

해양 로봇을 활용한 극지 해양 환경  
탐사를 위한 기반 기술 연구

A preliminary study of core technology  
development for unmanned underwater  
vehicle exploration in the Polar regions



2019.01.28

선박해양플랜트연구소

# 제 출 문

선박해양플랜트연구소장 귀하

본 보고서를 “극지 환경을 고려한 수중음향기반 위치추정 및 해상 항법 기초 기술 연구”과제의 연구결과 보고서로 제출합니다.

2019. 01. 28.

위탁연구기관명 : 극지연구소

위탁연구책임자 : 윤 숙 영

참 여 연 구 원 소 : 이 원 상

“ : 박 용 철

“ : 이 춘 기

“ : 이 승 현

“ : 김 수 환

“ : 윤 승 태

“ : 김 진 석

“ : 이 지 연

## 보고서 초록

과제고유 번호	PES9420	해당단계 연구기간	2018.03.01~12 .31	단계 구분	1 단계
연구사업명	중사업명	기관목적사업			
	세부사업명	-			
연구과제명	과제명	극지 환경을 고려한 수중음향기반 위치추정 및 해상 항법 기초 기술 연구			
	위탁과제명	해양 로봇을 활용한 극지 해양 환경 탐사를 위한 기반 기술 연구			
연구책임자	윤숙영	해당단계 참여연구원수	총 : 9 명 내부: 6 명 외부: 3 명	해당단계 연구비	정부: 30,000 천원 기업:            천원 계 :            천원
		총연구기간 참여연구원수	총 : 9 명 내부: 6 명 외부: 3 명	총 연구비	정부: 30,000 천원 기업:            천원 계 :            천원
연구기관명 및 소속부서명	극지연구소 해수면변동예측사업단		참여기업명		
국제공동연구					
위탁연구					
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)				보고서 면수	50
<ul style="list-style-type: none"> <li>- 빙붕 안정성을 진단하고 향후 거동을 예측하기 위해서는 빙붕 하부의 구조, 빙붕을 구성하는 얼음의 물성, 해수 특성 등을 파악이 필요함. 무인 잠수정 탐사를 통해 빙붕 하부의 해수 순환과 빙붕의 상호작용에 대한 보다 정확한 이해를 바탕으로 빙권 변화 예측 정확도를 향상이 필요함</li> <li>- 빙붕 하부 용융 프로세스 규명을 위해서는 하부 지형과 해수 물성, 해류 등의 관측이 필요한데 이 중 해류 관측의 경우 본체의 움직임이 보정되어야만 정확한 관측값을 얻을 수 있음</li> <li>- 극지 빙붕 하부에서의 안전한 탐사와 정확한 관측값 보정을 위해서는 본체의 위치와 움직임을 정확하게 파악하는 것이 중요하나 GPS나 자기나침반 활용이 어렵다.</li> <li>- 수중음향기반 위치추정 기술은 빙붕 하부 탐사에 상당히 효과적으로 활용될 수 있다. 무인 잠수정의 정확한 움직임을 추적하는 것은 안전한 운항뿐만 아니라 해류나 터블런스 관측값 보정에도 사용되어 빙붕 하부 용융 프로세스 연구에 있어서도 매우 중요함</li> </ul>					
색인어 (각 5개 이상)	한 글	자율무인잠수정, 빙붕하부탐사, 무인잠수정 항법, 빙상용융, 물리해양특성			
	영 어	Autonomous Underwater Vehicle, Exploration Beneath Ice Shelf, Navigation System of underwater Vehicles, Ice Sheet melting, physical ocean properties			

# 요 약 문

## I. 제목

해양 로봇을 활용한 극지 해양 환경 탐사를 위한 기반 기술 연구

## II. 연구개발의 목적 및 필요성

무인 잠수정은 빙봉의 붕괴는 빙하의 바다로의 유출을 가속화하므로 해수면 변동과 관련된 빙상거동 예측에 있어 빙봉의 안정성 진단은 필수적이다. 빙봉 안정성을 진단하고 향후 거동을 예측하기 위해서는 빙봉 하부의 구조, 빙봉을 구성하는 얼음의 물성, 해수 특성 등을 파악하여야 한다. 무인 잠수정 탐사를 통해 지금까지 접근하지 못했던 빙봉 하부의 정보를 획득함으로써 해수순환과 빙봉의 상호작용에 대한 보다 정확한 이해를 바탕으로 빙권 변화 예측 정확도를 높이는 것이 필요하다.

