남극 대기압에 의한 중력 변화 효과를 보정하는 작업을 하게 된다. 이 자료 처리 과정은 일반적으로 GRACE자료를 제공하는 기관에서 일괄적으로 수행하게 되는데, 남극 대기압 자료의 부정확성에 의해 잔여 대기압 신호가 GRACE자료에 포함될 수 있다. 비록 그 신호의 크기가 남극 빙하 변화에 비해 작을 것이라고 예상되나, 대기압 변동의 공간적인 특성상 남극 전체에 고루 영향을 미치기 때문에 남극 전체 얼음 수지 계산에 중요한 잡음 요소가 될 수 있다. 대기압 에러의 경우 공간적인 특성이 남극 대륙 규모이기 때문에, 해안선을 중심으로 감소하는 빙하 변화 신호와 뚜렷히 구분된다. 따라서 경험 직교 함수 (EOF) 분석을 통해, 이러한 공간적 특성을 가지는 신호를 분리하는 것이 가능하다.

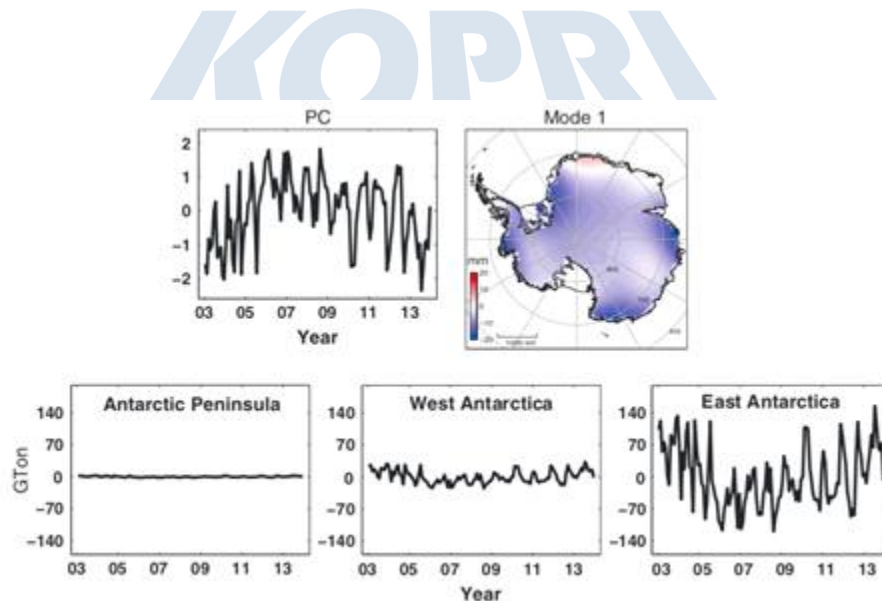


그림 484 EOF로 분리한 GRACE 관측자료의 대기압 에러 성분

그림 484는 GRACE자료에서 SMB를 뺀 잔여 신호를 EOF 분석한 첫번째 모드이다. 고주파 성분과 음의 가속 성분이 모두 관측이 되며, 이러한 시간 변화를 가지는 신호의 공간 패턴이 남극 전체에 고루 영향을 주고 있음을 알 수 있다. 대기압 에러로 의심되는 이 성분은 특히 동남극에 가장 큰 영향을 주고 있음이 계산 되었다. EOF로 구한 대기압 에러를 GRACE에서 제거 시킨 후 보정된 GRACE 남극 질량 변동과 SMB 변화를 새롭게 그림 485에 도시하였다. 그림 484과 달리, GRACE 관측값 (파란색)이 SMB (빨간색)에 더 일치할 하고 있음을 알 수 있다.

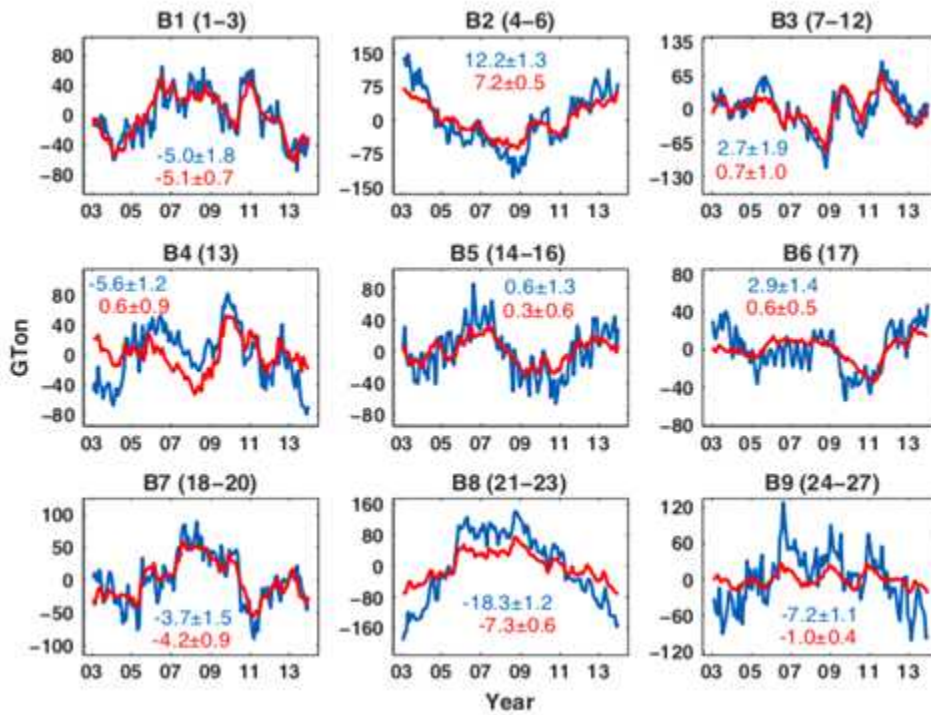


그림 485 대기압 에러가 보정된 GRACE 자료 (파란색)과 SMB (빨간색)

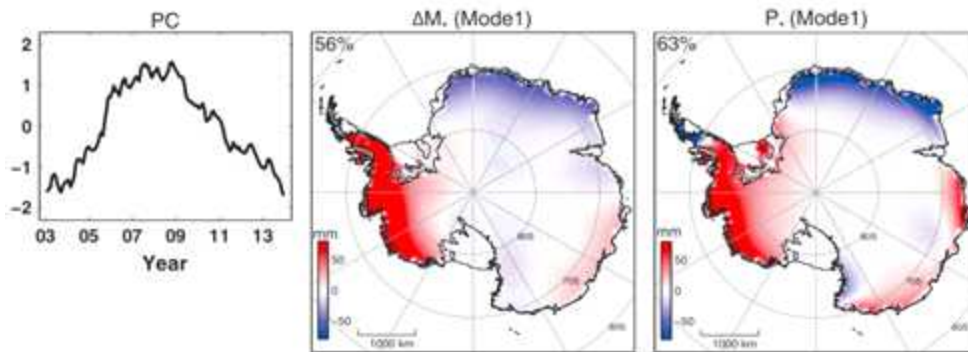


그림 486 GRACE자료 (ΔM^*)와 SMB (P^*)를 동시에 EOF 분석한 결과

남극 얼음 질량 변동과 SMB의 연관성은 EOF분석을 GRACE자료와 SMB를 동시에 적용해서도 확인이 가능하다. 그림 486은 GRACE가 측정된 남극 질량 변동과 SMB를 함께 EOF 분석한 것의 첫 번째 모드이다. 첫 번째 모드의 시간변동 (PC)는 음의 가속 성분들 보여주며, 공간적인 분포는 GRACE 관측 값과 SMB 모두 매우 유사한 형태를 보여주고 있다. 특히, 태평양쪽의 남극 해안은 양의 이상, 대서양과 인도양쪽의 남극 해안은 음의 이상을 보여주고 있음이 확인된다.

(다) 결론

남극의 빙하 질량은 서남극과 남극 반도를 중심으로 빠르게 감소하고 있으며 특히 그 감소하는 속도가 가속되고 있음이 밝혀졌다. 하지만, 빙하 감소의 가속성분에는 SMB의 감소에 의한 효과가

포함되어 있어 D에 의한 빙하 감소와 구분이 되어야만 한다. 서남극의 경우 2003-2013년 동안 약 -26 Gton/yr^2 의 빙하 감소 가속이 관측이 되었는데, 이중 -14 Gton/yr^2 가 SMB의 효과이고 -12 Gton/yr^2 가 D에 의한 효과로 규명이 되었다. 이는 남극 빙하 감소의 속도가 예상보다 빠르지 않음을 의미하며, 가까운 미래 남극 빙하 감소와 해수면 상승 예측에 고려 되어야만 한다. 또한, 장보고 기지가 있는 빅토리아랜드 지역은 빙하 감소 신호가 다른 지역에 비해 뚜렷하지 않았다.

다. 드라이갈스키 빙설 및 난센 빙붕 거동 규명

(1) 조석에 따른 빙붕의 물리적 변형 특성 규명

빙붕은 빙하가 바다로 흘러들어가는 것을 막고 있어 빙하동력학적으로 매우 중요한 역할을 한다. 빙붕의 기반선 부근에서는 빙저 기반암과의 접촉이 순간적으로 변화하는 곳이어서, 빙하의 동력학적 변화와 안정성을 이해하고 예측하는데 가장 중요한 지역이다. 해양조석에 의한 유발되는 빙붕과 빙하의 변화는 짧은 시간에 빙하의 변화를 연구할 수 기회를 제공한다. 2015/2016 하계기간 중 미국 NASA와 공동으로 난센 빙붕에 GPS 및 틸트미터(tiltmeter)를 설치하여 해양 조석의 영향을 모니터링하였다.

GPS 관측은 5개 측정점(PSU05-09)에서 Trimble NetRS로 수행되었으며, GIPSY-OASIS v6.4를 이용하여 위치정보로 변환하였다. PSU05-09인 측정점은 GPS-A-E로 부른다. 2015년 11월 24일부터 2016년 1월 22일까지 약 2달간의 자료를 이용하여 조석분석을 실시하였다.

표 58 난센빙붕 조석분석을 위한 GPS 및 틸트미터 측정

Station	Latitude	Longitude	Altitude (m)	Mean Speed (m d ⁻¹)
GPS-A	-74° 50' 48.9"	162° 57' 02.2"	-12.26	0.425
GPS-B	-74° 56' 15.6"	163° 05' 43.5"	-26.70	0.517
GPS-C	-75° 01' 19.9"	163° 18' 27.7"	-35.11	0.526
GPS-D	-74° 53' 55.0"	163° 21' 00.5"	-21.18	0.359
GPS-E	-74° 57' 26.0"	163° 27' 47.2"	-24.91	0.375
TM-U	-74° 37' 58.7"	162° 53' 09.7"	N/A	N/A
TM-D	-74° 40' 47.4"	162° 52' 59.4"	N/A	N/A

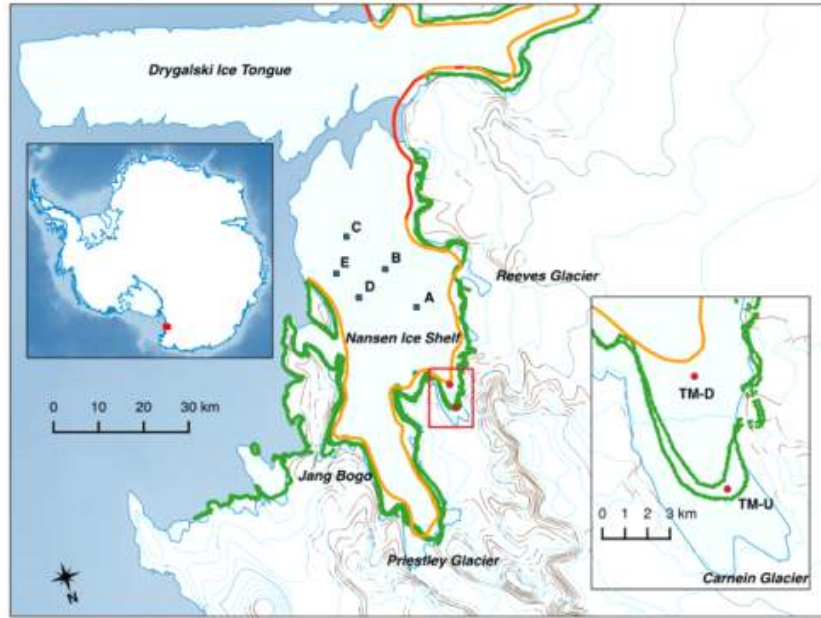


그림 487 난센빙붕 조석분석을 위한 GPS 및 틸트미터 측정점의 위치도

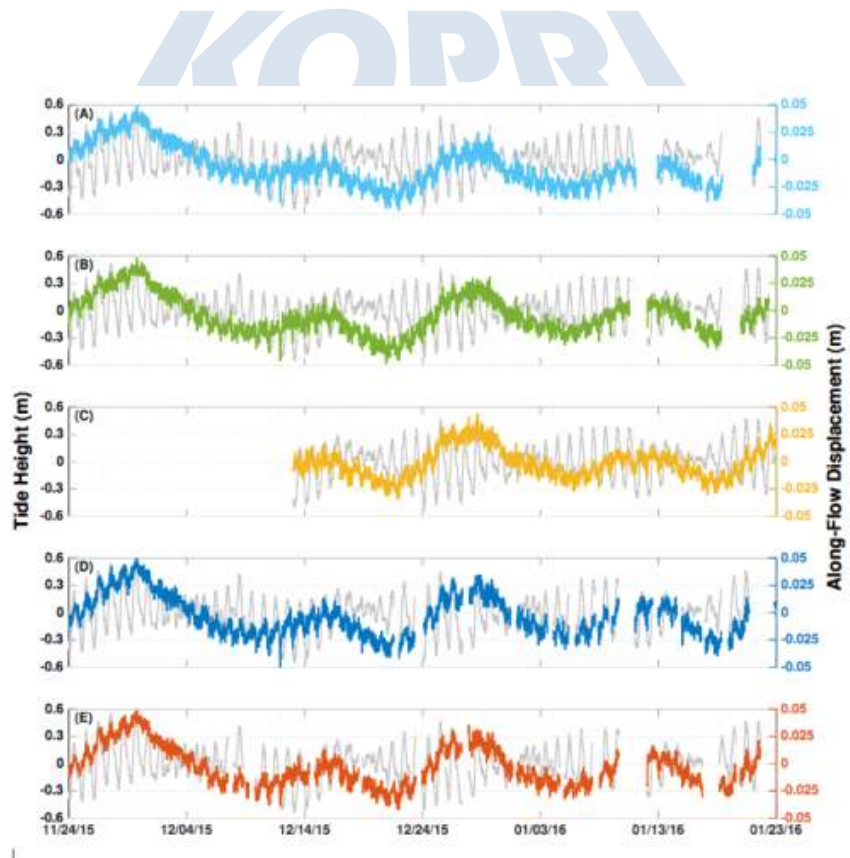


그림 488 추세가 제거된 수직 조석 변화(회색)과 평균 변위성분이 제거된 수평 변화

T_TIDE 조석 분석 패키지(Pawlowicz *et al.*, 2002)를 이용하여 조석분석을 실시한 결과, 6개 주된 성분(K1, O1, Q1, M2, S2, N2)들을 산출하였다. 모든 측점에서 거의 동일한 수직 변화가 관측되었으며, 일주조 성분이 약 70%, 반일주조 성분이 약 13%를 차지하고 있는 것으로 나타났다. 수평 변화의 경우 수직변화와 달리 Mm 및 Mf 성분이 가장 크게 관측되며, K1 성분의 작은 변화가 함께 나타난다. Mm 및 Mf 성분은 주로 빙하 이동 방향으로 주로 나타나지만, 일주조 성분은 방향성이 거의 없다. 이러한 특성은 Rutford Ice Stream에서 관측된 결과(Gudmundsson, 2006)와도 유사하다.

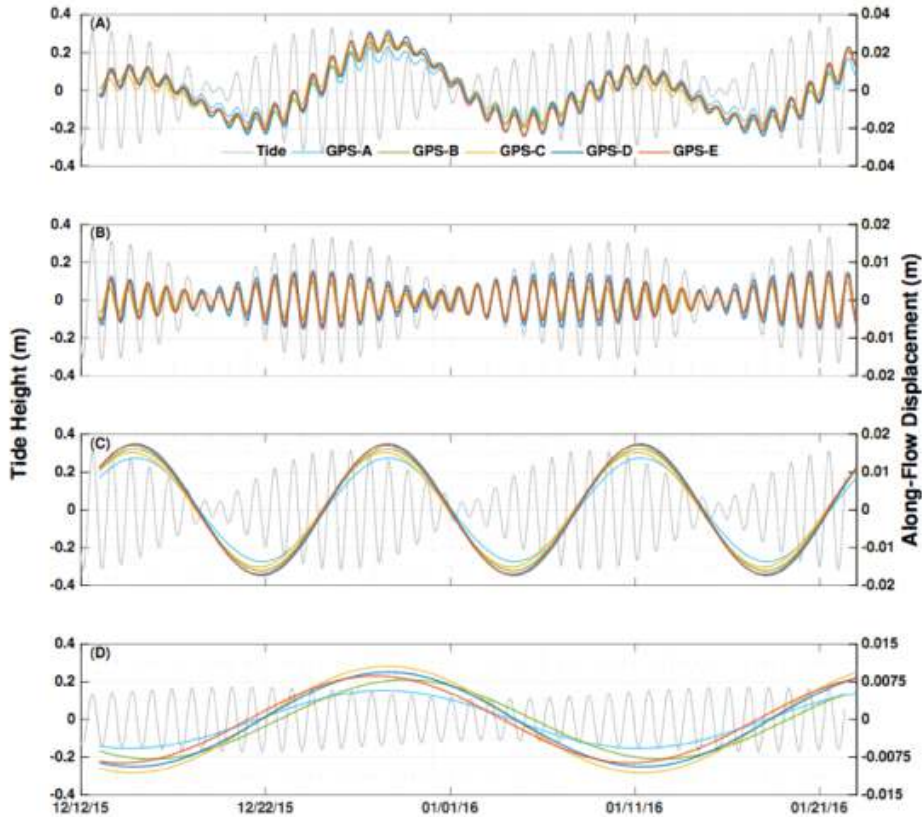


그림 489 조석 분석으로 산출된 수직 조석 성분(회색)과 수평 조석 변화(컬러). (a) 모든 일주조 성분의 수직 조석과 모든 성분의 수평 조석, (b) 모든 일주조 성분의 수직 조석과 M_m 및 M_f 성분의 수평 조석, (c) O1, K1 성분의 수직 조석과 M_f 성분의 수평 조석, (d) O1, Q1 성분의 수직 조석과 M_m 성분의 수평 조석

빙붕은 조석에 의하여 항상 상하 운동을 하고 있어서, 빙하가 지면과 바다와 동시에 접하는 지반선 상류에서도 조석에 의한 움직임이 전달되는데 이 지점을 만곡 경계(flexure limit)이라고 한다. 지반선 하류에서도 조석에 의한 탄성 변형이 발생하는데 탄성 변형이 없어지고 완전히 정수평형 상태에 도달하는 지점을 정수평형 경계(hydrostatic limit)라고 한다. 난센 빙붕에 접하고 있는 Carnein 빙하의 만곡 경계와 약 5km 하류 정수 평형 경계에 틸트미터(각각 TMU, TMD)를 설치하여 변형 정도를 관측하였다. 만곡 경계는 InSAR 자료(Rignot *et al.*, 2011)로부터 결정되었으며, 정수평형 경계는 기존 자료(ASAID, Bindschadler *et al.*, 2011)를 활용하였다. 2015년 12월 6일에서 2016년 1월

15일까지 약 1.5개월간 관측을 수행하였다. Jewell Instrument의 D701-A 틸트미터를 사용하여 1Hz 주파수로 관측하였으며, 1 μ radian의 해상도와 4 μ radian의 정확도를 가진다.

설치 후 12월 8일까지와 12월 12일과 23일 사이에는, 상대적으로 큰(수백 μ radian) 진동이 관측되는데, 이는 높은 온도 상태의 온도 일변화와 상관관계를 가진다. 따라서, 이 매우 큰 진동은 햇빛에 노출된 장비에서 발생하는 열팽창에 기인하는 것으로 추정된다. 12월 23일 눈이 내린 이후 틸트 신호와 온도 변화사이에 뚜렷한 상관관계는 보이지 않는다. 따라서, 실제 틸트 자료 분석은 12월 23일부터 1월 15일까지 24일간의 자료를 이용하였다. 먼저, Singular Spectrum Analysis(SSA)를 통하여 트렌드, 주기 변화, 잡음 요소를 분리하였으며, 조석 분석(tidal analysis)을 위하여 T_TIDE 소프트웨어를 사용하였다. K1, O1, M2, S2 4개의 주요 조석 성분은 73%-94%의 신호를 차지하는 것으로 분석되었다.

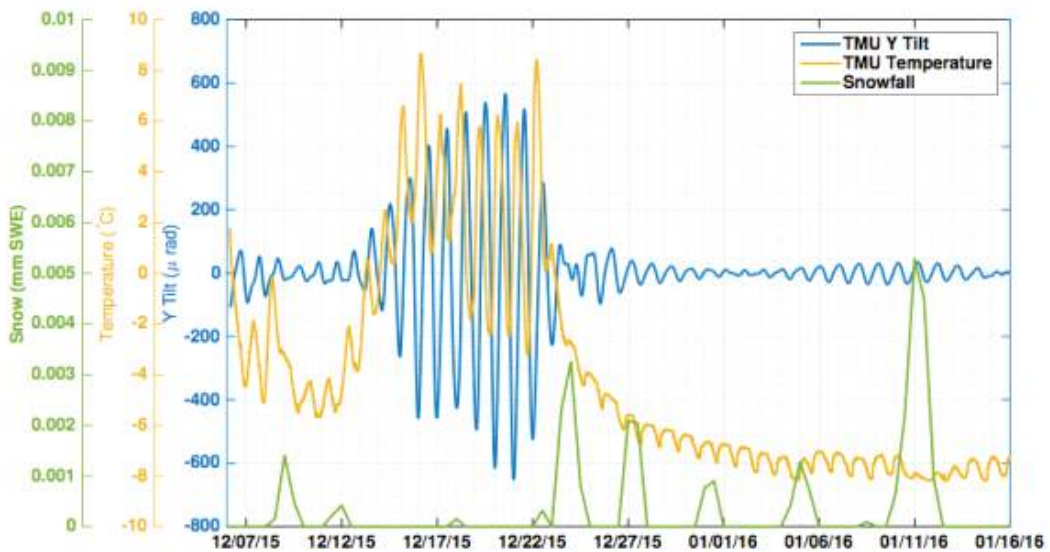


그림 490 Y 방향의 틸트, 내부 온도 변화, 강설량

틸트 관측값은 고도방향으로의 각도인 고도각(elevation angle)의 변화, 수평 방향으로의 변화인 방향각(Azimuth angle)로 나눌 수 있다. 고도각의 관측값은 인근 GPS 관측소에서 기록된 해양 조석의 변화와 매우 잘 일치한다. 하지만 GPS로 관측된 수직 조석과 약 2.75시간의 시간차가 나타나는데, 이는 빙봉 하부 해수층에서의 조석의 반사파 혹은 빙봉의 점성 효과가 빙봉의 조석 변형에 영향을 미친다는 것을 의미한다.

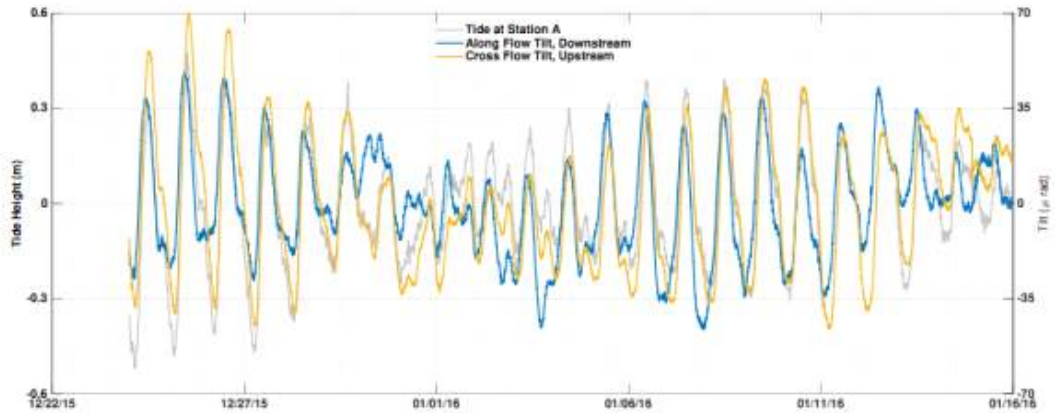


그림 491 틸트미터 성분과 인근 GPS 측점에서의 수직 조석 성분의 비교

결론적으로, 난센 빙봉의 흐름은 조석에 의해 좌우된다. 특히, M_m 및 M_f 성분의 수평 조석이 나타나는데 이는 비선형적인 조석 운동에 기인하는 것으로 추정되는데 그 원인은 아직 명확하지 않다. GPS 측점에서 관측되는 상대적인 시간 차이는 M_f 성분의 운동이 빙봉의 전단부에서부터 발생한다는 것을 지시한다. 반면, M_m 성분의 변화는 빙봉의 수평 경계면, 특히, Inexpressible Island 부근의 경계면에서 발생하는 것으로 보인다. 틸트미터에서 관측되는 시간차 역시 빙봉 운동의 비선형성을 나타내고 있으나, GPS와 같은 장주기 변동이 나타나지 않는 것은 빙봉의 물리적 현상에 대한 보다 심도 있는 이해가 필요함을 지시한다.

(2) 빙설/빙봉 두께 변화 관측을 통한 빙설/빙봉 하부용융도 추정

(가) 드라이갈스키 빙설의 하부 용융량

평형 상태의 빙봉 하부 용융량은 주로 Flux gate 방법과 Divergence 방법에 의해 산출될 수 있다. Flux gate 방법은 항공탐사 혹은 인공위성 고도계에 의해 정확한 고도가 알려진 지역에 gate를 설정하고 gate와 gate 사이의 평균적인 질량속(mass flux)을 산출함으로써 하부 용융량을 유추한다. Wuite *et al.* (2009)는 드라이갈스키 지역에서 대하여 ICESat 인공위성 고도계 자료를 이용하여 평형 상태 하부용융량을 추정하는 바 있다. Divergence 방법은 공간적으로 균일하게 분포하는 속도 및 빙봉 두께 자료를 이용하여 질량 보존식(mass conservation equation)을 수치적으로 계산함으로써 평형 상태 하부용융량을 구한다(Joughin and Padman, 2003). 이러한 경우 두께 및 속도 자료에 존재하는 오차의 영향을 최소화하기 위하여 공간적인 필터링을 수행하게 된다. 하지만 빙설(Ice tongue)과 같이 좁은 지역에서는 공간 필터링의 적용이 어려운 문제점이 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 이 연구에서는 흐름선(flow line)을 따라 하부용융량을 계산할 기법을 새롭게 적용하였다. Divergence 방법과 마찬가지로 질량 보존식을 기준으로 하지만 흐름선을 따른 좁은 영역에서 질량보존식을 정의하여 1차원적으로 하부용융량을 추정하게 된다. 아래 수식은 평형 상태에서의 질량보존식이며, Z 는 빙봉의 두께, V 는 속도, A 는 표면질량수지, B 는 하부용융량을 나타낸다.

$$\frac{\partial Z}{\partial t} + \nabla \cdot Z\vec{V} = A - B$$

평형상태이므로 $\partial Z/\partial t = 0$ 으로 가정하면 아래 수식과 같이 변환된다.

$$Z\nabla \cdot \vec{V} + \vec{V} \cdot \nabla Z = A - B$$

첫 번째 항은 이동속도 차이에 의한 변형률 효과를 나타내며, 두 번째항은 속도 방향으로의 두께 변화를 의미한다. 이 수식을 흐름선(flow line)을 따라서 정의하면 다음과 같이 표현된다.

$$Z\nabla \cdot \vec{V} + |\vec{V}| \frac{\partial Z}{\partial l} = A - B$$

여기서, l 은 흐름선을 따른 미소길이를 의미한다.

따라서, 빙설내에서 흐름선을 정확하게 정의하고 흐름선을 따라 각 항들을 산출함으로써 하부용융량(B)를 구할 수 있다. 빙봉의 두께는 빙봉 표면고도와 정수 평형을 이루고 있으므로 다음과 나타낼 수 있다.

$$h\nabla \cdot \vec{V} + |\vec{V}| \frac{\partial h}{\partial l} = \frac{\rho_w - \rho_i}{\rho_w} (A - B) \quad (4)$$

하부용융량 계산기법을 적용하기 위해서는 정확한 흐름선을 정의할 필요가 있다. 최근 가장 정확한 속도분포라고 할 수 있는 MEaSUREs 속도 분포는 2007년-2009년 사이에 관측된 자료를 통해 산출되었다. 하지만 드라이갈스키 빙설에서 관측된 GPS 및 InSAR 속도를 살펴보면, 2007년-2009년 사이의 속도는 평균적인 속도가 아니어서 이 속도 분포를 통해 흐름선을 산출할 경우 아래 그림과 같이 현재 빙설의 형태와 다른 양상의 흐름선이 산출된다. 이를 보정하기 위하여 여러 가지 각속도를 적용하여 현재 빙설의 형태에 가장 잘 부합하는 각속도(0.065°/yr)를 산출하였으며 이를 통해 흐름선을 정의하였다. 여기서 산출된 각속도 0.065°/yr는 최근 수십년 간의 평균적인 속도 분포와 MEaSUREs 속도 분포의 차이를 설명해준다.

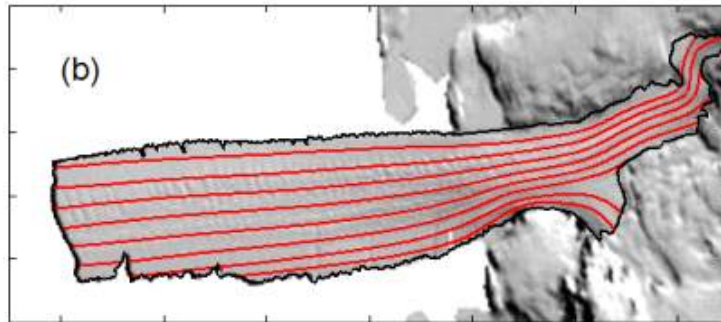
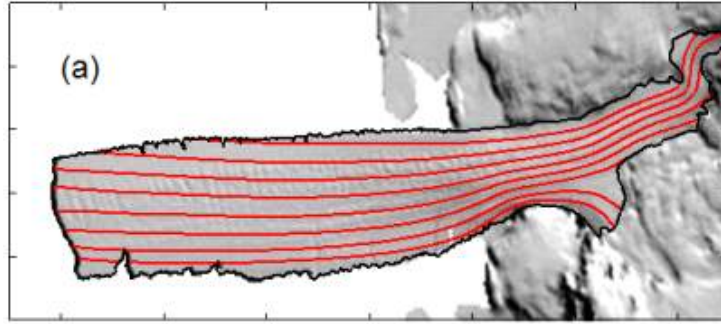


그림 492 드라이갈스키 빙봉을 따른 흐름선(flow line). (a) MEASUREs 속도 분포를 이용한 경우, (b) 각속도 0.065°/yr로 보정한 속도 분포를 이용한 경우

정확한 하부용융량을 추정하기 위해서는 정확한 빙봉의 두께를 알아야하는데 빙봉의 두께는 보통 빙봉 표면 고도값으로부터 정수 평형(hydrostatic equilibrium) 가정에 의해 산출된다. 그러나 드라이갈스키 빙봉의 고도는 남극 레이더고도계 관측 자료로부터 산출되기도 하였으나(Bamber *et al.*, 2009) 오차요인 크다. 최근 IceBridge 캠페인의 일환으로 드라이갈스키 빙설의 중심 지역에서 흐름선을 따라 항공탐사(UTIG)가 이루어졌다. 아래 그림에 항공 탐사에 의해 관측된 표면 고도 양상을 도시하였다. 드라이갈스키 빙설의 경우 표면의 구배가 매우 심하여 실제 측정된 고도가 평형 상태의 고도값이라고 보기 어렵다. 표면의 구배는 빙설의 이동과 함께 이동하기 때문에 관측 고도값으로부터 표면경사를 구하면 매우 변화가 큰 질량속이 산출되므로 정확한 하부용융량을 구하기 어렵다. 이러한 현상을 제거하기 위하여 smoothing spline을 이용하여 표면고도를 평활화하여 평형상태의 고도값을 산출하였다. smoothing spline은 평활화 변수를 이용하여 평활화 정도를 조절하는데 적절한 평활화 변수를 선택할 필요가 있다. 이를 위해 ICESat과 항공탐사의 교점에서 나타나는 라그랑지안 고도변화(Dh/Dt)를 산출하고 평형상태($\partial h/\partial t = 0$)라는 기본 가정 하에서는 $Dh/Dt = \vec{V} \cdot \nabla h = |\vec{V}| \partial h/\partial l$ 이므로 평활화된 고도값으로부터 산출된 $|\vec{V}| \partial h/\partial l$ 이 Dh/Dt 와 가장 잘 일치하도록 평활화 변수를 결정하였다.

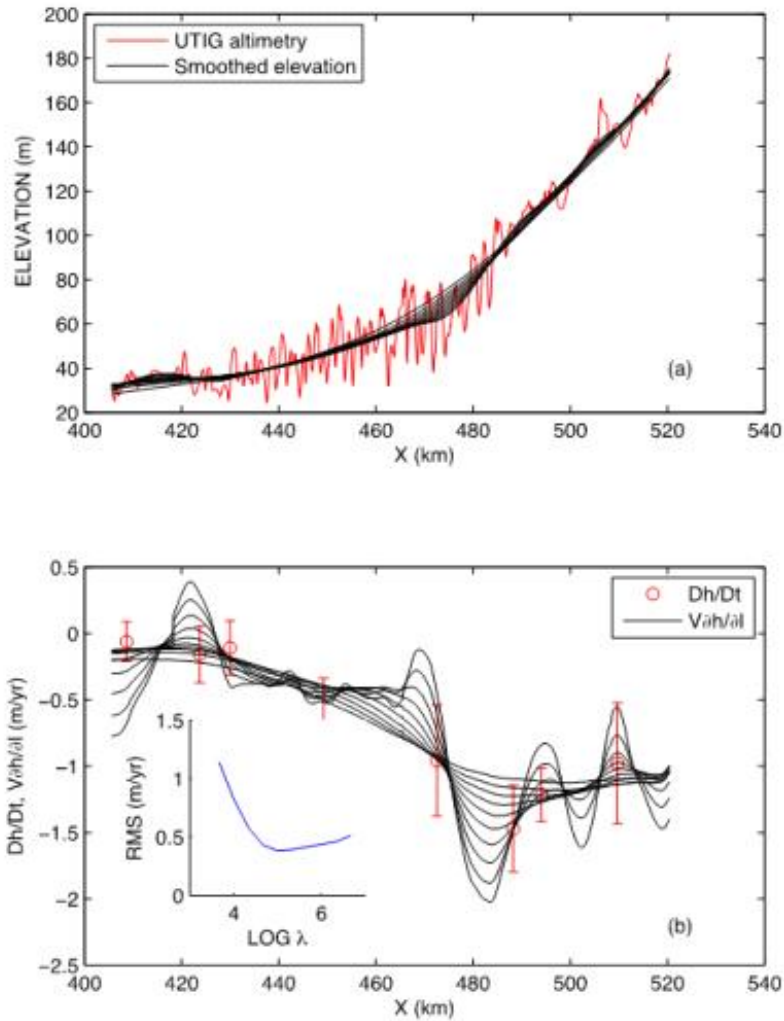


그림 493 평활화 변수의 결정. (a) UTIG 레이저 고도계 관측값 및 다양한 평활화 변수에 따라 평활화된 고도들. (b) 라그랑지안 고도변화와 다양한 평활화 변수에 따른 $|\vec{V}| \partial h / \partial l$ 의 비교.

결정된 평활화 변수는 10^{-4} 이며 이를 적용하여 $|\vec{V}| \partial h / \partial l$ 를 아래 그림에 도시하였다. 아래 그림의 e는 표면질량수지(A)와 하부용융(B)의 차이를 나타낸다. 즉, 바다 쪽으로 위치한 빙봉에서는 주로 하부용융이 우세하며 상류로 갈수록(460~480 km 지점) 용융량이 작아진다. 더 상류로 들어갈수록 용융량은 커지는 양상을 보이며 이는 기존 연구나 GPS 관측 결과와도 부합한다.

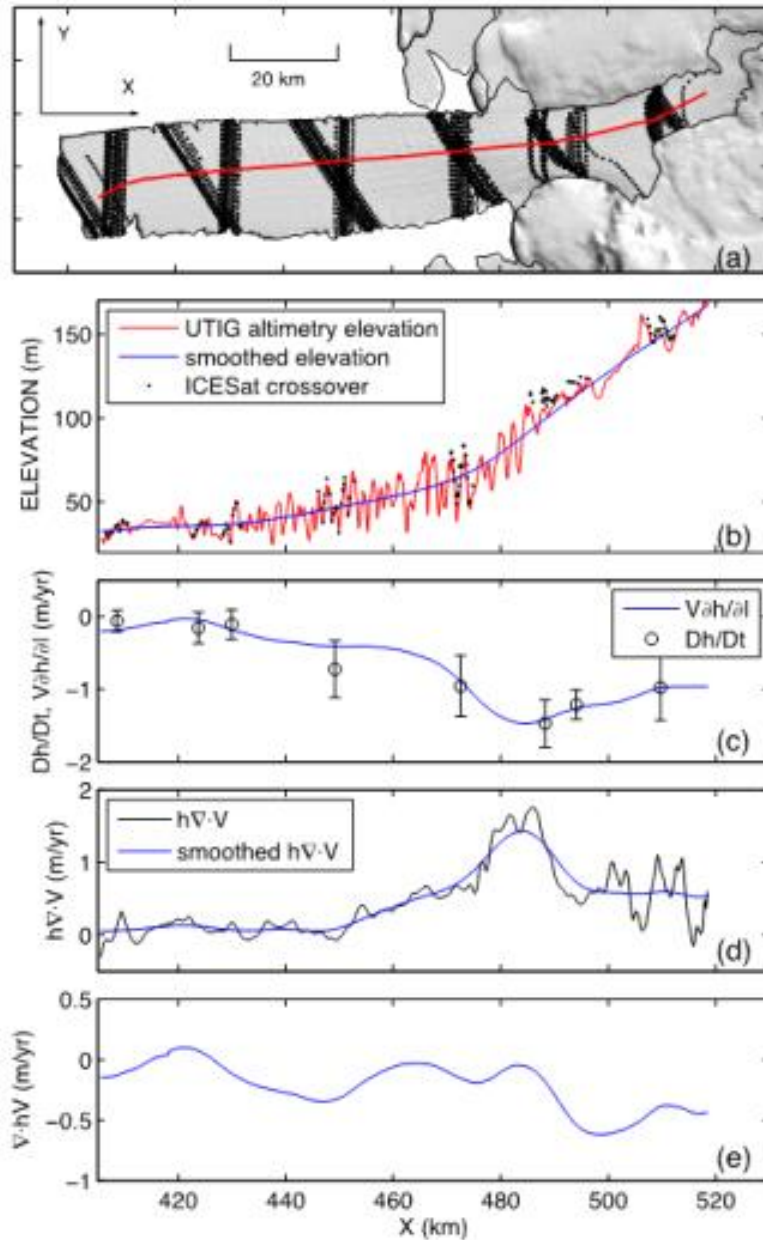


그림 494 선 기반 질량 속 추정 기법의 예. (a) 라그랑지안 시스템에서의 UTIG 항공탐사 궤적과 ICESat 트랙. (b) UTIG 레이저 고도계 관측값(적색선) 및 smoothing spline에 의해 평활화된 고도(청색선). 흑색점은 ICESat과 항공탐사의 교점에서의 관측된 ICESat 고도값. (c) ICESat과 항공탐사의 교점에서 구한 라그랑지안 고도 변화(Dh/Dt)와 평활화된 고도값으로부터 구한 $V\partial h/\partial l$ (청색선). (d) 변형에 의한 고도 변화 효과 $h\nabla \cdot \vec{V}$. (e) 질량속 변화에 따른 고도 변화 $\nabla \cdot h\vec{V}$

드라이갈스키 빙설 전체에 대하여 흐름선 기준 하부용융 추정 기법을 적용하기 위하여 항공 레이저 탐사 자료 대신 빙설 전반에 걸쳐 분포하는 최근 Cryosat-2 자료를 이용하였다. 하지만 Cryosat-2는 레이더 고도계로서 드라이갈스키 빙설처럼 표면 고도 변화가 매우 심한 지역에서는 바이어스가 존재한다. 바이어스를 보정하기 위하여 Cryosat-2 고도와 ICESat 고도값을 비교하였으며 Cryosat-2 자료 중 반사파의 분산정도를 나타내는 peakiness 변수와 바이어스가 상관관계를 가지고 있는 것으로 생각된다. 따라서, Cryosat-2와 ICESat 고도값차이를 최적화하는 peakiness를 변수로 하는 exponential 함수를 산출하여 모든 Cryosat-2 자료에 적용함으로써 바이어스를 보정하였다. 그림 494는 Cryosat-2 자료를 이용하여 산출된 질량속 변화에 따른 고도변화량(식(4)의 좌측항)이다. 이 결과로부터 유추해보았을 때 기존 연구(Wuite *et al.*)와 같이 바다로부터 상류로 갈수록 하부 용융량은 증가하지만 X=480km 부근 지점에서 하부 결빙 구역이 나타난다. GPS 관측 결과처럼 이 구역에서는 "Ice pump" 효과에 의해 상류에서 용융된 용융수가 빙설 하부면을 따라 상승하다가 압력의 감소로 인해 어느 점이 상승하여 결빙이 일어나는 것으로 생각된다. 결빙은 빙설의 북쪽면을 따라 더 강하게 나타나고 있으며 이는 용융수가 이 지역에서 주로 배출되고 있음을 시사한다. KGPS3 지점 근처에서는 소규모의 결빙 혹은 약한 용융이 발생하는 특이한 현상이 발견된다. 이 지역은 ICESat에 의한 정밀 고도 자료로부터 알 수 있듯이 돛 형태의 표면 지형을 나타낸다. MEaSUREs 속도 분포에서는 이 지역의 속도가 상류 혹은 하류에 비해 감소하는 현상이 발견된다. 이는 이 지역에서 빙설의 하부면이 해저면에 닿아서 속도가 감소하고 두께가 증가할 가능성을 시사한다. 따라서 이 지역에서는 해저면과 빙설 하부면 사이의 간격이 매우 좁거나 없어서 하부용융이 거의 발생하지 않는 것으로 추정된다. 이러한 빙설의 구조를 통해 북쪽 해저면과 북쪽 빙설 하부면 사이에서 주로 해수의 순환이 이루어지고 있음을 알 수 있다.

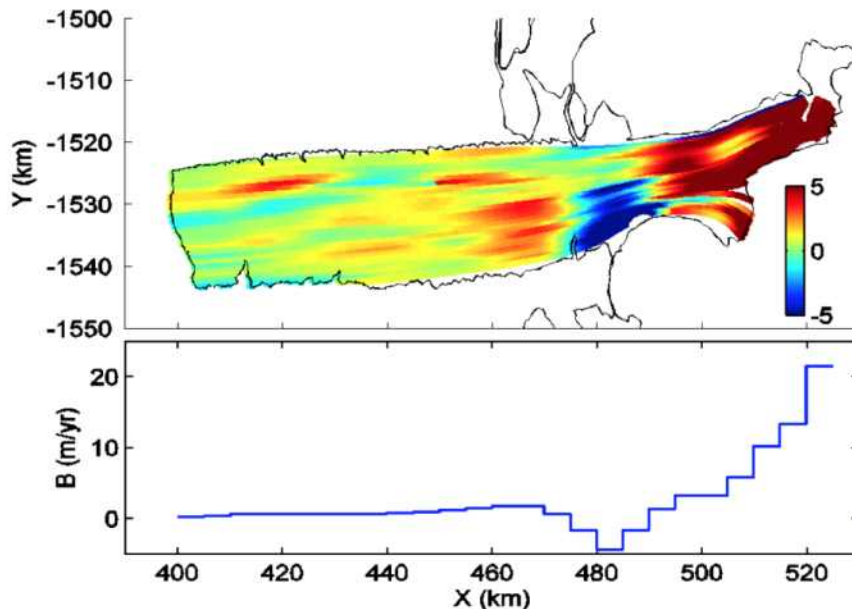


그림 495 드라이갈스키 빙설의 질량손실(B-A)의 (상) 공간 분포와 (하) X축 방향으로의 평균 질량손실량

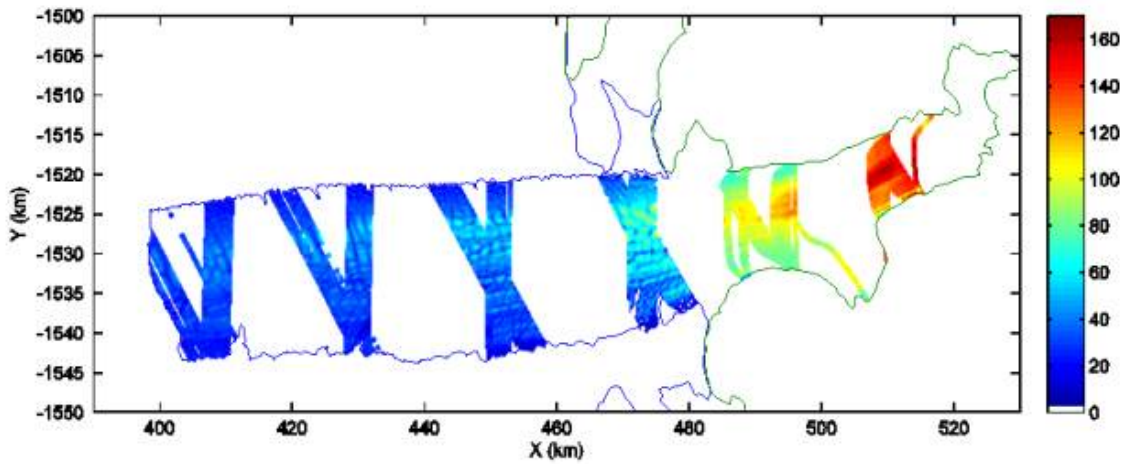


그림 496 ICESat 자료에서 산출된 정밀 고도 자료

(나) 난센 빙봉의 하부용융량

난센 빙봉의 하부용융량을 조사하기 위하여 ApRES (Automated phase-sensitive Radio Echo Sounding) 탐사를 수행하였다 (Nicholls *et al.*, 2015). 두 측정점(HWD, NAP10)에서는 장기 모니터링을 수행하였으며, 나머지 측정점에서는 1년 후 재측정을 수행하였다.

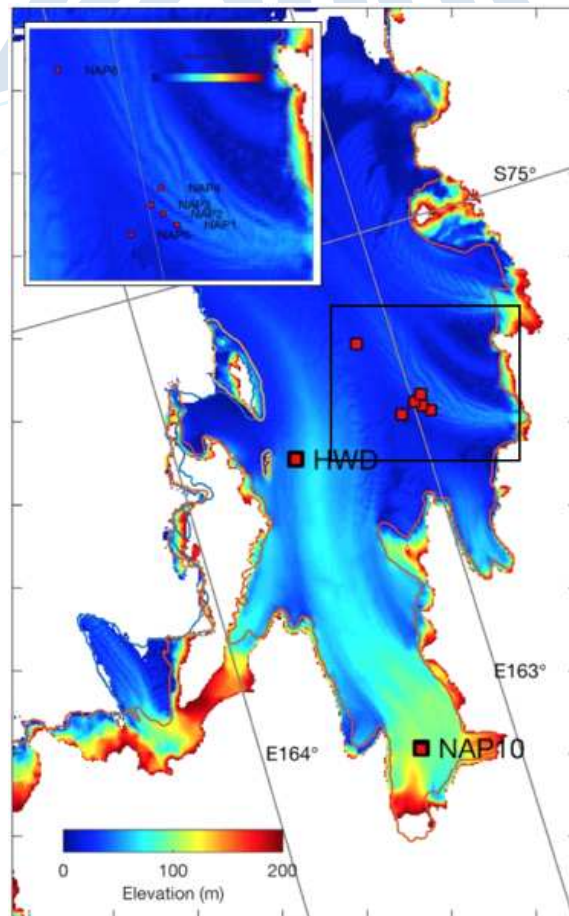


그림 497 난센 빙봉 ApRES 측정점

1년 후 재측정을 수행한 경우, 두 측정점(NAP4, NAP5)에서 유의미한 하부용융량이 산출되었다. 하지만, 나머지 측정점에서는 정확한 하부용융량을 산출하는데 실패하였다. 그 이유는 빙봉의 역학적인 변형이 심하여 레이더 파형의 상관관계수가 낮아져서 정확한 위상 변화를 산출하기 어려웠기 때문이다. 향후 이러한 문제를 해결하기 위해서는 짧은 시간 간격을 두고 재측정을 수행하거나, 모니터링 형태의 관측이 이루어져야 한다. 하부용융량이 산출된 NAP4 측정점은 약 400 m의 빙봉 두께를 나타내고 있으며, 역학적인 변형에 의해 연간 약 70 cm 정도 얇아지는 지역에 위치하고 있다. 역학적 변형 성분을 제거하고 산출된 하부용융량은 약 -15cm/yr로 약한 재결빙이 이루어지고 있음을 의미한다. NAP5 측정점의 경우, 빙봉의 두께는 약 200m이고, 연간 1.5 m 이상 두꺼워지는 역학적 변형이 관측되는데 이 지점은 Priestley 빙하와 Reeves 빙하의 합류 지점이기 때문이다. 역학적 변형이 제거된 하부용융량은 약 2cm/yr로 용융 및 결빙이 거의 평형을 이루는 지점으로 생각된다.

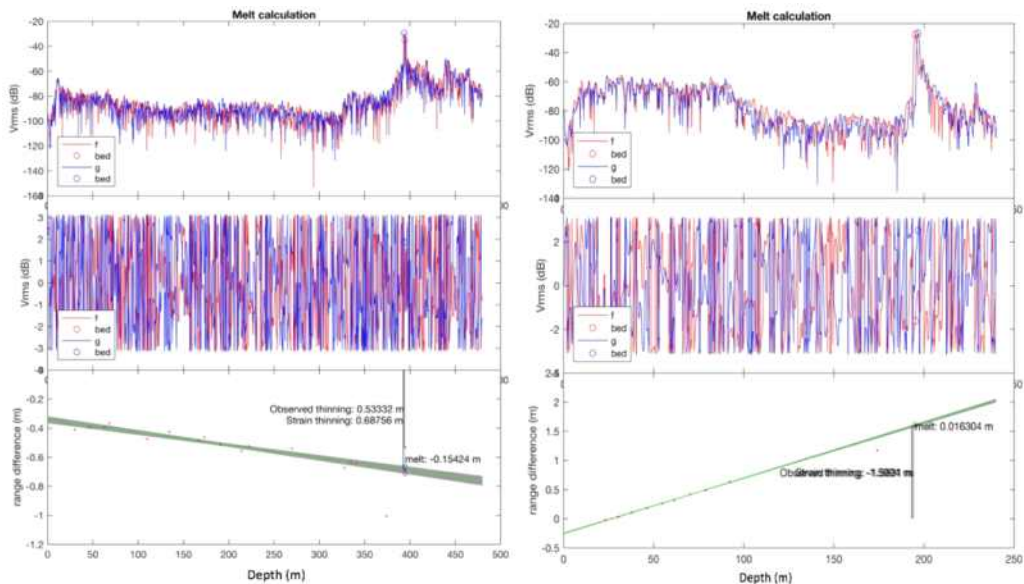


그림 498 1년 후 재측정을 통해 획득된 하부용융량 관측 결과. (좌) NAP4 측정, (우) NAP5 측정. (상) 레이더 진폭의 비교, (중) 위상 성분의 비교, (하) 파형의 변위 및 하부용융량 산출

장기 관측을 수행한 HWD 측정점에서는 12시간의 시간차를 가지는 자료의 쌍을 이용하여 하부용융량을 산출하였으며, 24시간 이동평균을 이용하여 잡음을 제거하였다. 2017년 2월부터 2018년 3월까지의 기간 중 약 8개월간의 관측 결과에 의하면 평균적으로 약 0.9m/yr의 하부용융이 발생하고 있다. 시간에 따라 하부용융량의 변동이 발생하고 있지만, 결빙이 발생하는 시기는 매우 드물다. 하부용융량의 변동성은 빙봉 하부 해수의 온도/염분에 의해 좌우될 수 있으나, 하부용융량의 변동성이 수직변형률과 상관관계를 보이고 있어 수직변형률 산출의 부정확성에 의한 오차일 가능성이 높다. 산출된 수직변형률은 큰 변동성이 나타나고 있으나, 평균적으로는 수직변형률이 매우 작은 값을 보이고 있어 역학적인 변형은 크게 발생하지 않는 것으로 보이며, 수직 변형률의 변동성은 잡음에 의한 영향인 것으로 보인다. 또한 NAP10 측정점과는 달리 조석변화도 관측되지 않아 조석에 의한 수직 변형 역시 발생하지 않는 것으로 생각된다.

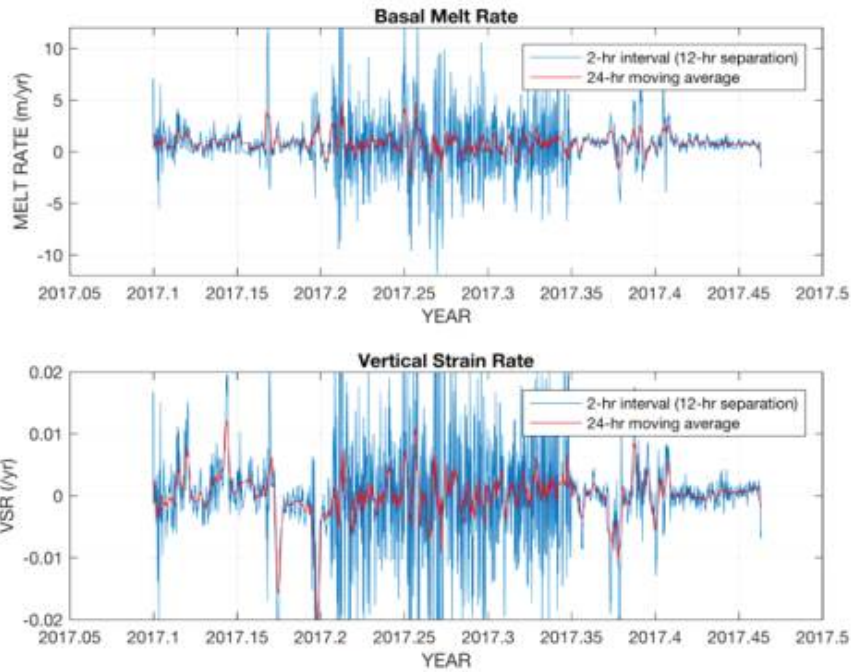


그림 499 HWD 측정점 1차 관측 결과 (2017.02 - 2017.06)

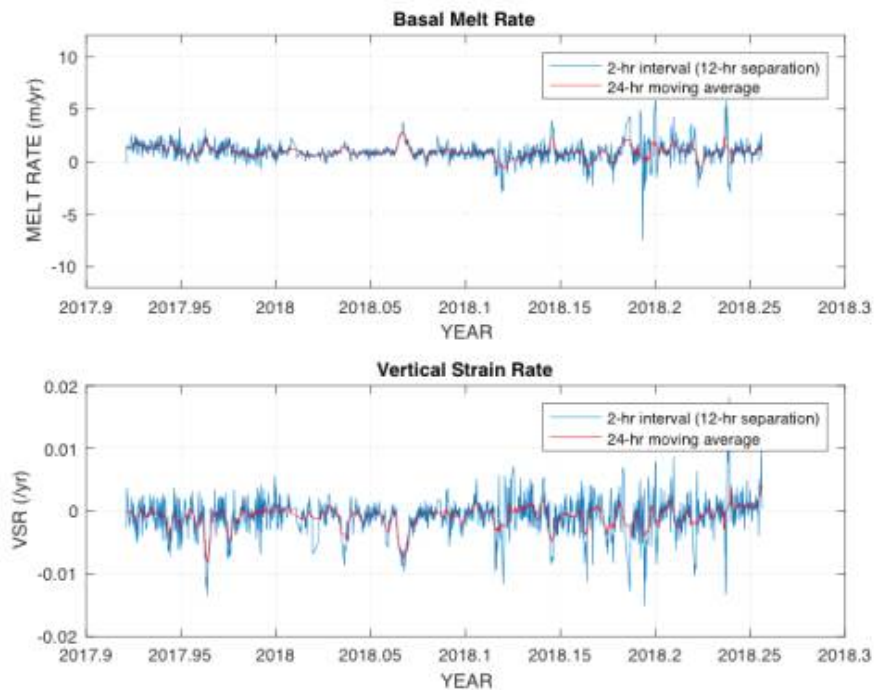


그림 500 HWD 측정점 ApRES 2차 관측 결과 (2017.11 - 2018.03)

NAP10 측정점은 Priestley 빙하가 난센 빙봉으로 흘러들어오는 지반선 인근에 위치하는 지점이다. 이 측정점 결과에서 흥미로운 점은 하계기간 중에는 매우 큰 하부 용융량이 관측된다는 것이다. 남극의 여름철, 즉 11월에서 1월까지 하부 용융량은 5-10m/yr에 달하지만, 2월에 들어서면서 하부 용융량은 감소하기 시작하여 3월부터는 용융이 거의 발생하지 않는 상태가 지속된다.

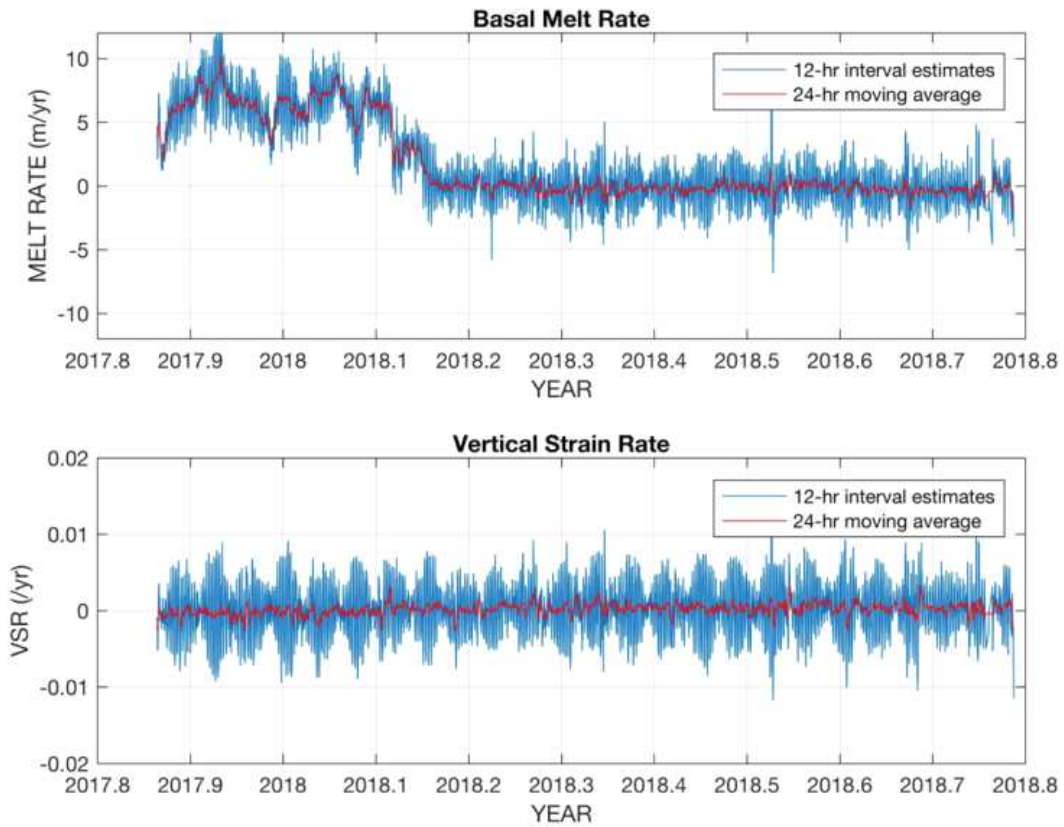


그림 501 NAP10 측정점의 ApRES 관측 결과

2018년 11월 ApRES 관측 장비를 회수한 후 같은 지점에 정밀 측위 GPS를 설치하였다. GPS는 2019년 1월초까지 운영되어 약 44일간의 고도 자료를 획득하였다. GPS 고도 변화는 뚜렷한 조석 성분이 관측되며, 조석 분석을 통하여 조석성분을 제거하였다. 또한, 기압변화에 따른 빙봉의 고도 변화(IBE 효과)는 ERA Interim 기압 자료를 이용하여 제거하였으며, ApRES 관측에서 알 수 있듯이, 역학적 수직 변형은 거의 발생하지 않으므로 고려하지 않았다. GPS 고도는 관측기간 동안 점진적으로 하강하여 하부용융이 발생하고 있음을 알 수 있으며, -1.24 m/yr 의 고도변화율을 보이는데, GPS고도와 빙봉의 두께를 통해 산출된 빙봉의 밀도(905 kg/m^3)를 적용하면, 약 10.4 m/yr 의 하부 용융량을 산출할 수 있다. 2017년 같은 시기에 ApRES를 통해 관측된 하부 용융량은 약 7 m/yr 로 GPS 관측 시기보다 약간 작다. 이러한 차이는 GPS 자료 처리에서 고려되지 않은 Firn의 압밀 작용의 영향일 것으로 추정된다. NAP10 측정점에서 빙봉의 밀도를 고려하였을 때, Firn의 두께는 20-30m 정도이어서 Firn의 압밀작용은 크지 않을 것이므로, GPS 관측 자료로부터 여름철에 강한 하부 용융량이 발생하고 있음을 확인할 수 있으며, ApRES와 GPS자료를 종합하면, 하부 용융량이 계절에 따라 변동한다는 것을 알 수 있다.

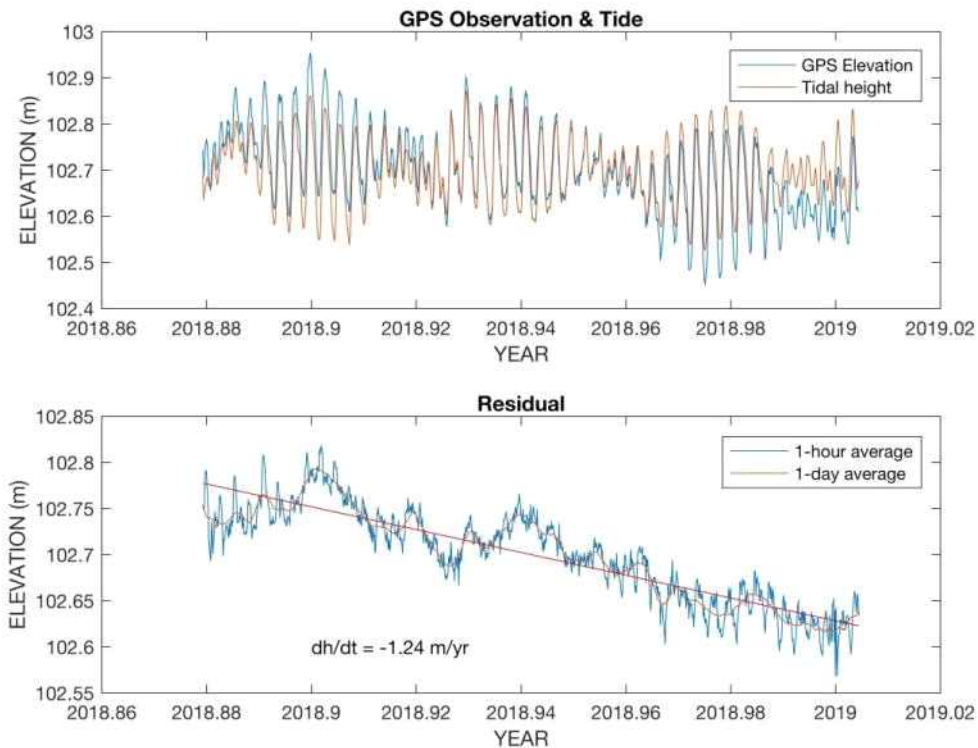


그림 502 NAP10 측점의 GPS 관측 결과

난센 빙봉 하부용융량이 계절에 따라 변동하는 것은 난센 빙봉 앞바다의 상태와 밀접한 상관관계가 있을 것으로 생각된다. 난센 빙봉 앞바다는 바람이 강하여 항상 풀리냐가 형성되어 있는 해역으로, 여름철(11월-1월)에는 바람이 약하고 2-3월부터 바람이 강해진다. 2018년 2월 풍속이 매우 강한 시기에 하부용융량은 급격히 감소하였으며, 이후 바람이 강한 겨울철 동안에는 하부용융이 거의 발생하지 않는다. 난센 빙봉의 하부용융을 유발하는 수괴는 HSSW(High Salinity Shelf Water)일 것으로 생각되는데, 여름철 난센 빙봉 하부로 진입하던 HSSW가 바람이 강해지는 겨울에는 빙봉 하부로 진입하지 못하여 겨울철에는 하부용융이 발생하지 않는 것으로 추측된다. 2-3월경 하부용융량이 급격하게 변화하고, 겨울철에는 거의 변화가 없는 것으로 보아 바람이 강해지는 겨울에는 여름과는 완전히 다른 해수 순환이 존재하는 것으로 생각된다.

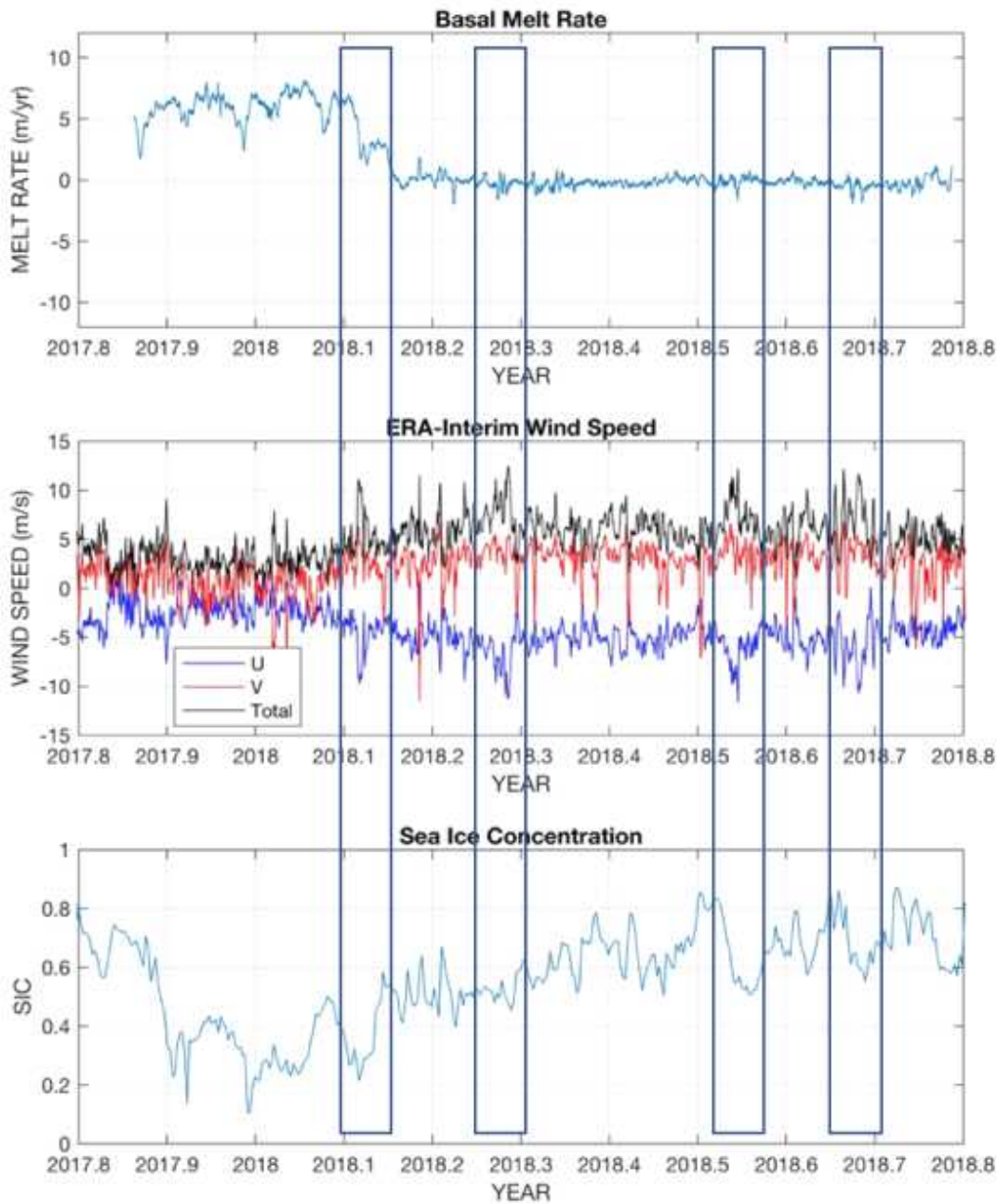


그림 503 NAP10 측정점의 하부용융량과 난센 빙붕 앞바다의 바람/해빙 상태와의 상관관계

하부용융량의 공간적인 분포를 살펴보기 위하여 질량 보존 기법(Mass conservation method)을 적용하였다. 앞절에서 설명한 질량보존식에서 평형 상태를 가정하면 ($\partial Z/\partial t = 0$), $-\nabla \cdot Z\vec{V}$ 는 하부용융량(B)과 표면질량수지(A)의 차이를 의미한다. 최근 가장 정확한 표면고도모델로 알려져 있는 REMA DEM (Howat *et al.*, 2019)의 표면고도를 이용하여 정수 평형 상태를 가정하여 산출된 빙붕의 두께를 적용하였으며, InSAR 기법으로 산출된 빙붕의 이동속도(Rignot *et al.*, 2017)를 이용하였다. 산출된 $-\nabla \cdot Z\vec{V}$ 값의 잡음을 제거하기 위하여 빙하 흐름 방향으로 나열된 10km*5km 가우시안 평균 필터를 적용하였다. 산출된 $-\nabla \cdot Z\vec{V}$ 값의 전체적인 분포를 살펴보면, 지반선 부근에서 질

량 손실이 크며, 특히 NAP10측점 부근에서 가장 큰 질량 손실이 발생한다. HWD 측점과 NAP10측점 사이에서 질량이 증가하는 구간이 존재하는데, 이 지역은 적설과 하부 결빙이 동시에 발생하는 지역으로 생각된다. 큰 하부용융량이 산출된 난센 빙봉 전단부는 C-33 빙산에 해당하는 지역으로 빙산의 형성과 가속에 의해 이 지역은 평형상태에 있지 않으며, 빨라진 빙하 이동 속도로 인해 양의 고도 변화가 있을 것으로 추정되는 지역이다. 이로 인한 영향으로 큰 하부용융량이 산출되었으나, C-33 빙산의 크랙을 경계로 급격히 하부용융량이 감소하는 것으로 보아 난센빙봉의 전단부에는 하부용융량이 크지 않은 것으로 생각된다.

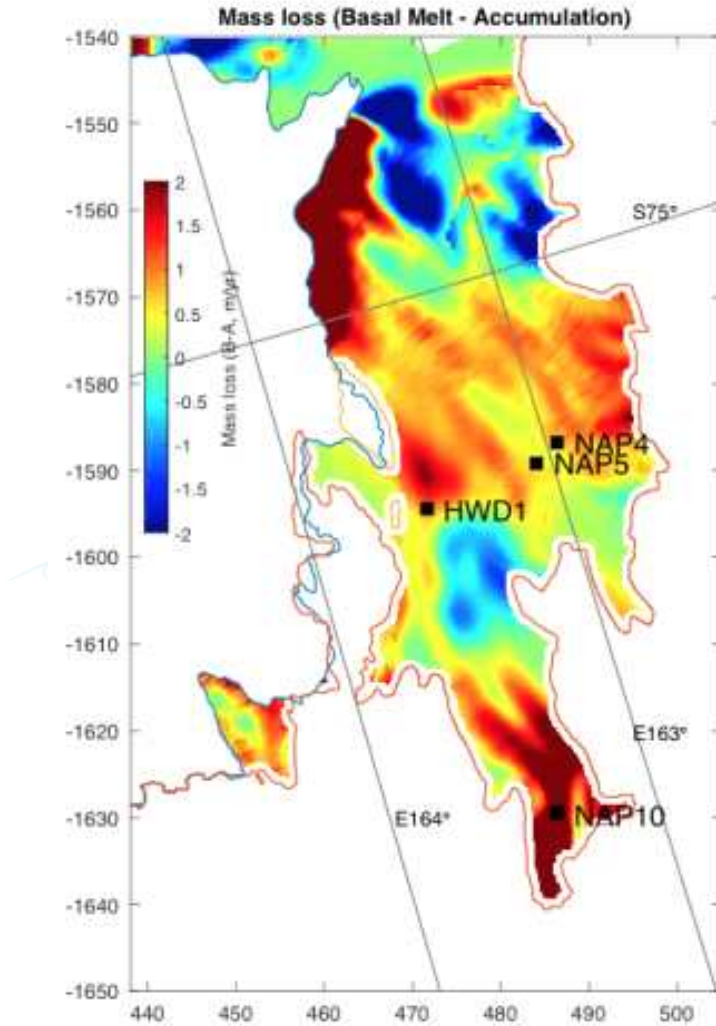


그림 504 질량 보존 방법으로 산출한 난센 빙봉 질량 손실 분포

ApRES 측점에서 관측된 표면 질량 수지를 적용하여 산출된 하부용융량과 ApRES로 직접 관측된 하부용융량을 아래 표에서 비교하였다. NAP4와 HWD 측점에서는 두 기법에 의한 하부용융량이 비슷하게 산출되었으며, NAP5와 NAP10측점에서는 차이가 크게 나타났다. NAP5 측점의 상류에는 크게 발달한 크랙이 존재하는데 이는 빙봉의 질량균형이 평형상태에 있지 않음을 의미한다. 이로 인해 질량 보존 기법에 의해 산출된 하부용융량이 더 크게 산출된 것으로 생각된다. NAP10 측점의

경우, 앞에서 기술하였듯이, 계절 변동이 발생하는 지역으로, 두 기법에 의한 하부용융량이 큰 차이를 보인다는 것은 시간에 따라 하부용융량의 변동이 심하다는 것을 지시한다. 즉, 바람과 해수 순환의 변화에 기인하는 계절 변동이 매년 상이하게 나타날 수 있음을 지시한다. GPS에 의해 관측된 하부용융과 ApRES에 의해 관측된 하부용융량의 차이도 매년 하부용융량이 변동하고 있다는 것을 나타낸다.

표 59 관측된 하부용융량과 질량 보존 기법으로 산출한 하부용융량의 비교

Site	Basal melt (ApRES)	Mass loss (Mass conservation)	Surface mass balance	Basal melt (Mass conservation)
NAP4	0.14	0.63	-0.42	0.21
NAP5	0.02	0.53	-0.06	0.47
HWD	0.90	0.94	0.10	1.04
NAP10	1.44	3.30	0.15	3.45

결론적으로 난센빙봉의 하부용융은 Priestley 빙하 지반선 부근에서 가장 크게 발생하며 용융된 용빙수는 빙봉 외부로 배출되는 과정에서 일부 재결빙되는 것으로 보인다. 난센빙봉은 표면질량수지의 변동이 심한 지역으로 표면질량수지의 정확한 관측이 하부용융량 산출에 매우 중요할 것으로 생각된다.

(다) 난센 빙봉 하부의 해저 지형

난센 빙봉 하부용융의 수치 모델링을 위해서는 빙봉 하부의 지형을 정확하게 알아야 한다. 하지만, 빙상 탐사에 주로 이용되는 빙하 투과 레이더가 빙봉 하부의 해수층을 투과하지 못하며, 쇄빙선을 이용한 멀티빔이나 탄성과 탐사도 수행할 수 없기 때문에, 해저지형에 대한 정보가 매우 희박한 실정이다. 가장 경제적인 탐사 기법은 항공 중력 탐사로서, 항공기에 탑재된 중력계를 이용하여 중력의 공간 변화를 탐사하고 중력 이상을 이용하여 해저지형을 역산을 통해 추정하는 방법이다.

난센 빙봉의 하부 해저 지형을 밝히기 위하여 2016/2017 하계기간 동안 헬기에 탑재된 GT-1A 중력계를 이용하여 항공 중력 탐사를 수행하였다. 잡음을 줄이기 위하여 150초 필터링을 적용하며, 이 경우 중력자료의 공간 해상도는 약 5km에 해당한다. 일반 항공기에 비하여 헬기는 진동이 심하고, 특히 난센 빙봉은 바람이 매우 강한 지역이어서, Crossover 정확도는 약 9.8 mGal로 일반 항공기를 이용한 중력 탐사 자료보다 낮은 편이다.

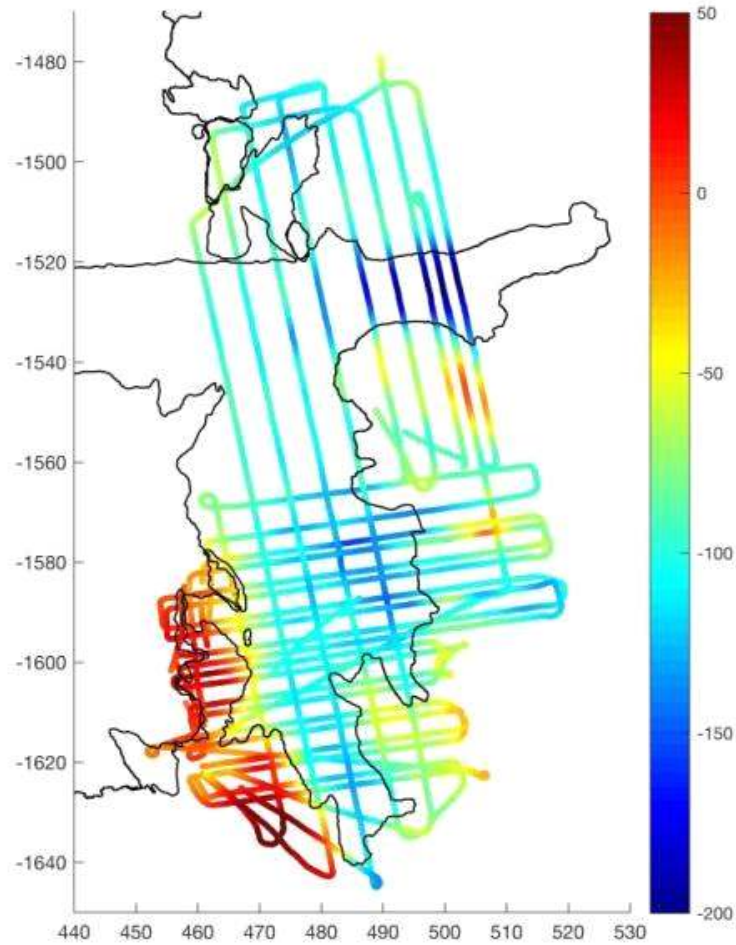


그림 505 난센 빙봉 지역의 Free-air 중력 이상

관측된 중력 자료를 이용하여 해저 지형을 추정하기 위해서는 초기 해저지형 모델에서 산출된 중력 이상과 관측 중력 이상의 차이를 역산하여 초기 해저지형 모델을 개선하는 방법을 사용하였다. 중력 역산의 과정은 다음과 같다.

- 초기 빙상/해저 지형 모델 생성
- 초기 모델을 이용한 순산 중력 이상($g_s^0 + g_b^0$) 산출
- 관측 중력이상(g_o)에서 순산 중력 이상 제거
- 광역 중력이상 산출 및 제거
- 잔여 중력이상을 이용한 중력 역산
- 중력 역산 결과를 이용한 모델의 개선

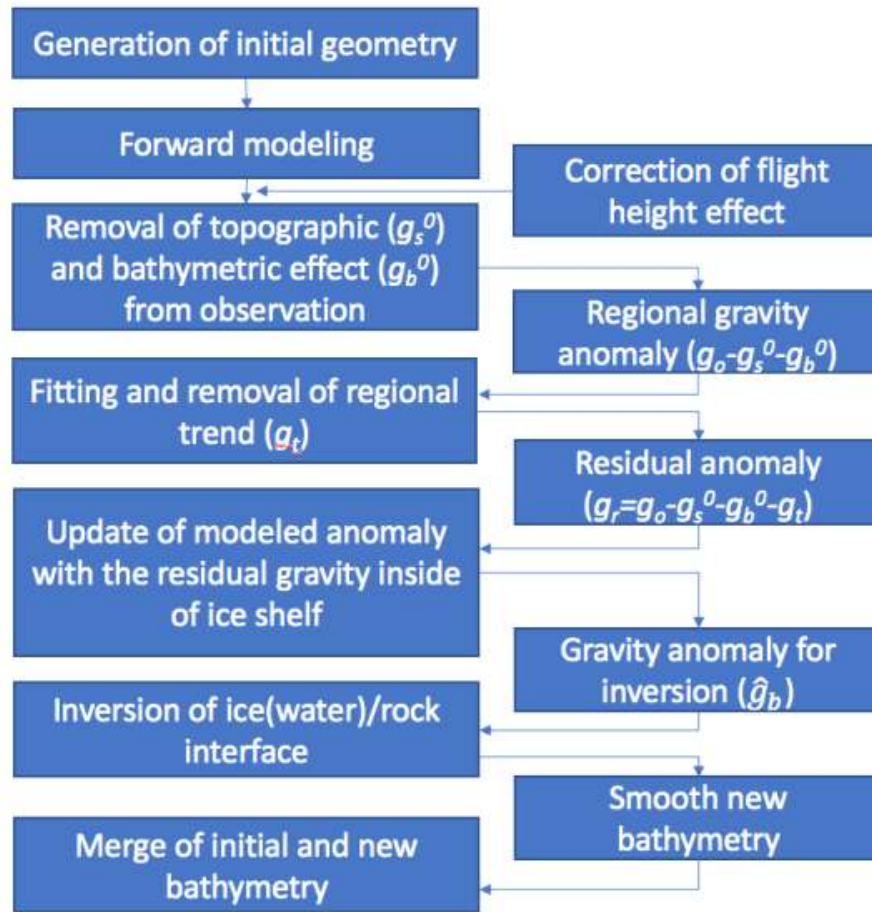


그림 506 중력 역산 흐름도

초기 빙붕/해저 지형 모델은 다양한 자료를 이용하여 구성되었다. 빙붕 및 주변 육상 지형은 REMA DEM (Howatt *et al.*, 2019)을 이용하였으며, 빙산 두께 및 육상의 기반암 형태는 BEDMAP2 (Fretwell *et al.*, 2013)를 사용하였다. 난센 빙붕 주변 해저 지형은 IBCSO (Arndt *et al.*, 2013)를 이용하였으나, 빙붕 근처에서는 IBCSO 자료가 정확하지 않아 쇄빙선을 이용한 멀티빔 탐사를 통해 획득된 해저 지형 자료를 추가로 이용하였다. 난센 빙붕 앞바다에서 수심 1200m가 넘는 깊은 해저 지형이 존재하지만, 난센 빙붕 하부에 대한 정보가 없기 때문에, 난센 빙붕 직하부에서는 해수층 두께가 거의 0에 가깝게 설정되어 있다.

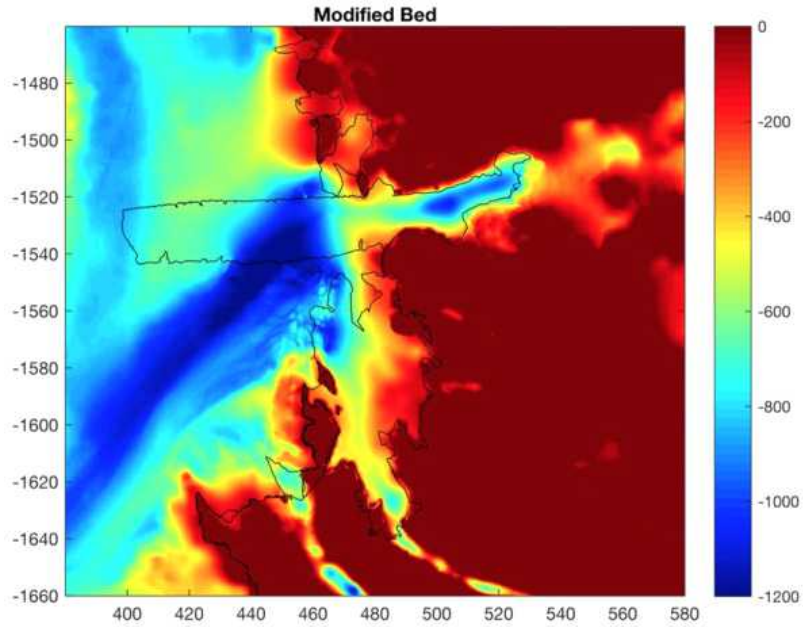


그림 507 난센 빙봉 주변의 수심(초기 모델). 단위: m

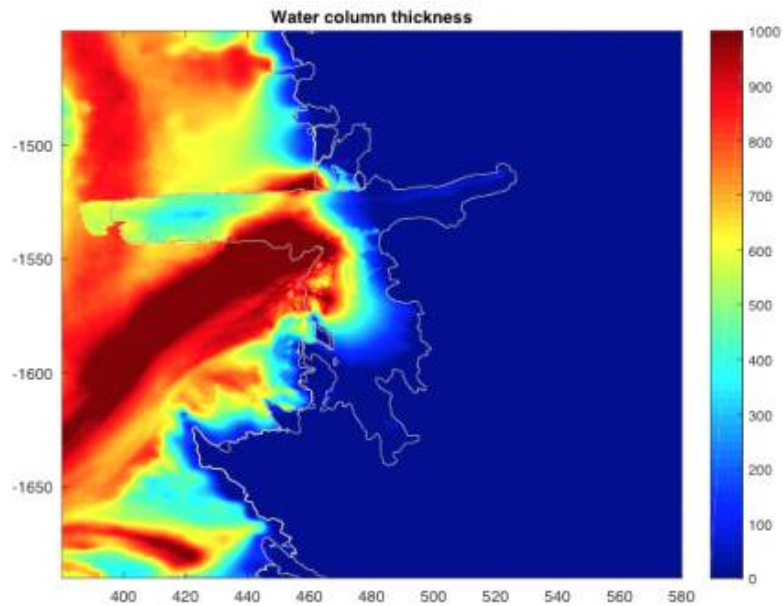


그림 508 난센 빙봉 주변의 해수층 두께(초기 모델). 단위: m

난센 빙봉 주변 지형의 영향을 제거하기 위하여 순산 모델링을 수행하였다. 중력 순산/역산 모델링은 Parker (1973)과 Oldenburg (1974)의 기법을 적용한 3DINVER.M 프로그램 (Gomez-Ortiz and Agarwal, 2005)을 이용하였다. 얼음의 밀도는 917 kg/m^3 , 해수의 밀도는 1028 kg/m^3 , 지각의 밀도는 2800 kg/m^3 (Jordan *et al.*, 2013)을 사용하였다. 헬기의 고도 변화에 따른 효과를 순산 모델링을 통해 보정하였으며, 약 1.5 mGal 수준이어서 자료의 정확도보다 낮은 수준이다. 관측된 중력 이상과 초기 지형모델의 순산 결과를 비교해보면 광역적인 변화가 관측된다. 이러한 광역적인 중력 이상은 심부의 지각구조 변화 (모호면의 깊이 변화 혹은 지각 밀도 변화)에 기인한다. 광역적인 중력

변화를 가장 근사하는 다항식 모델을 산출하여 제거하면 빙봉 지역에서 음의 중력 이상이 나타나는데 이는 실제 해저 지형이 초기 모델보다 깊다는 것을 의미한다.

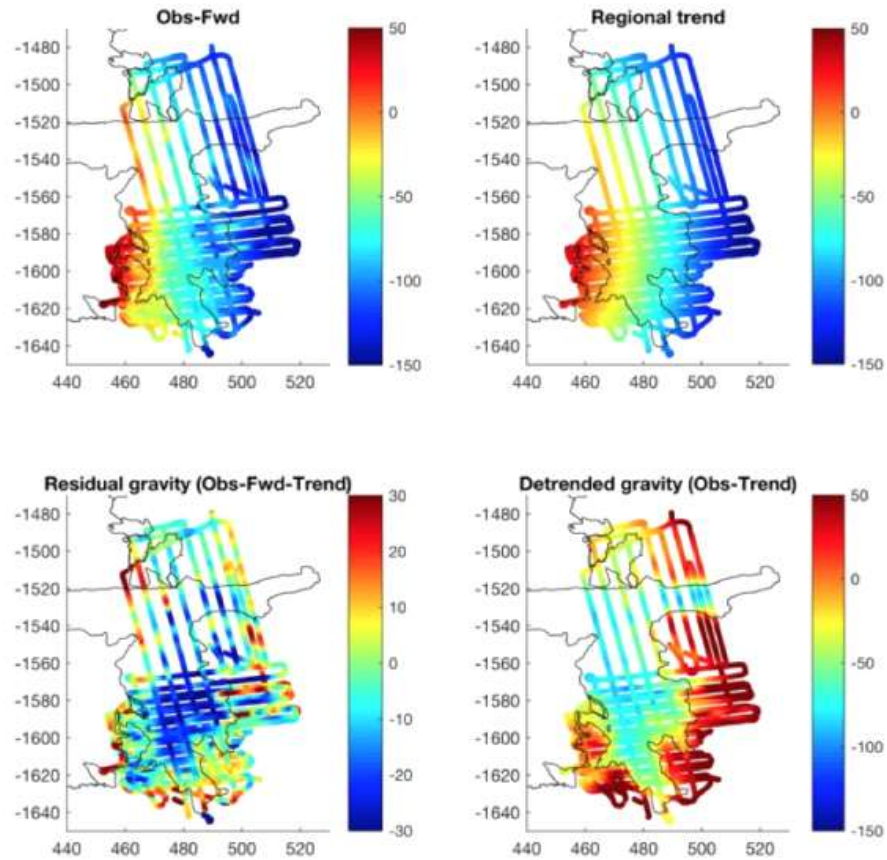


그림 509 (좌상) 관측 중력 이상과 순산 중력 이상의 차이, (우상) 관측 중력 이상과 순산 중력 이상의 차이를 근사한 다항식 모델(광역 이상), (좌하) 광역 이상이 제거된 후의 잔여 중력 이상, (우하) 관측 중력에서 광역 이상이 제거된 중력 이상

빙봉 지역 내의 잔여 중력 이상을 순산 중력 이상에 더하여 역산에 사용할 중력 이상도를 제작하였다. 해수/빙산과 기반암(해저면)과의 경계에 의해 발생하는 중력 이상을 역산함으로써 기반암의 깊이를 추정할 수 있기 때문에 대기과 해수면/빙산과의 경계면에 의해 발생하는 중력 이상은 중력 이상도에서 제거하였다.

역산을 수행한 결과, 역산 모델에 의한 중력 이상은 입력된 중력 이상과 약 2.19 mGal (4.6 %) 오차를 나타내는데 이는 관측 중력 이상의 정확도 보다 낮은 수준이어서, 역산 과정에서 발생하는 오차는 무시할 정도이다. 역산을 통해 얻어진 해저 지형은 초기 모델에 비하여 최대 약 500m 정도 깊은 것으로 파악되었다.