## III. 무인잠수정을 활용한 빙봉 탐사와 연구 현황

세계 각국에서 빙봉하부 무인잠수정 탐사를 시도하고 있으며 국내에서는 2016/17년 난센 빙봉 하부 무인잠수정 탐사를 수행하였다. 무인 잠수정 탐사와 항공 레이더 탐사를 통해 난센빙봉 하부 채널을 발견하였고 새로운 빙봉 안정과 붕괴 기작을 밝혔다. 미국에서는 2018년에 아문젠해에 글라이더 3대를 투입하여 빙봉하부 탐사를 수행중에 있다.

## IV. 빙봉 하부 무인 잠수정 관측 요소

빙봉 하부 용융 프로세스를 규명하기 위해서는 무인 잠수정을 활용하여 빙봉 하부의 구조, 해수의 온도와 염도, 해류 등을 관측해야 한다. 이 중에서 해류와 미세한 난류(turbulence)관측은 선체의 움직임과 방향 보정이 관측 정확도에 결정적인 영향을 미치게 된다. 극지역에서는 복각이 크고 수평방향 자기장이 약해 자기나침반을 이용한 선체 움직임 위치 결정에 어려움이 있다. 오차를 줄이기 위해서는 정밀한 선체위치 추적이 필요하다

## V. 북극 다산기지 GPS 관측 장비 설치 지원

극지연구소에서는 KRISO에서 극지역 GPS 수신 환경 테스트를 위한 GPS를 다산기지에 설치할 수 있도록 지원업무를 수행하였다.

## VI. 결론

수중음향기반 위치추정 기술은 빙봉 하부 탐사에 상당히 효과적으로 활용될 수 있

다. 무인잠수정의 정확한 움직임을 추적하는 것은 안전한 운항뿐만 아니라 정확한 빙봉 하부 지형도 작성과 해류나 터블런스 관측값 보정에도 사용되어 과학적으로도 매우 중요하다.



# S U M M A R Y 및 KEYWORDS

## (영 문 요약 문)

Autonomous underwater vehicles(AUVs) enable us to explore extreme regions previously untrodden by man, and the cutting edge technologies are applied to the next generation AUVs to explore to the most challenging and harshest regions, under ice in the Polar region. Exploration beneath ice is the most important key to expect how fast and how much the ice sheet in the Polar regions will melt. However, operating AUVs in the Polar regions is not easy. Low temperature can cause fast battery discharges, sea ice and its melting water also threat safe operations, and weak GPS signals and big magnetic declination require more developed navigation system. The exact estimation of AUV's location is very important not only for its safe operation but also for scientific data calibration. In this study, we will present characteristics of polar environments, such as physical ocean properties, currents, acquired from past Antarctic surveys by icebreaker RV ARAON and will show recent polar AUV exploration and techniques. These will contribute to reducing trial and errors in developing AUVs and its navigation systems for exploration under ice in the Polar regions.

(KEYWORDS : 무인잠수정, 빙붕하부탐사, 무인잠수정 항법, 빙상용융, 물리해양특성, Autonomous Underwater Vehicle, Exploration Beneath Ice Shelf, Navigation System of underwater Vehicles, Ice Sheet melting, physical ocean properties )

# C O N T E N T S

(영 문 목 차)

Chapter 1. Purpose of the study-----	8
Chapter 2. AUV explorations under ice-----	16
Chapter 3. Various AUV observations under ice-----	32
Chapter 4. Assistant for GPS installation in Dasan station, Arctic--	43
Chapter 5. Conclusion -----	45
Chapter 6. References-----	46

# 목 차

제 1 장 연구개발의 목적, 필요성-----	8
제 2 장 무인잠수정을 활용한 빙봉 탐사와 연구 현황-----	16
제 3 장 빙봉 하부 무인 잠수정 관측 요소-----	32
제 4 장 북극 다산기지 GPS 관측 장비 설치 지원-----	43
제 5 장 결론-----	45
제 6 장 참고문헌-----	46

## 제 1 장 연구개발의 목적, 필요성

최근 전 세계적으로 지구 온난화에 의한 빙상용융과 관련된 해수면 상승과 기후변화가 이슈가 되고 있다. IPCC 5차보고서 (IPCC AR5, 2013년)에 의하면 지난 20세기에 전 지구 평균기온은 0.85℃ 상승하였으며 해수면은 0.19m 상승한 것으로 관측되었고 특히 1992년부터 2010년 사이에는 해수면이 매년 3.2 mm 상승하는 것으로 관측되어 가파른 상승세를 보이고 있다. 이 보고서에서는 2100년까지 최대 0.98m의 해수면 상승을 예측하였으나 극지역의 빙상 용융 예측에 있어서의 오차로 인하여 해수면 상승 예측이 많은 불확실성이 있음을 지적하였다 (그림 1). 해수면 상승에 의한 실제적인 피해는 저위도 지역 연안국, 도서국가 등이 극심한 피해를 받고 있는 실정으로 해수면이 1m 만 상승하게 되더라도 전 세계 인구 중 적어도 1억 명이 직접적인 영향을 받게 되며 많은 연안 도시(도쿄, 상하이, 자카르타, 뭄바이, 뉴욕 등) 및 섬들의 침수를 유발할 것으로 예측되고 있다 (그림 2). 해수면 상승의 원인은 크게 해양의 열팽창과 육상빙의 용융의 영향으로 구분된다. 과거에는 열팽창이 주요 해수면상승의 원인이었으나 최근(1993-2008)에는 육빙의 질량 감소에 의한 해수면 상승 기여가 2배 이상 크게 평가 받고 있으며 남극 빙상 용융에 따른 해수면 상승 기여 분은 가파른 증가 추세를 보이고 있다 (그림 3).

이에 남극에서도 가장 급격히 변화하는 서남극 지역 빙하 안정도 평가를 통한 해수면 상승 예측의 중요성이 부각되어 전세계적으로 연구가 활발히 진행되고 있다. 서남극 빙상의 안정도를 저해하는 요소로는 크게 1) 따뜻한 해수의 유입과 2) 전 지구 온난화에 따른 기온상승요인을 들 수 있는데 평균 해수면 보다 지반이 아래에 놓인 서남극 빙상의 경우 1)의 효과가 우세하게 작용하고 있으며, 이러한 해수의 유입으로 인한 빙붕의 붕괴로 인한 지지 역할 감소는 내륙 빙상의 얼음을 해양으로 쏟아내어 급격한 해수면 상승을 초래할 수 있다. 과거(2002년) 남극반도 라르센 B 빙붕 붕괴 이후 상부 Flask Glacier의 거동 속도가 최대 36퍼센트 증가하였음이 보고되었다. (그림 4) 서남극 지역이 경우 해양빙상 (Marine Ice Sheet)의 특성상 빙상과 지반의 경계면이 해수면 아래에 위치하고 지반의 경사가 해양에서 내륙방향으로 들어가기 때문에 서남극 빙붕이 따뜻한 해양의 흐름에 의해 붕괴될 경우 내부 빙상에 있는 얼음이 쏟아져 나오고 빙하가 한번 후퇴하면 가속화되어 돌이킬 수 없는 상황으로 진행될 것으로 예상된다. 이와 같이 돌이킬 수 없는 지반선 후퇴는 기정사실로 알려져 있으나 이에 대한 적극적 대응 대책 수립을 위해서는 남극 빙상의 붕괴에 의해 얼음이 어느시점에 얼마나 많이, 얼마나 빠르게 흘러나오는지를 예측하는 것이 필

수적(Joughin *et al.*, 2014, Science)이며 이를 위해서는 서남극 빙붕의 역할과 빙상의 거동을 정확히 이해하는 것이 매우 중요하다.

남극연구과학위원회(SCAR)에서 SCAR Horizon Scan을 통하여 미래에 남극 연구에서 가장 우선적으로 해결되어야 할 6개 분류, 80가지 과학적 질문을 도출하였는데 그 중 남극 빙상과 해수면 변동 분류에서 우선적으로 해결해야 할 11개의 과학적 질문이 도출됨으로서 남극 빙상 붕괴와 해수면 상승과의 밀접한 영향에 대해서 경고하였다. 그림 5의 30번 문항은 해양과 빙붕 상호작용을 이해하여 빙붕이 어떻게 거동할 것인지에 대한 과학적 질문으로 해수 용융의 효과가 큰 서남극 빙상 거동을 예측하기 위해서는 반드시 해결해야 할 질문이다.