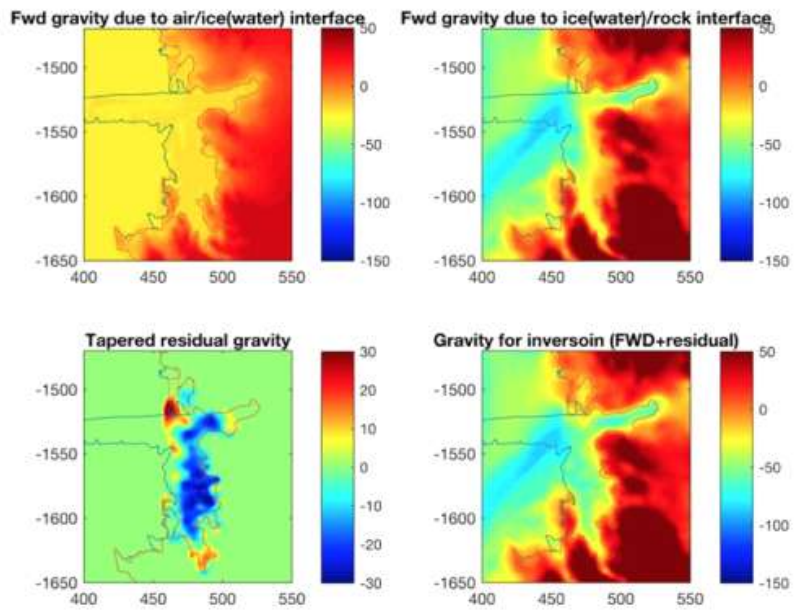


그림 510 역산을 위한 중력 이상도 제작. (좌상) 대기와 해수면/빙산 경계면에 의해 발생하는 중력 이상, (우상) 초기 모델의 빙산/해수와 기반암 경계면에 의해 발생하는 중력 이상, (좌하) 빙봉 지역의 잔여 중력 이상, (우하) 역산을 위해 제작된 중력 이상도

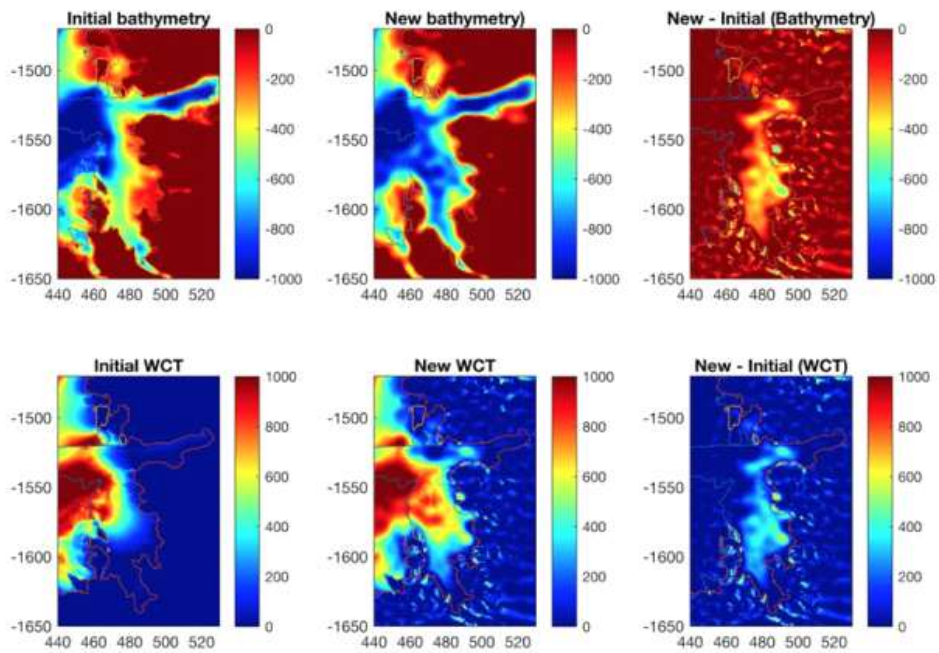


그림 511 중력 역산 결과. (상) 해저 지형도 및 (하) 해수 두께

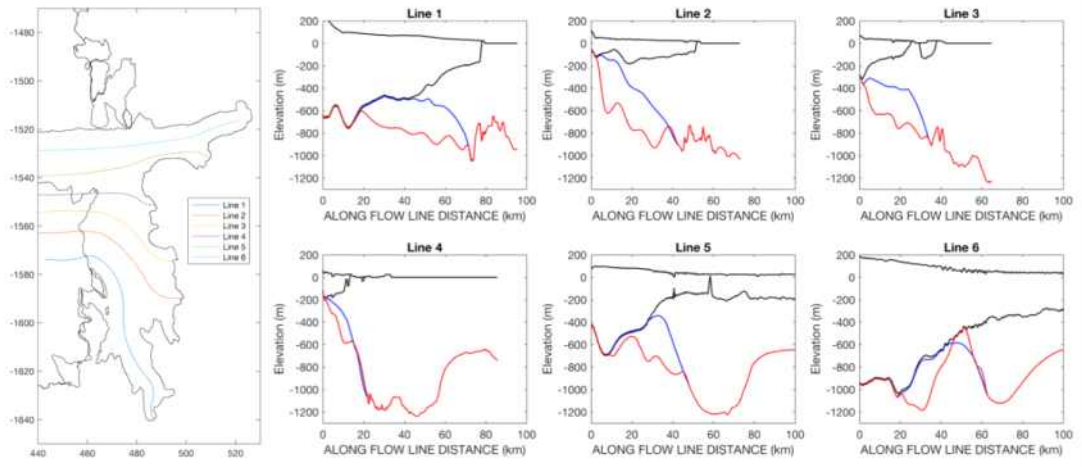


그림 512 빙하 흐름선을 따라 도시한 역산 결과. 청색선은 초기 모델, 적색선은 역산에 의한 해저 지형을 나타냄. 흑색선은 빙방의 형태를 나타냄.

난센 빙붕 아래 해저면은 대략 400 - 1000m의 깊이를 가지고 있으며, 난센 빙붕의 전단부에서 가장 깊다. 빙붕 전단부의 멀티빔 자료에서 관찰되는 깊은 trough는 육상 빙하 지류들과 연결되어 이어지며 과거 주된 빙하흐름선은 Priestley 빙하인 것으로 보이며, Reeves 및 Larsen 빙하에서의 흐름이 합류하는 형태의 빙하 지형을 형성하고 있다. 드라이갈스키 빙붕 지역은 난센 빙붕 쪽으로 치우쳐서 깊은 형태를 나타내고 있는데 바다에서 관찰되는 깊은 trough와의 연결을 고려할 때 남극 횡단 산맥이 형성될때의 변형에 의한 것으로 보인다. 중력 역산 결과 획득된 난센 및 드라이갈스키 빙붕 하부 지형은 과거 빙하기의 빙하 흐름 연구 및 현재 빙붕 하부의 해수 순환 모델링 등 광범위 하게 활용될 수 있을 것으로 생각된다.

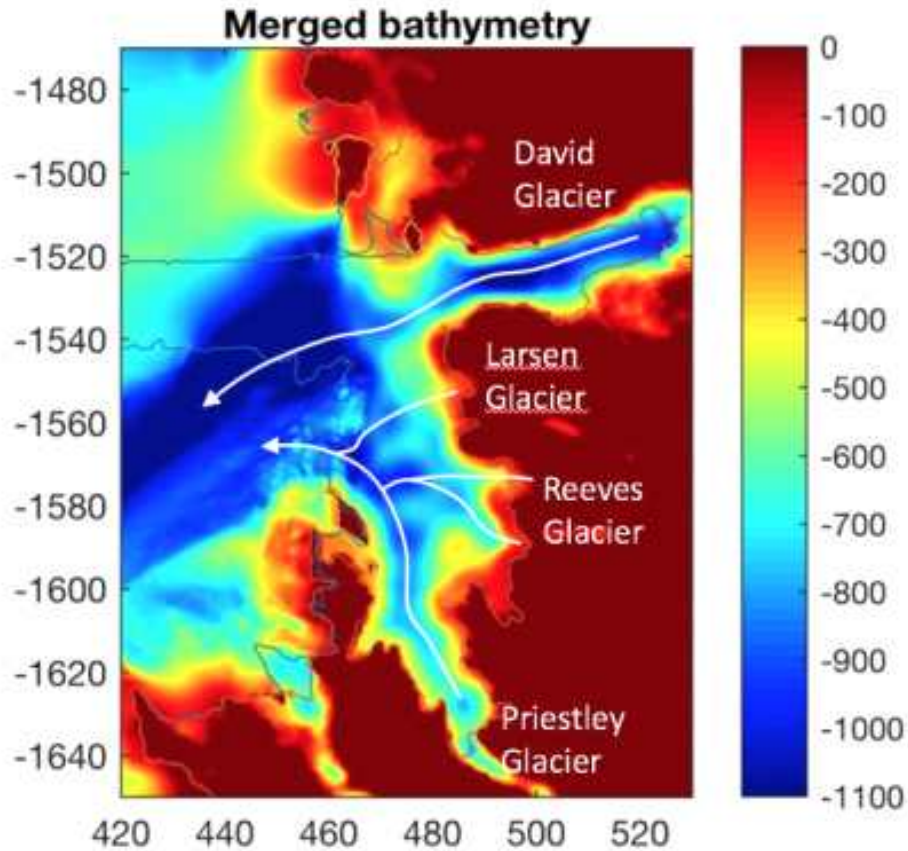


그림 513 역산 결과에 따른 난세 빙붕 지역 해저 지형도 및 추정되는 과거 빙하 흐름

극지연구소

라. 빙하 용융수의 기원 추정

빙하 용융수는 강설이 쌓여 형성된 빙붕이 해수와 상호작용할 때 발생하는 용융 기작으로 인해 생성된다. 장보고 과학기지 주변 테라노바 만에서 형성되는 고염대륙붕수(HSSW: High Salinity Shelf Water)는 대륙붕 사면을 따라 흘러 들어가 빙붕 하부에 도달하게 되며, 어는 점보다 더 높은 수온으로 인해 빙붕 하부를 용융시킨다. 이 과정에서 고염대륙붕수와 빙하 용융수가 혼합되어 빙붕수(ISW: Ice Shelf Water)를 형성하는 것으로 알려져 있다(Jacobs *et al.*, 1992; Jacobs and Fairbanks, 1985; Orsi and Wiederwohl, 2009).

한편 물의 수소 및 산소 안정 동위원소비(이하 물안정동위원소비)는 서로 다른 수계에서의 혼합 및 물의 기원을 추정하는 데 이용되어 왔다(Koh *et al.*, 2012). 바다로부터 시작되는 물 순환 과정에서 물 안정동위원소는 증발, 강수, 결빙 등의 동위원소 분화 과정을 거쳐 수계마다 다른 값을 갖는다. 이러한 특성을 활용하면 해수의 물 안정동위원소비를 바탕으로 빙하 용융수와 혼합 관계를 파악할 수 있다. 본 연구에서는 해수의 물 안정동위원소비를 활용하여 빙붕수의 존재를 파악하고, 동위원소비와 함께 물리적 요인을 활용하여 빙하 용융수의 기여율을 계산하여 주변 해양환경에 미치는 영향을 파악하고자 하였다.

(1) 눈 안정동위원소를 이용한 지표면 변화(알베도)에 따른 용설 생성 기작 이해

눈 표면의 불순물에 의해 눈의 알베도(albedo)가 감소하면 표면에서 흡수되는 에너지가 증가하여 용설(meltwater)을 발생시킨다. 용설은 아래로 흐르면서 눈과 동위원소교환반응(isotopic exchange between liquid water and ice)을 하게 되며 이 과정에서 용설과 눈의 안정동위원소가 변하게 된다(Lee *et al.*, 2009). 같은 지역에서 녹은 눈과 그렇지 않은 눈의 안정동위원소 값 차이는 안정동위원소를 활용하는 연구에서 결과 값의 오차를 발생시킨다(Warren *et al.*, 1980; Lee, 2012). 따라서 눈이 쌓인 후에 발생한 변화 요인(post depositional process)을 동위원소 연구에 필수적으로 고려해야한다. 이 연구에서는 눈이 쌓인 후에 눈에 포함되어있는 불순물에 의해 눈의 안정동위원소 값이 어떻게 변화하는지 살펴보고, 이러한 변화가 어떤 의미를 갖는지에 대하여 고찰하였다.

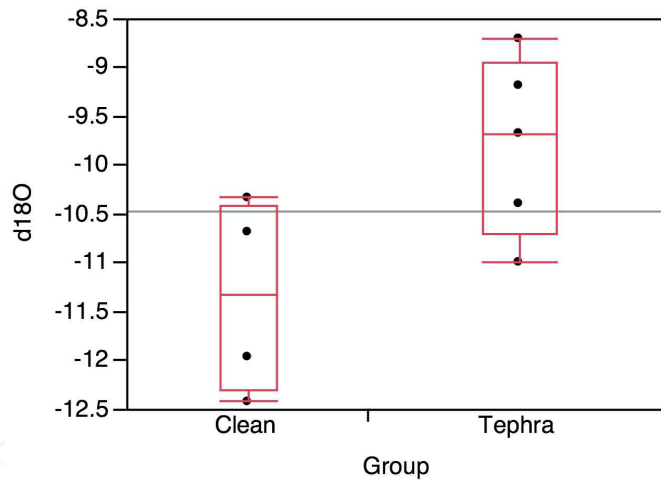


그림 514 다른 조건에서 채취된 눈시료의 안정동위원소 값 통계적 차이

테프라에 의한 산소 동위원소 값 변동을 알아보기 위해 t-test를 수행하였다(그림 514). t-test 결과 테프라에 의해 영향을 받은 지역의 눈 안정동위원소 값은 그렇지 않은 지역보다 높다는 것을 알 수 있다($p < 0.02$). 테프라에 의해 알베도가 낮아지게 되면 흡수하는 복사에너지의 양이 많아지게 되고, 이로 인해 눈이 녹게 되거나 눈이 녹는 속도가 빨라지게 된다(Lee *et al.*, 2011; Lee, 2014). 눈 표면에서 눈이 녹기 시작하면, 눈과 물의 동위원소교환반응(isotopic exchange between liquid water and ice)이 발생하여 동위원소 분화가 일어나게 된다(Lee *et al.*, 2009). 평형상태에서, 물의 $\delta^{18}\text{O}$ 과 δD 의 값은 고체상의 얼음과 눈에 비해 각각 3.1, 19.5‰ 낮다(O'Neil, 1968). 따라서, 동위원소 교환반응으로 인해 눈은 용해(melting)가 발생하면, 상대적으로 액상의 물에 비해 고체상인 눈은 동위원소 값이 증가하게 된다(Lee, 2014). 따라서, 테프라에 의해 영향을 받은 지역은 그렇지 않은 지역에 비해 알베도 감소에 의해 눈 표면에서 눈이 녹기 시작하였으며, 이로 인해 안정동위원소 값이 통계적으로 유의미하게 그렇지 않은 지역보다 높은 값을 나타내었다.

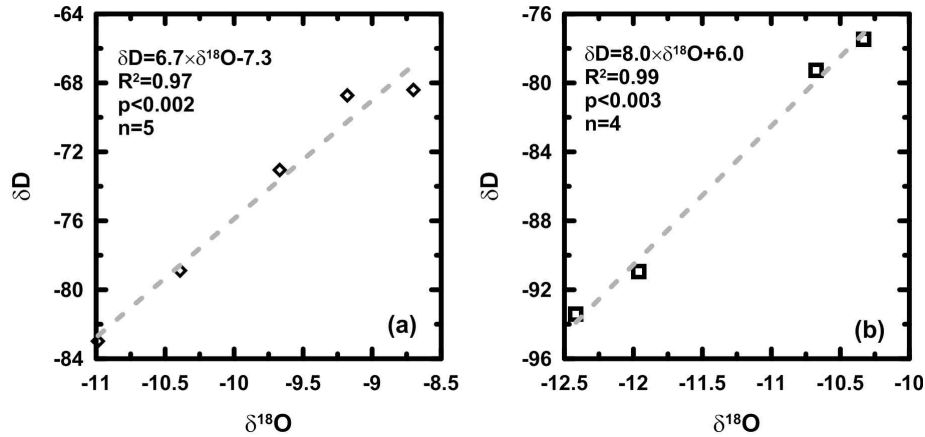


그림 515 (a) 테프라가 눈 위를 덮은 경우와 (b)그렇지 않은 깨끗한 눈 시료의 산소 및 수소 동위원소비 관계

연구지역에서 테프라로 덮인 지역(그림 515a)과 그렇지 않은 지역(그림 515b)로 구분하여 산소와 수소의 안정동위원소의 선형적인 관계를 도출하였다. 테프라로 덮인 지역은 알베도의 감소로 인해 눈이 녹기 시작하여 동위원소의 분화가 일어났으며, 그렇지 않은 지역은 거의 눈이 녹지 않은 차이는 두 동위원소의 선형관계에서도 잘 나타나고 있다. 테프라에 의해 영향을 받은 지역은 두 동위원소의 선형적 관계에서 기울기가 6.7이며, 그렇지 않은 지역은 기울기가 8.0으로서 GMWL(Global Meteoric Water Line, $\delta D = 8 \times \delta^{18}O + 10$)과 거의 일치하고 있다. 세종기지 주변의 해안에서 증발하여 응축된 수증기가 눈으로 내리고, 그 위에 테프라가 바람에 의해 퍼지면서 알베도를 변화시켜 용설이 발생해 동위원소 값이 변화했을 것으로 추정된다.

빙하의 용융에 따른 동위원소 변동을 파악하는 것은 향후 동위원소를 활용한 하부 용융수 기여율의 정확도를 향상시키기 위해 필수적으로 고려해야 한다. 동위원소를 활용한 기여율 계산에서 빙하를 단성분(endmember)으로 활용할 수 있는데, 이는 각 값이 변화하지 않았을 경우를 가정한다. 본 연구를 통해 빙하 자체의 동위원소비가 변할 수 있으며 동위원소비를 활용한 연구에서 반드시 단성분 변동에 따른 오차를 고려해야 함을 시사하였다.

(2) 물 안정동위원소의 용융수 기원지 추적 활용을 위한 얼음 용융실험 수행

빙하의 안정동위원소 값을 활용한 연구는 눈이 빙하 시추 장소에서 쌓인 이후 얼음으로 변성되고 나서 아무런 물리적 과정(post-depositional process)도 일어나지 않았다는 것을 가정한다(Lee *et al.*, 2015). 이는 남극 대륙 내부와 같이 연중 영하의 환경에서는 적절한 가정이지만, 그 외 다양한 지역에서 쌓인 눈이 녹아 만들어진 용설의 경우에는 적절하지 않다(Taylor *et al.*, 2001). 얼음의 안정동위원소 값과 기온은 서로 양의 선형관계를 가지고 있으므로, 얼음의 동위원소 값은 얼음이 변성작용을 받는 동안 값이 변한다. 또한 동위원소 수분분리를 수행하기 위해서는 얼음의 동위원소가 시간에 따라 분별(fractionation)됨으로써 발생하는 오차에 대한 이해가 필요하다. 본 연구에서는 얼음의 용융실험을 통해 동위원소 수분분리 및 빙하의 안정동위원소를 이해하는 데에 필요한 얼음의 동위원소 분별과정을 고체상인 얼음과 액체상인 물의 동위원소 교환반응으로 이해하고자 하였다. 이를 위해 Lee *et al.* (2015)에서 제시한 얼음 용융장치를 이용하여 얼음으로부터 발생된 물의 동위

원소변동을 물리적인 모델을 이용하여 설명하고자 하였다. 물 안정동위원소의 $\delta^{18}\text{O}$ 값은 H_2^{16}O 의 농도 값에 대한 H_2^{18}O 의 농도 값의 상대조성비로 나타내며, δD 의 값은 H_2^{16}O 의 농도 값에 대한 HD^{16}O 의 농도 값의 상대 조성비로 나타낸다. δ 의 정의는 아래 식 1과 같다.

$$\delta(\text{‰}) = \left[\frac{R_{obs} - R_{VSMOW}}{R_{VSMOW}} \right] \times 1000 \quad (1)$$

여기서 R_{obs} 와 R_{VSMOW} 는 각각 분석된 시료와 표준시료의 D/H 또는 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 를 나타낸다.

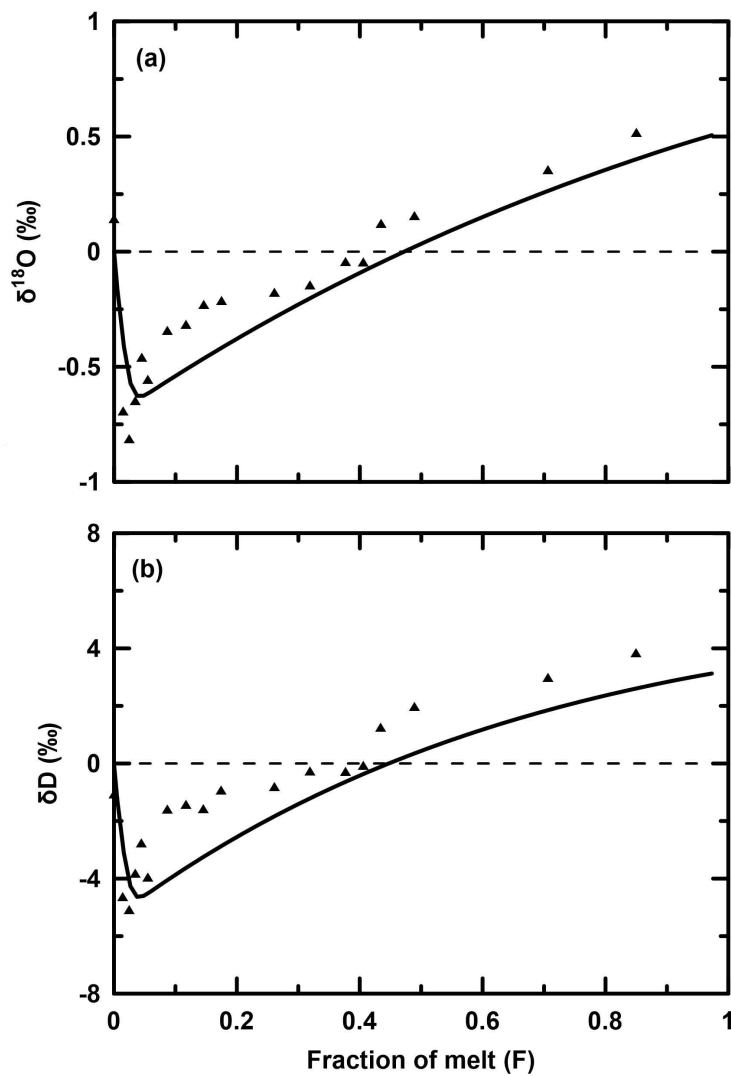


그림 516 얼음 용융도(F) 변화에 따른 용융수의 (a) 산소 동위원소비, (b) 수소동위원소비 조성(삼각형) 및 모델 결과(실선)

본 연구에 사용된 모델은 Taylor *et al.* (2001)과 Feng *et al.* (2002)에 의해 개발되었으며, 눈이 녹은 물과 고체상인 눈의 동위원소 교환반응을 모사하는 연구에 사용되어 왔다(Taylor *et al.*, 2002; Lee *et al.*, 2009; Lee *et al.*, 2010a). 눈 속을 흐르는 물의 속도는 일정하다고 가정하여 수리조건(hydrological condition)을 무시하였다. 하지만, Lee *et al.* (2010b)에서는 수리 조건을 고려한 모델을 개발하여 눈이 녹은 물의 일일 동위원소 변동 및 인공강우에 의한 동위원소 변동을 실험결과와 비교하였다. 두 모델의 차이점과 스노우팩의 동위원소 초기조건에 따른 융설의 동위원소 변동은 Lee (2014)에 제시되어 있다.

Taylor *et al.* (2001)과 Feng *et al.* (2002)에 의해 개발된 1-D 스노우팩동위원소모델은 식 2-5의 지배방정식을 따르며, 이는 기본적으로 용질이송모델과 동일하지만 이송(advection)과 동위원소교환(isotopic exchange between liquid water and ice)이 포함되어 있다. 이는 Búason (1972)에 의해 처음으로 제시되었으며, Taylor *et al.* (2001)는 눈이 녹은 물과 고체상인 눈의 동위원소교환반응은 모든 지역에서 일어나는 것이 아니라 눈 표면의 일부분에서만 반응이 일어날 것이라고 가정(식 3의 f)하여 모델을 수정하였으며, Taylor *et al.* (2002)에서는 실험과 모델을 비교하여 f 및 식 5의 동위원소교환계수(k_r)를 제시하였다.

$$\frac{\partial R_{liq}}{\partial t} = -\frac{\partial R_{liq}}{\partial z} + \psi\gamma(R_{ice} - \alpha R_{liq}) \quad (2)$$

$$\frac{\partial R_{ice}}{\partial t} = \psi(1-\gamma)(\alpha R_{liq} - R_{ice}) \quad (3)$$

$$\gamma = \frac{bf}{a+bf} \quad (4)$$

$$\psi = \frac{k_r Z}{u} \quad (5)$$

여기에서 R_{liq} 및 R_{ice} 는 각각 액상과 고체상에서의 D/H 또는 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 의 비율을 나타내며 α 는 0°C 에서의 수소 또는 산소의 평형상태에서의 분별계수를 나타낸다. 평형상태에서 수소 및 산소의 분별계수는 각각 3.1‰과 19.5‰이다(O'Neil, 1968). 변수 γ 는 고체상인 얼음이 동위원소교환반응에 얼마만큼 참여하는 가를 정량적으로 나타낸 것이며 변수 ψ 는 무차원동위원소 속도계수(dimensionless rate constant of isotopic exchange)이다. 기존 모델에서는 눈 또는 얼음의 동위원소 교환반응이 전 지역에서 일어난다고 가정하였지만, Taylor *et al.* (2001)의 연구에서는 γ 를 이용하여 동위원소교환반응이 부분적으로 일어날 것이라고 가정하였다. 여기에서 k_r 은 동위원소속도계수이며, Z 는 최초의 눈의 깊이이며, u 는 융설의 속도이다. a 와 b 는 각각 단위부피당 눈에 있는 물과 얼음의 질량을 나타낸다.

용융실험을 통해 얻어진 산소와 수소의 동위원소 분석값에 모델값의 적합도(fit)를 고려하여, 식 4과 5에서의 산소와 수소의 γ 와 ψ 값을 결정하였다. 얼음이 동위원소교환반응에 얼마만큼 참여하는 가(f)와 동위원소교환상수(k_r)는 식 4과 5를 통해 각각 정할 수 있다. 최적의 적합도(the best-fit)은

모델값과 실험값의 차이의 제곱을 가장 최소화하는 값(least-squares method)으로 결정하였다(Lee *et al.*, 2009).

얼음 표면이 녹기 시작하면 녹은 물은 얼음 사이를 통과하면 액상인 물과 고체상인 얼음의 동위원소교환반응(isotopic exchange between liquid water and ice)이 발생하여, 두 상의 동위원소 값을 변화시키게 된다(Lee *et al.*, 2009; Lee *et al.*, 2010; Lee *et al.*, 2015). 고체상인 얼음과 액체상인 물의 동위원소교환반응으로 평형을 이루게 되면, 산소 및 수소의 동위원소 값은 각각 3.1%, 19.5%의 차이가 발생하게 된다(Lee *et al.*, 2009). 실험 초기에 얼음 사이에는 물이 존재하지 않기 때문에 용융으로 생성된 물은 얼음 표면의 동위원소 조성과 같다. 시간이 지나면서 얼음 속을 지나가는 물은 동위원소교환반응으로 인해 동위원소 값이 감소하게 되고, 얼음의 동위원소 값은 증가하게 된다. 후에 동위원소 값이 증가된 얼음이 녹기 시작하면 얼음 속을 지나가는 물의 동위원소 값도 증가하며, 그림 516과 같이 처음에는 배출수의 동위원소 값이 초기에 감소하다가 결국에는 증가하는 양상을 보여 주게 된다. 그림 517에서는 실험에 사용된 최초의 얼음값(산소: -8.42‰, 수소: -61.26‰)에서 분석된 값을 뺀 값을 도시하였다. 이는 얼음의 동위원소 값의 시간적 변화를 보여 주며, 0을 기준으로 자료의 윗부분과 아래 부분은 질량보존법칙에 따라 같은 넓이를 가져야 한다.

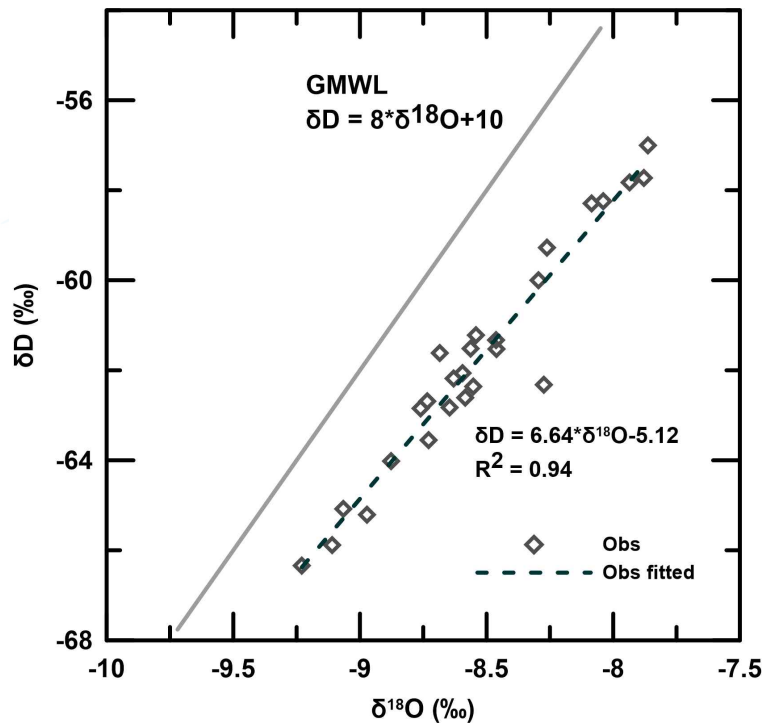


그림 517 얼음이 녹아 형성된 물의 산소 및 수소동위원소 비

산소와 수소의 선형관계는 동위원소수리지질학(isotope hydrogeology)에서 많이 쓰이는 방법이며, 선형관계의 기울기 및 절편은 물리적인 의미를 지니고 있다. 그림 517에 제시된 것처럼 전지구 순환선(Global Meteoric Water Line, GMWL)은 기울기를 8, 세로축 절편 10을 가진다. 이는 해양에서 기원한 강수(precipitation)에 해당되는 사항이며, 눈 또는 얼음이 쌓인 이후 녹기 시작한다면 다

른 선형관계를 가질 것이다(Lee *et al.*, 2010). Lee *et al.* (2010)에서는 새로운 눈, 스노우팩, 눈 녹은 물로 눈의 변성작용(snow metamorphism)이 일어나면서 선형관계의 기울기가 어떻게 변하는지 현장조사 및 모델로서 논의하였다. 새로운 눈은 GMWL과 같은 기울기 8을 가지지만 눈의 변성작용, 즉 대기의 복사에너지를 흡수하여 눈에서 얼음으로 변동될수록 선형관계의 기울기는 감소하는 것으로 보고하였다. 이는 액체상의 물과 고체상인 얼음의 동위원소교환반응으로 설명될 수 있으며, 이때의 동위원소분별계수(isotopic fractionation factor, 19.5/3.1~6.3)에 의해 8이하의 기울기를 설명할 수 있다(Lee *et al.*, 2009). 극지역에서는 승화(sublimation)에 의해서도 동위원소변화가 발생하지만, 산소와 수소의 선형관계는 대략 7.7 정도로 알려져 있으나, 본 실험에서 질량이 거의 회수되었으므로 승화에 의한 동위원소교환반응은 무시할 수 있을 것으로 판단된다(Earman *et al.*, 2006; Stichler *et al.*, 2001). 그림 517에서 제시된 본 연구의 결과에서도 기울기가 6.64를 가지면서 얼음이 녹으면서 동위원소교환반응이 일어났음을 지시한다.

Taylor *et al.* (2001)에서는 현장의 결과를 모사하기 위하여 1-D 스노우팩모델을 개발하였으며, Feng *et al.* (2002)와 Taylor *et al.* (2002)에서는 융해실험을 통해 눈 동위원소의 변화과정에서 화학적인 상수들을 모델을 통해 결정하였다. Lee *et al.* (2009)에서는 산소와 수소의 동위원소교환상수(k_r)가 동일한지를 알기 위하여, Taylor *et al.* (2002)의 실험을 이용하여 통계적으로 이를 분석하고, 두 동위원소의 상수가 유의미하게 다르지 않다는 결과를 제시하였다. Lee *et al.* (2010a)에서는 모델을 이용하여 현장에서 관찰된 산소와 수소의 선형관계 기울기가 변화하는 과정을 정량적으로 제시하였다. 본 연구에서는 시간에 따른 얼음의 동위원소분별과정을 정량적으로 예측하고 얼음의 동위원소교환상수 및 얼음이 동위원소교환반응에 얼마만큼 참여하는 가를 이해하기 위하여 Lee *et al.* (2010a)에 사용된 모델을 이용하였다.

식 4에서 사용된 a 와 b 는 다음과 같이 정의될 수 있다:

$$a = \phi(1 - S_i)(S + \beta)\rho_{liq} \quad (6)$$

$$b = \phi(1 - S_i)\rho_{ice} \quad (7)$$

여기에서 ϕ 는 얼음의 공극률이며, ρ 는 밀도이며, S_i 는 더 이상 줄일 수 없는 물(irreducible water), $\beta = S_i/(1 - S_i)$ 이다. 또한, 식 5에서 사용된 얼음 속에서 물의 속도를 구하기 위해서는 얼음 속의 물 포화도가 필요하다. 유효포화도는 다음과 같이 정의될 수 있다:

$$S = (S_w - S_i)/(1 - S_i) \quad (8)$$

$$u = \frac{K}{\phi(1 - S_i)} \frac{S^3}{(S + \beta)} \quad (9)$$

여기에서 K 는 얼음 속을 통과하는 물의 수리전도도이며, 본 연구에서는 얼음 속을 통과하는 물의 수리전도도와 가장 가까울 것으로 생각되는 역암에서의 수리전도도를 사용하였다. 모델에서 사용된 값과 모델을 통해서 나온 값들을 표에 정리하였다. 유효포화도는 0.12, 얼음 속을 통과하는 물의 속도(u)는 33.5 cm/hr 로 계산되었다.

그림 518에서 실험결과를 가장 잘 설명하는 모델결과를 함께 도시하였다. 실험결과와 모델결과의 차이의 제곱을 최소화하는 γ 와 ψ 값을 결정하였다. 실험결과와 적합도가 가장 높은 수소와 산소 동위원소의 ψ 값은 각각 0.34, 0.46이었으며, γ 값은 각각 0.88, 0.66이었다. 식 4, 5, 9를 이용하여 γ 와 ψ 값으로부터, f 와 k_r 값을 구할 수 있다. 계산된 f 값은 산소와 수소동위원소가 각각 0.28, 0.20이며, k_r 값은 각각 0.30, 0.41 hr⁻¹이다. f 와 k_r 값의 범위가 통계적으로 다른가를 확인하기 위하여, 차이의 제곱합(sum of squares)에 근거한 95% 신뢰영역(confidence region)을 계산하여 수소 및 산소동위원소 결과를 f - k_r 면에 제시하였다(Seber and Wild, 1989). 얼음의 두 안정동위원소의 신뢰영역은 거의 겹쳐있으며, 이를 통해 두 안정동위원소의 동위원소교환상수는 통계적으로 유의미하게 다르다고 할 수 없을 것이다(Lee *et al.*, 2009). 최고적합도를 나타내는 값은 두 안정동위원소 간에 차이가 나지만, 이는 물리적으로 설명할 수 없어 향후 추가적인 실험을 통해 규명할 수 있을 것으로 판단된다.

얼음이 녹으면서 얼음이 녹은 물의 안정동위원소 값이 시간에 따라 어떻게 변화하고, 이 과정에서 동위원소교환상수 및 얼음이 동위원소교환반응에 얼마만큼 참여하는 가는 용융실험과 1-D 모델 결과를 비교해서 구할 수 있었다. 얼음의 두 안정동위원소인 산소와 수소동위원소는 액상의 물과의 동위원소교환상수의 값에는 차이가 있었지만(산소와 수소 각각 0.30, 0.41 hr⁻¹), 95%의 신뢰구간이 거의 일치함을 보여 결론을 내리려면 조금 더 많은 실험이 필요할 것으로 판단된다. 또한, 본 실험에서 얼음이 동위원소 교환반응에 참여하는 정도는 산소와 수소동위원소가 각각 0.28, 0.20으로 계산되었다. 또한, 용융과정에서 산소와 수소의 안정동위원소의 선형관계에서 기울기는 6.64로 GMWL과는 차이를 보였으며, 이는 얼음과 얼음 속을 통과하는 물의 동위원소교환반응으로 설명할 수 있다.

극지역에서 빙하시료를 통해 온도를 복원할 때, 눈에서 얼음이 생성된 이후 어떠한 물리적과정도 일어나지 않아야 한다. 극지역의 기온상승과 해안지역에서 빙하시료를 획득하는 연구가 많아지면서, 이러한 지역에서 빙하의 용융이 발생된다면 얼음의 동위원소 값이 증가하게 되게 이를 통해 과거의 온도 복원은 따뜻한 쪽으로 오차를 발생하게 된다. 반대로, 빙하가 녹은 물이 다시 얼어 존재하게 된다면, 이는 원래 얼음보다 동위원소 값이 낮기 때문에, 과거의 온도 복원은 추운 쪽으로 오차를 발생시키게 된다. 따라서 본 실험을 통해 얻은 결과는 빙하시료의 동위원소 값을 온도의 프록시로 사용하는 연구에 정확성을 평가하는 데에 도움이 될 것으로 판단된다. 또한 동위원소값 자체를 활용하는 연구에서 불확실성을 판단하는 근거로 활용될 수 있을 것이다.

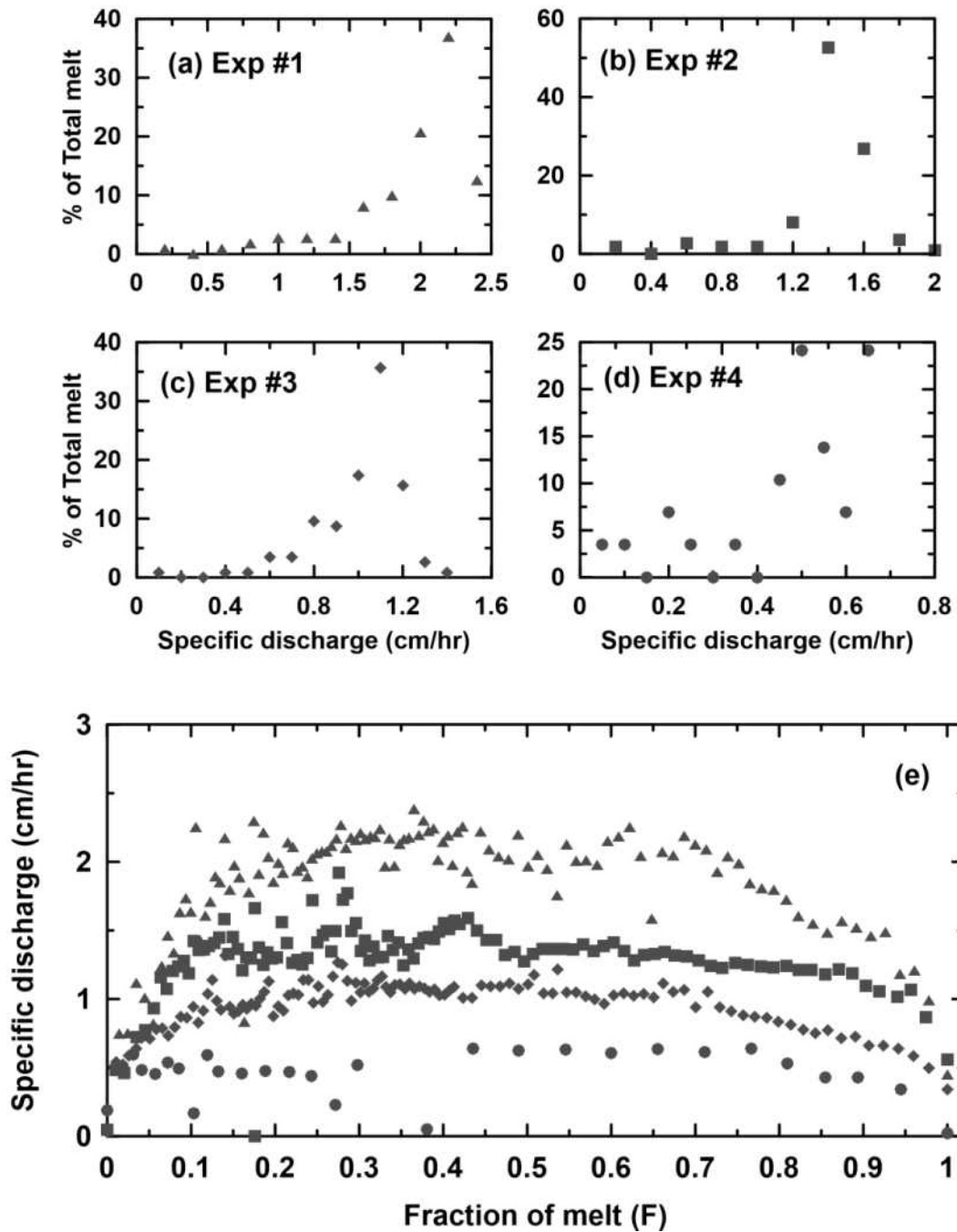


그림 518 (a)-(d) 용융도 변동에 따른 유출량 변화를 나타낸 확률밀도분포이다. 1-4의 실험을 통해 얻은 값이 총 유출량에서 차지하는 비를 단위시간당 유출량에 대하여 나타낸 그래프

(3) 해수 동위원소 시료 채취 및 동위원소 측정

극지연구소에서 수행한 2014/15 남극 하계연구항해부터 2018/19까지 총 5번에 걸쳐 남극 테라노바만 주변의 해수를 채취하였다. 아라온 호에 탑재되어있는 SeaBird Electronics사의 SBE911plus CTD를 활용하여 총 54개 지역에서 295개의 시료를 채취하였다(그림 519).

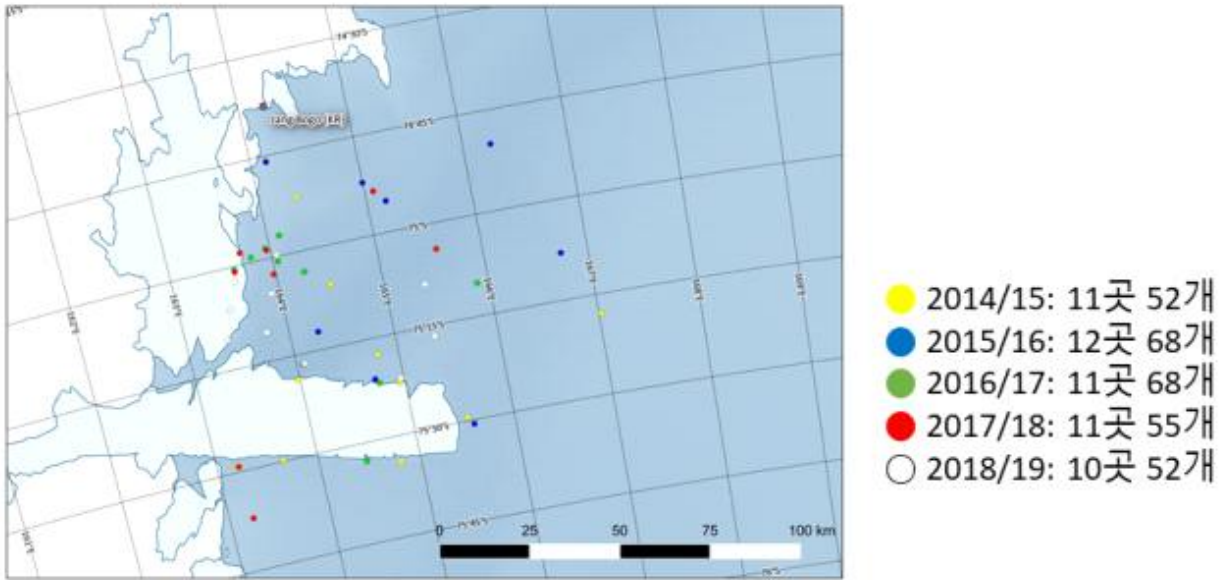


그림 519 연구지역 및 시료채취 지역

채취된 시료의 물 안정동위원소(δD , $\delta^{18}O$)는 극지연구소에 설치되어 있는 상용 물 안정동위원소 분석 장비(Picarro L2130)를 이용하여 분석하였다. 레이저 흡광법(Cavity RingDown Spectrometer, CRDS)이 기본원리이며 기체 흡수스펙트럼의 고유성을 이용하여 정밀하게 조정된 파장의 빛을 측정하여 챔버(cavity)에 조사한 후 빛이 측정 챔버 안에 있는 대기의 목적성분의 양에 비례하여 흡수 및 소멸되는 시간을 측정하는 원리이다(Jung *et al.*, 2013). 표준물질로는 국제원자력기구에서 제공하는 VSMOW2(산소 및 수소동위원소 값: 0 ‰, 0 ‰), SLAP(-55.50 ‰, -427.5 ‰), GISP(-24.76 ‰, -189.5 ‰)를 사용하였다. 각 표준물질은 개당 주입회수를 18회로 정하고 열 번째 시료까지는 이전 시료의 기억효과(memory effect)를 고려하여 결과 값 산출 시 제외하고 나머지 여덟 번의 평균값을 결과로 이용하였다. 시료는 개당 주입회수를 12회로 정하고 뒤의 여덟 번의 평균값을 결과로 이용하였다. 시료를 5회 분석한 후 표준물질을 러닝스탠다드(running standard)로 이용하였다. 물 안정동위원소의 $\delta^{18}O$ 값은 $H_2^{16}O$ 의 농도 값에 대한 $H_2^{18}O$ 의 농도 값의 상대조성비로 나타내며, δD 의 값은 $H_2^{16}O$ 의 농도 값에 대한 $HD^{16}O$ 의 농도 값의 상대 조성비로 δ 로 표기한다.

빙하의 산소동위원소 및 수소동위원소는 바다로부터 증발한 수증기가 강수로 내려 형성되는 것이므로, 바닷물에 비해 적은 동위원소 값을 갖는다. 한편 용빙수는 담수에 해당하므로 용빙수가 혼합되는 경우 해당 해수의 염도 값이 감소한다. 이 외에도 동위원소 값과 염도 값이 동시에 변하는 요소는 다음 그림(그림 520)에 나타난 것처럼 증발, 해빙의 생성과 용융, 강수 등이 있으며 각 수괴가 겪은 과정에 따라 다른 동위원소 값을 나타내게 된다. 특히 빙하의 동위원소값과 염도는 해수와 아주 다른 경향을 보이기 때문에 기여도 추정에 유용하게 활용될 수 있다.

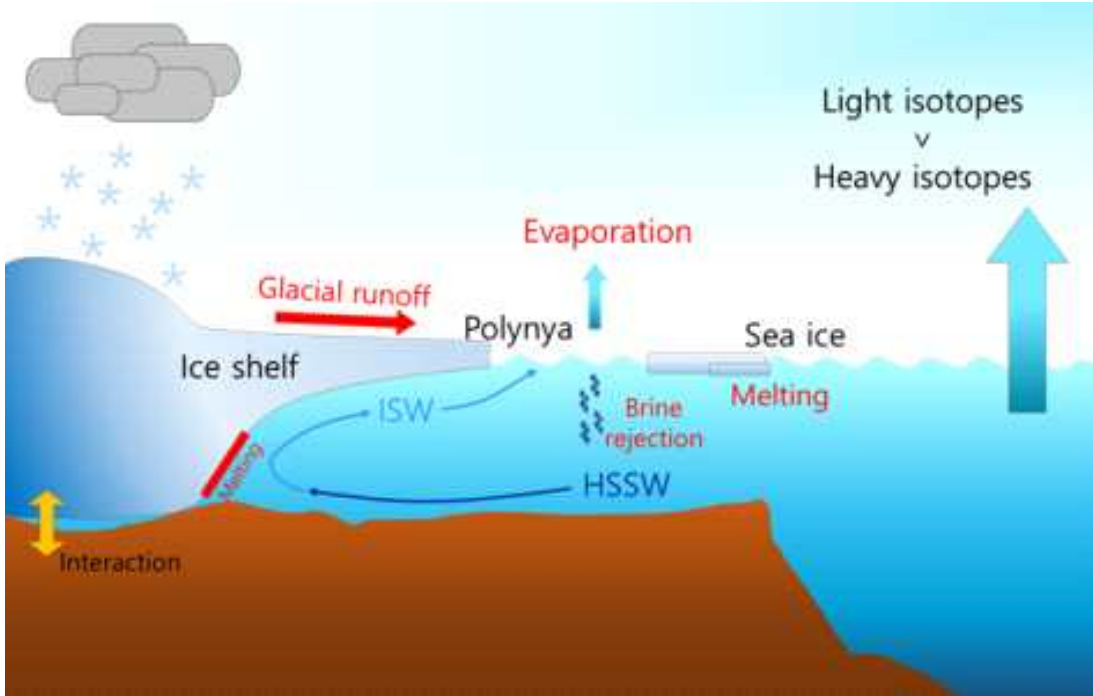


그림 520 연구지역의 동위원소 및 염도 변화 요건과 수괴 변화 과정

KOPRI

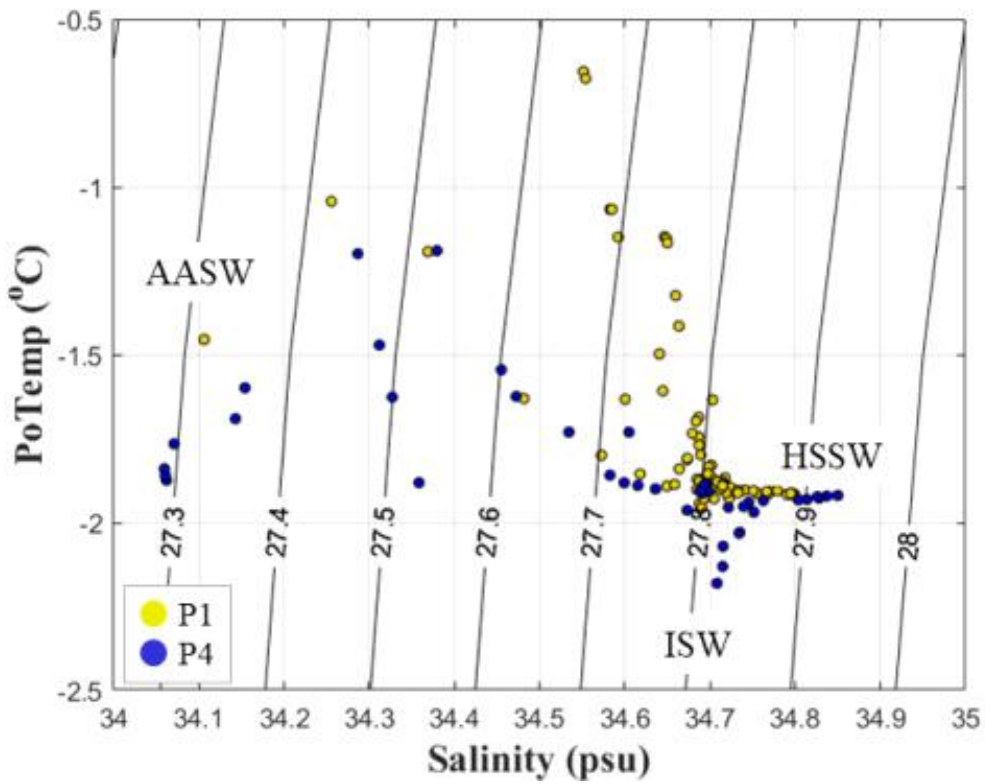


그림 521 1차년도(P1)와 4차년도(P4) 시료의 TS 도표

연구지역 주변에는 폴리아에서 형성된 고염대륙붕수(HSSW), HSSW가 빙하와 상호작용하여 형성되는 빙붕수(ISW), 바다 표층에서 대기, 생물 등 다양한 조건과 상호작용하여 형성되는 남극표층수(Antarctic Surface Water, AASW)등이 존재한다. 이 조건에 따라 1차년도와 4차년도에 채취하였던 시료를 그림 521과 같이 구분하였다. 1차년도에 비해 4차년도 시료에서는 더 고염의 HSSW가 나타났으며, ISW도 분명하게 나타났다. 1차년도의 시료는 HSSW와 환남극심층수(CDW)가 혼합된 양상을 보였으며, 4차년도는 증발, 해빙 용해 등 표층에서 일어난 변수에 영향을 많이 받았음을 알 수 있다. 물 안정동위원소의 수소와 산소 동위원소 값 선형관계를 통해서도, 다른 요인이 해수에 유입됨을 추정할 수 있다.

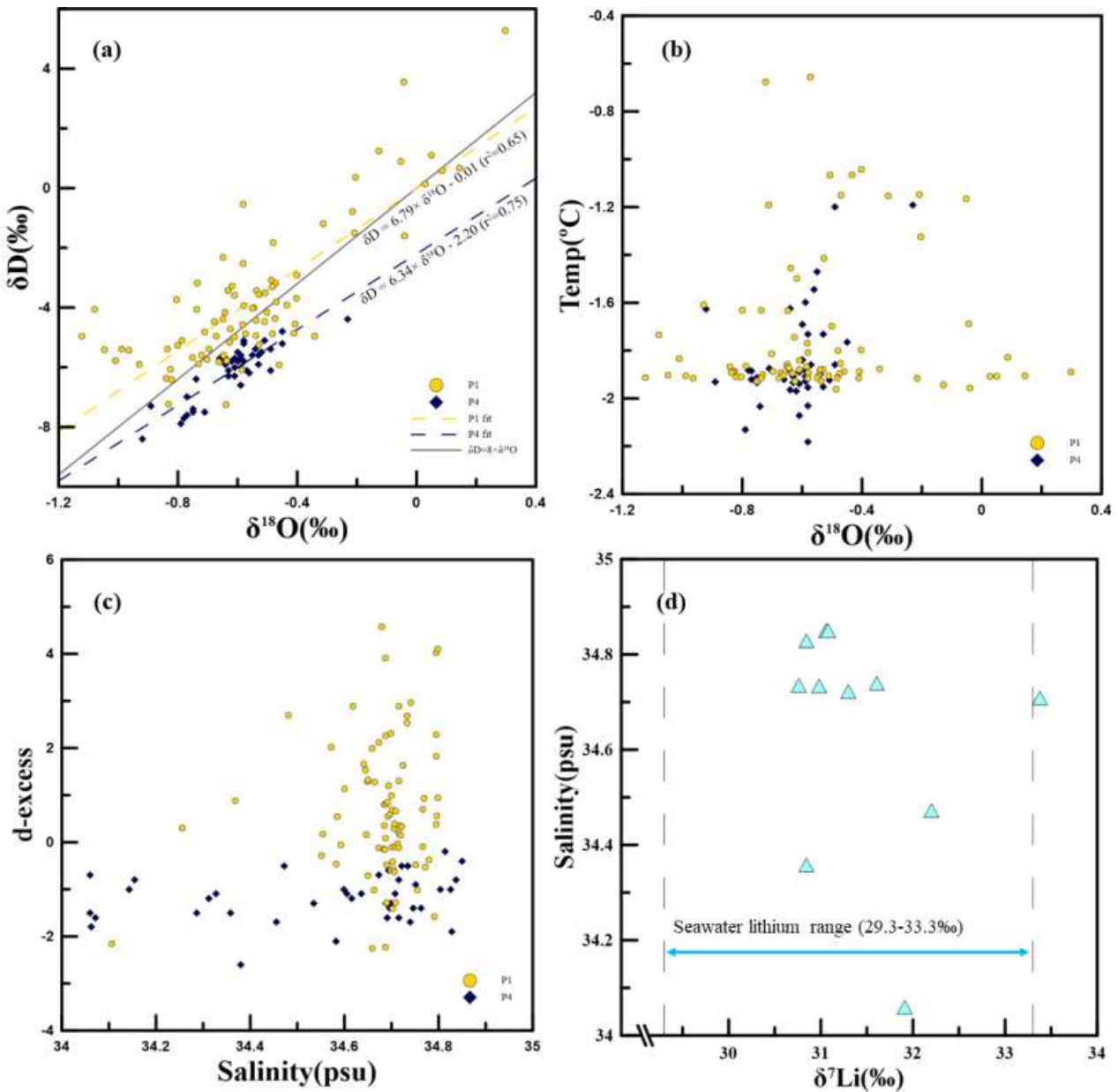


그림 522 (a) 해수 시료의 산소 및 수소 안정동위원소 값 (b) 산소안정동위원소와 수온 그래프(c) 중수소과잉값과 염도 그래프 (d) 4차년도 시료의 리튬안정동위원소 값

그림 522 (a)는 산소와 수소의 선형관계를 나타낸 것이다. 해수를 비롯하여 강수, 하천수 등은 모두 기울기 8의 값을 갖는다. 기울기의 변화는 재증발 등 동위원소 분화과정을 겪은 다른 요인의 유입을 의미한다. 4차년도 시료는 그림 521의 TS 도표에서 나타났듯이 해양 표층 변수에 의해 형성된 것으로 추정되는 시료가 많았는데, 산소와 수소 동위원소 선형관계 기울기 역시 1차년도 시료에 비해 감소한 값을 나타내고 있다. 산소와 수소의 관계를 나타내는 다른 요소로 중수소과잉값(d -excess)이 있다. 중수소과잉값은 지구천수선(Global Meteoric Water Line, GMWL; $\delta D = 8 \times \delta^{18}O + 10$)로부터 활용하는 것으로 $d = 8 \times \delta^{18}O - \delta D$ 로 나타낼 수 있다. 중수소과잉값은 보통 수원(water source)의 기원을 추정하는데 이용할 수 있다. 그림 522 (c)에서 나타나는 것처럼 4차년도의 시료는 대략 0부터 -2의 범위 내에 분포하는 것을 알 수 있다. 이를 통해 4차년도 시료는 일정한 요인으로부터 영향을 받았음을 추정할 수 있다.

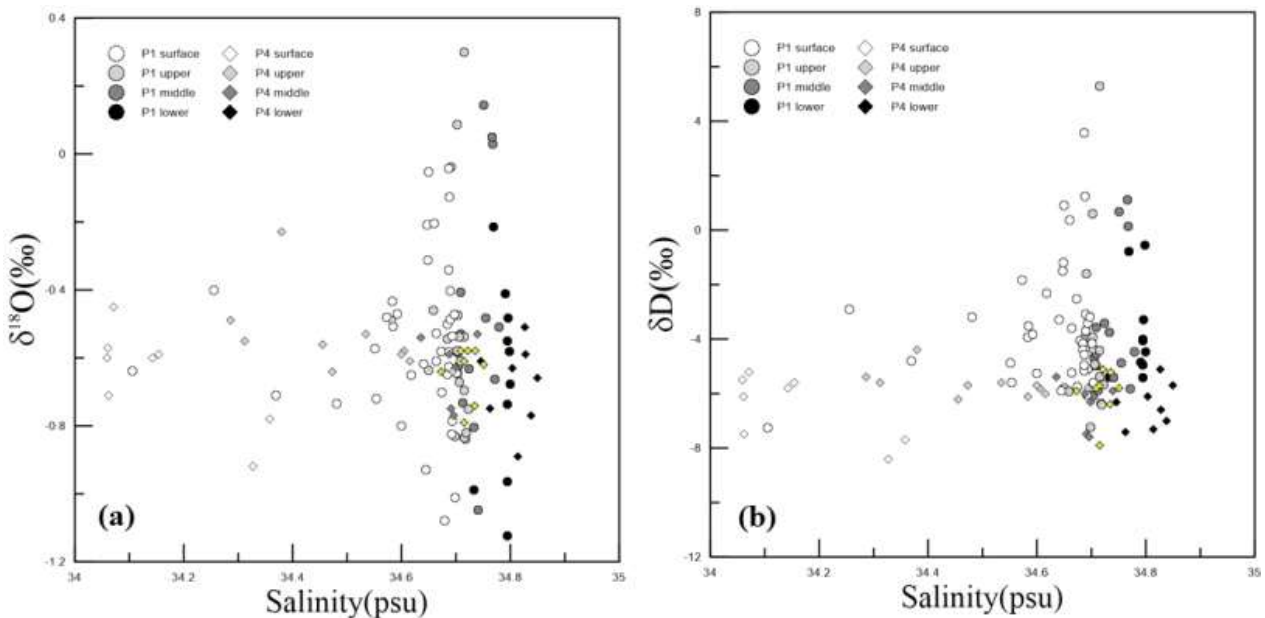


그림 523 산소동위원소(a)와 수소동위원소(b)의 동위원소-염도 그래프. ISW가 노란색으로 표기되어 있으며, 각 색은 다음과 같이 채취 깊이를 의미한다. ○ surface (~60m) ● upper (60m~300m) ● middle (300m~500m) ● lower (500m~)

4차년도 시료 중 빙봉수(ISW)로 추정되는 시료를 동위원소-염도 그래프에 도시하였다. 대체적으로 ISW는 서로 다른 정점에서 채수되었음에도 불구하고 비슷한 동위원소와 염도 조성을 갖는 것을 알 수 있다. 그러나 다른 해수 시료들과 비교하였을 때 절대적인 값으로 구분되지는 않는다. 이는 고염대륙붕수가 빙하와 만나 반응하는 과정에서 혼합되는 용빙수의 양이 적거나, 명백하게 다른 값을 나타낼 만큼 빙하와의 동위원소 교환반응이 충분히 이루어지지 않았기 때문으로 추정된다.

한편 리튬안정동위원소는 대륙의 화학적 풍화와 연관된 지시자로서 많이 활용되고 있다. 특히 규산염광물의 풍화작용 외에는 다른 요인에서 기인하는 것이 거의 없어, 수문학 연구에서 지질 매체와의 상호작용 연구에 널리 사용되고 있다. 빙하 용융수 중에서도 빙하 하부에서 대륙과 상호작용하며 형성되어 흘러나온 용융수를 분리하고자 리튬안정동위원소 값을 활용하였다. 리튬 안정동위

원소는 4차년도와 5차년도 연구항해에서 채집하였다. 리튬안정동위원소는 컬럼 작업을 통해 원소를 분리한 후 한국기초과학지원연구원의 MC-ICP-MS를 활용하여 분석하였다. 그림 522 (d)는 4차년도의 리튬안정동위원소 값을 나타낸 것으로, 파란 화살표는 Tang *et al.*(2007)에서 정리한 리튬안정동위원소값 중 해수 내의 리튬동위원소 분포를 나타낸 것이다. 분석된 결과 중 대부분이 해수의 리튬안정동위원소 범위 내에 포함되는 것을 알 수 있다. 이는 시료 채취 위치가 대륙과 반응한 혼합 지역으로부터 멀리 떨어져있고, 해수와의 혼합으로 인한 희석효과가 발생하여 명백한 차이를 나타내지 못한 것으로 추정된다.

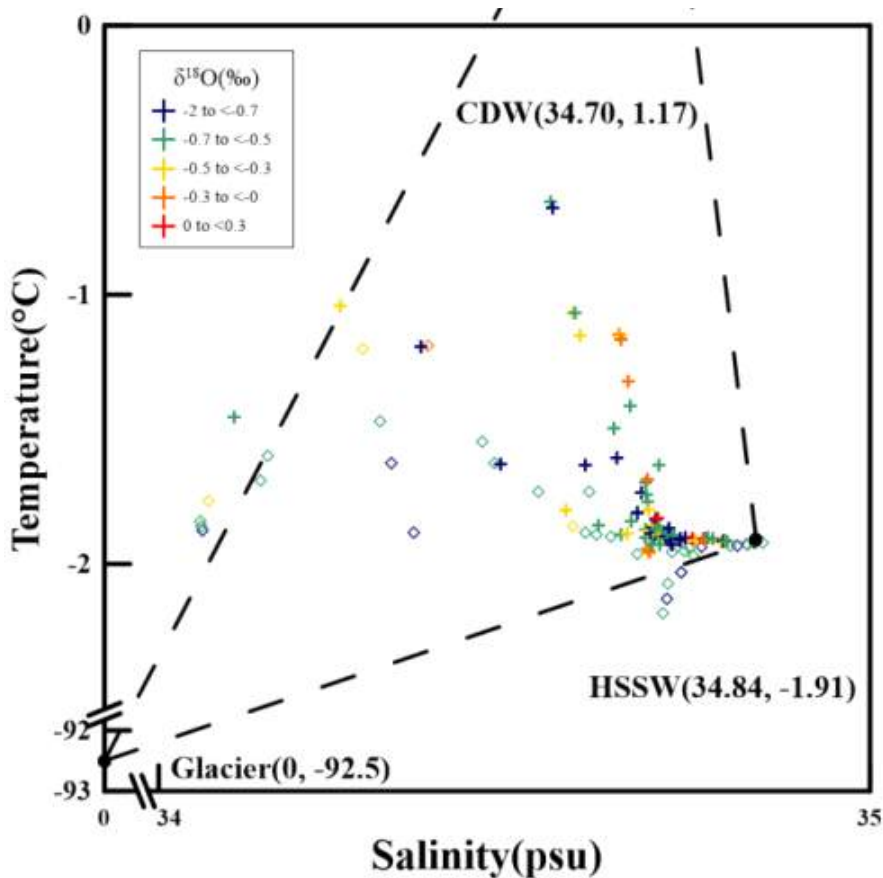


그림 524 TS 도표와 함께 나타낸 각 시료의 산소동위원소값. CDW, HSSW, Glacier는 해수의 온도와 염분에 영향을 주었을 것으로 추정되는 단성분(endmember)

그림 524에서는 테라노바 만 지역 해수의 동위원소, 수온, 염도에 영향을 주었을 것으로 추정되는 세 가지 단성분과 함께 시료의 값을 나타내었다. CDW와 HSSW 값은 Jacobs(1985) 논문을 참고하였으며, 실제 시료 값도 이에 상응하는 것으로 나타났다. Glacier의 온도 값은 Jenkins(1999)를 참조하였다. 각 시료는 3개의 단성분으로 구성된 삼각형 안에 대부분 위치하고 있다. 삼각형 바깥의 요소는 세 가지 단성분 외의 다른 영향을 받았음을 의미한다. ISW는 다른 시료에 비해 상당히 적은 동위원소 값을 나타내고 있다. 1차년도 시료는 4차년도 시료에 비해 대체적으로 동위원소 값이 크며, 4차년도의 시료는 ISW를 비롯하여 대체적으로 동위원소 값이 작다. 빙하는 바다에서 증발한 수증

기가 강설로 내려 형성되었기 때문에 해수에 비해 상당히 작은 값을 갖는다. 해안에서 약 60 km 정도 떨어져있는 STYX 지역의 평균 산소, 수소 동위원소 값은 (-34 ‰, -267 ‰)이다. HSSW가 빙하와 반응하여 형성되는 ISW는 빙하와 동위원소 교환반응을 일으킨다. 4차년도 시료 중 HSSW로 분류된 7개 시료의 평균 산소동위원소 값을 활용하여 HSSW(-0.68 ‰)에 1%의 빙하용융수가 혼합되었다고 가정할 때 나타나는 산소동위원소값 차이는 약 0.33 ‰인데 이는 Jacobs(1985) 등에서 나타난 ISW와 HSSW의 산소동위원소값 차이(0.12 ‰)보다 크다. 즉 ISW에서 용빙수의 비율을 1% 이내로 추정할 수 있다. 산소동위원소를 활용한 혼합비율 추정의 경우 분석오차를 고려하였을 때 최소 0.2 %부터 혼합비 추정이 가능하다. 4차년도 해수 안정동위원소 분석 결과 HSSW와 ISW의 산소동위원소 값 차이가 약 0.02 ‰로, 최소 추정범위보다 적었다. 즉 테라노바만에서 형성된 ISW에서 해수의 혼합비는 0.2 % 이내임을 추정할 수 있다. 해수 물 안정동위원소는 빙하 자체를 단성분으로 사용함으로써, 다른 요소로 인한 불확실성을 줄일 수 있다. 해수 안정동위원소의 분석오차를 최소화하고, 다른 화학적 요소를 함께 활용한다면 보다 정교한 혼합비율 추정이 가능할 것으로 생각된다.

(4) 완전최소자승법과 보통최소자승법을 이용한 물안정동위원소의 선형관계식 비교

(가) 배경

물의 순환(water cycle)에서 물이 어떠한 물리적 과정을 거쳤는가를 알기 위해서 물의 두 안정동위원소(δD 와 $\delta^{18}O$)가 지난 50 여년간 추적자(tracer)로 사용되어 왔다(Lee *et al.*, 2013). 해양에서 증발(evaporation) 또는 대류(convection)에 의해 대기로 이동된 수증기가 어떠한 경로로 이동하여 왔는가를 알기 위해서 수증기의 안정동위원소(stable water vapor isotope) 및 강우동위원소를 측정하여 추적자로 활용하고 있다(Kim *et al.*, 2016). 극지역에서는 빙하 및 눈의 안정동위원소를 이용하여 과거의 온도 및 빙하의 연대추정에 활용하고 있다(Kwak *et al.*, 2015). 극지역에서 물의 안정동위원소를 추적자로 활용하기 위해서는 눈이 얼음으로 형성되는 과정에서 눈 또는 얼음의 용해가 발생하게 되면 과거의 온도를 복원하는 데에 오차가 발생하게 된다. 이를 파악하기 위해서는 산소와 수소의 두 동위원소간의 선형관계(linear relationship)를 이용하면 용해가 발생하였는지를 파악할 수 있다(Lee *et al.*, 2009; Lee *et al.*, 2010).

과거에는 분석의 어려움으로 인해 산소동위원소를 주로 추적자로 사용하여 왔으며, 지난 20여년간 온라인분석방법의 발전으로 인해 수소동위원소도 많이 활용되고 있다. 수소동위원소는 700°C 이상의 고온에서 크롬(Cr)을 산화시켜 수소기체를 분석하며 산소는 이산화탄소와 평형을 시켜 이산화탄소를 동위원소질량분석기를 이용하여 분석한다(Lee *et al.*, 2009). 최근 레이저분광법(laser-spectroscopy)의 도입으로 물의 산소, 수소동위원소를 동시에 분석이 용이해짐에 따라 산소 및 수소동위원소의 선형적인 관계를 이용하여 물의 물리적 과정을 이해하려는 노력이 이전보다 많이 진행되고 있다(Lee *et al.*, 2010; Kim *et al.*, 2016). 따라서 산소 및 수소동위원소의 선형관계를 이용한 연구가 다양하게 진행되고 있으며, 이를 통해 물의 물리적과정을 이해하기 위한 시도가 진행되고 있다(Lee *et al.*, 2010).

물의 두 안정동위원소의 선형관계는 그 동안 보통최소자승법(ordinary least squares method, OLS)을 이용하여 선형관계의 기울기와 절편을 제시하였다(Lee *et al.*, 2010). 전 지구적으로 해양에서 기원한 수증기가 응축되어 비가 내리게 되면 강우의 두 안정동위원소의 선형관계에서 기울기는

거의 8을 나타낸다(Dansgaard, 1964). 중수소과잉값($d=8 \times \delta 18O - \delta D$)은 이 선형관계의 절편으로서 해양에서 수증기가 기원할 때의 상대습도를 나타낸다(Dansgaard, 1964). 중수소과잉값이 0에 가까울수록 상대습도가 100%에 가까우며, 값이 커짐에 따라 기원지에서의 상대습도는 감소하게 된다. 보통최소자승법은 가로축에 해당되는 산소동위원소의 오차가 없다는 것을 가정으로 세로축에 해당되는 수소동위원소의 오차가 최소가 되는 선형관계를 구하는 것이다. 하지만, 산소동위원소도 오차가 존재하므로, 산소와 수소동위원소의 오차를 모두 고려하는 완전최소자승법(total least squares method, TLS)을 산소와 수소의 선형관계에 적용시켜야 한다. 이는 본 연구에서 최초로 시도되었으며, TLS를 적용하기 위하여 남극 세종기지에서 획득한 눈 및 용설시료와 Lee *et al.*, (2013)에서 제시된 수증기 시료의 두 안정동위원소를 이용하였다. 용설시료와 수증기 시료의 동위원소 해석 모두 산소와 수소의 선형관계가 물순환에서 물이 어떻게 이동하는 가를 해석하는 데에 중요한 단서를 제공하였다. 따라서, 본 연구의 목표는 물의 두 안정동위원소의 선형관계를 해석할 때 OLS와 TLS를 적용하고 그 차이점을 이해하는 것이다.

(나) 연구방법 및 연구자료

상관관계(correlation)는 관심 있는 두 정량적인 변수간의 선형관계에서 그 방향성(direction)과 강도(strength)를 측정하는 것이다. 이를 이용하여 어떤 계(system)의 해(solution)를 근사적으로 구하기 위해서는 근사적으로 구하려는 해와 실제 해의 오차의 거리가 최소가 되는 개념이 최소자승근사법(least squares approximation)이다. 산소와 수소동위원소의 선형관계를 나타내는 방법으로는 OLS가 가장 일반적이다. 이는 측정된 자료의 수평방향(가로방향)의 변수는 오차가 없는 것으로 가정하고 수직방향(세로방향)으로 측정된 자료와 이를 설명하고자 하는 모델간의 거리를 최소가 되게 하는 방법이다. 이에 반해, 수평방향의 측정 자료에 오차가 존재하게 되면 측정자료의 위치에서 설명하고자 하는 모델간의 거리가 최소가 되는 방법을 찾아야 한다. 이러한 방법을 TLS라 하며 (Markovsky and Van Huffel, 2007; Petras and Bednarova, 2010), 이는 동위원소의 선형관계에 적용된 적이 없다. 수평방향에 나타내는 산소동위원소의 경우에도 오차가 존재하기 때문에 개념적으로는 완전최소자승법을 동위원소 자료에 적용하여야 한다. 그림 525은 이를 개념화하여 나타내었으며, 두 개념을 소개하고자 한다.

① 보통최소자승법과 완전최소자승

OLS는 설명변수(explanatory variable)와 반응변수(response variable)간의 관계를 설명하는 것이다. 즉, 위에서 언급한 것처럼 수평방향의 설명변수에 의해 수직방향의 반응변수는 결정, 또는 설명될 수 있다. 따라서, 반응변수 y 와 설명변수 x 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\hat{y}_i = a + bx_i \tag{1}$$

여기에서 b 는 기울기, a 는 절편을 나타내며, \hat{y}_i 는 OLS에 의해 예측된 y 값을 나타낸다. 하지만, 관측된 자료는 OLS에 의해 예측된 직선에 분포하지 않기 때문에 다음과 같이 가정할 수 있다.

$$y_i = a + bx_i + e_i \tag{2}$$

여기에서 e_i 는 오차(error) 또는 잔차(residual)를 나타낸다. OLS에서 오차는 y 에 의해서만 발생하기 때문에, 오차항은 다음과 같이 바뀔 수 있다.

$$e_i = y_i - (a + bx_i) \tag{3}$$

기하학적으로 e_i 는 관측된 y_i 과 예측된 \hat{y}_i 의 거리이며, 이를 최소화하는 방법은 e_i 의 제곱의 합을 최소화하면 된다. 이는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sum_{i=1}^n (e_i)^2 = \sum_{i=1}^n \{y_i - (a + bx_i)\}^2 \quad (4)$$

오차의 제곱의 합을 $Q(a, b)$ 로 나타내고 이를 a 와 b 의 두 변수에 대한 편미분을 0으로 하는 값을 구하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial Q}{\partial a} = -2 \sum_{i=1}^n \{y_i - (a + bx_i)\} = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial b} = -2 \sum_{i=1}^n \{y_i - (a + bx_i)\} \cdot x_i = 0 \quad (6)$$

식 (5)와 (6)을 정리하여 기울기(b)와 절편(a)을 구하면 다음과 같다.

$$na = \sum_{i=1}^n y_i - b \sum_{i=1}^n x_i \quad (7)$$

$$a = \bar{y} - b\bar{x} \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^n x_i y_i - a \sum_{i=1}^n x_i - b \sum_{i=1}^n (x_i)^2 = 0 \quad (9)$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (10)$$

여기에서 n 은 자료의 개수를 나타내며, \bar{x} 와 \bar{y} 는 각각 반응변수와 설명변수의 평균을 나타낸다. OLS가 수직적인 거리의 최소화에 기반하여 유도된 것이라면, TLS는 자료와 예측된 직선간의 거리가 최소화되는 방법이다. TLS의 수학적 접근은 이 논문의 범위를 벗어나기 때문에 개념에서부터 유도된 기울기와 절편의 계산식을 제시하였다. OLS와 동일하게 측정된 자료(x_i, y_i)와 그 자료와 직선의 거리를 가장 짧게 하는 기울기와 절편을 계산할 수 있다(Fig. 2). 이 경우에 가장 짧은 직선은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$e_i = \Delta y_i \cos \theta = \frac{\Delta y_i}{\sqrt{1 + \tan^2 \theta}} = \frac{\Delta y_i}{\sqrt{1 + b^2}} \quad (11)$$

OLS와 동일하게 오차 또는 직선의 길이가 가장 짧은 직선은 식 (4)와 같이 식 (11)을 변형할 수 있다.

$$\sum_{i=1}^n (e_i)^2 = \frac{1}{1 + b^2} \sum_{i=1}^n \{y_i - (a + bx_i)\}^2 \quad (12)$$

이를 OLS와 동일하게 편미분하고 편미분의 함수가 0을 가지는 값을 구하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial Q}{\partial a} = -2 \frac{1}{1 + b^2} \sum_{i=1}^n \{y_i - (a + bx_i)\} = 0 \quad (13)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial b} = -2 \frac{1}{1 + b^2} \sum_{i=1}^n \{y_i - (a + bx_i)\} \cdot x_i - 2 \frac{b}{(1 + b^2)^2} \sum_{i=1}^n \{y_i - (a + bx_i)\}^2 = 0 \quad (14)$$

식(13)을 정리하면 TLS의 절편도 OLS에서의 절편과 같은 식이 유도되게 된다. 식 (14)를 정리하

면 기울기(b)에 대한 2차방정식이 유도된다. 이차방정식을 근의 공식을 이용하여 해를 구하면 b 는 다음과 같다.

$$b = w \pm (v - w) \sqrt{w^2 + 1} \quad (15)$$

$$u = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2, \quad v = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2, \quad r = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}), \quad w = \frac{v - u}{2r} \quad (16)$$

② 눈안정동위원소 및 수증기 안정동위원소

본 연구에서는 서로 다른 계의 물안정동위원소를 이용하여 OLS와 TLS를 비교하였다. 먼저, 2013년 하계 기간을 이용하여 남극 세종기지 주변에서 눈과 융설시료 178개를 채취하고 냉동상태로 보관하여 분석 직전까지 극지연구소에서 냉동 보관하였다. 산소와 수소의 안정동위원소는 한국해양과학기술원 부설 극지연구소에 설치되어 있는 Picarro L2130-i를 이용하여 분석하였다. 레이저분광법 분석장비의 정밀도는 산소와 수소가 각각 0.2%, 1% 이하이다. 세종기지 주변의 눈과 융설시료는 OLS와 TLS를 모두 적용하여 비교를 시도하였다.

Lee *et al.* (2013)에서 태풍이 지나갈 때 서해안에 위치한 극지연구소에서 수증기안정동위원소를 레이저분광법을 이용하여 측정하고 수분(moisture)의 이동에 대하여 논의하였다. 산소와 수소의 수증기안정동위원소를 분석하고 OLS를 적용하여 수증기가 해안에서 증발 또는 대류에 의해 대기로 상승한 후 연구지역으로 이동하였음을 보였다. 본 연구에서는 Lee *et al.*, (2013)에서 제시한 수증기 동위원소 자료에 TLS를 적용하여 OLS로 나온 결과와 비교를 시도하였다.

③ 연구결과

물의 수소와 산소동위원소를 오프라인(offline)방식으로 전처리를 한 후 동위원소질량분석기(Isotope Ratio Mass Spectroscopy, IR-MS)를 이용하여 분석했던 시기에는 두 종류의 동위원소를 동시에 분석하는 것은 시간을 많이 필요로 했던 일이었기 때문에, 주로 분석이 용이했던 산소동위원소만을 이용하여 물의 순환을 이해하려고 하였다. 2000년대 전반부터 물안정동위원소는 온라인(online)방식과 2000년대 후반에 등장한 레이저분광법(laser-spectroscopy)의 등장으로 산소와 수소의 동시분석이 용이해지면서 비약적으로 물안정동위원소 연구의 수가 증가하고 있다. 국내에서도 레이저분광법을 이용한 물안정동위원소 분석법이 도입되어 극지역연구 및 지하수 연구에 다양하게 활용되고 있다(Jung *et al.*, 2013; Lee *et al.*, 2015)

해양에서 증발 또는 대류에 의해 생성된 수증기는 대기로 이동하면서 응축되어 비 또는 눈의 형태로 떨어지면서 점점 수증기의 동위원소 값은 낮아지게 된다. 해양에서 증발에 의해 생성된 수증기의 산소 및 수소동위원소의 선형관계는 기울기 8을 가지면서 동위원소 값은 낮아지게 되지만 기울기 8과 세로축의 절편 10의 선상에서 움직이게 된다(Dansgaard, 1964). 이를 지구천수선(Global Meteoric Water Line, GMWL)이라 부르며, 지구상의 강우는 이 직선상에서 동위원소 값이 움직이게 된다. 따라서, 강우의 두 동위원소의 선형관계의 기울기 8은 물순환에서 강우에 의한 영향을 파악하는 데에 많이 활용된다. 예를 들어, 토양수 또는 천부의 지하수의 두 동위원소의 선형관계가 기울기 8을 가지게 되면 이는 강우에 의한 직접적인 영향으로 파악될 수 있다. 지역별로 기울기가 8에서 벗어나는 경우도 있으며, 이를 지역천수선(Local Meteoric Water Line, LMWL)이라 부르며, 국내에서는 제주지역에서의 LMWL이 계절별로 보고되어 있다(Lee *et al.*, 1999). 이러한 계절성을

이용하여 제주도의 지하수가 언제 충전(recharge) 되었는지를 정량적으로 계산하였으며, 이 때 두 안정동위원소의 기울기는 매우 중요한 역할을 할 수 있다. 또한, 중수소과잉값($d = 8 \times \delta^{18}O - \delta D$)은 기울기가 8인 지구천수선의 세로축의 절편에 해당되며, 수증기가 기원한 해양의 습도가 증가하면 10보다 낮은 값을, 감소하면, 10보다 높은 값을 나타낸다.

극지역에서는 해양에서부터 이동한 수증기가 응축되면서 강우대신 눈으로 떨어지게 되지만 이 역시 두 안정동위원소의 관계는 8을 가지게 된다. 이후 눈이 녹지 않고 그대로 얼음으로 바뀐다면 그 눈의 기울기가 8을 유지하게 되지만, 눈 또는 빙하가 녹는 지역에서는 고체상인 얼음 또는 눈과 액체상인 물의 동위원소교환반응으로 인해 두 동위원소의 선형관계는 기울기 6.3을 가지게 된다 (Lee *et al.*, 2009; Lee *et al.*, 2010; Lee *et al.*, 2015). 따라서, 눈 또는 빙하가 녹아서 지하수를 충전하는 지역에서 이러한 영향을 파악하는 데에 두 동위원소의 선형관계는 도움을 줄 수 있다.

그림 527은 남극세종기지지에서 채취한 눈과 용설 시료의 동위원소결과를 산소와 수소의 선형관계로 나타내었다. OLS와 TLS를 적용하여 구한 선형관계의 변수들은 표 59에 제시하였다. 두 방법 모두 기울기가 각각 7.00(OLS), 7.16(TLS)으로 8보다 작은 값을 나타내었다. 세로축의 절편은 각각 -5.89(OLS), -4.05(TLS)를 나타내었다(그림 553a). 먼저, 이는 세종기지 주변의 대부분의 눈은 해양에서 수증기가 응축되어 눈으로 떨어진 이후 용융되어 존재하고 있음을 알 수 있다. 두 방법으로부터 계산된 기울기의 표본오차는 0.08이며, 세로축의 절편에 대한 표본오차는 0.94이다. 그림 527b에서는 관찰된 자료와 두 모델방법에 의해 구해진 값과의 차이를 나타낸 것이다. 잔차에 어떠한 특징도 없으며 두 방법 간의 차이도 그리 많지 않음을 알 수 있다.

그림 528은 수증기의 두 안정동위원소 값의 선형관계를 OLS와 TLS를 이용하여 나타내었다. 이에 관련된 통계값은 표에 제시되어 있다. 두 방법 모두 기울기가 각각 7.75(OLS), 7.87(TLS)로 8과 거의 가까운 값을 보였다. 세로축의 절편은 각각 10.06(OLS), 12.01(TLS)를 나타내었다. 두 방법 으로부터 계산된 기울기의 표본오차(standard error)는 0.14이며, 세로축의 절편에 대한 표본오차는 2.40이다. 기울기가 8에 가까운 것은 지구천수선과 동일한 물리적과정을 겪었으므로, 서해안의 수증기는 해양에서 증발하여 더 이상의 물리적과정 없이 연구지역으로 이동하였음을 지시한다(Lee *et al.*, 2013). 그림 528b에서는 관찰된 자료와 두 모델방법에 의해 구해진 값과의 차이를 나타낸 것이다. 잔차(residual)에 어떠한 특징도 없으며 두 방법 간의 차이도 그리 많지 않음을 알 수 있다. 따라서, 물리적과정을 관찰하기 위하여 산소와 수소의 선형관계를 파악하기 위해서는 OLS와 TLS간의 차이가 크게 없음을 보여 준다.

④ 결론

본 연구에서는 남극 세종기지 주변의 눈과 용설 시료 및 서해안의 수증기 시료를 이용하여 보통 최소자승법(OLS)과 완전최소자승법(TLS)의 차이를 비교하였다. 산소와 수소의 안정동위원소 분석 값은 불확정성을 포함하고 있기 때문에, 이론적으로는 TLS를 적용하여야 하지만, 두 동위원소의 선형관계에 OLS가 그 동안 적용되어 왔다. 보통최소자승법은 상용프로그램을 이용하여 쉽게 계산이 가능하지만, 완전최소자승법은 본 논문에서 제시한 것처럼 사용자가 계산을 수행해야 하는 번거로움이 있다.

선형관계의 기울기를 계산하고 해석하는 것은 동위원소 수리학(isotope hydrology)에서는 매우 중요한 과정이다. 세종기지 눈과 용설시료와 및 서해안 지역의 수증기의 두 안정동위원소($\delta^{18}\text{O}$, δD)의 선형관계를 파악하면 물이 어떻게 이동하였는가에 대한 물리적 과정을 파악할 수 있다. 두 방법을 이용하여 선형관계를 계산하였을 때 크게 다르지 않음을 알 수 있었다. 기울기의 오차 및 차이가 물리적인 과정을 다르게 해석할 만큼의 차이가 발생하지 않았다(7.00 vs. 7.16, 7.75 vs. 7.87, OLS vs. TLS). 해수의 물 안정동위원소에서 산소동위원소와 수소동위원소의 관계는 강수 외에 추가로 증발, 결빙 등 다른 요인이 있었음을 지시하는 것으로 활용될 수 있다. 통계적인 방법을 통해 두 성분이 모두 오차를 갖는 경우에도 기존에 활용하던 OLS를 활용할 수 있었다.