지구온난화로 따뜻해진 환남극 심층수의 대륙붕 유입은 서남극지역 빙하의 용빙이 가속화되고 있으며 용빙수의 확산은 전 지구적 해양 순환에 유의미한 영향을 미친다. 해양 순환에 의한 빙붕 용빙 기작과 관련해서 세가지 모드로 설명할 수 있다. 첫 번째 모드는 대륙붕에서 형성된 고온 고염의 수괴가 빙붕의 grounding line을 용빙시키는 것, 두 번째 모드는 환남극 심층수 공급에 의한 빙붕 용빙, 세 번째 모드는 남극 표층수 공급에 의한 빙붕 전선 용빙에 해당한다. (Dinniman *et al.*, 2015). 이 프로세스를 규명하기 위해 많은 해양-빙붕 접합 모델링 연구가 수행되고 있지만 이 중 빙붕 하부에서 이루어지는 첫 번째와 두 번째 모드는 빙저 용융이 일어나는 위치에 접근이 어렵고 (두꺼운 얼음, 해저, 빙저 등). 모델링에서 중요한 관측 지점임에도 불구하고 기존 기술로는 관측에 한계가 있다. 빙붕 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 탐사이다.

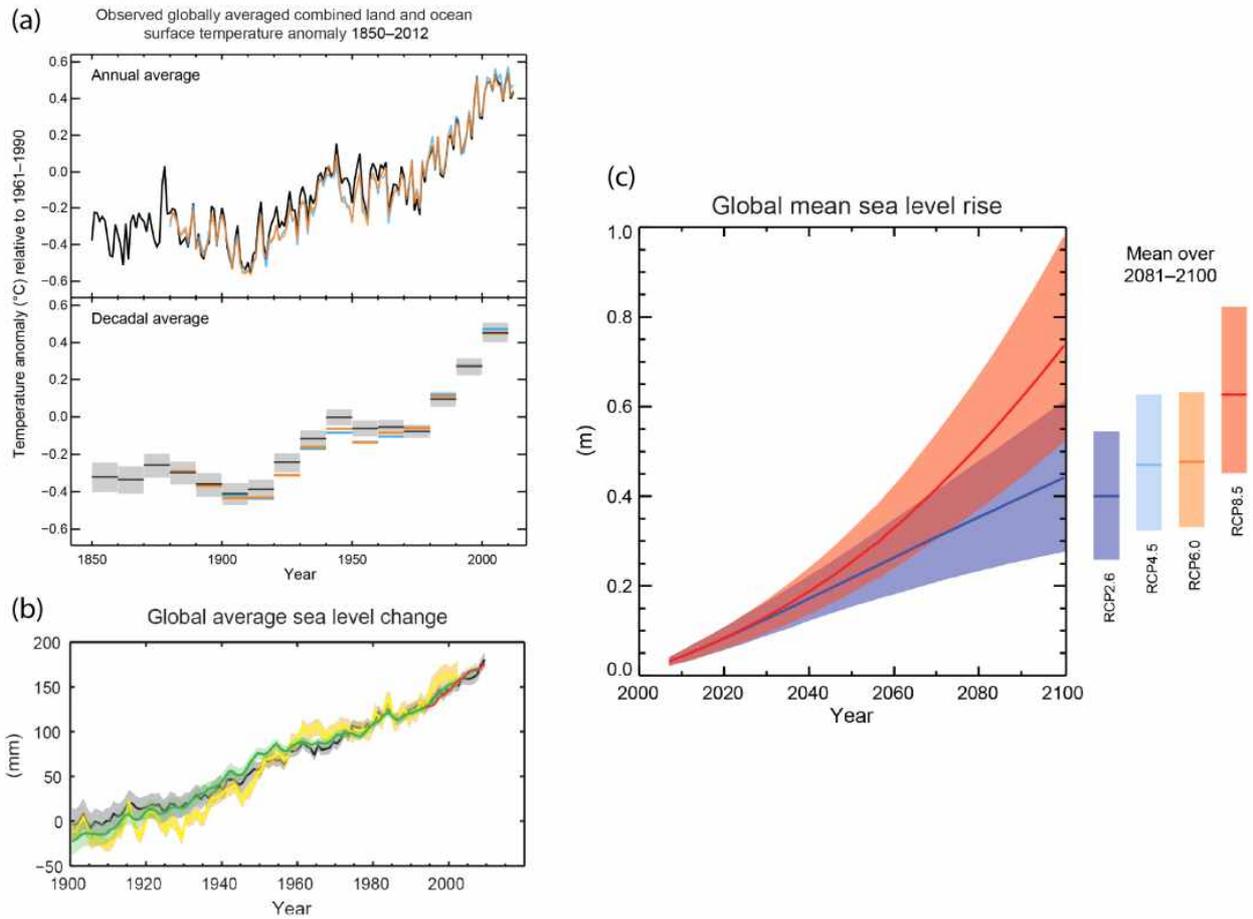


그림 1. (a) 1850-2012년간 표층 온도와 1961년부터 30년간 평균 기온 간의 차이. 1980년 이후 급격한 상승이 관찰됨. (b) 1900년 이후 해수면 변동. 1990년대부터 가파른 해수면 상승 추세가 관측됨. (c) 4가지 RCP 시나리오를 반영한 2100년까지의 해수면 변동 예측. RCP8.5 가정시 최대 0.98m까지 해수면 상승 예측됨 [IPCC AR5, 2013].