표 60 산출된 OLS and TLS 비교값

		OLS		TLS	
Antarctic snow	slope	7.00		slope	7.16
	intercept	-5.89		intercept	-4.05
	R^2	0.9778		R^2	0.9768
Water vapor	slope	7.75		slope	7.87
	intercept	10.06		intercept	12.01
	R^2	0.9847		R^2	0.9842

극지연구소

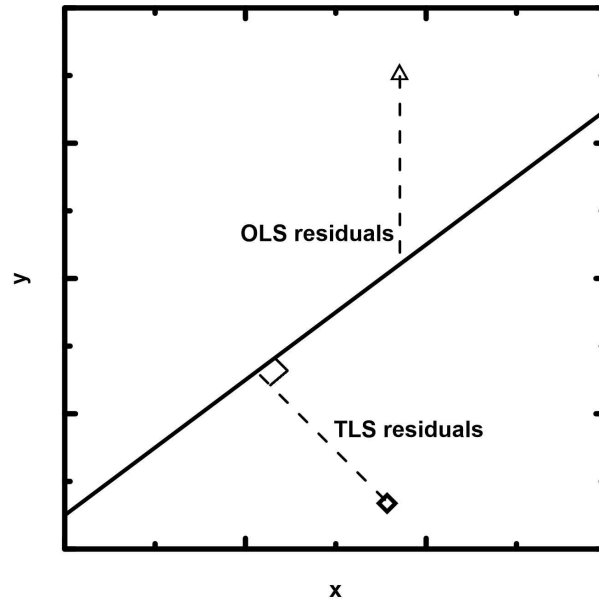


그림 525 보통최소자승법(OLS)과 완전최소자승법(TLS)의 개념도. 실선은 $y=a+bx$ 의 추세선을 나타내며, 점선은 추정되는 오차를 의미함

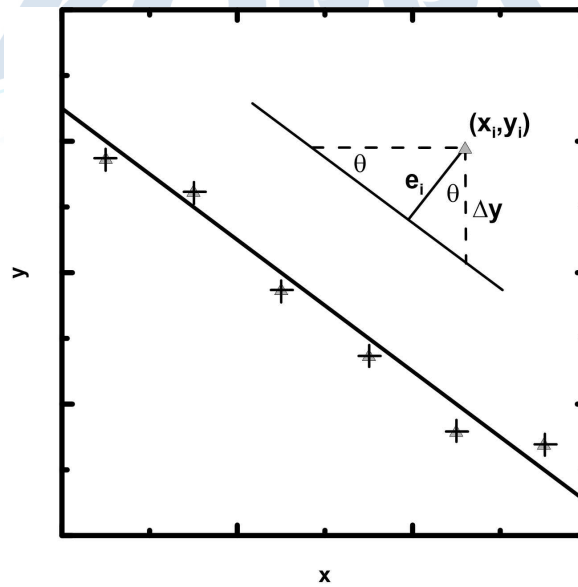


그림 526 직선에 대한 완전최소자승법

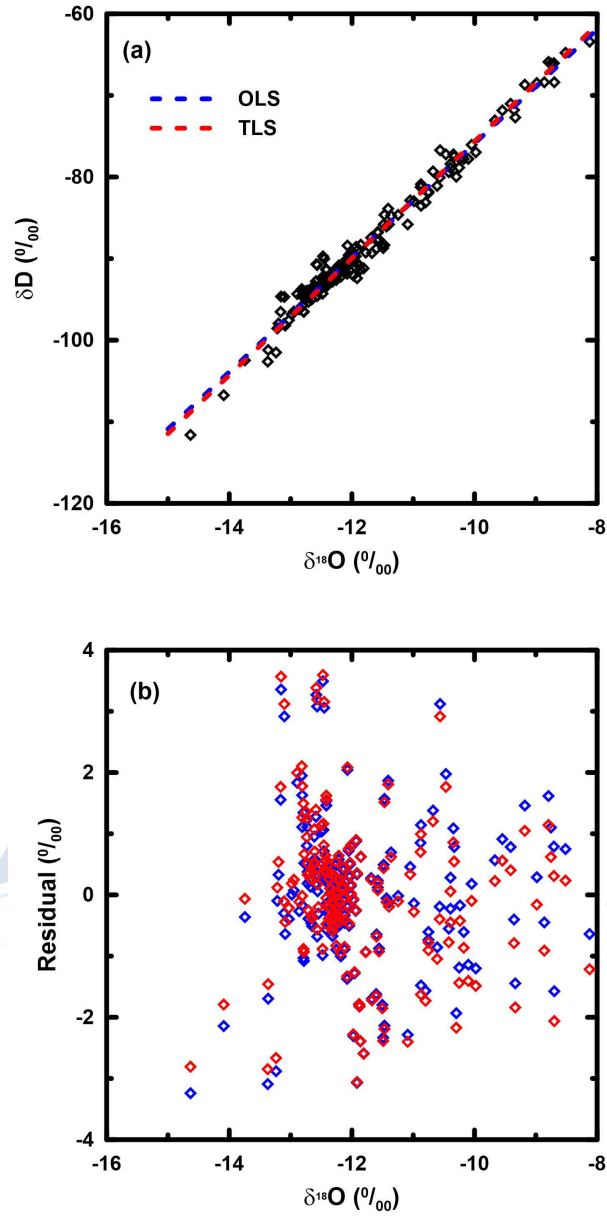


그림 527 (a) 보통최소자승법과 완전최소자승법을 사용하여 나타낸 세종기지에서 채취한 눈 시료와 용빙수 시료의 수소 및 산소 동위원소비의 선형관계 (b) 관찰된 자료와 보통최소자승법, 완전최소자승법을 각각 활용해 구한 산소동위원소 값 간의 차이

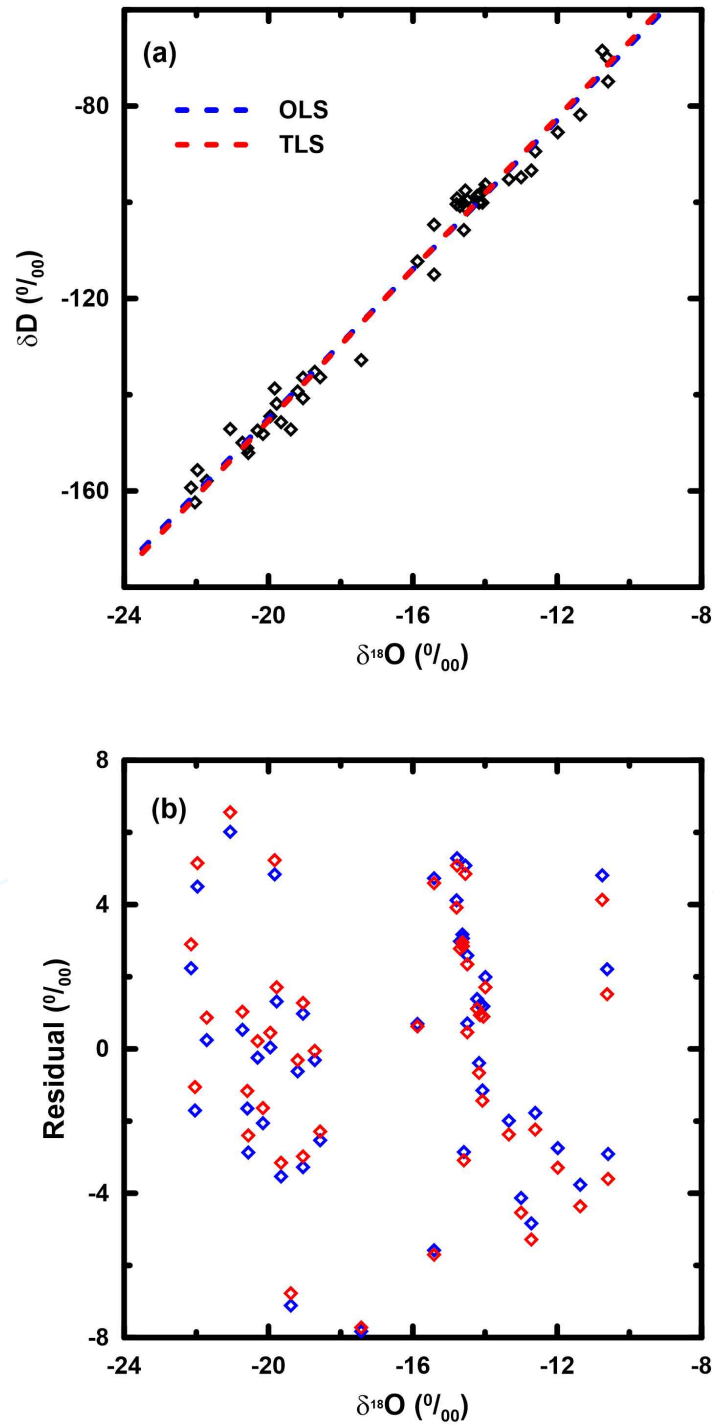


그림 528 (a) 보통최소자승법과 완전최소자승법을 사용하여 나타낸 Lee *et al.* (2013)에서 사용된 수증기의 산소 및 수소동위원소비의 선형관계(b) 관찰된 자료와 보통최소자승법, 완전최소자승법을 각각 활용해 구한 산소동위원소값 간의 차이

(5) 해수침투 발생 시 혼합비 계산의 오차에 관한 연구

자연적 또는 인위적인 요인에 의해 해수와 담수가 섞이는 과정인 해수침투는 해안지역에서 이용할 수 있는 지하수의 양을 감소시키는 역할을 한다. 추적자를 이용하여 지하수와 해수가 얼마만큼 혼합이 되었는가를 이해하는 것은 매우 중요하며, 이러한 혼합계산 시 추적자의 농도를 바탕으로 하기때문에 불확정을 제시하는 것도 매우 중요하다. 해수침투가 발생할 때 해수와 지하수의 혼합비(mixing ratio)는 비반응추적자(conservative tracer)의 질량보존(mass conservation)방정식을 정립하여 혼합비를 계산한다. 주로 사용되는 추적자에는 염소이온(Cl^-), 브롬화이온(Br^-), 물의 두 안정동위원소인 산소와 수소동위원소($\delta^{18}\text{O}$, δD)가 주로 사용된다. 연구지역의 지하수 중에서 배경농도에 해당되는 시료와 연구 지역 주변 해수시료의 추적자 농도를 분석하고 질량보존방정식을 이용한다. 해수침투가 얼마만큼 일어났는가에 대한 해수의 경우에는 분석의 어려움과 이전 연구에서 분석값이 많이 발표되어 있는 이유로 인해 문헌값을 이용하거나 주변 해안에서 해수 시료를 채취하고 평균값을 주로 이용한다. 이러한 값을 이용하여 지하수와 해수의 혼합비(mixing ratio)를 계산하게 되면, 오차(uncertainty)가 발생하게 된다. 이는 단성분 화학조성값이 지역 또는 시간에 따라 다르기 때문이다. 따라서, 본 연구에서는 이러한 오차를 불확정성의 원리를 이용하여 계산하고 어떠한 요인에 의해서 오차가 증가 또는 감소하는가를 논의하였다. 다음 장에서는 단성분 혼합분석에서 발생하는 오차에 대한 수학적인 미분방정식을 고찰해 보았으며, 3장에서는 2장에서 제시한 수학적인 식으로부터 계산된 결과를 통해 해수침투 시 계산된 혼합비의 오차결과를 제시하였다. 본 연구에서는 이러한 해수와 담수의 혼합비 계산시 발생하는 오차를 불확정성의 원리를 이용하여 결정하였다. 또한 해수침투 혼합비를 계산할 때 평균값과 표준편차의 차이에 의해 발생할 수 있는 혼합비의 오차를 제시하였다.

(가) 단성분 혼합분석(End Member Mixing Analysis, EMMA)

해수의 혼합(mixing) 과정을 이해하는 데 가장 많이 사용되는 방법이 추적자(tracer)의 농도 또는 동위원소 조성을 이용한 단성분 혼합분석(EMMA)이다(Kim *et al.*, 2017). EMMA를 수행하기 위해서는 추적자로 사용되는 단성분 사이의 화학조성 또는 동위원소 비율의 차이가 커야 하며, 추적자는 지질매체와의 반응으로 인해 농도 및 동위원소 비율이 변하지 않아야 한다. 해수와 담수의 혼합비(mixing ratio)를 구하기 위해서 연구지역 지하수의 배경농도(background concentration of groundwater)와 해수의 화학조성을 각 단성분(end member)으로 가정할 수 있다(Kim *et al.*, 2017). 추적자로는 주로 비반응추적자(conservative tracer)인 염소이온, 브롬화이온 및 물의 두 안정동위원소를 이용하며 질량보존의 법칙을 이용한 다음의 식 (1)으로 시료의 혼합비를 나타낼 수 있다(Lee *et al.*, 2013).

$$C_{a,gr} = xC_{sea} + (1-x)C_{p,gr} \quad (1)$$

여기서, x 는 해수와 담수의 혼합비를 나타내며, $C_{a,gr}$ 는 해수의 영향을 받은 지하수의 추적자농도이며, C_{sea} 와 $C_{p,gr}$ 는 해수의 추적자농도 및 연구지역 지하수의 추적자 배경농도에 해당된다. 혼합비를 다음과 같이 정리될 수 있다.

$$x = \frac{C_{a.gr} - C_{p.gr}}{C_{sea} - C_{p.gr}} \quad (2)$$

해수와 담수의 혼합비(x)는 식(2)를 사용하여 정량적으로 계산할 수 있으며, x 의 표준오차(standard error)는 가우스의 불확정성전파(Gaussian error propagation)를 이용하여 상대오차를 구할 수 있으며, 다음과 같이 정리될 수 있다(Genereux, 1998).

$$s_x^- = \sqrt{\left(\frac{\partial x}{\partial C_{a.gr}} \Big|_{C_{a.gr}, C_{p.gr}, C_{sea}} s_{C_{a.gr}}^- \right)^2 + \left(\frac{\partial x}{\partial C_{p.gr}} \Big|_{C_{a.gr}, C_{p.gr}, C_{sea}} s_{C_{p.gr}}^- \right)^2 + \left(\frac{\partial x}{\partial C_{sea}} \Big|_{C_{a.gr}, C_{p.gr}, C_{sea}} s_{C_{sea}}^- \right)^2} \quad (3)$$

여기서, s_x^- 는 x 의 표준오차를 나타내며, $s_{C_{a.gr}}^-$, $s_{C_{p.gr}}^-$, $s_{C_{sea}}^-$ 는 각각 해수의 영향을 받은 지하수, 배경지하수, 해수 추적자 농도의 상대오차를 나타낸다.

식(3)에서 해수와 지하수의 혼합비율(x)의 상대오차를 계산할 때, 세 가지의 제공항이 존재한다. 여기서, 첫 번째 제공 항에서 해수의 영향을 받은 지하수 자체의 농도변화에 의해 발생하는 x 의 표준오차를 수학적으로 나타내면 식 (4)와 같다.

$$\Delta x = \frac{\partial x}{\partial C_{a.gr}} \Delta C_{a.gr} = \frac{1}{(C_{sea} - C_{p.gr})} \Delta C_{a.gr} \quad (4)$$

여기서 Δx 는 x 의 계산된 오차이다. 배경지하수의 농도변화에 의해 발생하는 상대오차, 즉 식(3)에서 두 번째 제공 항에 해당되는 것을 수학적으로 표시하면 식 (5)와 같다.

$$\Delta x = \frac{\partial x}{\partial C_{p.gr}} \Delta C_{p.gr} = \frac{(C_{a.gr} - C_{p.gr}) - (C_{sea} - C_{p.gr})}{(C_{sea} - C_{p.gr})^2} \Delta C_{p.gr} = \frac{x - 1}{(C_{sea} - C_{p.gr})} \Delta C_{p.gr} \quad (5)$$

해수의 영향을 받은 지하수의 시료의 농도에 분석오차가 없다면 $\Delta C_{a.gr}$ 은 0에 수렴하므로 식(4)에 의한 오차는 없다고 할 수 있다. 또한, 배경지하수의 농도 역시 분석오차가 없다면 $\Delta C_{p.gr}$ 은 0에 수렴하므로 식(5)에 의한 오차 역시 없다고 할 수 있다. 마지막으로, 해수의 농도변화에 의해서 발생하는 상대오차, 즉 식(3)에서 세 번째 제공항에 해당되는 것을 다음과 같이 식 (6)으로 나타낼 수 있다.

$$\Delta x = \frac{\partial x}{\partial C_{sea}} \Delta C_{sea} = -\frac{(C_{a.gr} - C_{p.gr})}{(C_{sea} - C_{p.gr})^2} \Delta C_{sea} = -\frac{x}{(C_{sea} - C_{p.gr})} \Delta C_{sea} \quad (6)$$

ΔC_{sea} 는 C_{sea} 의 오차이며, 이는 해수의 추적자농도로 사용되는 값과 지역에 따른 해수의 추적자농도 값의 차이이다. 예를 들어, 지역에 따른 해수 추적자의 농도 값을 고려하지 않고 평균값을 사용할 때 발생할 수 있는 차이이다. 또는, 해수 시료 여러 개를 채취하고 분석한 평균과 표준편차 간의 차이도 될 수 있다. 따라서 식 (6)에 의하면 해수와 지하수의 혼합비(x)를 고려하였을 때 발생하는 오차는 해수와 배경지하수의 농도 차에 반비례하며 혼합비 자체와 해수 추적자농도의 차이에 비례한다.

세 가지의 제품 항에서 처음 두 항은 0에 수렴하였으며, 마지막항의 해수농도의 표준편차에 의한 상대오차항만이 존재함을 알 수 있다. 따라서 다음 장에서는 해수 추적자의 농도의 편차에 의한 상대오차를 계산하기 위해 실제 연구에서 사용된 해수의 농도를 Table 1에 제시하였다. Table 1에 제시된 해수의 Cl^- 와 Br^- 농도의 평균 및 표준편차는 각각 $18170 \pm 2293 \text{mg/L}$, $76.7 \pm 24 \text{mg/L}$ 이었다.

(나) 연구 결과 및 토의

앞 장에서 해수의 추적자 농도의 차이에 의해 해수침투시 지하수와 해수 혼합비(x)의 상대오차가 결정됨을 보였다. 식 (2)에서 해수의 추적자 농도에 변화가 발생하면 x 의 오차가 발생함을 알 수 있다. 식 (2)에서 사용된 해수의 추적자 농도 평균값에 비해 실제 해수의 추적자 농도가 낮다면 x 값을 과대평가(overestimate) 할 수 있으며, 높다면 x 값을 과소평가(underestimate) 할 수 있다(식 6). x 의 오차는 x 값 자체, 해수추적자의 농도변화에 비례하여, 해수추적자와 배경지하수 추적자 간의 농도차에 반비례함을 알 수 있다. 표 60의 평균값과 표준편차를 이용하여 그림 529은 Cl^- , 그림 530은 Br^- 의 오차값을 나타내었다. 그림 510은 식 (6)에 의한 x 의 상대오차를 언급한 세 가지의 함수로 나타낸 것이다.

그림 510에서 수직축($C_{sea} - C_{p,gr}$)의 0을 기준으로 윗부분은 x 값을 과소평가 한 영역이며, 아랫부분은 x 값을 과대평가 한 부분이다. ΔC_{sea} 를 표준편차 값으로 가정한다면, 그림 529과 같은 오차값의 분포를 얻을 수 있다. 예를 들어, 여러 지역에서 채취한 해수의 평균값이 18170mg/L 이며 표준편차가 $\pm 2293 \text{mg/L}$ 라고 가정하여 EMMA를 이용하여 해수침투가 일어날 때의 혼합비를 계산한다고 가정해 볼 수 있다(Shin *et al.*, 2017). 이 때, 혼합비가 10%이며, 배경지하수의 염소이온농도가 거의 0이라고 한다면, 오차값은 ∓ 0.012 ($\mp 1.2\%$)만큼 발생하게 된다. 다시 말해, 평균값이 18170mg/L 인 해수 농도를 가지는 지역에서 $+1\sigma$ 의 차이가 있는 시료($20463 \text{mg/L} = 18170 \text{mg/L} + 2293 \text{mg/L}$)는 -1.2% 만큼의 오차를 발생시킨다.

그림 530은 Br^- 이온을 추적자로 사용하고 표 60의 값을 이용하여 오차를 나타낸 것이다. 염소이온과 브롬이온 모두 문헌에 제시된 값들의 평균과 표준편차를 이용하였지만 브롬이온의 경우가 표준편차/평균의 비율이 높아(염소이온과 브롬이온 각각 12.6%, 32.0%), 염소이온과 같이 평균 (76.7mg/L)과 표준편차($\pm 24 \text{mg/L}$)를 적용하게 되면, 오차값이 ∓ 0.032 ($\mp 3.2\%$)만큼 발생하게 된다 (10% 혼합비 가정). 즉, 평균값과 적용하는 값의 차이가 클수록 오차의 절대 값은 커지게 된다.

해수침투가 발생하면 해수와 혼합된 지하수와 지질매체간의 다양한 지구화학적인 반응이 일어난다(Liu *et al.*, 2017). 그 중에서 가장 대표적인 것이 양이온교환반응(cation exchange)인데, Na^+ 가 Ca^{2+} 로 교환되는 반응은 다음과 같이 표현될 수 있다.



여기에서, X 는 이온교환반응이 일어날 수 있는 지질매체를 나타낸다. 혼합비가 결정되면, 혼합된 지하수의 이론적인 화학조성이 결정될 수 있으며 실제 시료가 가지는 값과의 차이(이온델타)를 구할 수 있다(ΔNa^+ , ΔCa^{2+} , ΔMg^{2+} 등). 예를 들어, 시료의 ΔCa^{2+} 값과 ΔNa^+ 값이 모두 양의 값을 가지게 되면 이는 시료에 이론적인 값 이상이 들어 있는 것을 의미하므로 암석에서의 용해(dissolution)을 의미하게 된다. 반대로, 두 값 모두 음의 값을 가지게 되면 이는 이론적인 값 이하로 들어 있는 것을 의미하므로 침전(precipitation)을 뜻하게 된다. 따라서, 혼합비가 해수침투가 일어날 때 지구화학적변화를 이해하는 데에 중요한 역할을 하며, 특히 값이 0 근처에서 오차에 의해 용해와 침전이 결정될 수 있다.

해수침투가 일어나는 해안지역에서 해수가 얼마만큼 담수와 혼합하였는가를 결정하는 것은 매우 중요한 일이다. 이번 연구를 통하여 해수침투가 발생하는 지역에서 해수와 담수의 혼합비를 계산할 때 오차가 발생할 수 있음을 보였다. 이러한 오차로 인하여 해수와 담수가 혼합될 때 사용된 값이 평균값보다 낮을 때는 혼합비를 과대평가 할 수 있으며, 높을 때는 과소평가 할 수 있다. 혼합비 계산과정에서 오차의 크기는 혼합비가 커질수록, 사용된 값과 평균값의 차이가 클수록, 마지막으로 해수추적자와 배경농도간의 차이가 작을수록 커진다.

빙하 연구에서도 단성분 혼합분석을 활용하여 빙하용융수의 혼합비율을 추정할 수 있다. 특히 주변 영향요소가 많아 단성분 변동이 우려되는 해양지역에서는 해수와 담수의 혼합비율을 결정할 때 단성분의 시료를 정확하게 채취하고 분석해야 이러한 오차를 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

극지연구소

표 61 선행연구에서 mixing ratio 계산을 위해 사용한 해수의 염소 농도

Reference	Location	Cl ⁻ (mg/L)	Br ⁻ (mg/L)
Faye <i>et al.</i> (2005)	Saloum , Senegal	19888.67 ±2423.38	67.00
Park <i>et al.</i> (2005)	Western Coastal Area, South Korea	19350.00	NA*
Pulido-Leboeuf (2004)	Castell de Ferro, Spain	21259.00	132.00
Argamasilla <i>et al.</i> (2017)	Marbella - Estepona, Spain	19472.00	66.00
Han <i>et al.</i> (2015)	Daweiijia, China	16211.50 ±668.08	NA
Na and Son (2005)	Seomjin River, South Korea	18800.00	67.00
Capaccioni <i>et al.</i> (2005)	Sicily, Italy	21204.50 ±34.65	NA
Kim <i>et al.</i> (2006)	Yeonggwang, South Korea	14408.02	67.00
Kim <i>et al.</i> (2003)	Jeju, South Korea	18211.00	64.70
Lee and Song (2007)	Buan, South Korea	16716.00	NA
Jeen <i>et al.</i> (2001)	Mid-western Coast, South Korea	19300.00	73.00
Shin <i>et al.</i> (2002)	Gogum, South Korea	17164.00	NA
Kim <i>et al.</i> (1997)	Yeosu, South Korea	14230.50 ±528.21	NA

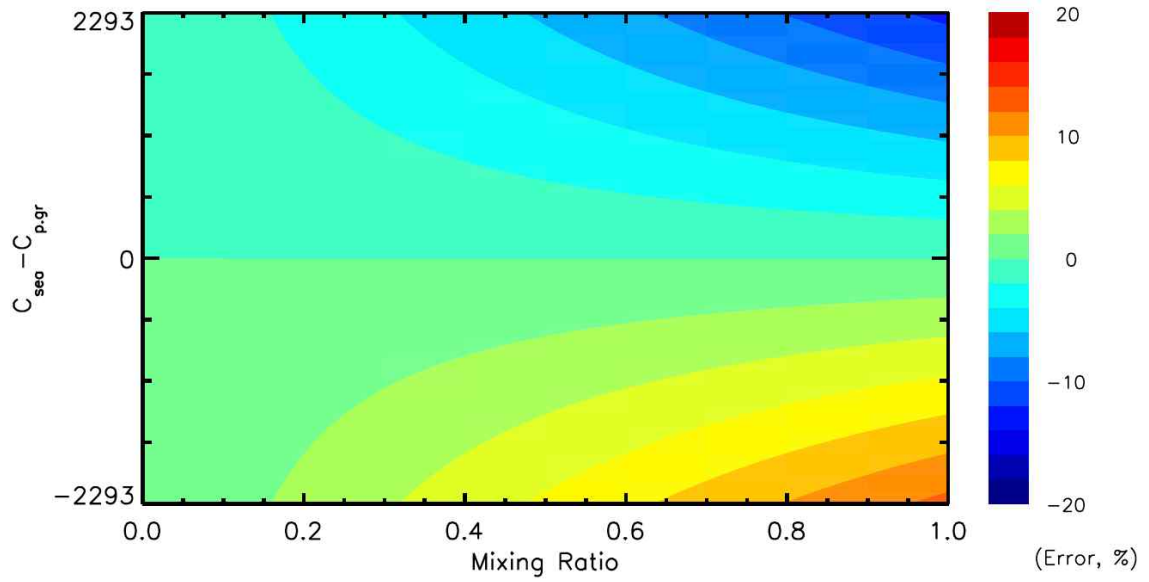


그림 529 염소 이온의 해수 평균 농도와 표준편차(표60)를 이용하여 혼합비 계산 오차를 나타낸 컨투어그래프

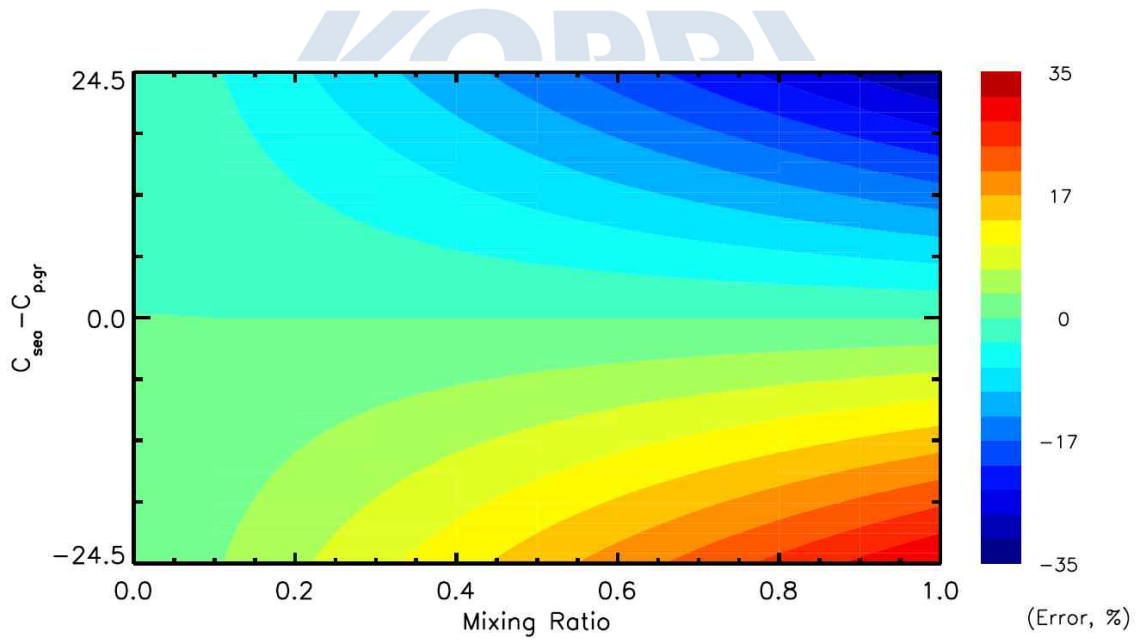


그림 530 브롬 이온의 해수 평균 농도와 표준편차(표60)를 이용하여 혼합비 계산 오차를 나타낸 컨투어그래프

마. 테라노바 만 빙봉수의 성질 변화와 생성 기작 연구

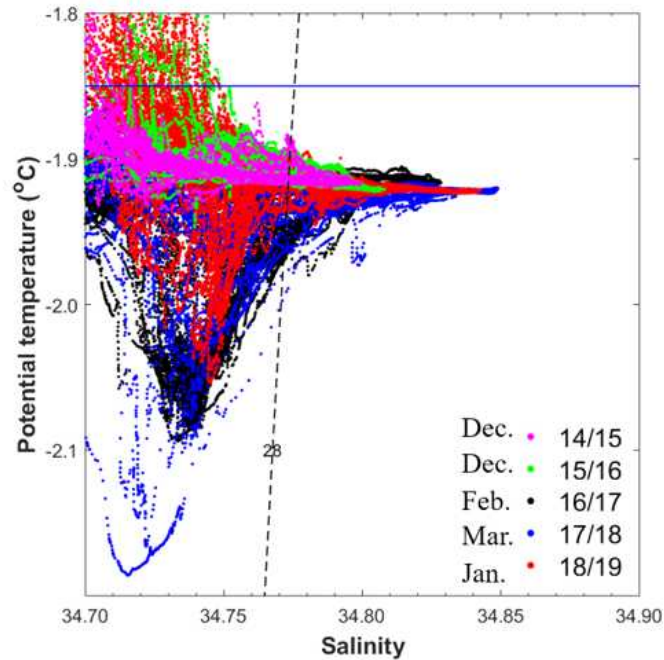


그림 531 5개년 남극 하계 테라노바 만 관측을 통해 확인된 TISW(테라노바 만 빙봉수) 분포

TISW는 HSSW에 비해 수온이 낮고 염분이 낮은 수괴로 테라노바 만 빙봉수로 불리며 해양과 빙봉의 상호작용으로 만들어진 수괴이다. 5개년 CTD 관측 결과 TISW는 1-3월에만 발견이 되었고 12월에는 HSSW(고염분 대륙빙수)만이 확인되었다. 또한 1월(빨강), 2월(검정), 3월(파랑)으로 갈수록 TISW의 성질이 더 차가워지고 더 저염화(fresh)되는 것을 확인할 수 있는데 이는 1월부터 빙봉수 유출이 시작되고 3월까지의 지속적 유출로 인하여 TISW의 성질이 더 차가워지고 저염화 되는 것으로 여겨진다.

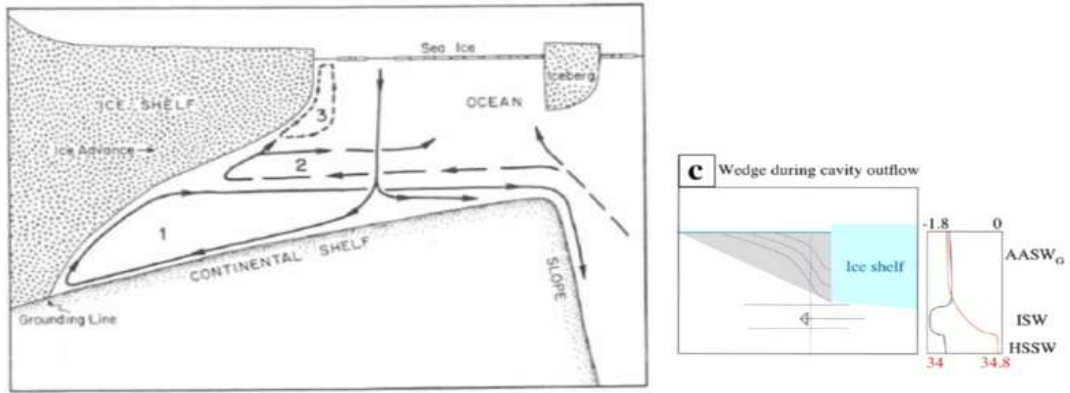


그림 532 왼쪽은 Jacobs[1992]에서 발췌한 것으로 용빙수 유출 기작을 모식적으로 표현한 그림. 오른쪽은 Malyarenko 등[2019]에서 발췌한 것으로 wedge(저염수괴)에 의한 빙봉 용빙 기작을 보여줌.

그림 532의 좌측 그림에서 보듯이 빙봉 하부 용빙에 의한 용빙수의 유출 기작은 총 3가지로 정의할 수 있다. 모드 1은 상대적으로 고온 고염의 수괴가 빙봉 하부로 유입되어 빙봉의 기반선을 녹이는 것으로 HSSW, CDW(환남극심층) 등이 고온 고염의 수괴에 해당된다. 모드 2는 HSSW, CDW 등보다 가벼운 중층 수괴 즉, MSW(변환 대륙붕수), MCDW(변환 환남극심층수) 등의 유입으로 빙봉의 중앙부가 녹는 기작에 해당한다. 모드3은 그림 532의 우측 그림과 연관된 기작으로 Ice front의 용빙으로 유출되는 민물에 의해 생성된 wedge(저염수괴)의 발달과 연관이 있다. 즉, 여름철 따뜻해진 남극 표층수에 의해 Ice front가 녹으면 표층에 wedge 형태의 저염의 수괴 덩어리가 만들어지고 이것이 따뜻한 남극 표층수가 빙봉 하부로 관입되는 것을 유도하여 빙봉 용빙 및 용빙수 유출이 발생하는 것이다.

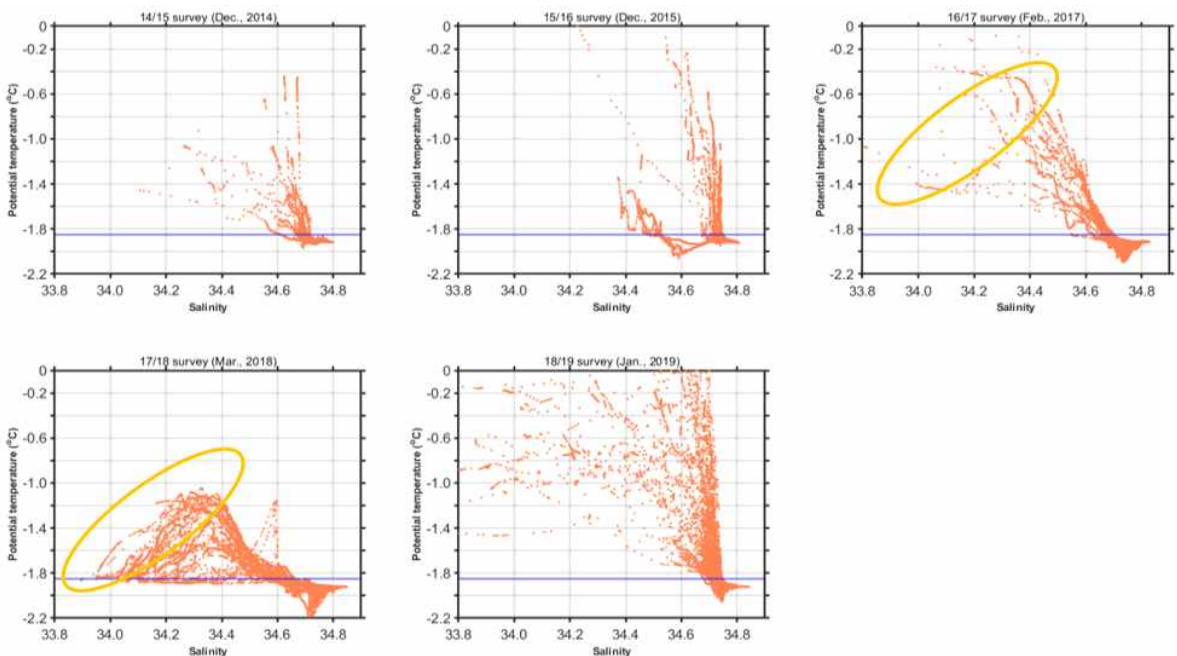


그림 533 관측별 온도-염분 다이어그램 및 wedge 관측(초록색 타원) 표시

모드3과 연관된 wedge 모양의 저염 수괴는 온위-염분 다이어그램에서 갈고리 형태로 나타나는 데 이는 Ice front에서 유출되는 민물 영향으로 수괴가 저온 저염의 분포를 가지기 때문이다. 그림 534과 같이 각 관측 시기별 온위-염분 다이어그램을 확인한 결과 wedge의 모습은 12월과 1월에는 확인되지 않고 2월과 3월에만 확인이 되었다. 이는 wedge와 연관된 모드3 기작이 2, 3월 동안의 용빙수 유출을 유발할 수 있음을 의미하는 결과이며, 그림 531에서 확인했던 2월과 3월 TISW의 성질이 더 차갑고 저염화 되는 것에 모드3 기작이 기여한다고 볼 수 있다.

추가로 2017년 2월에 난센 빙봉 연안에서 관측된 CTD, LADCP 결과를 보면 YY 정점을 기준으로 남쪽에서는 고온 고염의 수괴가 빙봉 하부로 유입되고 북쪽에서는 TISW 성질의 수괴가 유출되는 것을 확인할 수 있는데 1-2월 사이에 발견되는 TISW는 모드1 또는 모드2 기작과 연관될 수 있음을 보여주는 증거이다. 특히 YY 정점 기준으로 남쪽에서 발견되는 고온 고염의 수괴가 HSSW에 가깝기 때문에 모드1 기작에 가깝다고 보여진다. 종합하여 봤을 때 빙봉수 생성 혹은 빙봉 하부의 용빙은 기작의 차이는 있어 보이나 매년 1-3월 사이에 발생하는 것으로 여겨지며 용빙수의 유출에 따른 월별 TISW의 성질 변화가 존재함을 관측 자료로부터 분명히 확인할 수 있었다.

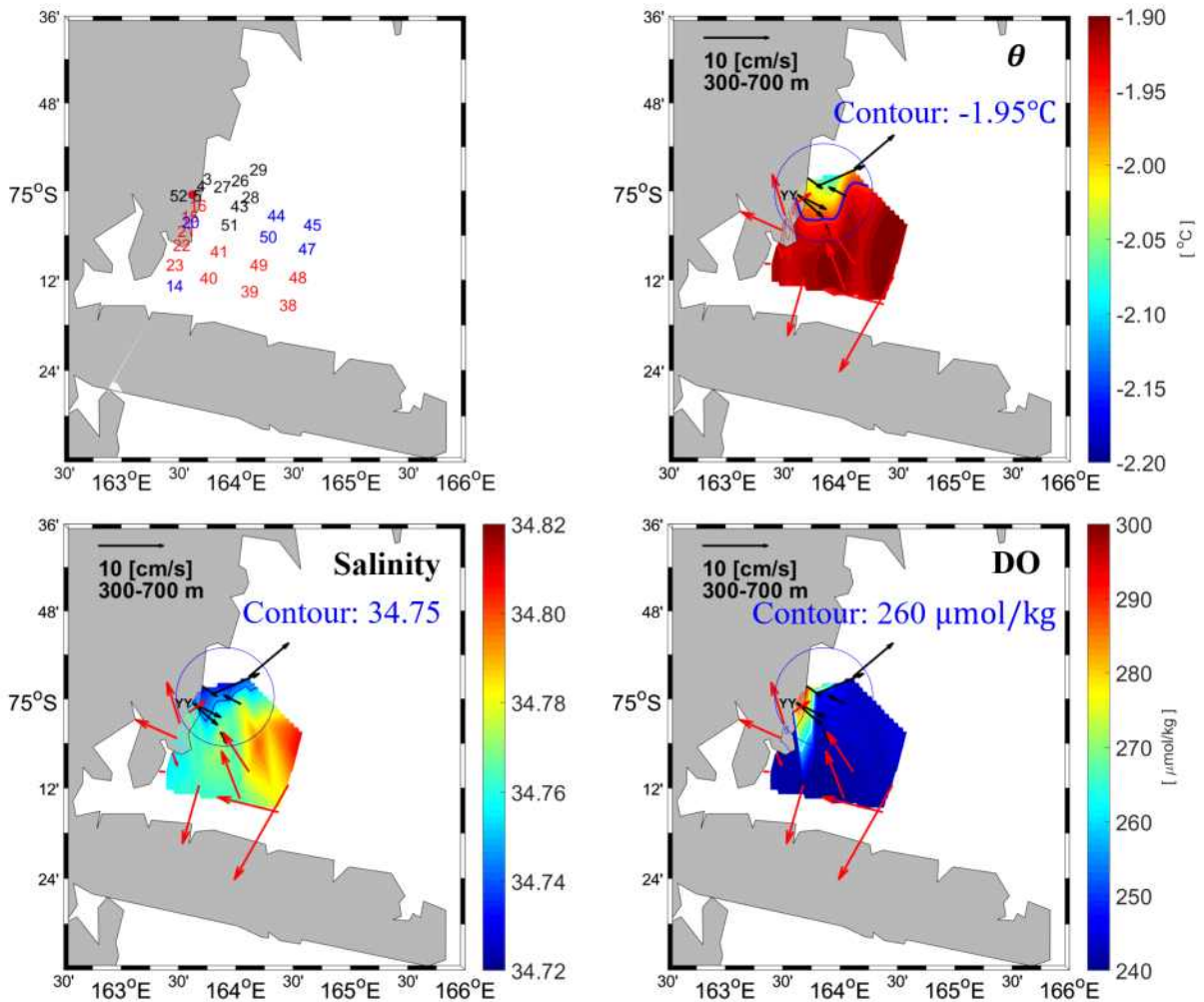


그림 534 16/17 관측에서 얻어진 TISW layer(300-700 m)에서의 평균 온위, 염분, 용존 산소, 유속 분포

(1) 폴리냐 발달에 따른 고염분 대륙붕수의 생성과 거동

(가) 연구의 배경

HSSW(고염분 대륙붕수)의 33%가 로스해의 테라노바 만에서 생성[Jendersie 등, 2018]되는 것으로 알려져 있으며 HSSW는 그림 535 왼쪽에서 확인되는 wAABW(상대적으로 고온 고염의 남극저층수)의 기원수로 여겨진다. 그림 535 오른쪽에서는 HSSW가 로스해에서 어떻게 거동하는지 모식적으로 표현한 것으로 남극 저층수는 HSSW와 대륙붕수로 유입된 변형 환남극심층수(MCDW)와의 혼합에 의해 형성되는 것으로 알려져 있다. 테라노바 만에서는 난센 빙봉에서 부는 활강 바람과 드 라이갈스키 빙설의 존재로 항상 폴리냐가 발달하기 때문에, 겨울철 표층에서의 해빙 생성과 브라인 유출로 인하여 HSSW가 형성된다.

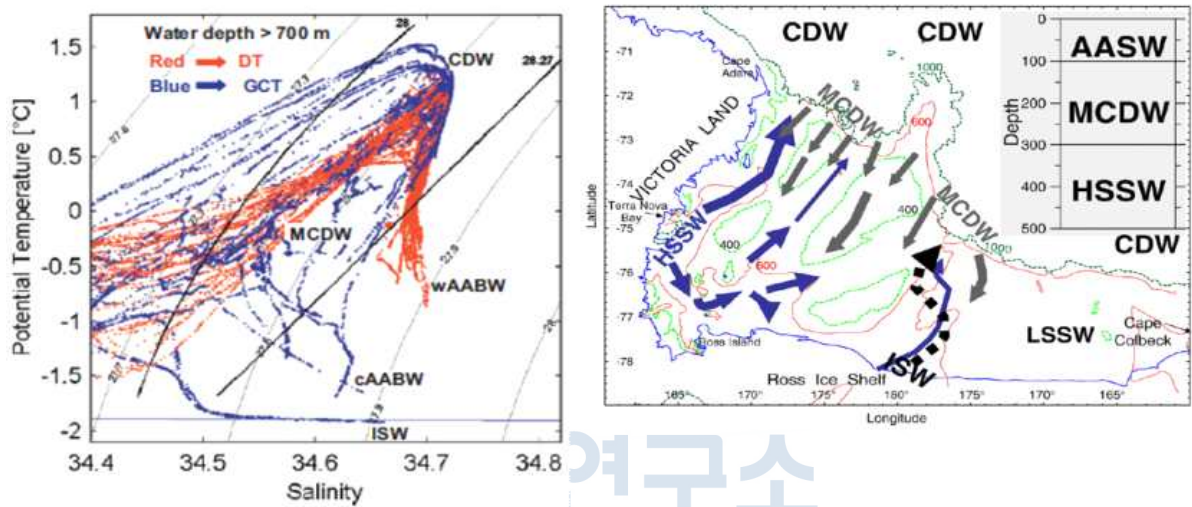


그림 535 왼쪽은 Budillon 등[2011]에서 발췌한 것으로 대륙붕 부근에서의 수괴 분포를 보여줌. 오른쪽은 Cincinelli 등[2008]에서 발췌한 것으로 로스해 수괴 거동을 모식적으로 표현한 것임.

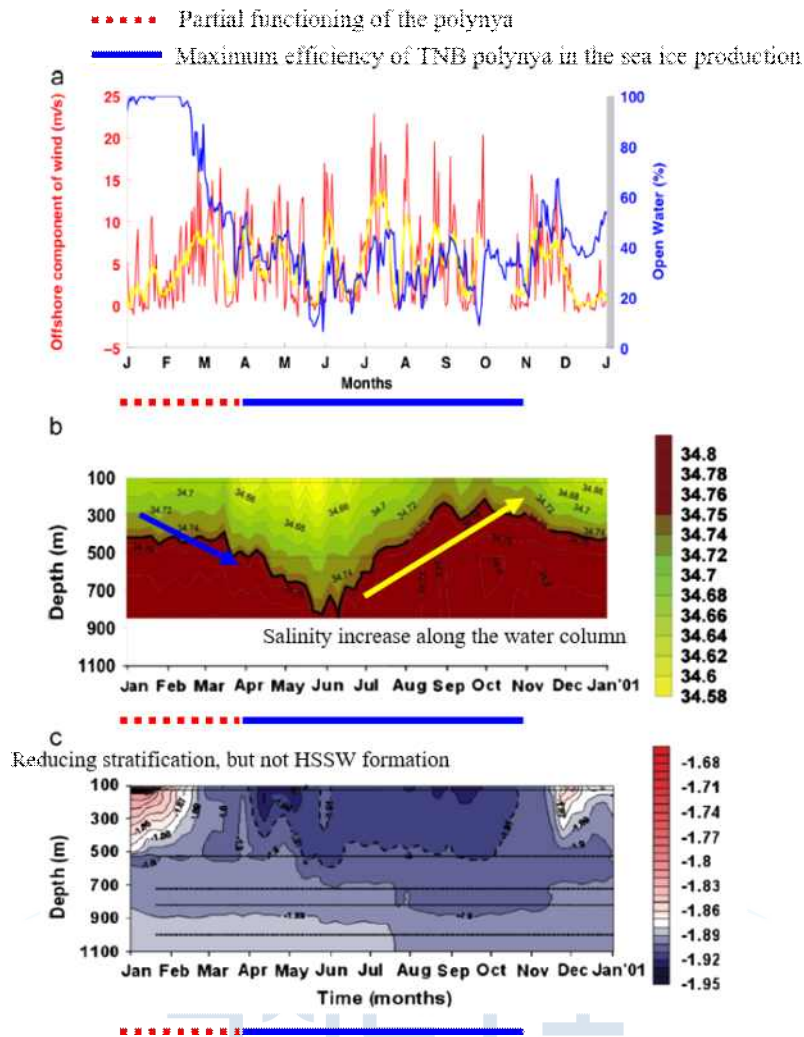


그림 536 Rusciano 등[2013]에서 발췌한 것으로 활강 바람에 의한 폴리나 발달에 따른 HSSW의 발달 모습을 보여줌

테라노바 만의 폴리냐는 모든 시기에 잘 발달해있지만 HSSW 형성에 직접적인 영향을 미치는 시기는 4-11월이라고 기존 연구들에서 제시되었다. 그림 536에서 확인할 수 있듯이 난센 빙붕으로부터 활강 바람이 불어 모든 시기에 폴리냐가 잘 열려 있지만, 실질적으로 전층의 염분 증가 그리고 HSSW 생성과 연관이 있는 시기는 1년 중 4-11월 기간 동안이다. 1-3월 기간에도 염분이 증가하여 상층의 성층화가 감소하기는 하나 전층에 걸쳐 염분이 증가하지 않으며 HSSW도 생성되지 않는 것으로 관측되었다.

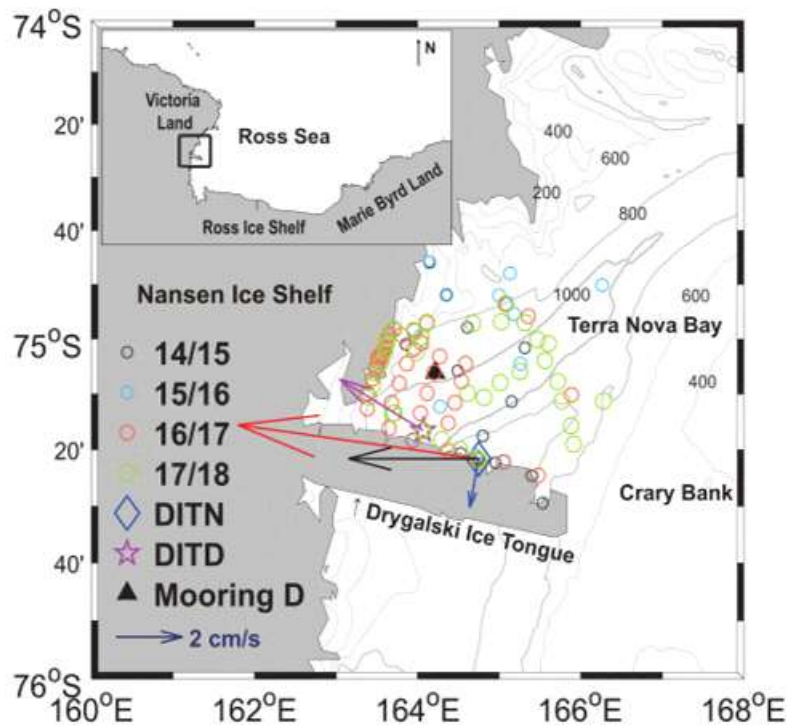


그림 537 테라노바 만 CTD 및 해양 계류선 관측 정점도 (Yoon *et al.*, 2019)

얕은 수심과 활강 바람의 영향권을 고려 했을 때 테라노바 만 내에서 HSSW의 생성 지역은 난센 빙붕 연안으로 여겨진다. 이러한 이유로 그림 537에 표시된 Mooring D 정점에서 염분의 장기 변화를 관측하고 HSSW 형성과 거동에 관한 연구를 진행해왔다. 그러나 테라노바 만 가운데에는 깊은 수심의 trough가 발달해 있어 동 서 해역이 지형적으로 구분되어 있으며 이로 인해 동 서 간 염분 변화간의 공통점과 차이점을 살펴볼 필요가 있다. 또한 난센 빙붕 연안에서 생성된 HSSW가 로스해로 유입되기 이전에 테라노바 만에서 어떻게 거동하는지에 대한 연구 역시 부족하다. 따라서 본 연구에서는 그동안 테라노바 만에서 얻어진 CTD/LADCP 자료와 테라노바 만 가장 깊은 수심에서의 장기 계류선(DITD), 테라노바 만 동부에서의 장기 계류선(DITN) 자료를 이용하여 HSSW의 시공간적 생성과 거동에 관하여 살펴보았다.

(나) 테라노바 만 동부 및 심층의 염분 변화

우선, DITN과 DITD 계류선을 통해 관측된 심층 염분의 변화를 살펴보면(그림 525), 2016년과 2017년 9월부터 급격한 염분의 증가를 확인할 수 있다. 이는 DITN(660 m), DITD(1200 m) 염분 시계열 모두에서 발견된 현상으로 2015년과는 확연한 차이를 보인다. 흥미로운 점은 염분 증가 시기 이후 여름철에 관측된 CTD 결과에서도 HSSW의 염분은 17/18 (그림 538 수직 프로파일에서 초록색), 16/17 (그림 538 수직 프로파일에서 빨간색) 순으로 높게 나타났다는 것이다. 테라노바 만에서 관측되는 염분 34.80 이상의 고염 수괴는 HSSW로 여겨지며 계류선 자료와 CTD 관측 결과를 종합해 봤을 때 2016년과 2017년 겨울철 동안에는 HSSW가 활발히 생성된 것으로 보인다. 그러나 한 가지 기존 연구와의 차이점은 DITN, DITD 계류선 심층 염분이 모두 9월부터 증가한다는 것인데,

Rusciano 등[2013]의 기존 연구에서는 HSSW 생성에 의한 염분 증가가 6-7월부터 발생함을 언급하였다.

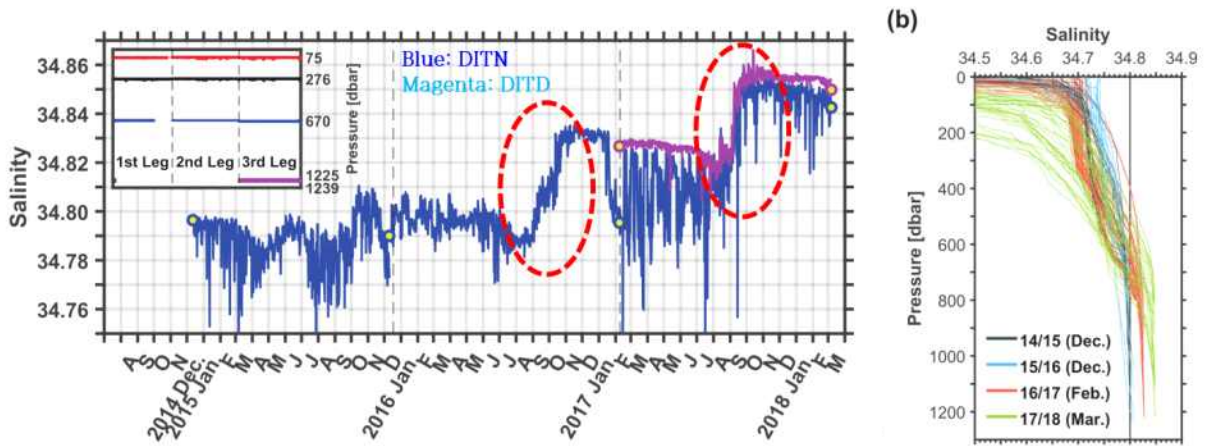


그림 538 DITN, DITD 계류선 심층 염분 변화 시계열과 4개년 CTD 수직 프로파일 (Yoon *et al.*, 2019)

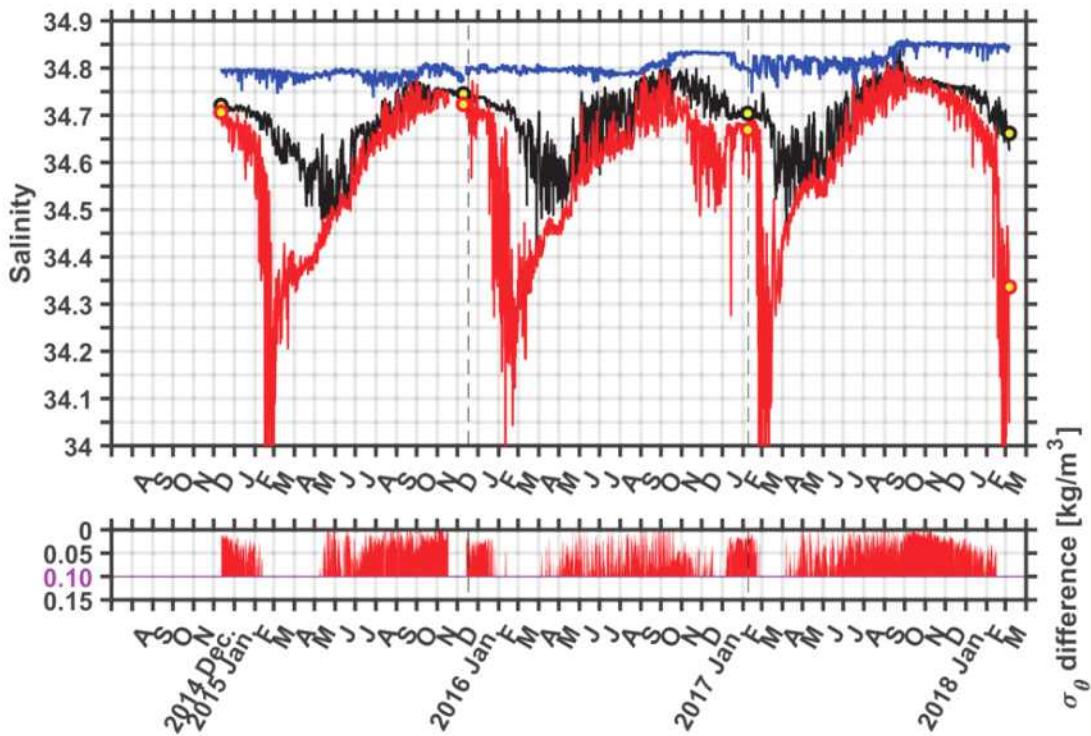


그림 539 DITN 계류선 3개 수심(70, 270, 660 m) 염분 시계열과 70, 270 m 수심간의 밀도 차이 (Yoon *et al.*, 2019)

심층과 달리 상층(70, 270 m)에서는 두 수심 염분의 혼합 과정과 염분 증가 모습을 확인할 수 있었다. 특히, 두 수심 물성 간의 혼합 기준을 0.01 kg/m^3 밀도 차이로 가정하였을 때, 2015, 2016, 2017년으로 갈수록 혼합시기가 빨라지는 것을 확인할 수 있는데, 2015년의 경우 5월초, 2016년에는 4월 말, 2017년에는 4월 초에 두 수심 간의 혼합이 완료된 것으로 관측되었다. 두 수심 염분은 혼합이 완료된 이후부터는 함께 증가하는 모습을 보였다. 실제로 혼합된 이후 염분이 함께 증가하는 시기 때에 두 수심 염분간의 연관성 상수는 0.9 정도로 매우 높게 나타났다. 그리고 HSSW가 잘 생성된 것으로 여겨지는 2016년과 2017년 상층 염분이 크게 증가하여 시기별 온위-염분 다이어그램(그림 540)에서 2016, 2017년 8-10월 동안 HSSW가 상층 염분에서도 확인되었다. 이 관측 결과는 겨울철에 테라노바 만 동부 상층에서도 대양 대류에 의한 HSSW 형성이 가능함을 보여주는 증거이며 상층 두 수심에서의 염분 시계열은 심층에서의 염분 시계열과는 매우 낮은 연관성 상수를 보였다 (< 0.3).

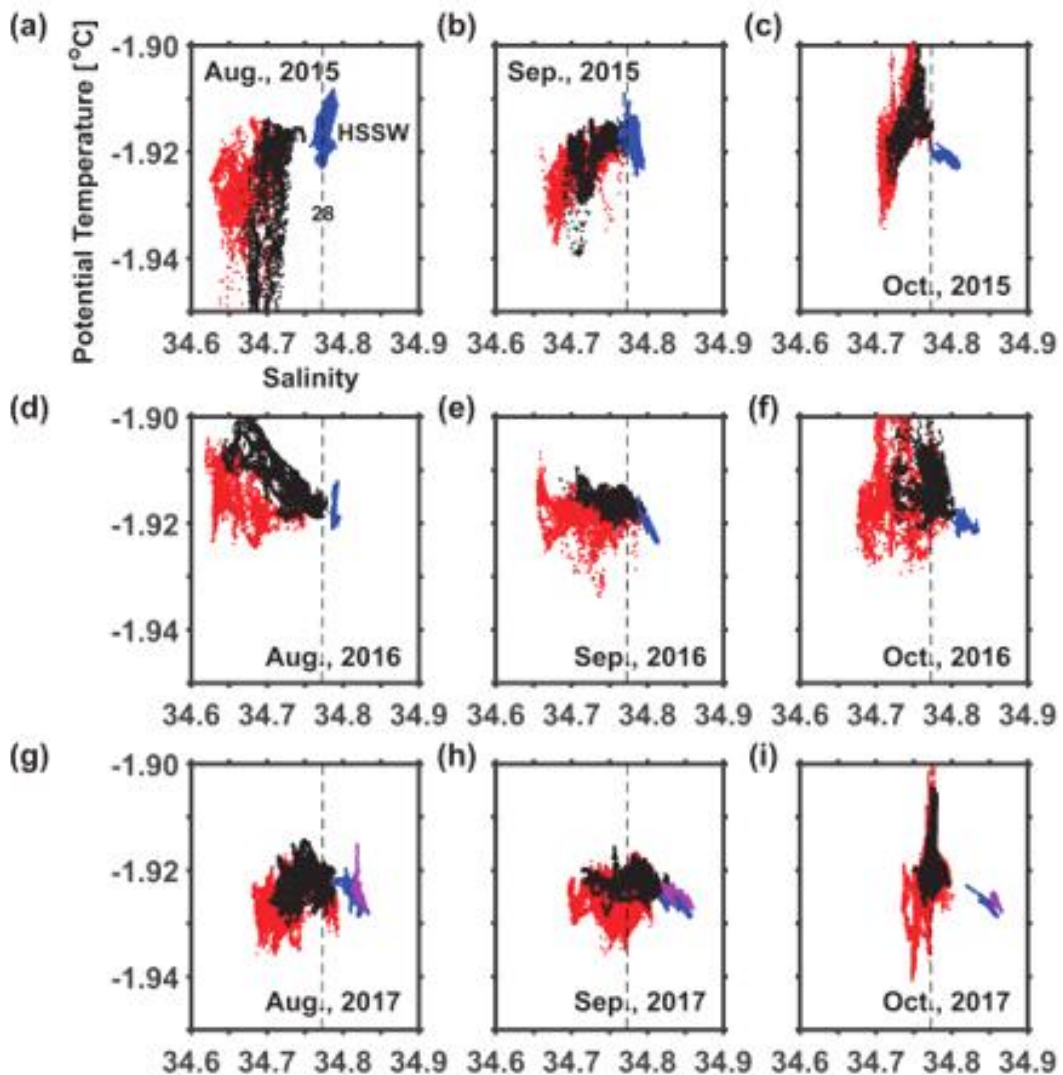


그림 540 DITN 계류선 수심별 염분의 월별 온위-염분 다이어그램 (Yoon *et al.*, 2019)

DITN과 DITD 계류선의 염분 시계열을 통해, 심층 염분은 9월부터 증가하는 모습이 관측되었고 이는 2016년과 2017년 테라노바 만에서 HSSW가 활발히 생성되었기 때문인 것으로 생각되며 심층 염분 증가 시기 동안 상층에서도 혼합층 발달에 따른 HSSW 생성 모습이 관측되었다고 요약 할 수 있겠다.

다음 LADCP와 계류선에서 관측된 테라노바 만의 해류 분포 및 시계열을 확인하였다. 우선, 4개년 동안의 LADCP 평균 관측 유속 분포에 따르면, 100-700 m 층에서는 드라이갈스키 빙설과 난센 빙봉을 따라 시계 방향의 큰 순환이 확인이 되고 깊은 수심의 trough 해역에서도 분명하지는 않으나 시계 방향의 순환이 확인되었다 (그림 541 왼쪽). 그리고 그림 541의 오른쪽 그림에서 확인할 수 있듯이 DITN(파랑)과 DITD(magenta) 심층에서는 각각 남서향, 북서향하는 해류가 관측이 되었다. LADCP 관측 결과는 기존 연구들에서 언급한 테라노바 만 내의 cyclonic circulation으로 여겨지며 계류선에서 관측된 해류들도 이 순환의 일부로 생각된다. 따라서 심층 염분이 9월부터 증가하기 시작한 것은 6-7월 난센 빙봉 근처에서 생성된 HSSW가 cyclonic circulation을 따라 거동하여 1-2개월 뒤에 DITN 및 DITD 계류선에 영향을 미쳤기 때문으로 여겨진다. 반면, 상층에서도 서향하는 흐름이 매우 지속적이고 강하게 관측되었으나 테라노바 만 동부 상층 해역에서는 테라노바 만 내의 수괴들보다 저염의 수괴가 존재하기 때문에 DITN 계류선 상층 염분의 증가는 오로지 혼합층 발달과 이에 따른 HSSW 생성 때문인 것으로 여겨진다.

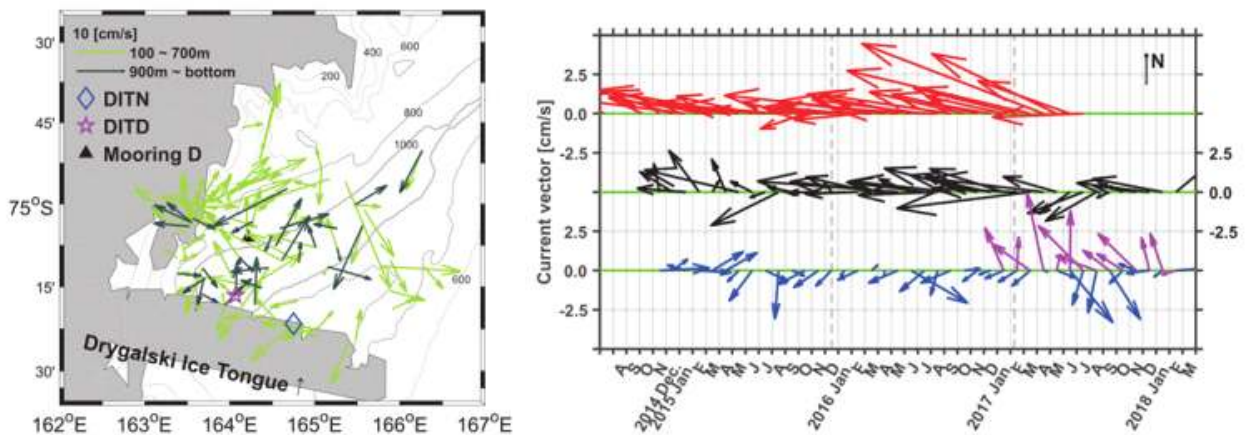


그림 541 4개년 LADCP 관측에서 얻어진 테라노바 만의 유속 분포와 DITN, DITD 계류선에서 관측된 월평균 유속 시계열 (Yoon *et al.*, 2019)

결론적으로, DITN, DITD 계류선에서 심층 염분 변화의 주요 원인은 HSSW의 이류이고 상층 염분의 주요 변화 요인은 혼합층 발달과 HSSW 생성이라고 볼 수 있겠다.

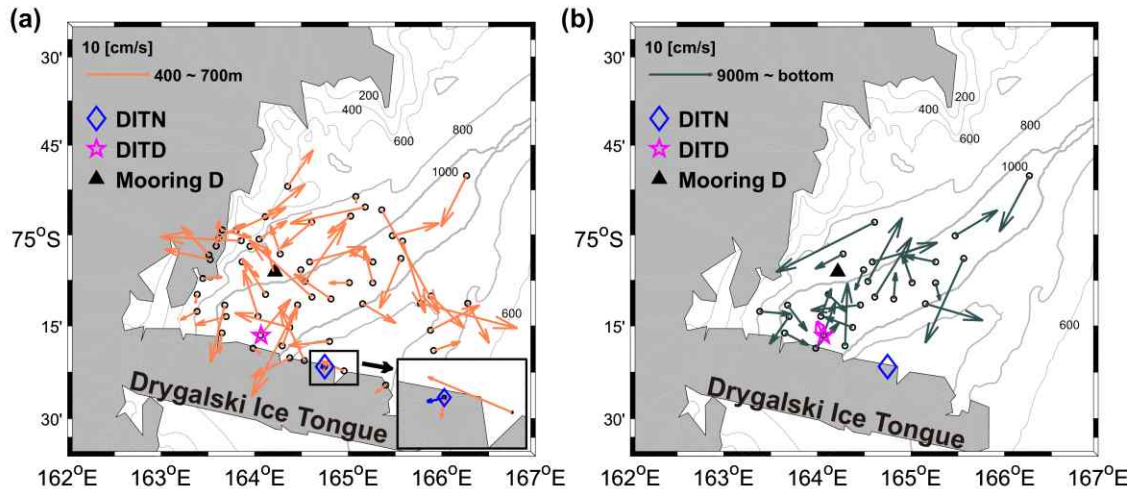


그림 542 (a) 2014년부터 2018년까지 4번의 걸친 남극 하계 관측에서 얻어진 400-700 m 평균 유속 그림. 3 km 이내로 가까운 정점에서 얻어진 자료들은 공간 평균함. 검은색 원은 LADCP 자료 정점을 나타냄. 1-2월 동안 평균한 DITN 계류선의 660 m 유속은 파란색 화살표로 표시함. DITN 계류선 근처 유속은 확대하여 오른쪽 하부에 추가로 표시함. (b) (a)와 같은 그림이나, 900 m - 바닥까지 평균한 유속에 해당함. 1-2월 동안 평균한 DITD 계류선의 1,222 m 유속은 자홍색 화살표로 표시함. (Yoon *et al.*, 2019)

4개년 남극 하계 (12-3월) 관측 동안 CTD 관측과 함께 LADCP 관측을 수행하였다. 본 그림에서의 유속은 모두 조석 성분에 의한 유속을 제거한 결과이다. 우선, 드라이갈스키 빙설을 따라 서향하는 흐름의 유속이 400-700 m 평균 유속에서 확인된다 (그림 542a). 이 서향하는 흐름은 난센 빙봉을 따라 북향하는 흐름, 테라노바만 북동쪽에 발달해 있는 남동향하는 흐름과 함께 시계 방향 (cyclonic) 순환 패턴을 구성하는 것으로 보인다. 물론, 드라이갈스키 분지와 800-1000 m 수심에서 드라이갈스키 빙설을 향해 흐르는 남향류가 관측되기도 하였으나 시계 방향 순환 패턴은 테라노바만 전체에서 분명하게 확인된다. 그러나, 특이한 점은 난센 빙봉에서 드라이갈스키 빙설로 이동하는 모습의 남동향류가 관측되지 않는다는 것이다. 2014년 12월부터 2018년 3월까지 관측된 DITN 계류선 660 m 수심의 해류는 그 크기는 시기별로 차이가 있으나 방향은 거의 변화 없이 남서향으로 흐르는 것으로 확인되었다(그림 542). 그러므로 만약 이 시계 방향 순환이 일년 내내 유지된다고 가정하면, 난센 빙봉 근처에서 생성되는 고염분 대륙붕수(High Salinity Shelf Water, HSSW)는 DITN 계류선 위치로 남동향 해류를 타고 바로 이동하는 것이 아니라 테라노바만을 시계 방향으로 순환한 뒤에 DITN 계류선 근처로 도착한다고 해석할 수 있다. 이로 인해 DITN 계류선 660 m 염분 시계열(그림 545)에서 기존 연구에서 발표한 염분 증가 시기인 7월보다 늦은 9월부터 염분이 증가하는 모습을 보인 것으로 여겨진다. 더욱이 기존 연구에 따르면 테라노바만 중심부 상층에는 용승을 유도하는 시계 방향 순환이 바람에 의해 발달해 있어 이 해역의 수평방향 흐름이 발달하는 것을 방해한다고 알려져 있다 [Van woert 등, 2001]. 예를 들어 2017/18 남극 하계 관측 기간 동안 CTD 수직 단면도를 보면 400 m 보다 상층에서 위로 휘어진 형태의 등밀도선을 테라노바만 중심부에서 확인할 수 있다 (그림 543)

추가로 난센 빙봉 근처에서는 난센 빙봉 하부로 향하는 서향류도 확인이 되는데 이들 해류는 남극 하계에 발견되는 테라노바만 빙하 용빙수 생성의 주요 원인인 것으로 여겨진다. 이들 해류 관련해서는 난센 빙봉 근처에서의 장기 계류를 통해 계절 변화를 먼저 살펴볼 필요가 있겠다.

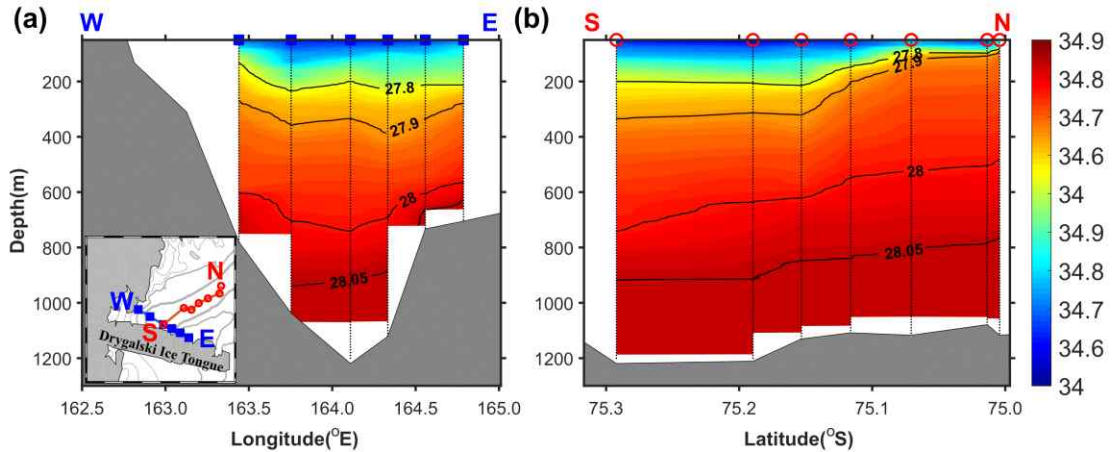


그림 543 (a) 2107/18 남극 하계 관측에서 얻어진 CTD자료로 드라이갈스키 빙설 (파란색 사각형 정점들)을 따라 그린 염분의 수직 단면도. 염분은 색으로 나타냈으며 색 범위는 (b)에 표시하였음. 간격은 0.01임. 등밀도선은 0.1 kg/m³ 간격으로 표시함. (b) (a) 그림과 같으나 드라이갈스키 분지(빨간색 원 정점들)를 따라 그린 염분 수직 단면도 및 등밀도선. (Yoon *et al.*, 2019)

다음, 드라이갈스키 분지 바닥 수심의 해류는 주로 중력의 영향을 많이 받는 것으로 알려져 있으나 [Jendersie 등, 2018] 아직 이 해역에서의 순환에 관한 연구와 관측 자료는 매우 부족하다. 그러나 DITN 계류선에서의 심층 해류와 마찬가지로, DITD 계류선 1,222 m 에서의 해류 관측을 통해 심층 해류의 방향이 1년 내내 거의 변화가 없는 것으로 확인하였다 (그림 542). 따라서 4개년 남극 하계 (12-3월) 관측 동안 얻어진 LADCP 결과가 드라이갈스키 분지 (1,000 m 보다 깊은 수심)에서의 해류 순환을 살펴보는데 매우 큰 도움이 된다고 볼 수 있다. 우선, 900 m부터 바닥 수심까지 평균된 해류를 보면, 남서향하는 흐름이 드라이갈스키 분지 북동쪽에서 확인이 되고, 북서향 하는 흐름은 테라노바만 남쪽에서, 북동향 하는 흐름은 테라노바만 서쪽에서 관측되었다 (그림 542b). 이들 흐름 역시 드라이갈스키 분지내에 제한된 형태의 시계 방향 순환으로 여겨지며 이는 앞서 400-700 m에서 관측된 시계 방향 순환 패턴과는 다른 것으로 보여진다. 다시 말해, 난센 빙봉 근처에서 형성된 뒤 드라이갈스키 분지까지 가라앉은 고염분 대륙붕수는 드라이갈스키 분지에 존재하는 시계 방향 순환을 따라 이동한다는 볼 수 있다. DITN계류선과 마찬가지로 DITD 계류선 1,200 m 부근에서 관측된 염분도 9월부터 증가하는 모습을 보이는데 이 역시 드라이갈스키 분지에 존재하는 순환을 따라 고염분 대륙붕수가 이동한 결과라고 여겨진다(그림 543).

테라노바만은 고염분 대륙붕수 형성 및 서부 로스해로의 고염분 대륙붕수 공급 해역이기 때문에 앞으로 더 많은 정점에서의 LADCP 및 계류선 관측을 통해 테라노바만의 층별 순환 규명 연구를 지속해나갈 필요가 있겠다.

3) 활강 바람과 폴리나 발달 그리고 상층의 염분 변화

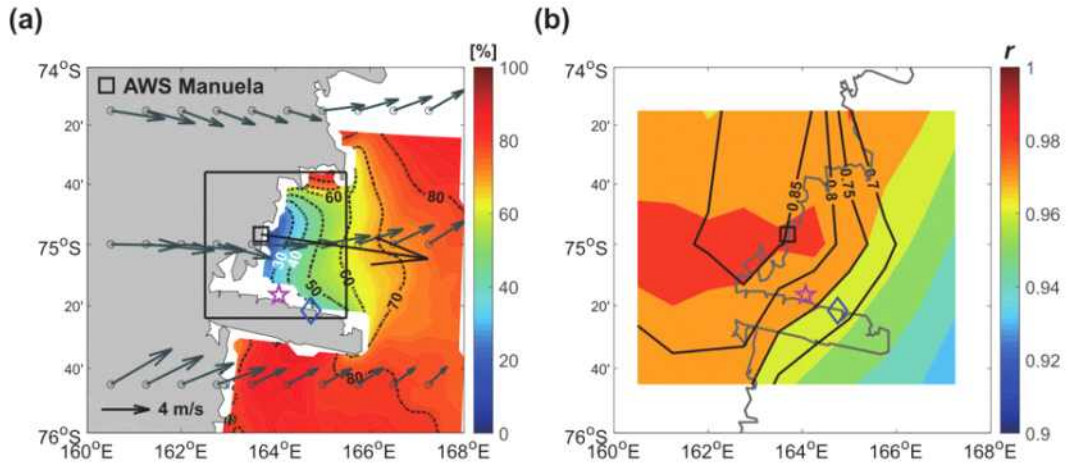


그림 544 (a) AWS Manuela 정점 바람과 ERA-Interim 재분석장 자료 바람의 평균 분포(2014-2018) 및 해빙 농도의 평균 분포 (b) AWS Manuela 정점 자료와 ERA-Interim 자료 간의 연관성 분포 (대기 온도 - 색깔, 바람 - contour line) (Yoon *et al.*, 2019)

계류선에서 확인된 HSSW의 생성과 거동은 활강 바람과 테라노바 만 폴리나 발달에 따른 해빙 생성 및 염분 공급과 연관이 있다. 그림 529(a)에서 확인 할 수 있듯이 난센 빙붕에서 부는 활강 바람은 테라노바 만에 L자 모양 폴리나 발달을 야기시킨다. 또한 그림 544(b)에서 확인 할 수 있듯이 Manuela 위치에서 부는 활강 바람의 세기는 테라노바 만 해역 전체를(계류선 위치 포함) 대표한다고 볼 수 있다(연관성 상수>0.7).

극지연구소

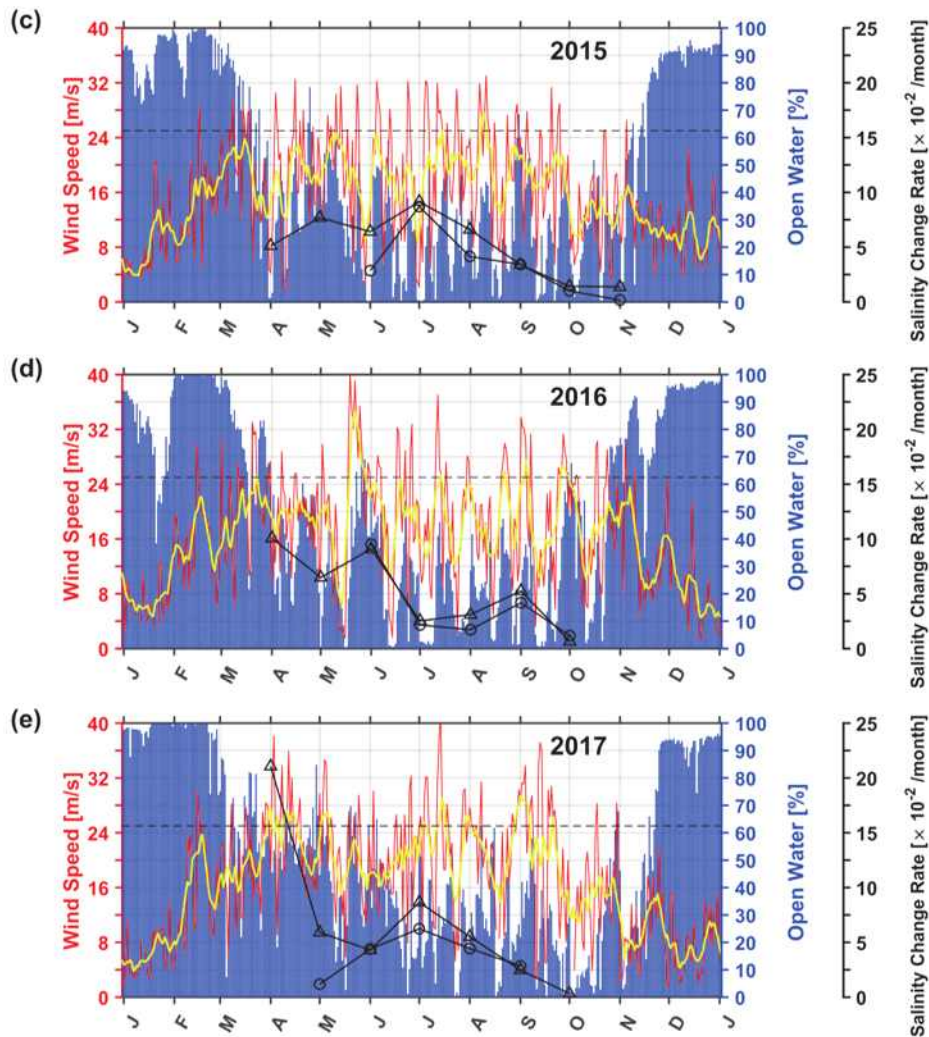


그림 545 (c) 2015년 일별 동풍 계열 바람 속도(빨강)와 7일 이동 평균한 속도(노랑) 시계열, 일별 해빙 농도를 이용해 계산한 테라노바 만 open water 비율(그림 527(a) 박스에서 계산됨), DITN 상층 염분 변화율(삼각형-70 m, 원-270 m) (d) 2016년 시계열 (e) 2017년 시계열 [윤 등, 2019]

기존 연구에서 언급된 바와 같이 일별 동풍 계열 바람과 테라노바 만 폴리냐 발달은 서로 양의 관계를 가지고 있으며 통계적으로 99% 신뢰구간에서 유의미한 관계를 가진다. 연관성 상수는 0.4-0.5 사이로 이는 난센 빙붕으로부터 동풍 계열 바람이 강하게 불면 폴리냐도 잘 발달했다고 해석할 수 있겠다. 이 뿐 아니라 동풍 계열 바람이 강하고 폴리냐가 잘 열리는 시기에 DITN 계류선 상층 70 m와 270 m 염분이 모두 증가하는 모습을 보였다. 반면, 동풍 계열 바람이 상대적으로 약하고 폴리냐가 잘 열리지 않는 시기에는 70 m 염분만 증가하는 모습을 보여 폴리냐 발달에 따른 염분의 변화 모습을 확인할 수 있었다. 연도별로 살펴보면, 2017년이 2016, 2015년에 비해 큰 상층 염분 증가를 보인 것은 4월과 7월에 보이는 강한 동풍 계열 바람과 폴리냐 발달이 연관된 것으로 보이며 2016년은 6월에 분 동풍 계열 바람과 폴리냐 발달이 상층 염분 증가에 기여를 한 것으로 보

이다. 2015년은 상대적으로 2016, 2017년에 비해 약한 바람과 폴리나 발달을 보여 상층 염분의 증가량이 가장 낮았던 것으로 여겨진다. 추가로 겨울철 활강 바람의 평균 지속 시간은 2014, 2015, 2016, 2017년 순으로 5.9, 6.5, 7.0, 7.7시간으로 관측되었는데 이는 심층 염분 즉, HSSW의 최대 염분이 2017, 2016, 2015, 2014년 순으로 높게 관측된 것과 일치하는 결과이다. 기존 연구에서도 HSSW 활발한 생성을 위해서는 활강 바람의 평균 지속 시간이 길어야 한다고 제시하고 있다 [Rusciano 등, 2013].

따라서 결과적으로 난센 빙붕에서부터 부는 활강 바람은 테라노바 만 전역에 영향을 미치고 폴리나를 발달시키며, 이로 인해 난센 빙붕 연안과 테라노바 만 동쪽 상층에서는 HSSW가 생성된다. 또한 난센 빙붕 연안에서 생성된 HSSW는 테라노바 만의 시계 방향 순환을 따라 이동하여 테라노바 만 동쪽에는 9월쯤에 도달하여 심층 염분을 증가시킨다. 이는 난센 빙붕에서 생성된 HSSW가 단순히 테라노바 만 동쪽으로 이동하는 것이 아님을 보여주는 중요한 연구 결과이다.

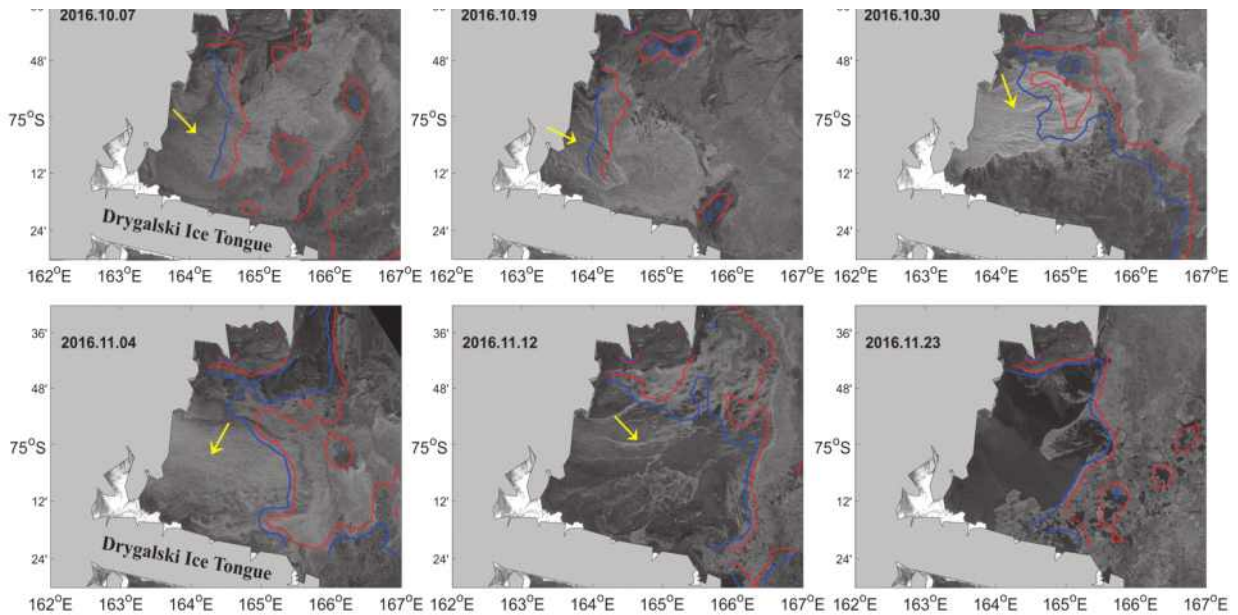


그림 546 SAR(Synthetic Aperture Radar) 이미지와 30%(파랑), 50%(붉은색) 해빙 농도 컨투어, 노란색 화살표가 랑뮤어 플럼(Langmuir plume)을 의미함.

마지막으로 위 그림은 10월과 11월에 테라노바 만 SAR 이미지에서 확인된 랑뮤어 플럼(Langmuir plume)으로 살얼음(frazil ice) 형성을 나타낸다. 기존 연구에 의하면 두꺼운 얼음이 성장할 때보다 살얼음이 형성될 때 염 방출이 더 많다고 알려져 있다 [Ushio & Wakatsuchi, 1993]. 따라서 10월 표층에서 확인되는 살얼음 형성은 DITN 상층에서의 염분 증가와 연관이 있을 수 있고 추후 활강 바람의 세기, 폴리나 발달, 얼음의 형성, 염의 방출 등에 관한 정량적 관계 규명이 반드시 필요하다.

4. 극지역 환경변화에 따른 장보고기지 주변 빙권 시스템 거동 예측

가. 빅토리아랜드 지역대표 후빙기 조륙운동 보정(GIA) 모델 향상

(1) 지구내부구조: 원격지진을 이용한 북빅토리아 랜드 맨틀 속도 구조 모델링

(가) 지진관측망 및 원격지진 자료

장보고 기지를 중심으로 운영되고 있는 멜번화산지진관측망(KPSN), 난센빙하 지진관측망(KN), 데이비드빙하 지진관측망(KDG), 그리고 2012-16년에 운영된 해저면지진계 지진관측망(OBS)과 미국 TAMNNET 관측망(그림 547 참조)에서 관측된 연속지진자료 중에서 규모 5.5 이상의 지진을 추출하여 데이터베이스를 만들었다.

초동 P파를 수작업으로 선택한 후에 다중파형상관법(multi-channel cross-correlation method)를 이용하여 정확한 P파의 상대적인 도달 시간을 측정하고, 이 중에서 상관관계함수가 0.8이상의 신호대 잡음비(signal to noise ratio)가 높은 파형을 선별함. 선별된 원격지진의 위치는 그림 548에 나타나 있고, 이 지진들은 주요 판들의 경계에 집중되어 있음을 알 수 있다 (그림 548). 선택된 지진 자료는 644이며, 이 지진에서 관측된 9,723개의 초동 P파가 선택되었다.

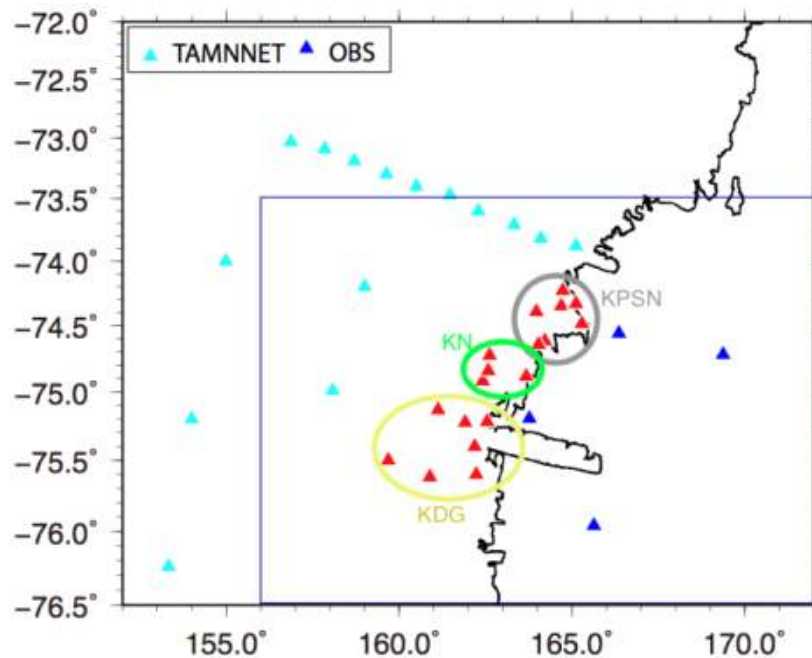


그림 547 맨틀 속도 구조 연구에 사용된 지진관측망의 위치

선별한 P파의 상대적인 도달시간에 대한 지진파의 주행 곡선을 계산하고 3차원 속도 모델링의 위하여 작성한 격자 모델(그림 549)에 맞추어 계산하였고, 이를 다중 반복법(iterative method)을 이용하여 3차원 모델을 도출하였다 (VanDecar, 1991).

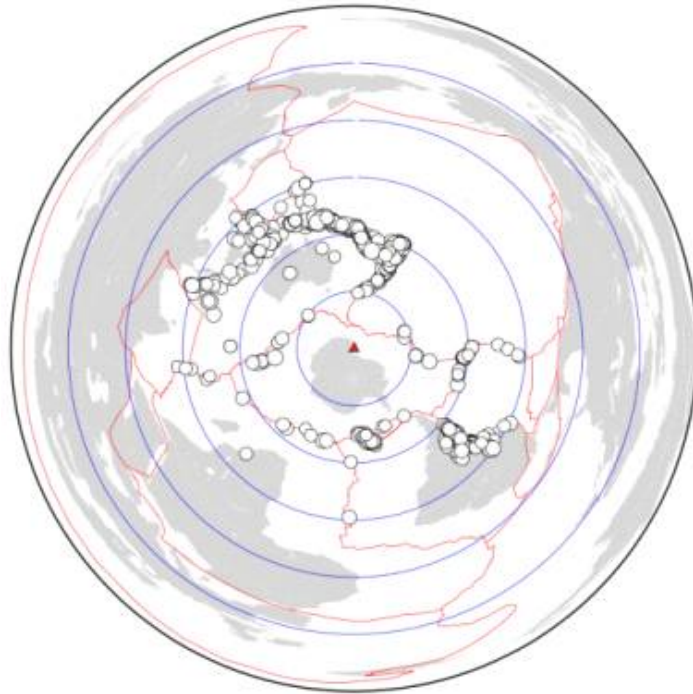


그림 548 MCCC후에 선별된 원격지진원의 위치

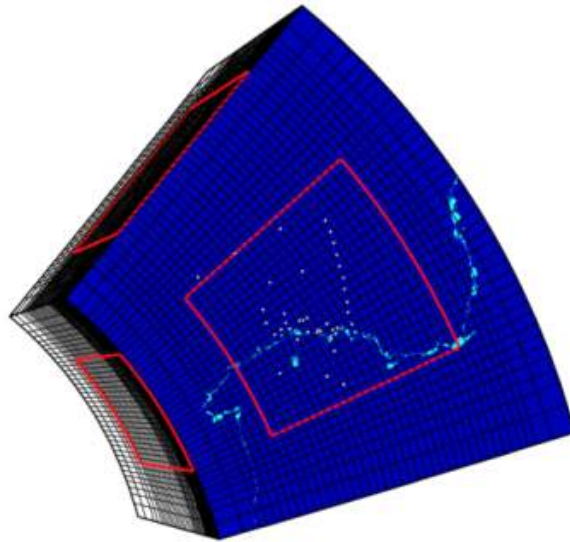


그림 549 3차원 속도 모델링을 위하여 미리 작성된 격자 모델. 붉은 사각형 지역은 본 모델에서 가장 해상도가 높을 것으로 예상되는 지역

(나) 3차원 속도 모델 결과

미국 TAMNNET 지진관측망 자료를 이용하여 구현된 3차원 속도 모델의 범위는 북빅토리아 내륙과 북부로 확대되었으며, 극지연구소의 관측망 자료와 연개하여 기존에 발표된 모델보다 비약

적으로 높아진 해상도를 보여준다.

그림 550와 551는 본 연구에서 도출된 3차원 속도구조 모델의 깊이에 대한 구조와 수직단면의 속도 구조를 각각 보여준다. 그림에서 붉은 부분은 상대적으로 속도가 최대 2% 느린 부분, 그리고 파란색은 상대적으로 최대 2% 빠른 지역을 나타내고 있다. 맨틀의 속도구조는 지각과 달리 화학적 조성이 안정적이기 때문에 속도의 변화는 물성의 변화에 기인되는 것이 확인되고 있다. 따라서 맨틀의 속도가 느리다는 것은 그 지역이 상대적으로 뜨거운 물질로 되어 있다는 것이고, 속도가 빠른 지역은 그 지역이 따가운 맨틀 물질로 이루어 진것으로 유추할 수 있다.

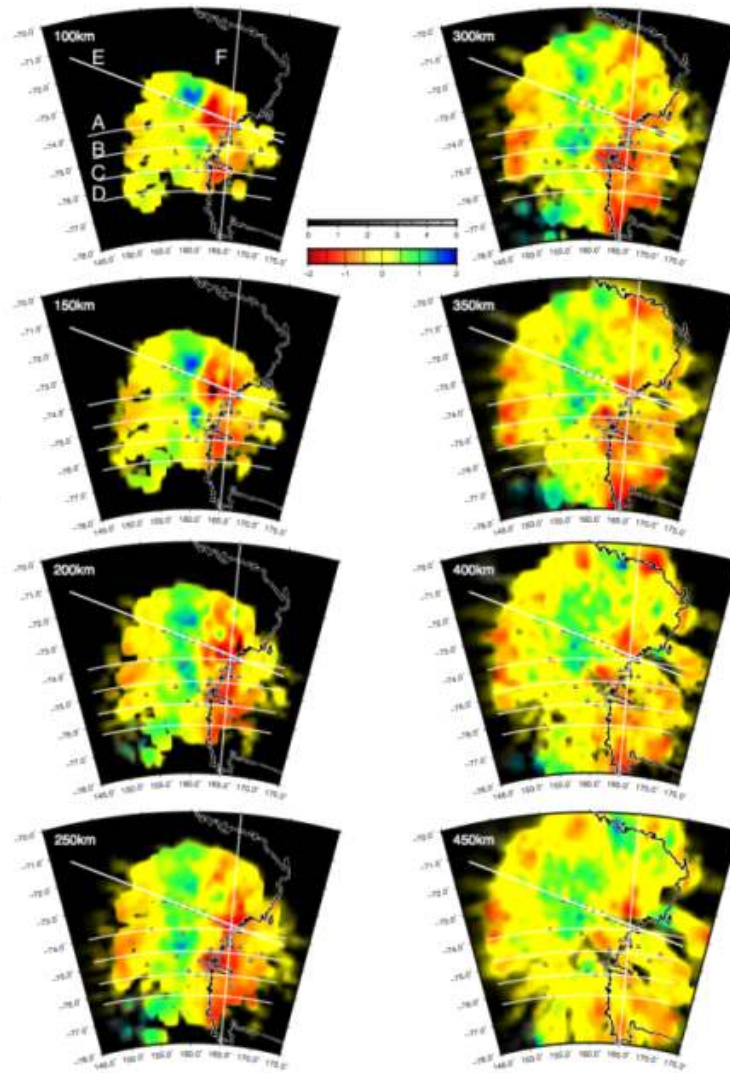


그림 550 본 연구를 통하여 구현된 3차원 속도 모델에서 추출된 각 깊이에 대한 속도 구조. 그림 1에서 보여주는 격자 모델중에서 지진파가 통과한 숫자가 5개 이하인 곳은 검은색으로 표현되었음

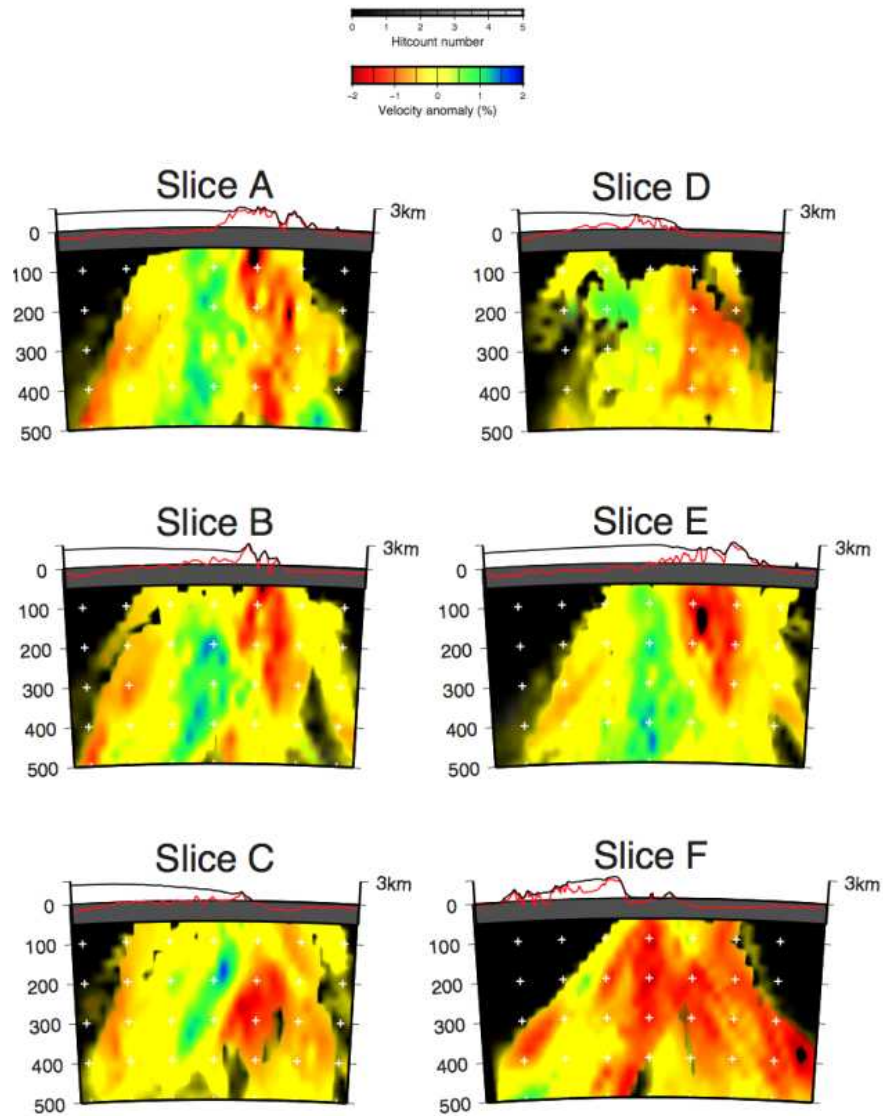


그림 551 본 연구에서 구현된 3차원 속도 모델의 수직 단면에 대한 속도 구조. 단면에 대한 위치는 그림 502에 나타나 있음. 상부의 검은 색 실선은 Bedmap2에서 추출한 표면의 고도를 나타내며, 붉은 색 실선은 Bedmap2에서 추출한 빙하 하부의 지표 고도를 나타냄. 표면의 고도와 빙하하부 지표 고도는 속도모델의 깊이보다 20배 확대되어 그려짐.

(2) 지구내부구조: 관측망 주변잡음 표면파를 이용한 북빅토리아 랜드 지각 및 상부 맨틀 속도 구조 연구

(가) 분산곡선 추출

극지연구소 지진관측망의 14관측소와 미국 TAMNNET 관측망의 15개 관측소(그림 552a)에서 관측된 연속 지진자료를 잡음 상호 상관법(Noise Cross-Correlation)을 이용하여 406개의 관측소 쌍에 대한 fundamental mode Rayleigh-wave의 Green's functions 계산하였다 (그림 552b).

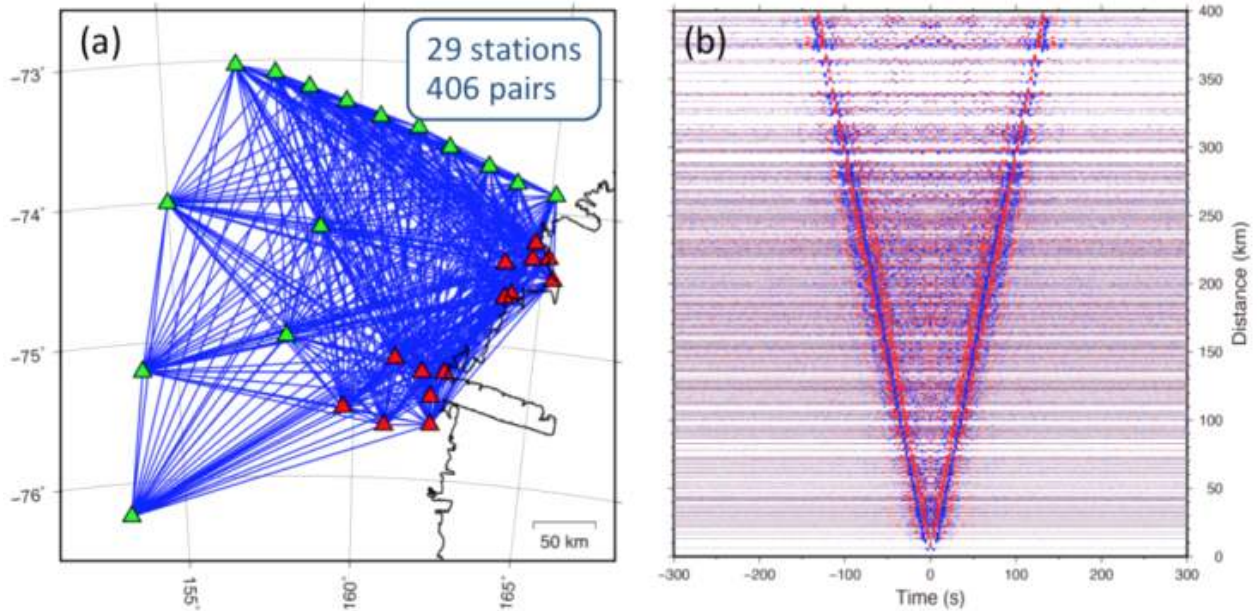


그림 552 (a) 극지연구소 지진관측망(붉은색 삼각형)과 미국의 TAMNNET 지진관측망(초록색 삼각형)에 대한 관측소 쌍(파란색 실선)의 모습. (b) 각 관측소 쌍의 상호상관방법으로 추출된 수직성분 표면파 파형 (Rayleigh waves).

- 추출된 406개의 Rayleigh wave에서 다중 필터 방법(Multiple Filter Technique)[Herrmann, 2012]를 이용하여 3초~25초간의 군속도와 위상속도에 대한 분산곡선을 추출하였다. 정확한 분산곡선을 추출하기 위하여 계산된 Green's function들 중에서 신호대 잡음비(signal-to-noise ratio: SNR)이 10보다 작은 신호, 관측소간 거리가 표면파 주기에 대하여 파장*3보다 짧을 경우, 그리고 3개월의 신호 중첩(tree-month-stacked)된 Green's functions의 표준편차가 0.1km/s 이상인 자료는 사용하지 않았다. 최종적으로 각 주기에 대하여 사용된 자료의 개수와 결과는 그림 553와 같다.

- 계산된 분산 곡선을 각 주기에 대하여 정렬하여 2차원의 군속도와 위상속도 구조를 역산하였다. 역산을 위하여 20*20km 간격의 격자구조와 Fast Marching Travel-time (FMT) 방법을 사용하였다. 5초, 10초, 15초, 그리고 20초에 대한 2차원 역산결과는 그림 554에서 보여준다.

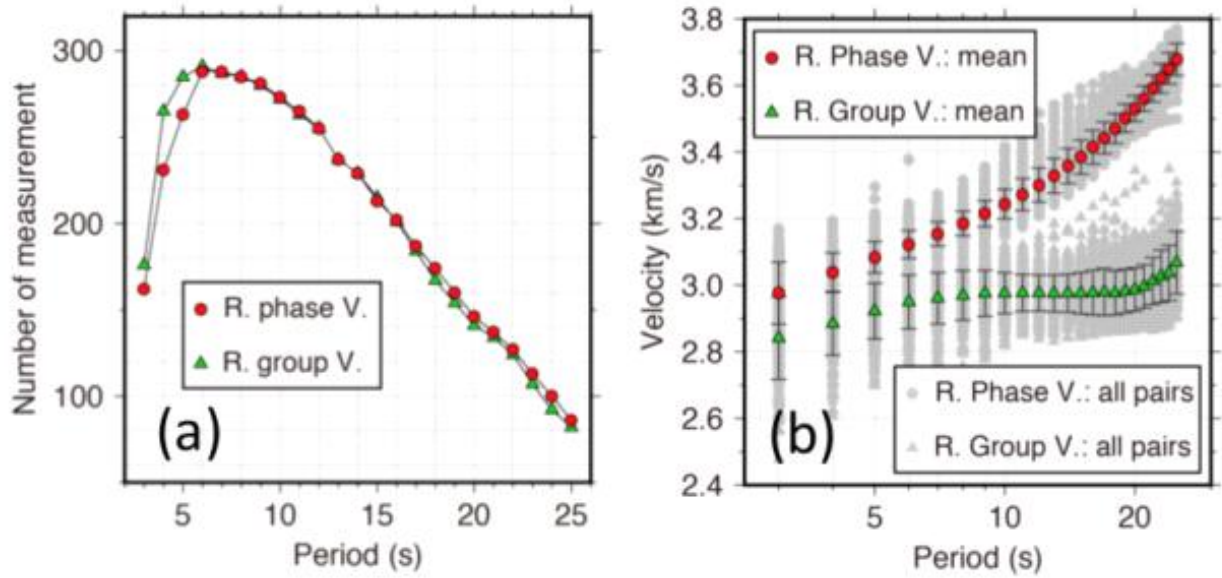


그림 553 (a) 각 주기에 대한 표면파 관측 숫자. (b) 각 주기에 대한 계산된 균속도(붉은 원)와 위상 속도(초록색 삼각형)와 평균값, 편준편차(error bar)를 보여줌.

- 주변 잡음을 이용하여 계산된 Rayleigh파의 위상속도와 40km 이상의 상부 맨틀 구조를 계산하기 위하여 TAMNNET에서 two-plane wave method를 이용하여 계산된 장주기 위상 속도[Graw *et al.*, 2016]를 합하여 3차원 속도 구조를 계산하였다 (그림 555). 그림 556은 겉보기 3차원 속도구조 모델(pseudo-3D shear velocity model)를 구하기 위한 1d Rayleigh wave dispersion를 추출하기 위한 격자 구조와 지체구조 특성에 따른 1d 속도구조 예시 지점을 보여준다(5개의 큰원).

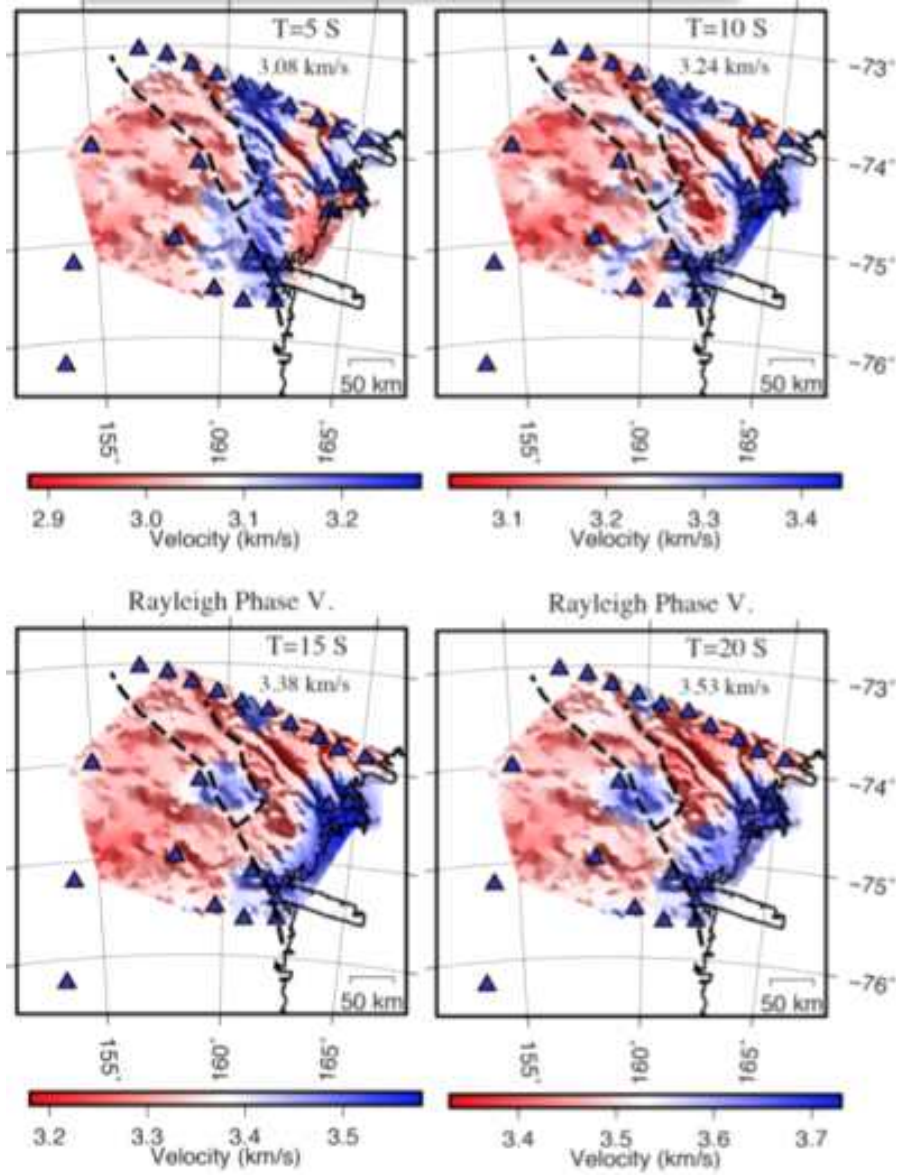


그림 554 Rayleigh wave의 5초, 10초, 15초, 20초에 대한 2차원 위상속도 결과

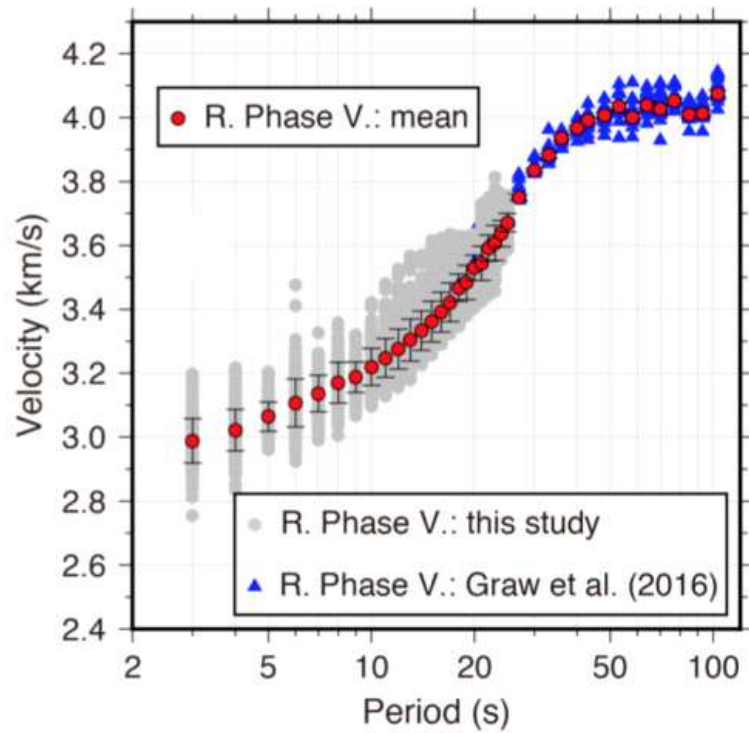


그림 555 본 연구를 통하여 계산된 Rayleigh wave 위상속도 (회색 원)와 상부 맨틀 속도 계산을 위해 사용된 Graw *et al.* [2016]의 위상 속도 분포 (파란색 삼각형)과 평균값 (붉은 원).

극지연구소

- 202개의 격자 지점중에서 연구지역에서 볼 수 있는 5개의 지체구조에 대한 1d 속도 모델을 그림 557에서 보여 주고 있다. 그림 557에서 첫 번째 속도 모델은 멜번 화산 지역을 나타내며 깊이 40km 지역에서 매우 느린 저속도 층의 존재를 보여주며, 또한 120km이하에서도 전지구 평균보다 낮은 속도를 보여 주고 있다. 두 번째로 Ross 해 연안은 20km 깊이의 지각을 보이며 상부맨틀에서 암석권과 연약권에 대한 명확한 경계가 없는 것이 특징이다. 내륙 쪽으로 남극종단 산맥에 해당하는 지역은 40km 두께의 지각과 ~50km-80km 사이에서 암석권의 lid가 존재하는 것을 보인다. 마지막으로 동남극 지역(격자 번호 471번과 720)은 ~20km과 ~40km에서 강한 불연속면을 보이고 있는데, ~20km는 감람암/현무암질의 상부지각과 하부지각에 대한 불연속면에 의한 것으로 추정된다. ~40km 두께의 지각 이후로 남극종단 산맥에서 보여주는 것과 같이 암석권의 lid가 존재하는 것을 보여 준다.

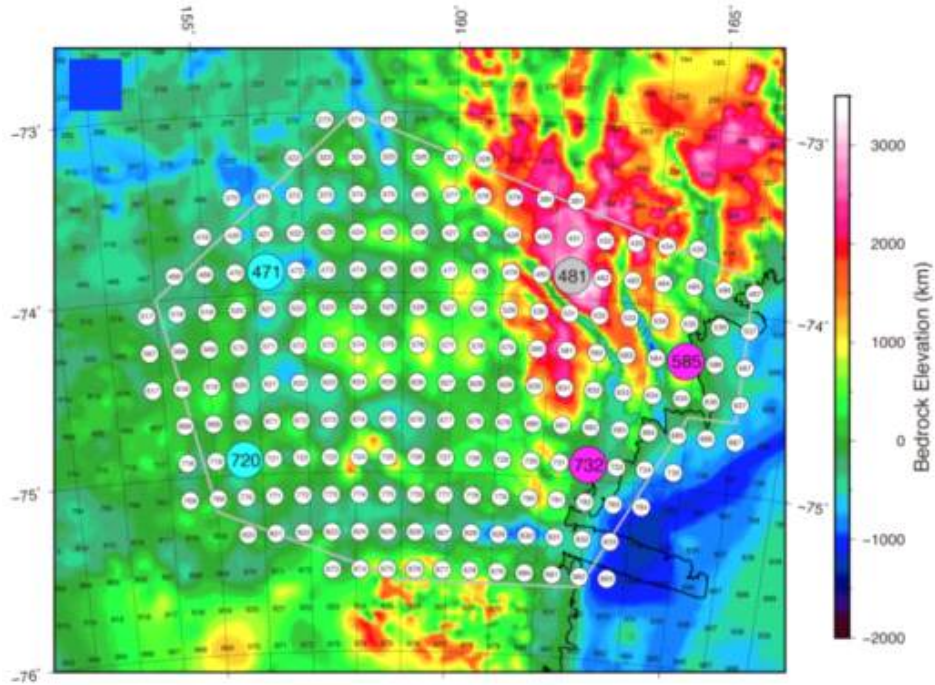


그림 556 Pseudo-3D model 계산을 위한 Rayleigh wave 추출 격자 지점. 지점 중에서 지체구조별로 1d model 특성(그림 509)을 나타내기 위한 5개 지점은 큰 원으로 표시됨

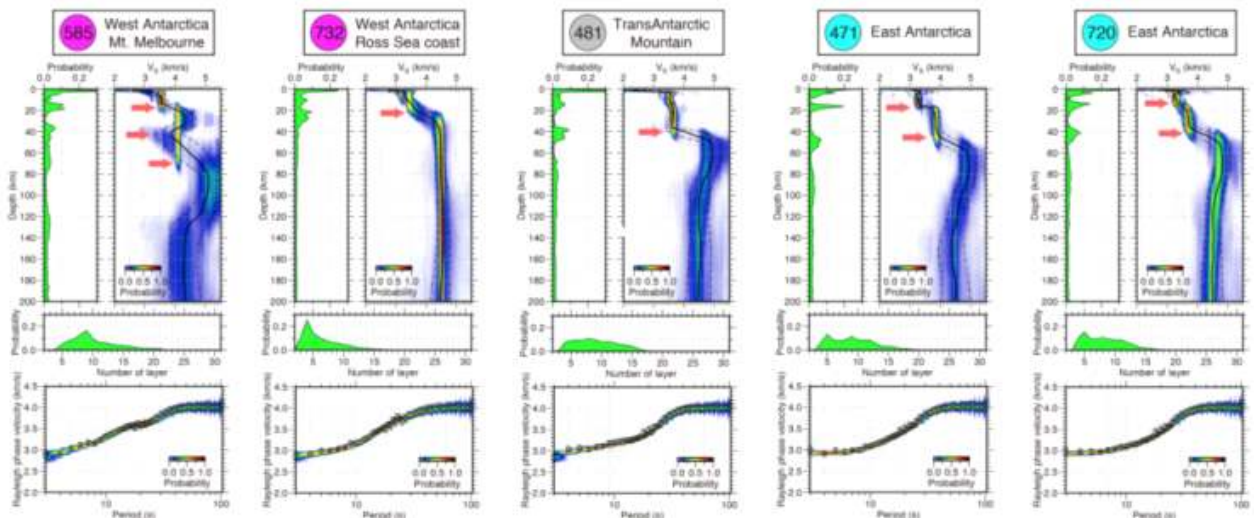


그림 557 연구지역에서 나타나는 대표적인 5개의 지체구조에 대한 1d 속도 구조 모델. 각 지체구조별로 각기 다른 속도 구조적 특징을 보여주고 있음.

- 본 연구에서 도출된 3차원 속도 구조는 맨틀 온도를 계산하는 기초자료를 제공할 수 있고, 환산된 맨틀의 온도 분포를 이용하여 맨틀에서 지각으로 전해지는 열류량을 유추할 수 있다. 이는 지각과 빙하의 경계면에 전해지는 열류량으로 환산할 수 있고, 이는 남극 북빅토리아 지역에서의 빙하의 거동을 예측하는데 매우 중요한 자료로 활용될 것이다.

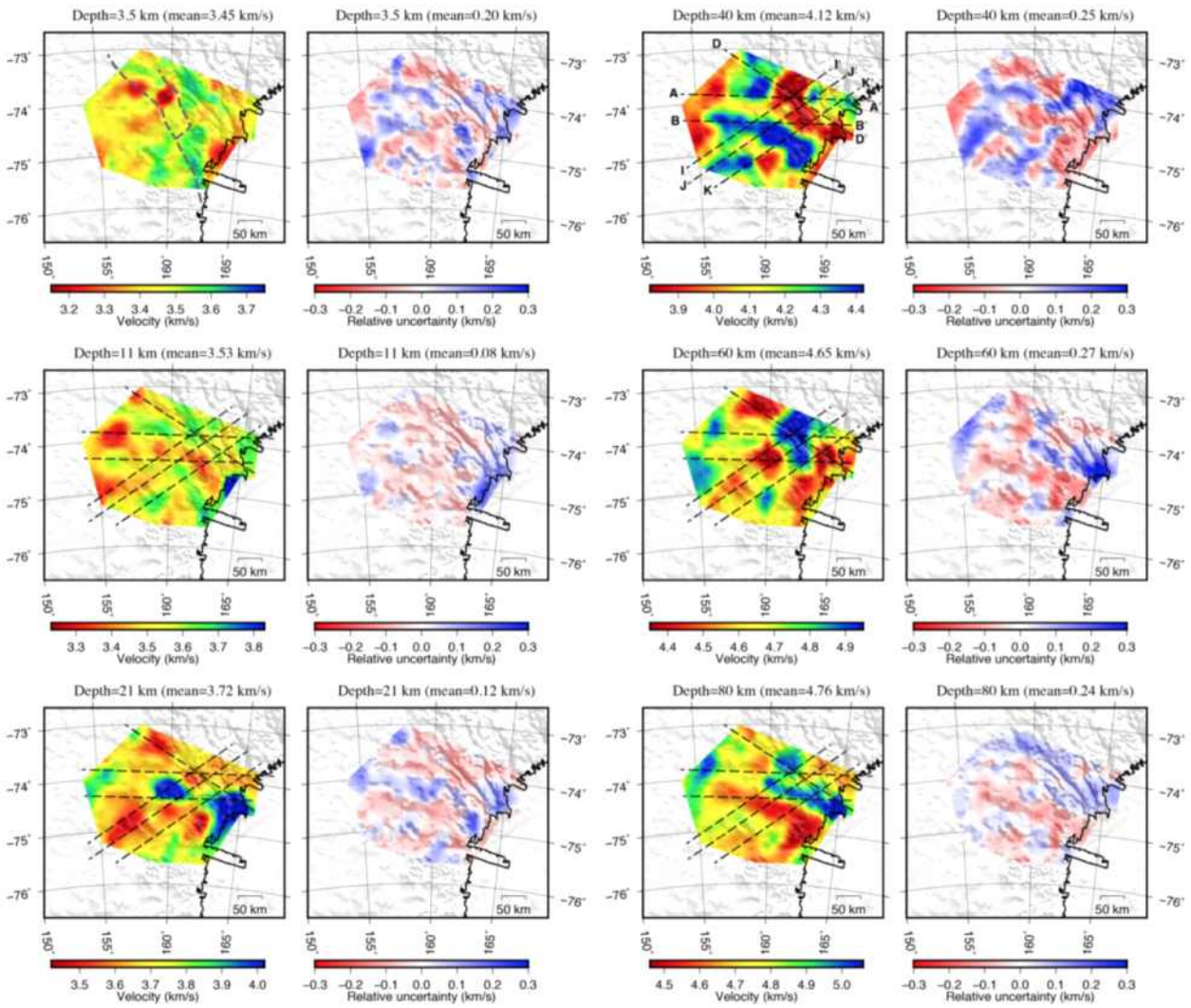


그림 558 202개 1d 모델을 합하여 생성된 3d 속도 구조 모델에서 추출한 35km-80km 깊이에 대한 속도 구조와 오차 범위. 6개의 수직 단면도의 위치는 40km 깊이 모델에 나타나 있고, 단면 모델은 그림 503에서 보여줌.

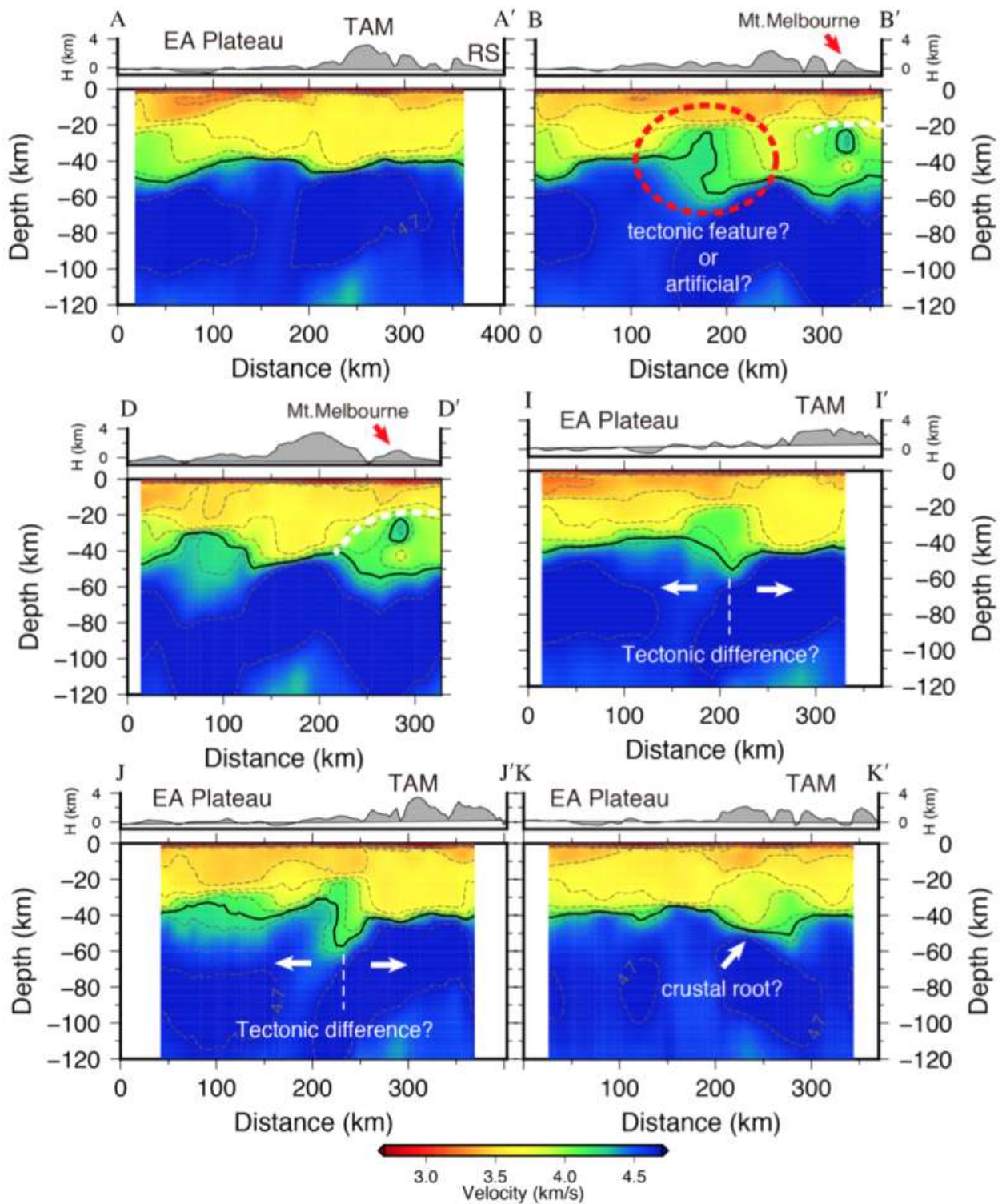


그림 559 202개 1d 모델을 이용하여 생성된 3d 모델의 수직 단면도.

(3) 후빙기 지각 반등 모델 검증

전 지구적인 중력 관측은 2002년 GRACE(Gravity Recovery and Climate Experiment)가 발사된 이후로 큰 진전을 보였다(Tapley *et al.*, 2004). 중력 위성이 지구를 실시간으로 관측하면서 이전까지 사람의 발길이 닿지 못했던 험지와 오지의 자료를 포함하여 전 지구의 중력 변화를 수백 킬로미터의 해상도로 가능하게 한 것이다. 이러한 중력 변화는 주로 지구의 각 지역에서 발생하는 질량 변화에 의해 나타난다. 예를 들어 연간 변화하는 중력 변화는 대부분 지표의 물 질량의 수송에 의한 결과로서 관측된다. 지표에 존재하는 물이나 얼음은 계절에 따른 기후 변화에 의해 다른 곳으로 빠져 나가거나 추가로 유입되므로 연중 중력의 증가 혹은 감소 신호를 뚜렷하게 만들어 낸다. 매년 심해지는 해수면 상승 역시도 동일한 원리로 바다 지역의 중력 신호를 매년 점점 강하게 만들고 있기 때문에, 이를 통해 해수면의 연간 증가폭을 추정할 수 있게 되는 것이다. 표면의 수질량 외에도 고체 지구의 질량이 움직여도 중력 변화가 발생할 수 있다. 지진 등으로 지각이 이동, 압축, 신장되는 경우에는 지각의 밀도 변화가 중력의 변화로서 관측될 수 있다. 또 다양한 원인으로 발생하는 지각 하부의 맨틀이 움직이는 신호도 장기적이고 광역적인 중력 변화를 일으킨다. 이 외에도 지구의 조석, 타원도(ellipticity) 변화, 극 운동(polar motion) 현상과 같은 행성 규모의 현상도 중력 신호의 관측에 적지 않은 영향을 미친다.

그 중에서도 중요하게 다루어지는 효과 중 하나가 바로 후빙기 반등(post-glacial rebound) 또는 빙하 지각평형 조정(glacial isostatic adjustment)으로 불리는 현상이다. 이는 과거 빙하기 때에 무거운 얼음에 눌러 있던 지구 표면이 얼음이 녹고 난 이후에 천천히 원래 위치를 회복하는 현상을 말하며, 현재에도 진행 중이다. 지난 빙하기 이후 당시 빙하 지역이었던 곳을 중심으로 수만 년 동안 비교적 일정한 속도로 지표면이 상승하는 모습은 곧 고체 지구가 상승하는 효과이기 때문에 중력 위성 입장에서는 마치 중력이 조금씩 강해지는 것처럼 관측된다. 위에서 언급하였듯이 중력 위성은 모든 질량 변동 원인으로부터 발생하는 중력 효과가 모두 합쳐져 관측되므로, 각 요소들에 대한 효과를 잘 분별해 내야만 원하는 목표 현상의 효과를 정확하게 추정할 수 있게 된다(Peltier, 2004). 이와 같은 후빙기 반등 현상은 북미 오대호 인근을 중심으로 한 캐나다 지역, 남극의 일부 지역, 유럽 북부 지역에 주로 나타나고 있으나, 반등 효과의 정확한 크기와 영역에 대해서는 연구한 학자마다 그 결과물에 다소 차이가 있다. 따라서 어떠한 후빙기 반등 모델을 받아들여 GRACE 중력 관측값을 보정, 분석하는가에 따라 해당 지역의 수질량 변화 예측은 제각기 달라질 수밖에 없다. 특히 후빙기 반등 효과에 큰 영향을 받고 있는 지역에는 그린란드나 남극처럼 현재에도 지구의 거대한 얼음 저장고의 역할을 하는 곳들이 포함되어 있는데, 한 예시로서 남극 대륙의 빙하 감소는 사용된 후빙기 반등 모델에 따라 그 양이 연간 수십 기가톤에서 많게는 200 기가톤으로 분석되는 등, 연구마다 그 결과의 편차가 무시할 수 없을 정도로 크다. 이러한 오차들은 현재 진행 중인 기후 변화의 실태 평가는 물론, 장기적 기후 변화 예측에도 큰 불확실성을 야기하게 된다.

수많은 전문가들은 일반적으로 빙하 이력(ice history)이라 불리는 과거 축적된 빙하의 분포 모델과 지구 내부의 점탄성 반응에 관련된 수직 층상 구조 모델을 바탕으로 여러 관측 결과에 가장 잘 부합하는 후빙기 반등 모델을 계산하여 제공하고 있다. 하지만 본 연구에서는 이러한 전문적이고도 원론적인 접근법 외에, 현재 가진 GRACE 관측 자료를 활용하여 지구 각 부분의 수질량 변화를 예측하고자 할 때에 당장 적용 가능한 수준의 후빙기 반등 모델을 얻고자 하였다. 바꾸어 말하면, 수질량 변동과 무관한, 후빙기 반등 효과를 포함한 기타 효과들을 GRACE 자료에서 효과적으로 보정

함으로서 결과적으로 수질량 변화에 의한 신호를 더욱 정확하게 얻어내는 것을 목표로 하는 것이다.

GRACE 자료는 이전 시기 관측 자료에 비해 눈에 띄는 장점을 갖고 있지만, 그 반면에 몇 가지 한계점도 명확하게 포함하고 있다(Chen *et al.*, 2013). 여러 연구기관에서 제공되는 GRACE 자료는 고주파 대역에서의 소음을 상당량 포함하고 있는데, 이를 제거하기 위한 후처리 기법을 거치면 대개 해상도가 수백 km에 달할 정도로 떨어지게 된다. 때문에 실제 신호들이 주변 영역으로 퍼져 보이는 신호 누출 현상이 나타날 수 있다. 또한 위성 측정 자체의 감도 문제 때문에 지구의 무게중심, 자전축 변화와 같은 행성 규모의 현상을 표현하는 구면 조화 함수의 저차 계수들(degree-1과 2)은 다소 정밀하지 못하다는 약점도 함께 내포하고 있다. 이들 신호들이 만들어내는 자료의 부정확성은 위에서 중요하게 언급한 후빙기 반등 효과의 불확실성과 함께 정밀한 수질량 변화를 얻는 데에 장애물로서 작용하고 있다. 이러한 효과들이 적절하게 보정되지 못했을 경우에는 GRACE 자료의 수질량 변화 신호들 또한 큰 오차를 내포할 수밖에 없다. 때문에 보정을 모두 거친 GRACE 자료가 수질량 변화 신호만을 갖고 있는지에 대한 타당성을 평가할 수단이 필요하게 된다.

본 연구에서는 이를 위하여 바다의 수질량 신호를 이용하였다. GRACE 자료에서 바다의 수질량 변화 신호는 물리적으로 질량 해수면(mass sea level) 변화로 곧장 연결된다. 질량 해수면은 총 해수면 변화에서 열팽창과 같은 부피 변화 효과를 빼어 질량의 증감으로만 야기되는 해수면의 변화를 의미하는 항이다(Cazenave *et al.*, 2014). 이 질량 해수면의 증가는 곧 육지에서 담수나 빙하들이 동일한 양만큼 유출된 양으로 쉽게 이해할 수 있기 때문에 기후 변화의 주요 지시자로서 폭넓게 이용되고 있다. 이 질량 해수면은 물리적으로 지구의 지오이드 면을 따라 정렬하게 되는데, 1970년대에 이미 임의의 표면 질량 배열이 주어지면 질량 해수면의 공간적인 변화를 계산하는 방법이 해수면 방정식(sea level equation)이라는 이름으로 집대성된 바 있다(Farrell and Clark, 1976). 이를 이용하면, 어떤 GRACE 자료가 수질량 변화에 의한 신호만을 갖도록 타당하게 보정되었다면, 그 자료의 바다 부분 신호는 해수면 방정식으로 거의 동일하게 재현되어야 할 것이다. 해수면 방정식은 순수하게 중력에 의해 해수면이 재배열되는 효과만을 나타내기 때문에, 이와 물리적으로 별개의 현상인 후빙기 반등 신호나 저차 계수 신호들이 채 보정되지 않고 섞여 있다면, GRACE 자료의 잔여 값이 말해 주는 해수면은 해수면 방정식을 통해 물리적으로 예견되는 해수면과 시공간적으로 상당한 차이를 보일 것이라 예상할 수 있다. 이러한 방식의 평가는 앞서 언급했던 빙하 이력, 지구 구조 모델과 같은 전문적이고도 복잡한 추가 모델링 절차 없이도 후빙기 반등 효과를 GRACE 자료 자체만 갖고도 보정할 수 있는 한 가지 방법이 될 수 있다. 이를 GRACE 자료의 자체 일관성 평가(self-consistency test)라고 하겠다.

본 연구에서는 우선 저해상도인 GRACE 자료를 고해상도로 복원하기 위하여 Forward Modeling 기법을 통해 고해상도 수질량 분포도를 얻었다(Chen *et al.*, 2013). 이 방법은 자동화된 반복시행법을 통해 저해상도의 자료를 만들어 낼 수 있는 가장 합리적인 고해상도 분포도를 찾아 가는 방법으로, 이미 여러 연구에서 널리 쓰여 온 방식이다. 이 고해상도 분포도를 이용하면 해수면 방정식을 통한 이론적 해수면 변화를 계산하는 것은 물론, 신호 누출이 없는 GRACE 자료의 온전한 바다 신호를 얻을 수 있다. 이때 해수면 방정식의 해와 GRACE 바다 신호의 시계열을 비교하여 해당 GRACE 자료의 자체 일관성의 수준을 평가할 수 있다. 이 유사성을 정량적으로 평가하기 위해, 본

연구에서는 6개의 대양 영역으로 바다를 분할하여 각 바다에서 평균적인 변화 시계열을 얻은 후, 두 시계열 간의 선형 추세(linear trend)와 평균 제곱근 편차(root-mean-square)를 비교하였다. 이러한 방법을 통해 자체 일관성이 가장 높은 GRACE 자료를 얻을 수 있으며, 여기에는 후빙기 반등 효과와 같은 수질량 변화 신호와 무관한 효과가 효과적으로 보정되어 있을 것으로 예상된다. 이를 기반으로 육상 담수의 변화는 물론, 해수면의 거동도 더욱 정밀하게 예측할 수 있게 된다.

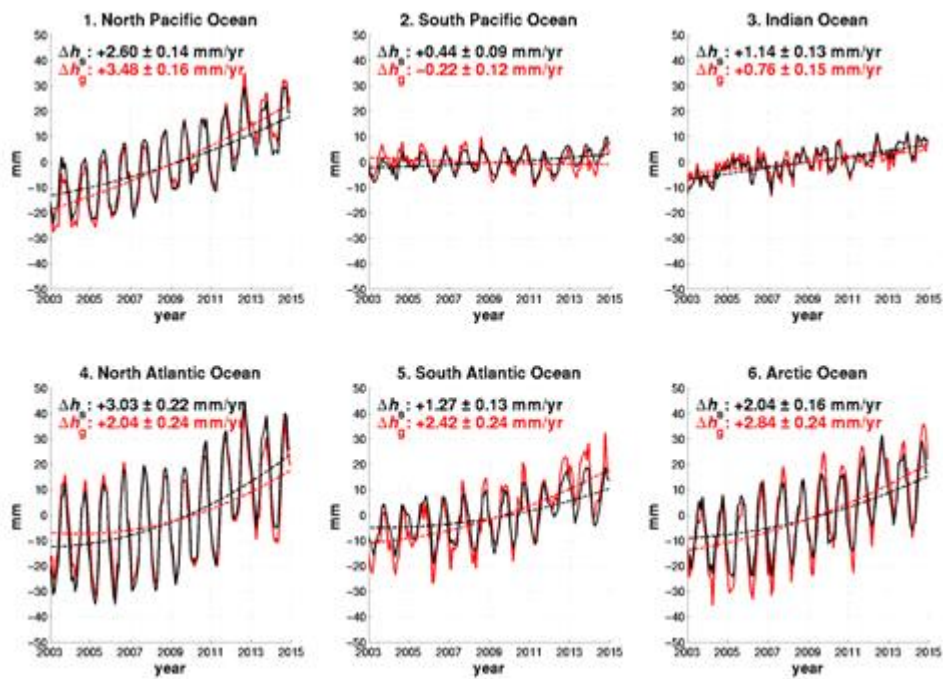


그림 560 널리 추천되는 방법으로 보정된 GRACE 자료의 자체 일관성 평가. 번호 순서대로 북태평양, 남태평양, 인도양, 북대서양, 남대서양, 북극해에서의 평균 시계열이며, 빨간 선은 GRACE의 잔여 바다 신호, 검은 선은 해수면 방정식으로 구한 질량 해수면 변동을 나타낸다. 후빙기 반등 효과는 A Geruo의 모델(2013)을 사용하여 보정하였으며, GRACE 자료의 불확실한 저차 계수 중 하나인 C_{20} 는 SLR(Satellite Laser Ranging) 계측으로 별도로 구한 값들로 대체한 것이다. 검은 선과 빨간 선은 대부분의 바다에서 대체로 맞지 않음을 확인할 수 있으며, 최대 1.2 mm/yr의 추세 차이를 보이고 있다.

상기하였듯이, 자체 일관성 평가는 결국 관측된 GRACE 자료의 잔여 바다 신호와 해수면 방정식으로 예측되는 이론적 바다 신호의 일치율로써 GRACE 자료의 보정이 타당하게 이루어졌는가를 판단하는 과정이다. 이들 시계열의 불일치율은 GRACE 자료에서 후빙기 반등, 저차 계수의 변동과 같은 고체 지구의 반응으로부터 기인한 신호들이 성공적으로 보정되지 않았다는 방증이 될 수 있다. 특히 최근 GRACE 자료의 후처리는 이들 신호를 보정하기 위한 ‘권장’ 후처리 선택지를 제공하고 있는데, 이는 SLR(Satellite Laser Ranging) 관측으로 얻은 C_{20} 저차 계수를 GRACE 자료에 교

체 삽입하고(Cheng *et al.*, 2013), 후빙기 반동 신호는 A Geruo의 모델로 보정하는 것이다(A *et al.*, 2013). 하지만 이들 역시도 다소 불완전하다는 의견이 제시되어 왔다. 본 연구에서는 실제로 이 처리법이 어느 정도의 자체 일관성을 보이는가를 판단하기 위해, 권장되는 후처리법으로 GRACE 자료를 보정한 후, 여기에 자체 일관성 평가를 수행하였다. 그림 560은 2003년 1월에서 2014년 12월까지 만 12년의 기간 동안, 6개 대양에서 GRACE 자료의 바다 잔여 신호(빨간색)와 이론적 해수면 변화(검은색)를 그린 것이다. 그림에서 확인할 수 있듯 두 시계열은 변화의 양상은 유사하나 그 추세 면에서 큰 차이를 보이고 있다. 질량 해수면은 해당 기간 동안 전 세계 평균 약 2 mm/yr의 상승률을 보이고 있는데, 두 시계열은 지역에 따라서 1.2 mm/yr까지 차이가 나기도 하는 등, 그 차이가 상당하다고 할 수 있다. 따라서 상기한 처리법을 사용하여 해수면의 거동을 연구하는 경우에 해수면 변동의 불확실성은 더욱 증가할 수밖에 없다. 이러한 차이는 GRACE의 바다 잔여 신호에 해수면 방정식으로 구현되지 못하는 고체 지구의 변동 신호가 섞여 있다는 중요한 증거가 되며, 해당 GRACE 자료의 보정이 부족하다는 명확한 근거가 된다.

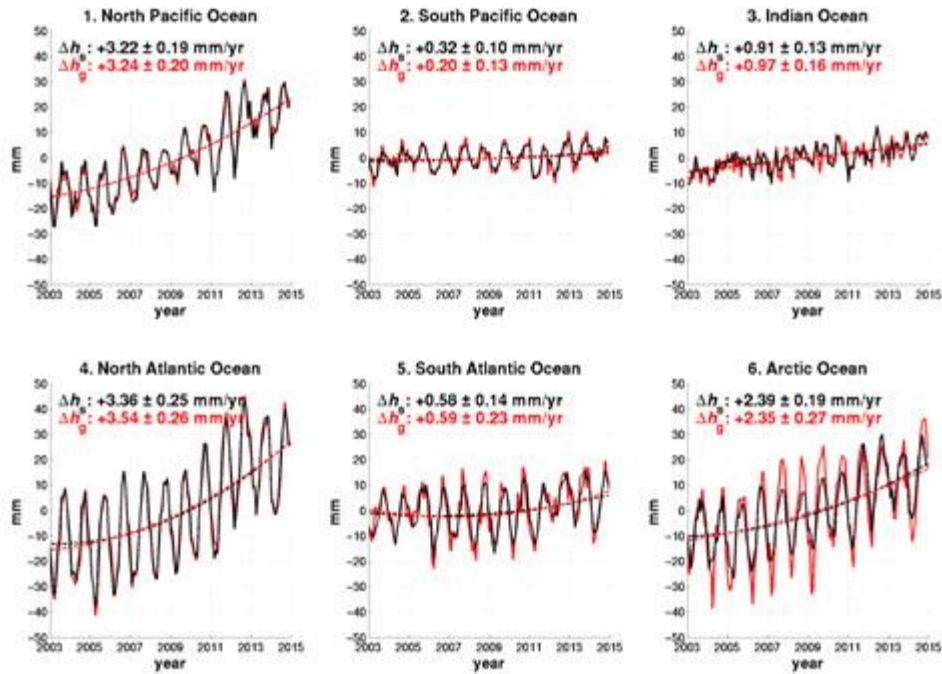


그림 561 이전 그림과 동일한 형태의 그림이나, GRACE 자료는 가장 자체 일관성이 높은 조합으로 처리되었다. GRACE 저차 계수 C_{20} 는 통째로 교체하는 대신 K_2 , S_2 조석 신호의 공명으로 발생하는 에러 신호 보정만 수행하였고, C_{21} 과 S_{21} 은 극 운동 관측 자료를 바탕으로 새롭게 계산하여 교체하였다. 후빙기 반동 신호는 Peltier의 모델(2015)로 보정하였다.

그림 561은 자체 일관성을 시험한 수많은 결과 중 하나의 예시로서, 실제로 후빙기 반동, 저차 계수 보정, GRACE 자료 제공 센터 등 수많은 선택지를 고려하면 백여 가지 이상의 조합이 발생할 수 있다. 이들 자료의 다양성은 그만큼 GRACE 자료로 얻을 수 있는 표면 수질량 변화도가 백여 가지 이상의 서로 다른 선택지를 가질 수 있다는 것을 뜻하며, 그들 자료 간의 상이한 차이는 곧

해석적 불확실성과 오차 범위로 이어질 수 있다는 것을 의미한다. 본 연구에서는 가능한 모든 조합에 대하여 자체 일관성 평가를 수행했으며, 그 중 가장 높은 일치율을 보이는 처리법 조합을 발견하였다. 가장 자체 일관성이 높았던 자료는 CSR(Center for Space Research)에서 제공하는 GRACE 자료를 써서 저차 계수 C_{20} 에 남아 있는 K_2 , S_2 조석의 신호를 보정하고 후빙기 반동을 Peltier의 최신 모델(Peltier *et al.*, 2015)로 보정한 경우로 나타났다. 그림 562는 해당 자료를 바탕으로 한 두 시계열의 변화를 나타낸 것으로서, 대부분의 바다에서 거의 동일한 수치의 추세는 물론, 북극해를 제외한 대부분의 바다에서 그 변동 양상이 유사하게 나타나고 있다. 이는 GRACE 자료에서 후빙기 반동 및 지구 운동과 같은 고체 지구에 의한 효과가 성공적으로 보정되어, 수질량의 재배치만 고려하는 질량 해수면 변화가 해수면 방정식을 통한 물리적 예측과 잔여 바다 신호에서 보이는 관측적 수치 양쪽에서 잘 일치된 결과로 나타났기 때문이다.

이러한 일치가 단순히 우연의 산물이 아님을 확인하기 위해, 이와 별도로 가상의 합성 자료를 갖고도 모델 실험을 수차례 수행했는데, 임의의 고체 지구 신호(자전축의 부자연스러운 와동, 과장된 후빙기 반동 강도 등)를 의도적으로 섞어 넣은 합성 자료는 항상 자체 일관성이 낮은 결과를 보였다. 반대로 이러한 신호가 없었을 때에는 수질량 신호가 임의의 분포를 갖더라도 합성 GRACE 자료의 바다 잔여 신호는 해수면 방정식의 물리적 예측과 높은 일치율을 보였다(Jeon *et al.*, 2018).

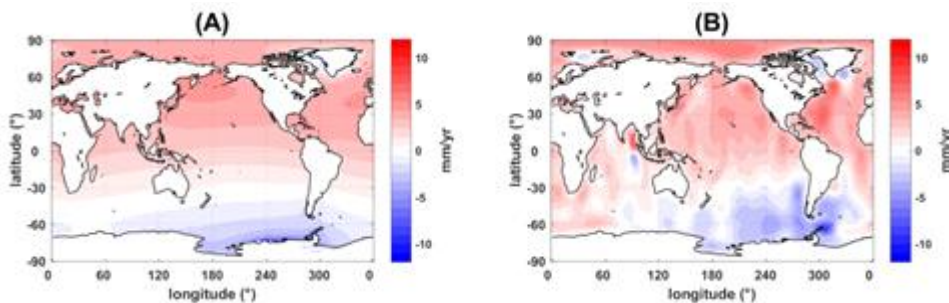


그림 562 자체 일관성이 가장 높은 그림 561과 같은 GRACE 자료를 써서 구한 추세도. (A)는 해수면 방정식으로 구한 결과이며, (B)는 효과적으로 보정된 GRACE의 잔여 바다 신호로부터 구한 해수면 상승률이다.

그림 562는 이론적 해수면 변동과 관측적 해수면 변동 두 자료로부터 선형 변화율을 공간적으로 그린 것으로, 여기에서도 대부분의 바다에서 거시적으로 굉장히 유사한 패턴을 보이고 있음을 확인할 수 있다. 왼쪽(A)의 이론적 해수면 변화율과 달리 오른쪽(B)의 GRACE 잔여 신호들은 위에서 언급하였던 고주파 소음들이 여전히 약간 포함되어 있고, 수마트라 인근과 같이 지진 신호도 약간 포함되어 있음을 알 수 있다(Han *et al.*, 2006). 하지만 그 외에는 대양 규모에서 두 자료의 분포는 놀랄 만큼 유사하며, 이 역시 후빙기 반동 신호를 포함한 대규모의 고체 지구 신호들이 효과적으로 제거되었기 때문으로 생각된다.

이렇게 자체 일관성이 높은 자료를 바탕으로, 우리는 GRACE 자료가 포함하고 있지 않은 지구 무게 중심 이동 효과(1차 구면 조화 계수)를 추가로 계산하여 더하였다. 실제 총 질량 해수면은 무게 중심 변화까지 모두 포함된 값으로 표현되어야 하지만, GRACE는 상기한 감도의 한계 때문에 지구 중심 이동은 감지하지 못한다. 때문에 2차 이상의 구면 조화 계수 합으로 표현된 그림 561와 562의 결과는 이 효과를 포함하여야 완전한 해수면 변화를 표현할 수 있게 된다. 지구의 무게 중심

이동은 Swenson 등(2008)의 연구에서 소개된 계산법을 통해 쉽게 계산할 수 있다. 이를 포함하면 그림 563과 같은 각 대양에서의 시계열 변화와 그림 564와 같은 공간적 해수면 상승을 얻을 수 있다.

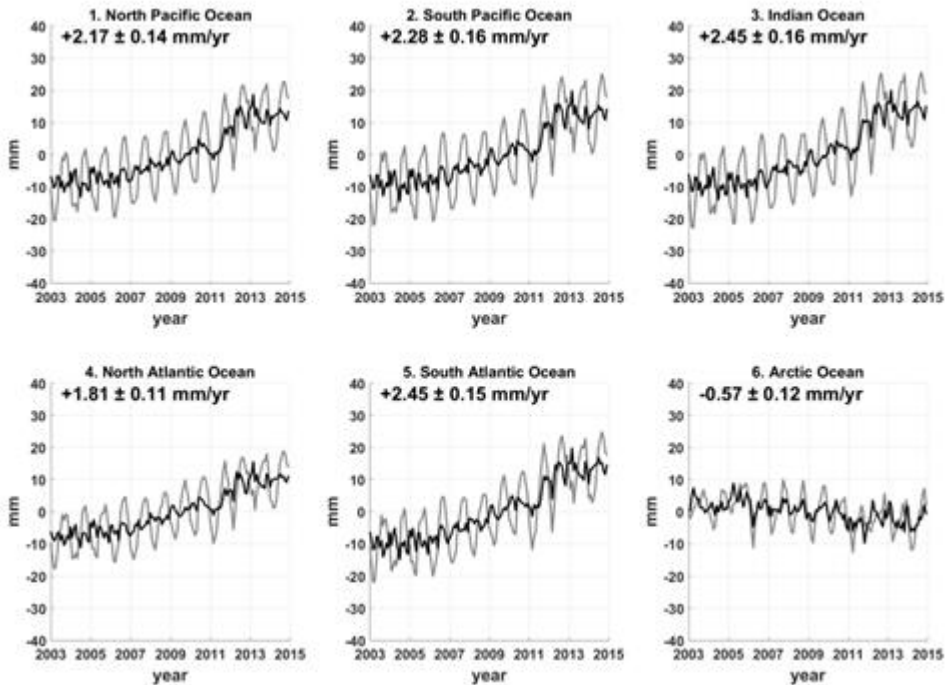


그림 563 자체 일관성이 높은 자료에 지구 무게 중심 이동 효과를 더한 총 질량 해수면의 변동. 북극해의 질량 해수면이 감소세라는 것이 특기할 만하다.

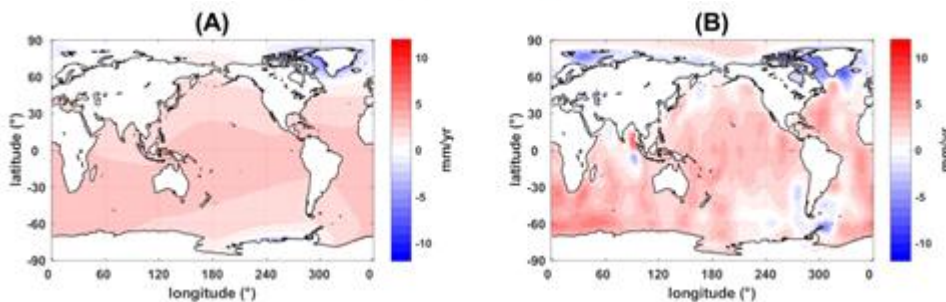


그림 564 이전 그림과 동일한 자료를 바탕으로 지구 무게 중심 이동 효과를 추가로 더한 질량 해수면 변화율의 공간적 분포. 육지의 수질량이 끊임없이 유출된다고 알려진 그린란드와 서남극 인근의 감소율이 눈에 띈다.

현재 진행중인 육지 담수의 고갈과 해수면 상승의 효과는 바다의 지리적 위치 때문에 북반구보다 남반구에 더 큰 질량 집중을 야기한다. 따라서 지구의 무게 중심은 기후 변화에 따라 남반구 방향으로 꾸준히 이동하고 있으며, 이 효과를 포함하는 경우 남반구의 바다는 그림 532에서 보인 변화율보다 양의 방향으로 더욱 증가된 해수면 상승 효과를 보인다(그림 532과 535). 연구된 2003-2014 기간 동안 전 세계 바다가 평균적으로 2.14 ± 0.12 mm/yr (95% 신뢰구간) 상승하는 추

세로 조사된 데에 비해, 그림 564에 나타난 것처럼 남반구 바다는 이에 비해 더 큰 질량 해수면 상승을 보이고 있다. 더욱 특기할 만한 점은, 북극해의 질량 해수면은 여타 대양들과 눈에 띄게 다르게 감소 효과를 보이고 있다는 사실이다(그림 563와 564). 해수면 방정식이 묘사하고 있듯 질량 해수면은 지구의 중력에 직접 영향을 받는 지오이드 면을 따라 정렬하므로, 이 면은 주변의 중력 근원, 즉 질량들이 유출될수록 낮아질 수밖에 없다. 따라서 북극해의 감소하는 질량 해수면은 지구 무게 중심이 남반구로 이동한 요인 외에도, 극권에서 기후 변화에 따른 담수와 빙하 질량의 손실이 주변 해수를 붙잡아 둘 중력의 감소로 이어지고 있다는 사실로서 설명될 수 있을 것이다. 특히 연 구 기간 동안 조사된 전 세계 평균 질량 해수면 변화율인 2.14 mm/yr라는 수치는 이전 GRACE를 이용한 질량 해수면 연구들에서 측정된 수치보다 비슷하거나 약간 높은 수준에서 잘 일치할 뿐만 아니라, 2005-2014년 시기의 열팽창 효과의 기여도(약 1.1 mm/yr)와 위성 고도계를 이용한 총 해수면 변화율(약 3.5 mm/yr)을 연구한 최신 연구(Dieng *et al.*, 2017)의 결과들과도 그 범위가 상당히 부합하는 결과이다.

본 연구는 이와 같이 후빙기 반등 효과와 섞여서 관측되는 중력 신호에서 이를 효과적으로 분별 해냄으로써 수질량 변동 신호만을 바탕으로 전 세계 평균 질량 해수면의 변화만이 아니라 각 지역의 해수면 변화까지도 알아볼 수 있었다. 질량 해수면은 공간적으로 굴곡이 있는 지오이드 면을 따라 지역에 따라 최대 2.4 mm/yr에서 적게는 북극해와 같이 감소하는 등 지역적 편차가 상당하였다. 특히 앞서 언급하였듯 후빙기 반등 효과가 나타나는 영역과 강도에 대한 추정 범위가 모델 별로 상이하여 정확한 수질량 변화를 해석해 내는 데에 상당한 오차 범위를 내포했다는 사실을 상기해 보면, 본 연구의 자체 일관성 평가는 후빙기 반등과 같은 여타 고체 지구의 반응을 적절하게 제거할 하나의 방법론을 제시하였을 뿐만 아니라, 그를 바탕으로 일관되고 불확실성이 적은 예측 수치를 제시하였다는 데에 그 의의가 크다고 할 수 있다. 자체 일관성 평가는 미래에도 제안될 후빙기 반등 모델들과 기타 고체 지구의 효과들을 판별하는 데에도 꾸준히 적용될 수 있을 것이며, 이를 기반으로 더욱 정밀한 수치 예측과 기후 변화의 파악 또한 가능할 것이다.

(4) 후빙기 지각 반등 모델 보정

해수면 상승은 기후 변화를 나타내는 중요한 지표이며, 검조의 (tide gauge) 및 위성 고도계를 이용하여 관측되어 왔다. 위성 고도계 관측에 의하면 1993년에서 2015년 동안 전 세계 바다의 평균 해수면은 약 3.07 mm/yr 상승하였으며, 최근 10년 동안은 3.5 mm/yr로 해수면 상승률이 더 빨라졌다. 이러한 해수면 상승을 일으키는 요인은 크게 두 가지로 나뉘며, 첫 번째는 해수의 온도 및 염분 변화로 인한 부피팽창과 두 번째는 극지방의 빙상, 대륙 빙하 및 담수의 유입으로 의한 해수의 총 질량 증가이다. 최근 WRCP 보고서에 의하면 평균 해수면 변화량의 약 1/3이 해수의 부피 변화에 의한 것으로 밝혀졌다. 따라서 해수의 질량 증가가 최근 가속화된 평균 해수면 상승의 주된 원인으로 손꼽히고 있으며 이를 정확히 추정하는 것이 현재와 미래의 해수면 상승을 이해하는데 매우 중요하다.

2002년부터 Gravity Recovery and Climate Experiment(GRACE) 위성에 의하여 시간에 따른 전 지구적 표면 질량 변화가 관측되어왔으며, GRACE 관측 자료는 구면 조화 함수의 형태로 제공되고 있다. 배포되고 있는 GRACE 자료에는 극지방의 빙상, 대륙의 물과 빙하, 해수 질량 및 고체지구의 밀도 재배치 등이 복합적으로 포함되어 있으며, 지표의 물 및 얼음 질량 변화를 이해하기 위해서는

고체지구의 밀도 재배치 성분이 적절히 제거 되어야 한다. GRACE 자료에 포함되어 있는 고체지구 질량 재배치 신호의 대부분은 빙하기에 지각과 맨틀을 누르고 있었던 빙하들이 간빙기를 거치며 짧은 시간에 사라짐으로 인해 나타나는 맨틀의 반등(Post Glacial Rebound : PGR) 효과이다. PGR 효과는 과거 빙하들의 역사와 지구 내부 구조에 기반한 모델 값을 이용하여 GRACE 측정 값에서 제거할 수 있다.

현재 다양한 PGR 모델이 개발되어 있으며, 물과 얼음 질량의 변화량을 정확하게 이해하기 위해서 가장 합리적인 PGR 모델을 선택해야 한다. 최근 들어 ICE-5G 모델에서 ICE-6G 모델로 발전함에 따라 많은 진전이 있었지만 여전히 최적의 PGR 모델을 선택하는 것에는 많은 논의가 필요하다. 특히 PGR 모델을 구성하는 다양한 스펙트럼 중 지구 자전축의 운동으로 인해 생기는 degree 2 order 1 구면조화 함수 계수 ($\Delta C_{21}/\Delta S_{21}$)에 큰 오차가 있는 것으로 알려져 있다 (Chambers *et al.*, 2010). 예를 들어 PGR 모델에 따라서 남극의 연간 질량 변화량은 117 ~ 171 Gton/yr, 해양질량은 1.08 ~ 2.11 mm/yr와 같이 다양한 추정을 유발한다 (WCRP Global Sea Level Budget Group, 2018).

본 연구에서는 PGR 모델의 $\Delta C_{21}/\Delta S_{21}$ 성분을 보정한 후 대륙 및 해양의 물 질량 변동을 비교, 분석하고자 한다. $\Delta C_{21}/\Delta S_{21}$ 은 GRACE 위성이 관측할 수 있는 가장 큰 범위의 신호이기 때문에 대륙 규모의 표면 질량 변화에 큰 영향을 줄 것으로 보인다. 따라서 본 연구를 통해 PGR 모델에 내재되어 있는 불확실성을 줄이고 대규모 신호와 관련하여 물 질량의 이동 및 기후변화에서 새로운 이해를 기대할 수 있다.

(가) GRACE 와 PGR 모델

대륙 및 해양의 물 질량 변화를 이해하기 위해서 Center of Space Research(CSR)에서 구면조화 함수 형태로 제공하는 release06 level2 GRACE 위성 자료를 사용하였다. GRACE 위성 자료에는 PGR 효과가 포함되어 있기 때문에 이를 적절한 모델 값을 이용하여 제거하여야 한다. 본 연구에서는 PGR 효과를 제거하기 위해서 Paulson *et al.*[2007] (이후 Paulson07), A *et al.* [2013](이후 A13), Peltier *et al.*(2015) (이후 Peltier15)에서 제시한 모델들을 사용하였다.

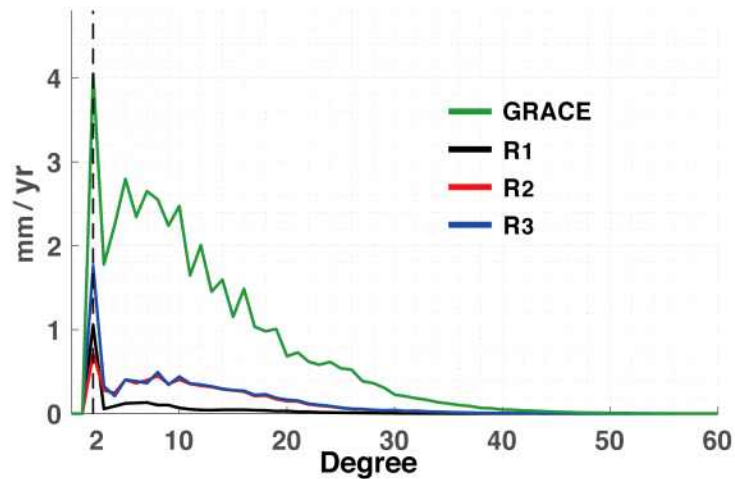


그림 565 A13을 이용하여 PGR 신호가 제거된 GRACE 신호(녹색)와 PGR 모델 차이의 스펙트럼 세기. R₁(검정색), R₂(빨간색), R₃(파란색)는 각각 A13 - Paulson07, A13 - Peltier15, Peltier15 - Paulson07이다. 모든 값에 500km 반지름의 Gaussian 평활화가 적용되어 있다.

그림 565은 PGR 모델간의 차이를 보여준다. R₁, R₂, R₃는 각각 A13 - Paulson07, A13 - Peltier15, Peltier15 - Paulson07의 스펙트럼별 세기를 보여준다. 녹색 선은 A13을 이용하여 GRACE 신호를 보정하였을 때의 스펙트럼별 세기이고 검정색 점선은 구면 조화함수의 degree-2 계수의 지점을 표시한 것이다. 세 가지 잔여 값의 신호는 GRACE 신호보다 모든 스펙트럼에서 신호의 크기가 작게 나타나며, 30차 이상의 영역에서는 모델 간의 일치도가 높게 나타난다. 반면, 서론에서 언급하였듯이 모델 간의 차이는 degree-2 영역에서 가장 크게 나타나며 대부분은 $\Delta C_{21}/\Delta S_{21}$ 의 차이에서 기인한다. 더욱이 degree2에서 R₃(파랑)의 경우 GRACE로 추정된 물 질량 변동 신호(녹색)의 1/2에 해당한다는 점에서 정확한 ΔC_{21} 과 ΔS_{21} 이 반드시 고려되어야 한다.

GRACE 위성은 지구의 무게중심점을 중심으로 지구를 선회하며 중력 변화를 측정하기 때문에 지구 무게 중심의 변화(geo-center motion)를 정확하게 추정할 수 없는 단점이 있다. 이러한 지구의 무게 중심 변화량은 구면 조화 함수의 계수 중 degree-1에 해당하므로, GRACE의 degree-1 성분은 0으로 제거한 후 제공되고 있다. 하지만 지구의 무게 중심이 자전축의 북쪽 방향으로 1mm 이동한다면 평균 해수면의 높이는 약 0.51mm 하강에 해당하는 효과를 발생시키기 때문에 degree-1 구면 조화함수 계수는 반드시 고려해야할 요소 중 하나이다(Wu *et al.*, 2012). 통상적으로 degree-1 구면 조화함수 계수는 degree-2 이상으로 이루어진 GRACE 육지 신호와 이 육지신호를 이용하여 얻은 해양 모델을 합하여 계산할 수 있다(Swenson *et al.*, 2008). 만약 degree-2 이상의 육지 신호가 불확실하다면(특히 $\Delta C_{21}/\Delta S_{21}$), 그 때 얻어지는 degree-1 구면조화함수 계수도 큰 오차를 포함한다.

(나) 순산 모의 기법 (forward modeling)

GRACE의 신호의 공간 해상도는 약 300km (60차 구면조화 함수)에 해당하기 때문에, 그보다 작은 공간 규모의 신호를 해석하는데 한계가 있다. 게다가 여러 aliasing error를 줄이는 단계에서 신호의 해상도와 세기는 더 낮아지고, 인접한 영역으로 신호가 퍼져나가는 leakage 현상이 나타난다. 일반적으로 육지 영역의 신호가 해양 영역 신호보다 강하기 때문에 해안가에 위치한 해양 신호는 육지로부터 넘어온 leakage에 오염되어 있다. 이 문제를 해결하기 위해서 Chen *et al.* (2013)은 순산 모의 기법(forward modeling(FM))을 개발하였다. FM은 육지와 해양의 지리적 경계를 기준으로 감쇄되어 있는 신호를 반복적으로 회복하는 과정을 거친다. 본 연구에서는 PGR 효과를 모델을 통해 제거한 후 FM을 수행하였다. 자세한 FM 방법은 Chen *et al.* (2013)에 제시되어 있다.

각 반복 과정에서 전 지구적으로 표면 질량이 배치되기 때문에 불완전한 무게 중심 성분 (degree-1 구면조화함수 계수)이 생긴다. 하지만 본래의 GRACE 신호에는 degree-1 계수가 없기 때문에 반복 과정 중 생기는 degree-1 항은 항상 제거한다. 일정 수 이상의 반복을 거친 후에 업데이트되는 해양 신호의 변화량은 0에 가깝게 수렴하며, 이 때 우리는 FM의 최종 해를 얻었다고 판단한다. 원래의 FM 방법에서는 해양 질량이 모든 곳에서 동일하다고 가정하지만 보다 더 정확한 육지와 해양의 질량 분포를 얻기 위해서 Jeon *et al.* (2018)은 Self-attraction and loading (SAL) 효과(Farrell and Clark, 1976)를 가정한 FM을 수행하였다. 추가적으로 본 연구에서는 PGR model에서 불확실성이 높은 $\Delta C_{21}/\Delta S_{21}$ 계수를 보정하여 표면 질량 변화에 의해서만 유도되는 $\Delta C_{21}/\Delta S_{21}$ 을 얻는 것이 목적이기 때문에 FM 시작 전에 $\Delta C_{21}/\Delta S_{21}$ 계수가 없는 상태에서 반복을 시작한다. FM 반복 과정에서 발생하는 $\Delta C_{21}/\Delta S_{21}$ 성분 또한 degree-1 계수처럼 제거한다. 결과적으로 수정된 FM 방법을 이용하여 얻은 해에는 leakage효과뿐 아니라 PGR error가 최소화 된 표면질량 분포를 얻을 수 있다. PGR error가 최소화 되었다고 판단할 수 있는 근거는 PGR 모델에서 $\Delta C_{21}/\Delta S_{21}$ 외에는 model간 차이가 적고, 미처 제거하지 못한 잔여 PGR의 영향은 구면조화함수의 차수가 커질수록 GRACE 표면 질량 분포에 비해서 매우 작으므로 FM 반복을 거치는 동안 그 영향이 미비해지기 때문이다 (그림 566).

① Degree-1, ΔC_{21} , ΔS_{21} 추정

앞서 말했듯이 degree-1 구면조화 함수 계수는 GRACE의 육지 신호와 해양 모델을 결합하여 얻을 수 있다(Swenson *et al.*, 2008). Swenson *et al.* (2008)은 해양 모델로써 육지 질량 변화량과 총량은 같지만 부호가 반대이면서 평평한 해수면 모델을 가정하여 degree-1 구면조화함수 계수를 계산하였다. 하지만 이 방법은 크게 세 가지의 문제점을 가지고 있다. 첫째, 해양 질량은 전 지구적으로 평평하게 분포한다는 가정은 이론적으로 적합하지 않으며, SAL 효과가 고려된 해양 모델을 사용하는 것이 더 적절하다(Sun *et al.* 2016; Jeon *et al.*, 2018). 둘째, leakage 보정을 하지 않은 상태의 GRACE 신호를 이용하기 때문에 degree-1 구면조화함수 계수는 leakage에 오염되어 있다. 셋째, 사용된 PGR 모델에 내재 되어 있는 PGR error의 수준에 따라 결정되는 degree-1이 상이하다. 본 연구에서는 leakage 및 $\Delta C_{21}/\Delta S_{21}$ 과 관련된 문제를 FM을 통해 보정 및 제거하였으며, SAL 효과를 해양모델로 채택하였다. 또한 저차계수를 추정할 때에는 degree-1 뿐만 아니라 $\Delta C_{21}/\Delta S_{21}$ 구면조화함수 계수를 동시에 계산했다. 선행 연구(Sun *et al.*, 2016)에서도 degree-1 뿐만 아니라 다른 구면조화함수(ΔC_{20})를 동시에 계산하였지만 불완전한 leakage 보정이 이루어 졌다는 점에서

차이가 있다.

Degree-1, ΔC_{21} , ΔS_{21} 계산 방법을 간단히 소개하면 다음과 같다. 보다 더 자세한 식의 유도 과정은 Swenson *et al.*, (2008)을 참고하면 된다.

$$\begin{bmatrix} \Delta C_{10}^{ocean} \\ \Delta C_{11}^{ocean} \\ \Delta S_{11}^{ocean} \\ \Delta C_{21}^{ocean} \\ \Delta S_{21}^{ocean} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{10C}^{10C} & I_{11C}^{10C} & I_{11S}^{10C} & I_{21C}^{10C} & I_{21S}^{10C} \\ I_{10C}^{11C} & I_{11C}^{11C} & I_{11S}^{11C} & I_{21C}^{11C} & I_{21S}^{11C} \\ I_{10C}^{11S} & I_{11C}^{11S} & I_{11S}^{11S} & I_{21C}^{11S} & I_{21S}^{11S} \\ I_{10C}^{21C} & I_{11C}^{21C} & I_{11S}^{21C} & I_{21C}^{21C} & I_{21S}^{21C} \\ I_{10C}^{21S} & I_{11C}^{21S} & I_{11S}^{21S} & I_{21C}^{21S} & I_{21S}^{21S} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta C_{10} \\ \Delta C_{11} \\ \Delta S_{11} \\ \Delta C_{21} \\ \Delta S_{21} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta G_{10C} \\ \Delta G_{11C} \\ \Delta G_{11S} \\ \Delta G_{21C} \\ \Delta G_{21S} \end{bmatrix} \quad (1)$$

식(1) 에서 $[\Delta C_{10}^{ocean} \Delta C_{11}^{ocean} \Delta S_{11}^{ocean} \Delta C_{21}^{ocean} \Delta S_{21}^{ocean}]^T$ 은 FM 해에서 SAL 효과에 의해 예측되는 구면조화함수 계수들이다. \bar{I} 행렬은 아래 식과 같다.

$$\bar{I} = \frac{1}{4\pi} \int \bar{U} \bar{U}^T \vartheta(\theta, \phi) d\Omega \quad (2)$$

이 때, \bar{U} 행렬은 아래 식과 같다.

$$\bar{U} = [\Delta U_{10C} \Delta U_{11C} \Delta U_{11S} \Delta U_{21C} \Delta U_{21S}]^T \quad (3)$$

식 (3)의 \bar{U} 행렬 의 각 성분은 아래 식과 같다.

$$U_{lm\psi} = \tilde{P}_{lm}(\cos\theta) \begin{cases} \cos(m\phi) & (\psi = C) \\ \sin(m\phi) & (\psi = S) \end{cases} \quad (4)$$

위 식의 θ 와 ϕ 는 각각 위도와 경도를 나타내며, \tilde{P}_{lm} 은 정규화된 버금 르장드르 함수이다. $\vartheta(\theta, \phi)$ 는 해양 함수로써 육지 영역은 0이고 해양 영역은 1이다. \bar{G} 행렬은 \bar{U} 로 이루어져 있으며 FM 해에서 얻어지는 지구전체의 구면조화함수 계수이다.

$$\Delta G_{lm\psi} = \frac{1}{4\pi} \int U_{lm\psi} \vartheta(\theta, \phi) \sum_{l'=2}^{\infty} \sum_{m'=0}^{\infty} \tilde{P}_{l'm'}(\cos\theta) \Delta C_{l'm'} \cos(m'\phi) + \Delta S_{l'm'} \sin(m'\phi) d\Omega$$

마지막으로 $[\Delta C_{10} \Delta C_{11} \Delta S_{11} \Delta C_{21} \Delta S_{21}]^T$ 이 수렴할 때 까지 $[\Delta C_{10}^{ocean} \Delta C_{11}^{ocean} \Delta S_{11}^{ocean} \Delta C_{21}^{ocean} \Delta S_{21}^{ocean}]^T$ 을 업데이트해 가며 식(1)을 반복적으로 풀게 되면 저차 구면조화함수 계수들을 얻게 된다. 이 때 얻어진 degree-1, $\Delta C_{21}, \Delta S_{21}$ 구면조화함수 계수는 PGR error가 최소화되어 있는 FM 최종 해를 기반으로 계산되었기 때문에 대부분이 지구 표면에 존재하는 물과 얼음의 질량에 의해 결정되는 저차계수들이다.

② PGR 모델 error가 보정된 Degree-1, ΔC_{21} , ΔS_{21} 구면조화함수 계수

그림 538는 PGR error의 보정 유무에 따른 degree-1 구면조화함수 계수들을 나타낸다. 좌측 그림들은 ΔC_{21} 과 ΔS_{21} 에 의한 PGR 모델 잔여 오차들이 남아 있는 상태에서 계산한 값들이고, 우측 그림들은 PGR 모델의 잔여 오차 성분 보정이 고려된 값들이다. PGR error가 보정된 경우, 사용된 PGR 모델에 상관없이 선형성분들의 편차가 줄어들었음을 확인할 수 있었다.

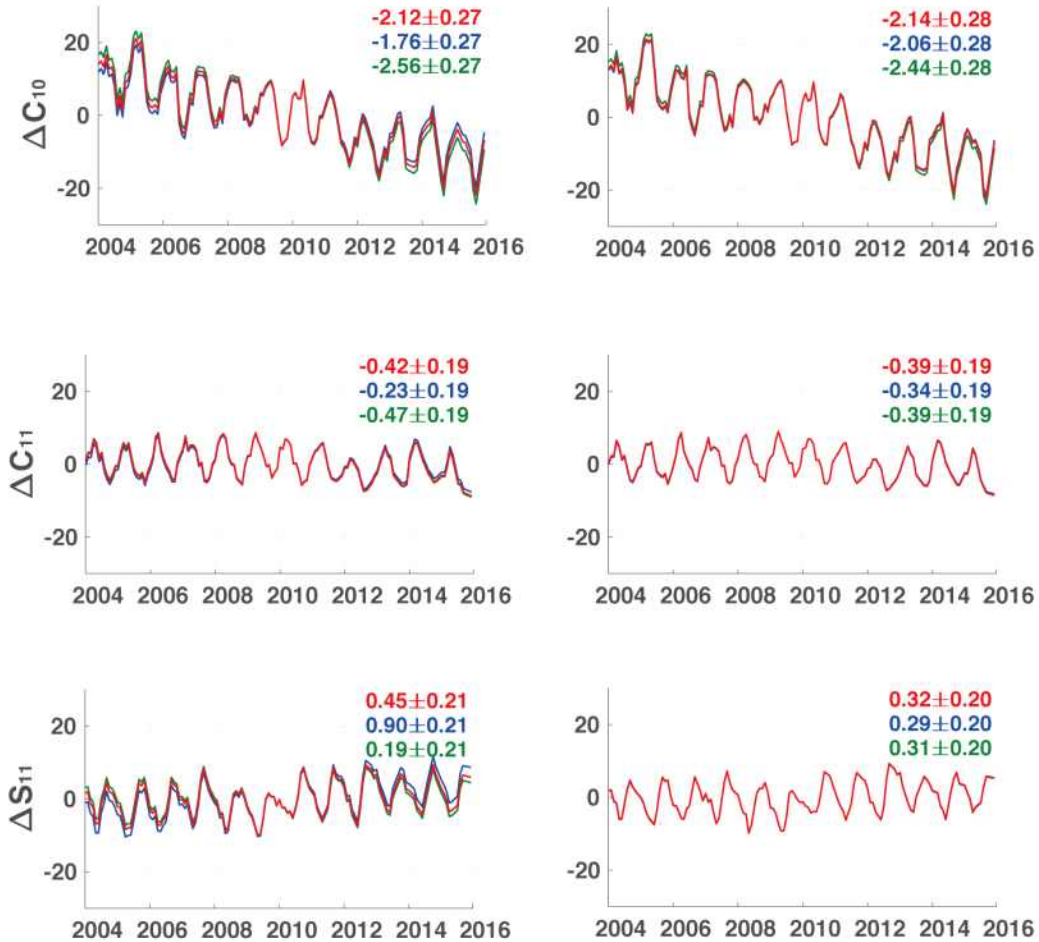


그림 566 PGR error가 포함된 degree-1(좌) 과 PGR error가 보정된 degree-1(우) 구면조화함수 계수. 첫 행은 ΔC_{10} , 두 번째 행은 ΔC_{11} , 마지막 행은 ΔS_{11} , 구면조화함수 계수이다. 빨간색은 A13, 파란색은 Paulson07, 녹색은 Peltier15를 이용하여 PGR 효과를 보정한 결과이다. 세로축의 단위는 mm이고, 각 그림 속의 숫자는 시계열의 선형성분(mm/yr)을 나타낸다 (95% 신뢰구간).

현재 보고서에 나타나진 않았지만, 이러한 보정 방법의 타당성을 검증하게 위해서 모의실험을 수행하였다. 그 결과 본 연구의 방법을 적용했을 때, degree-1 계수들이 참 값과 가까운 결과로 산출되는 것을 확인할 수 있었다.

그림 566에서 왼쪽 그림들은 GRACE 신호에서 PGR 모델만을 이용하여 그 효과를 제거한 ΔC_{21} , ΔS_{21} 계수를 나타내고 오른쪽 그림들은 PGR error를 보정해준 계수들의 시계열을 나타낸 것이다. PGR error가 남아 있는 ΔS_{21} 의 경우에는 선형성분의 부호가 반대로 나타날 정도로 PGR model 간

의 차이가 크다. 반면 PGR error 보정을 거친 후의 두 계수들은 PGR 모델에 상관없이 선형성분들이 서로 잘 일치한다. ΔC_{21} 과 ΔS_{21} 의 경우도 모의실험을 한 결과, PGR error가 보정되었을 때 참값과 매우 유사한 선형성분을 나타내었다.

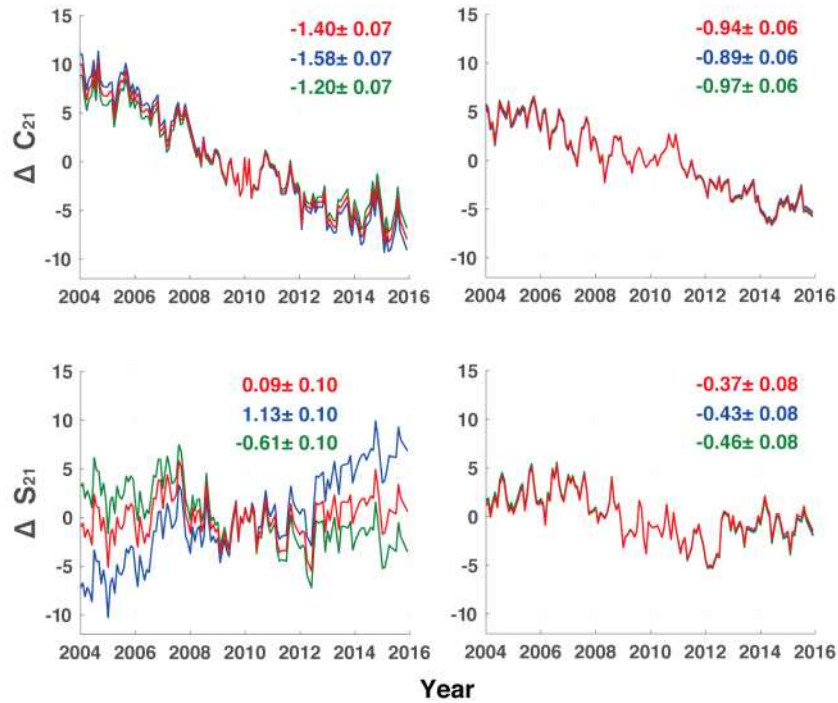


그림 567 왼쪽 그림들은 A13(빨간색), Paulson07(파란색), Peltier15(녹색)에 의해서 PGR 효과가 보정된 GRACE ΔC_{21} (위), ΔS_{21} (아래) 그림이다. 오른쪽 그림들은 왼쪽 그림들의 경우와 비슷하지만 PGR error가 제거된 ΔC_{21} , ΔS_{21} 구면조화함수 계수들이다. 세로축의 단위는 mm이고, 각 그림 속의 숫자는 시계열의 선형성분(mm/yr)을 나타낸다 (95% 신뢰구간).

③ 대륙별 물 수지 및 평균 질량 해수면 변화

PGR error가 보정되지 않은 저주파 계수들(그림 566와 567의 좌측 계수)과 보정된 계수들(그림 538와 539의 우측 계수)을 고려하였을 때, 대륙별 물 수지 및 해수면의 변화가 어떤 양상을 나타내는지 알아보았다.

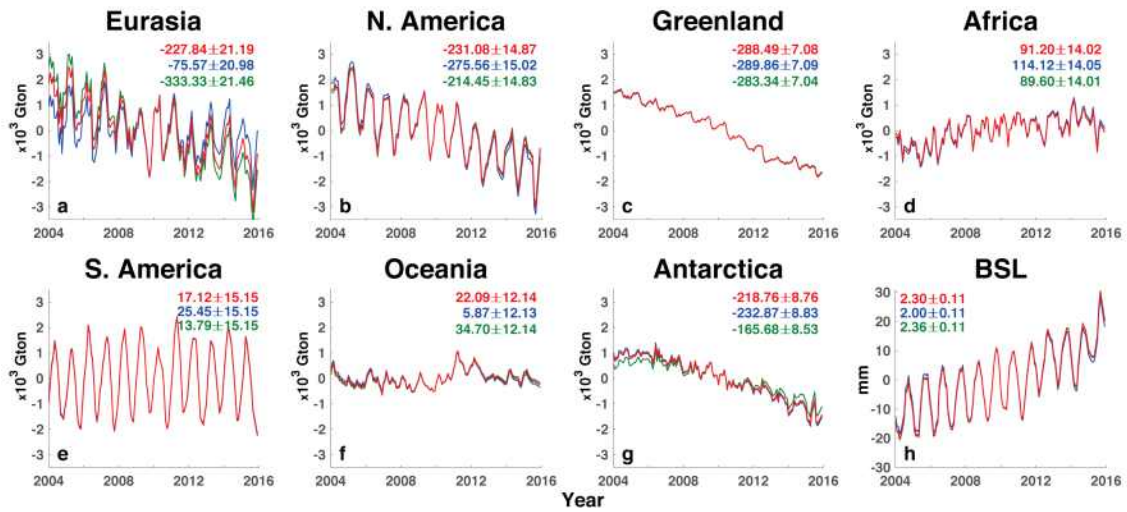


그림 568 A13(빨간색), Paulson07(파란색), Peltier15(녹색)에 의해 PGR 효과가 제거된 GRACE 자료로부터 계산한 대륙별 물 수지(a~g)와 평균 질량 해수면 변화(h). Leakage 효과는 FM을 이용하여 모두 제거 되었다. 각 그림속의 숫자들은 계절 변동 성분이 제거된 시계열의 선형 성분과 95% 신뢰구간을 나타낸다(a~g: Gton/yr, h: mm/yr).

그림 568은 PGR model error가 보정되지 않은 대륙별 물 수지(a~g) 및 평균 질량 해수면 변화(h)를 나타낸다. 저차 계수들의 특성상 대규모 신호에 큰 영향을 주기 때문에 degree-1, ΔC_{21} , ΔS_{21} 구면조화함수 계수에 잔여 오차 성분들이 남아있다면 표면 질량의 추정은 PGR 모델의 선택에 따라 매우 다양하게 나타난다. 특히 Paulson07 (파랑)의 경우 다른 두 모델을 이용했을 때 보다 유라시아와 평균해수면은 매우 낮게 추정하는 반면 북미에서는 Greenland에 버금갈 정도의 질량 손실이 있는 것처럼 오해할 수가 있다.