**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.

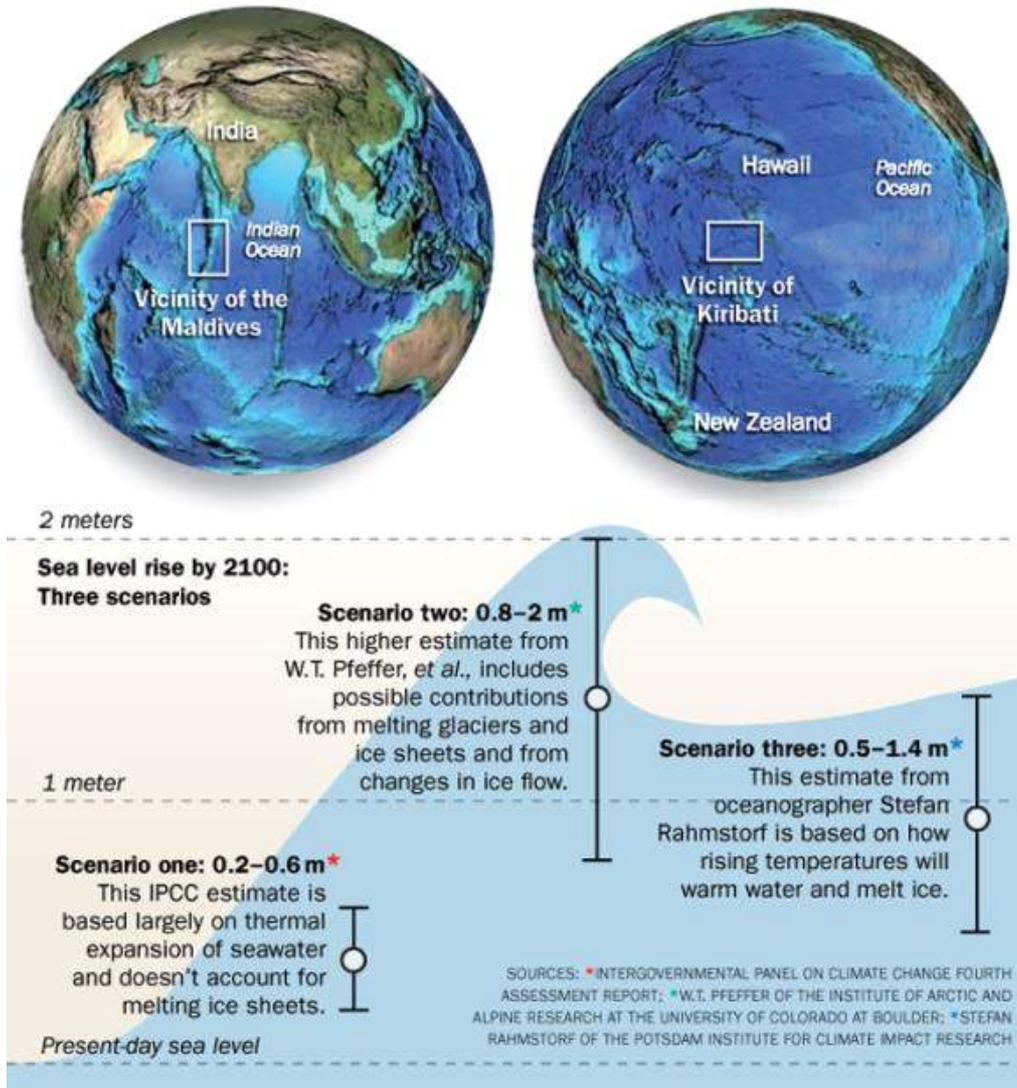


그림 2. 해수면이 1m 만 상승하게 되더라도 전 세계 인구 중 적어도 1억 명이 직접적인 영향을 받게 되며 많은 연안 도시(도쿄, 상하이, 자카르타, 뭍베이, 뉴욕 등) 및 섬들의 침수를 유발할 것으로 예측됨

(출처:<http://mastereia.wordpress.com/>

2012/05/18/sea-level-rise-and-coastal-erosion

/).

### Climate-related Contributions to Global Sea Level Rise

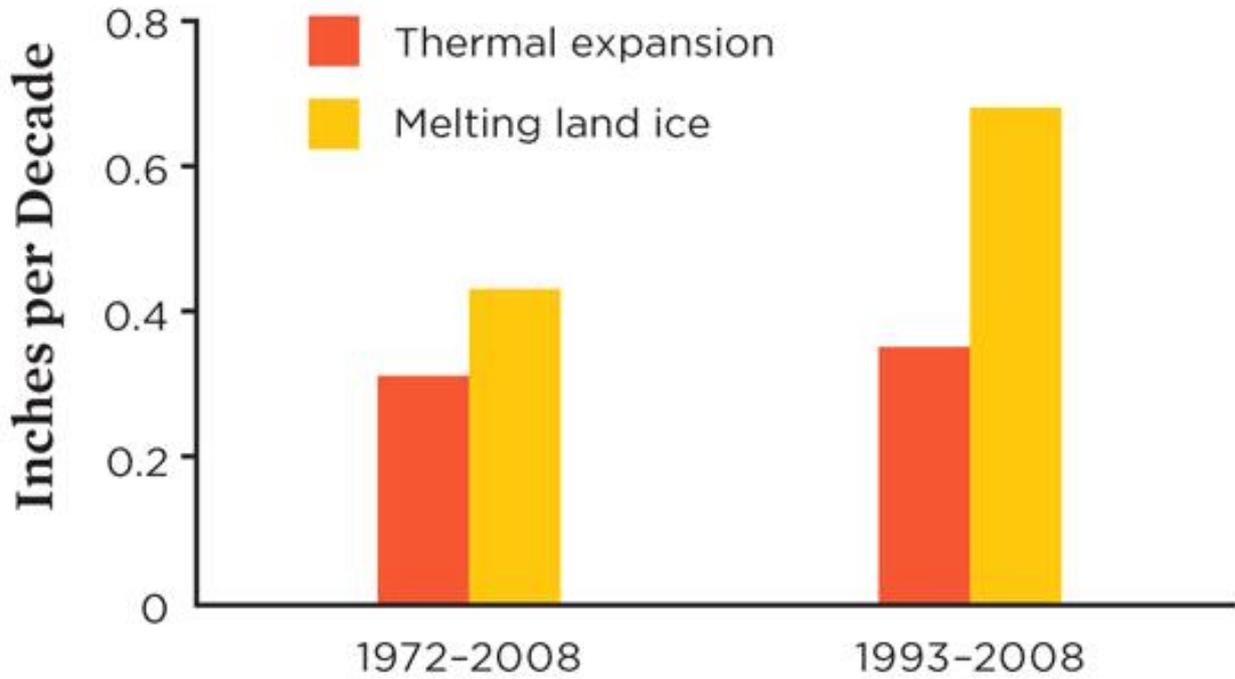


그림 3. 전 지구 해수면 상승에 영향을 주는 열팽창과 빙상, 빙하 용융의 기여도 비교.  
(Church and White, 2011, Oceanography)