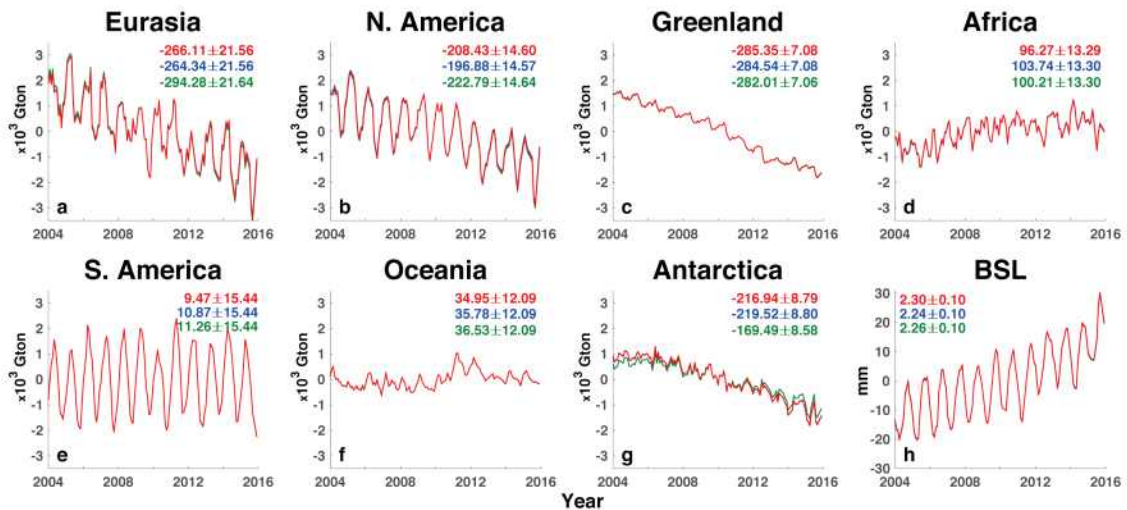


그림 569 그림 568과 유사하지만, PGR model error가 보정된 대륙별 물 수지 및 평균 질량 해수면 변화.

반면 그림 568 와 달리 그림 569에서는 남극을 제외하고 모든 대륙의 선형 성분들이 오차범위 안에서 잘 일치한다. 흥미로운 사실은 PGR error가 존재하는 경우 PGR 모델에 따라 유라시아와 북미의 질량 변화를 해석하기 난해하였지만 PGR error가 보정되었을 때는 각 대륙의 질량 손실율이 PGR 모델에 상관없이 비슷하게 나타난다는 것이다. 이뿐만 아니라 두 대륙의 질량 손실율의 합이 그린랜드와 남극 질량 손실율 합에 버금간다는 것이다. BSL(h)의 경우에 어떠한 PGR 모델을 사용하더라도 평균값 2.27 mm/yr과 크게 다르지 않다. 해수의 질량 변화량(2.27 mm/yr)은 해수의 부피 변화 값(1.3 mm/yr)과 더해지면 위성 고도계가 측정한 평균 바다 해수면 증가 속도(3.5 mm/yr)와 0.07 mm/yr 밖에 차이 나지 않는다 (WCRP Global Sea Level Budget Group, 2018). 이는 저차계수들에 남아 있던 PGR error 성분이 효과적으로 보정되었음을 지시하는 또 다른 검증 도구가 될 수 있다. 그림 568와 달리 Paulson07을 이용한 경우에도 다른 두 모델들의 추정 값과 큰 차이 없이 상호간의 높은 일치율을 보인다. 하지만 여전히 남극에서는 A13과 Paulson07을 이용한 값과 Peltier15를 이용한 값에서 큰 차이가 존재하는데 이는 PGR 모델에 사용된 빙하의 역사차이 (ICE-5G, ICE-6G)에서 오는 근본적인 문제로 ICE-5G를 이용하고 있는 PGR model의 개선이 필요하다.

본 연구에서는 PGR 모델 내에서 가장 불확실성이 높은 ΔC_{21} , ΔS_{21} 계수를 보정했다. PGR error가 존재하는 경우에는 PGR 모델 선택에 따라 대륙별 물 수지 및 평균 질량 해수면의 변화 폭이 다양했지만, 보정을 거치고 나면 모델에 상관없이 일관적인 질량 변화량을 보여준다. 다시 말해 공간 규모가 큰 신호를 정확하게 추정하기 위해서는 정확한 저차계수가 수반 되어야 함을 의미한다. PGR error가 보정된 자료를 근거로 판단했을 때, 해수면을 상승시키는 요인으로 그린랜드, 남극의 빙상의 유실뿐만 아니라 유라시아 및 북미에서도 해수면 상승에 큰 기여를 하고 있음이 밝혀졌다. 극지방 외의 대륙별 물 수지의 감소는 기후변화 및 인간 활동에 따른 관계농업의 증가, 지하수의 감소, 영구 동토층의 질량 감소 등을 지시할 수 있는 관측적 사실임에 큰 의의가 있다.

(5) 고해상도 현장 중력 관측

(가) 초전도 중력계 설치

초전도 중력계(superconducting gravimeter)는 지금까지 제작된 중력계 중 해상도가 가장 뛰어난 중력계로서, 이론상 0.01nm/s^2 (1 nGal)까지 상대적 중력 변화를 측정할 수 있다. 장보고기지에 설치된 iGrav 초전도 중력계는 크게 중력 센서부, 냉각시스템, 전원공급장치(UPS)로 구성되며 중력센서부는 액체 헬륨 용기(dewar)안에 초전도 구체, 초전도 자성체 및 코일 등이 장착되어 있고 외부에 제어 회로 및 컴퓨터가 부착되어 있다. 냉각 시스템은 냉각기(cold head)와 압축기(compressor)로 이루어져 있으며 냉각기는 중력 센서부 상단에 위치하여 액체 헬륨 용기 내의 온도로 4.2°K 로 유지시키는 역할을 한다. 중력 센서부는 UPS 역할을 하는 전원공급장치에 연결되며 전원공급장치에 탑재된 네트워크 시스템에 의해 외부에서 원격으로 조작 및 점검이 가능하다. 중력 센서부와 냉각기는 장보고기지 내 지구물리관측동 옆 지하에 설치된 $2\text{m}\times 1\text{m}\times 2\text{m}$ 공간의 중력계실에 설치하였으며 압축기, 전원공급장치, 헬륨 가스는 지구물리관측동 내에 위치한다. 초기 설치 과정은 다음과 같다.

- 액체 헬륨 용기의 진공 강화
- 중력계실내 base plate 설치
- 냉각기-압축기 사이의 헬륨 호스 및 각종 케이블용 관로 매설

- 중력 센서부 설치
- 냉각기 설치
- 압축기 및 전원공급장치 설치
- 중력 센스부 경사 교정



그림 570 중력관측실 전경



그림 571 중력센서부 및 냉각기



그림 572 지구물리관측동 내 압축기 및 전원공급장치

초기 설치 과정 이후 2015년 12월 25일 압축기 및 냉각기의 작동을 시작하였고, 냉각을 시작한지 3.5일 경과 후 액체 헬륨 용기 중심부 온도(Body-T)가 약 4.2°K에 도달하였다(그림 573). 이때부터, 헬륨 가스가 액화하기 시작하여 냉각을 시작한지 약 8.5일 이후 99%이상 액체 헬륨이 채워졌으며, 이후 헬륨 가스의 공급을 정지시켰다. 헬륨 가스가 충분히 채워진 후 초전도 구체의 levitation을 실시하였으며, 기타 미세 조정을 실시한 이후 2016년 1월 6일 이후에 안정화된 중력 측정이 시작되었다. 그림 574은 2016년 1월 6일 이후의 중력 측정 원시 자료를 보여준다. 중력의 조석 효과가 잘 나타나고 있으며, 지진파에 의한 영향으로 보이는 신호가 다수 관찰된다. 잡음 분석을 위하여 중력 자료를 파워 스펙트럼으로 변환하였을 때 약 15-20초 주기의 1차(primary) 잡음 성분과 이 잡음의 조화 성분(harmonics)인 약 7-10초 주기의 잡음 대역이 뚜렷이 구별된다. 이러한 잡음은 장보고기지 인근에 설치된 지진계 자료에서도 관측되는 것으로 바다의 파도 혹은 너울에 의해 지각에 유기되는 지진파 성분에 의한 영향으로 보인다. 현재의 관측자료는 기지 주변 해빙이 녹아 사라진 여름 시기에 해당하므로 잡음이 강하게 관측되고 있으며 해빙이 생성되는 겨울동안에는 이러한 잡음의 영향이 적을 것으로 예상된다.

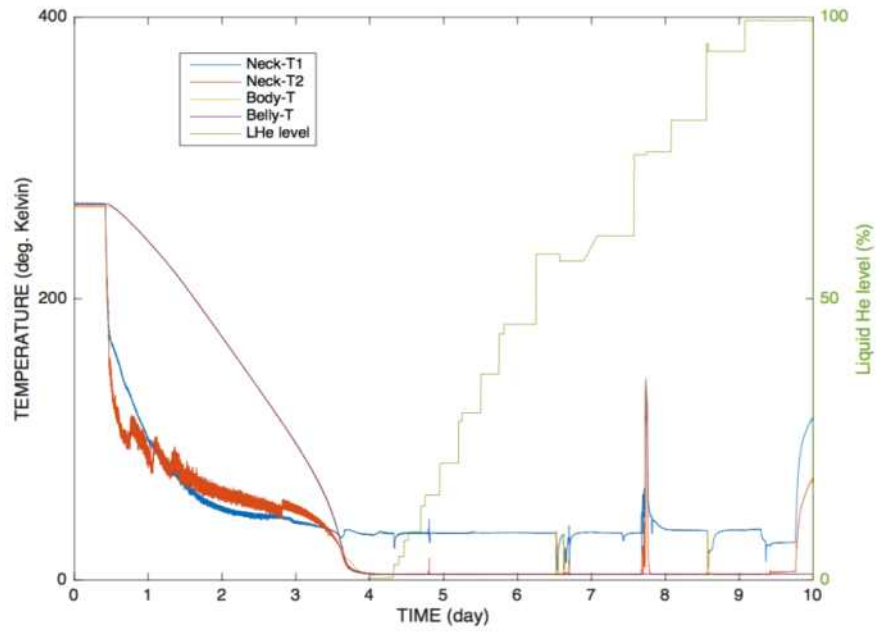


그림 573 초기 냉각에 따른 액체 헬륨 용기 내 온도 변화 및 액체 헬륨 충전율의 변화

KOPRI

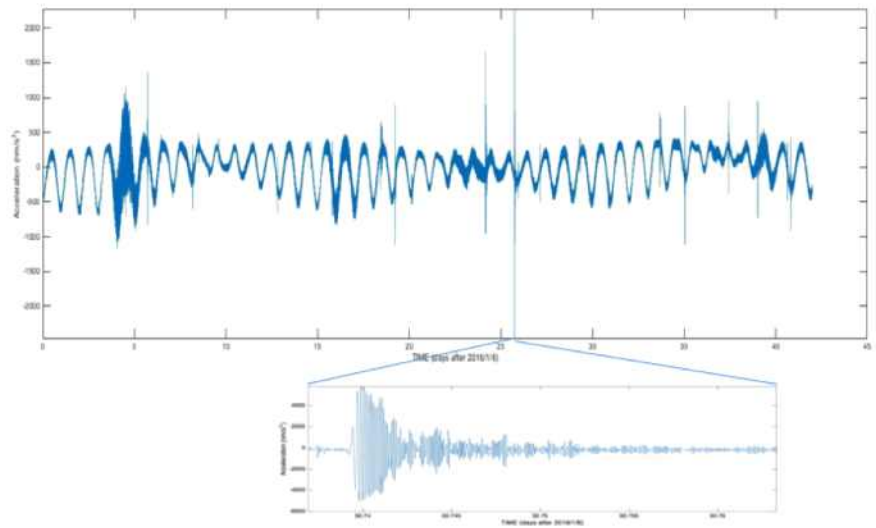


그림 574 중력 측정 결과 및 지진파에 의한 중력 변화의 예

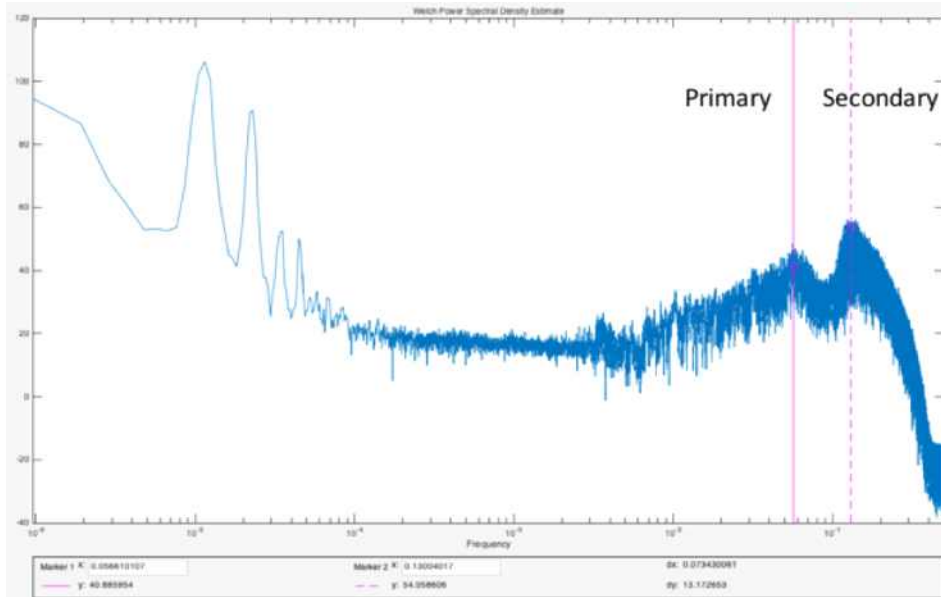


그림 575 중력 관측 자료의 파워 스펙트럼

초전도 중력계의 제어는 중력계실 내의 중력센서부에 연결된 컴퓨터를 통해서 이루어진다. 하지만, 점검을 위하여 주기적으로 중력계에 접근하는 것은 중력 자료에 잡음을 유발하므로 네트워크를 통해 원격으로 제어하거나 모니터링하는 것이 좋다. 이를 위해 제어용 컴퓨터와 전원공급장치는 인터넷을 통해 기지내 네트워크에 연결되어 있다. 먼저, 전원공급장치에 내장된 라우터는 192.168.34.14의 IP로 네트워크에 연결되어 있으며, 전원공급장치와 중력센서부는 이 라우터의 로컬 네트워크에 연결되어 있다. 따라서, 웹 브라우저를 통해 <http://192.168.34.14:3400>에 접속함으로써 전원공급장치 내의 CBW X310 컨트롤러에 접속할 수 있으며 이를 통해 압축기 및 전원공급192.168. 장치의 온도를 모니터링할 수 있으며, 압축기와 헬륨 가스 공급 밸브의 ON/OFF를 원격으로 제어할 수 있다. 또한 중력센서부는 원격제어 프로그램인 teamviewer 소프트웨어를 통해 원격으로 접속하여 측정 상태를 모니터링하거나 제어할 수 있다.



그림 576 초전도 중력계 네트워크 개략도

극지연구소

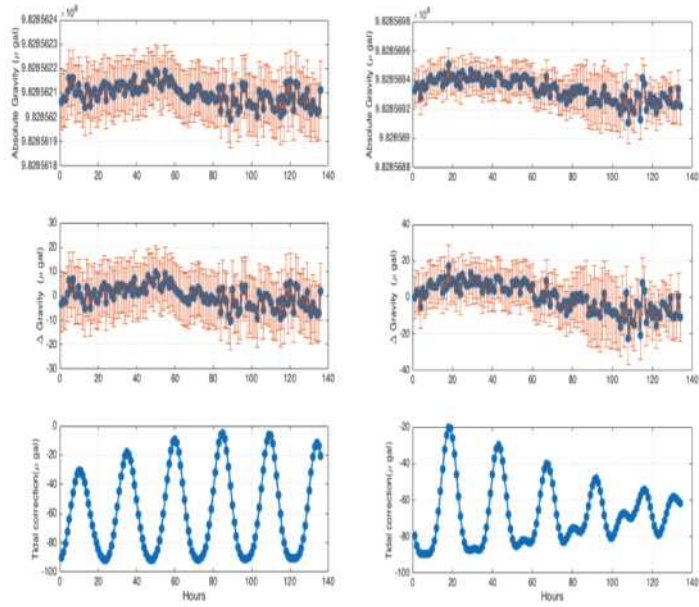


그림 577 초전도 중력계 및 절대 중력계 관측치의 상관 관계 및 산출된 변환 계수

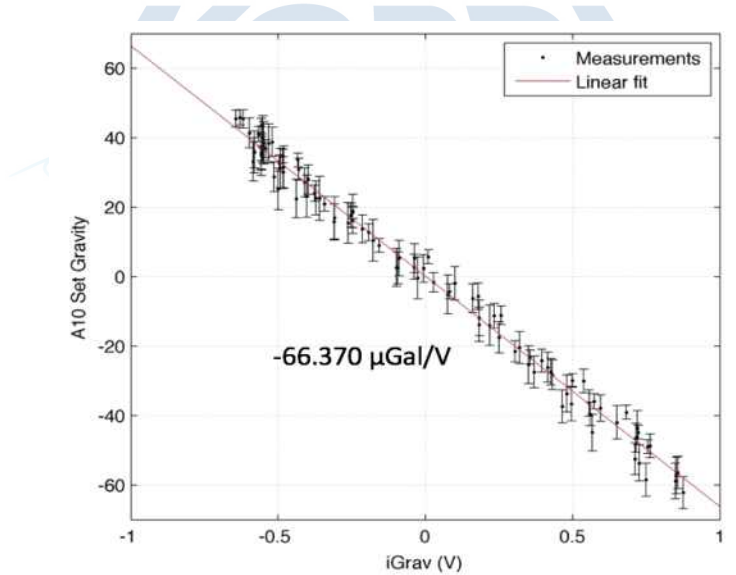


그림 578 변환된 초전도 중력계 중력값과 절대 중력계 중력값의 비교

(나) 초전도 중력계 관측 자료 분석

2016년 1월부터 시작된 초전도 중력계의 운영은 자료의 누락없이 성공적으로 이루어지고 있으며, 2016/2017년 하계기간 중에 컴프레셔를 교체하는 작업을 수행하였으며, 2018/2019년 하계기간 중에 coldhead를 교체하였다. 챔버에 저장된 헬륨은 현재 약 96%를 유지하고 있어 약 4%의 빠져나간 것으로 추정되어 매우 안정적으로 유지되고 있음을 알 수 있다. 중장비동에서 관측된 절대중력을 이용하여 초전도 중력계로 측정된 관측치를 교정하였다. 아래 그림은 초전도 중력계 관측치(V)와 절

대 중력계 관측치(microGal)를 도시한 것이다. 선형의 상관관계를 가지고 있으며, 이로부터 산출된 초전도 중력계의 변화계수는 $-66.37 \text{ microGal/V}$ 이다. 2018년 4월 16일 제설작업 중 GPS 안테나의 소실로 인하여 GPS 시간 동기화가 상실되었으나 중력관측은 계속 이루어졌다. 2018년 10월 14일 GPS 안테나의 재연결을 통하여 시간 동기화가 다시 이루어졌다. GPS 시간동기화가 상실된 시간에 대해서는 2016-2017년 조석분석을 통하여 획득한 조석 모델과의 상관성 분석을 통하여 시간 지연량을 보정하였다.

약 3년 간의 중력 관측 자료에서 나타나는 가장 큰 신호는 지구 조석(solid earth tide)에 의한 중력변화이며, 두 번째로는 기압 변화에 따른 대기효과이고, 세 번째로는 해양 조석에 의한 지각 변형(ocean tide loading)의 영향이다. 조석에 의한 중력 변화는 ETERNA33 프로그램을 이용하여 분석하였다. 이 프로그램은 Hartmann-Wenzel 포텐셜 카타로스를 사용하며, 탄성체 지구를 가정한 Wahr-Dehant(W-D) 모델을 사용한다. 8개의 주성분 조석(M2, S2, K1, O1, N2, P1, K2, Q1)과 MF, MM, SSA 장주기 조석 성분을 사용하였다. 관측 자료의 조석 분석을 통하여 구해진 각 성분의 조석은 이론적인 지구 조석과 해양 조석 모델에 의해 산출된 지각 변형 성분의 합과 비교하였다.

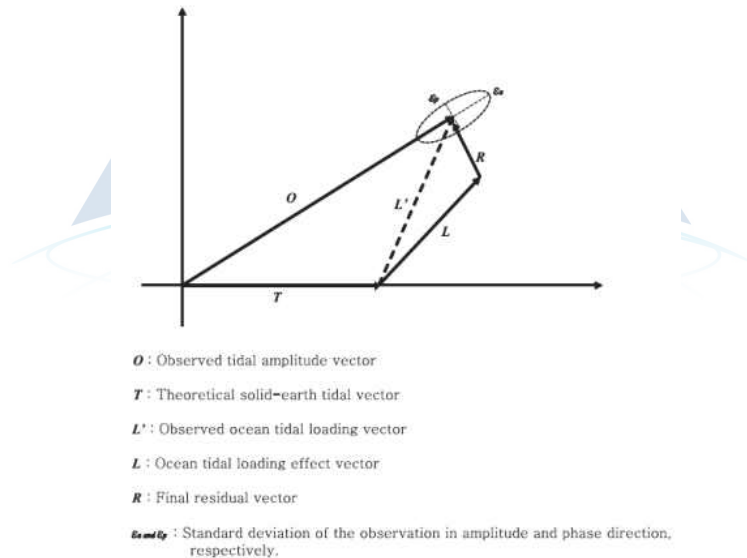


그림 579 조석 분석 과정을 나타내는 다이어그램(Kim *et al.*, 2011)

관측 조석은 이론 조석과 유사한 형태를 나타낸다. 가장 큰 성분은 K1과 O1성분이 가장 우세하며, 전체적으로 약 9%의 차이를 보이고 있다. 이 차이(L')는 많은 부분 해양 조석에 의한 지각 변형에 기인하기 때문에 여러 지구 조석 모델에서 산출되는 지각 변형 모델(L)들과 비교하였다. 범지구 모델 중 많이 통용되는 TPXO7.2, GOT4.7, FES2004 모델과 남극 지역 모델인 CATS2008모델을 비교하였다. L'와 L 벡터의 차이인 R벡터를 산출한 결과, 일주조 성분들은 잔여 벡터가 작아지는 경향을 보이나 반일주조와 장주기 조석의 경우 잔여벡터가 작아지지 않는다. 이는 로스해 지역의 해양 조석 모델 혹은 해양 조석에 의한 지각 변형 모델이 매우 부정확함을 나타낸다. 이러한 결과는 향후 해양 조석에 의한 지각 변형 모델의 개선에 유용한 자료로 이용될 수 있을 것이다.

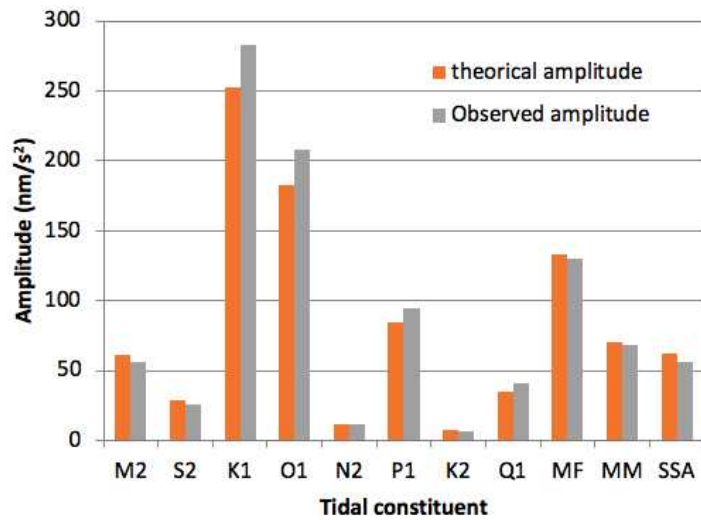


그림 580 이론 조석과 관측 조석의 비교

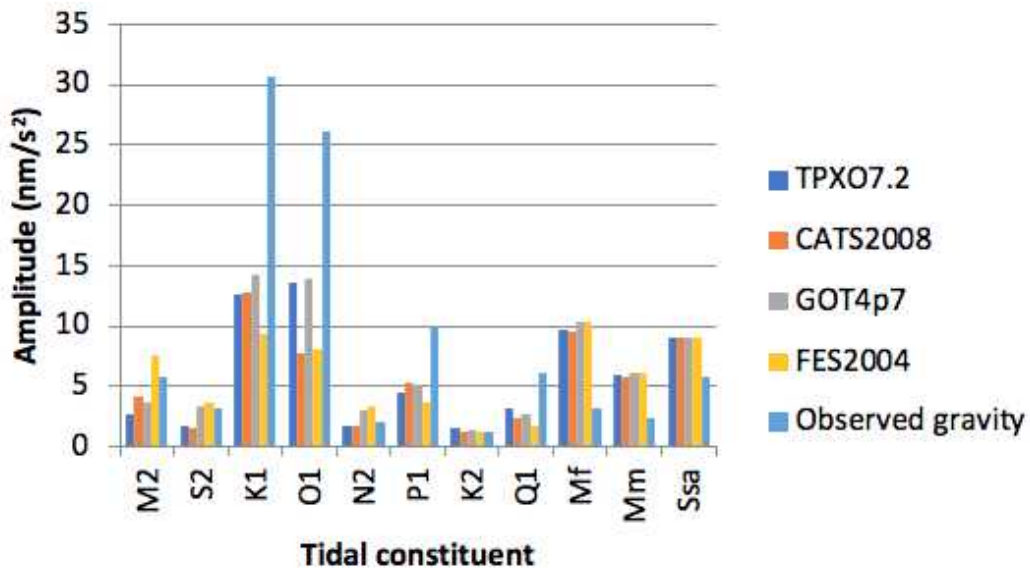


그림 581 해양 조석에 의한 지각 변형을 제거한 후의 잔여 벡터 진폭

조석 분석을 통해 산출된 중력 성분을 보정한 잔여 중력 성분을 살펴보면, 기압과 강한 음의 상관관계를 나타낸다. 대기의 밀도 변화에 따른 직접적인 중력효과와 대기의 하중에 의해 발생하는 지각 변형이 동시에 작용하는데 이에 따라 음의 상관관계가 나타나게 된다. 선형 회귀 분석에 따른 대기 효과의 계수는 $-0.3418 \text{ microGal/hPa}$ 이다. 대기효과가 보정된 중력 변화는 약 10 microGal 의 진폭을 보이고 있다. 조석 분석에서는 산출되지 않으나, 지구 조석에는 연 주기 조석(Sa)과 18.6년 주기 조석이 존재한다. 이러한 장주기 조석은 다른 지구 중력 변화와 구별이 되지 않기 때문에 조석분석 대신 이론적인 계산값을 이용하여 보정한다. Sa와 18.6년 조석은 Tamura *et al.* (1987)의

조석 포텐셜과 Dehant *et al.* (1999) 지구 비탄성 모델의 중력 계수를 이용하여 이론적으로 산출할 수 있다. 지구의 장주기 중력변화에는 지구 자전축의 변동에 따른 성분이 존재하는데 이를 극운동 (polar motion) 성분이라고 한다. 극운동 성분은 Wahr (1985)에 의하여 계산할 수 있으며, 이를 위한 Earth's orientation parameter(EOP)는 International Earth Rotation Service (<http://www.iers.org/IERS/EN/DataProducts/EarthOrientationData/eop.html>) 을 통하여 획득할 수 있다.

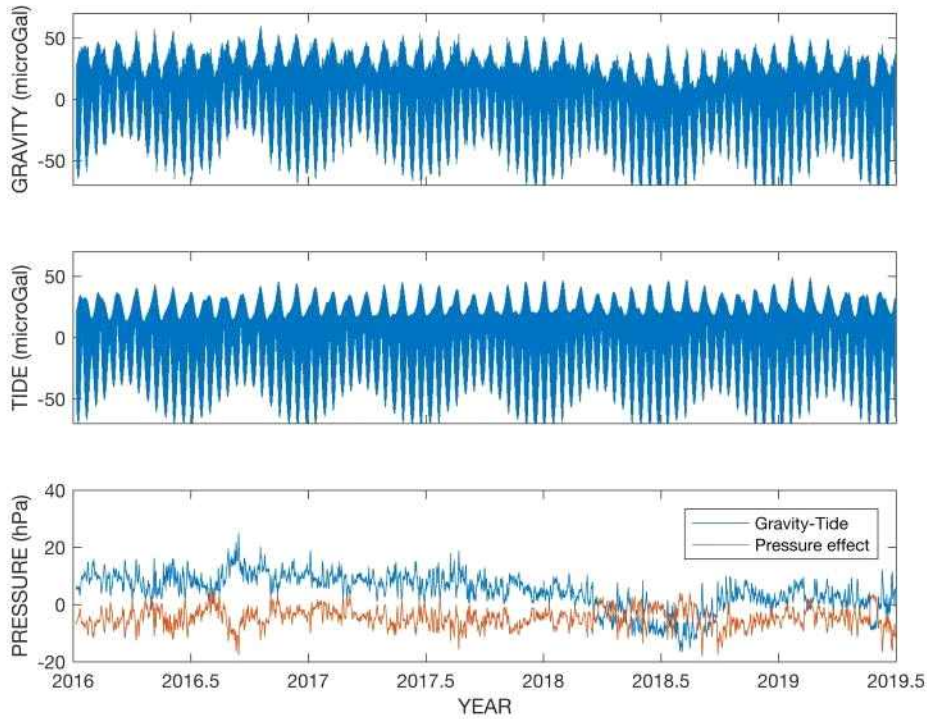


그림 582 (상) 초전도 중력계 관측값, (중) 조석 분석에 따른 조석 성분, (하) 보정된 중력과 기압변화에 의한 대기 효과

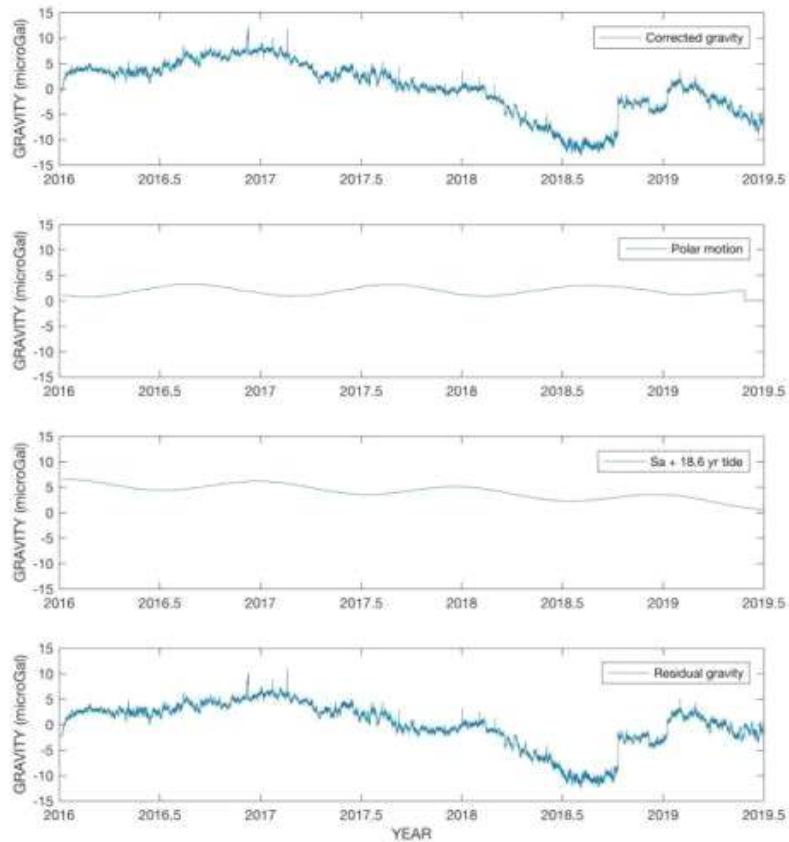


그림 583 극운동 성분과 장주기 조석 성분(Sa + 18.6년 조석)을 제거한 잔여 중력

조석, 대기효과, 극운동, 장주기 조석 성분이 제거된 잔여 중력 약 7 microGal의 진폭을 가진다. 2016/2017 하계기간에 가장 높은 중력값을 나타내었으며 현재는 점진적으로 낮아지는 추세이다. 남극의 여름철에는 중력값이 커지며, 겨울철에는 2-3 microGal 정도 낮은 경향이 있다. 이는 겨울철에 적설량이 많아 지하에 설치된 초전도 중력계의 음의 방향으로 영향을 미치기 때문일 것으로 보인다. 잔여중력에서 나타나는 문제점 중 하나는 2018년 이후 겨울철 음의 방향으로 급격히 중력값이 변화하는 것이다. 이는 중력계실 위에 많은 적설이 발생하기 때문인데 2018년 이후 중력계실 주변 건물들의 변화로 인해 적설량이 확연히 증가하였기 때문이다. 2018년 하반기에는 중력계실 주변에 1 m 이상의 적설이 유지되었으며, 이로 인해 약 8 microGal의 중력 감소가 발생하였다. 제설작업을 수행한 후 중력값은 원상으로 복귀되었으나, 이후 계속되는 적설로 인해 급격한 중력 변화가 자주 발생하고 있다. 향후 장기 모니터링을 위해서는 중력계 주변 적설의 관리가 이루어져야 한다.

나. 수치모델링을 통한 빙하-빙붕 거동 예측

(1) 빙붕-해양 수치모델링 기반 난센빙붕 붕괴 재현, 원인규명 및 향후 거동 예측

남극 빙상의 질량 손실은 가속화 되고 있으며 (예, McMillan *et al.*, 2014), 특히, 빙상이 해양으로 유출되는 지역에서 가장 급격한 얼음의 손실이 관측되고 있다 (Pritchard *et al.*, 2012). 빙붕은 육상으로 부터의 빙하의 흐름을 효과적으로 제어하고 있으나, 기후변화로 인해 따뜻해진 대기와 해수의 영향으로 인해 그 안정도가 크게 약화되고 있어 빙상 붕괴 및 그로 인한 해수면의 급격한 상승을 초래할 가능성이 커지고 있다. 빙상의 붕괴로 인한 해수면 변동은 빙붕이 육지와 닿아있는 지반선으로부터 떠있는 빙붕까지 남극의 얼음이 수송되는 비율에 의해 영향을 받기 때문에, 해양과 빙붕의 상호작용은 매우 중요한 물리과정중 하나이다. 빙상의 질량 변화에 대한 역학은 제한된 시, 공간적 관측 데이터의 한계로 인하여 아직까지 잘 이해되어 있지 않다. 특히, 직접적인 관측을 바탕으로 한 빙붕 아래의 해양에 대한 평가는 굉장히 어려운 실정이다. 빙붕 하부의 해양 순환과 해황의 시, 공간적 변동성을 조사하기에 충분히 넓은 지역과 장기간의 연속적인 데이터가 거의 없기 때문이다. 따라서 관측에 근거한 빙붕 하부의 순환과 해황에 대한 연구는 현재까지 거의 수행되고 있지 않다. 하지만 최근, 고정도의 해양 순환 모델이 개발, 개선되어 해양 물리학적 제반 현상의 재연성이 향상되어짐에 따라, 보다 정확한 해양의 표층하 구조에 대한 정보를 얻을 수 있게 되었으며, 그로 인해 관측이 불가능한 지역에서의 순환과 해황의 시공간적 변동을 이해하는 단서를 얻는 것이 가능하게 되었다.

수치 모델은 빙붕 하부 용융을 지배하는 과정을 이해하는데 매우 유용한 도구가 될 수 있다. 해양과 빙붕의 상호작용은 해양과 얼음의 경계에서 빙붕의 용융/빙결과 수괴의 변형 둘 다에 매우 중요한 과정이다. 본 연구에서는 해양과 빙붕의 상호작용을 고려한 3차원 해양 순환 모델을 사용하여 남극 로스해의 테라노바만(Terra Nova Bay) 지역에서 빙붕 하부와 대륙붕 위에 놓여있는 수괴의 순환과 그 변동 특성에 대하여 조사하고 그 기작을 분석하고자 한다. 본 연구의 주요 목적은 빙붕 안정도에 상당한 영향을 미치는 수괴의 특성과 해양 순환에 있어서 해양-얼음 상호작용이 어떻게 일어나는지에 대하여 더 나은 이해를 얻는 한편, 해수의 온도, 해류, 모델의 기하학적 특성, 특히 빙붕 하부의 기하학적 특성들이 빙붕 기저 용융에 대한 불확실성에 미치는 영향을 분석하는 것이다.

테라노바만 해역을 포함하는 해양 대순환 모델 중, 현재 사용 가능한 모델의 수평 해상도는 약 $1/12^\circ$ 가 최대이며, 대양에서의 수직 해상도는 계산기의 성능과 적분 시간 등의 이유로 심층으로 갈수록 500 m 이상으로 설정된다. 그 결과, 열염 순환에서 중요한 저층 해류에 크게 영향을 주는 지형의 효과는 실제 지형이 아닌 모델의 해상도에 따라 평활화된 지형의 효과가 모델에 반영된다. 또한, 빙붕 기저 용융과 빙붕 하부 순환의 기작에 있어 중요한 해양-빙붕 상호작용을 고려한 모델로부터 생산된 데이터는 거의 없다. 따라서, 테라노바만 해역의 정확한 해양 물리적인 환경을 재연하기 위해서는 빙붕과의 상호작용이 고려된, 수평, 수직적으로 고해상도의 모델을 새롭게 구축할 필요성이 있다.

본 연구에서는 테라노바만 해역에서 해양-빙붕 상호작용이 포함된 모델(ROMS-TNB)을 구축하기 위하여, ROMS (Regional Ocean Modeling System) 해양 수치 모델을 사용하였다. 이 모델의 특징 중 하나는 S-coordinate (stretched terrain following coordinate)의 수직 격자를 채택하고 있는 것으로, 이 좌표계는 z-coordinate의 PBL (planetary boundary layer) 구현의 장점과 σ -coordinate의 바닥 경계층 구현의 장점을 살린 좌표계로 수직적으로 원하는 수심의 해상도를 높여

바닥경계층에서 물리적 현상 파악이 용이하고, 지형에 민감하게 반응하는 압력구배의 오차를 줄일 수 있게 개발 되었다 (Song and Wright, 1998; Shchepetkin and McWilliams, 1998). 이 모델은 3차원 원시방정식을 사용하였는데, 부시네스크 근사와 정역학평형을 가정하였고, 비선형, 자유표면이 적용된 수치 모델로 수평 격자는 직교곡선 좌표계를 사용하고, 수평 격자체계는 Arakawa C-grid system을 사용함으로써, 계산의 안정성과 경제성을 높였다 (Arakawa and Lamb, 1997). ROMS에서는 이류항 계산을 위해 수평적으로 2차 그리고 4차 중앙차분, 3차 upstream을 사용하고 있다. 이는 계산오차를 줄이는데 아주 효과적이고 모델에서 예측 수정방법을 이용하여 좀 더 안정적으로 계산이 가능하다. 그리고 수직적 혼합은 K-Profile 모수화 (KPP; Large *et al.*, 1994)를 사용하였다.

그림 584은 모델 영역의 지형도를 보여준다. 모델 영역은 테라노바만을 중심으로 경도 159.07°E 부터 175.93°E, 그리고 위도 72.77°S부터 77.15°S 까지 포함한다. 경도, 위도 수평 간격은 3km이고 수직적으로 변화하는 24개의 층으로 구성된다. 수직 간격은 중층에서 가장 넓게, 표층과 해저 부근으로 갈수록 수직 해상도를 높게 설정하였다. 모델의 지형은 해저지형은 IBCSO(International Bathymetric Chart of the Southern Ocean), 빙봉은 Bedmap2로부터 제공되는 데이터를 모델 격자에 맞게 내삽하여 사용하였다. 하지만, 제공되는 데이터에서 빙봉 하부의 기하학적 특징은 데이터의 부정확성과 불확실성이 굉장히 크며, 따라서 본 연구에서는 테라노바만에서 빙봉을 포함한 지형의 보다 현실적인 효과를 재연하기 위하여 본 과제에서 수행한 중력탐사 결과를 이용하여 생성된 지형 자료를 제공 받아 사용하였다.

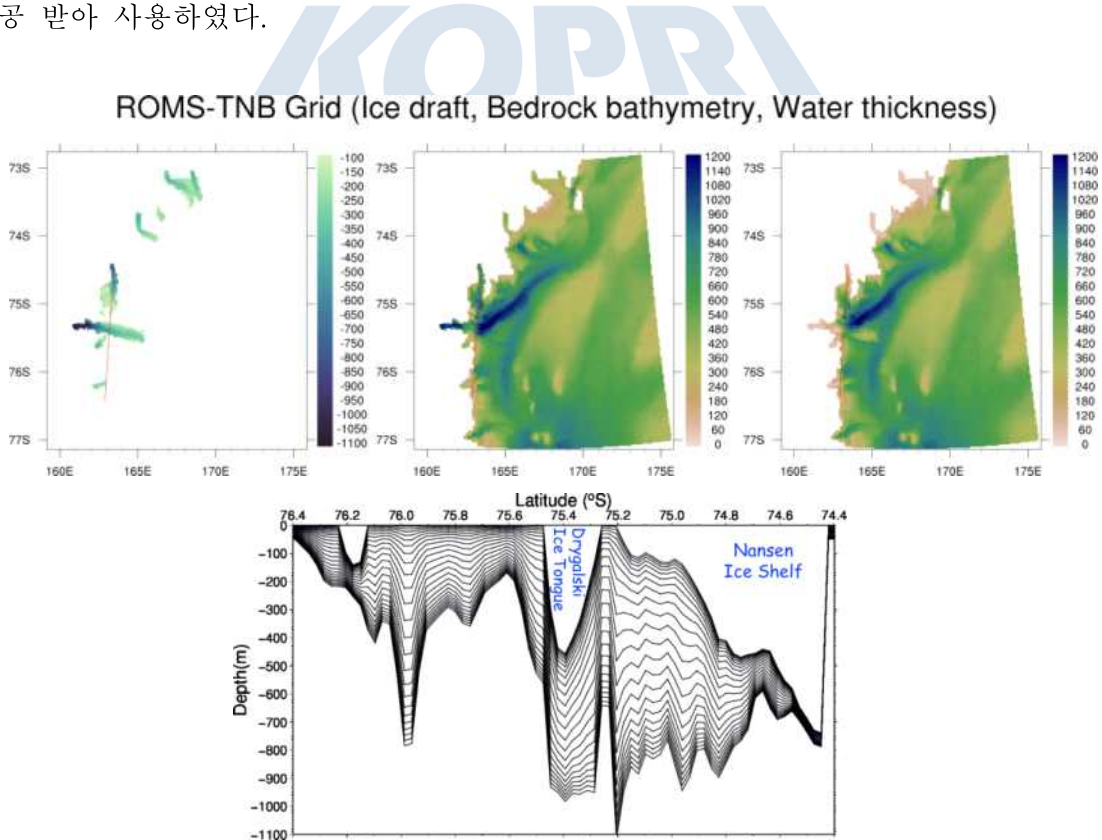


그림 584 모델 영역의 빙봉 두께, 해저 지형, 해수 두께와 동경 163도를 따라 모델의 수직 구조

모델은 서쪽의 대륙지역을 제외하고 동남북 방향으로 열린 경계를 갖는다. 이 경계에서의 적절한 조건이 주어질 때, 모델은 성공적으로 영역의 제반 현상을 재현할 수 있다. 본 연구에서는 열린 경계 조건을 위하여, CMEMS (Copernicus Marine Environment Monitoring Service)에서 제공하는 고해상도 전지구 에디 분해 모델로부터 생산된 해양 재분석 자료인 GLORYS12v1의 월평균 자료를 사용하였다. 일반적으로 해빙 또는 빙붕이 포함되지 않은 해양 순환 모델에서 수직 경계 조건은 대기와 해양이 만나는 표층과 해양과 해저면이 만나는 바닥의 두 부분으로 나뉘게 된다. 해수면에서의 바람응력을 위해 유럽중기예보센터(ECMWF)에서 제공하는 6시간 간격의 바람장을 사용하였으며, 해저면의 마찰응력은 이차해저마찰방정식(quadratic bottom friction equation)을 사용하여 계산하였다.

한편, 모델에서 빙붕과의 상호작용이 고려될 때, 얼음과 해양의 경계에서 플럭스의 교환은 다른 경계조건을 사용하여 주어진다. 빙붕-해양의 수치 모델은 해양에 떠있는 얼음의 기계적 압력의 효과뿐만 아니라, 얼음과 해양 사이에 운동량, 열, 염의 전달을 반드시 표현해야한다. 열과 염 플럭스는 얼음과 해양 경계면에서의 상변화에 기인한다. 이런 상변화는 전형적으로 열역학적 평형상태에서 발생한다고 가정하면, 경계면에서의 온도(빙결온도)는 압력(수심)과 염분의 함수로 표시할 수 있다. 이러한 조건을 바탕으로 빙결과 용융은 세가지 기본 방정식에 의해 표현될 수 있는데, (i) 해수의 빙결점은 염분과 압력의 약한 비선형 함수이고 이것은 다음의 방정식들의 분석해를 허용하기 위해 보통 선형이라 가정하며, (ii) 열역학적 평형 상태에서 얼음-해양 경계면에서 빙결이나 용융에 의해 야기되는 잠열의 생성 또는 소멸은 반드시 해수로부터 공급되는 열과 얼음으로 손실되는 열 사이의 차이와 균형을 이루어야 하고, (iii) 얼음-해양 경계에서, 용융이나 빙결에 의해 야기되는 염 플럭스는 얼음을 통과하는 염플럭스는 0이기 때문에, 해양에서 경계를 가로지르는 염 플럭스와 평형을 이루어야 한다는 것이다. 이러한 조건을 바탕으로 본 연구에 사용된 ROMS 모델은 빙붕 열역학과 해빙 역학-열역학적 과정을 명시적으로 계산하며, 기저 용해 모수화를 이용하여 얼음-해양 경계 조건을 결정한다.

모델의 수치 적분은 1993년 1월의 GLORYS 재분석장을 초기조건으로 하여 대기 외력으로는 유럽중기예보센터(ECMWF)에서 생산되는 ERA-Interim 월평균 재분석 데이터(기압, 비습, 강수, 구름, 복사 - 바람, 기온장은 6시간 간격)를 이용하여 1993년 1월 1일부터 2017년 12월 31일까지 총 25년간 적분을 하였으며, 매해 월평균 데이터를 산출하여 결과를 분석하였다. 기후학적 순환의 특징을 분석하기 위하여 마지막 20년의 결과를 월평균하여 기후장으로 고려하였다.

(가) 테라노바만 해역의 해양 순환과 해황의 특성

해양 순환을 구동하는 외력 중에 하나인 바람장의 변동 특성을 알아보기 위하여 그림 585에 1월과 7월의 윈드 스트레스와 윈드 스트레스 컬의 수평 분포와 테라노바만에서 공간적으로 평균된 남북 바람 성분의 시계열을 나타내었다. 남반구 여름철, 테라노바만 지역에서의 바람장은 일반적으로 약하며, 남풍의 성분이 그 크기는 작지만, 상대적으로 더 강하게 나타난다. 겨울철 남풍은 매우 약화되며, 서풍 계열의 바람이 활강풍과 같이 나타나며, 그 크기가 강화됨을 보인다. 테라노바만 지역을 제외하고 모델의 영역에서는 남풍 계열의 바람이 우세하며, 양의 바람 회전장이 외해에 연중 존재하고 있으며, 연안을 따라 음의 바람 회전장이 분포함을 보인다.

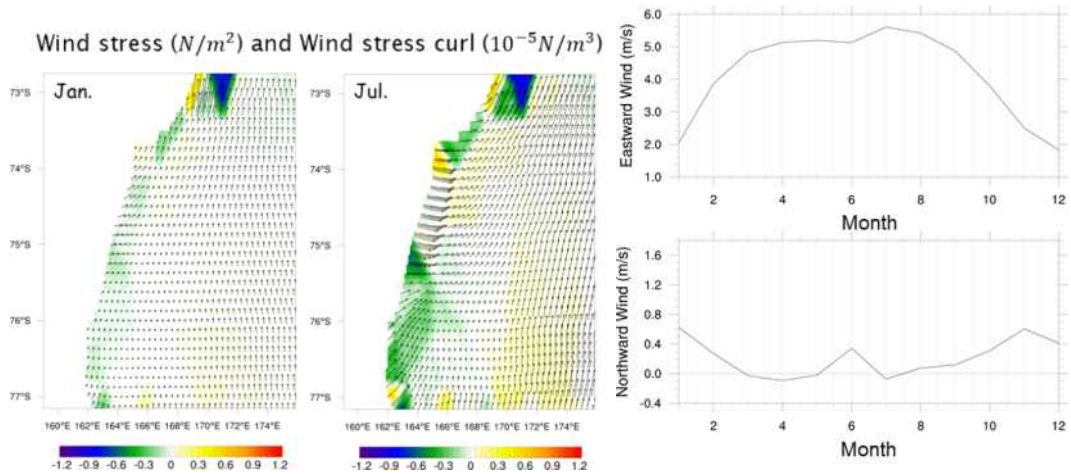


그림 585 1월과 7월의 바람응력과 바람 회전장의 공간분포(좌). 테라노바만 영역에서 공간 평균된 동서, 남북 방향의 바람 성분의 시계열(우)

테라노바만을 포함한 주변 해역에서의 계절별 해류의 수평 분포와 해황의 특성을 알아보기 위하여, 그림 586에 상층 100m 와 하층 500m 수심에서 해류와 수온의 수평 분포를 나타내었다. 상층에서는 양의 바람 회전장이 존재하는 외해에 반시계방향의 순환이 그 세기는 변화하지만, 연중 존재하는 반면, 연안에서의 해류 패턴은 변화한다. 따뜻한 시기 해류는 연안을 따라 북쪽으로 흐르며, 드라이갈스키 빙설을 돌아 테라노바만으로 유입되며 연안을 따라 계속 북쪽으로 흐르는 양상을 보인다. 이러한 북향의 연안류와 함께 따뜻한 해수가 남쪽으로부터 테라노바만으로 유입된다. 하지만 바람이 강해지는 겨울철, 연안류는 반대의 양상을 보인다. 즉 연안을 따라 남하하는 해류가 우세하게 나타난다. 겨울철 서풍이 강해짐에 따라, 드라이갈스키 빙설의 북쪽에 바람 부는 방향의 해류가 발생하기 시작하며, 이 해류는 외해의 반시계방향의 순환의 일부분인 남하하는 해류에 수렴되어 흐른다. 이후 해류는 빙설을 따라 연안쪽으로 방향을 바꾸어 남쪽으로 흐르는 양상을 보인다.

하층에서의 흐름은 남위 75도를 기준으로 남쪽에 시계방향의 순환이 연중 존재하고 있으며 이 지역은 음의 윈드 스트레스 컵이 연중 작용하는 지역과 상응한다. 비록 서풍이 강해질지라도, 연안을 따라 흐르는 해류는 상층과는 달리 계속 북향을 유지한다. 반시계방향의 순환은 남위 75도 북쪽에서 바람이 강한 겨울철 발달한다. 빙설 주변을 흐르는 해류는 겨울철 동안 그 패턴을 유지하지만, 여름철 시계 방향의 순환이 더 강해지고 해류는 빙설 하부를 가로질러 흐른다. 한가지 흥미로운 점은 드라이갈스키 분지의 동쪽, 크레리 뱅크의 서쪽 경사면을 따라 남쪽으로 흐르는 해류가 5월에서 10월, 겨울철에 나타난다. 이 해류는 북쪽의 따뜻한 해수를 남쪽으로 수송하며 남쪽의 시계방향의 순환에 수렴되며, 여름철 사라진다.

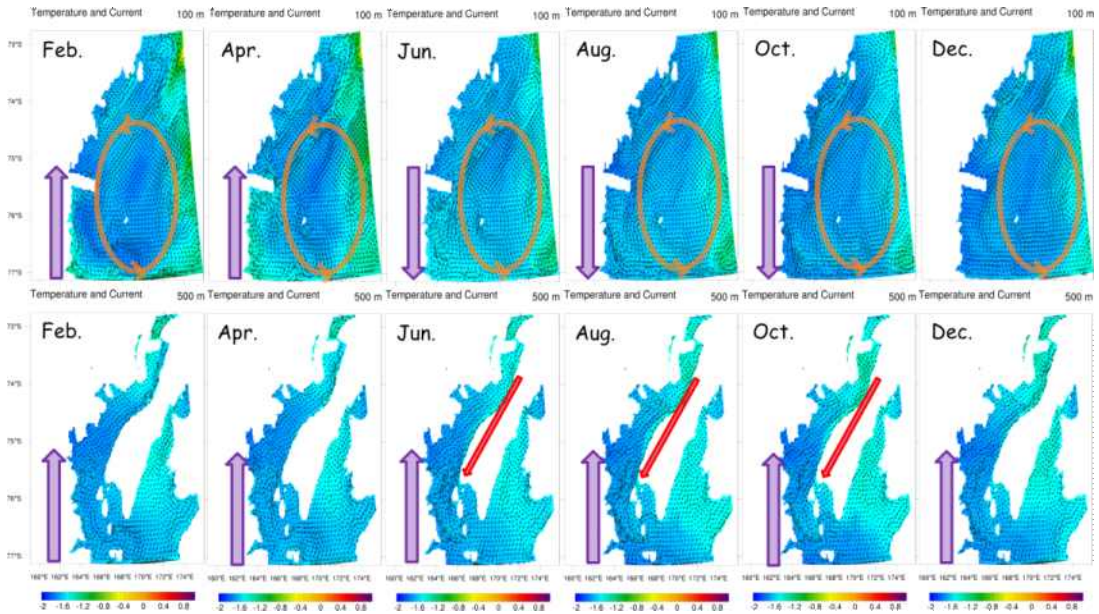


그림 586 상층(100m)과 하층(500m)에서 해류와 온도의 수평 분포

빙붕 하부에서의 해양의 순환과 빙붕의 용융률에 대하여 재연된 결과를 분석하기 위하여 테라노바만에 위치한 난센 빙붕 하부에서의 해양의 물리적 특성에 대하여 조사하였다. 그림 587은 용융률과 빙붕 하부에서 모델의 표층과 하층에서의 수온, 해류의 수평 분포를 보여준다. 모델에서 난센 빙붕은 전반적으로 양의 용융률을 보이며, 그 세기는 시간과 공간에 따라 다른 양상을 보여주고 있다. 가장 높은 기저 용융은 난센 빙붕의 입구와 빙붕의 가장 안쪽 기저면 근처에서 나타난다. 빙붕 하부에서의 해수의 흐름은 해저 바닥을 따라 유입되며 빙붕 바닥을 따라 유출되는 양상을 보인다. 이러한 해류와 함께, 빙붕 바깥쪽을 상대적으로 따뜻한 해수는 빙붕 하부의 해저면을 따라 유입되며 빙붕 아래쪽을 따라 찬 해수가 빙붕 밖으로 유출되고 있다. 빙붕 전체 영역에서의 용융률의 시간 변동은 3월에 최대의 기저 용융을 보이다 시간에 따라 감소하며 7월에 최소값을 나타낸다. 이후 다시 증가하여 9월에 최대를 보인다.

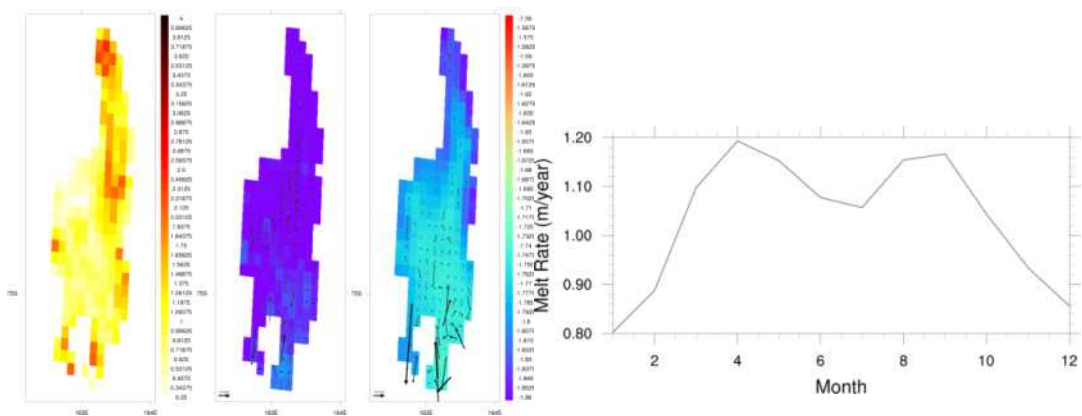


그림 587 (좌) 난센 빙붕의 용융률과 모델의 첫 번째 층과 마지막 층에서의 해류와 수온 분포. (우) 빙붕 전체 영역에서 평균된 용융률의 계절 변화

기저 용융이 높게 나타나는 지역별로 용융률의 계절 변화를 조사하면 지역에 따라 다른 양상을 보인다(그림 588). 빙봉의 입구에서 최대의 기저 용융은 4월에 나타난다. 하지만 빙봉 가장 안쪽에서의 용융은 10월에 최대값을 보이며 5월에 최소값을 나타낸다. 이러한 지역별 최대 기저 용융이 나타나는 시기의 불일치는 해황의 수직 분포를 통해 설명할 수 있다.

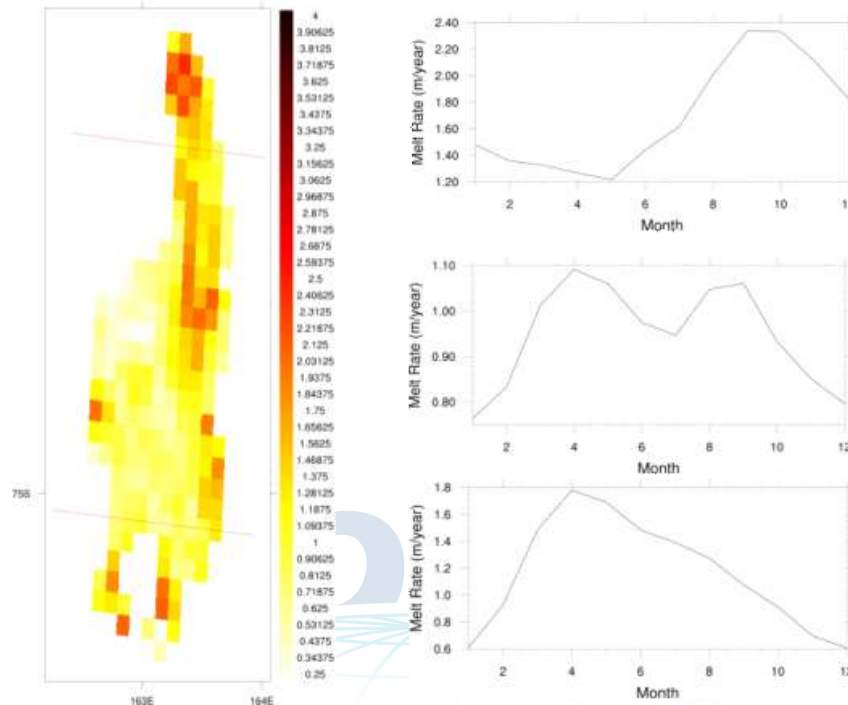


그림 588 난센 빙봉 지역별 평균된 용융률의 계절 변화

그림 589은 동경 163도를 따라 수온과 북쪽 성분 해류의 월별 연직 분포를 보여준다. 1월부터 남쪽으로 부터 따뜻한 해수는 북쪽으로 유입되기 시작하며 3월에 드라이갈스키 빙설 남쪽의 전체 해수는 따뜻해진다. 이후 따뜻한 해수는 상층에서 빙설을 돌아 난센 빙봉의 입구에 다다른다. 이후 빙봉 하부 안으로 북상하며 빙봉과 상호작용을 통해 차가워 지며 수직적으로 혼합된다. 하층에서 남쪽의 따뜻한 해수는 아직까지 빙봉 하부로 유입되지 않는다. 이것은 아마도 드라이갈스키 빙설이 벽으로 작용하기 때문이다. 하층에서 따뜻한 해수는 계속적으로 빙봉 하부로 유입되며 그것은 열적 성층을 야기한다. 이후 기저면 근처까지 북상하고 빙봉을 녹이게 된다. 그 결과 차가워진 해수는 빙봉 아래를 따라 빙봉 밖으로 흘러 나온다. 이는 해류의 분포에서 또한 확인할 수 있다. 1월부터 4월까지 상층의 북상하는 해류는 남쪽의 따뜻한 해수를 테라노바만으로 수송한다. 빙봉 하부에서 북상하는 흐름은 빙봉 입구까지 제한된다. 하층에서는 해저면을 따라 빙봉 안으로 북상하는 해류는 계속 흐르며, 이후 빙봉 하부를 따라 빙봉 밖으로 되돌아 나오는 남향의 해류 분포를 보인다.

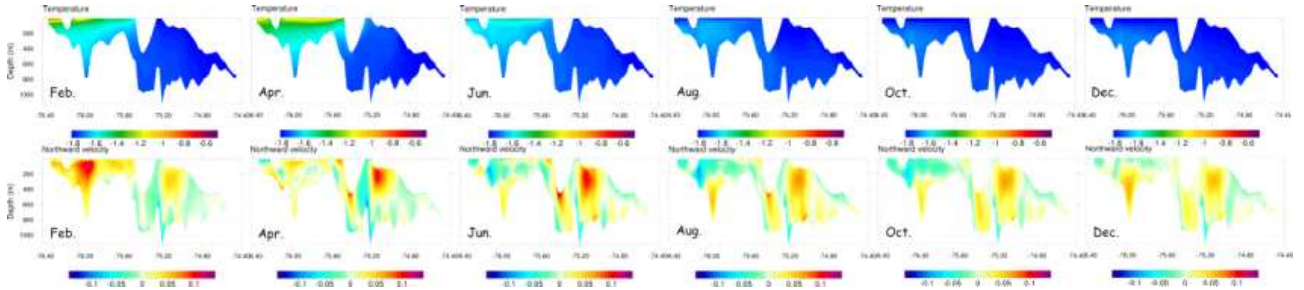


그림 589 동경 163도를 따라 수온(상)과 남북 방향의 속도 성분(하)의 연직 분포

(나) 난센빙붕 끝 부분 붕괴 원인 규명

빙붕(Ice shelf)은 육상의 빙하가 바다와 만나서 물위에 떠 있는 거대한 얼음 덩어리로 붕괴되거나 모두 녹더라도 해수면 변동에 직접적인 영향을 미치지 않는다. 하지만, Buttressing이라는 효과는 육상에 남아 있는 빙하가 해양으로 빠르게 이동하지 못하도록 붙잡고 있는 방어막 역할을 하여, 이러한 빙붕이 붕괴되면 빙하의 이동 속도가 많게는 약 30-40% 빠르게 상승한다는 연구결과도 발표된 바 있다. 남극에는 로스, 필쉬너-로니, 웨델 등 대형 빙붕이 존재하고 있는데 이들 빙붕의 안정성을 면밀히 관찰하여 미래 전지구 해수면 변동 예측의 불확실성을 줄이는데 연구 역량이 집중되고 있다. 특히 빙붕 끝부분에서 일어나는 붕괴현상(ice front calving)은 관측자체가 어려워 현상의 물리적 이해에 많은 제약이 있어 빙상 모델을 통한 예측에 불확실성이 큰 요소로 반드시 규명되어야 할 연구 주제로 인식되고 있다.

장보고 기지로부터 남쪽으로 약 50km 떨어진 곳에 위치하고 있는 난센빙붕은 연간 약 150m의 속도로 이동하고 있으며, 2016년 4월에는 빙붕 끝 부분이 붕괴되어 두 개의 거대 빙산이 탄생하였다(그림 590). 2017년에 발표된 연구 결과(Bell *et al.*, 2017, Nature)에 따르면, 2014년 1월에 난센빙붕 상부에 형성된 거대한 강을 통해 많은 양의 융빙수가 짧은 시간에 흘러내리게 되면, 빙붕의 안정성을 위협하는 주요 기작인 hydrofracturing 효과가 확연히 줄어들어 빙붕 안정성이 회복될 수도 있음이 밝혀져 세계적인 주목을 받았다.

하지만 위와 같은 현상은 지역적인 특성에 기인함을 염두에 두고 결국 2016년 빙붕 끝부분이 붕괴된 점을 상기할 때, 다음과 같은 또 다른 중요한 과학적 질문을 제기할 수 있다.

1. 빙붕 상부 하천은 어떻게 형성되었으며, 빙붕 끝부분 붕괴는 언제 어떻게 시작되었는가?
2. 이와 같은 빙붕 끝부분 붕괴는 극지역에서 일반적으로 관찰되는 현상인가?

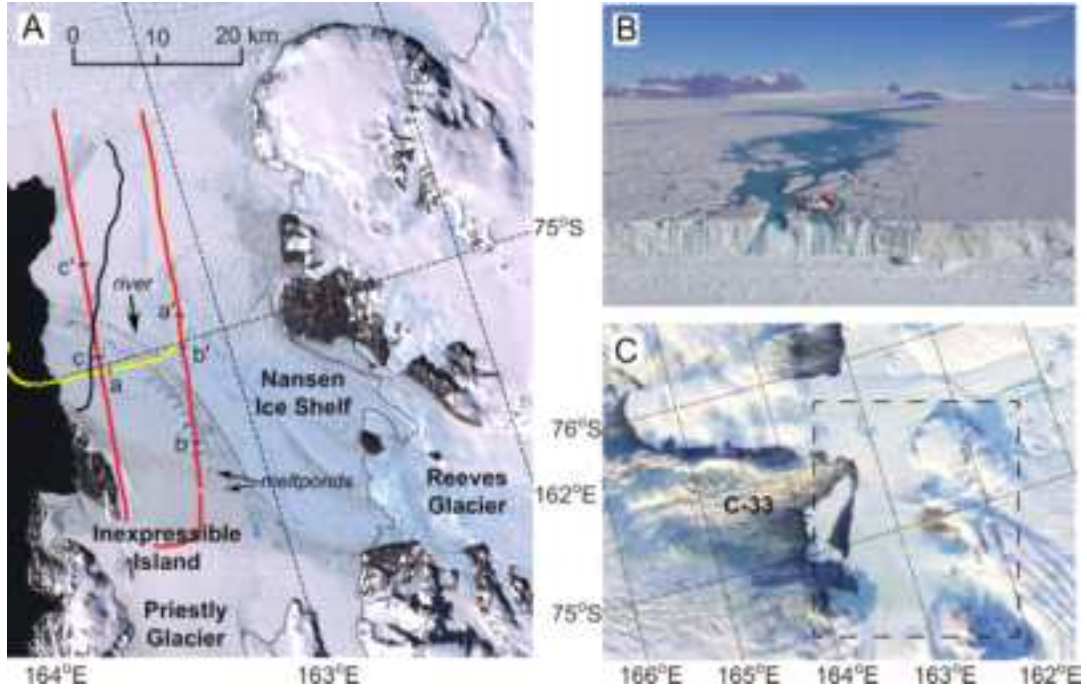


그림 590 2016년 4월 난센빙붕에서 떨어져 나온 두 개의 빙산(c), 두 빙산 중 큰 쪽은 C-33으로 명명되어 현재까지 인공위성으로 위치를 추적 중(Dow *et al.*, 2018, Science Advances, in print).

첫 번째 질문을 해결하기 위해 난센빙붕 형성에 관해 먼저 살펴보자면, 빙붕 상류에서 부터 Reeves 및 Priestly 빙하가 흘러내려 한 곳에서 만나기 시작하는데, 서로간의 이동속도가 달라 만나는 부분에서 해수 침투가 용이하게 일어나 빙붕 하부 용융이 가속화된다. 움푹 파인 빙붕 하부 구조는 2011년 10월 미국 공동연구진(UTIG)이 ICECAP 과제의 일환으로 실시한 항공지구물리탐사 결과를 통해 확인할 수 있다(그림 591).

그림 591에서 해수에 의해 빙붕 하부 용융이 일어난 부분과 빙붕 상부 하천망이 형성된 부분의 위치가 일치함이 발견되었다. 이는 hydrostatic equilibrium으로 설명 가능하며, 빙붕 하부 채널이 상부의 하천망 형성에 기여했음을 지시하는 결정적인 증거이다.

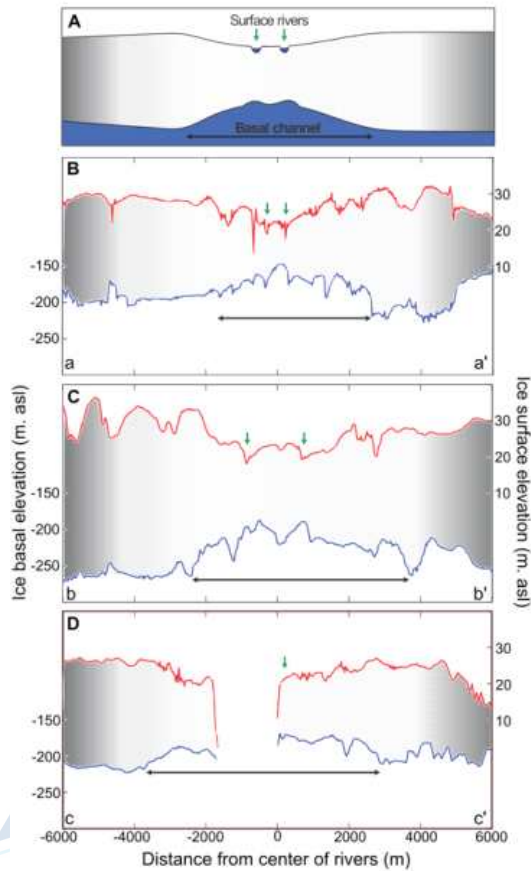


그림 591 (A) 빙붕 상, 하에 형성된 채널 모식도, (B) ICECAP 결과 획득된 빙붕 단면도, 녹색 화살표는 Landsat 인공위성에서 식별된 빙붕 상부 하천망 위치, 검정색 화살표는 항공지구물리탐사로 규명된 빙붕하부 채널(Dow *et al.*, 2018, in print).

2016년 4월 발생한 빙붕 끝부분 붕괴(ice front calving)의 시작은 Landsat 인공위성 자료를 통해 1987년 최초로 식별되었으며, 빙붕의 이동에 따라 커다란 크기의 변동 없이 하류로 동반 이동을 하였음을 확인할 수 있다(그림 592a). 2013년에 들어서면서 ice fracture 크기가 크게 증가하다 2014년 빙붕 상부 거대 용융수 하천망 형성시 붕괴직전까지 압박한 상황이 관측되었다.

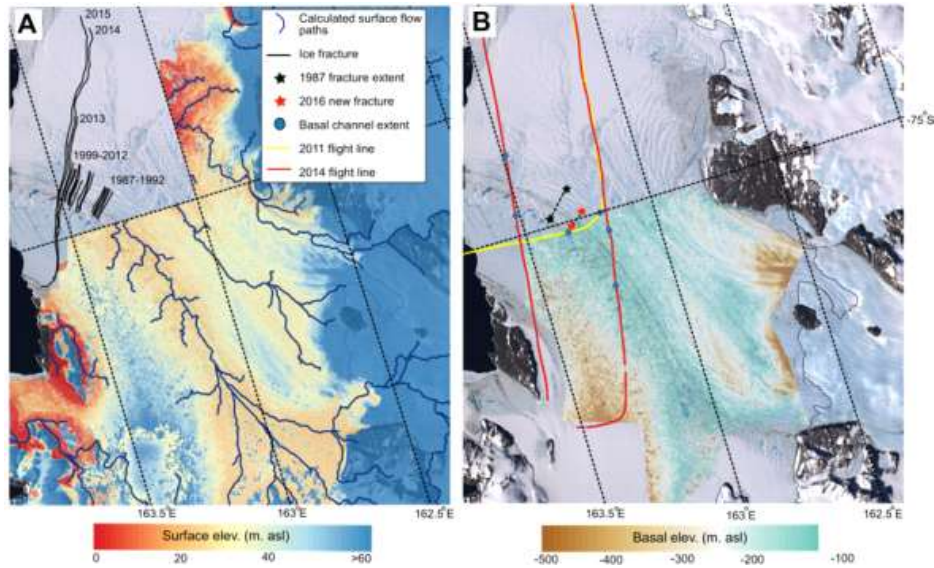


그림 592 인공위성 자료분석을 통해 획득된 난센빙붕 Digital Elevation Model(DEM), A. 상부 DEM, B. 하부 DEM. 1987-2012 간 크기 변동이 거의 없다가 2014년에 이르러 붕괴 직전까지 확장됨(Dow *et al.*, 2018, in print).

그림 591를 보면 빙붕 상부 아래로 움푹 파인 부분(A)과 빙붕 하부에서 위로 솟아 오른 부분(B)의 위치가 일치하고, DEM으로부터 계산된 하천망의 위치와 실제 2016년 강줄기의 위치가 일치함도 확인할 수 있다.

강이 지형의 기복에 따라 형성되어 흐르고 빙붕 상부 기복은 빙붕 하부 채널의 모습에 크게 영향 받는 사실 및 강줄기 한복판에 ice fracture가 형성되었다는 사실은 다양한 지구물리탐사를 통해 규명되었는데, ice fracture의 폭 및 길이가 2015년에 왜 급격히 증가했는가에 관한 의문이 여전히 남는다. 이를 규명하기 위해 DEM 및 인공위성을 통한 빙붕 이동속도로부터 빙붕의 strain을 계산해 보았다. 그림 593 B-C에서 보이는 바와 같이 ice fracture를 중심으로 상, 하류 지역 모두에서 ice fracture 발달 방향과 평행하게 extensional strain이 우세하여 별다른 폭 변화가 관찰되지 않다가 2015년부터 하류지역에서 ice fracture 발달 방향과 직각, 빙붕 이동 흐름 방향과 평행한 extensional strain이 우세하기 시작하여 확장 폭이 크게 증가하게 되었음을 알 수 있다. 특히 크게 확장된 rift에 2014년 1월 엄청난 양의 융빙수가 유입되어 hydrofracturing 현상이 지속적으로 발생하고 결국 2016년에 붕괴가 일어나게 된 것으로 판단된다.

두 번째 확인해야 할 궁금점은 과연 이러한 빙붕 하부 구조가 상부 하천망 구조를 형성하도록 유도하며, 채널 한 복판에 ice fracture가 생기는 현상이 일반적인지에 관한 것이다. 이를 위해 남극 및 그린란드에 존재하는 주요 빙붕을 살펴보았다. 그림 593은 MODIS 인공위성 자료를 통해 확인된 빙붕들로 모든 주요 빙붕에서 난센빙붕과 같은 모습이 관찰되었으며, 이는 빙하 동역학 모델을 통한 미래 예측에 가장 큰 불확실성 중 하나인 빙붕 끝부분 붕괴(ice front calving) 현상을 이해하는데 새로운 패러다임을 제시한 매우 중요한 연구결과로 평가되고 있다.

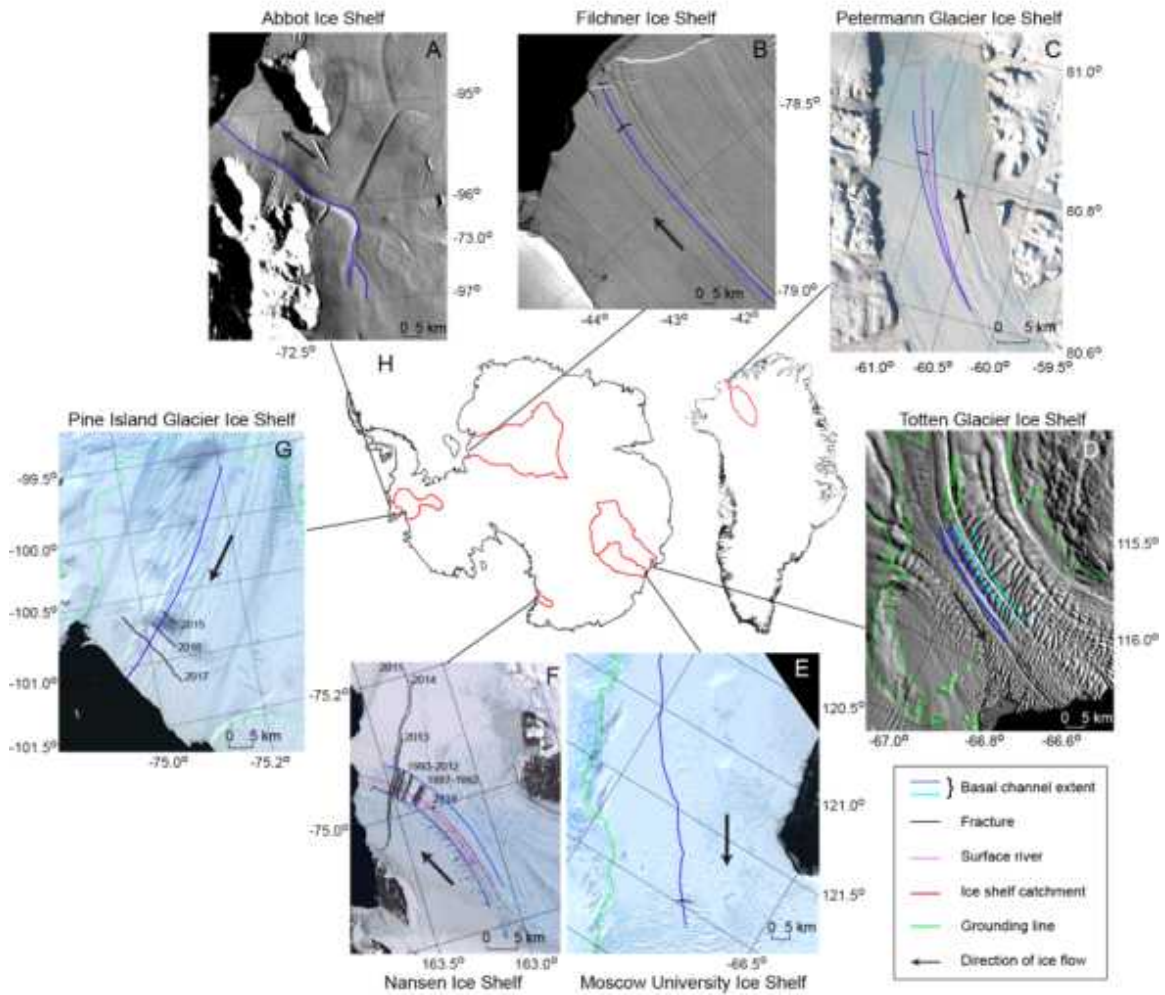


그림 593 MODIS 인공위성을 통해 확인된 빙붕 내 ice fracturing (Dow et al., 2018)

(다) 난센 빙붕 붕괴 수중음향 관측 연구

극지연구소와 미 해양대기청 (NOAA)에서는 테라노바만 주변 빙권 발생 신호 (해빙 발생 신호, 빙붕 붕괴 음향 신호 등) 와 해저지각활동 (해저화산, 해저지진) 해양포유류 발생 신호 관측을 통한 빙권 변화와 해양환경변화 관측하기 위해 수중음향 관측망을 설치 운영하였다. 난센 빙붕 붕괴 시점인 2016년 4월에는 테라노바만 남쪽에 수중음향 관측소 3기가 운영되고 있었다. 수중음향관측소 3기는 2km 간격의 삼각형 모양으로 설치되어 PMCC(progressive multi-channel cross-correlation, Cansi 1995) 방법 (그림 594)을 이용하여 각 센서에서의 신호 도달시각 차이로부터 wave 방향과 속도를 계산할 수 있다. 센서 간의 거리가 가깝고 그에 비해 신호발생 지점까지의 거리가 멀 경우 각 관측소에 들어오는 파는 평면파로 가정할 수 있게 된다. 이 가정에서 각 센서에 도달하는 신호의 미세한 시간 차이를 cross-correlation 방법을 통해 정확하게 계산해내면 평면파가 진행해오는 방향과 그 속도를 계산해낼 수 있다. 우리는 이 방법을 이용하여 테라노바만에서 관측한 수중음향 자료를 분석하여 그림 595에 빙권 신호의 발생 시기별 방향을 도시하였다. 이 그림에서 알 수 있듯이 난센 빙붕 방향에서 붕괴 발생 시점인 4월이 아니라 1월에 가장 활발하게 이벤트가 발생하였음을 알 수 있다.

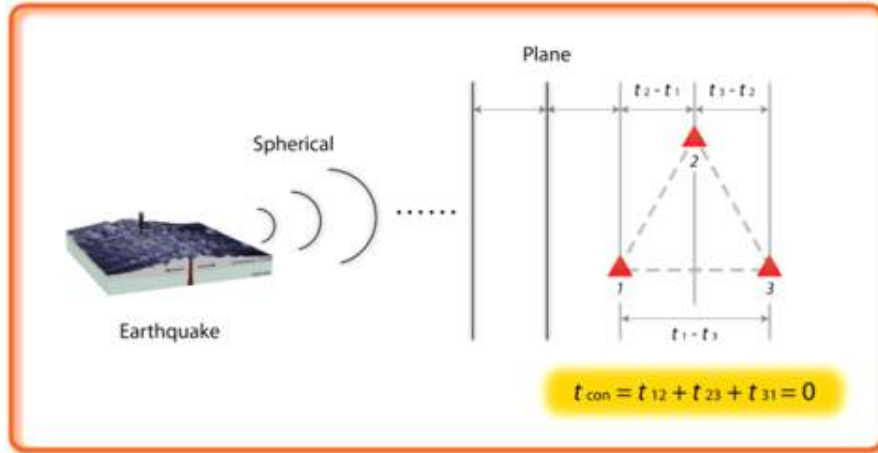


그림 594 좁은 간격의 어레이에서 각 센서에 신호 도달시각 차이로부터 wave 방향과 속도를 계산할 수 있는 PMCC (progressive multi-channel cross-correlation, Cansi 1995) 모식도

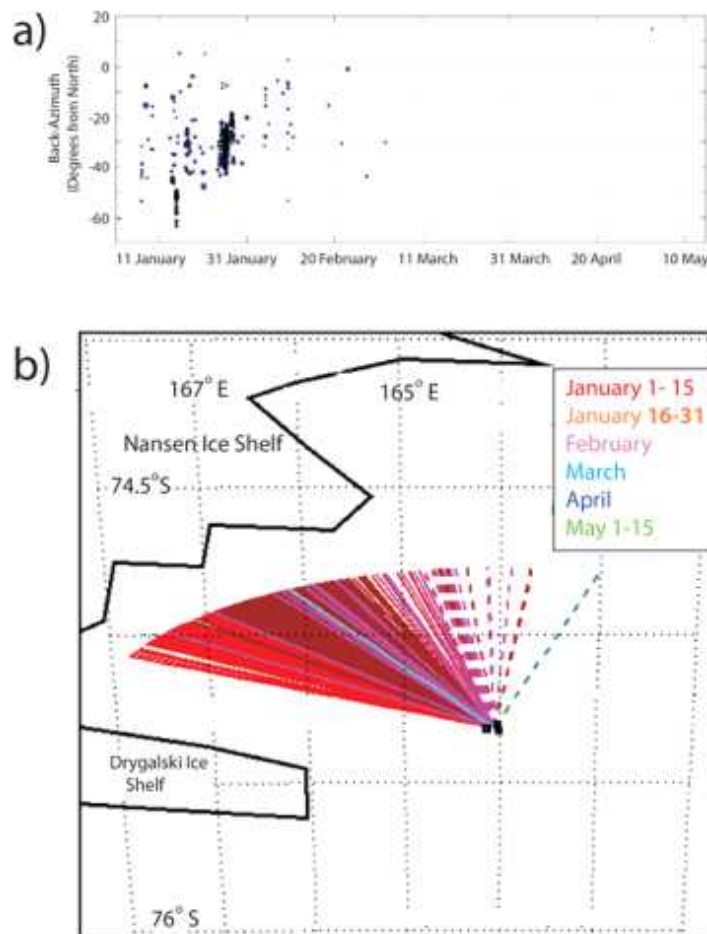


그림 595 수중음향 자료에 PMCC 방법을 적용하여 계산한 난센 빙붕 방향에서 발생한 빙권 발생 신호의 시기별 발생 분포 (a)와 신호 방향 (b) (Dziak *et al.*, 2019)

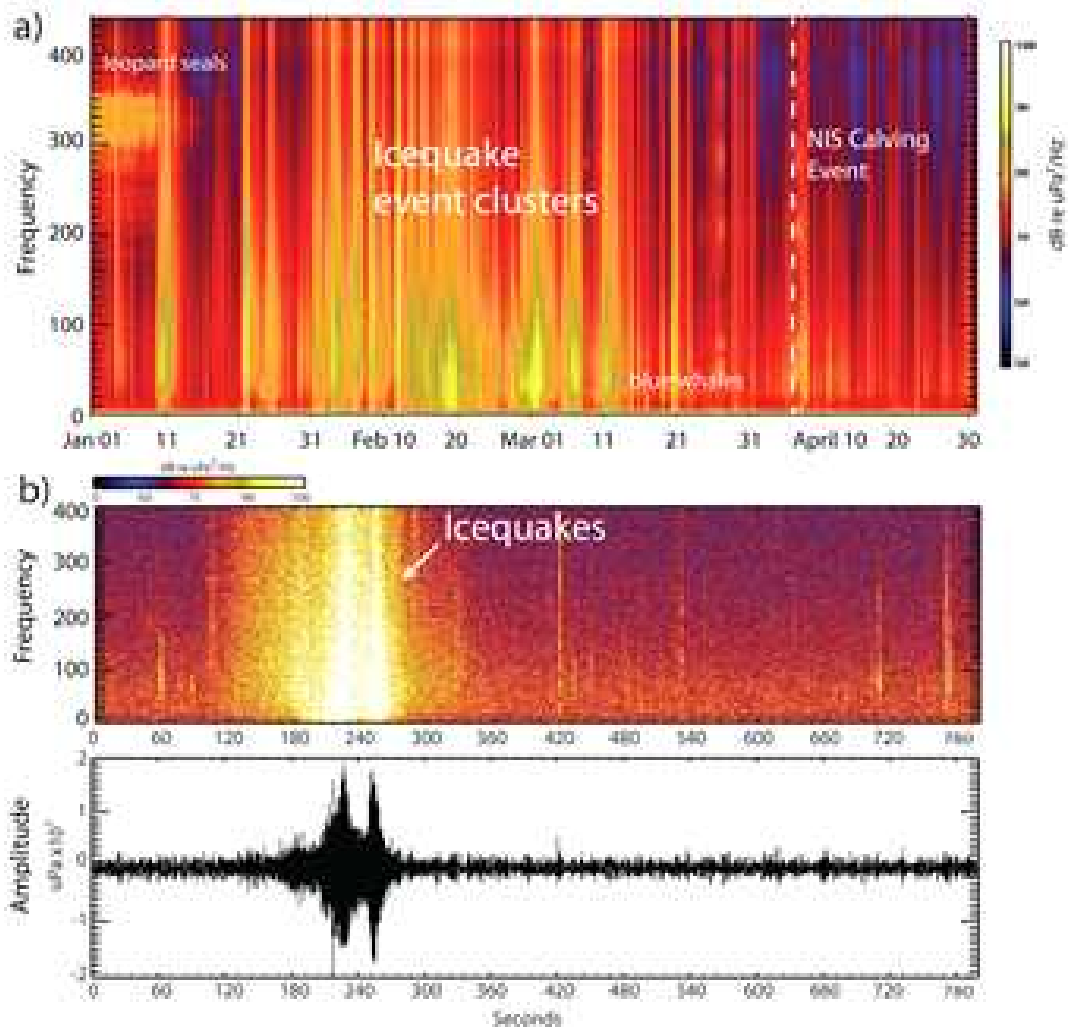


그림 596 2016년 3월 전후 난센빙봉 주변에서 발생한 빙권 발생 이벤트인 빙진(Icequakes)의 스펙트로그램과 파형 (Dziak *et al.*, 2019)

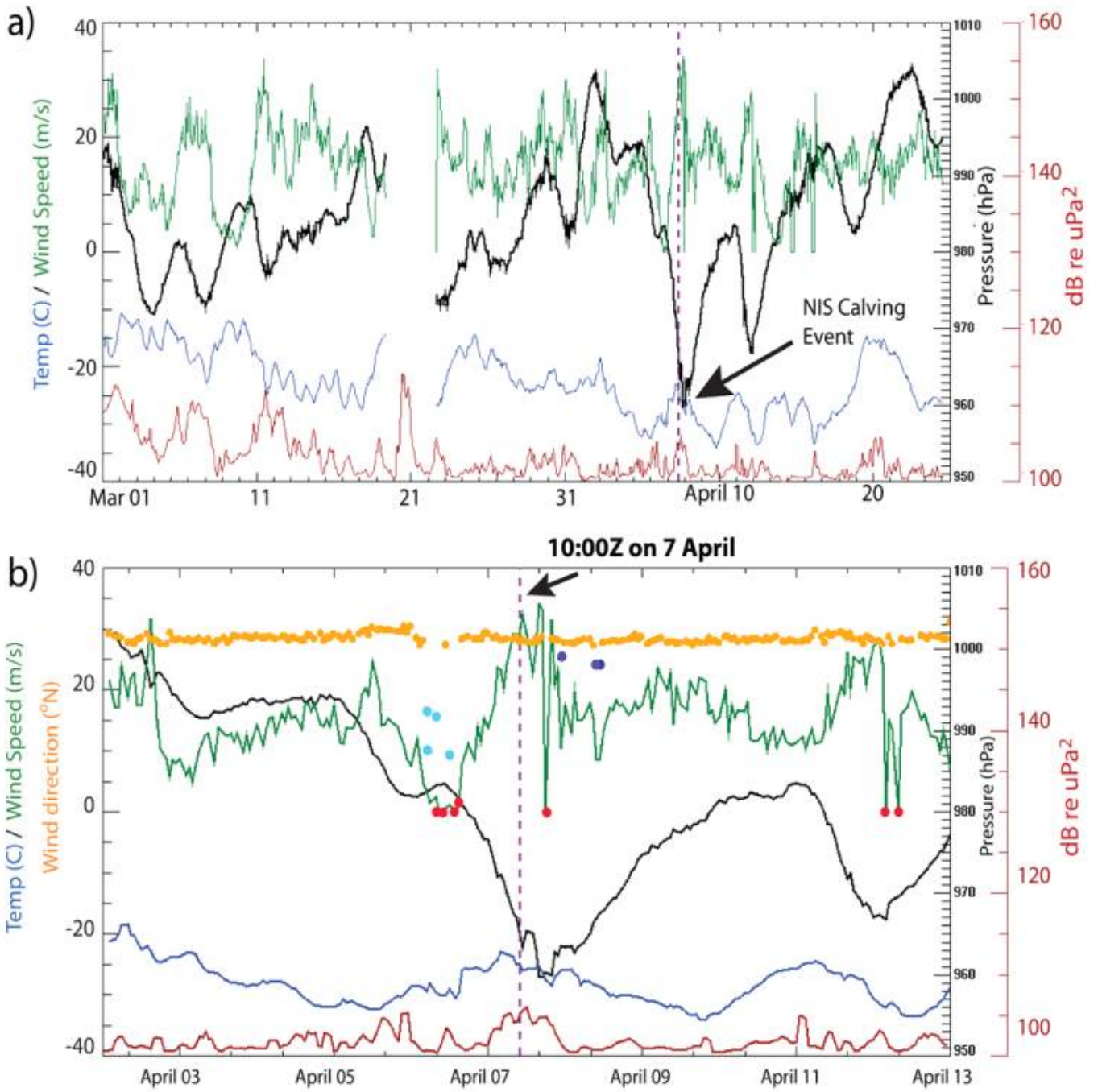
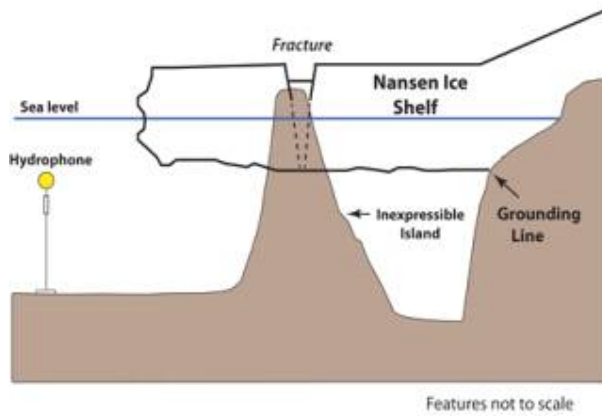


그림 597 난센빙봉 붕괴가 발생한 2016년 4월 7일의 기상 상황. 강한 저기압이 발생하였으며 순간 풍속 35m/s에 달하는 강한 바람이 불었다

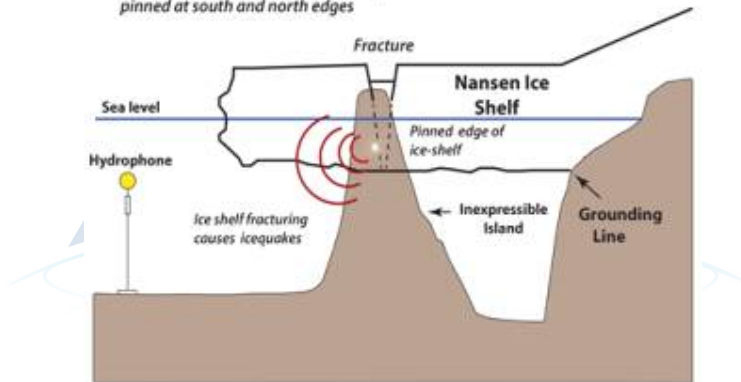
(a) December 2015



(b) January-March 2016

Variable, but not maximum winds, atmospheric pressure

NIS front fractures, but icebergs stay pinned at south and north edges



(c) April 2016

High wind, low atmospheric pressure event

7 April 2016, high winds, high ocean-tide un-moor icebergs

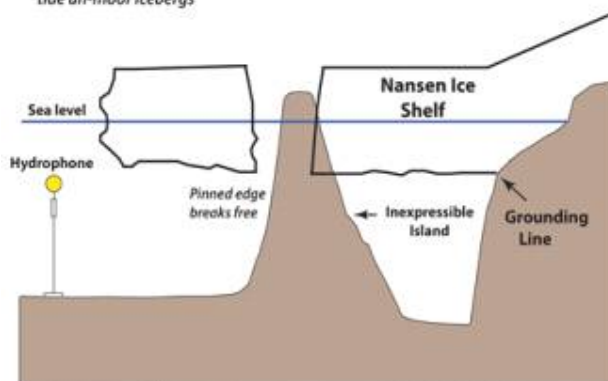


그림 598 난센빙붕 붕괴과정 모식도. 실제 붕괴 발생 전인 1월부터 큰 균열이 발생하였고 이로 인한 말단부 움직임이 빙진을 유발함 (Dziak *et al.*, 2019)

(라) 난센 빙붕 붕괴 재현 및 원인규명

난센 빙붕의 기저 용융률의 경년 변동은 25년의 모델 적분 기간 동안 재연된 결과에서 확인할 수 있다(그림 573). 결과는 현저한 계절 변동성을 보여준다. 하지만 2012년을 기준으로 난센 빙붕의 기저 용융률은 급격히 증가하는 양상을 나타낸다. 2013년 최대의 용융률을 보이며 이후 감소하기 시작하지만 과거와 비교할 때 높은 용융률을 유지한다. 이러한 양상은 빙붕으로 유입되는 열적 수송량을 통해서 확인할 수 있다. 그림 599은 난센빙붕 입구를 가로질러 유입되는 열수송량의 시간 변동을 나타낸다. 기저 용융률에서와 마찬가지로 난센 빙붕으로의 열수송량도 2012년 이후 급격하게 증가함을 보여준다. 이것은 2012년 이후 빙붕 하부로 유입되는 열이 많거나, 유입되는 해류가 강해졌다는 것을 의미한다.