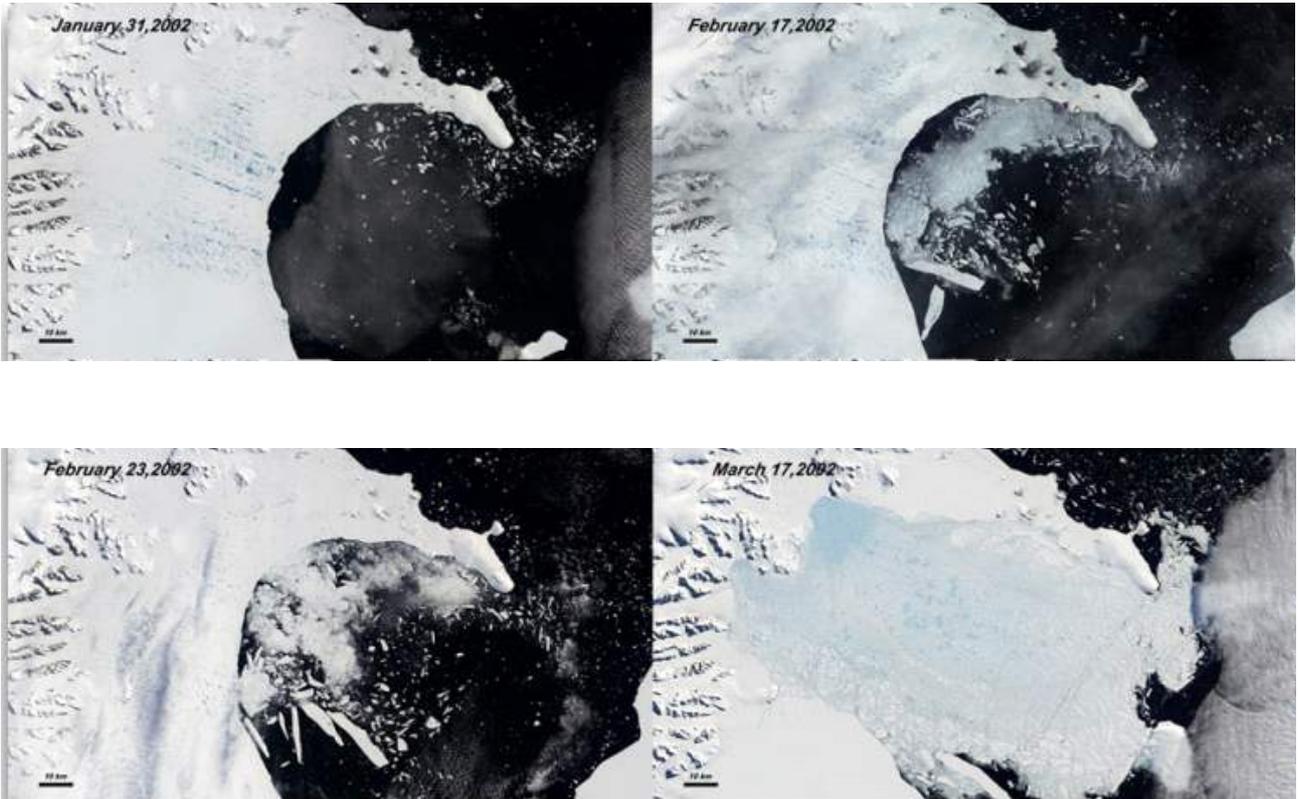


그림 4. 과거(2002년) 남극반도 라르센 B 빙붕 붕괴 이후 상부 Flask Glacier의 이동속도가 최대 36퍼센트 증가하였다

## ANTARCTIC ICE SHEET AND SEA LEVEL<sup>1,2</sup>

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

그림 5. SCAR Horizon Scan을 통하여 도출된 최우선적으로 해결되어야 할 남극 빙상과 해수면 변동 관련 질문. (Kennicutt II et al., 2014).