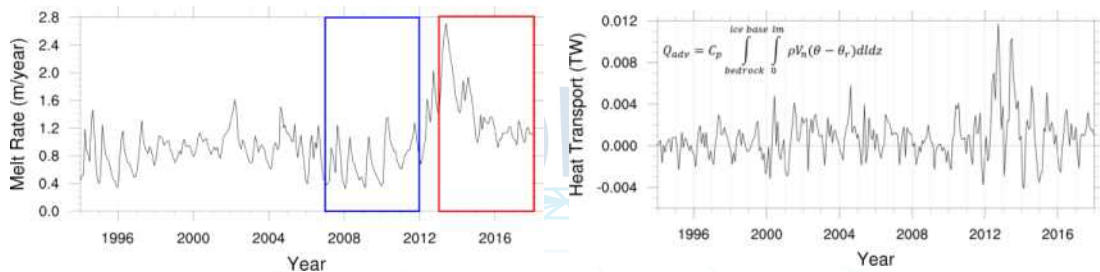


그림 599 1994년에서 2017년까지 난센 빙붕의 기저 용융률(좌)과 난센 빙붕 입구를 통과하는 열 수송(우)의 시계열

이러한 이벤트 전후로 해황의 변화를 알아보기 위하여 2012년을 기준으로 두 기간으로 나누어, 각각 5년의 결과(2007~2011과 2013~2017)를 평균하여 두 기간 동안의 해양의 물리적 특성을 비교하였다. 상대적으로 용융이 약한 앞의 기간을 cold period(그림 599에서 파란색 박스), 뒤의 용융이 활발한 기간을 warm period(그림 599에서 붉은색 박스)로 구분하였다. 이에 앞서, 이러한 이벤트가 모델 결과가 아닌 실제 재분석장에서도 나타나는지 확인해보기 위하여 GLORYS 데이터를 이용하여 해황을 조사하였다. 그림 600은 모델 영역과 같은 영역에서 평균된 운동에너지와 해수의 온도를 보여준다. 이전의 모델 결과와 마찬가지로 2012년 이후 해류의 운동에너지는 급격하게 증가하며, 이와 함께 수온의 최소값 또한 평년에 비해 높은 값을 갖는다. 앞에서 설정한 두 기간 동안 재분석 데이터에서 나타나는 해류와 수온의 수평 분포를 비교할 때, 두 기간 사이에 눈에 띄는 차이점은 해류의 강도와 해수 온도이다. warm period에서 해류는 더 강하게 나타나며 특히 3월에 연안을 따라 북상하는 해류와 9월 남하하는 해류가 더 강하게 존재한다. 또한 연구 영역 전체에 상대적으로 따뜻한 해수가 분포하고 있으며, 더 강하게 북상하는 연안류와 함께 테라노바만에 따뜻한 해수가 수송되고 있음을 보여준다.

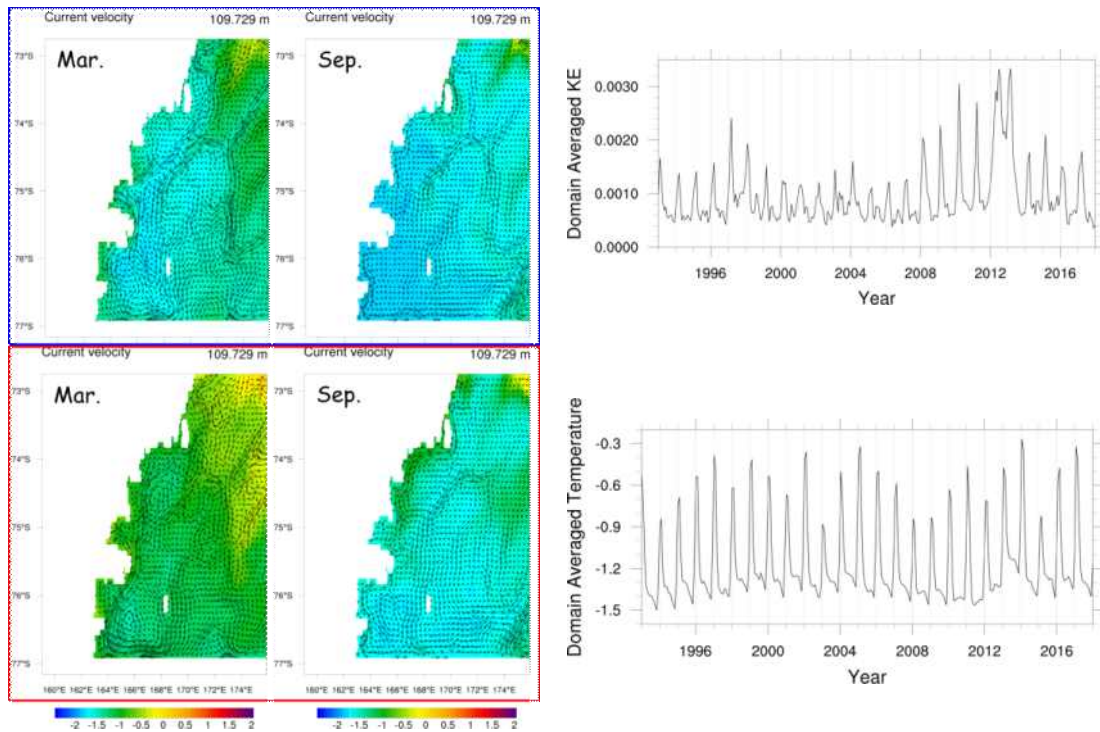


그림 600 3월과 9월 수심 110m에서의 해류와 수온의 수평 분포(좌). 모델 영역에서 평균된 운동에너지와 수온의 시계열(우)

두 기간사이에 환경적 차이점을 조사하기 위하여 해류를 구동하는 외력중 하나인 바람장을 비교하였다. 그림 601은 두 기간의 테라노바만 영역에서 공간 평균된 동쪽과 북쪽의 바람 성분의 계절 변화를 보여준다. 두 기간 사이, 12월, 1월에 warm period때 약간 약해지는 것을 제외하고 동쪽의 바람성분에서 차이는 거의 없다. 하지만 북쪽의 바람 성분은 여름철 warm period일 때, 현저하게 강해지고 있음을 보여준다. 강한 남풍은 약해진 서풍과 함께 여름철 강한 연안을 따르는 downwind currents를 야기할 수 있다. 실제, warm period 일 때, 겨울철 상층에서 북쪽으로 흐르는 연안류는 cold period일 때에 비해 더 강하게 나타난다(그림 602). 결과적으로 더 따뜻한 해수가 더 멀리 북쪽까지 수송된다. 또한 하층에서 난센 빙봉 하부로 유입되는 해류는 더 강하고 더 많이 유입된다.

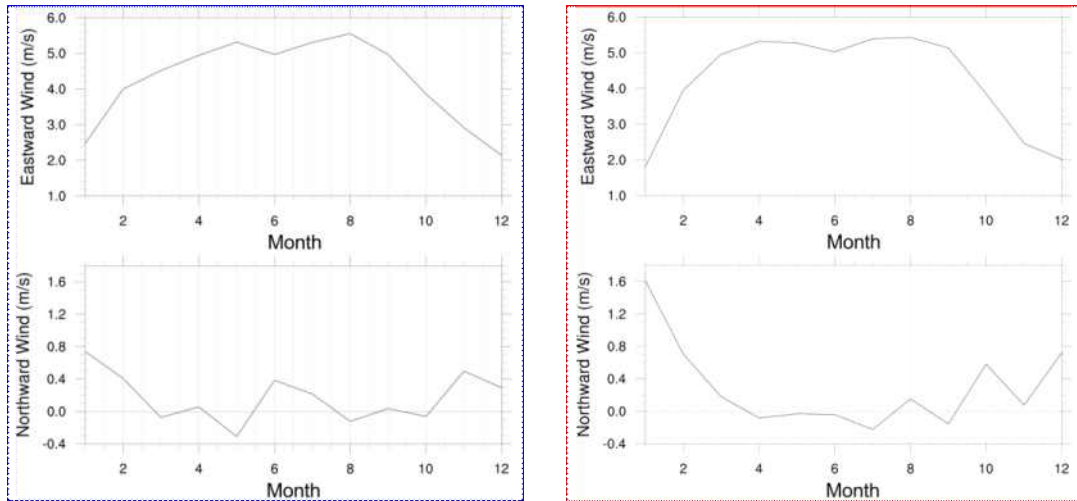


그림 601 각 시기 테라노바만 영역에서 공간 평균된 동서, 남북 바람의 계절 변동

그림 603은 각 시기 동경 163도를 따라 수온, 염분, 해류의 동쪽과 북쪽 성분의 아노말리의 연직 분포를 나타낸다. 아노말리는 1998년~2017년 20년 평균값으로부터 계산하였다. 수온 아노말리는 각각의 시기 cold와 warm 아노말리를 보인다. warm period일 때, 드라이갈스키 빙설의 북쪽에서 서향하는 해류가 유세하게 나타나며, 북향하는 해류는 평년에 비해 더 강하게 나타난다. 결과적으로 기저 용융이 활발한 시기, 많은 양의 열과 염이 빙붕 아래 해저면을 따라 난센 빙붕 하부로 유입되면, 빙붕 하부를 따라 되돌아 나가는 해류가 나타난다.

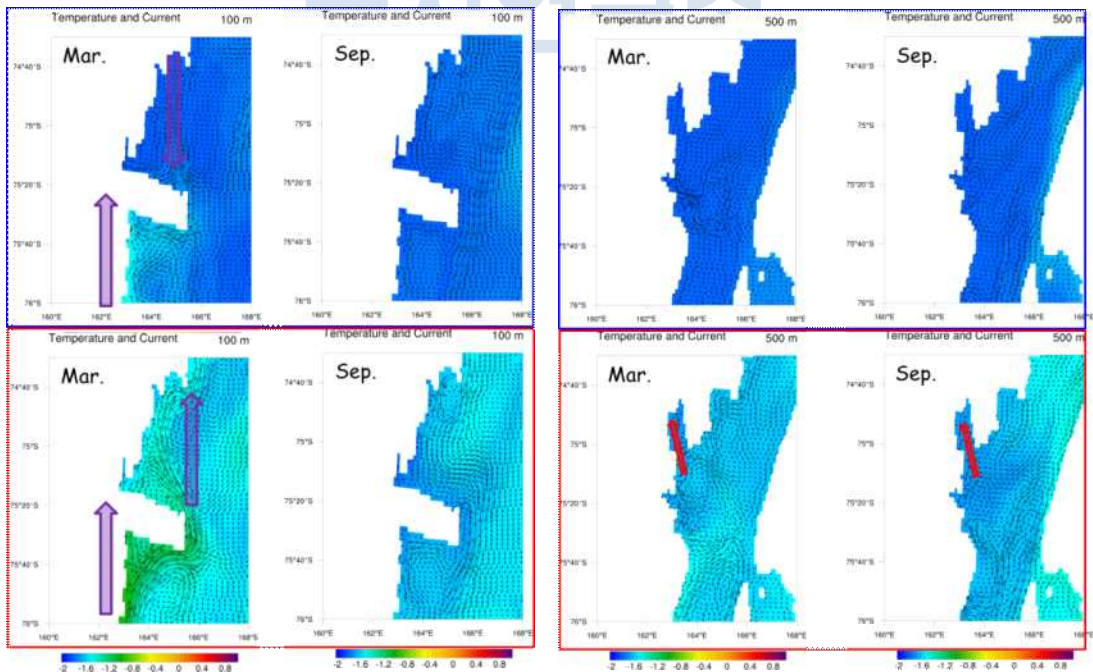


그림 602 각 시기 상층(좌)과 하층(우)에서의 해류와 수온의 수평 분포

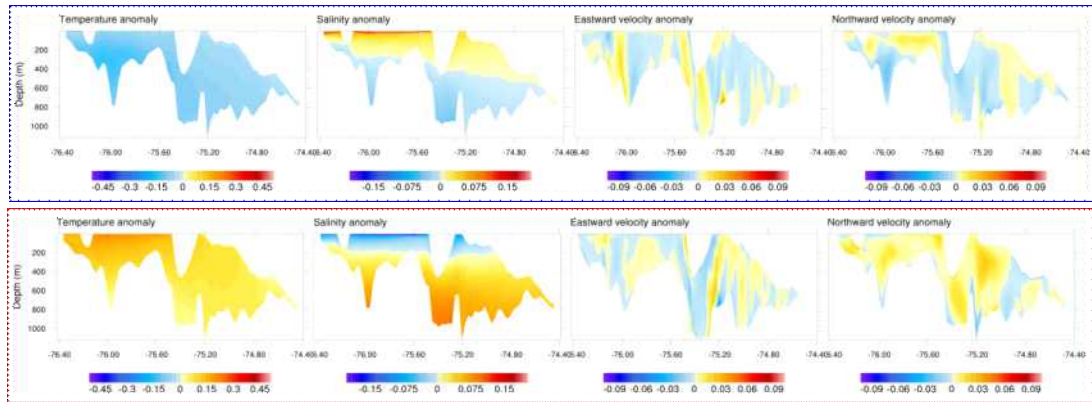


그림 603 각 시기 동경 163도를 따라 수온, 염분, 동서 방향, 남북 방향의 속도 성분 아노말리의 연직 분포

기저 용융의 세기는 빙봉 하부 순환의 세기와 상대적으로 따뜻한 해수 유입의 세기, 빙봉 하부로 유입되는 해수의 특성으로부터 결정된다. warm period 동안 빙봉 하부의 순환은 cold period 일 때 보다 더 강하다. 또한 많은 양의 따뜻한 해수가 난센 빙봉 하부로 유입된다(그림 604).

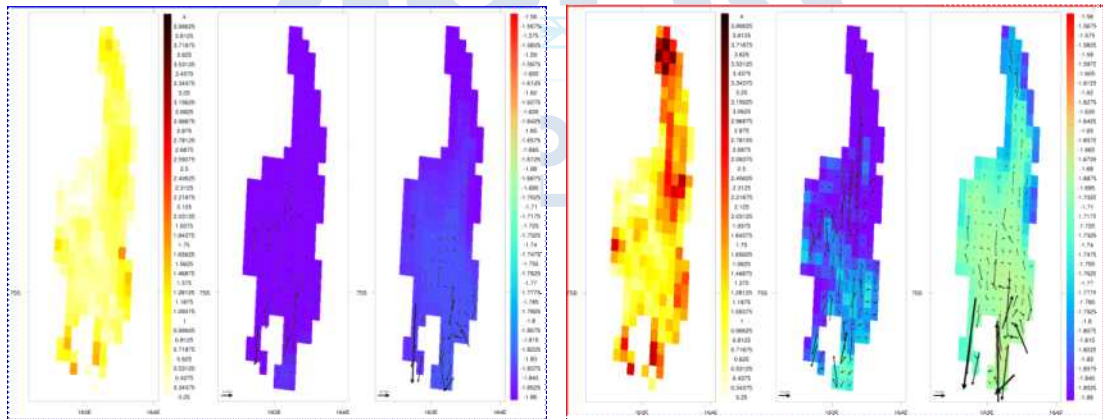


그림 604 각 시기 난센 빙봉의 기저 용융률, 모델의 첫 번째, 마지막 층에서 해류와 수온 분포

본 연구에서는 ROMS 3차원 해양 모델을 이용하여, 테라노바만 해역에서 빙봉-해양 상호작용이 포함된 모델을 구축하였다. 구축된 ROMS-TNB 수치모델의 결과를 이용하여 테라노바만에서의 순환과 해황에 대하여 조사하고 그것에 상응하여 빙봉의 용융이 어떻게 나타나는지에 대하여 조사를 수행하였다.

(2) 장보고 기지 주변 빙하-빙설 거동 수치모델링

(가) 서론

기후 변화는 남극에서 강설, 표면 용해, 그리고 빙붕하부용융률을 변화시켜 빙상 및 빙붕 모양을 변화시키고 순차적으로 지반선(grounding line) 부근에서의 지지대 역할(buttressing)을 감소시킴으로써 빙상 역학에 영향을 미치게 된다. 남극의 빙하에서 이러한 변화가 발생하게 되는 기작은 각 빙하의 모양, 기저 지형(bed geometry), 대기·해양 환경에 따라 다른 양상으로 나타나며 그 임계점(tipping point) 또한 다르다. 남극은 남극횡단산지를 기준으로 서쪽에 위치하고 있는 서남극과 동쪽의 동남극으로 구분되며 각각 4.3m, 그리고 53.3m의 전지구 해수면 상승을 야기할 수 있는 얼음 양을 보유하고 있다. 특히 최근 지반선 부근 빙하 이동속도(ice velocity) 증가와 용융에 의한 질량 변화가 활발하게 진행 중인 서남극에서는 대기 및 해양 온난화와 더불어 역행적(retrograde) 기저 지형과 순환 심층수(circumpolar deep water)의 침투에 의한 해양빙상불안정성(marine ice sheet instability)이 급작스러운 서남극 빙상의 붕괴를 야기할 수 있는 주요 기작으로 이해되고 있다. 반면 동남극에서는 기후 변화의 영향이 비교적 서서히 나타나고 있으며 빙상역학의 변화 기작에 대한 이해 또한 불확실성이 크다.

장보고 기지가 위치해 있는 동남극 북빅토리아랜드에서 가장 큰 데이비드 빙하의 내부 얼음은 피오르드 지형 계곡을 따라 기저능을 지나 빙폭(ice fall) 형태로 드라이갈스키 빙설을 형성하며 테라노바 베이로 배출된다. 데이비드 빙하-드라이갈스키 빙설 지역 질량은 연평균 -3 ± 6 Gt의 비율로 감소하고 있으며, 빙속은 지반선에서 최대값을 보이며 해양으로 가까워질수록 감소한다. 드라이갈스키 빙설은 테라노바 베이의 해빙 형성에 중요한 역할을 하고 있는데, 2005년 강한 바람의 영향으로 발생한 칼빙으로 인해 형성된 B-15A는 드라이갈스키 빙설에서 산출된 가장 큰 빙산이었다. 본 연구에서는 이 지역을 대상으로 획득한 항공 레이더 자료 기반 산출된 고해상도 기저 지형자료가 빙상동역학 모델 성능 개선에 미치는 영향에 대해 분석하였으며, 나아가 개선된 모델을 사용하여 IPCC RCP 시나리오 기반 미래 빙상변화 시나리오를 산출하였다.

(나) 연구 방법

본 연구에서 사용된 빙상동역학 모델은 NASA/JPL 및 UCI(University of California, Irvine)에서 공동 개발된 ISSM(Ice Sheet System Model) 이다 (Larour *et al.*, 2012). 이 모델은 2차원 얇은빙붕 가정(2-D shallow shelf approximation) 기반 유한요소법을 사용하여 스토크스(Stokes) 방정식을 이산화하여 풀어낸다. 특히 빙상동역학 모델에서 지반선의 이동과 모델 안정성에 중요한 변수인 지반선의 기저마찰력을 요소내 모수화로 처방하여 빙붕의 마찰계수를 0으로 설정하였다 (Seroussi *et al.*, 2014a). 빙상 가장자리의 빙속은 최신 관측값에 기반하여 거의 움직이지 않는 것으로 가정하며, 해양과 맞닿은 빙붕은 정역학 압력과 평형을 이루게 설정되었다. 유속방정식에서 유효압력은 글렌의 법칙을 따르는 비선형적 값으로 정의되며 얼음 강성은 온도에 따라 정의되다.

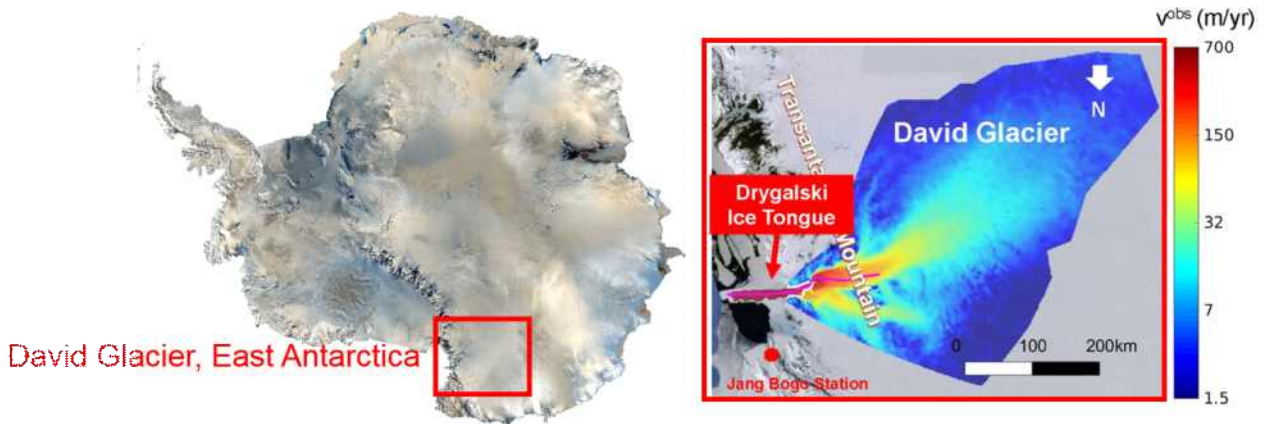


그림 605 동남극 북빅토리아랜드 데이비드 빙하-드라이갈스키 빙설 위치(좌) 및 관측 빙속 분포도(우)

데이비드 빙하-드라이갈스키 빙설을 포함하는 모델 영역은 그림 605과 같이 정의되었으며 모델 격자는 계산 효율성을 높이기 위하여 빙속이 빠른 지역에서는 450 m, 느린 지역에서는 8 km 까지 격자요소 크기가 변화하는 적응망(adaptive mesh) 격자 생성기법에 기반하여 구성되었다. 특히 안정도가 중요한 빙설의 가장자리 영역은 450 m 고해상도 격자로 설정하며 울퉁불퉁한 모양을 다듬어 모델이 보다 안정적으로 구동하도록 하였다. 이처럼 생성된 모델 영역의 전체 격자 개수는 59,000개이며, 격자 크기 및 분포는 그림 606에서 보여주고 있다.

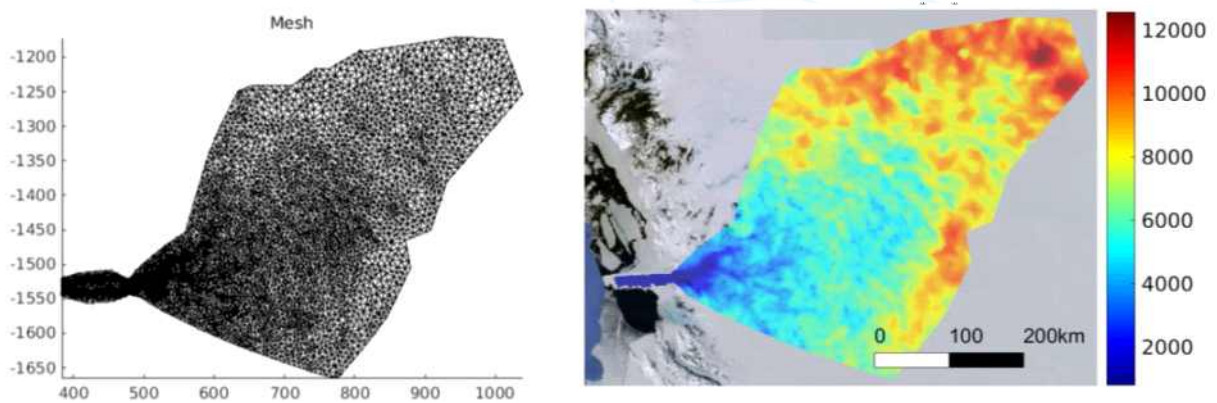


그림 606 모델영역 적응망격자 생성(좌) 및 크기(우)

격자생성 후 초기값을 처방하고 역산 과정을 거치게 되는데, 이는 모델 구동에 필요한 기저마찰계수와 빙봉의 얼음강성은 관측되지 않는 값이기 때문에 관측과 모델 빙속의 손실계수를 최소화 하는 역산(inversion) 모델을 이용하여 먼저 계산하여야 하기 때문이다. 이후 산출된 기저마찰계수와 얼음강성값을 처방하여 모델을 구동하면서 표면질량균형값(surface mass balance)과 빙봉내 용융비(sub-ice shelf melting) 등을 강제력으로 처방하면 질량보존법칙 기반 유도된 질량이동모델(mass transport model) 내에서 강제력들이 얼음의 유동과 상호작용하며 빙속을 산출하게 된다. 표면질량균형값은 강설량에서 증발산량을 감한 값으로 나타낸다.

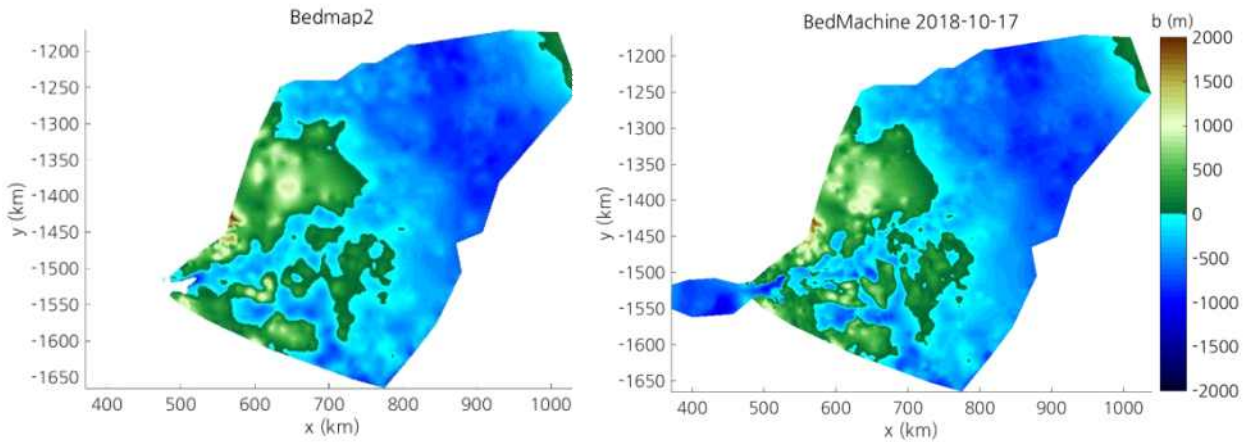


그림 607 Bedmap2와 KOPRI 항공레이더 관측자료가 반영된 BedMachine 기저지형 자료 비교

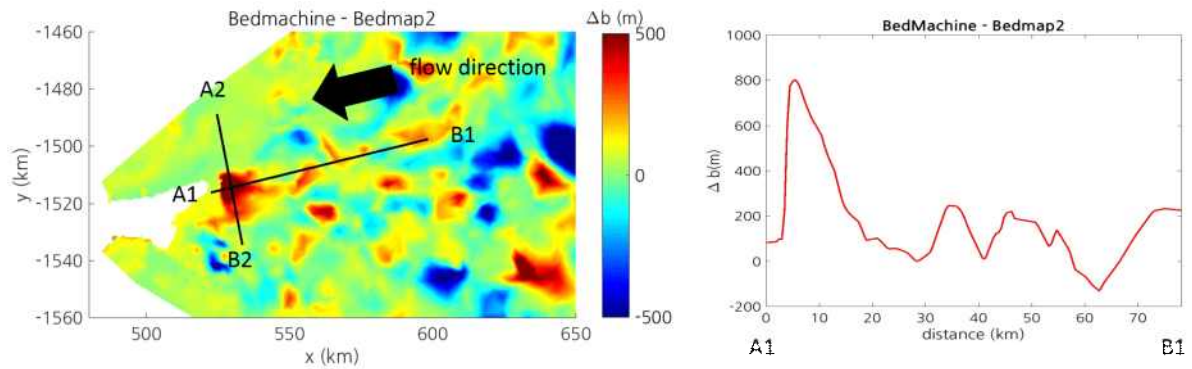


그림 608 지반선 부근 Bedmap2와 BedMachine 기저능 고도 비교

본 연구에서 수행된 항공 레이더 현장관측 자료에서 산출된 얼음 두께 자료를 기반으로 질량보존법칙 기법을 활용하여 새로운 기저지형자료로 산출되었으며 그림 609의 BedMachine Antarctica라는 남극전체 빙저지형도 제작에 통합되었다 (Morlighem *et al.*, 2011, <https://sites.uci.edu/morlighem/bedmachine-antarctica/>). 이 자료는 기존의 Bedmap2 자료(Fretwell *et al.*, 2013)와 비교하였을 때 특히 데이비드 빙하 지반선 부근 기저능의 고도가 500 m 정도 더 높다는 사실을 밝혀주었다 (그림 608). 이 두 기저지형자료를 ISSM 모델에 각각 처방하여 모델 실험을 수행하여 기저지형자료가 빙상동역학 모델 성능에 미치는 영향에 대하여 분석하였다. 모델 실험에 사용된 초기조건 및 보조자료는 표 62에 요약하였다.

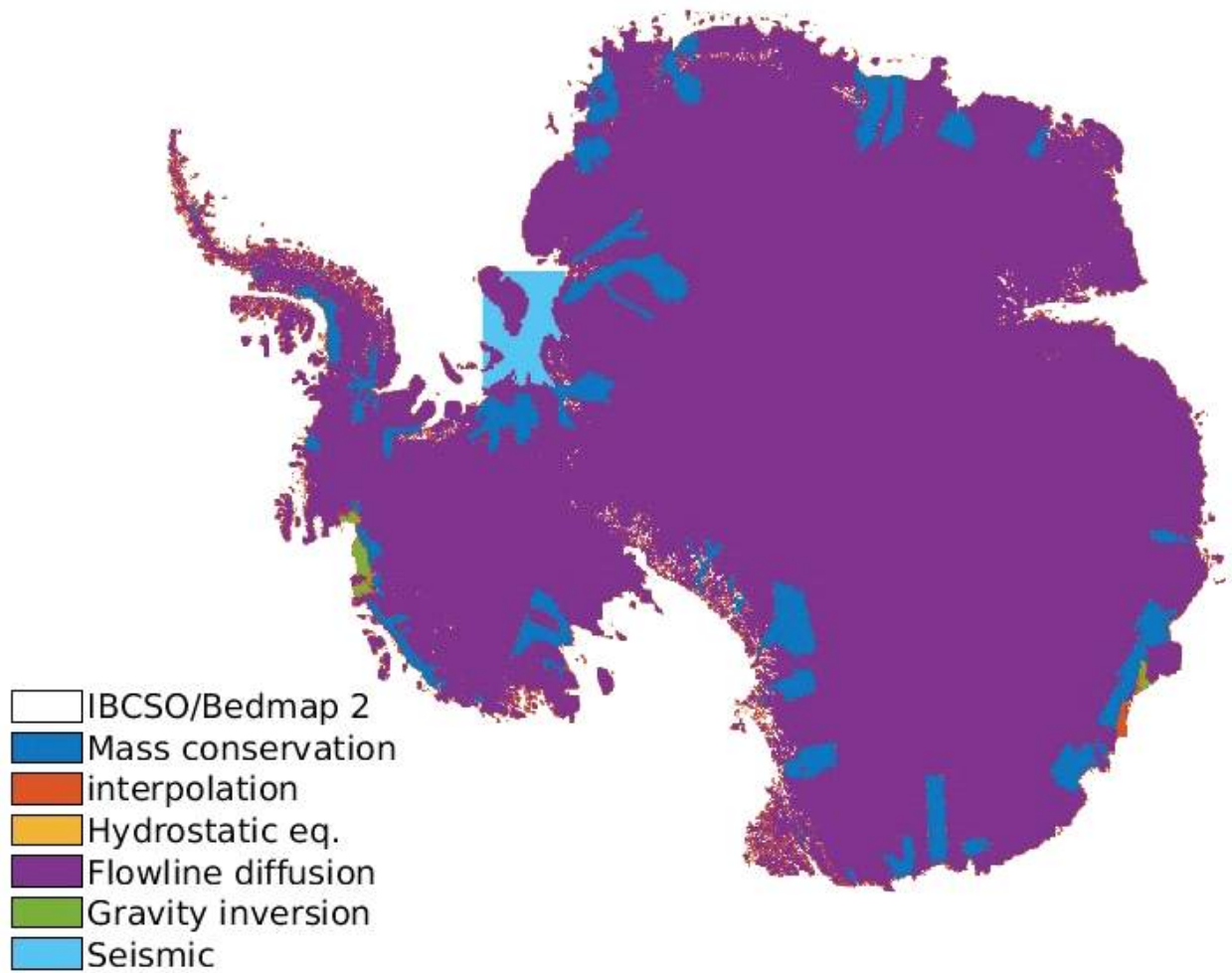


그림 609 BedMachine Antarctica의 소스 자료 현황. 데이비드 빙하 지역에 표시된 파란색 부분이 본 연구에서 획득된 자료를 이용하여 제작된 500m 급 해상도의 빙저 지형도 영역에 해당함. (<https://sites.uci.edu/morlighem/bedmachine-antarctica/>)

표 62 ISSM 빙상동역학 모델 실험에 사용된 초기조건 및 보조자료

변수	자료
표면고도	REMA (Howat <i>et al.</i> , 2018)
빙속	Mouginot <i>et al.</i> (2012)
표면질량균형	RACMO2.3 (Lenaerts <i>et al.</i> , 2012)
대기온도	Cosimo (2000)
지열속	Shapiro <i>et al.</i> (2004)

초기 빙붕내 용융비 분포는 지반선에서 약 20.91 ± 9.6 m/yr이며 해양으로 갈수록 감소하는 기존 문헌에서 제시된 분포(Wuite *et al.*, 2009)에 기반하여 생성되었다. 이후 시간에 따른 빙붕하부용융률의 변화는 모델의 안정성을 보장하기 위하여 얼음 두께에 비례하여 감소하는 방식을 사용하여 (Seroussi *et al.*, 2014b) 해면 아래 1200 m 두께의 빙붕에서는 15 m/yr, 200 m 지점에서는 0으로 설정하였다. 초기 빙붕하부용융률은 6.8 Gton/yr이며 이는 기존 관측기반 문헌인 Rignot *et*

al.(2013)에서 산출된 7.6 Gton/yr보다는 낮고 Wuites *et al.*(2009)에서 산출된 3.12 Gton/yr보다는 높다.

빙상동역학 모델은 초기자료 변수들을 획득한 시기 차이, 눈에 보이지 않아 부정확한 빙하 밑 기저암(bedrock) 고도, 그리고 모델에 변수를 입력하기 위해 사용하는 보간법 등에 의해 초기에 수치적 발산(numerical shock)이 존재한다. 이와 같은 초기자료 오류에 의한 모델 오차의 증가를 최소화하고 모델을 안정화시키기 위하여 RACMO2.3 지역기후 모델에서 산출된 표면질량균형값과 얼음 두께에 비례하는 빙붕하부용융률을 처방하여 빙속과 얼음 두께의 공간분포가 관측값과 유사해지고 얼음속 발산(ice flux divergence)이 최소값이 될 때 까지 100년 간 적분하여 모델을 완화(relaxation)하였다. 이후 이상화된 시나리오 및 기후변화에 관한 정부간 협의체(IPCC) 5차 보고서에서 정의된 RCP(Representative Concentration Pathway) 기후변화 시나리오를 강제력으로 처방하여 예측 실험을 수행하였다.

(다) 빙상동역학모델 정확도 향상 검증 기법

일반적으로 수치모델 정확도는 모델 영역에서의 장기간 평균적인 모의 성능으로 검증되기 때문에, 한 지점의 관측값 (in situ observation)으로 검증하기보다는 관심 영역의 관측값들을 시공간적으로 최대한 포함하여 품질관리 및 보정을 거쳐 균일하게 격자화 된 값으로 제공되는 위성자료 및 재분석 자료를 관측자료(observational dataset)로 선정하여 검증한다.

모델 검증은 모델이 모의하는 주요 변수의 평균장, 다양한 시간규모별 분산 및 표준편차, 계절변화(seasonal march), 계절내변화(intraseasonal variability), 경년변동성(interannual variability), 십년 주기 변동성(decadal variability) 및 선형 경향성(linear trend) 등을 종합적으로 분석하여 관측과 달리 나타나는 오차 특성을 다면적으로 평가하여 이루어지게 된다. 이를 위해 모델 영역에서 주요 변수의 장기 관측 자료 확보가 필수적이다. 일차적으로 모델의 에너지 보존을 확인하기 위한 장기적 분 결과의 통계적 분석을 시작으로, 큰 시공간 규모 현상부터 작은 시공간 규모 현상까지 모의 성능을 분석한다. 특히 모델 성능을 한 눈에 쉽게 판단하기 위하여 다양한 “지수(metric)”들을 정의하여 사용하는데, 통계적 혹은 과정기반 분석적 값으로 표현되는 지수들은 4차원 변수로 산출되는 모델 결과를 1~2차원 값으로 제시함으로써 보다 효율적인 모델 결과 분석을 도모한다.

모델 성능 향상 또는 변화의 추적을 보다 효율적으로 수행하기 위하여 수치모델을 개발하는 모델링 센터에서는 “규준실험”을 정의하고 “테스트베드”를 구축한다. 규준실험은 모델 영역, 초기자료, 경계조건, 보조자료, 적분기간, 그리고 모델성능 검증 자료로서 사용할 관측 자료를 정의하여 결정하게 된다. 테스트베드란 다면적으로 주요 모델 성능 변화를 추적 검증할 수 있는 여러 개의 규준 실험을 표준검증실험으로 정의하고, 표준검증실험 산출물을 분석하는 지수(metric)들과 가시화하는 틀까지 포함하는 패키지 개념이다. 체계적인 모델 개선 실험 및 모델 업데이트와 버전관리를 위해 자동화된 코드로 테스트베드를 구축하고 활용하여 모델 개선을 관리하게 된다.

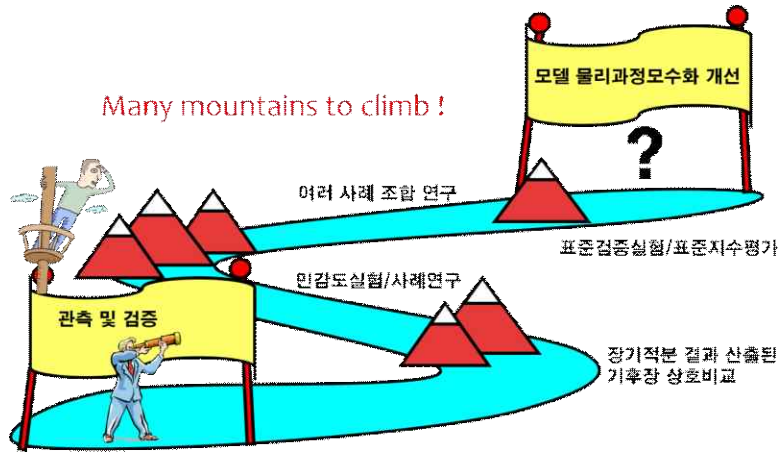
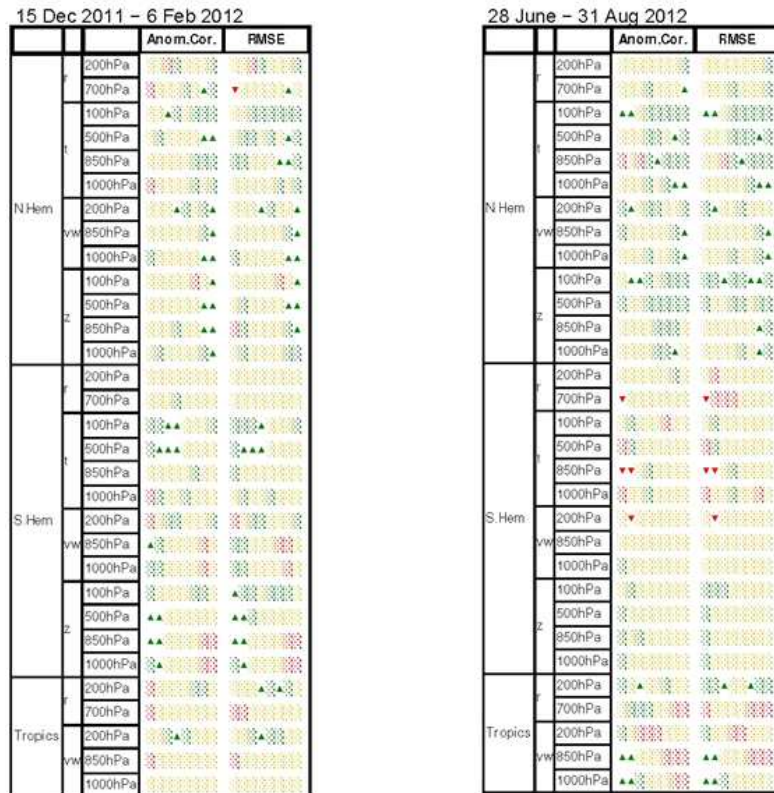


그림 610 모델에서 관측과 테스트베드를 활용한 물리과정 모수화 개선 과정 모식도 (ECMWF, 2012)



Symbol legend: for a given forecast step (d: score difference, s: confidence interval width)

- ▲ experiment **better** than control **statistically highly significant** (the confidence bar above zero by more than its height) ($d/s > 3$)
- ▲ experiment **better** than control **statistically significant** ($d/s \geq 1$)
- ◻ experiment better than control, yet not statistically significant ($d/s \geq 0.5$)
- ◻ not really any difference between control and experiment
- ◻ experiment worse than control, yet not statistically significant ($d/s \leq -0.5$)
- ▼ experiment **worse** than control **statistically significant** ($d/s \leq -1$)
- ▼ experiment **worse** than control **statistically highly significant** (the confidence bar below zero by more than its height) ($d/s < -3$)

그림 611 다양한 변수의 모의 성능을 1차원 지수로 가시화하여 보여주는 스코어카드 예시

본 연구에서도 빙상동역학모델에서 산출되는 가장 중요한 변수인 빙속 및 빙하 두께에 대하여 검증자료와 비교하여 모델 영역 평균 오차가 최소로 산출되는 조합(모델 방정식, 가정, 모수화, 입력 자료, 완화기간 등)을 추출하여 규준모델 실험을 설정하였다. 규준실험 프로토콜에 따라 여러 강제력을 바꾸어가며 실험들을 반복하여 수행하고 그 결과들을 상호 비교하여 모델 성능향상 연구를 수행하였다. 특히 모델 성능의 변화 추이를 한 눈에 판단하기 위해서 모델 영역 평균 빙속 및 빙하 두께를 모델 성능 평가의 지수로 정의하여 사용하였으며, 위성기반 관측자료와 상호 비교하여 오차 값을 산출하고 성능 개선을 분석하였다.

이외에 한 지점 또는 좁은 영역에서 단시간 확보되는 집중 관측 자료를 기반으로 한 모델 개선 연구도 기획하여 수행할 수 있다. 이런 경우 보다 단순화된 모델들이 일반적으로 사용되는데, 모델의 수평 영역을 단일기둥모델(single column model) 등으로 관측지점과 동일하게 한 점으로 구성하여 이 지점에서 집중 관측기간에 발생하는 물리 변수들의 시간적 변화를 모델이 어떻게 모의하는지 평가하여 모델 물리과정 모수화 개선점을 도출하게 된다 (e.g. Stokes and Schwartz, 1994; <http://arm.gov>). 여러 모델을 상호비교하여 공통의 문제점을 파악하고 개선점을 도출하는 연구에도 이러한 집중관측-모델 실험이 체계적으로 기획되어 수행된 사례가 많다 (e.g. Klein *et al.* 2009).

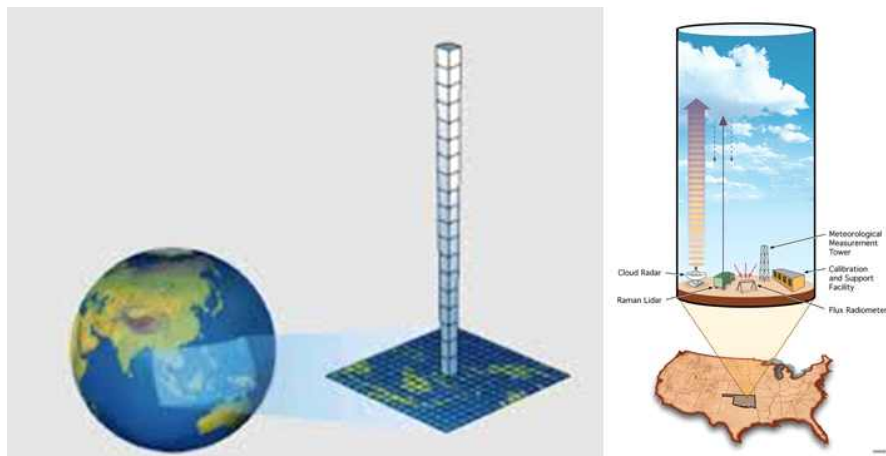


그림 612 ARM (Atmospheric Radiation Measurement) 프로젝트에서 기획된 집중관측과 단일기둥모델 상호비교 연구 모식도 (<http://arm.gov>)

(라) 기저지형자료 개선에 따른 빙상동역학모델 정확도 향상

먼저 현장 관측자료 기반 기저지형자료 개선에 따른 빙상동역학모델 성능 변화를 빙속과 빙하 표면고도 모의 성능을 기준으로 평가하였다. 모델 성능 검증을 위하여 RMSE(Root Mean Square Error, 평균제곱근편차) 방법과 면적 가중치 오차(misfit) 산출 방법을 적용하여 시간에 따른 모델의 예측성을 평가하였다. RMSE를 산출하는 방법은 다음과 같다.

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{(v_i^{mod} - v_i^{obs})^2}{N}}$$

위 식에서 v는 변수, i은 격자의 꼭지점, N은 총 꼭지점의 개수, mod은 모델의 약자이며, obs은 관측의 약자이다. 다음으로 면적 가중치 오차 계산 방법은 다음과 같다.

$$w_e = \frac{area_e}{total\ area}$$

$$misfit = \sum_{e=1}^M (w_e \times |v_e^{mod} - v_e^{obs}|)$$

위 식에서 w_e 은 격자들로 구성하는 요소의 면적을 전체 면적으로 나눈 것이다. 위 방정식들에 기반하여 RMSE은 격자의 꼭지점들의 값을 기반으로 계산되며, 면적 가중치 오차는 격자들로 구성되는 요소들의 면적값을 기반으로 계산된다. 그림 613는 모델 영역에서 초기 조건 빙속 분포 및 빙하의 표면 고도를 보여준다. 이 값들이 RMSE 및 면적 가중치 오차의 기준값으로 선정되었으며, 전체 모델 영역 및 변수 변동성이 큰 영역(그림 613(우)의 빨간색 상자)에서 값을 산출하였다.

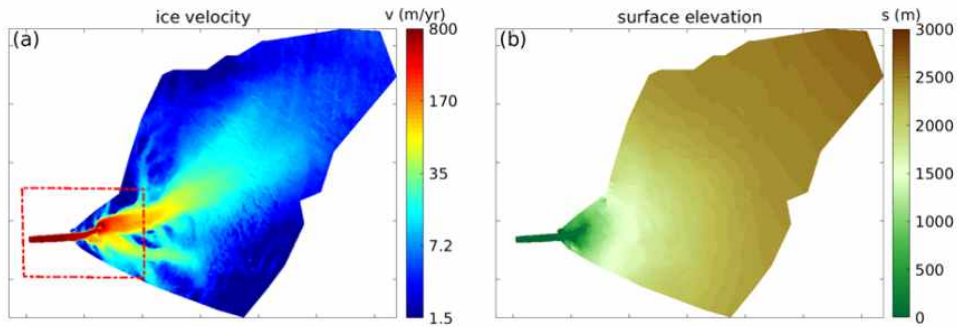


그림 613 데이비드 빙하 빙속 분포(좌, Mougnot *et al.* 2012) 및 빙하의 표면 고도(우, Howat *et al.*, 2018) 분포. 좌 그림에서 빨간색 상자 지역이 변수들의 변동성이 큰 영역

먼저 역산 후 산출한 모델의 빙속의 면적 가중치 오차값은 **Bedmachine**을 사용하였을 때 **0.96 m/yr** 반면 **Bedmap2**를 사용하였을 때 **1.14 m/yr**로 나타나, 기저지형 자료 개선에 따른 모델 성능 향상이 뚜렷하다 (그림 614). 이와 같이 개선된 초기 자료는 지반선 부근 초기 얼음속 발산값도 300 m/yr에서 100 m/yr로 감소시켜 주어, 이후 100년 간 완화를 위한 적분을 수행한 후 산출된 빙하 지표고도를 비교하여 보면 (그림 615) Bedmachine 기저지형 자료를 사용하여 개선된 실험에서 500m 이상 빙하 두께 오차가 감소하였음을 알 수 있다.

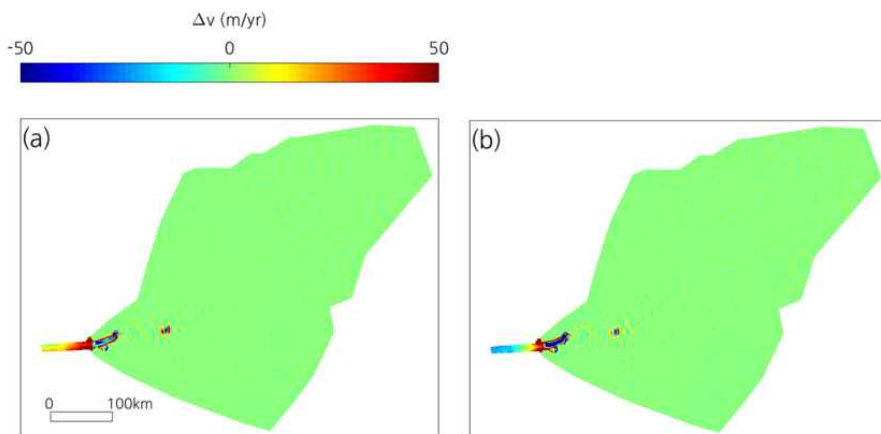


그림 614 Bedmachine(좌)과 Bedmap2(우)를 사용한 실험 역산 결과 모델 영역에서 빙속 면적 가중치 오차값 분포

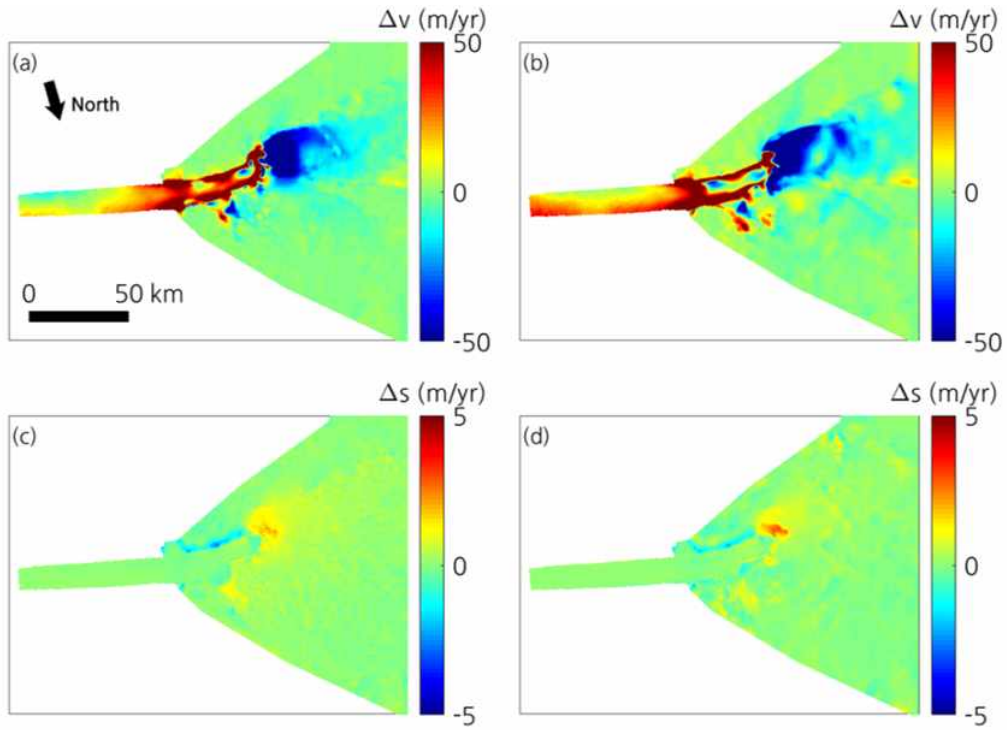


그림 615 Bedmachine(좌)과 Bedmap2(우)를 사용한 실험 역산 결과 모델 영역에서 빙속(위)과 빙하 표면고도(아래) 면적 가중치 오차값 분포

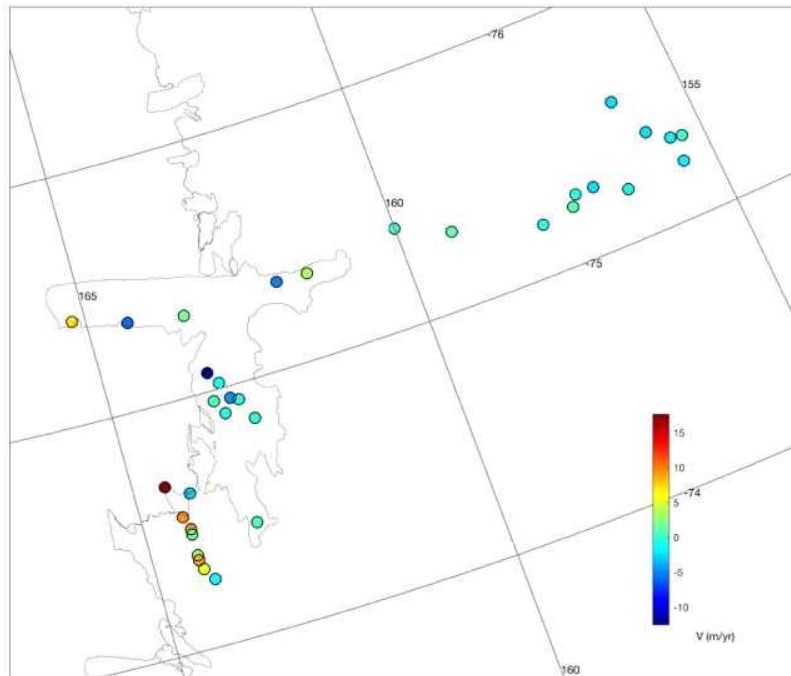


그림 616 GPS 현장 관측 빙하 속도와 인공위성 InSAR 관측 빙하 속도(MEaSURES, Rignot *et al.*, 2017)의 차이 (GPS-InSAR)

초기화, 역산, 그리고 100년 간의 완화 적분을 기반으로 모델을 안정화시킨 후 200년 동안 빙하하부 용융률 및 빙하 말단부(ice front) 위치 등의 모델 강제력을 변화시키지 않는 모델 기준 실험을 수행하였다. 이 때 날려쌓인눈(snow drift) 물리과정을 포함하는 지역기후 모델인 RACMO2.3에서 산출된 표면질량균형값을 위성관측 자료를 현장 관측자료로 보정한 Arthern 표면질량균형값(Arthern *et al.*, 2006)과 비교하기 위하여 두 자료를 각각 모델 강제력으로 처방하였다. 모델영역 평균 표면질량균형값은 RACMO2.3이 5.4 Gton/yr인 반면 Arthern은 20.93 Gton/yr으로 나타나며, 일반적으로 RACMO2 값이 남극 지역 표면질량균형값을 잘 대표하는 것으로 알려져 있다(Lenaerts *et al.*, 2012).

모델 적분 시간에 따른 빙하 이동속도(그림 617) 및 빙하 표면 고도(그림 618)의 RMSE 및 면적 가중치 오차값의 변화를 산출한 결과, RACMO2.3 그리고 Arthern 표면질량균형값을 사용하는 경우 모두 초기 조건에 비해 **빙속은 연간 0.5 m/yr 이내로** 변하며, **빙하의 표면고도는 연간 0.2 m/yr 이내로** 변화하였다. 그리고 Bedmap2를 사용하였을 때보다 Bedmachine을 사용하였을 때 특히 변동성이 큰 지역에서 빙속의 RMSE와 면적 가중치 오차값 모두 연간 **0.01~0.03 m/yr** 감소하는 것으로 나타나, 기저지형 자료 개선에 따른 모델 성능 향상이 뚜렷이 나타남을 알 수 있다. 반면 빙하 지표고도 모의성능은 면적 가중치 오차로 산출하였을 때에만 개선 결과가 나타났다. 수치 모델 정확도는 인공위성 InSAR 기법에 의해 제공되고 있는 실측 빙하 이동속도 자료(MEaSURES, Rignot *et al.*, 2017)를 이용하여 평가하였다. MEaSURES 빙하 이동 속도 자료는 GPS 실측 자료를 이용하여 정확도를 검증된 자료이다. (그림 616) 데이비드 빙하 지역의 경우, InSAR 자료의 정확도가 오차 범위 내에 분포하는 것을 확인할 수 있으며 수치모델 정확도는 GPS 등의 point measurements가 아닌 속도모델과 비교하여 검증하는 것이 타당하기 때문에 빙상동역학 모델 연구에서 일반적으로 활용되는 방법이다.

빙하의 표면고도 변화의 RMSE와 면적 가중치 오차값의 증가 경향을 살펴보면 RACMO2.3보다 Arthern을 사용하였을 때 100년 이후 오차가 급격히 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이는 모델 전체 영역에 대해 표면질량균형값의 평균이 RACMO2.3가 0.04 m/yr인데 반해 Arthern은 0.15 m/yr이므로 Arthern이 빙하에 유입시키는 표면질량균형값이 RACMO2.3보다 많아 유출량보다 유입량이 많아지기 때문에 빙하 표면의 고도가 지속적으로 상승하기 때문으로, 이처럼 시간의 흐름에 따라 RMSE와 면적 가중치 오차가 증가하는 요인이 표면질량균형 강제력에 기인한 것임을 알 수 있다.

200년 간의 적분실험 후 결과를 분석하면 (그림 619) 빙속의 경우 **Bedmachine 기저지형 자료**를 RACMO2.3 표면질량균형값을 함께 사용하였을 때 관측과 가장 유사한 지반선 근처 **최대값의 위치 및 값**을 모의하는 것을 알 수 있다. Bedmap2의 경우 빙속을 과대모의하고 최대값의 위치를 다소 빙설 쪽으로 그릇되게 모의하는 것으로 나타난다. 또한 Bedmachine 기저지형 자료를 사용하였을 때 RACMO2.3 실험의 경우 1.3 Gton/yr의 빙하 질량 감소 및 Arthern 실험의 경우 13.9 Gt/yr의 빙하 질량 증가가 있었으며 이는 각각 0.7 mm의 전지구 해수면 상승 및 7.5 mm의 전지구 해수면 하강에 상응하는 질량 변화이다. Bedmap2를 사용하였을 때에는 RACMO2.3 실험의 경우 1.8 Gton/yr 질량 감소 및 Arthern 실험의 경우 13.4 Gt/yr의 질량 증가가 있었으며, 이는 각각 1.0 mm의 전지구 해수면 상승 및 7.2 mm의 전지구 해수면 하강에 상응하는 질량 변화이다.

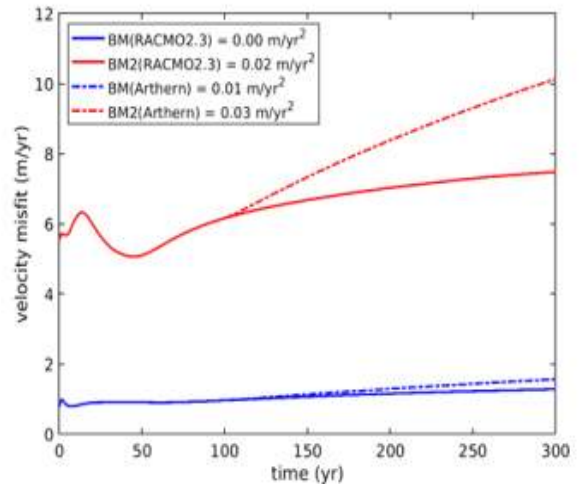
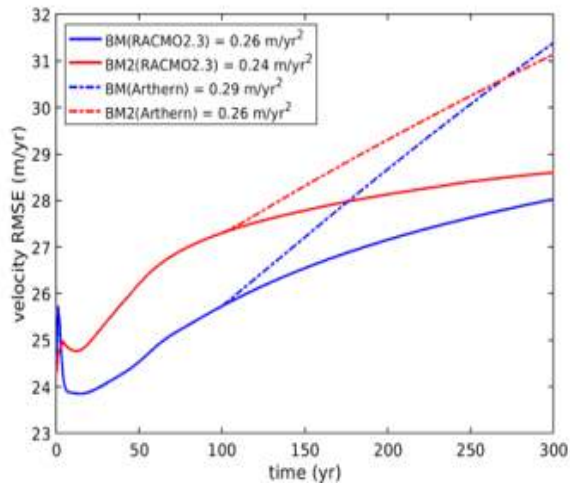


그림 617 빨간색 박스 영역에서 RMSE(좌) 및 면적 가중치 오차값(우)을 적용한 시간에 따른 표면 빙속 변화. 각 선 설명의 숫자는 평균 기울기이며, BM은 BedMachine, BM2은 Bedmap2를 나타냄

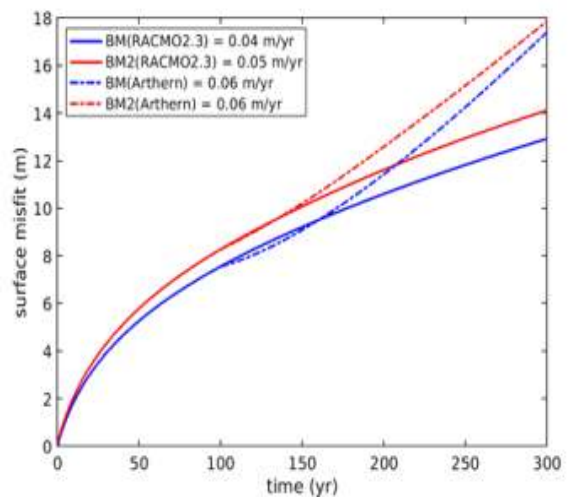
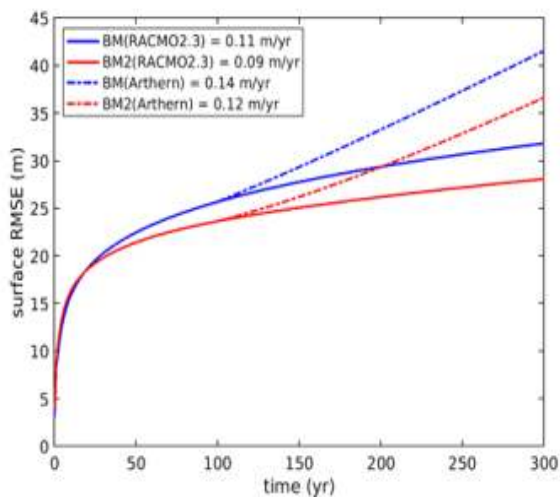


그림 618 모델 전체 영역에서 RMSE(좌) 및 면적 가중치 오차값(우)을 적용한 시간에 따른 빙하 표면고도 변화. 각 선 설명의 숫자는 평균 기울기이며, BM은 BedMachine, BM2은 Bedmap2를 나타냄

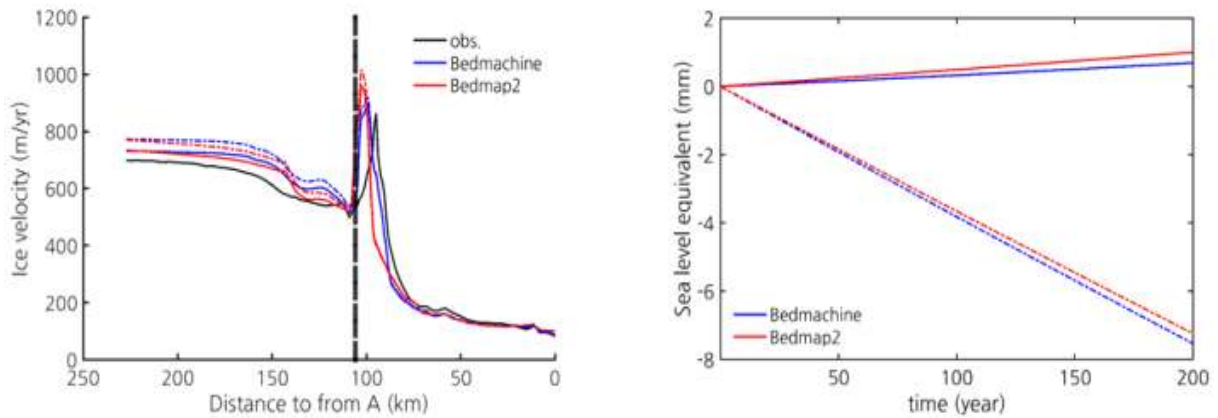


그림 619 200년 기준 실험 결과 산출된 빙속(좌) 및 전지구 해수면 상승값 (우). 검정색은 관측, 파란색은 BedMachine, 붉은색은 Bedmap2를 나타내며, 실선은 RACMO2.3, 점선은 Arthern을 나타냄

(마) 칼빙 및 빙붕하부용융률 강제력 시나리오에 대한 빙상동역학모델 민감도 평가

안정화된 ISSM 빙상동역학 모델을 사용하여 200년 간 이상화된 미래 기후변화 시나리오에 대한 민감도를 평가하고 해수면 상승 예측 결과를 산출하였다(그림 620). 먼저 드라이갈스키 빙설의 지지 역할에 대한 민감도를 평가하기 위하여 칼빙에 의한 빙하 말단부 위치 변동에 대한 여섯 가지 시나리오를 수립하여 빙상동역학 모델 미래변화 실험을 수행하였다. 빙하 말단부가 빙설, 빙설과 지반선 사이 측면 빙하에 맞닿은 지역, 그리고 지반선 부근 협곡으로 둘러싸인 내륙에 위치해 있는 경우를 각각 두 가지 씩 가정하였다. 빙붕하부용융률의 경우 서남극 파인 아일랜드 빙하에서 관측된 100 m/yr (Payne *et al.*, 2007)에 기반하여 기준 실험의 값의 5배를 최대값으로 설정하고 이에 이를 때까지 특정 승수(specific multiplier) β 를 적용하여 β 가 5일 때 75 m/yr 값이 되도록 조정하였다. 이 실험들의 경우 표면질량균형값은 RACMO2.3이 사용되었다.

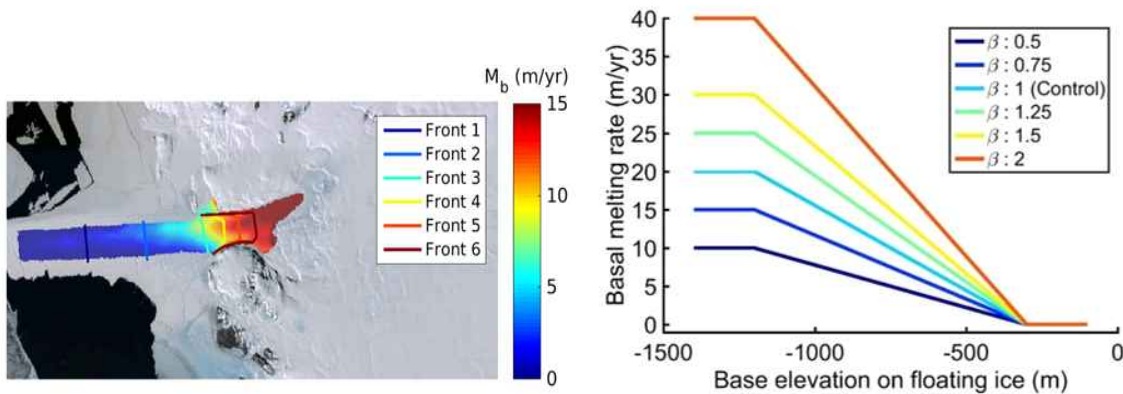


그림 620 모델 강제력으로 처방된 빙하 말단부 위치 변동(좌) 및 빙붕하부용융률 분포(우)

모델에서 사용하는 용융 모수화에서는 일반적으로 역행적 지형을 가정하기 때문에 빙붕하부가

얇아져 기저 고도가 상승하게 되면 용융률이 서서히 감소하게 된다. 따라서 데이비드 빙하와 같이 지반선으로 갈수록 높아지는 기저지형의 빙하에서는 지반선에서의 용융이 실제와 달리 약화되는 결과를 초래할 수 있다. 이와 같은 단점을 보완하기 위해 본 연구에서는 극한 빙붕하부용융률 시나리오를 가정하여 빙붕 두께가 1m 이내로 감소하는 경우 기저지형 고도가 상승하는 지역에서 빠른 빙붕하부용융이 발생하는 사례로 추정하여 빙붕 두께와 무관하게 최대 β 가 10일 때 빙붕하부용융률이 150 m/yr까지 증가하도록 설정하여 강제력 증가에 따른 지반선의 이동 및 빙상의 역학적 변화를 실험하였다. 실험 기간 내 빙붕하부용융률의 시간적 변화는 그림 621에 묘사되었다.

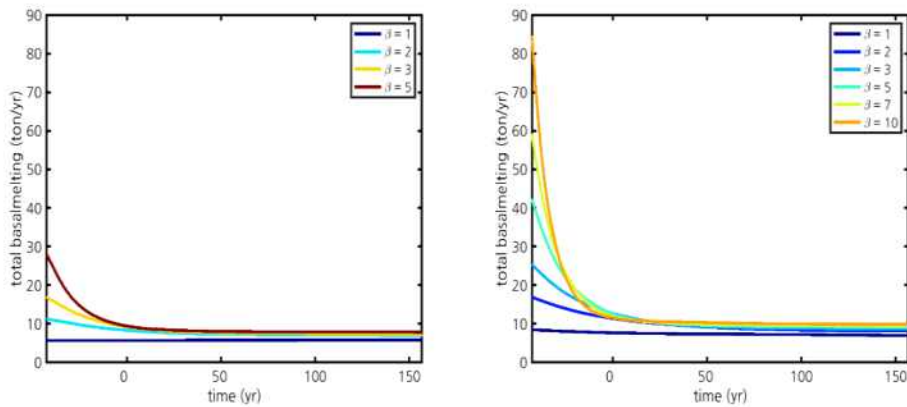


그림 621 모델 강제력으로 처방된 빙붕하부용융률(좌) 및 극한 빙붕하부용융률(우)의 시간에 따른 변화

BedMachine 기저지형 자료를 사용하여 200년 간의 강제력 실험 결과 산출된 빙속 단면도를 보면 (그림 622) 빙하 말단부 위치 변동에 의한 빙속의 변화는 뚜렷이 나타나지 않다가 빙하 말단부가 지반선 부근 협곡 지역까지 후퇴하여야 빙설 지역 빙속의 증가가 나타나는 것으로 모의되었다. 이는 칼빙 강제력에 대한 빙속 변화의 임계점이 존재한다는 것을 보여주는 결과이다. 이는 기존 연구에서 일부 빙설 지형이 역학적으로 빙상 지지 역할을 하지 않으며, 빙하에 둘러싸인 지역에 이르러서야 빙상 역학적 변화에 영향을 미친다는 사실에 부합하는 결과이다 (Serrousi *et al.*, 2014b; Fürst *et al.*, 2016). 빙붕하부용융률의 경우 용융률이 증가할수록 지반선 근처에서의 빙하 이동 속도는 증가하는 반면 빙설의 두께를 감소시키고 더욱 평평하게 만들어 빙설에서의 속도는 감소하는 것으로 나타났다.

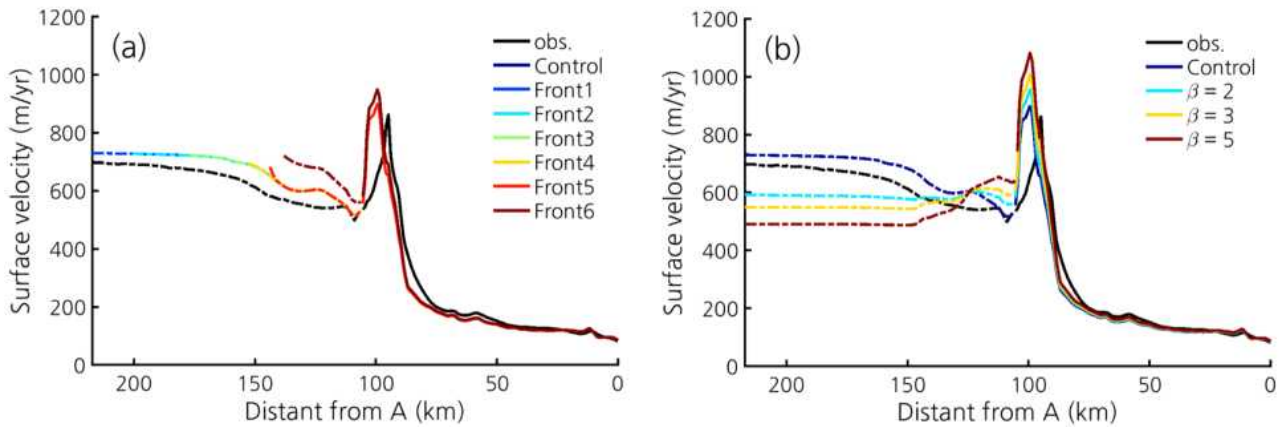


그림 622 200년 간의 빙하 말단부 위치 변동(좌) 및 빙붕하부용융률(우) 강제력 실험 결과 산출된 빙속. 검정색은 관측, 실선은 빙하, 점선은 빙붕에서의 빙속을 나타냄

200년 간의 강제력 실험 결과 산출된 지반선 이동 위치를 보면 (그림 623) 빙하 말단부 위치 변동에 의한 지반선 이동은 거의 나타나고 있지 않으며, 빙붕하부용융률의 경우 극한 사례의 경우 β 가 3 이상일 때 임계점을 가지고 나타나는 것으로 보여진다. 이는 외부 강제력에 의한 빙하의 역학적 변화가 특별한 임계점을 가지고 돌발적으로 발생할 수 있다는 사실을 내포하는 결과이다.



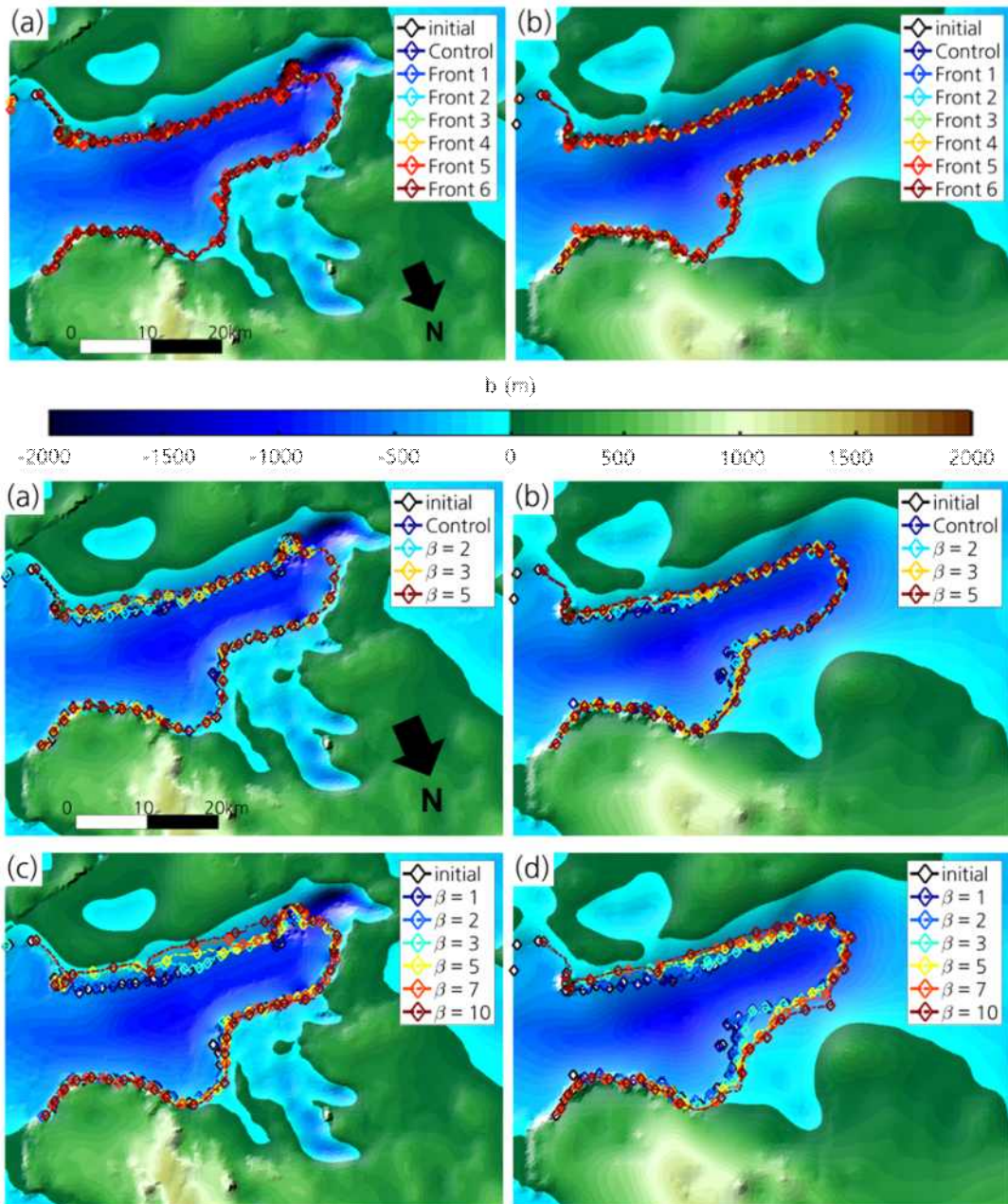


그림 623 200년 간의 빙하 말단부 위치 변동(위) 및 빙붕하부용융률(중간)과 극한 빙붕하부용융률(아래) 강제력 실험 결과 산출된 지반선 이동

(바) 이상화된 강제력 시나리오 기반 산출된 빙권 변동에 따른 해수면 상승 기여도 추정

빙상동역학 모델에서 산출된 얼음의 질량 변화는 전지구 해수면 변동값으로 변환되어 나타날 수 있다. 따라서 해수면 변동에 영향을 미치게 되는 부력 이상의 빙하 질량(VAF, volume above flotation)을 해수면 변동값으로 변환하여 산출한다. 그림 624는 빙하 말단부 위치 변동 및 빙붕하부 용융률 강제력에 대한 200년 미래변화 실험 결과 산출된 해수면 변동값을 보여주고 있다. RACMO2.3 표면질량균형값을 사용하고 다른 강제력을 처방하지 않은 기준실험에서도 이 지역의 빙상 질량 감소와 해수면 상승이 모의되었다. 빙하 말단부 위치 변동 강제력의 경우 빙하 말단부가

지반선 부근 협곡 지역까지 후퇴하는 임계점 이상의 강제력이 존재할 때 해수면 상승이 뚜렷이 나타나는 것으로 보여진다. Bedmachine의 경우 Bedmap2 기저지형 자료를 사용하는 경우보다 해수면 상승값이 작게 나타나는데, 이는 지반선 부근 위치한 기저능의 고도가 Bedmachine 자료에서 500 m 이상 높게 나타나며, 특히 해면고도 이상으로 높기 때문에 빙하의 후퇴를 저지하는 역할로 작용하여 빙하의 후퇴를 더디게 저지하는 것으로 해석할 수 있다. 따라서 **현장 관측자료 기반 개선된 기저지형 자료 활용**으로 인한 **모델 정확도 향상**이 이 지역의 미래변화 시나리오에서 **기후변화 강제력에 의한 해수면 상승이 더욱 서서히 나타나는 방향**으로 작용하였음을 알 수 있다. 빙붕하부용융률 강제력의 경우 강제력 승수에 비례하여 200년 동안 서서히 전지구 해수면이 증가하는 방향으로 작용하고 있으며, 칼빙의 사례와 마찬가지로 Bedmachine의 경우 Bedmap2 기저지형 자료를 사용하는 경우보다 해수면 상승값이 작게 나타난다.

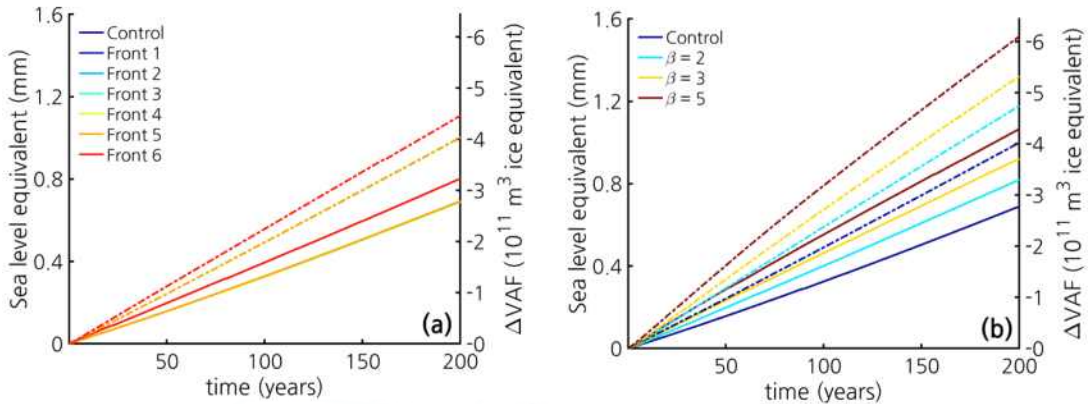


그림 624 빙하 말단부 위치 변동(좌) 및 빙붕하부용융률(우) 강제력에 대한 200년 미래변화 실험 결과 산출된 해수면 변동값. 실선이 Bedmachine, 점선이 Bedmap2 기저지형자료 실험.

(3) IPCC 미래 기후변화 시나리오 적용 빙하-빙설 거동 수치모델링

(가) 연구 방법

IPCC RCP 온실가스 배출 시나리오에 따라 미래 기후변화를 모의한 CMIP5(Couple Model Intercomparison Project 5) 전지구 모델들의 자료를 20세기 기후재현 실험, RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0, 그리고 RCP8.5 시나리오별로 확보하였다. 미래 시나리오는 그림 625와 같이 나타난다. 각 시나리오가 대표하는 사용된 모델 및 시나리오에 따른 앙상블 개수는 표 63과 같다.

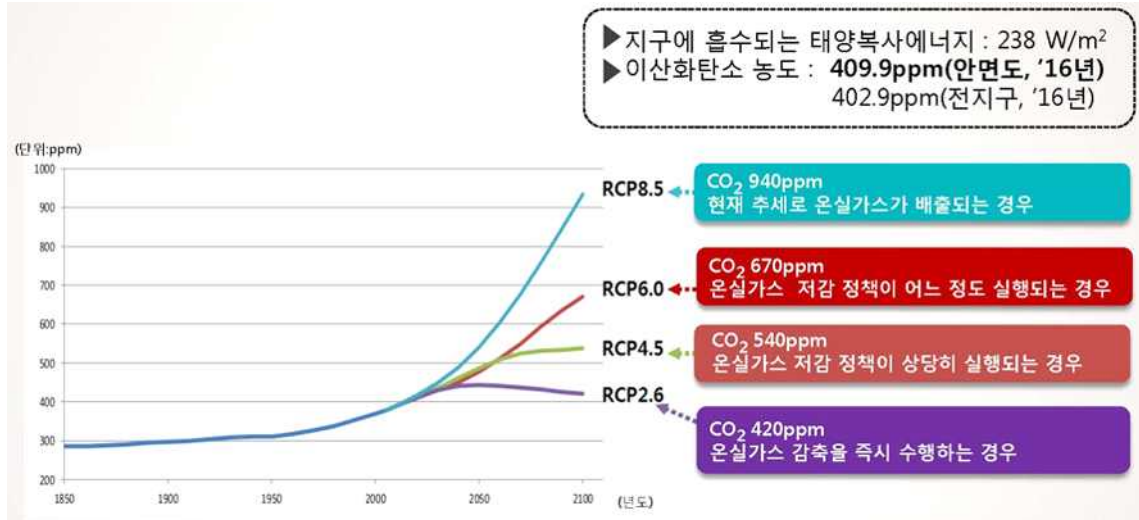


그림 625 IPCC AR5에서 산출한 2100년까지 온실가스 배출 RCP 시나리오. 2100년에 RCP2.6의 경우 전지구 평균 온도를 산업혁명 시기보다 0.9~2.3°C, RCP4.5는 1.7~3.2°C, RCP6.0은 2.0~3.7°C, 그리고 RCP8.5는 3.2~5.4°C 상승시킬 수 있음

표 63 사용된 IPCC CMIP5 전지구 모델 자료

기관	모델	재현실험	RCP2.6	RCP4.5	RCP6.0	RCP8.5
CCCma	CCCma.CanESM2	5	1	1	0	1
CSIRO-QCCCE	CSIRO-QCCCE.CSIRO-Mk3-6-0	10	10	10	10	10
IPSL	IPSL.IPSL-CM5A-LR	6	4	4	1	4
IPSL	IPSL.IPSL-CM5A-MR	3	1	1	1	1
MIROC	MIROC.MIROC-ESM	3	1	1	1	1
MIROC	MIROC.MIROC-ESM-CHEM	1	1	1	1	1
MIROC	MIROC.MIROC5	5	5	5	5	5
MPI-M	MPI-M.MPI-ESM-LR	3	3	3	0	3
MPI-M	MPI-M.MPI-ESM-MR	3	1	3	0	1
MRI	MRI.MRI-CGCM3	5	1	1	1	1
NASA-GISS	NASA-GISS.GISS-E2-H	18	3	16	3	5
NASA-GISS	NASA-GISS.GISS-E2-R	18	3	17	3	5
NCAR	NCAR.CCSM4	3	1	1	1	1
NIMR-KMA	NIMR-KMA.HadGEM2-AO	1	1	1	1	1
NOAA-GFDL	NOAA-GFDL.GFDL-CM3	5	1	3	1	1
NOAA-GFDL	NOAA-GFDL.GFDL-ESM2G	1	1	1	1	1
NSF-DOE-NCAR	NSF-DOE-NCAR.CESM1-CAM5	1	1	1	1	1
	계	91	39	70	31	43

수집된 각 모델 자료의 모델 영역에서의 강수량을 표면질량균형값으로 치환하여 모델 강제력으로 처방하였다. 1950~2006년까지 현재기후 재현실험에서 산출된 표면질량균형값을 사용하였으며, 이후 2006년부터 2106년 (일부 모델은 2306년)까지는 각 시나리오에서 산출된 표면질량균형값을 사용하였다. 사용된 CMIP5 모델들은 전지구 모델인 관계로 해상도가 비교적 낮으며 모델 간 성능 차 또한 크게 나타나게 되며, 그 중 고위도 강설량의 모의 정확도는 일반적으로 매우 낮은 것으로 알려져 있다. 특히 남극의 극히 일부를 포함하는 빙상동역학 모델 영역에서의 강설 정확도 또한 높지 않아, 현재기후 재현실험에서 모델이 모의하는 표면질량균형값을 비교적 고해상도의 지역기후모델에서 산출된 값과 비교하여 보면 그 차가 매우 크며 모델 혹은 앙상블 멤버 사이의 모의 성능 또한 매우 다르게 나타난다는 것을 알 수 있다.

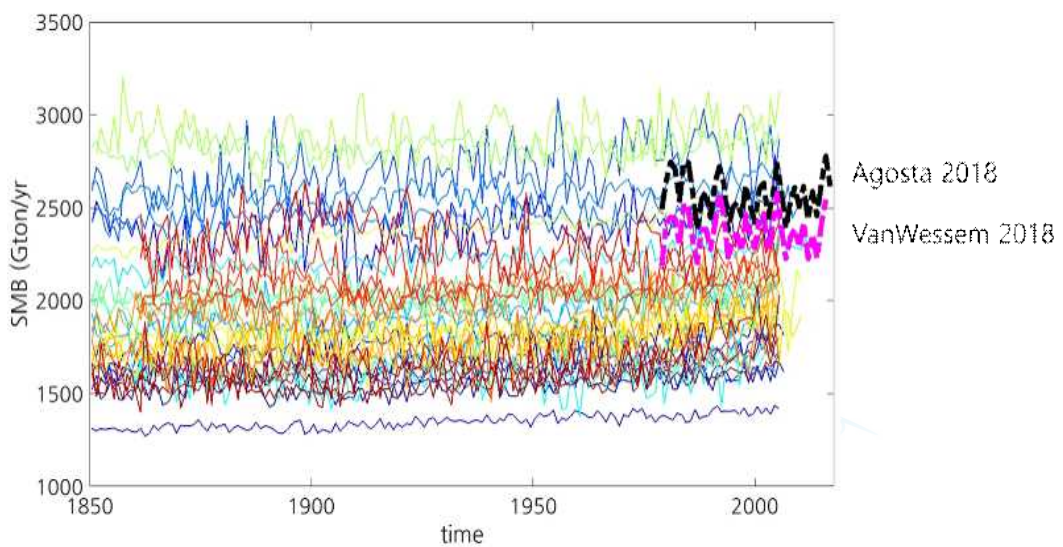


그림 626 빙상동역학 모델 영역인 북빅토리아랜드 데이비드빙하-드라이칼스키 빙설 지역에서 IPCC CMIP5 현재기후 재현실험 결과 산출된 표면질량균형값 및 MAR(Agosta, 2018)과 RACMO2.3(VanWessem, 2018) 지역기후모델에서 산출된 표면질량균형값

(나) IPCC RCP 시나리오 기반 산출된 빙권 변동에 따른 해수면 상승 기여도 추정

ISSM 빙상동역학 모델을 이용하여 동남극 북빅토리아랜드 데이비드 빙하-드라이칼스키 빙설 지역에서 IPCC RCP 시나리오 기반 산출된 표면균형질량값을 기후 강제력으로 처방한 미래 예측 실험을 수행하였다. 그림 627은 2300년까지 RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0, 그리고 RCP8.5 시나리오 예측 결과 산출된 빙하 질량 변동값에서 변환된 해수면 변동값을 보여주고 있다. 다중모델 상호비교 결과 모델 간 앙상블 민감도는 다소 넓게 나타나지만, 대부분의 실험에서 온실가스 증가 속도 및 증가량과는 무관하게 이 지역에서는 빙하 질량 증가로 인한 전지구 해수면 하강이 우세할 것으로 예측되었다. 이는 이 지역의 빙하의 안정성이 매우 커서 21세기 내의 지구 온난화 강제력에도 불구하고 빙하 질량 손실이 뚜렷이 나타나지 않는다는 것을 의미한다. 이 지역 지반선에 위치한 해면보다 높은 기저능의 존재가 빙하의 안정성에 큰 영향을 미치고 있다고 해석할 수 있다.

각 시나리오별 다중모델 앙상블 평균값을 비교한 그림 628를 보면, 2100년까지 시나리오 간 해수면 변동값의 차는 크지 않지만 RCP6.0 시나리오에서 가장 작은 빙상 질량 증가 및 해수면 하강이 나타나고 RCP8.5 시나리오에서 가장 큰 빙상 질량 증가 및 해수면 하강이 나타난다는 것을 알 수 있다. 다만 시나리오별 모델 및 앙상블 개수가 다르기 때문에 각 시나리오별 특성을 일반화하는 데에는 한계가 있다고 할 수 있겠다. 또한 CMIP5 전지구 모델들의 경우 빙상동역학 모델이 전지구 모델에 결합되어 있지 않기 때문에 남극 지역 기후모의 성능에 한계가 있다는 사실 또한 이 결과를 해석하는 데 고려해야 할 점이다.

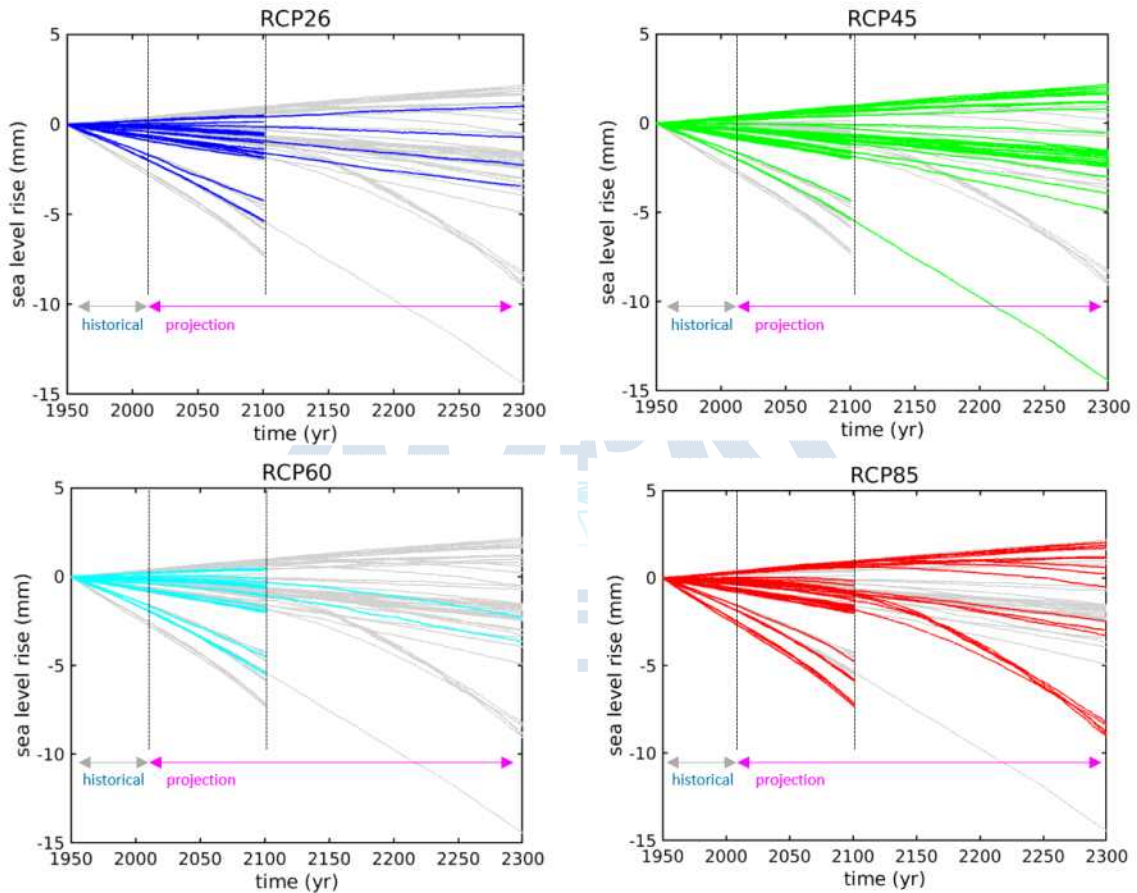


그림 627 빙상동역학 모델 영역인 북빅토리아랜드 데이비드빙하-드라이칼스키 빙설 지역에서 2300년까지 IPCC RCP 시나리오 강제력 실험 결과 예측된 해수면 변동값

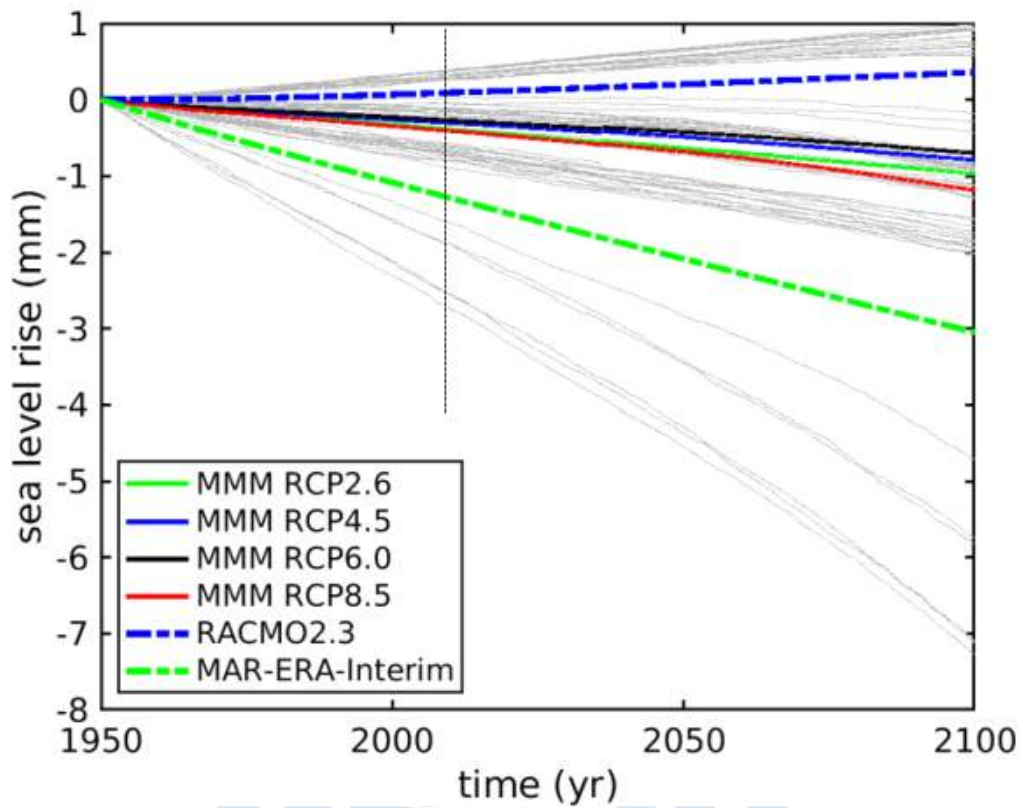


그림 628 빙상동역학 모델 영역인 북빅토리아랜드 데이비드빙하-드라이칼스키 빙설 지역에서 2100년까지 IPCC RCP 시나리오 강제력 실험 결과 예측된 다중모델 앙상블 평균 해수면 변동값

5. 기술적/경제적 성과

가. 기술적성과

(1) 지식재산권

본 과제에서 도출된 지식재산권 총 3건이며, 모두 국내에서 특허 출원 및 등록되었다.

번호	지식재산권 등 명칭 (건별 각각 기재)	국명	출원				등록			
			출원인	출원일	출원 번호	등록 번호*	등록인	등록일	등록 번호	등록 번호*
1	전자기 반응 분석을 통한 지하관료 위치 및 매설 깊이 분석 시스템	대한 민국	(주) 지오록 스	2014/11 /20	10-201 4 -01625 65		(주) 지오록 스	2015/10 /26	10-156 4718	
2	극지환경용 지구물리탐사 전극 장치	대한 민국	한국해 양과학 기술원	2017/04 /14	10-201 7-0048 601	105876	한국해 양과학 기술원	2018/03 /15	10-184 0782	
3	극지 환경의 지구물리탐사를 위한 전극 시스템, 전극 및 전극의 설치, 회수 장치	대한 민국	한국해 양과학 기술원	2019/04 /01	10-201 9-0038 057					

(2) 관측 및 분석

- 극지의 지하 지질구조 연구뿐만 아니라 극지 자원개발 응용할 수 있는 극지 환경용 MT 탐사 기술 및 장비 개발을 통해 지질·환경적인 한계를 해결할 수 있다.

- 극지 환경 MT 모니터링용 전극 개발을 통해 측정 한계를 극복하고, 기술특허 등록을 함으로써, 국산화 기술력 강화하고 선진국의 외산 장비 수입 대체 효과가 기대된다.

(3) 예측 기술

- 남극 지역 빙상의 미래 변화 예측 기반 전지구 해수면 변동 예측값을 산출함으로써, 해수면 상승에 따른 국내 연안 침수재해도 작성 원천자료 제공 등 연안지역 재해대응 정책 수립의 과학적 근거를 제공할 수 있다.

- 최신 현장 관측자료 기반 빙상동역학 모델 성능을 개선함으로써 극지역 용빙에 따른 전지구 해수면 상승 예측성 제고. 따라서 극지역 용빙에 따른 해수면 상승에 의해 발생하는 연안침수 등 대형재난 대응에 필요한 예측기술 확보로 피해예방 및 비용 절감 가능하다.

(4) 모델링

- 동남극 빅토리아랜드 데이비드 빙하-드라이갈스키 빙설 지역의 빙하 흐름을 역학적으로 재현·측할 수 있는 빙상동역학 모델 시스템을 구축함으로써, 이를 활용하여 향후 빙상관련 물리기작 이해, 관측자료 검증, 모델의 예측성 증진, 다양한 과거 및 미래변화 시나리오 산출 등 다양한 연구로

의 확장성 확보할 수 있다.

- 빙상동역학 모델 개선으로 남극 및 전지구 예측 정확도 향상에 기여함으로써 IPCC 등 기후변화 관련 국제회의 어젠다 개발 및 기후변화 재해 문제에 직면한 인류 공동의 현안 해결 및 신기후체제 선제적 대응 방안 마련 가능할 것이다.

나. 경제적성과

(1) 기초연구의 경제성 평가 (한국환경경제학회, 2019)

본 과제는 기초연구인 만큼 다른 일반적인 국가 연구개발 사업에서 경제성을 평가하는 방식으로 평가하는 것은 한계가 있어, 다른 방식으로 경제성을 평가하였다.

- 일반적인 국가 연구개발 사업에서는 시제품 제작, 기술 이전, 사업화 투자실적, 사업화, 매출, 고용 창출, 비용절감등을 통해 경제적 파급효과를 평가하였다.

- 본 과제와 같은 기초연구에서는 구체적으로 실현된 경제효과보다는 본 과제를 통해 얻을 수 있는 사회적 편익에 대한 평가를 통해 경제성을 파악하였다.

- 현재까지 기초연구분야의 연구개발 사업의 경제적 가치를 평가하기 위한 표준화된 평가방법은 존재하지 않으므로, 기초연구분야의 R&D에 내제된 불확실성과 성과측정의 어려움에 기인하여 평가하였다.

- 이러한 현실은 예비타당성조사와 같이 사전적으로 R&D 부문 사업의 편익을 추정하려는 시도가 매우 큰 제약요안에 놓여 있으며, 경제적 편익추정 방법의 채택과 적용 시에도 신중을 기할 필요가 있음.

- 본 평가에서는 지난번 극지연구소에서 수행한 한국환경경제학회(2018)의 연구결과⁶³⁾를 인용하여, 본 과제의 경제성을 평가하고자 하였다.

* 한국환경경제학회(2018) 보고서는 극지빙상·해수면 변동 관측 및 예측 체계 구축 연구를 수행할 경우 예상되는 사회적 편익을 추정하였다.

* 사회적 편익을 추정하기 위한 방법론은 진술선호접근법 중 하나인 설문조사를 기반으로 한 선택실험법(CE, Choice Experiment)를 활용하였다.

(2) 경제성 평가 결과 (한국환경경제학회 성과평가 보고서, 강희찬 2019)

- 극지 빙상·해수면 변동 관측 및 예측 체계 구축을 위한 연구사업으로 인한 연간 사회적 편익은 60,647 백만 원으로 추정된다.

- ‘국내 해안지역 침수사고 예측력 제고 편익’은 2,890백만원, ‘국내외 인식 제고와 더 나은 UN 기후협상 유도 편익’은 9,519백만원, ‘세계 최고 수준 연구 성과 도출과 국가위상 제고 편익’은 22,860백만원,

63) 한국환경경제학회(2018), 극지 빙상·해수면 변동 관측 및 예측 체계 구축을 위한 연구사업의 경제적 타당성 분석.

마지막으로 ‘미지의 세계에 대한 지적호기심 충족 편익’은 25,378백만원으로 추정된다.

(단위: 백만원/년)

표 64 경제성 추정치와 세부 내용

사회적 편익 구분	추정량
국내 해안지역 침수사고 예측력 제고 편익	2,890
국내외 인식 제고와 더 나은 UN 기후협상 유도 편익	9,519
세계 최고 수준 연구성과 도출을 통한 국가 위상 제고 편익	22,860
미지의 세계에 대한 지적 호기심 충족 편익	25,378
합계	60,647



제4장. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

1. 목표 달성도

가. 정량적 목표 달성도

(1) 최종 목표

(가) 빙권변화 진단 관련 관측자료 생산 및 자료 DB화

- ▷ 지진관측: 관측소 25개소, 연평균 자료회수율 70% 이상 :
25개소 (육상 19개소, 해양 6개소), 평균 자료회수율 81.47%
- ▷ GPS 관측: 관측소 20개소, 연평균 자료회수율 80% 이상 :
38개소, 평균 자료회수율 82.82%
- ▷ 기상관측: 관측소 7개소, 연평균 자료회수율 90% 이상 :
16개소 (AMIGOS 6개소, 지표온도관측 10개소), 평균 자료회수율 73.34%
- ▷ 해양물리자료획득: 해양계류 3개소, 연평균 자료회수율 80% 이상
5개소, 평균자료회수율 93.27%
- ▷ KPDC(극지자료센터 <http://kpdc.kopri.re.kr>) 활용 Metadata 제공 : 메타데이터

공개

- ▷ 관측활동보고 뉴스레터(남극현장연구활동보고서) 발간: 2015 ~ 2019년 총 5부 발간

(나) 빙권변화 원인 규명/빙권 거동 수치예측 모델 개발 및 검증

- ▷ 예측 수치모델 검증/정밀도: 관측 값과 비교 오차, 빙하 두께 변동 연 $\pm 1\text{m}$ 이내, 빙하 이동속도 연 $\pm 5\text{m}$ 이내 : 기저지형자료 개선에 따른 빙상동역학모델 정확도 향상 시킨 모델링 수행 빙속은 연간 0.5 m/yr 이내, 빙하의 표면고도 연간 0.2 m/yr 이내로 변하는 결과 도출 (최종보고서 pg607~611)
- ▷ IPCC RCP 시나리오 적용한 수치모델 예측 결과 산출을 통한 미래 해수면 변동 추정 (최종보고서 내 포함) : “IPCC 미래 기후변화 시나리오 적용 빙하-빙설 거동 수치모델링“파트에서 서술 (최종보고서 pg.616~620)
- ▷ 빙붕-해양 상호관계 수치모델링을 통한 난센빙붕 붕괴 재현, 원인규명 및 향후 거동 예측 : 난센 빙붕 집중 탐사와 연구를 통해 붕괴 재현 및 원인규명 관련 논문 2편 발간 (Bell *et al.*, 2016; Dow *et al.*, 2018), 1편 Accept (Dziak *et al.*, 2019)
- ▷ 관측/원인규명 분야 SCI/SCIE 논문 연평균 5.5편 게재, 수치예측 모델 분야 연구기간 중 논문 2편 게재, 연구기간 중 mrnIF 70이상 논문 주저자 15편
 - SCI/SCIE 논문 5년간 28편, 연 평균 5.6편
 - 수치예측 논문 3편 : Craig *et al.*, 2017 (해양 모델링), Dow *et al.*, 2018 (빙붕 거동 모델링) Na *et al.*, 2018 (유체 난류 모델링)
 - mrnIF 70이상 논문 주저자 11편 (mrnIF 70이상 총 논문 19편)

(2) 연차별 목표 달성도

구분	성과목표	성과지표	목표치	가중치 (%)	설정근거	평가기준 (측정산식 등)	달성치
최종 목표	관측자료 획득	지진관측	70% 이상	10		자료회수율	81.47 / 100 %
		GPS 관측	80% 이상	10		자료회수율	82.82 / 100 %
		기상자료	90% 이상	10		자료회수율	73.34 / 81 %
		해양물리자료	80% 이상	10		자료회수율	93.27 / 100 %
	관측자료 DB화	지진관측	600 Gb 이상	5		확보자료량	792 Gb
		GPS 관측	5 Gb 이상	5		확보자료량	29.99 Gb
		기상자료	5 Gb 이상	5		확보자료량	5.15 Gb
		해양물리자료	12건	5		확보건수	22 건
	탐사기술 확보 ⁶⁴⁾	빙권 MT탐사 등 기술확보	2건	10		기술개발여부	출원3건, 등록 2건/ 100%
	논문발표 (SCI+SCIE/비SCI)		28/15	20		게재건수	28/11, 100%/73.3%
학회발표 (국내/국제)		21/23	5		발표건수	59/31/ 100%	
홍보활동		32 건	5		홍보건수	51/ 100%	
1차년도 (2014년)	빙권변화 모니터링 관측소 구축	9개소 (지진: 1, GPS: 4, AMIGOS: 2, Balog: 2)		50		관측소 구축 여부	100%
	논문발표 (SCI+SCIE/비SCI)		6/3	40		게재건수	50%
	학회발표 (국내/국제)		5/3	5		발표건수	100%
	홍보활동		5 건	5		홍보건수	5건, 100%
2차년도 (2015년)	관측자료 획득	지진관측	70% 이상	12		자료회수율/달성률	89%/100%
		GPS 관측	80% 이상	12		자료회수율/달성률	99%/100%
		기상자료	90% 이상	12		자료회수율/달성률	91%/100%
		해양물리자료	80% 이상	12		자료회수율/달성률	99%/100%
	논문발표 (SCI+SCIE/비SCI)		6/3	35		게재건수/달성률	4/3(36%/60%)
	학회발표 (국내/국제)		5/7	7		발표건수/달성률	6/10
홍보활동		7 건	10		홍보건수/달성률	9 건, 100%	
3차년도	관측자료 획득	지진관측	70% 이상	7.5		자료회수율 / 달성률	78.6% / 100%

(2016년)		GPS 관측	80% 이상	7.5		자료회수율 / 달성률	75.0% / 93.8%
		기상자료	90% 이상	7.5		자료회수율 / 달성률	80.0% / 88.9%
		해양물리자료	80% 이상	7.5		자료회수율 / 달성률	80.0% / 100%
		탐사기술 확보	1건	10		기술개발여부	특허출원 1건
		논문발표 (SCI+SCIE/비SCI)	6/3	40		게재건수 - mrnIF 70이상 3편 - SCI/SCIE 논문 연평균 5.5편	10/1 (mrnIF 70 이상 4편)
		학회발표 (국내/국제)	6/6	10		발표건수	16/8, 100%
	홍보활동	10 건	10		홍보건수 (관측망홍보 포함)	12	
4차년도 (2017년)	관측자료 획득	지진관측	70% 이상	5		자료회수율 / 달성률	83.4% / 100%
		GPS 관측	80% 이상	5		자료회수율 / 달성률	74.44% / 93%
		기상자료	90% 이상	5		자료회수율 / 달성률	30.62% / 34%
		해양계류자료	80% 이상	5		자료회수율 / 달성률	100% / 100%
		CTD 자료	10점점 이상	5		정점수 / 달성률	42 / 100%
	탐사기술 확보	1건	10		기술개발여부	특허 등록 1건	
	논문발표 (SCI+SCIE/비SCI)	5/3	45		게재건수 - mrnIF 70이상 3편 - 관측자료 활용 논문 발표 여부확인	5/3 -mrnIF 70 이상 4편 -관측자료 활용논문 1편	
	학회발표 (국내/국제)	5/5	10		발표건수	9/6	
	홍보활동	10 건	10		홍보건수	12	
5차년도 (2018년)	관측자료 획득	지진관측	70% 이상	7		자료회수율	74.88%
		GPS 관측	80% 이상	7		자료회수율	75 %
		기상자료	90% 이상	7		자료회수율	54 %
		해양물리자료	80% 이상	7		자료회수율	100%
		CTD 자료	10점점 이상	7		정점수	64 정 점
	ApRES(빙봉두께) 관측	장기1/단기9	7		측점수	100%(1/9)	
관측자료 DB화	지진관측	600 Gb 이상	5		확보자료량	792 Gb / 100%	

	GPS 관측	5 Gb 이상	5		확보자료량	29.78 Gb / 100%
	기상자료	5 Gb 이상	5		확보자료량	4.51 Gb/ 90%
	해양물리자료	12건	5		확보건수	22건/100%
	탐사기술 확보	1건	5		기술개발여부	특허출원 1건
	논문발표 (SCI+SCIE/비SCI)	6/3	20		게재건수 (mrnIF 70이상 3편, 관측자료 활용 논문발표 1건 이상)	5/2, (83%/ 66%) (mrnIF70 이상 5편, 관측자료 활용 논문 1편)
	학회발표 (국내/국제)	5/5	5		발표건수	18/5, 100%
	홍보활동	10 건	8		홍보건수 (관측자료 DB 홍보 1건 이상)	11 (해양학회 관측자료 홍보 1건)

(3) 과학적 성과

(가) 관측 자료별 DB화 목표 달성 현황

No	Metadata ID	Title	URL	달성치	
지 진 관 측	1	KOPRI-KP DC-000005 98	Seismic data collected from KPSN at David Glacier and Terra Nova Bay area in 2015	https://dx.doi.org/doi:10.22663/KOPRI-KPDC-00000598.1	139 Gb
	2	KOPRI-KP DC-000011 61	KPSN Seismic Data at Victoria Land, Antarctic 2016	https://dx.doi.org/doi:10.22663/KOPRI-KPDC-00001161.2	159 Gb
	3	KOPRI-KP DC-000011 62	KPSN Seismic Data at Victoria Land, Antarctic 2017	https://dx.doi.org/doi:10.22663/KOPRI-KPDC-00001162.1	85 Gb
	4	KOPRI-KP DC-000011 69	KPSN Seismic Data at Victoria Land, Antarctic 2018	https://dx.doi.org/doi:10.22663/KOPRI-KPDC-00001169.5	148 Gb
	5	KOPRI-KP DC-000007 50	Hydroacoustic data in Terra Nova Bay, 2016	https://dx.doi.org/doi:10.22663/KOPRI-KPDC-00000750.2	261 Gb
합 계				792 Gb	
GP S 관 측	1	KOPRI-KP DC-000006 00	Ice sheet monitoring GPS data at David Glacier in 2015	https://kpsc.kopri.re.kr/search/88703613-be03-4c29-8f6e-2188e15f9e9f	817 Mb
	2	KOPRI-KP	Ice sheet monitoring GPS data	https://dx.doi.org/doi:10.22663	14.84

	DC-000007 47	around the Jang Bogo Station in 2016	/KOPRI-KPDC-00000747.1	Gb	
3	KOPRI-KP DC-000009 01	Ice sheet monitoring GPS data around the Jang Bogo Station in 2017	https://dx.doi.org/doi:10.22663 /KOPRI-KPDC-00000901.1	2.36 Gb	
4	KOPRI-KP DC-000011 75	Ice sheet monitoring GPS data around the Jang Bogo Station in 2018	https://dx.doi.org/doi:10.22663 /KOPRI-KPDC-00001175.3	11.98 Gb	
합 계				29.78 Gb	
기 상 관 측	1	KOPRI-KP DC-000006 02	Ice sheet monitoring system (AMIGOS) data at Drygalski Ice Tongue, Nansen Ice Sheet, and Campbell Glacier in 2015	https://dx.doi.org/doi:10.22663 /KOPRI-KPDC-00000602.1	1.22 Gb
	2	KOPRI-KP DC-000007 48	Ice sheet monitoring system (AMIGOS) data at Drygalski Ice tongue, Nansen Ice Sheet, and Campbell Glacier in 2016	https://dx.doi.org/doi:10.22663 /KOPRI-KPDC-00000748.1	2.34 Gb
	3	KOPRI-KP DC-000009 02	Ice Sheet monitoring system(AMIGOS) data at Drygalski Ice tongue, Nansen Ice Sheet, and Campbell Glacier in 2017	https://dx.doi.org/doi:10.22663 /KOPRI-KPDC-00000902.1	994 Mb
	4	KOPRI-KP DC-000011 74	Ice Sheet monitoring system(AMIGOS) data at Drygalski Ice tongue, Nansen Ice Sheet, and Campbell Glacier in 2018	https://dx.doi.org/doi:10.22663 /KOPRI-KPDC-00001174.3	342Mb
	5	KOPRI-KP DC-000011 73	Surface temperature, Himidity, Pressure at the GPS stations around Jang Bogo Station	https://dx.doi.org/doi:10.22663 /KOPRI-KPDC-00001173.3	259Mb
	합 계				5.15 Gb
해 양 물 리 자 료	1	KOPRI-KP DC-000010 60	NIWA oceanographic mooring data in the Drygalski Ice Tongue North 2015	https://dx.doi.org/doi:10.22663 /KOPRI-KPDC-00001060.1	1건
	2	KOPRI-KP DC-000007 49	NIWA oceanographic mooring data in the Drygalski Ice Tongue North 2016	https://dx.doi.org/doi:10.22663 /KOPRI-KPDC-00000749.1	1건
	3	KOPRI-KP DC-000009 05	LDEO oceanographic mooring data 2017	https://dx.doi.org/doi:10.22663 /KOPRI-KPDC-00000905.1	1건
	4	KOPRI-KP DC-000008 97	NIWA oceanographic mooring data in the Drygalski Ice Tongue South 2017	https://dx.doi.org/doi:10.22663 /KOPRI-KPDC-00000897.1	1건

5	KOPRI-KP DC-000008 98	NIWA oceanographic mooring data in the Drygalski Ice Tongue North 2017	https://dx.doi.org/doi:10.22663/KOPRI-KPDC-00000898.1	1건
6	KOPRI-KP DC-000009 06	NIWA oceanographic deep mooring data in the Drygalski Ice Tongue 2017	https://dx.doi.org/doi:10.22663/KOPRI-KPDC-00000906.1	1건
7	KOPRI-KP DC-000011 66	NIWA oceanographic mooring data in the Drygalski Ice Tongue North 2018	https://dx.doi.org/doi:10.22663/KOPRI-KPDC-00001166.1	1건
8	KOPRI-KP DC-000011 67	NIWA oceanographic deep mooring data in the Drygalski Ice Tongue 2018	https://dx.doi.org/doi:10.22663/KOPRI-KPDC-00001167.1	1건
9	KOPRI-KP DC-000011 68	NIWA oceanographic deep mooring data in the Drygalski Basin (deep trough) 2018	https://dx.doi.org/doi:10.22663/KOPRI-KPDC-00001168.1	1건
10	KOPRI-KP DC-000007 50	Hydroacoustic data in Terra Nova Bay, 2016	https://dx.doi.org/doi:10.22663/KOPRI-KPDC-00000750.2	3건
11	KOPRI-KP DC-000008 99	Hydroacoustic data in Terra Nova Bay, 2017	https://dx.doi.org/doi:10.22663/KOPRI-KPDC-00000899.3	6건
12	KOPRI-KP DC-000011 71	Hydroacoustic data in Terra Nova Bay, 2018	https://dx.doi.org/doi:10.22663/KOPRI-KPDC-00001171.1	4건
합 계				22건

극지연구소에서 운영하는 극지지진관측망은 국제디지털지진관측망 (International Federation of Digital Seismograph Network; FDSN)에 등록됨 (doi:10.7914/SN/KP)

(나) 극지정보 데이터센터에 등록된 관측자료 목록

	No.	Metadata ID	Title	URL
1차년도(PM 14020)	1	KOPRI-KPDC-0001062	CTD profiles observed in the Terra Nova Bay, Ross Sea, in December, 2014 (ANA05A)	https://dx.doi.org/doi:10.22663/KOPRI-KPDC-0001062.1
	2	KOPRI-KPDC-0001064	LADCP data observed in the Terra Nova Bay, Ross Sea, in December, 2014 (ANA05A)	https://dx.doi.org/doi:10.22663/KOPRI-KPDC-0001064.1
2차년도(PM 15020)	3	KOPRI-KPDC-0001060	NIWA oceanographic mooring data in the Drygalski Ice Tongue North 2015	https://dx.doi.org/doi:10.22663/KOPRI-KPDC-0001060.1
	4	KOPRI-KPDC-0	LADCP data observed in the Terra	https://dx.doi.org/doi:10.22663/

		0001061	Nova Bay, Ross Sea, in December, 2015 (ANA06A)	KOPRI-KPDC-00001061.1
	5	KOPRI-KPDC-0000601	Depth profiles of temperature and salinity in the Ross Sea, Antarctica, in December 2015	https://dx.doi.org/doi:10.22663/KOPRI-KPDC-0000601.1
	6	KOPRI-KPDC-0000600	Ice sheet monitoring GPS data at David Glacier in 2015	https://dx.doi.org/doi:10.22663/KOPRI-KPDC-0000600.1
	7	KOPRI-KPDC-0000599	Superconducting gravimeter data at Jang Bogo Station in the installation stage	https://dx.doi.org/doi:10.22663/KOPRI-KPDC-0000599.1
	8	KOPRI-KPDC-0000598	Seismic data collected from KPSN at David Glacier and Terra Nova Bay area in 2015	https://dx.doi.org/doi:10.22663/KOPRI-KPDC-0000598.1
	9	KOPRI-KPDC-0000602	Ice sheet monitoring system (AMIGOS) data at Drygalski Ice Tongue, Nansen Ice Sheet, and Campbell Glacier in 2015	https://dx.doi.org/doi:10.22663/KOPRI-KPDC-0000602.1
3차년 도 (PM16 020)	10	KOPRI-KPDC-00001161	KPSN Seismic Data at Victoria Land, Antarctic 2016	https://dx.doi.org/doi:10.22663/KOPRI-KPDC-00001161.2
	11	KOPRI-KPDC-0000750	Hydroacoustic data in Terra Nova Bay, 2016	https://dx.doi.org/doi:10.22663/KOPRI-KPDC-0000750.2
	12	KOPRI-KPDC-00001063	CTD profiles observed in the Terra Nova Bay, Ross Sea, in January, 2017 (ANA07C)	https://dx.doi.org/doi:10.22663/KOPRI-KPDC-00001063.1
	13	KOPRI-KPDC-00001065	LADCP data observed in the Terra Nova Bay, Ross Sea, in January, 2017 (ANA07C)	https://dx.doi.org/doi:10.22663/KOPRI-KPDC-00001065.1
	14	KOPRI-KPDC-0000749	NIWA oceanographic mooring data in the Drygalski Ice Tongue North 2016	https://dx.doi.org/doi:10.22663/KOPRI-KPDC-0000749.1
	15	KOPRI-KPDC-0000748	Ice sheet monitoring system (AMIGOS) data at Drygalski Ice tongue, Nansen Ice Sheet, and Campbell Glacier in 2016	https://dx.doi.org/doi:10.22663/KOPRI-KPDC-0000748.1
	16	KOPRI-KPDC-0000747	Ice sheet monitoring GPS data around the Jang Bogo Station in 2016	https://dx.doi.org/doi:10.22663/KOPRI-KPDC-0000747.1
4차년 도 (PM17 020)	17	KOPRI-KPDC-0000899	Hydroacoustic data in Terra Nova Bay, 2017	https://dx.doi.org/doi:10.22663/KOPRI-KPDC-0000899.3
	18	KOPRI-KPDC-0000901	Ice sheet monitoring GPS data around the Jang Bogo Station in	https://dx.doi.org/doi:10.22663/KOPRI-KPDC-0000901.1

		2017		
19	KOPRI-KPDC-0000902	Ice Sheet monitoring system(AMIGOS)data at Drygalski Ice tongue, Nansen Ice Sheet, and Campbell Glacier in 2017	https://dx.doi.org/doi:10.22663/KOPRI-KPDC-0000902.1	
20	KOPRI-KPDC-0000903	ApRES (Automated phase-sensitive Radar Echo Sounding) data at Nansen Ice Sheet	https://dx.doi.org/doi:10.22663/KOPRI-KPDC-0000903.1	
21	KOPRI-KPDC-0000905	LDEO oceanographic mooring data 2017	https://dx.doi.org/doi:10.22663/KOPRI-KPDC-0000905.1	
22	KOPRI-KPDC-0000904	Ocean Bottom Seismometer Data at Antarctic in 2017	https://dx.doi.org/doi:10.22663/KOPRI-KPDC-0000904.1	
23	KOPRI-KPDC-0000906	NIWA oceanographic deep mooring data in the Drygalski Ice Tongue 2017	https://dx.doi.org/doi:10.22663/KOPRI-KPDC-0000906.1	
24	KOPRI-KPDC-0000898	NIWA oceanographic mooring data in the Drygalski Ice Tongue North 2017	https://dx.doi.org/doi:10.22663/KOPRI-KPDC-0000898.1	
25	KOPRI-KPDC-0000897	NIWA oceanographic mooring data in the Drygalski Ice Tongue South 2017	https://dx.doi.org/doi:10.22663/KOPRI-KPDC-0000897.1	
26	KOPRI-KPDC-0000896	LADCP data observed in the Terra Nova Bay, Ross Sea, in March, 2018 (ANA08C)	https://dx.doi.org/doi:10.22663/KOPRI-KPDC-0000896.1	
27	KOPRI-KPDC-0000895	CTD profiles observed in the Terra Nova Bay, Ross Sea, in March, 2018 (ANA08C)	https://dx.doi.org/doi:10.22663/KOPRI-KPDC-0000895.1	
28	KOPRI-KPDC-0001162	KPSN Seismic Data at Victoria Land, Antarctic 2017	https://dx.doi.org/doi:10.22663/KOPRI-KPDC-0001162.1	
5차년 도 (PM18 020)	29	KOPRI-KPDC-0001169	KPSN Seismic Data at Victoria Land, Antarctic 2018	https://dx.doi.org/doi:10.22663/KOPRI-KPDC-0001169.5
	30	KOPRI-KPDC-0001171	Hydroacoustic data in Terra Nova Bay, 2018	https://dx.doi.org/doi:10.22663/KOPRI-KPDC-0001171.1
	31	KOPRI-KPDC-0001168	NIWA oceanographic deep mooring data in the Drygalski Basin (deep trough) 2018	https://dx.doi.org/doi:10.22663/KOPRI-KPDC-0001168.1
	32	KOPRI-KPDC-0001167	NIWA oceanographic deep mooring data in the Drygalski Ice Tongue 2018	https://dx.doi.org/doi:10.22663/KOPRI-KPDC-0001167.1
	33	KOPRI-KPDC-0001166	NIWA oceanographic mooring data in the Drygalski Ice Tongue North	https://dx.doi.org/doi:10.22663/KOPRI-KPDC-0001166.1

			2018	
34	KOPRI-KPDC-0001165	CTD profiles observed in the Terra Nova Bay, Ross Sea, in January, 2019 (ANA09B)		https://dx.doi.org/doi:10.22663/KOPRI-KPDC-00001165.1
35	KOPRI-KPDC-0001164	LADCP data observed in the Terra Nova Bay, Ross Sea, in January, 2019 (ANA09B)		https://dx.doi.org/doi:10.22663/KOPRI-KPDC-00001164.1

극지연구소에서 운영하는 극지지진관측망은 국제디지털지진관측망 (International Federation of Digital Seismograph Network; FDSN)에 등록됨 (doi:10.7914/SN/KP)

(다) 관측소별 자료 회수율 현황

▶ 무인지진관측 시스템 년도별 자료 회수율

No	관측소명	2015	2016	2017	2018
1	KDG01	99	93	91	100
2	KDG02	97	100	100	100
3	KDG03	99	100	100	100
4	KDG04	49	34	47	1
5	KDG05	86	97	87	0
6	KDG06	76	87	0	0
7	KDG07	98	78	97	100
8	KP01	98	100	80	83
9	KP02	57	95	100	100
10	KP03	99	100	77	100
11	KP04(JBS)	95	0		0
12	KP05	98	96	87	100
13	KP07	99	100	35	100
14	JBG2	97	100	100	100
15	KN01		49	100	100
16	KN02		46	100	100
17	KN03		60	95	0

18	KN04		93	100	100
19	KT01			89	88
20	KPAUH1		100		
21	KPAUH2		100		
22	KPAUH3		100		
23	KPDR02		0		
24	NOAA171			100	
25	NOAA172			100	
26	NOAA173			100	
27	NOAA174			100	
28	NOAA175			100 (18/19회수)	
29	NOAA176			100	
30	KPOBS171			100	
31	KPAUH181				100
32	KPAUH182				100
33	KPAUH183				0
34	KPAUH184				0
35	KPAUH185				100
36	KPAUH186				100
평균회수율		89	78.55	87.4	70.88

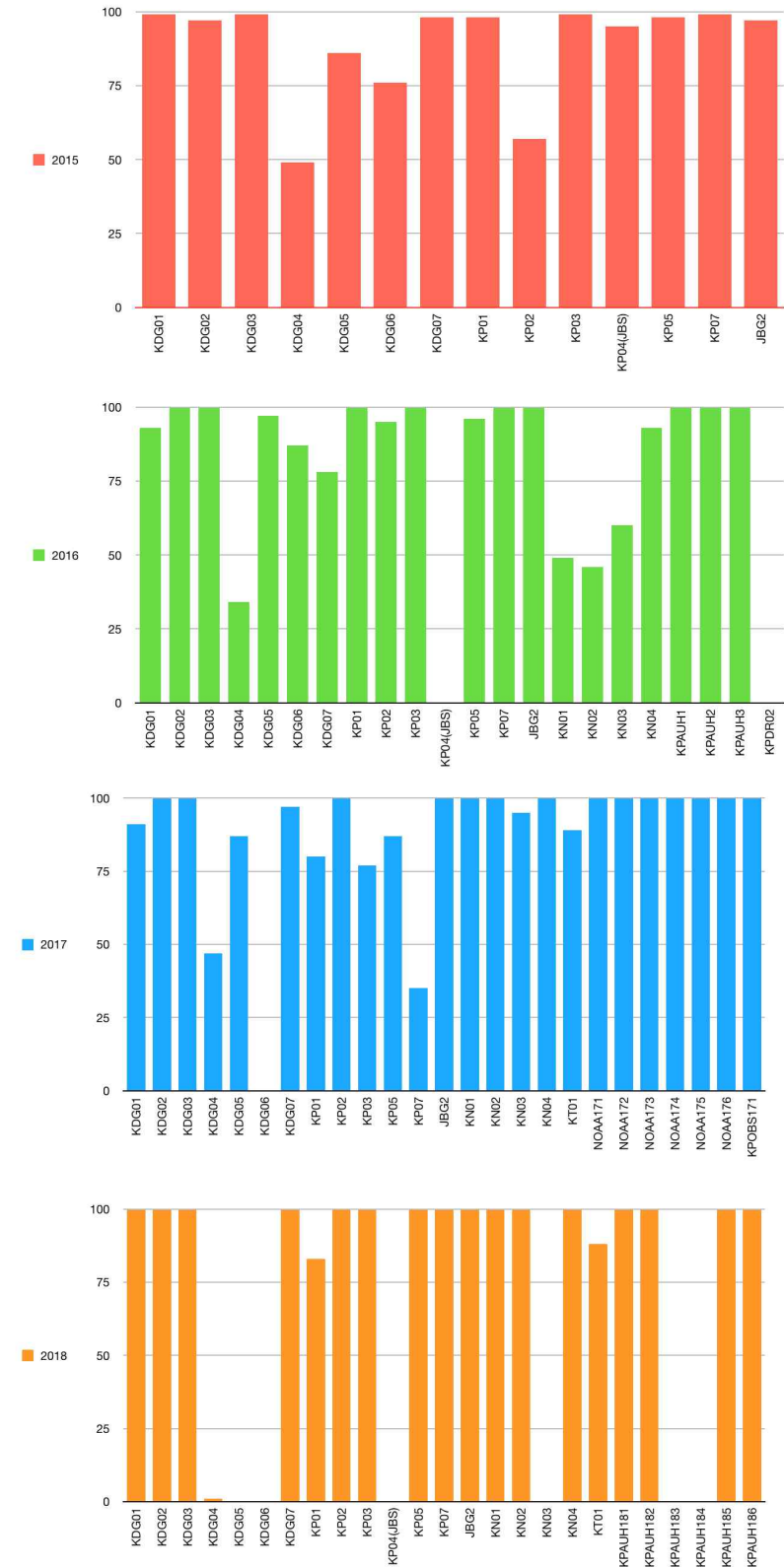


그림 629 지진관측소 년도별 자료회수율 그래프

▶ GPS 관측 시스템 년도별 자료 회수율

No	관측소명	2015	2016	2017	2018
1	KGPS05	99			
2	KGPS06	100		75.2	
3	KGPS07	100			
4	KGPS08	100		90.6	
5	KGPS20		99	97.6	100
6	KGPS21		89	84	97
7	KGPS22		99		
8	KGPS21K		83		
9	KGPS24K		100		
10	KGPS25		100		
11	KAGPS2		97	62.6	99
12	KAGPS3		94	86.7	
13	KAGPS4		98	12.8	6
14	KAGPS5		95	21.6	18
15	KAGPS6		96		
16	KGPS09		0		
17	KGPS11			63.7	
18	KGPS12			0	
19	KGPS13		99.2		98
20	KGPS14		0	0	
21	KGPS15			99.3	
22	KGPS16			99.9	94
23	KGPS17			99.7	
24	KGPS18			99.7	98
25	KGPS19			100	
26	KGPS23			96.3	16
27	KGPS21K			100	
28	DRY1			100	
29	KGPS24				100
30	KGPS25				99
31	KGPS26				0
32	KGPS27				100
33	KGPS28				100
34	KGPS29				100

35	KGPS30				100
36	KGPS31				0
37	KGPS33				100
38	DRY4				100
평균회수율		99.75	82.09	73.14	75

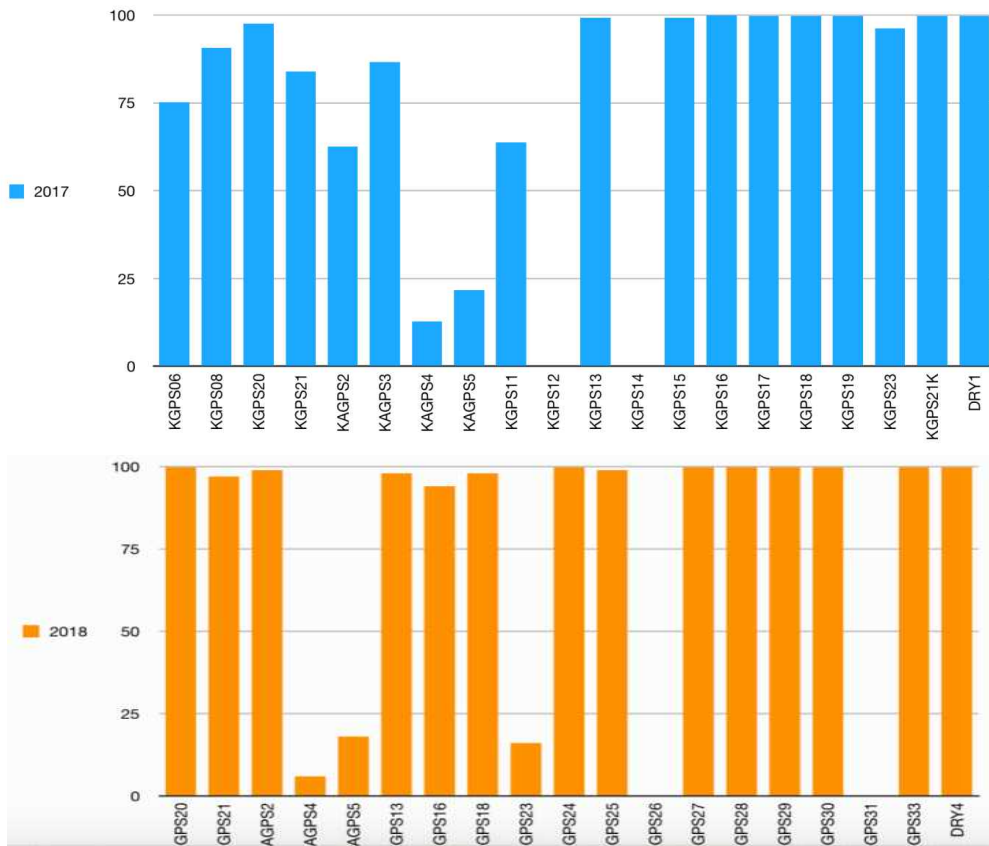


그림 630 GPS 관측소 년도별 자료회수율 그래프

▶ 기상관측 시스템 연도별 자료회수율

No	관측소명	2015	2016	2017	2018
1	KA01	90	0	0	0
2	KA02	97	97	62.6	99
3	KA03	74	94	86.7	0
4	KA04	98	98	12.8	6
5	KA05	95	95	21.6	0
6	KA06		96	0	0
7	KGPS11			63.7	
8	KGPS13			99.2	98
9	KGPS15			99.3	
10	KGPS16			99.9	94
11	KGPS17			99.7	
12	KGPS18			99.7	98
13	KGPS20			97.6	100
14	KGPS21			84	97
15	KGPS23			96.3	16
16	KGPS25				99
평균회수율		90.8	80	68	54



그림 631 기상관측시스템 자료회수율 그래프

▶ 해양계류장비 년도별 자료회수율

No	관측소명	2015	2016	2017	2018
1	DITN	100	100	100	100
2	LDEO		0	100	
3	KPAUH1		100		
4	KPAUH2		100		
5	KPAUH3		100		
6	DITS			100	100
7	DITD			100	100
8	TNBD				100
9	KPDR01	99			
평균회수율		99.5	80	100	100

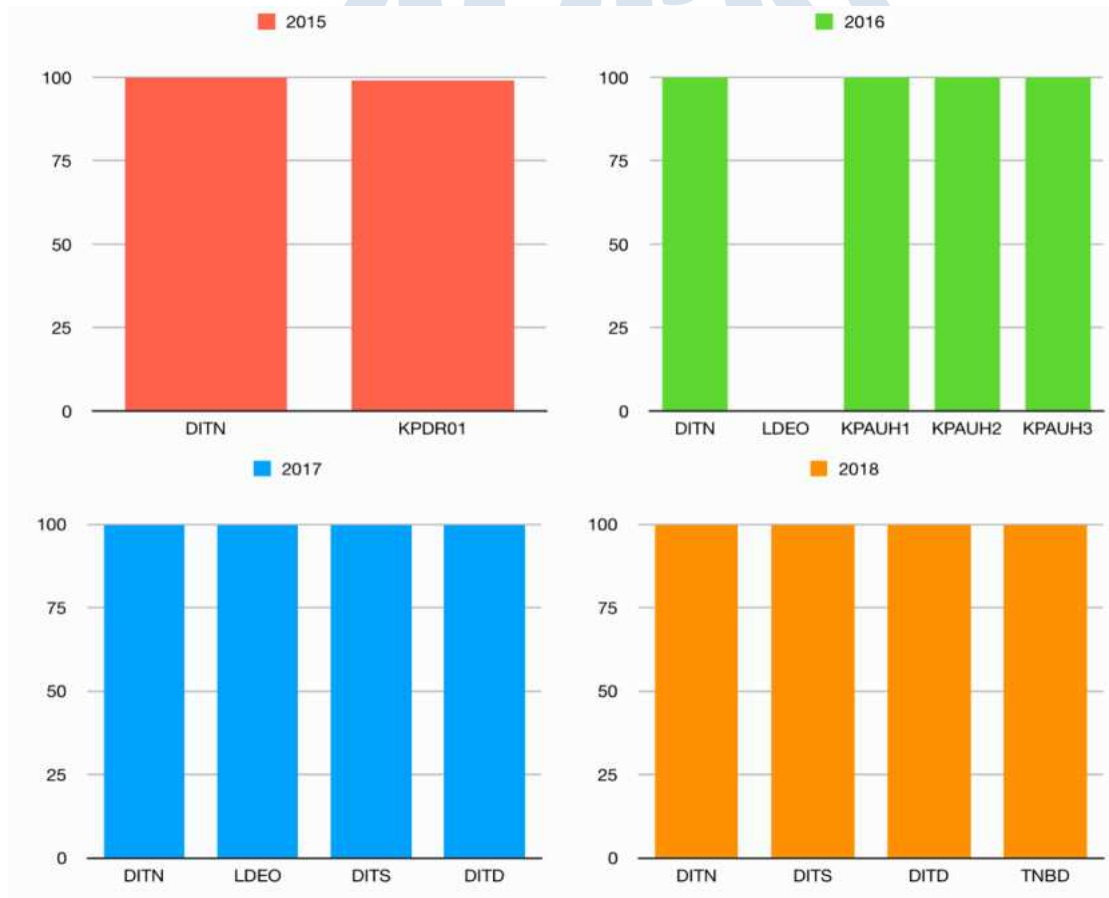


그림 632 해양계류장비 년도별 자료 회수율 그래프

▶ 관측소 자료회수율 지표 산정 근거

구 분	목표치(%)	설정 근거
지진관측	70	- 혹야현상이 지속되는 남극 장보고기지 부근 겨울의 경우 태양광 발전이 불가능하여 전원공급이 원활하지 않아 자료회수율이 급격히 저하(연평균 약 60%; POLENET) - 극지연구소 주요사업 수행(극지역 관측소 시범운영) 결과 불안정한 전원공급 및 극저온/강풍 등의 주변 기상환경으로 관측소 자체의 물리적 파손/결함이 빈번히 발생(연간 약 20%이상)함을 확인
GPS 관측	80	- 지진관측의 경우와 마찬가지로 극저온 및 강풍 등의 피해를 고려, 적절한 수준의 회수율 설정 - 지진관측 대비 저용량 자료기록 특성 고려
기상관측	90	- 지진 및 GPS 관측소와 비교하여 저전력 운영설계를 통한 100%에 가까운 자료회수율을 목표치로 설정 - 극저온 및 강한 대륙 활강풍에 의한 빈번한 센서 오작동 발생으로 회수율 저하 발생
해양관측	80	- 극지역 해양 특성상 해빙 상황 및 장기 계류에 따른 기계적 결함 여부에 따라 관측자료 회수 가능여부가 결정됨 - 세계최고 수준의 도전적인 목표치 설정(NOAA/PMEL 무인 자율 수중음향관측망 운영 기준)

* 기상자료 자료회수율 부분달성(목표대비 81%) 사유: 대륙 활강풍과 빙권 변화와의 연관관계 연구를 위하여 활강풍이 강한 지역에 설치한 관측소의 파손이 있었으며 기상악화로 관측소 접근이 제한되어 유지 보수가 지연되면서 회수율이 하락함

▶ 관측자료 DB 용량 지표 산정 근거

구 분	목표치(%)	설정 근거
지진관측	600 Gb	- 초당 100~250 샘플로 기록하는 초광대역 지진계를 설치하여 연간 평균적으로 150 Gb 이상의 관측자료를 확보하는 것을 목표로 설정
GPS 관측	5 Gb	- 남극 상시 GPS 관측소 (Polnet 등) 운영 기준인 “30초” 간격 측정, “GPS 위성” 수신을 최소 기준으로 설정
기상관측	5 Gb	- GPS와 비교하여 관측소의 수는 적으나 하나의 관측소에 온도, 습도, 바람 등 다양한 관측 요소를 기록하여 GPS와 동일한 기준으로 설정
해양관측	12건	- 극지역 해양 특성상 해빙 상황 및 장기 계류에 따른 기계적 결함 여부에 따라 관측자료 회수 가능여부가 결정됨

* GPS 자료 초과달성(29.99 Gb) 사유: 일부 측정 (주로 단기 관측 측정)에서는 정확도 향상을 위하여 “2초” 혹은 “5초” 간격으로 측정되었으며, 최근 “GPS 위성” 뿐만 아니라 “GLONASS 위성(러시아의 위성항법 시스템)” 자료도 활용하는 추세여서 일부 측정에서는 GLONASS 위성 신호도 수신함에 따라 자료 확보량이 증가함

* 해양관측 초과달성 (22건) 사유: 연구기간 중 LIONESS 국제 공동연구 체제가 확장됨에 따라 뉴질랜드 NIWA, 미국 LDEO와 공동으로 구축하여 운영한 관측자료가 추가적으로 확보되어 자료량이 초과됨

(라) 논문(국내외 전문 학술지) 게재

번호	논문명	학술지명	주저자명	호	국명	발행기관	SCI여부 (SCI/비SCI)	mrnIF	게재일	관련연구 code *	
1차 년 도	1	Accelerated mass loss from Greenland ice sheet: Links to atmospheric circulation in the North Atlantic	Ki-Weon Seo	128	네덜란드	Elsevier	SCI	85.42	2015/02/23	S2.1	
	2	Sources and Levels of Ambient Ocean Sound near the Antarctic Peninsula	Robert P. Dziak	10 (4)	미국	Public Library of Science	SCIE	83.87	2015/04/14	S1.3	
	3	Surface mass balance contributions to acceleration of Antarctic ice mass loss during 2003-2013	Journal of Geophysical Research	Ki-Weon Seo	120 (5)	미국	Journal of Geophysical Research	SCI	85.79	2015/04/14	S2.1
2차 년 도	1	알베도 변화에 의한 남극 눈 안정동위원소의 변동에 관한 연구	이정훈	37 (2)	한국	한국해양과학기술원	비SCI	-	2015/06	S1.3	
	2	Observation Activities in the Ross Sea: Current and Future National Contributions to the Southern Ocean Observing System(SOOS)	M. Williams	1	호주	Southern Ocean Observing System	비SCI	-	2015/08/24	S1.3	
	3	Decadal and quadratic variations of Earth's oblateness and polar ice mass balance from 1979 to 2010	Geophysical Journal International	Ki-Weon Seo	203 (1)	영국	Oxford University	SCI	66.25	2015/08/27	S2.1
	4	P-wave velocity structure beneath Mt. Melbourne in northern Victoria Land, Antarctica: Evidence of partial melting and volcanic magma sources	Earth and Planetary Science Letters	Y. Park	432	네덜란드	Elsevier	SCI	91.67	2015/11/03	S2.1
	5	용해실험에 의한 얼음과 용해수의 안정동위원소분화에 관한 연구	Ocean and Polar Research	이정훈	37 (4)	한국	한국해양과학기술원	비SCI	-	2015/12	S1.3
	6	Reclassification of <i>Serpens flexibilis</i> Hespell 1977 as <i>Pseudomonas flexibilis</i> comb. nov., with <i>Pseudomonas tuomuerensis</i> Xin <i>et al.</i> 2009 as a later heterotypic synonym	Systematic and Applied Microbiology	S-K Shin	38	독일	Elsevier	SCI	74.07	2015/12	S1.4
	7	Crustal structure beneath the Northern Transantarctic Mountains and Wilkes Subglacial Basin: Implications	Journal of Geophysical	S.E. Hansen	121	미국	American Geophysical Union	SCI	81.93	2016/01/22	S2.1

	for tectonic origins	Research: Solid Earth									
8	스노우팩에서 인공강우실험에 의한 배출수의 화학적인 분리	지질학회지	이정훈	52 (2)	한국	대한지질학회	비SCI	-	2016/04	S1.3	
1	Spurious barometric pressure acceleration in Antarctica and propagation into GRACE Antarctic mass change estimates	Geophysical Journal International	Kim, B-. H	206	영국	Oxford University	SCI	66.25	2016/06/05	S2.1	
2	Upper Mantle Shear Wave Velocity Structure Beneath Northern Victoria Land, Antarctica: Volcanism and Uplift in the Northern Transantarctic Mountains	Earth and Planetary Science Letters	Graw, J	449	네덜란드	Elsevier	SCI	92.50	2016/06/06	S2.1	
3	Reclassification of <i>Halomonas caseinilytica</i> Wu <i>et al.</i> 2008 as a later synonym of <i>Halomonas sinaiensis</i> Romano <i>et al.</i> 2007, and emendation of the species description	Antonie van Leeuwenhoek	Hwang, C. Y.	109 (10)	네덜란드	Springer International Publishing	SCI	33.61	2016/07/14	S1.4	
4	<i>Pseudoalteromonas neustonica</i> sp. nov., isolated from the sea surface microlayer of the Ross Sea (Antarctica), and emended description of the genus <i>Pseudoalteromonas</i>	International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology	Hwang, C. Y.	66 (9)	영국	Microbiology Society	SCI	47.54	2016/09	S1.4	
5	인공강우실험을 이용한 동위원소수분분리 및 각각의 추적자에 따른 의미	Ocean and Polar Research	이정훈	38 (4)	한국	한국해양연구원	비SCI	-	2016/12	S1.3	
6	Active subglacial lakes and channelized water beneath the Kamb Ice Stream	The Cryosphere	Kim, B-. H	10	독일	European Geosciences Union	SCIE	97.92	2016/12/01	S1.1	
7	Influence of pre-event water on streamflow in a granitic watershed using hydrograph separation	Environmental Earth Sciences	Hyerin Kim	76	독일	Springer	SCI	53.15	2017/01/12	S1.3	
8	Estimation of Amazon River Discharge Based on EOF Analysis of GRACE Gravity Data	Remote Sensing of Environment	Eom, J.	191	미국	Elsevier	SCI	100	2017/01/20	S2.1	
9	An assessment of crustal and upper-mantle velocity structure by removing the effect of an ice layer on the P-wave response: An application to Antarctic	Bulletin of Seismological Society of	Graw, J. H.	107 (2)	미국	Seismological Society of America	SCI	62.50	2017/02/21	S2.1	

3차
년
도

		seismic studies	America								
	10	Ice and groundwater effects on long term polar motion (1979-2010)	Journal of Geodynamics	Youm, K.	106	영국	Elsevier	SCI	56.25	2017/02/28	S2.1
	11	동위원소 추적자를 이용한 수문분리에 대한 연구	지질학회지	이정훈	53(2)	한국	대한지질학회	비SCI		2017/04/10	S1.3
	12	Antarctic ice shelf potentially stabilized by export of meltwater in surface river	Nature	Bell, R. E.	544	영국	Springer Nature	SCI	100	2017/04/20	S1.2
4차 년 도	1	The influence of the Drygalski Ice Tongue on the local ocean	Annals of Glaciology	Craig Stevens	58(74)	영국	Cambridge University	SCIE	83.33	2017/06	S1.3
	2	Time series analysis for evaluating hydrological responses of pore-water pressure to rainfall in a slope	Hydrological Sciences Journal	Jun-Mo Kim	62(9)	영국	TAYLOR & FRANCIS	SCIE	85.06	2017/06/01	S1.1
	3	Correlated error reduction in GRACE data over Greenland using extended empirical orthogonal functions	Journal of Geophysical Research-Solid Earth	Jooyoung Eom	122(7)	미국	American Geophysical Union	SCI	85.79	2017/08/15	S2.1
	4	The role of eddies in solute transport and recovery in rock fractures: implication for groundwater remediation	Hydrological Processes	Seung Hyun Lee	31(20)	영국	John Wiley & Sons	SCI	88.51	2017/09/14	S1.1
	5	Deep Fault Plane Revealed by High-Precision Locations of Early Aftershocks Following the 12 September 2016 ML 5.8 Gyeongju, Korea, Earthquake	Bulletin of the Seismological Society of America	Kwang Hee Kim	108(1)	미국	Seismological Society of America	SCI	56.63	2017/12/12	S2.1
	6	용해실험 및 일차원모델을 이용한 얼음과 용해수의 동위원소교환반응에 대한 연구	지질학회지	함지영	53(6)	한국	대한지질학회	비SCI	-	2017/12	S1.3
	7	완전최소자승법과 통최소자승법을 이용한 물안정동위원소의 선형관계식 비교	자원환경지질	이정훈	50(6)	한국	대한자원환경지질학회	비SCI	-	2017/12	S1.3
	8	전남 신안군 지역의 지하수 수질에 대한 해수의 영향 분석	한국 지구과학회지	신경선	38(7)	한국	한국 지구과학회	비SCI	-	2017/12/01	S1.3
5차 년 도	1	Basal channels drive active surface hydrology and transverse ice shelf fracture	Science Advances	Christine F. Dow	4(6)	미국	American Association for the Advancement of Science	SCI	95.24	2018/06/13	S1.3
	2	Complete genome of streamlined	BMC	B.C.	19:	영국	BMC	SCIE	75.63	2018/	S1.4

	marine actinobacterium Pontimonas salivibrio strain CL-TW6T adapted to coastal planktonic lifestyle	Genomics	Cho	625		Genomics			08/22		
3	Global sea level change signatures observed by GRACE satellite gravimetry	Scientific Reports	전태환	8(0)	영국	Nature Publishing Group	SCI	82.54	2018/09/10	S2.2	
4	해수침투 발생 시 혼합비 계산의 오차에 관한 연구	지질학회지	이정훈	54(5)	한국	지질학회	비SCI	-	2018/10	S1.3	
5	Application of the Empirical Orthogonal Functions on the GRACE Spherical Harmonic Solutions	한국 지구과학회지	서기원	39(5)	한국	한국 지구과학회	비SCI	-	2018/10	S1.2	
6	Landsat 다중분광 영상정합을 이용한 동남극 난센 빙봉의 2000-2017년 흐름속도 변화 분석	대한원격탐사학회지	한향선, 이춘기	34(6-2)	한국	대한원격탐사학회	비SCI	-	2018/11/30	S1.2	
7	Stochastic characteristics for the vortical structure of a 5-MW wind turbine wake	Renewable Energy	Ji Sung Na	133(2019)	영국	Elsevier	SCIE	81.25	2018/09/10	S2.2	
8	Contribution of low-salinity water to sea surface warming of the East China Sea in the summer of 2016	Progress in Oceanography	Taekyun Kim	175	영국	Elsevier	SCI	96.82	2019/03/28	S1.3	
사업종료 후 추가성과	1	Hydroacoustic, Meteorologic and Seismic Observations of the 2016 Nansen Ice Shelf Calving Event and Iceberg Formation	Frontiers in Earth Science	Robert P. Dziak	183	스위스	Frontiers in Earth Science	SCIE	72.82	2019/07/16	S1.3
	2	Ross Ice Shelf Icequakes Associated with Ocean Gravity Wave Activity	Geophysical Research Letters	Zhao Chen		미국	American Geophysical Union	SCI	93.33	2019/07/29	S1.3
	3	Isotopic variations of meltwater from ice by isotopic exchange between liquid water and ice	Journal of Glaciology	Ji-Young Ham		영국	Cambridge University press	SCI	76.41	In revision	S1.3
	4	Accelerating ice mass loss and decreasing precipitation in Antarctica during the last decades	Global and Planetary Change	Ki-Weon Seo		네덜란드	ELSEVIER	SCI	83.67	Under review	S2.1
	5	Spatio-temporal variation in production of High Salinity Shelf Water in Terra Nova Bay Polynya, Antarctica	Ocean Science	Seung-Tae Yoon		독일	COPERNICUS GESELLSCHAFT MBH	SCIE	72.30	Under review	S1.3
	6	Getz IceShelf melt enhanced by freshwater discharge from beneath the West Antarctic Ice Sheet, West Antarctica	The Cryosphere	Wei Wei		독일	European Geosciences Union	SCIE	94.36	Under review	S1.3

* 관련연구code 는 p.51 핵심 연구주제 및 해당 기술분야 참조

(마) 한국 및 국제 학술대회 발표

번호	회의 명칭	발표자	발표 일시	장소	국명	
1차 년 도	1	D-LUX: A new way to assess the safety of embankment by 3D electrical survey	오석훈 외 2인	2015/02/16	ASEG-PESA	호주
	2	Old water contributions to a granitic watershed	이정훈 외 6인	2015/04/15	EGU General Assembly 2015	오스트리아
	3	극지 탐사용 무인항공기를 위한 제어 소프트웨어 설계	김태형 외 2인	2015/05/15	한국정밀공학회	한국
	4	Surface Elevation Changes on the Subglacial Lakes Upstream of the David Glacier, Antarctica Using Cryosat-2 and ICESat Satellite Altimetry: A Preliminary Result	김병훈 외 2인	2015/05/19	제21차 국제극지 심포지엄	한국
	5	Flow Interaction of the Drygalski Ice Tongue	Cameron Edwards 외 3인	2015/05/19	제 21차 국제극지 심포지엄	한국
	6	Analysis of Sub-Antarctic Lake Stability Using a Coupled Basal Hydrology Model	Christine Dow 외 2인	2015/05/19	제 21차 국제극지 심포지엄	한국
	7	Flow around glacial tongues	Craig Stevens 외 2인	2015/05/20	제 21차 국제극지 심포지엄	한국
	8	Preliminary results of marine heat flow measurements across the eastern flank of the Adare Trough, Antarctica: possibility of hotter than normal asthenosphere?	Y.G. Kim 외	2015/10/12	The 2nd InterRidge International Workshop	한국
	9	Crustal and upper mantle structure beneath Mt. Melbourne, Antarctica: Implication for partial melting	유현재 외 5인	2015/06/22	2015 IUGG	체코
2차 년 도	1	A study on isotopic variations of ice by a melting experiment	함지영 외 2인	2015/10/28	2015 추계지질 과학연합학술대회	한국
	2	남극 중서부 로스해 대륙경계부의 탄성과 층서	김수관 외 4인	2015/10/28	2015 추계지질 과학연합학술대회	한국
	3	Corrections of Correlation Errors in Greenland Ice Mass Variations from GRACE using Empirical Orthogonal Function	J. Eom 외 2명	2015/12/14	AGU Fall Meeting 2015	미국
	4	An observation of Antarctic marginal subglacial lake using Cryosat-2 SARin mode	B.-H. Kim 외 3인	2015/12/14	AGU Fall Meeting 2015	미국
	5	Surface mass balance contributions to acceleration of Antarctic ice mass loss during 2003-2013	K.-W. Seo 외 7인	2015/12/14	AGU Fall Meeting 2015	미국
	6	Long-term (1979-2010) ice mass balance in Antarctica and Greenland estimated from the Earth's rotational	K.-H. Yeom 외	2015/12/14	AGU Fall Meeting 2015	미국

	pole variations	2인				
7	Seasonal variations of seismic noise sources in the western Ross Sea, Antarctica	M. Schmidt-Aursch 외 4인	2016/03/16	76 th Annual Meeting of the German Geophysical Society	독일	
8	Cryosat-2 레이더 고도계를 이용한 남극 빙저호 연구	김병훈 외 2인	2016/04/07	2016 한국지구과학회 춘계학술대회	한국	
9	고등학교 지구과학 교과서에 제시된 판 이동의 주된 원동력에 대한 고찰	전태환 외 2인	2016/04/07	2016 한국지구과학회 춘계학술대회	한국	
10	Deciphering the Tectonic History of the Northern Transantarctic Mountains	S. Hansen 외 5인	2016/04/17	European Geosciences Union 2016	오스트리아	
11	Amphibian Seismological Studies in the Ross Sea, Antarctica	M. Schmidt-Aursch 외 7인	2016/04/17	European Geosciences Union 2016	오스트리아	
12	Acoustic monitoring in the Ross Sea, Antarctica, using hydrophone of the Ocean Bottom Seismometer	S. Yun 외 6인	2016/04/17	European Geosciences Union 2016	오스트리아	
13	Characteristic atmosphere and ocean interactions in the coastal and marine environment inferred from infrasound data at Terra Nova Bay, West Antarctica	M. Kanao 외 9인	2016/05/10	제 22차 국제극지심포지엄	한국	
14	Sub-bottom acoustics as a tool for measuring sea ice properties	K. Manzer 외 5명	2016/05/10	국제극지심포지엄	한국	
15	무인항공기와 열영상 카메라를 이용한 남극대륙 화산 탐사 타당성 조사	양재현 외 2인	2016/05/11	한국정밀공학회	한국	
3차 년 도	1	Potential subglacial lakes derived from a new DEM from Cryosat-2 and satellite optical image in the David Glacier, Antarctica	이춘기 외 5인	2016/08/22	SCAR Open Science Conference 2016	말레이시아
	2	대규모 지진에 의한 TEC 변화와 최근 발생한 한국지진에의 적용 결과	김병훈 외 1인	2016/09/22	2016 추계 한국지구과학회	한국
	3	극 운동을 이용한 남극과 그린란드의 장기간 (1979~2010) 빙하 질량 변화 이해	염국현 외 3인	2016/09/22	2016 추계 한국지구과학회	한국
	4	해수면 방정식을 이용한 PGR 모델과 GRACE 저주파 계수 검증	전태환 외 1인	2016/09/22	2016 추계 한국지구과학회	한국
	5	남극 Kamb 빙류 하부에 존재하는 활동성 빙저호와 단일채널의 빙저수 흐름	김병훈 외 4인	2016/10/06	2016 한국지구물리·물리탐사학회 추계학술대회	한국
	6	남극 로스해 센트럴분지의 탄성과 층서분석을 통한 신생대 후기 남극빙상의 발달과 저층해류의 변화	김수관 외	2016/10/06	2016 한국지구물리·물리탐사학회 추계학술대회	한국

7	남극 Adare Trough 주변의 해양지열연구	김영균 외 1인	2016/10/06	2016 한국지구물리· 물리탐사학회 추계학술대회	한국
8	남극 장보고 기지 주변 지진관측망에서 관측된 국지지진 발생 현황	박용철 외 3인	2016/10/06	2016 한국지구물리· 물리탐사학회 추계학술대회	한국
9	위성 중력 자료를 이용한 그린란드 빙상의 계절적 변동	엄주영 외 3인	2016/10/06	2016 한국지구물리· 물리탐사학회 추계학술대회	한국
10	극운동을 이용한 남극과 그린란드의 장기간(1979~2010) 빙하 질량 변화 이해	염국현 외 3인	2016/10/06	2016 한국지구물리· 물리탐사학회 추계학술대회	한국
11	주변지진잡음 토모그래피 방법을 이용한 남극 북빅토리아랜드의 지각구조 연구	유현재 외 5인	2016/10/06	2016 한국지구물리· 물리탐사학회 추계학술대회	한국
12	해저면 수중음향관측기를 이용한 남극 로스해 음향 관측	윤숙영 외 1인	2016/10/06	2016 한국지구물리· 물리탐사학회 추계학술대회	한국
13	마이크로모델 시각화를 활용한 단열에서의 미시적인 유체유동 및 용질거동 현상 고찰	이승현 외 2인	2016/10/06	2016 한국지구물리· 물리탐사학회 추계학술대회	한국
14	빙상 용융에 따른 해수면 변동	이원상 외 7인	2016/10/06	2016 한국지구물리· 물리탐사학회 추계학술대회	한국
15	남극 멜번 화산 지역에서의 자기지진류 탐사	이춘기 외 3인	2016/10/06	2016 한국지구물리· 물리탐사학회 추계학술대회	한국
16	해수면 방정식을 이용한 PGR 모델과 GRACE 저주파 계수 검증	전태환 외 1인	2016/10/06	2016 한국지구물리· 물리탐사학회 추계학술대회	한국
17	칼럼실험을 이용한 용융수의 불안정동위원소 변동에 관한 연구	함지영 외 4인	2016/10/26	대한지질학회	한국
18	Monitoring subsurface ice-ocean processes using underwater acoustics in the Ross Sea	Robert Dziak, 이원상	2016/12/14	2016 American Geophysical Union Fall Meeting	미국
19	Seasonal Evolution of Ice Mass in Antarctic Peninsula recovered by GRACE Data after Removing Correlation Errors	엄주영 외 4인	2016/12/12	2016 American Geophysical Union Fall Meeting	미국
20	Visualizing trapped solute migration in a single rough-walled fracture and its implications for in-situ groundwater remediation	이승현 외 4인	2016/12/16	2016 American Geophysical Union Fall Meeting	미국

	21	Self-Attraction and Loading Effect of Ocean to Understand Post-Glacial Rebound and Degree-2 Stokes Coefficients	전태환 외 1인	2016/12/13	2016 American Geophysical Union Fall Meeting	미국
	22	A preliminary study on isotopic evolution of ice by a melting experiment	함지영 외 4인	2016/12/12	2016 American Geophysical Union Fall Meeting	미국
	23	Characteristic spatial and temporal patterns of Ross Ice Shelf boundary perturbation	Adam Campbell, 이춘기	2017/02/12	International Symposium on The Cryosphere in a Changing Climate	뉴질랜드
	24	Influence of ice tongues on local ocean and polynya processes	Craig Stevens, 이원상	2017/02/12	International Symposium on The Cryosphere in a Changing Climate	뉴질랜드
4차 년 도	1	Estimation of Amazon river discharge based on EOF analysis of GRACE gravity data	엄주영 외 2인	2017/08/07	2017 AOGS annual meeting	미국
	2	남극 얼음 질량의 경년 및 장기적 변동과 기후 진동간의 관련성	김병훈 외 1인	2017/10/26	2017 추계 지질과학연합 학술발표회	한국
	3	해수면 상승의 대륙별 기여도 재추정	김재승 외 2인	2017/10/26	2017 추계 지질과학연합 학술발표회	한국
	4	Sensitivity analysis of ice dynamics to climate forcing scenarios in Victoria land, East Antarctica	박인우 외 4인	2017/10/26	2017 추계 지질과학연합 학술발표회	한국
	5	해수침투에 의한 전남 신안군 지역 지하수의 혼합비 계산	신경선 외 2인	2017/10/25	2017 추계 지질과학연합 학술발표회	한국
	6	완전최소자승법과 최소자승법을 이용한 물안정동위원소의 선형관계식 비교	이다은 외 4인	2017/10/25	2017 추계 지질과학연합 학술발표회	한국
	7	지하수 자원에 대한 향후 기후변화의 영향	정혜정 외 2인	2017/10/25	2017 추계 지질과학연합 학술발표회	한국
	8	Sensitivity analysis of sea level rise contribution depending on external forcing: A case study of Victoria Land, East Antarctica	박인우 외 4인	2017/12/14	2017 American Geophysical Union Fall Meeting	미국
	9	Evaluation CMIP5 precipitation in Antarctica using Earth's oblateness observations	김병훈 외 1인	2018/04/19	European Geophysical	오스트리아

				Union 2018		
10	Seasonal spatial patterns of Greenland ice mass change recovered by GRACE gravity data	엄주영 외 1인	2018/04/19	European Geophysical Union 2018	오스트리아	
11	Crustal displacement in Amazon River basin using GRACE and a river routing model	염국현 외 2인	2018/04/19	European Geophysical Union 2018	오스트리아	
12	Global sea level change signatures observed by GRACE satellite gravimetry	전태환 외 4인	2018/04/19	European Geophysical Union 2018	오스트리아	
13	기후변화 강제력에 대한 빙상 모델 민감도 분석	진경 외 1인	2018/04/16	2018 한국기상학회 봄학술대회	한국	
14	Status and Plan of Ice Sheet Modeling in CHASE (Unit of Ice Sheet and Sea Level Changes)	진경 외 1인	2018/05/07	Rising Coastal Seas on a Warming Earth III Workshop	아랍에미리트	
15	기후 변화 강제력 요소에 따른 향후 200년 동남극 데이비드 빙하 거동 변화 모의	박인우 외 6인	2018/05/10	2018 KGU 연합학술대회	한국	
16	판을 이동시키는 원동력의 이해	서기원 외 2인	2018/05/10	2018 KGU 연합학술대회	한국	
17	위성 중력자료를 이용한 그린란드 빙상의 시간-공간 변화 분석	엄주영 외 1인	2018/05/10	2018 KGU 연합학술대회	한국	
18	남극 테라노바 만 주변 해수의 조성 및 수괴 구분	유현주 외 5인	2018/05/10	2018 KGU 연합학술대회	한국	
19	Re-initiation of bottom water formation in the East Sea (Japan Sea) in a warming world	윤승태 외 7인	2018/05/16	2018 춘계해양학회	한국	
5차 년 도	1	Relationship Between Development of the Terra Nova Bay Polynya and Distributions of Water Masses During the Austral Summer Seasons in 2014-2016	윤승태 외 7인	2018/06/05	Asia Oceania Geosciences Society annual meeting (AOGS 2018)	미국
	2	Ice Sheet Modeling based on ISSM	진경 외 2인	2018/06/10	2018 ISSM Workshop	미국
	3	Status and plan of ice sheet modeling in KOPRI	진경	2018/06/29	예측모델의 불확실성 완화 및 개선을 위한 수치알고리즘 분석 워크샵	한국
	4	Utilization of filed observations to improve the reliability of ice sheet model	진경 외 3인	2018/09/04	FRISP 2018	프랑스
	5	Improving future projection of Antarctica: observations and modeling	진경 외 3인	2018/10/10	Ice Sheet Dynamics Model Workshop	한국

6	Future projections of David Galcier-Drygalski Ice Tongue under idealized scenarios	진경 외 4인	2018/10/15	Korea-New Zealand Bilateral Antarctic Cooperation Workshop	한국
7	GRACE 위성으로 관측한 전 세계 중력 해수면 변화	전태환 외 3인	2018/10/24	대한지질학회	한국
8	표면 질량 변화에 의한 아마존 분지 수직 변위 연구	염국현 외 3인	2018/10/24	대한지질학회	한국
9	Numerical analysis on the response of subglacial ridge for future projection of David Glacier, East Antarctica	박인우 외 7인	2018/12/10	2018 AGU Fall meeting	미국
10	The properties of glacial meltwater and sea water isotopes in the Terra Nova Bay, Antarctica	유현주 외 7인	2019/04/09	EGU General Assembly 2019	오스트리아
11	남극 캠벨빙하 하부 빙저지하수 수문장 변동성 모델 연구 (Modelling transient subglacial water flow beneath Campbell Glacier, Antarctica)	이승현 외 4인	2019/04/10	2019 지하수토양환경학회 춘계학술대회	한국
12	Numerical simulation of ocean - ice shelf interaction : Water mass circulation in the Terra Nova Bay, Antarctica	김태균 외 3인	2019/04/22	2019 한국기상학회 학술대회	한국
13	LES 모델 기반 남극 빙붕 하부 열전달특성 연구	나지성 외 3인	2019/04/22	2019 한국기상학회 봄 학술대회	한국
14	Future Projections of Antarctica Ice Shelf melting and Global Sea Level Rise	진경 외 4인	2019/04/22	2019 한국기상학회 봄 학술대회	한국
15	Numerical modeling of water mass circulation and variability in the Terra Nova Bay, Antarctica	김태균 외 3인	2019/05/17	2019 한국해양학회 춘계학술대회	한국
16	수치해석을 통한 빙붕 하부 경계층의 특성 연구	나지성 외 2인	2019/05/17	2019 한국해양학회 춘계학술대회	한국
17	남극 로스해 테라노바만 수중음향 관측	윤숙영 외 5인	2019/05/17	2019 한국해양학회 춘계학술대회	한국
18	남극 테라노바 만 해수 염분의 시공간적 변화	윤승태 외 7인	2019/05/17	2019 한국해양학회 춘계학술대회	한국
19	극지 빙상용융과 전지구 해수면 상승: 서남극 스웨이즈 빙하 연구(LIONESS-TG)	이원상 외 21인	2019/05/17	2019 한국해양학회 춘계학술대회	한국
20	남극 테라노바 만의 원핵생물 군집 구조에 대한 중장기 변동성 연구	이인애 외 6인	2019/05/17	2019 한국해양학회 춘계학술대회	한국
21	남극 로스해 지체구조 활동과 빙권변화	이지연 외	2019/05/17	2019	한국

	관측을 위한 해저면지진계 설치 및 운용	4인		한국해양학회 춘계학술대회	
22	위상 민감 레이더를 이용한 남극 빙봉 하부 용융량 관측	이춘기 외 7인	2019/05/17	2019 한국해양학회 춘계학술대회	한국
23	The impact of the ice-ocean interaction on the future projection of global sea level rise	진경 외 4인	2019/05/17	2019 한국해양학회 춘계학술대회	한국

(바) 생명자원(생물자원, 생명정보)/화합물 등록

번호	생명자원(생물자원, 생명정보)/화합물 명	등록/기탁 번호	등록/기탁 기관	발생 연도
1	Pseudoalteromonas neustonica 균주	KCCM 43187	한국미생물보존센터	2015
2	Pseudomonas sp. SSM26(=PAMC28426) 균주	KCCM 43193	한국미생물보존센터	2016
3	Pseudomonas sp. SSM44(=PAMC28427) 균주	KCCM 43194	한국미생물보존센터	2016
4	Pseudoalteromonas neustonica 균주의 유전체	BDDS01000000	미국국립생명공학정보센터 (NCBI)	2016
5	Pseudomonas sp. SSM26 균주의 유전체	RKKU00000000	미국국립생명공학정보센터 (NCBI)	2018
6	Pseudomonas sp. SSM44 균주의 유전체	RKKV00000000	미국국립생명공학정보센터 (NCBI)	2018
7	Pontimonas salivibrio 균주의 유전체	CP026923	미국국립생명공학정보센터 (NCBI)	2018

(사) 연구 보고서 링크

연도	보고서 구분	제목	발간일	등록 번호	링크
2015	연구 보고서	2014/2015 남극활동 보고서 =Annual Report of 2014/2015 Activities at the King Sejong/Jang Bogo Station, Antarctica	2015년 4월	9546	http://library.kopri.re.kr/search/detail/CAT000000029905
2016	연구 보고서	2015/2016 남극활동 보고서 =Annual Report of 2015/2016 Activities at the King Sejong/Jang Bogo Station, Antarctica	2016년 4월	10347; 10348	http://library.kopri.re.kr/search/detail/CAT000000029938
2017	연구 보고서	2016/2017 남극활동 보고서 =Annual Report of 2016/2017 Activities at the King Sejong/Jang Bogo Station, Antarctica	2017년 4월	11882; 11883	http://library.kopri.re.kr/search/detail/CAT000000050731
2018	연구 보고서	2017/2018 남극활동 보고서 =Annual Report of 2017/2018 Activities at the King Sejong/Jang Bogo Station, Antarctica	2018년 4월	12395; 12396	http://library.kopri.re.kr/search/detail/CAT000000052709
2019	연구 보고서	2018/2019 남극활동 보고서 =Annual Report of 2018/2019 Activities at the King Sejong/Jang Bogo Station, Antarctica	2019년 4월	12801; 12802	http://library.kopri.re.kr/search/detail/CAT000000053255

(아) 전문 연구인력 양성

번호	분류	기준 연도	현황										
			학위별				성별		지역별				
			박사	석사	학사	기타	남	여	수도권	충청권	영남권	호남권	기타
1	학교	2015	1		3			4	4				
2	학교	2016	1	4	2		3	4	7				
4	학교	2017		2	3			5	5				
5	학교	2018		4	2		1	5	6				
7	학교	2019		1	1			2	2				
총			2	11	11								

나. 정성적 목표 달성도

▷ 다학제 관측자료 활용 테라노바만 해양환경 변화 원인을 규명, 특히 수중글라이더를 활용하여 남극 빙상하부 탐사를 최초로 성공하여 빙봉하부 해양순환 수치모델 정확도 향상에 기여할 것으로 기대

▷ 동남극 빅토리아랜드 데이비드 빙하-드라이갈스키 빙설 지역의 빙하 흐름을 역학적으로 재현·예측할 수 있는 빙상동역학 모델 시스템을 구축하여 향후 빙상관련 물리기작 이해, 관측자료 검증, 모델의 예측성 증진, 다양한 과거 및 미래변화 시나리오 산출 등 다양한 연구로의 확장성 확보

▷ 빙상동역학 모델 영역인 북빅토리아랜드 데이비드빙하-드라이갈스키 빙설 지역에서 2100년까지 IPCC RCP 시나리오 강제력 실험 결과 예측된 다중모델 앙상블 평균 해수면 변동값 산출

▷ 세계 최고 수준의 다학제 빙권변화 관측망(LIONESS; Land-Ice/Ocean Network Exploration with Semiautonomous Systems)을 한반도 면적 40%에 해당하는 지역에 성공적으로 구축하고, 고해상도 관측자료 확보를 통한 빙하거동 예측모델의 정확성을 대폭 향상시켰으며, 장보고 기지 주변 빙상 변화의 재현 및 예측 시스템을 구축함으로써, 기존의 연구단계를 뛰어넘는 수준의 도전적이며 혁신적인 내용의 연구를 수행

▷ 극한지 탐사 기술과 관측망 운용 기술 개발을 통해 세계 수준의 극지 탐사 역량을 갖추

▷ 빙봉-해양 다학제 관측을 통해 난센 빙봉 붕괴 원인규명 연구를 수행하여 기존 빙봉 붕괴 시나리오에 새로운 패러다임을 제시하고, 빙상용융에 의한 해수면 상승 예측 모델 정확도 향상에 크게 기여

※ 최종보고서 p.588-592, 관련 논문 2편 발간(Bell *et al.*, 2016; Dow *et al.*, 2018), 1편 게재승인 (Dziak *et al.*, 2019)

▷ 수행 연구결과를 바탕으로 네이처 및 사이언스誌에서 선정한 2019년 주목해야할 연구 내용인 서남극 스웨이츠 빙하 연구과제 착수(해수부 R&D)하여 급격한 해수면 상승의

원인규명을 위한 국제적 연구 이슈 해결에 주도적으로 기여

2. 관련 분야 기여도

가. 극지 관측기술

(1) 강풍 지역에서 활용할 수 있는 솔라패널 디자인 개발

육상 관측망의 전원공급을 위한 솔라패널이 강한 바람에 파손되는 경우가 발생하여 이를 보완하여 바람의 저항을 줄일 수 있는 삼각형 모양 디자인의 솔라패널 프레임을 개발하여 안정적인 운영에 성공하였다

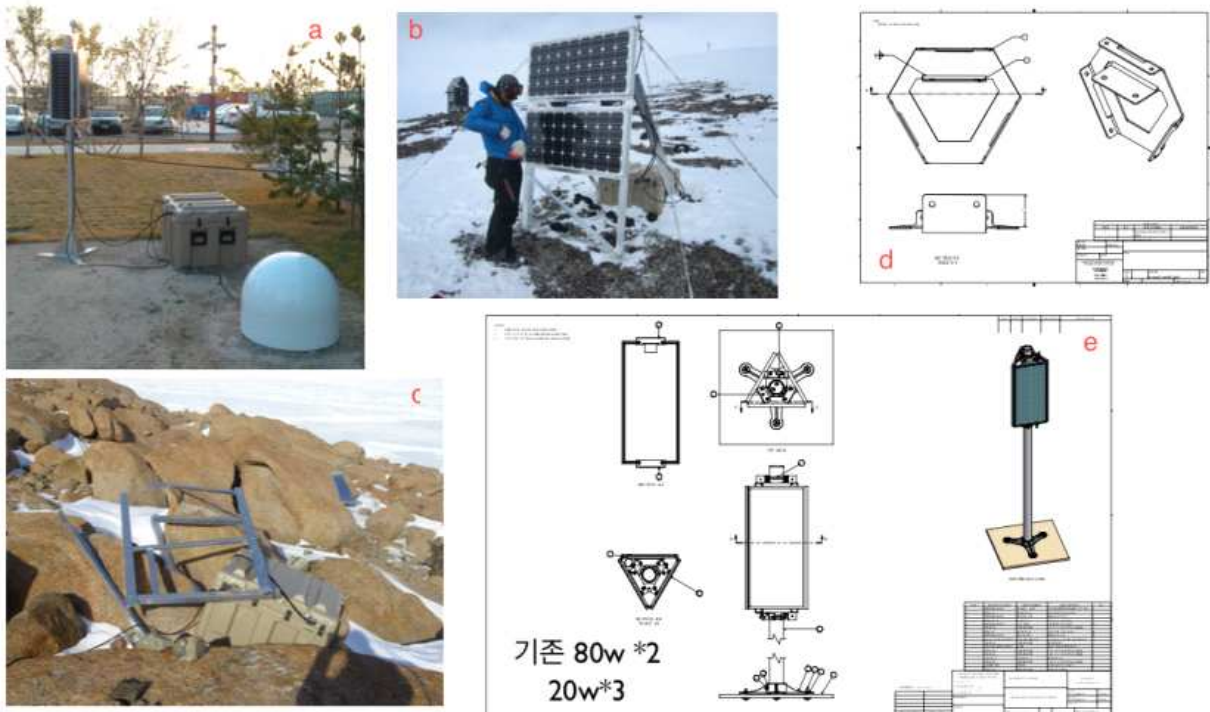


그림 633. (a) 새롭게 개발된 저저항 솔라패널 프레임. (b-c) 기존의 솔라패널 프레임의 설치 모습(b)과 남극 대륙의 강풍에 의해 부서진 솔라패널 프레임 모습(c). (d-e) 저저항 솔라패널 프레임 설계도 모습

(2) 극지 무선자료 전송 시스템 구현

장보고기지 주변에 설치된 AMIGOS 시스템은 다양한 자료(GPS, 기상, 카메라 영상)를 이리뚝 위성 통신을 이용하여 실시간으로 전송하는 시스템이다. 하루 전송량은 수백 kb에 달해 이리뚝 통신을 사용하는 경우, 매우 많은 통신료(~1,000천원/측점/월)를 지불하여야 한다. 통신료 절감을 위하여 장보고기지를 중심으로 하는 무선 통신 네트워크를 구축할 필요성이 대두되었다. 이를 위하여 무선 전송 시스템을 개발하여 시험 적용하고자 하였다.

AMIGOS와 장보고 기지에 설치하는 무선 모듈은 Xetawave사의 Xeta9 900 MHz 무선 통신 모듈이며, AMIGOS 메인 모듈에서 컨트롤할 수 있도록 구현되었다. 무선 중계기(Radio repeater)는 송신과 수신에 동시에 이루어지도록 이중 전송 모드(dual radio)로 구성되었으며,

독립적으로 전력이 유지될 수 있도록, 태양전지, 풍력 발전 시스템, 배터리와 타워로 구성되었다.

무선 시스템의 전송 가능 거리를 시험하기 위하여 무선 중계기 제작을 맡은 Polar66사에 의뢰하여 경비행기를 이용하여 전송 시험을 실시하였다. 전송 가능 최대 거리는 약 96km로 산정되었다.



그림 634 무선 전송 시험: 지상 무선 중계기

극지연구소



그림 635 무선 전송 시험: 경비행기 운행 중 무선 전송 시험 수행

개발된 무선 전송 시스템은 GPS RTK 무인 관측 시스템에도 적용하고 있다. GPS 실시간 이동관측(RTK)은 GPS 기준국(base station)의 신호를 무선 통신으로 GPS 관측소(rover)에 전송하여 실시간으로 정밀 측위를 수행하는 기법이다. 남극과 같이 접근이 어려운 곳에 원격 GPS 관측 시스템을 운영하는 경우, 적설 및 강풍에 의해 관측소가 소실될 가능성이 높다. 관

측 자료 전체를 인공위성 통신으로 송신하는 경우 막대한 통신료가 소요되기 때문에 실시간 이동 관측을 통해 현장에서 정밀 좌표를 결정하고 좌표만을 인공위성 통신으로 전송하면 막대한 통신료를 대폭 절감할 수 있다. 이 연구에서 구현된 무선 통신 시스템은 GPS RTK 시스템 개발에 적용되고 있으며, 향후 현장 방문에 제약이 있고 강설이 많은 서남극 지역의 빙하 모니터링에 적용될 예정이다.



그림 636 개발된 무선통신 시스템을 이용하여 개발중인 GPS RTK 시스템

(3) 극지 환경용 MT 탐사 기술 및 장비 개발

얼지 많은 토양에서 활용되던 기존 MT 탐사의 지질·환경적인 한계를 해결함으로써 극지 지하 지질구조 연구 및 극지 자원개발 응용에 활용될 수 있는 장비를 개발하고 빙하 하부 구조연구에 활용 지열 공급과 관련된 마그마 탐지에 기여하였다. 극지 환경 MT 모니터링용 전극 개발을 통해 측정 한계를 극복하고, 기술특허 등록을 함으로서 국산화 기술력을 강화하고 선진국의 외산 장비 수입 대체 효과를 기대할 수 있으며 선진화된 국산 극지탐사 기술은 국제 공동연구를 추진하는 데에 있어 유리한 위치를 선점하는 데에 기여할 수 있을 것으로 기대한다

(4) 국내 무인잠수정 관측기술 개발에 기여

2016/17년도와 2018/19년 극지에서 수행한 무인잠수정 탐사 경험을 바탕으로 한국 선박해양플랜트연구소 위탁과제 수행(2017~2018년)하면서 극지 무인 잠수정 운항기술 개발에 필요한 환경조건과 발생가능한 문제점을 공유하고 이를 통해 무인 잠수정 운항기술 개발 시행착오를 줄이는데에 기여하였으며 2019년 4월 3일 KRISO, KIST, KOPRI 3개기관 “수중해양탐사/남극 육상탐사 활용가능 로봇개발관련 워크샵”에서 “남극 테라노바만 무인탐사로봇 관측과 향후 극지빙권연구에의 활용”발표 등을 통해 적극적으로 국내 무인 탐사 기술 개발에 기여하고 있다.

나. 극지자료 분석기술

(1) 인공위성 고도계 Swath processing 기법

2010년 발사된 Cryosat-2 인공위성은 최근 극지의 표면 고도를 정밀하게 관측하는 미션을 계속 수행하고 있다. Cryosat-2는 369일의 repeat cycle을 가지고 있어서 이전의 ICESat 인공 위성 고도계에 비하여 매우 조밀한 공간 밀도를 가지는 자료를 제공하고 있다. Cryosat-2는 레이더파를 송신하여 반사되어 오는 신호의 시간을 측정하여 반사면의 고도를 측정하는데, 해상도를 높이기 위하여 Synthetic Aperture Radar (SAR) 방식의 기법을 이용할 뿐 아니라, 두 개의 안테나를 사용하는 interferometer를 이용하여 반사면의 위치를 정밀하게 계산한다. 빙상의 고도 변화를 산출하는데 예는 POCA(Point of Closest Approach), 즉 가장 가까운 반사점에서 반사된 신호의 위치를 이용하며, 이 POCA 반사점들은 Cryosat-2 L2 데이터로 제공된다. 하지만, 표면에 굴곡이 심할 경우, POCA 반사점들이 존재하지 않는 지역이 다수 발생한다. 예를 들면, 빙저호들은 수리학적 포텐셜이 낮은 지역에 부존하기 때문에, 보통 빙저호 위의 빙하 표면은 보통 움푹 들어간 형태를 가지고 있다. 이런 지역에서는 움푹 들어간 지역의 가장자리에서 반사된 반사파가 먼저 도달하기 때문에 빙저호 위에는 POCA 반사점이 매우 희박해지게 된다. 이러한 단점을 보완하고 빙저호 수위를 탐지하기 위하여 Swath 처리 기법을 자체적으로 개발하였다.

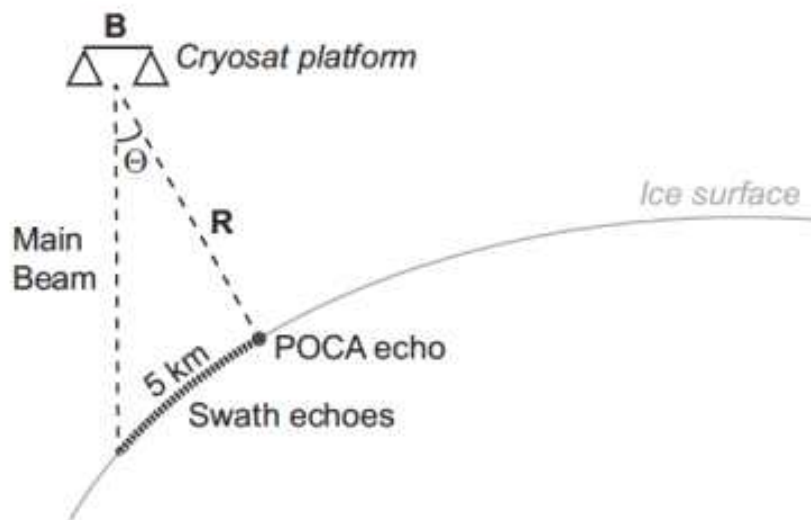


그림 637 Swath 자료처리기법의 개념도 (Gourmelon *et al.*, 2017)

자체 개발된 Swath 기법을 이용하여 데이비드 빙하 빙저호 지역의 수치 고도 모델을 작성하였다. 2016/2017 하계기간에 수행된 항공 탐사에서 획득된 레이저 고도계 자료와 비교할 경우, 기존 수치 고도 모델(BEDMAP2, Cryosat-2 L2, ICESat)에 비하여 현저히 개선된 결과를 제공한다.

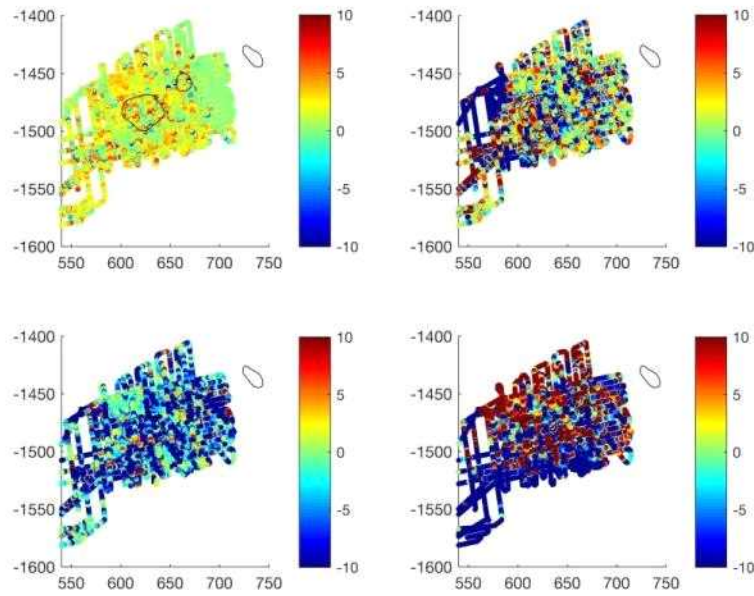


그림 638 수치 고도 모델(DEM)과 항공 레이저 고도계 탐사 자료의 비교: (좌상) Cryosat-2 Swath 기법 DEM, (우상) BEDMAP2 DEM, (좌하) Cryosat-2 L2 DEM, (우하) ICESat DEM

Cryosat-2 Swath processing 기법은 0.5도 - 2도 이내의 경사를 가지고 있는 지역에서 가장 적합한 자료 처리 기법으로 이 연구에서 적용한 데이비드 빙하 지역 외에도 서남극 지역 등의 경사진 빙하 지역에서 적용 가능하여, 서남극 지역 현장 탐사 지역 선정, 남극 전역의 질량 손실 연구 등에 많은 기여를 할 것으로 예상된다.

(2) 빙하 변동에 의한 해수면의 지역적 변동 분석 기술 개발

육지의 물과 얼음 손실에 의한 해수면 변화는 전 지구 바다의 해수면을 상승시키는 작용을 한다. 가령, 남극 반도와 같이 전 지구 규모에 있어 상대적으로 작은 지역에서 얼음이 유실될 경우에도 바다의 특성상 전 지구 바다의 해수면을 상승시키게 된다. 지금까지 대부분의 해수면 변화 연구 역시 전 지구 평균 해수면 상승률을 이용하여 해수면 상승의 효과를 계산해 왔다. 하지만, 해수면은 중력에 의해 자유롭게 재배치 되기 때문에, 해수면 변동은 전 지구 바다에 동일하게 발생하지 않는다. 서남극과 같이 많은 빙하 유실이 있는 지역은 전 지구 평균 해수면을 상승시키는데 크게 영향을 주지만, 서남극 일대의 해수면은 오히려 하강하게 된다. 이는, 서남극 빙하 유실에 의한 지역적인 중력 가속도 감소로 해수면이 서남극에서 더 먼 바다로 재배치가 되기 때문이다. 반대로, 동 남극은 얼음 질량이 증가하여 전 지구 해수면을 하강시키는 역할을 하고 있는데, 이 지역은 중력 가속도 증가로 오히려 인근 바다의 해수면이 상승을 하고 있다. 이러한 지역적인 해수면 변동을 효과를 Self-Attraction and Loading (SAL) 이라고 한다. 이론적으로 SAL효과는 이미 밝혀져 있었으나, 그 효과가 명확하게 관측되지는 못하였다. 그 이유는, SAL효과가 주로 해안선 인근에서 가장 뚜렷히 발생하는데, GRACE를 비롯한 인공위성 자료들은 해안선 인근 바다에서 관측 에러가 매우 크기 때문이다. 이번 연구

를 통해, SAL효과를 계산하는 모델과 GRACE의 고유 에러인 leakage error를 보정하는 자료 처리 기법을 새롭게 개발하여, SAL에 의한 해수면의 지역적인 변동을 관측적으로 최초로 확인할 수 있어 향후 해수면 변동 연구와 모델링 결과 검증에 활용할 수 있을 것으로 기대된다

다. 극지 빙상 미래변화 예측 기술

▷ 남극 지역 빙상의 미래 변화 예측 기반 전지구 해수면 변동 예측값을 산출함으로써, 해수면 상승에 따른 국내 연안 침수재해도 작성 원천자료 제공 등 연안지역 재해대응 정책 수립의 과학적 근거를 제공

▷ 최신 현장 관측자료 기반 빙상동역학 모델 성능을 개선함으로써 극지역 용빙에 따른 전지구 해수면 상승 예측성 제고. 따라서 극지역 용빙에 따른 해수면 상승에 의해 발생하는 연안침수 등 대형재난 대응에 필요한 예측기술 확보로 피해예방 및 비용 절감 가능

▷ 모델링

- 동남극 빅토리아랜드 데이비드 빙하-드라이갈스키 빙설 지역의 빙하 흐름을 역학적으로 재현·예측할 수 있는 빙상동역학 모델 시스템을 구축함으로써, 이를 활용하여 향후 빙상관련 물리기작 이해, 관측자료 검증, 모델의 예측성 증진, 다양한 과거 및 미래변화 시나리오 산출 등 다양한 연구로의 확장성 확보

- 빙상동역학 모델 개선으로 남극 및 전지구 예측 정확도 향상에 기여함으로써 IPCC 등 기후변화 관련 국제회의 어젠다 개발 및 기후변화 재해 문제에 직면한 인류 공동의 현안 해결 및 신기후 체제 선제적 대응 방안 마련 가능

▷ 예측 기술

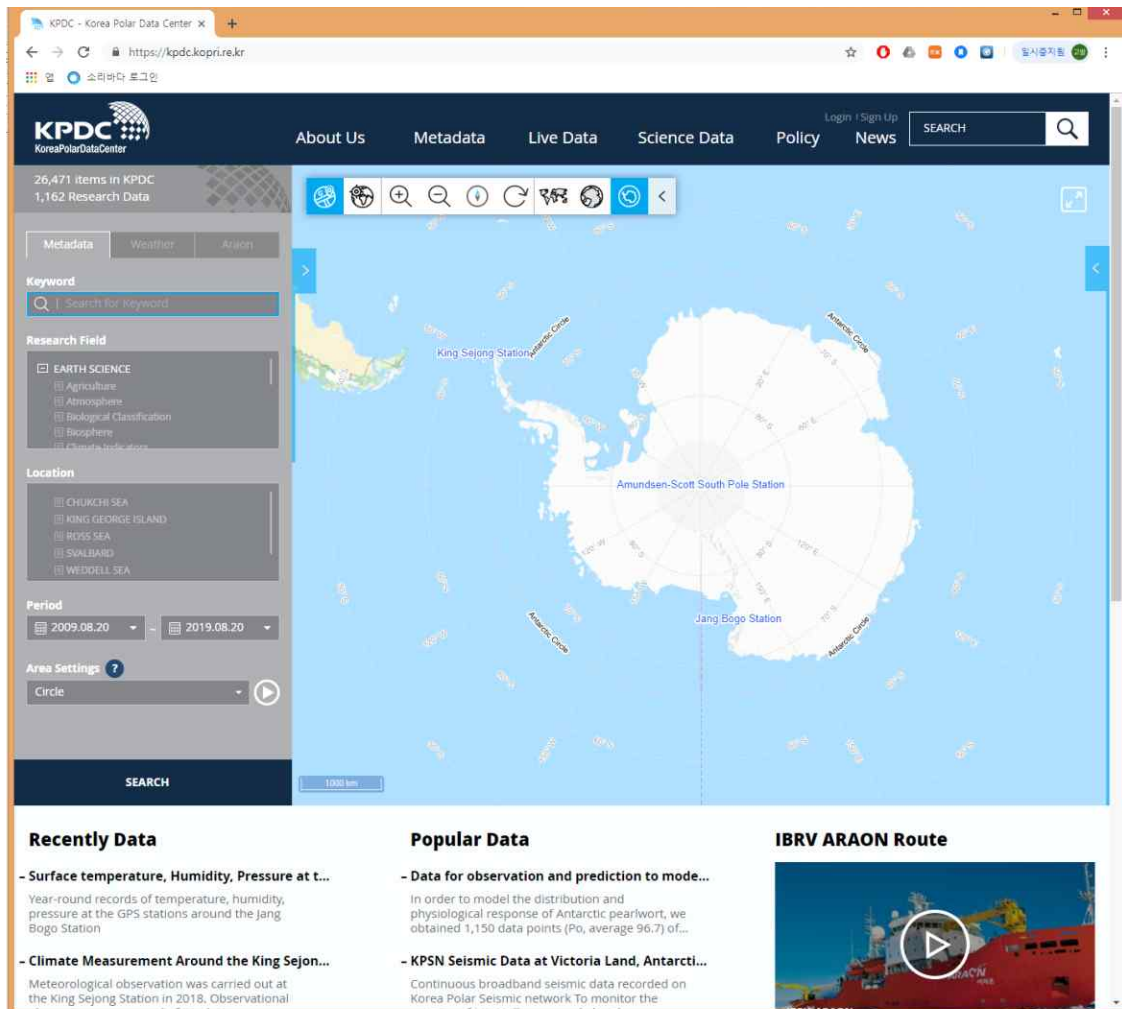
- 국내 최초로 빙상동역학 모델 시스템을 구축하고 활용함으로써 미래 빙하변화 및 해수면 상승 예측에 핵심기술로 사용되는 빙상동역학 모델 개발·운용 기술 확보 및 새로운 분야 개척

- 최신 현장관측 자료 기반 빙상동역학모델 시스템 성능 개선을 통해 극지 현장관측의 필요성·중요성을 역설

제5장. 연구개발성과의 활용계획

1. 관측자료 활용계획 (윤숙영)

- 한국극지데이터센터(<https://kpsc.kopri.re.kr/>)에 사업에서 획득된 모든 메타데이터를 등록하여 누구나 검색을 통해 자료를 찾아보고 확인할 수 있도록 함



연차별 획득된 자료 리스트와 KPDC 링크 URL

	No.	Metadata ID	Title	URL
1차년도(PM 14020)	1	KOPRI-KPDC-00001062	CTD profiles observed in the Terra Nova Bay, Ross Sea, in December, 2014 (ANA05A)	https://dx.doi.org/doi:10.22663/KOPRI-KPDC-00001062.1
	2	KOPRI-KPDC-00001064	LADCP data observed in the Terra Nova Bay, Ross Sea, in December, 2014 (ANA05A)	https://dx.doi.org/doi:10.22663/KOPRI-KPDC-00001064.1
2차년도	3	KOPRI-KPDC-0	NIWA oceanographic mooring data	https://dx.doi.org/doi:10.22663/

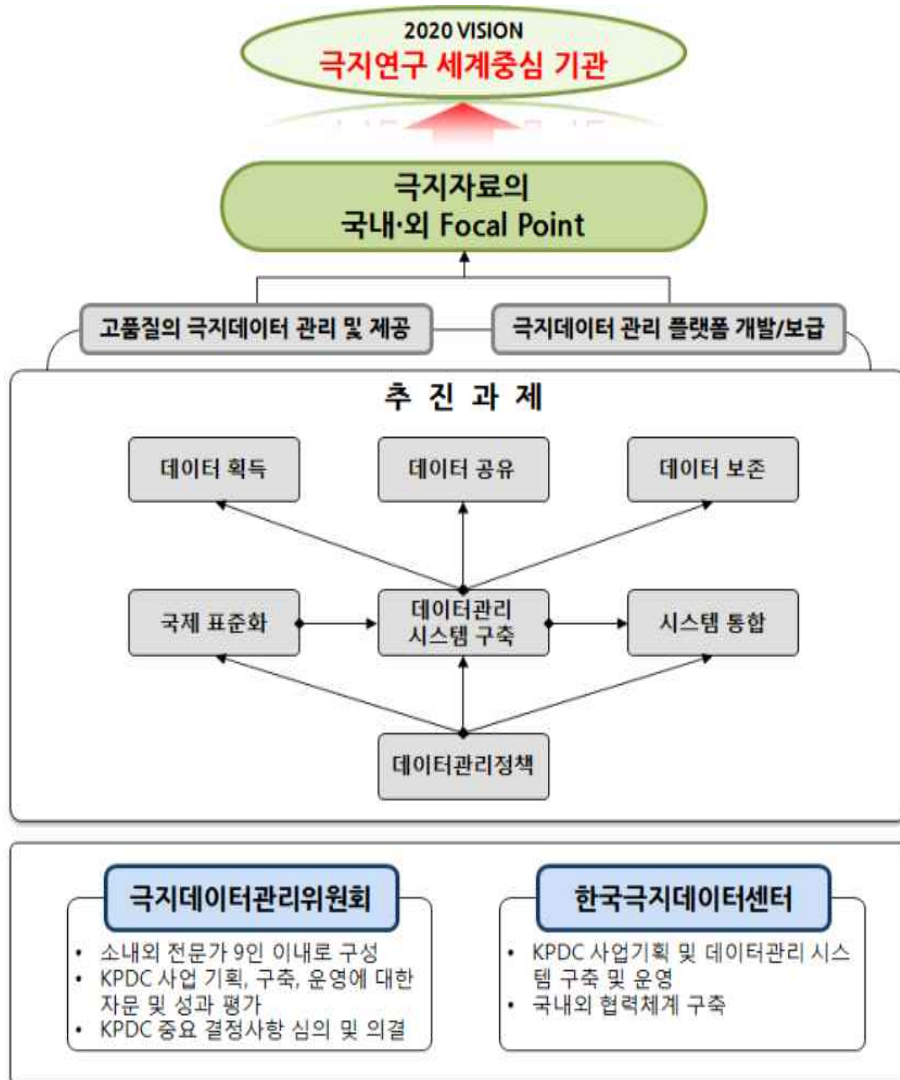
도(PM 15020)		0001060	in the Drygalski Ice Tongue North 2015	KOPRI-KPDC-00001060.1	
	4	KOPRI-KPDC-0 0001061	LADCP data observed in the Terra Nova Bay, Ross Sea, in December, 2015 (ANA06A)	https://dx.doi.org/doi:10.22663/ KOPRI-KPDC-00001061.1	
	5	KOPRI-KPDC-0 0000601	Depth profiles of temperature and salinity in the Ross Sea, Antarctica, in December 2015	https://dx.doi.org/doi:10.22663/ KOPRI-KPDC-00000601.1	
	6	KOPRI-KPDC-0 0000600	Ice sheet monitoring GPS data at David Glacier in 2015	https://dx.doi.org/doi:10.22663/ KOPRI-KPDC-00000600.1	
	7	KOPRI-KPDC-0 0000599	Superconducting gravimeter data at Jang Bogo Station in the installation stage	https://dx.doi.org/doi:10.22663/ KOPRI-KPDC-00000599.1	
	8	KOPRI-KPDC-0 0000598	Seismic data collected from KPSN at David Glacier and Terra Nova Bay area in 2015	https://dx.doi.org/doi:10.22663/ KOPRI-KPDC-00000598.1	
	9	KOPRI-KPDC-0 0000602	Ice sheet monitoring system (AMIGOS) data at Drygalski Ice Tongue, Nansen Ice Sheet, and Campbell Glacier in 2015	https://dx.doi.org/doi:10.22663/ KOPRI-KPDC-00000602.1	
	3차년 도 (PM16 020)	10	KOPRI-KPDC-0 0001161	KPSN Seismic Data at Victoria Land, Antarctic 2016	https://dx.doi.org/doi:10.22663/ KOPRI-KPDC-00001161.2
		11	KOPRI-KPDC-0 0000750	Hydroacoustic data in Terra Nova Bay, 2016	https://dx.doi.org/doi:10.22663/ KOPRI-KPDC-00000750.2
12		KOPRI-KPDC-0 0001063	CTD profiles observed in the Terra Nova Bay, Ross Sea, in January, 2017 (ANA07C)	https://dx.doi.org/doi:10.22663/ KOPRI-KPDC-00001063.1	
13		KOPRI-KPDC-0 0001065	LADCP data observed in the Terra Nova Bay, Ross Sea, in January, 2017 (ANA07C)	https://dx.doi.org/doi:10.22663/ KOPRI-KPDC-00001065.1	
14		KOPRI-KPDC-0 0000749	NIWA oceanographic mooring data in the Drygalski Ice Tongue North 2016	https://dx.doi.org/doi:10.22663/ KOPRI-KPDC-00000749.1	
15		KOPRI-KPDC-0 0000748	Ice sheet monitoring system (AMIGOS) data at Drygalski Ice tongue, Nansen Ice Sheet, and Campbell Glacier in 2016	https://dx.doi.org/doi:10.22663/ KOPRI-KPDC-00000748.1	
16		KOPRI-KPDC-0 0000747	Ice sheet monitoring GPS data around the Jang Bogo Station in 2016	https://dx.doi.org/doi:10.22663/ KOPRI-KPDC-00000747.1	
4차년 도	17	KOPRI-KPDC-0 0000899	Hydroacoustic data in Terra Nova Bay, 2017	https://dx.doi.org/doi:10.22663/ KOPRI-KPDC-00000899.3	

(PM17 020)	18	KOPRI-KPDC-0 0000901	Ice sheet monitoring GPS data around the Jang Bogo Station in 2017	https://dx.doi.org/doi:10.22663/ KOPRI-KPDC-00000901.1
	19	KOPRI-KPDC-0 0000902	Ice Sheet monitoring system(AMIGOS)data at Drygalski Ice tongue, Nansen Ice Sheet, and Campbell Glacier in 2017	https://dx.doi.org/doi:10.22663/ KOPRI-KPDC-00000902.1
	20	KOPRI-KPDC-0 0000903	ApRES (Automated phase-sensitive Radar Echo Sounding) data at Nansen Ice Sheet	https://dx.doi.org/doi:10.22663/ KOPRI-KPDC-00000903.1
	21	KOPRI-KPDC-0 0000905	LDEO oceanographic mooring data 2017	https://dx.doi.org/doi:10.22663/ KOPRI-KPDC-00000905.1
	22	KOPRI-KPDC-0 0000904	Ocean Bottom Seismometer Data at Antarctic in 2017	https://dx.doi.org/doi:10.22663/ KOPRI-KPDC-00000904.1
	23	KOPRI-KPDC-0 0000906	NIWA oceanographic deep mooring data in the Drygalski Ice Tongue 2017	https://dx.doi.org/doi:10.22663/ KOPRI-KPDC-00000906.1
	24	KOPRI-KPDC-0 0000898	NIWA oceanographic mooring data in the Drygalski Ice Tongue North 2017	https://dx.doi.org/doi:10.22663/ KOPRI-KPDC-00000898.1
	25	KOPRI-KPDC-0 0000897	NIWA oceanographic mooring data in the Drygalski Ice Tongue South 2017	https://dx.doi.org/doi:10.22663/ KOPRI-KPDC-00000897.1
	26	KOPRI-KPDC-0 0000896	LADCP data observed in the Terra Nova Bay, Ross Sea, in March, 2018 (ANA08C)	https://dx.doi.org/doi:10.22663/ KOPRI-KPDC-00000896.1
	27	KOPRI-KPDC-0 0000895	CTD profiles observed in the Terra Nova Bay, Ross Sea, in March, 2018 (ANA08C)	https://dx.doi.org/doi:10.22663/ KOPRI-KPDC-00000895.1
5차년 도 (PM18 020)	28	KOPRI-KPDC-0 0001162	KPSN Seismic Data at Victoria Land, Antarctic 2017	https://dx.doi.org/doi:10.22663/ KOPRI-KPDC-00001162.1
	29	KOPRI-KPDC-0 0001169	KPSN Seismic Data at Victoria Land, Antarctic 2018	https://dx.doi.org/doi:10.22663/ KOPRI-KPDC-00001169.5
	30	KOPRI-KPDC-0 0001171	Hydroacoustic data in Terra Nova Bay, 2018	https://dx.doi.org/doi:10.22663/ KOPRI-KPDC-00001171.1
	31	KOPRI-KPDC-0 0001168	NIWA oceanographic deep mooring data in the Drygalski Basin (deep trough) 2018	https://dx.doi.org/doi:10.22663/ KOPRI-KPDC-00001168.1
	32	KOPRI-KPDC-0 0001167	NIWA oceanographic deep mooring data in the Drygalski Ice Tongue 2018	https://dx.doi.org/doi:10.22663/ KOPRI-KPDC-00001167.1

33	KOPRI-KPDC-0001166	NIWA oceanographic mooring data in the Drygalski Ice Tongue North 2018	https://dx.doi.org/doi:10.22663/KOPRI-KPDC-00001166.1
34	KOPRI-KPDC-0001165	CTD profiles observed in the Terra Nova Bay, Ross Sea, in January, 2019 (ANA09B)	https://dx.doi.org/doi:10.22663/KOPRI-KPDC-00001165.1
35	KOPRI-KPDC-0001164	LADCP data observed in the Terra Nova Bay, Ross Sea, in January, 2019 (ANA09B)	https://dx.doi.org/doi:10.22663/KOPRI-KPDC-00001164.1

극지연구소에서 운영하는 극지지진관측망은 국제디지털지진관측망 (International Federation of Digital Seismograph Network; FDSN)에 등록됨 (doi:10.7914/SN/KP)

- 자료공유에 관한 모든 사항은 극지연구소 ‘극지데이터관리규정’에 따름



- 학회 등에 관측망과 관측자료 활용 연구를 지속적으로 소개하여 자료 활용 도모함

극지연구소		부스 번호 9
주 소 인천시 연수구 송도미래로 28 극지연구소		
전 화 032-760-5410	대표자 윤호일	
담당자 문숙영	이메일 yun@kopri.re.kr	
<p>극지연구소에서는 쇄빙연구선 아라온호를 비롯하여 인공위성 원격탐사 및 무인 관측 등 다양한 방법으로 남북극 해역을 관측하고 있다. 빙 전시 부스에서는 극지연구소에서 수행 중인 연구 사업, 여러가지 관측 장비 및 현장에서 획득한 관측 자료를 소개하고 도출된 주요 연구 성과를 전시할 계획이다.</p>		



2019 춘계 해양학회 극지 관측망/연구 홍보 부스 운영

2. 극지 관측망 운영/관측/연구수행 역량을 미래 빙하 연구에 활용 (이원상)

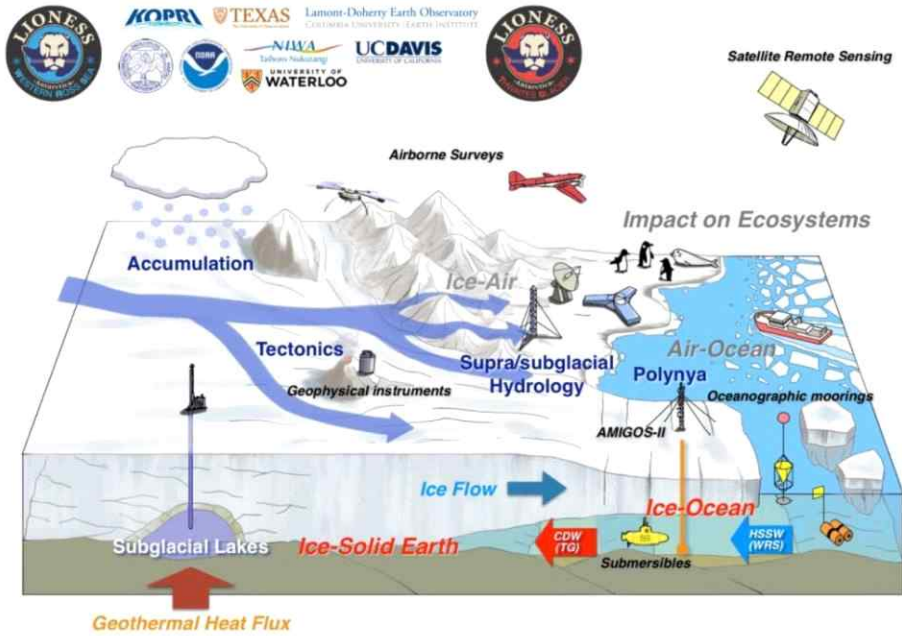
- 관측을 수행하면서 빙권 변화 원인 규명과 미래 예측에 있어서 중요한 관측 요소를 파악하고 실질적으로 운용할 수 있는 기술과 역량을 국제협력 다학제 빙권변화 종합관측 플랫폼인 LIONESS를 통해 확보하였다. 이를 활용하여 가까운 미래에 붕괴가 예상되는 서남극 스웨이츠 빙하 지역에 진출하여 현장 관측 기반으로 고품질의 다학제 빙권변화 관측 자료를 획득하고 빙상-해수면 변동 수치모델에 반영하여 서남극 지역 돌발 붕괴에 의한 해수면 상승을 예측 연구에 활용하여 전 인류 현안문제를 해결하는데 기여코자 함

- 해수면 상승 예측 불확실성의 대부분을 차지하는 남극 빙상의 거동 예측의 난관은 1. 불충분한 경계조건의 해상도, 2. 빙상/빙붕 붕괴 물리적기작의 복잡성, 3. 빙상과 암권 경계의 미끄러짐 작용에 관한 지식 부족 등으로부터 기인. 빙붕의 단절(calving)이나 CDW에 의한 빙저 용융량 증가를 고려하게 되면 붕괴속도의 추가 가속화 예상

- 스웨이츠 지역에서는 용융 기작을 밝히기 위해 육상 하부 Cavity/빙저호/화산 지역 집중적으로 관측소를 설치하여 탐사를 수행하고 해양에서는 따뜻한 CDW 유입 경로를 따라 수행,

해양 계류장비 설치할 계획

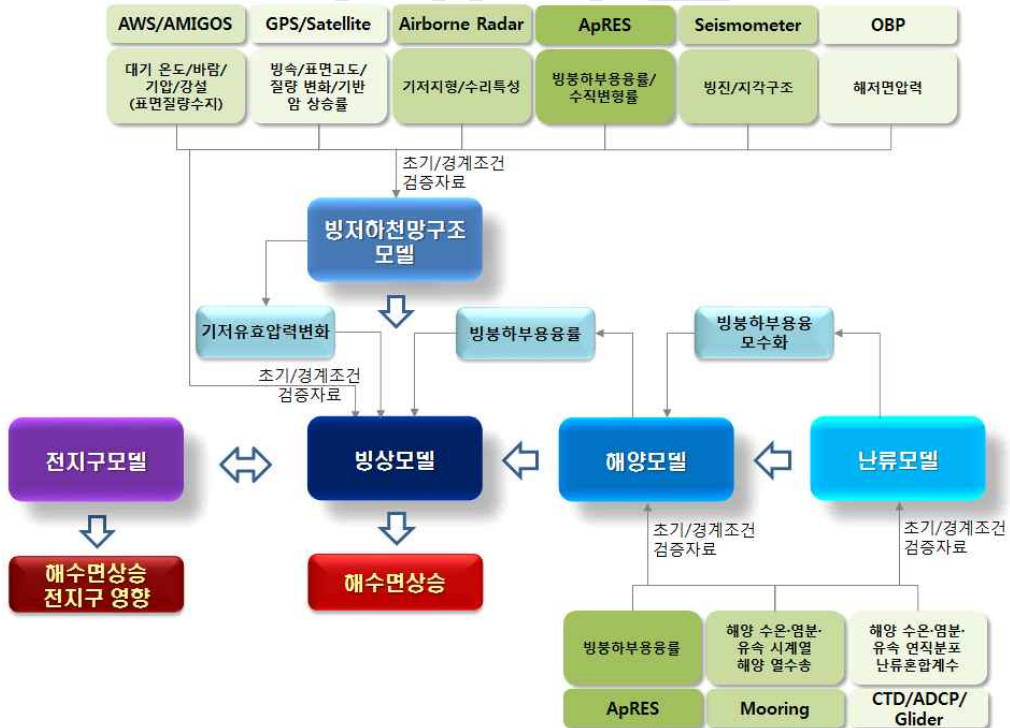
- 장보고 기지에서는 장기 관측 자료 확보를 통해 장기 빙권 환경 변화 트렌드를 관측하고 서남극 스웨이츠 지역과의 용융기작 차이를 규명하기 위하여 현재 관측망을 유지



Land-Ice/Ocean Network Exploration using Semiautonomous Systems

국제협력 다학제 빙권변화 관측 플랫폼 LIONESS

- 관측 요소 및 모델 요소의 유기적 연계성



관측-탐사자료	1차산출물	수치모델	최종결과물
ApRES CTD/CDCP/Glider Mooring	빙봉하부용융률 수온, 염분, 유속 시계열 수온, 염분, 유속 연직분포 난류혼합비	난류모델 PALM LES	<ul style="list-style-type: none"> 빙봉하부 혼합층의 유동 특성 규명 및 빙봉하부용융률 관련 구체적 상관관계 규명 연한얼음(frazil ice) 역학의 영향성 평가 해양모델 빙봉하부용융 모수화 개선점 도출
ApRES CTD/CDCP/Glider Mooring	빙봉하부용융률 수온, 염분, 유속 시계열 수온, 염분, 유속 연직분포 빙봉하부 캐비티로의 열수송량	해양모델 ROMS	<ul style="list-style-type: none"> 빙봉하부 캐비티 순환 모의성능 개선 개선된 빙봉하부용융률 산출 해류 및 와동에 의한 열수송량 산출
ApRES Airborne Radar GPS/Satellite Seismometer OBP	반사도 빙저정밀지형도 빙하 두께 변화 시계열 빙하이동 속도 시계열 암권 지진파 속도구조 해저면 압력	빙저하천망구조 모델 GlaDS	<ul style="list-style-type: none"> 빙상하부 시공간적 수문 변동성 도출 수문 변동성과 기저 마찰변동 관계성 산출 개선된 기저 유효압력변화 산출
ApRES Airborne Rader GPS/Satellite AWS/AMIGOS	빙봉하부용융률 빙저정밀지형도 빙하이동 속도 표층기상조건 빙상 표면질량 수지	빙상모델 ISSM	<ul style="list-style-type: none"> 빙하이동 속도 및 해수면 상승 정확도 개선 미래 전지구 해수면 상승 시나리오 산출
Synthesis	담수속	전지구모델 IPCC ESMs	<ul style="list-style-type: none"> 남극 빙하 용융에 영향을 주는 대규모 대기-해양 순환 특성 분석 남극 용융에 의한 담수속 방출 및 해수면 상승의 전지구적 영향 분석

- “서남극 스웨이트 빙하 돌발붕괴의 기작규명 및 해수면 상승 영향 연구” 사업 계획



연구목표	1차년도	2차년도	3차년도	4차년도
스웨이츠 빙하를 중심으로 서남극지역 빙하의 돌발 붕괴 기작 규명 및 전 지구적 해수면 상승에 미치는 영향 평가	스웨이츠 빙하 육상 및 해역 관측망 구축	지역 특성별(TG, TNB) 빙하 이동 및 빙하 붕괴 특성 비교 연구	관측 자료 기반의 스웨이츠 빙하 붕괴 원인 분석	최신 경계조건 기반의 스웨이츠 빙하 붕괴 예측 및 해수면 상승 시나리오 도출
연구내용	1차년도	2차년도	3차년도	4차년도
환남극 심층수 유입에 의한 빙봉 용융기작 규명	<ul style="list-style-type: none"> 해양물리 연속 시계열 자료수집 세부안 수립과 계류 설계 및 장비 설치 해양 탐사 자료 획득 및 처리, 분석 및 연속 시계 	<ul style="list-style-type: none"> 해양 탐사 자료 분석 환남극 심층수 유입량 및 빙봉 하부 용해과정 분석과 관측 결과 해석 	<ul style="list-style-type: none"> 계류 설계 보완 및 해양물리 연속 시계열 자료수집 세부안 수립 해양 탐사 자료 획득과 처리 및 계류 시계열 장비 회수와 분석 	<ul style="list-style-type: none"> 해양 탐사 자료 및 연속 시계열 자료 분석 환남극 심층수 특성, 유입량, 열 수송 해석 및 변동 원인 규명

	<ul style="list-style-type: none"> 열 자료 수집 개선안 수립 한남극 심층수 변동 정량화 및 빙봉 하부 용융 기작 연구 해양모델과 난류 모델 구축 및 기 후 평균장 모의 	<ul style="list-style-type: none"> 관측 및 난류모델을 이용한 빙봉 하부 혼합 물리과정 검증 	<ul style="list-style-type: none"> 탐사 자료를 활용한 해양 모델 개선 	<ul style="list-style-type: none"> 관측, 모델 기반 융해과정 변동 해석 및 원인 규명
서남극 빙상 질량 손실량 평가 기반 빙상용융 가속화 원인 규명	<ul style="list-style-type: none"> 인공위성 고도계를 이용한 서남극 빙상 부피 변화 평가 빙하 거동 관측망 구축 (GPS/ApRES) 기반암 상승 및 화산 관측망 구축 (GPS) 표면 질량수지 (SMB) 관측망 구축 	<ul style="list-style-type: none"> 서남극 지역 빙저호 활동성과 빙상 손실의 상관성 규명 GRACE 인공위성을 통한 서남극 질량 변화 평가 지반선 후퇴 현장 관측 기법 개발 원격탐사를 통한 빙봉/빙산 모니터링: 하부용융량 산출 	<ul style="list-style-type: none"> 지반선 부근 빙하 배출량 정밀 추정 인공위성 고도계 및 GRACE 자료 복합 역산: 빙하 손실 밀도 산출 빙상 질량 손실 원인 규명 현장 관측망 유지 및 빙봉 하부 용융량 관측망 구축 	<ul style="list-style-type: none"> 기반암 상승량 평가 및 후빙기반동 (PGR) 모델 개선 화산-빙상 거동 상관성 규명 서남극 빙상 질량 손실 가속도 산출 빙상용융 가속화 원인 규명
스웨이츠 빙하 질량 손실에 의한 해수면 변동 특성 규명	<ul style="list-style-type: none"> 해저면 압력계 계류 	<ul style="list-style-type: none"> 고해상도 (mesh-based) 해수면 방정식 해 도출 	<ul style="list-style-type: none"> 해저면 압력계 (OBP) 회수 서남극 빙하 손실에 의한 서남극 바다 해수면 변동 계산 	<ul style="list-style-type: none"> 해수면 변화 실측 자료와 해수면 방정식의 해와 비교 rotational feedback 을 포함한 전지구 해수면 변동 계산
빙저하천망 변화 특성 기반 빙하 이동 가속화 원인 규명	<ul style="list-style-type: none"> 항공, 육상 탐사 자료 획득 GPS 및 인공위성 고도계를 통한 수문 변동성 해석 빙저 수문 예비 수치 모델 구축 	<ul style="list-style-type: none"> 빙상 하부 지형 자료 개선 및 공간 수문 분포 도출 열수시추 장비 구축 및 기술협의 GPS 및 인공위성 고도계를 통한 수문 변동성 해석 빙저 수문 변동성 모델(GlaDS) 활용 민감도 분석 연구 	<ul style="list-style-type: none"> 항공, 육상 탐사 자료 획득 열수시추 활용 빙봉/지반선하부 관측자료 획득 GPS 및 인공위성 고도계를 통한 수문 변동성 해석 빙상 동역학 모델 빙관암권 경계조건을 위한 시공간적 유효 압력 변화자료 생산 	<ul style="list-style-type: none"> 현장 관측, 인공위성, 수문 모델 융합 자료 기반 수문 변동 원인 규명
	<ul style="list-style-type: none"> 다심도 해수 동위원소 시료 및 해빙, 스노우 팻, 편코어 시료 채취 	<ul style="list-style-type: none"> 해수의 안정동위원소분석을 통한 심층수와 담수 분리 	<ul style="list-style-type: none"> 해수시료 및 육상 시료 채취 해수에서 담수 기여도 계산 	<ul style="list-style-type: none"> 재분석 자료를 이용한 용설량 계산 해수의 담수 기여도 변동 분석

	- 해수의 동위원소 분석법 개발	- 스노우피트와 편코어 분석을 통한 강설량분석	- 강설량 분석을 통한 빙하 질량 계산	
서남극의 급격한 빙하 소멸 기작을 규명하여 스웨이트 빙하 붕괴 시점 예측	- 스웨이트 지역 빙상동역학 모델 구축 - 관측자료와 비교 검증 기반 빙상동역학 모델 안정화 - 미래예측 실험에 사용할 IPCC RCP 기후변화 시나리오 자료 확보 - 시나리오 자료를 빙상동역학 모델 강제력으로 변환	- 빙상동역학 모델 성능 검증 및 개선점 도출 - 지역별 빙상동역학 모델 모의 특성 분석 - IPCC RCP 시나리오를 적용하여 지역규모 빙권 미래 예측실험 수행 - 시나리오별 예측된 빙하 소멸 기작 특성 분석	- 현장관측 기반 새로운 물리기작 및 경계조건 빙상동역학모델 반영 - 빙상동역학 모델의 빙속 모의성능 개선 - 시나리오 업데이트 및 미래 예측 실험 수행 및 결과 분석	- 민감도 실험 기반 빙상동역학 모델 고도화 - IPCC RCP 시나리오별 스웨이트 빙하 비가역적 붕괴 시점 예측 - IPCC RCP 시나리오별 빙상 질량 손실 추세 및 손실량 예측
스웨이트 빙하 돌발 붕괴에 의한 전지구 평균 해수면 상승 예측	- 빙상질량-해수면 변동 상관관계 및 신뢰도 기준 분석 - 남극 대기 주요 변동 모드에 따른 빙붕-빙상 용융 메커니즘 진단 - 남극 담수 강제력에 의한 전지구 기온변화 분석 - 동아시아 기후변화에 미치는 영향 분석	- 빙상동역학 다중 모델 상호비교연구 자료 확보 및 미래예측 결과 특성 분석 - 남극 대기 주요 변동에 따른 빙붕-빙상 용융 실험 수행 - 전지구 모형을 이용한 남극 빙붕-빙상 용융 실험 수행 및 담수 강제력 산출 - 서남극 담수 강제력에 의한 전지구 영향 분석	- IPCC RCP 시나리오별 빙상동역학 다모델 해수면 상승 예측 결과 비교분석 - 장주기 기후변화에 따른 남극 대기 변동성 변화 규명 - 남극 담수 강제력 강도에 대한 전지구 기후변화 민감도 분석 - ENSO 및 열대 기후 변동에 미치는 영향 분석	- IPCC RCP 시나리오를 반영한 스웨이트 빙하 붕괴의 전 지구적 해수면 상승 기여도 산출 및 신뢰도 제시 - 미래 전지구 및 남극 대기 변동성 변화에 따른 빙붕-빙상 용융 영향 예측 - 서남극 빙붕 용융과 동아시아 기후변화 관련성 종합적 고찰 및 개념 모형 산출

- 인공위성 고도계/InSAR 연구는 빙하 두께 변화를 탐지하는데 매우 중요한 연구 방법으로, 극지에서는 현장 접근이 어려워 주기적인 모니터링에 고비용이 소요되는 상황에서 적은 비용으로도 빙하 거동 상시 모니터링에 활용함 (이준기)

- 인공위성을 활용한 빙하 거동의 상시 모니터링 자료는 빙하 동역학 모델의 공간적 모델 파라미터로 사용되어 빙하의 거동 미래 예측에 활용함 (이준기)

- 육상 GPS/AMIGOS 등 측지 네트워크는 원격탐사에서 제공할 수 없는 정밀한 시간에 따른 거동 자료를 제공하여 향후 빙하 거동을 예측하는데 활용함 (이준기)

- 무인항공기/항공기를 이용한 정밀 측지 기술에 의한 자료 획득을 통해 남극 빙권의 국제적 DB(Bedmap 등)에 자료를 제공함으로써 국제 공동 연구에 기여할 수 있으며, 극지뿐만 아니라 국내에서도 지형도 작성, 지표면 변화 탐지, 산사태 모니터링, 조간대 지형 매핑 등 다양

한 지질/지구물리 분야에 활용 가능 (이원상)

- 전자기적 지구물리 탐사 방법을 통한 빙하 하부 지전기구조 규명은 지진파 자료와의 복합 역산 등을 통해 지체구조 규명의 정확도 향상에 활용 (임기영)
- 극지환경 자기지전류 탐사 기법은 현재 매우 제한되어있는 극지에서의 전자기적 지구물리 탐사 기법 적용 분야를 확장시켜 현재 지진파 토모그래피 등에 국한되어 있는 남극 하부 지체 구조 규명에 널리 활용 (임기영)
- 극지연구소 타 연구 사업에서 뉴질랜드-미국 MT 연구팀과의 공동 연구를 조율 중이며, 공동 연구 수행 시, 개발된 MT 탐사 장비를 해외 장비와 남극 환경에서 비교/검증 (이춘기)
- 빙원 탐사기술은 빙하시추, 대기과학, 천문, 지구물리 등 남극 대륙 연구 수행에 활용 (박용철)
- 초전도 중력계를 이용한 중력 모니터링은 남극 질량 균형 규명 뿐 아니라 장기적으로 로스해 지역의 해수면 상승 신호를 포착하는데 활용 (서기원)
- 장보고 기지 부근의 빙하 용빙수에 관한 해양자료는 해양 미생물 군집 변화에 대한 기초 자료 제공 및 빙권 변동과 연계된 생태계 모델 연구에 활용 (황청연, 윤승태)
- 연안 빙하 변동에 따른 해빙 분포 변화가 펭귄류의 번식생태에 미치는 영향을 파악함으로써 기후변화에 따른 해양 환경 변화가 생태계에 가져올 파급효과를 예측하는데 활용 (이원상)

3. 빙권 수치예측 모델 국내 활용 방안 (진경)

- 극지역 특성상 국내와의 환경 차이로 인하여 활용 수요는 제한적일 것으로 예상
- 극지 데이터센터에 관측자료와 개발된 물리모델의 Meta-data 공개
- 국가수리과학연구소와 자료 공유, 빙권 모델링 전문 인력 양성에 활용
- 도출된 예측 결과를 한국 환경정책 평가연구원(KEI)등에 원천자료 제공 국내 연안 예측 정확도 향상 및 항만 안전 대처에 기여하도록 유관기관과 적극 협력

4. 연구 성과 확산 및 홍보 전략 (이원상)

- 지구온난화로 인해 급변하는 전 세계적 이상 기후 현상으로 인해 극지 환경에 대한 국민적 관심사가 높아지고 있으므로 지속적인 언론 홍보와 대중 강연을 통해 세계 10위권 경제 규모인 우리나라의 위상에 맞는 인류 현안 문제 해결을 위한 극지에서의 과학 연구수행을 알림으로서 국가 자긍심을 고취시킬 수 있도록 함
- 초등학교로부터 전문영역에 이르기까지 남극과 기상 그리고 해수면 상승 분야에서 교육적 자료로 활용될 수 있도록 예측 결과를 바탕으로 빙하용융과 지각 반등, 해수면 상승을 한눈에 확인할 수 있도록 이미지/영상 자료를 제작 배포
- IPCC 등 기후변화 관련 국제회의 어젠다 개발하기 위해 IPCC 7차 평가보고서 작성/전문가리뷰 참여하며 UN 기후변화 협약 등 국가간 기후변화협상 관련 과학적 근거 제시 및 국제회의 어젠다 발굴하는데 적극적으로 참여. CCAMLR-MPA 대응 로스해-서남극해 해양관측 자료를 제공하여 남극 거버넌스에서의 의사 결정과정에 영향력 제고
- 국내 연안 침식 등 피해 저감 관련 연구를 하는 학계와 기관에 전 지구적 해수면 상승 예측 결과 자료를 제공할 수 있도록 협업을 도모, 기초과학 위주의 극지 연구에서 국민이 체감할 수 있는 문제 해결형 극지 연구체제로서의 전환할 수 있도록 함

제6장. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보

1. 극지에서 많이 활용되는 Slocum 글라이더 기본 운영 기술 및 극지 환경에서의 취약점 : GPS 위성 수신율이 저하되고 극지 지구자기장의 편각과 복각이 커져 나침반에 의지한 운항 방향 정확도 감소, 통신을 위해 수면에서 대기 중 결빙으로 인하여 파손 우려 증가, 안테나결빙으로 인한 수신율 저하 등의 문제가 있음, 수면에서 위치 확인이 어려운 극지 얼음 하부 환경에서는 수중음향을 이용한 잠수정 위치 결정에 활용된다.

2. 남극 빙권 변화 및 해수면 상승 연구에 크게 기여를 한 GRACE 위성의 수명이 다하여, GRACE-II 위성이 최근 발사 되었다. GRACE-II 위성은 GRACE 위성에 비해 10배 이상의 해상도를 가질 것으로 예상되어 과학계가 큰 주목을 하고 있다. 하지만, GRACE-II 위성의 가속도계에 결함이 있음이 밝혀져 아직까지 GRACE-II 위성이 관측한 결과가 배포되고 있지 않은 상황이다. 향후, 남극 빙권 및 해수면 변화 연구를 기획할 때 GRACE-II 위성 자료의 한계를 명확히 인식하는 것이 필요하다.

3. 극지에서의 MT 탐사를 위한 연구 수행

- Wannamaker *et al.* 등에 의해 극지 MT 탐사기술 적용을 위한 2차원 비저항 역산 기법 연구를 수행하고 있음

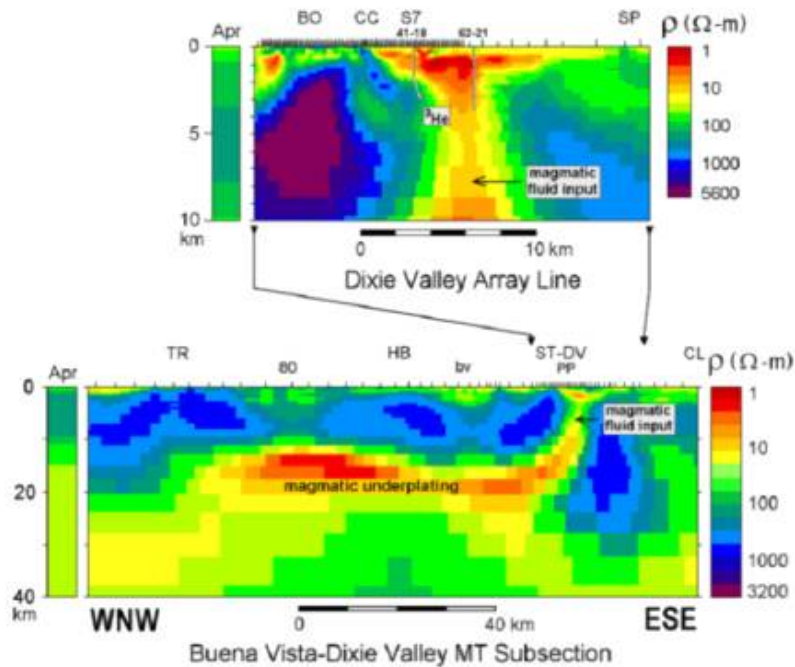


그림 640 MT 탐사기술 적용을 위한 2차원 비저항 역산 기법 연구(Wannamaker *et al.*, 2007)

4. 동남극 지역에서의 MT 탐사를 통한 지하 전기적 구조 양상 분석

- D.N. Murthy(CSIR-National Geophysical Research Inst.) 등이 동남극 지역에서 MT 탐사를 수행하여 겉보기 비저항(Apparent resistivity) 및 위상(Phase) 자료를 바탕으로 하부 층서 구조를 파악하였다.

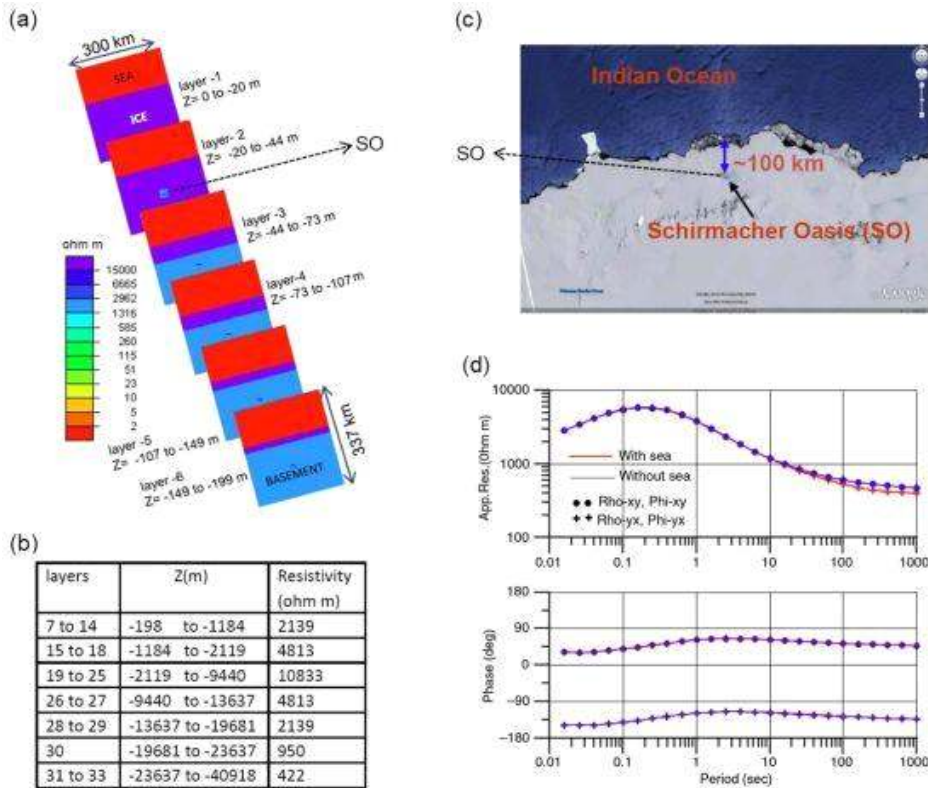


그림 641 동남극 지역에서 MT 탐사를 수행하여 겉보기 비저항 (Apparent resistivity) 및 위상(Phase) 자료를 바탕으로 하부 층서 구조를 규명함 (D.N. Murthy *et al.*, 2013)

5. 해수면의 지역적 변동인 SAL효과를 계산하는 모델의 공간 해상도가 급격히 상승하여, 수 km 규모의 작은 효과까지 계산이 가능하게 되었다. 남극 빙하 유실은 상대적으로 작은 규모의 빙하 하류에서 발생하기 때문에 SAL에 의한 해수면 변동 역시 고 해상도 계산이 요구가 된다. 서남극 빙하 유실에 의한 해수면 변동 연구를 위해서 국내 연구진에서도 고해상도 SAL 모델을 개발하는 것이 필요하다.

6. 모델링 관련 과학기술

빙상 붕괴로 인한 해수면 상승 및 전지구에 미치는 영향의 정량적 예측·전망은 매우 중요한 주제임에도 불구하고 극지역 관측자료 부족으로 인하여 복잡한 빙상역학 및 관련된 물리 기작에 대한 이해가 부족하고, 빙상동역학 모델과 지구시스템 모델 개발활동 간 교류가 활발하지 않았으며, 그리고 대기·해양 강제력과 빙하·빙상의 상호작용에 대한 불확실성이 크기 때문에 빙상동역학 모델링의 기술 수준은 뒤쳐져 있다.

IPCC 보고서(2007)에서 빙상동역학 모델이 빙하의 최근 급격한 질량·속도 변화의 정확한

재현이 쉽지 않았기 때문에 미래 해수면 상승 예측에서 기여도를 반영하지 못하였으며, 따라서 빙상모델이 미래 해수면 상승 예측 불확실성을 높이는 주요 원인이라고 지적하였으며, 이후 미국과 유럽을 중심으로 SeaRISE(Sea-level Response to Ice Sheet Evolution), ice2sea, COMBINE(Comprehensive Modelling of the Earth System for Better Climate Prediction and Projection) 등의 국제공동연구를 통하여 동역학빙상모델을 이용한 그린랜드와 남극 빙하 용융 및 미래 해수면 변화 예측 실험이 체계적으로 수행되면서 성능 개선이 도모되어 왔다.

이러한 노력들이 ISMIP6(Ice Sheet Model Intercomparison Project for CMIP6)로 수렴되면서 동역학빙상모델뿐 아니라 동역학빙상모델-지구시스템모델 접합시스템을 이용한 그린랜드와 남극 빙하 용융 및 미래 해수면 변화 예측 실험이 계획되어 2022년 출간될 IPCC AR6 보고서를 위한 CMIP6(Climate Model Intercomparison Project 6)의 구성요소로 채택되어 빙상동역학모델의 성능 제고가 기대되고 있다.

최근 서남극 지역 해양빙상 붕괴가 주요 이슈로 대두됨에 따라 빙하의 장기적 지표질량 변화 뿐만 아니라 빙상-해양 경계에서 발생하는 물리 과정들에 중점을 두는 MISMIP+(Marine Ice Sheet MIP third phase), MISOMIP(Marine Ice Sheet - Ocean Model Intercomparison Project) 등의 빙상동역학 모델링 국제공동연구가 진행 중이므로, 이러한 프로젝트에서 산출되는 결과물들을 검토하여 모델 개선방향으로 채택해야 한다.

지구 온난화 영향 하에서 남극 지역의 빙상붕괴는 그 질량을 고려하였을 때 급격한 전지구 해수면 상승을 초래할 수 있는 잠재적 위험 요소로서, 특히 갑작스러운 빙하붕괴가 예측되는 서남극 스웨이츠 지역에서는 영국-미국 중심의 모델링 프로젝트들이 진행 중에 있다. 그 중 MELT(Melting at Thwaites grounding zone and its control on sea level)는 지반선 부근 현장 관측을 기반으로 고해상도 난류모델을 활용하여 해양모델의 빙붕하부용융을 모의 성능 개선을 목표로 하고 있으며, PROPHET(Processes, drivers, Prediction: modeling the History and Evolution of Thwaites)은 빙상-해양 접합모델을 활용한 미래 빙상변화-해수면 상승 예측을, DOMINOS(Disintegration of Marine Ice-sheets Using Novel Optimised Simulations)는 카빙 기작 이해를 목표로 하고 있다. 따라서 이들의 연구 방향을 추적하고 연구 우수 성과들을 도입하는 것이 필요하다.

최근 IPCC에서 발간된 지구온난화 1.5°C 특별보고서(2018)에는 2100년까지 전지구 평균 해수면 상승은 2°C 보다 1.5°C 지구온난화에서 약 0.1m 낮을 것으로 전망되며, 상승 규모와 속도는 미래 배출경로에 따라 결정될 것이지만 이는 관련 리스크에 노출되는 인구가 최대 천만 명 줄어든다는 것이라 해석했다. 하지만 수백 년에서 수천 년에 걸쳐 수 미터(m)의 해수면 상승을 초래할 수 있는 남극 빙하의 불안정성이 지구온난화가 1.5~2°C 범위에 있을 때 촉발될 수 있다고 기술됨에 따라, 성능이 개선된 빙상동역학 모델을 활용한 실험 기반으로 정확한 티핑 포인트(tipping point)를 예측하는 것이 더욱 중요해 졌다고 할 수 있다.

제7장. 연구개발성과의 보안등급

보안등급 분류	보안	일반
		V
결정 사유	「국가연구개발사업의 관리 등에 관한 규정」 제24조의4에 해당하지 않음	



제8장. 국가과학기술종합정보시스템에 등록된 연구시설·장비 현황

해당사항 없음



제9장. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적

- 본과제의 연구수행은 장보고기지를 기반으로 남극 빅토리아랜드 전역에 걸쳐 수행되며 주요 활동은 다음과 같이 나누어질 수 있음
 - 입출남극시 수송기 또는 아라온 활용
 - 장보고기지 기반 중장거리 일일 헬기 이용 탐사
 - 로스해 지역 아라온 탐사
- 남극에서의 연구활동은 가장 기초적인 생존을 위한 훈련 뿐 아니라, 비상시 병원, 암벽에서의 이동에 대한 기술이 필요함
- 각 연구활동의 위험요인과 수준에 따른 극지적응훈련과 교육을 극지연구소 기술안전지원팀에서 수행하였으며, 본 과제 참여자들은 빠짐없이 훈련에 참여하여 생존과 연구활동에 필요한 기본 기술을 습득한 후 탐사에 참여함
- 극한지 활동에 경험이 많고 특히 극지연구지원에도 도움을 줄 수 있는 안전 가이드를 고용 연구현장에서 안전관리 전담
- 연구소 내 안전관리 대책으로는 “연구실 안전환경 조성에 관한 법률”에 의거 극지연구소 자체적으로 연구실 종합안전정보시스템을 구축하여 소내 “연구실 안전관리 규정”에 따라 연구과제 수행시 수반될 수 있는 위험요소를 최소화 하고 참여 연구원의 안전을 확보하고 있음
- 또한 2013년에 “연구실 안전환경 조성에 관한 법률” 제 9조에 의거 정밀안전진단을 실시하였으며 이에 따른 중점적인 문제점에 대한 개선계획을 수립하여 시행하고 있음
- 망실의 위험이 높은 해양 관측 장비는 동산보험 가입

제10장. 연구개발과제의 대표적 연구 실적

번호	구분 (논문/ 특허/ 기타)	논문명/특허명 /기타	소속 기관명	역할	논문 게재지/ 특허 등록 국가	영향력 지수	논문 게재 일 /특허 등록 일	사사 여부 (단독 사사 또는 중복 사사)	특기 사항 (SCI 여부/ 인용 횟수 등)
1	논문	P-wave velocity structure beneath Mt. Melbourne in northern Victoria Land, Antarctica: Evidence of partial melting and volcanic magma sources	극지 연구소	지진관측자료를 이용하여 멜번화산 주변지역에 마그마가 있음을 규명하여 빙하하부용융의 원인이 될수 있는 지열공급원이 있음을 시사함	Earth and Planetary Science Letters	91.67	2015/11/03	단독	SCIE/ 인용 3회
2	논문	Antarctic ice shelf potentially stabilized by export of meltwater in surface river	Lamont-Doherty Earth Observatory of Columbia University	극지연구소 남극 탐사에서 관측한 난센 빙봉에 발달한 채널을 통하여 용빙수가 즉시 배출되면서 추가 용융을 막아 안정도에 기여하는 메커니즘 규명	Nature	100	2017/04/20	중복	NSC/ 인용39 회
3	논문	The influence of the Drygalski Ice Tongue on the local ocean	NIWA	극지연구소와 NIWA 협력으로 아라온을 이용한 DITN 해양물리계류장비 자료와 CTD 관측을 통해 드라이갈스키 빙설이 인근 해양에 미치는 영향을 규명	Annals of Glaciology	83.33	2017/04/17	중복	SCIE/ 인용2 회
4	논문	Basal channels drive active surface hydrology and transverse ice shelf fracture	Univ. of Waterloo	극지연구소와 텍사스대가 공동으로 수행한 난센빙봉 항공탐사 자료를 분석하여 빙봉 하부채널이 상부채널과 균열을 유발했음을 규명	Science Advances	95.24	2018/06/13	중복	SCIE/ 인용 7회

5	논문	Global sea level change signatures observed by GRACE satellite gravimetry	서울대	GRACE 중력위성자료로부터 전세계 해수면 변화를 관측함	Scientific Reports	82.54	2018/ 09/10	중복	SCIE/ 인용1 회
---	----	---	-----	--	--------------------	-------	----------------	----	-------------------



제11장. 기타 사항



제12장. 참고 문헌

A G, Wahr J, Zhong S. Computations of the viscoelastic response of a 3-D compressible Earth to surface loading: an application to Glacial Isostatic Adjustment in Antarctica and Canada. *Geophys J Int* 2012, 192(2): 557-572.

A. D. Bowen, D. R. Yoerger, C. C. German, J. C. Kinsey, M. Jakuba, D. Gomez-Ibanez, C. L. Taylor, C. Machado, J. C. Howland, C. L. Kaiser, M. Heintz, C. Pontbriand, S. Suman, L. O'Hara, J. Bailey, C. Judge, G. McDonald, L. L. Whitcomb, C. J. McFarland, L. Mayer (2014). Design of Nereid-UI: a remotely operated underwater vehicle for oceanographic access under ice, *Proc. IEEE Oceans*, pp. 1-6.

A. Spears, M. West, M. Meister, C. Walker, J. Buffo, T. Collins, A. M. Howard, and B. E. Schmidt (2016). Under Ice in Antarctica: The Icefin Unmanned Underwater Vehicle Development and Deployment, *IEEE Robotics & Automation Magazine*, vol. 23, no. 4, pp. 30-41, Dec.

Arthern, R. J., Winebrenner, D. P., & Vaughan, D. G. (2006). Antarctic snow accumulation mapped using polarization of 4.3-cm wavelength microwave emission. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 111(6), 1 - 10.

Asay-Davis, X. S., Cornford, S. L., Durand, G., Galton-Fenzi, B. K., Gladstone, R. M., Gudmundsson, G. H., Hattermann, T., Holland, D. M., Holland, D., Holland, P. R., Martin, D. F., Mathiot, P., Pattyn, F., and Seroussi, H. (2016), Experimental design for three interrelated marine ice sheet and ocean model intercomparison projects: MISMIP v. 3 (MISMIP +), ISOMIP v. 2 (ISOMIP +) and MISOMIP v. 1 (MISOMIP1), *Geosci. Model Dev.*, 9, 2471-2497, <https://doi.org/10.5194/gmd-9-2471-2016>.

Bindschadler, R. A., S. Nowicki, A. Abe-Ouchi, A. Aschwanden, H. Choi, J. Fastook, G. Granzow, R. Greve, G. Gutowski, U. Herzfeld, C. Jackson, J. Johnson, C. Kroulev, A. Levermann, W. Lipsomb, M. Martin, M. Morlighem, B. Parizek, D. Pollard, S. Price, D. Ren, F. Saito, T Sato, H. Seddik, H. Seroussi, K. Takahashi, R. Walker and W. L. Wang (2013) Ice-sheet model sensitivities to environmental forcing and their use in projecting future sea level (the SeaRISE project). *Journal of Glaciology* 59 (214), 195-224.

Blankenship, D.D., Carter, S.P., Holt, J.W., Morse, D.L., Peters, M.E. & Young, D.A. (2009). Antarctic subglacial lake classification inventory. Boulder, CO: National Snow and Ice Data Center.

Budillon, G., P. Castagno, S. Aliani, G. Spezie, and L. Padman (2011), Thermohaline variability and Antarctic bottom water formation at the Ross Sea shelf break, *Deep-Sea. Res. I*, 58,

Carter, S. P., Blankenship, D. D., Peters, M. E., Young, D. A., Holt, J. W., & Morse, D. L. (2007). Radar based subglacial lake classification in Antarctica. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 8(3).

Chambers, D. P., Wahr, J., Tamisiea, M. E. & Nerem, R. S. Ocean mass from GRACE and glacial isostatic adjustment. *Journal of Geophysical Research* 115, doi:10.1029/2010jb007530 (2010).

Chandler, D. M. *et al.* (2013), Evolution of the subglacial drainage system beneath the Greenland Ice Sheet revealed by tracers, *Nature Geosci.*, 6(3), 195 - 198, doi:10.1038/ngeo1737.

Chen, J. L., C. R. Wilson, and B. D. Tapley (2013), Contribution of ice sheet and mountain glacier melt to recent sea level rise, *Nat. Geosci.*, 6, 549 - 552, doi:10.1038/NGEO1829.

Chen, J. L., C. R. Wilson, D. D. Blankenship, and B. D. Tapley (2006), Antarctic mass rates from GRACE, *Geophys. Res. Lett.*, 33(11), doi:10.1029/2006GL026369.

Cheng, M., B. D. Tapley, and J. C. Ries (2013), Deceleration in the Earth's oblateness, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 118(2), 740-747.

Cincinelli, A., T. Martellini, L. Bittoni, A. Russo, A. Gambaro, and L. Lepri (2008), Natural and anthropogenic hydrocarbons in the water column of the Ross Sea (Antarctica). *J. Mar. Sys.*, 73, 208 - 220. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2007.10.010>

Comiso JC (2000) Variability and trends in Antarctic surface temperatures from in situ and satellite infrared measurements. *J. Climate*, 13(10), 1674-1696 (doi:10.1175/1520-0442(2000)013<1674:VATIAS>2.0.CO;2)

D.N. Murthy, K. Veeraswamy, T. Harinarayana, U.K. Singh & M. Santosh (2013) Electrical structure beneath Schirmacher Oasis, East Antarctica: a magnetotelluric study, CSIR-National Geophysical Research Institute.

Danesi, S., S. Bannister, and A. Morelli (2007), Repeating earthquakes from rupture of an asperity under an Antarctic outlet glacier, *Earth and Planetary Science Letters*, 253(1 - 2), 151 - 158, doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.epsl.2006.10.023.

Davison, B. J., Sole, A. J., Livingstone, S. J., Cowton, T. R., & Nienow, P. W. (2019). The influence of hydrology on the dynamics of land-terminating sectors of the Greenland Ice Sheet. *Frontiers in Earth Science*, 7.

de Fleurian, B., Werder, M. A., Beyer, S., Brinkerhoff, D. J., Delaney, I., Dow, C. F., ... & Seguinot, J. (2018). SHMIP The subglacial hydrology model intercomparison Project. *Journal of*

Glaciology, 64(248), 897-916.

DeConto, R. M. and D. Pollard (2016) Contribution of Antarctica to past and future sea-level rise. *Nature* volume 531, pages 591 - 597 (31 March 2016) doi:10.1038/nature17145.

Dieng, H. B., A. Cazenave, B. Meyssignac, and M. Ablain (2017), New estimate of the current rate of sea level rise from a sea level budget approach, *Geophys. Res. Lett.*, 44(8), 3744-3751.

Dow, C. F., Werder, M. A., Babonis, G., Nowicki, S., Walker, R. T., Csathó, B., & Morlighem, M. (2018). Dynamics of Active Subglacial Lakes in Recovery Ice Stream. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 123(4), 837-850.

Dow, C. F., Werder, M. A., Nowicki, S., & Walker, R. T. (2016). Modeling Antarctic subglacial lake filling and drainage cycles. *The Cryosphere*, 10(4), 1381-1393.

Dziak, R. P., M. Park, W. S. Lee, H. Matsumoto, D. R. Bohnenstiehl, and J. H. Haxel (2010), Tectonomagmatic activity and ice dynamics in the Bransfield Strait back-arc basin, Antarctica, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 115(B1), doi:10.1029/2009JB006295.

Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., Senior, C. A., Stevens, B., Stouffer, R. J., and Taylor, K. E.: Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization (2016) *Geosci. Model Dev.*, 9, 1937-1958, <https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016>.

Farrell, W. E., and J. A. Clark (1976), On Postglacial Sea Level, *Geophys. J. Roy. Astr. Soc.*, 46(3), 647-667.

Fleurian, B., Gagliardini, O., Zwinger, T., Durand, G., Le Meur, E., Mair, D., & Raback, P. (2014). A double continuum hydrological model for glacier applications. *The Cryosphere*.

Fleurian, B., Morlighem, M., Seroussi, H., Rignot, E., Broeke, M. R., Kuipers Munneke, P., ... & Tedstone, A. J. (2016). A modeling study of the effect of runoff variability on the effective pressure beneath Russell Glacier, West Greenland. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 121(10), 1834-1848.

Flowers, G. E. (2015, April). Modelling water flow under glaciers and ice sheets. In *Proc. R. Soc. A* (Vol. 471, No. 2176, p. 20140907). The Royal Society.

Fretwell P, and 9 others (2013) Bedmap2: improved ice bed, surface and thickness datasets for Antarctica. *Cryosphere*, 7(1), 375-393

Fretwell, P.; Pritchard, H. D.; Vaughan, D. G.; Bamber, J.; Barrand, N.; Bell, R.; Bianchi, C.; Bingham, R.; Blankenship, D.; Casassa, G. & others (2013) Bedmap2: improved ice bed,

surface and thickness datasets for Antarctica. *The Cryosphere*, 7, 375-393

Fricker, H. A., Carter, S. P., Bell, R. E., & Scambos, T. (2014). Active lakes of Recovery Ice Stream, East Antarctica: a bedrock-controlled subglacial hydrological system. *J. Glaciol*, 60(223), 1015-1030.

Fricker, H. A., T. Scambos, R. Bindshadler, and L. Padman (2007), An Active Subglacial Water System in West Antarctica Mapped from Space, *Science*, 315(5818), 1544 - 1548.

Fürst JJ, and 6 others (2016) The safety band of Antarctic ice shelves. *Nat. Clim. Change*, 6(5), 479-482

Gardner, A. S., Moholdt, G., Scambos, T., Fahnestock, M., Ligtenberg, S., van den Broeke, M., & Nilsson, J. (2018). Increased West Antarctic and unchanged East Antarctic ice discharge over the last 7 years. *Cryosphere*, 12(2), 521-547.

Han, S.-C., C. K. Shum, M. Bevis, C. Ji, and C.-Y. Kuo (2006), Crustal Dilatation Observed by GRACE After the 2004 Sumatra-Andaman Earthquake, *Science*, 313(5787), 658.

Harris, K. J., A. E. Carey, W. B. Lyons, K. A. Welch, and A. G. Fountain (2007), Solute and isotope geochemistry of subsurface ice melt seeps in Taylor Valley, Antarctica, *Geological Society of America Bulletin*, 119(5-6), 548 - 555.

Helsen, M. M. (2008), Elevation changes in Antarctica mainly determined by accumulation variability, *Science*, 320, 1626 - 1629, doi:10.1126/science.1153894.

Howat, I., Morin, P., Porter, C., & Noh, M.-J. (2018). The Reference Elevation Model of Antarctica, V1. *The Cryosphere*, (November), 1 - 16.

Howat, I., Morin, P., Porter, C., & Noh, M.-J. (2018). The Reference Elevation Model of Antarctica, V1. *The Cryosphere*, (November), 1 - 16.

Huybrechts, P., & Payne, T. (1996) The EISMINT benchmarks for testing ice-sheet models. *Annals of Glaciology*, 23, 1-12. doi:10.3189/S0260305500013197.

Iwano, S., Y. Fukuda, T. Sato, Y. Tamura, K. Matsumoto, and K. Shibuya (2005), Long-period tidal factors at Antarctica Syowa Station determined from 10 years of superconducting gravimeter data, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 110(B10), doi:10.1029/2004JB003551.

J. Burnett, F. Rack, B. Zook, B. Schmidt (2015). Development of a borehole deployable remotely operated vehicle for investigation of sub-ice aquatic environments", *Proc. IEEE Oceans*, pp. 1-7.

J. G. Bellingham, E. Cokelet, W. Kirkwood (2008). Observation of warm water transport and mixing in the Arctic basin with the ALTEX AUV, Proc. IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles, pp. 1-5.

Jacobs, S. S., H. H. Helmer, C. S. M. Doake, A. Jenkins, and R. M. Frolich (1992), Melting of ice shelves and the mass balance of Antarctica, *J. Glacio.*, 130, 375-387.

Jendersie, S., M. J. M. Williams, P. J. Langhorne, and R. Robertson (2018), The density driven winter intensification of the Ross Sea circulation, *J. Geophys. Res. Oceans*, 123, <https://doi.org/10.1029/2018JC013965>

Jeon, T., K.-W. Seo, K. Youm, J. Chen, and C. R. Wilson (2018), Global sea level change signatures observed by GRACE satellite gravimetry, *Scientific Reports*, 8(1), 13519, doi:10.1038/s41598-018-31972-8.

Joughin, I., and S. Tulaczyk (2002), Positive mass balance of the Ross Ice Streams, West Antarctica, *Science*, 295, 476 - 480, doi:10.1126/science.1066875.

Joughin, I., L. Gray, R. Bindschadler, S. Price, D. Morse, C. Hulbe, K. Mattar, and C. Werner (1999), Tributaries of West Antarctic Ice Streams Revealed by RADARSAT Interferometry, *Science*, 286(5438), 283 - 286.

Kim, B. H., Lee, C. K., Seo, K. W., Lee, W. S., & Ted, S. (2016). Active subglacial lakes and channelized water flow beneath the Kamb Ice Stream.

King, M. A., L. Padman, K. W. Nicholls, P. J. Clarke, H. Gudmundsson, B. Kulesa, and A. Shepherd (2011), Ocean tides in the Weddell Sea: new observations on the Filchner-Ronne and Larsen C ice shelves and model validation, *J. Geophys. Res. (Oceans)*, 116, C06006, doi:10.1029/2011JC006949.

Larour E, Seroussi H, Morlighem M and Rignot E (2012) Continental scale, high order, high spatial resolution, ice sheet modeling using the Ice Sheet System Model (ISSM). *J. Geophys. Res.: Earth Surface*, 117(F1)

Lee, C.-K., K.-W. Seo, S.-C. Han, J. Yu, and T. A. Scambos (2012), Ice velocity mapping of Ross Ice Shelf, Antarctica by matching surface undulations measured by ICESat laser altimetry, *Remote Sensing of Environment*, 124(0), 251 - 258, doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2012.05.017.

Lenaerts, J. T. M., Broeke, M. R. Van Den, Déry, S. J., Meijgaard, E. Van, Berg, W. J. Van De, Palm, S. P., & Rodrigo, J. S. (2012). Modeling drifting snow in Antarctica with a regional climate model : 1 . Methods and model evaluation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 117, 1 - 17.

Lenaerts, J. T. M., Broeke, M. R. Van Den, Déry, S. J., Meijgaard, E. Van, Berg, W. J. Van De, Palm, S. P., & Rodrigo, J. S. (2012). Modeling drifting snow in Antarctica with a regional climate model : 1 . Methods and model evaluation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 117, 1 - 17.

Levermann, A. (2011), *Oceanography: When glacial giants roll over*, *Nature*, 472(7341), 43 - 44, doi:10.1038/472043a. East Antarctica, from magnetotelluric measurements, *Geophysical Journal International*, 157(1), 36 - 54, doi:10.1111/j.1365-246X.2004.02156.x.

Levermann, A. and Winkelmann, R. (2016) A simple equation for the melt elevation feedback of ice sheets, *The Cryosphere*, 10, 1799-1807, <https://doi.org/10.5194/tc-10-1799-2016>, 2016.

Lin, Guang, Engel, David W., & Eslinger, Paul W. (2012) *Survey and Evaluate Uncertainty Quantification Methodologies*. United States. doi:10.2172/1035732.

MacAyeal, D. (1993) A tutorial on the use of control methods in ice-sheet modeling. *Journal of Glaciology*, 39(131), 91-98. doi:10.3189/S0022143000015744.

Malyarenko, L., N. J. Robinson, M. J. M. Williams, and P. J. Langhorne (2019), A wedge mechanism for summer surface water inflow into the Ross Ice Shelf cavity, *J. Geophys. Res. Oceans*, 124, <https://doi.org/10.1029/2018JC014594>.

McMillan, M., H. Corr, A. Shepherd, A. Ridout, S. Laxon, and R. Cullen (2013), Three-dimensional mapping by CryoSat-2 of subglacial lake volume changes, *Geophys. Res. Lett.*, 40(16), 4321 - 4327, doi:10.1002/grl.50689.

Mouginot, J., Scheuchl, B., & Rignot, E. (2012). Mapping of ice motion in Antarctica using synthetic-aperture radar data. *Remote Sensing*, 4(9), 2753 - 2767.

Mouginot, J., Scheuchl, B., & Rignot, E. (2012). Mapping of ice motion in Antarctica using synthetic-aperture radar data. *Remote Sensing*, 4(9), 2753 - 2767. Arthern, R. J., Winebrenner, D. P., & Vaughan, D. G. (2006). Antarctic snow accumulation mapped using polarization of 4.3-cm wavelength microwave emission. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 111(6), 1 - 10.

Mouginot, J., Scheuchl, B., & Rignot, E. (2012). Mapping of ice motion in Antarctica using synthetic-aperture radar data. *Remote Sensing*, 4(9), 2753-2767.

Nauels, A., Rogelj, J., Schleussner, C.-F., Meinshausen, M., & Mengel, M. (2017). Linking sea level rise and socioeconomic indicators under the shared socioeconomic pathways. *Environmental Research Letters*, 12(11), 114,002.

Nowicki, S., R. Bindshadler, A. Abe-Ouchi, A. Aschwanden, E. Bueller, H. Choi, J.

Fastook, G. Granzow, R. Greve, G. Gutowski, U. Herzfeld, C. Jackson, J. Johnson, C. Kroulev, E. Larour, A. Levermann, W. Lipsomb, M. Martin, M. Morlighem, B. Parizek, D. Pollard, S. Price, E. Rignot, D. Ren, F. Saito, T Sato, H. Seddik, H. Seroussi, K. Takahashi, R. Walker and W. L. Wang (2013) Insights into spatial sensitivities of ice mass response to environmental change from the SeaRISE ice sheet modeling project I. Antarctica. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* 118 (2), 1002-1024.

Padman, L., H. A. Fricker, R. Coleman, S. Howard, and S. Erofeeva (2002), A new tidal model for the Antarctic ice shelves and seas, *Ann. Glaciol.*, 34, 247-254.

Parizek, B. R., K. Christianson, S. Anandakrishnan, R. B. Alley, R. T. Walker, R. A. Edwards, D. S. Wolfe, G. T. Bertini, S. K. Rinehart, R. A. Bindschadler and S. M. J. Nowicki (2013) Dynamic (in)stability of Thwaites Glacier, West Antarctica. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* 118 (2), 638-655.

Paulson A, Zhong S, Wahr J. Inference of mantle viscosity from GRACE and relative sea level data. *Geophys J Int* 2007, 171(2): 497-508.

Payne AJ, Holland PR, Shepherd AP, Rutt IC, Jenkins A and Joughin I (2007) Numerical modeling of ocean - ice interactions under Pine Island Bay's ice shelf. *J. Geophys. Res.*, 112(C10), C10019 (doi: 10.1029/2006JC003733)

Payne, A., Huybrechts, P., Abe-Ouchi, A., Calov, R., Fastook, J., Greve, R., . . . Thomassen, M. (2000) Results from the EISMINT model intercomparison: The effects of thermomechanical coupling. *Journal of Glaciology*, 46(153), 227-238. doi:10.3189/172756500781832891.

Peltier, W. R. (2004), Global Glacial Isostasy and the Surface of the Ice-Age Earth: The ICE-5G (VM2) Model and GRACE, *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, 32(1), 111-149, doi:10.1146/annurev.earth.32.082503.144359.

Peltier, W. R., D. F. Argus, and R. Drummond (2015), Space geodesy constrains ice age terminal deglaciation: The global ICE-6G_C (VM5a) model, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 120(1), 450-487.

Philip E. Wannamaker, William M. Doerner, Derrick P. Hasterok (2007) Integrated Dense Array and Transect MT Surveying at Dixie Valley Geothermal Area, Nevada- Structural Controls, Hydrothermal Alteration and Deep Fluid Sources.

Pritchard, H. D., R. J. Arthern, D. G. Vaughan, and L. A. Edwards (2009), Extensive dynamic thinning on the margins of the Greenland and Antarctic ice sheets, *Nature*, 461(7266), 971 - 975, doi:10.1038/nature08471.

Rignot, E., J. Mouginot, and B. Scheuchl (2011), Ice Flow of the Antarctic Ice Sheet, *Science*, 333(6048), 1427 - 1430.

Rignot, E., J. Mouginot, and B. Scheuchl. 2011. Antarctic Grounding Line Mapping from Differential Satellite Radar Interferometry, *Geophysical Research Letters*. 38. L10504. <https://doi.org/10.1029/2011GL047109>

Rusciano, E., G. Budillon, G. Fusco, G. Spezie (2013), Evidence of atmosphere-sea ice-ocean coupling in the Terra Nova Bay polynya (Ross Sea-Antarctica), *Cont. Shelf Res.*, 61-62, 112-124, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.csr.2013.04.002>.

Rignot, E., J. Mouginot, and B. Scheuchl. (2017), MEaSURES InSAR-Based Antarctica Ice Velocity Map, Version 2. [Indicate subset used]. Boulder, Colorado USA. NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center. doi: <https://doi.org/10.5067/D7GK8F5J8M8R>.

Scambos, T. A., Bell, R. E., Alley, R. B., Anandakrishnan, S., Bromwich, D. H., Brunt, K., ... Yager, P. L. (2017). How much, how fast?: A sciencereview and outlook for research on the instability of Antarctica's Thwaites glacier in the 21st century. *Global and Planetary Change*, 153,16 - 34.

Schroeder, D. M., Blankenship, D. D., & Young, D. A. (2013). Evidence for a water system transition beneath Thwaites Glacier, West Antarctica. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(30), 12225-12228.

Seroussi H and 6 others (2014b) Sensitivity of the dynamics of Pine Island Glacier, West Antarctica, to climate forcing for the next 50 years. *Cryosphere*, 8(5), 1699 - 1710 (doi: 10.5194/tc-8-1699-2014)

Seroussi H, Morlighem M, Larour E, Rignot E and Khazendar A (2014a) Hydrostatic grounding line parameterization in ice sheet models. *Cryosphere*, 8(6), 2075-2087

Shapiro NM and Ritzwoller MH (2004) Inferring surface heat flux distributions guided by a global seismic model: particular application to Antarctica. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 233(1 - 2), 213 - 224

Shepherd, A., *et al.* (2012), A reconciled estimate of ice-sheet mass balance, *Science*, 338(30), 1183 - 1189.

Simmons, A., S. Uppala, D. Dee, and S. Kobayashi (2007), ERA-Interim: New ECMWF reanalysis products from 1989 onwards ECMWF Newsletter No. 110.

Smith, B. E., Fricker, H. A., Joughin, I. R., & Tulaczyk, S. (2009). An inventory of active subglacial lakes in Antarctica detected by ICESat (2003-2008). *Journal of Glaciology*, 55(192), 573

- 595. <http://doi.org/10.3189/002214309789470879>

Sommers, A., Rajaram, H., & Morlighem, M. (2018). SHAKTI: Subglacial Hydrology and Kinetic, Transient Interactions v1. 0. *Geoscientific Model Development*, 11(7), 2955-2974.

Stearns, L. A., B. E. Smith, and G. S. Hamilton (2008), Increased flow speed on a large East Antarctic outlet glacier caused by subglacial floods, *Nature Geosci*, 1(12), 827 - 831, doi:10.1038/ngeo356.

Sun Y, Riva R, Ditmar P. Optimizing estimates of annual variations and trends in geocenter motion and J2 from a combination of GRACE data and geophysical models. *J Geophys Res Solid Earth* 2016, 121(11): 8352-8370.

Swenson, S., D. Chambers, and J. Wahr (2008), Estimating geocenter variations from a combination of GRACE and ocean model output, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 113(B8), B08410.

Tapley, B. D., S. Bettadpur, M. Watkins, and C. Reigber (2004), The gravity recovery and climate experiment: Mission overview and early results, *Geophys. Res. Lett.*, 31(9), L09607.

Ushio, S., and M. Wakatsuchi (1993), A laboratory study on supercooling and frazil ice production processes in winter coastal polynyas. *J. Geophys. Res. Oceans*, 98(C11), 20,321 - 20,328. <https://doi.org/10.1029/93JC01905>

Van Woert, M. L., Meier, W. N., Zou, C.-Z., Archer, A., Pellegrini, A., Grigioni, P. and Bertola, C.: Satellite observations of upper-ocean currents in Terra Nova Bay, Antarctica. *Ann. Glaciol.*, 22, 407 - 412, <https://doi.org/10.3189/172756401781818879>, 2001.

Wannamaker, P. E., J. A. Stodt, L. Pellerin, S. L. Olsen, and D. B. Hall (2004), Structure and thermal regime beneath the South Pole region,

WCRP Global Sea Level Budget Group. Global sea-level budget 1993 - present. *Earth Syst Sci Data* 2018, 10(3): 1551-1590.

Werder, M. A., Hewitt, I. J., Schoof, C. G., & Flowers, G. E. (2013). Modeling channelized and distributed subglacial drainage in two dimensions. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 118(4), 2140-2158.

Winkelmann, R., A. Levermann, M. A. Martin, and K. Frieler (2012), Increased future ice discharge from Antarctica owing to higher snowfall, *Nature*, 492(7428), 239 - 242, doi:10.1038/nature11616.

Wu, X., Ray, J. & van Dam, T. Geocenter motion and its geodetic and geophysical implications. *Journal of Geodynamics* 58, 44-61, doi:10.1016/j.jog.2012.01.007 (2012).

Wuite J, Jezek K, Wu X, Farness K and Carande R (2009). The velocity field and flow regime of David Glacier and Drygalski Ice Tongue, Antarctica. *Polar Geogr.*, 32(3/4), 111 - 127 (doi: 10.1080/10889370902815499).

Yoon, S.-T., Lee, W. S., Stevens, C., Jendersie, S., Nam, S., Yun, S., Hwang, C. Y., Jang, G. I., and Lee, J.: Spatio-temporal variations in High-Salinity Shelf Water production in Terra Nova Bay polynya, Antarctica, *Ocean Sci. Discuss.*, <https://doi.org/10.5194/os-2019-80>, in review, 2019.





주 의

1. 이 최종보고서는 해양수산부에서 시행한 장보고기지 주변 빙권변화 진단, 원인규명 및 예측 연구사업의 연구보고서입니다.
2. 이 최종보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 해양수산부에서 시행한 사업의 연구개발성과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.