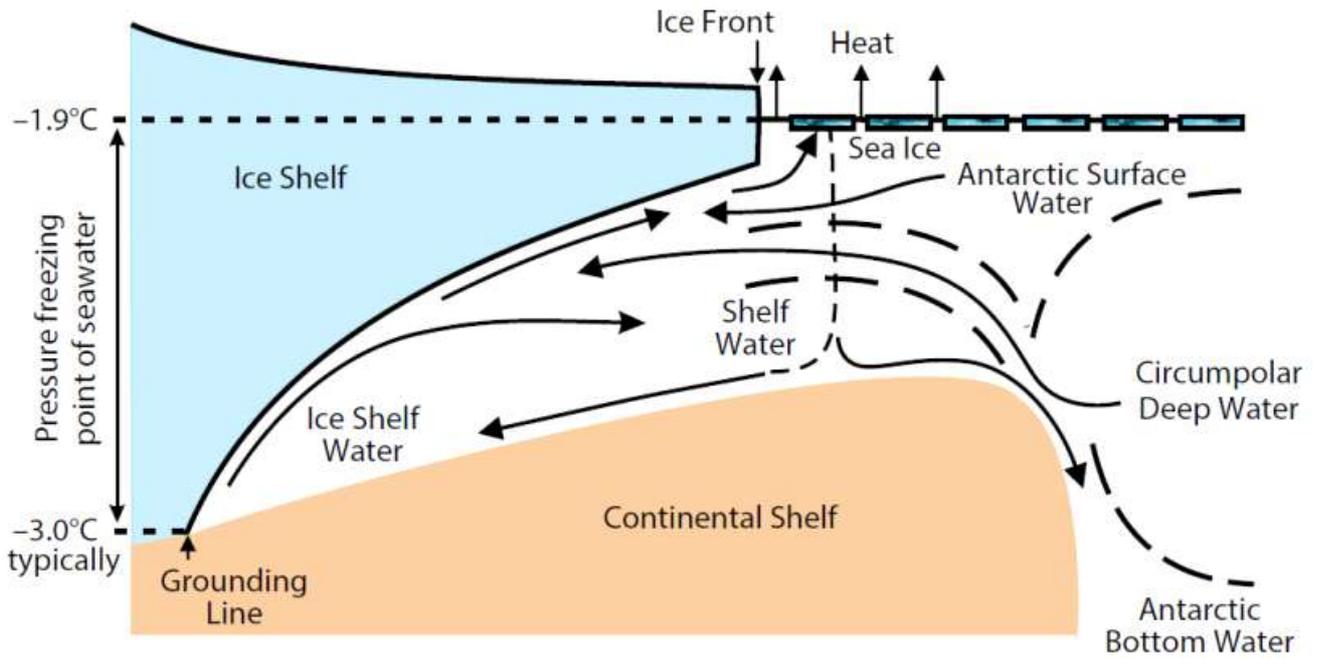


그림 6. 해양 순환에 의한 빙봉 융빙 기작을 보여주는 모식도 (Dinniman et al., 2011)

극지연구소

## 제 2 장 무인잠수정을 활용 빙봉 탐사와 연구 현황

2009년에는 영국 BAS와 NOC (National Oceanography Centre), 미국 LDEO (Lamont-Doherty Earth Observatory) 3개 기관이 협력하여 Autosub3 (그림 7) 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 수행하였다. 빙봉하부 탐사는 정확한 경로를 따라 빙봉 입구로 잠수정이 다시 돌아와야 하지만 잠수정 회수가 가능하다는 점에서 해빙탐사와는 다르게 매우 위험하며 보다 정확한 항법 기술이 필요하다. Autosub2는 2005년에 빙봉 탐사 중에 망실되었으며 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 headings을 판별할 수 있는 센서와 정확한 속도 계산을 통해 1km 진행 시 1m 에러의 오차로 현재 위치를 판별할 수 있다. (<http://noc.ac.uk/facilities/marine-autonomous-robotic-systems/autosubs>)

Endurance 무인잠수정은 남극 빙저호에 투입되어 탐사를 수행하였고 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 Icefin 을 개발하여 남극에서 테스트를 수행하였는데 (Spears *et al.*, 2016) Icefin은 일반적인 AUV와는 다르게 광학 케이블로 연결되어 작동하며 얼음을 뚫고 하부로 직접 투입되도록 디자인 되어 있다(그림 8). 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 사용하였다.

스웨덴 Gotenberg 대학은 Kongsberg 사의 Hugin 무인 잠수정을 구매하여 극지연구소 협력하에 2019/20 남극 하계 시즌 아문젠해 빙봉 투입을 목표로 테스트 중에 있다. 이 무인잠수정은 기존에 사용되던 IMU, DVL을 이용한 위치추정 방식 뿐만 아니라 음향신호를 이용하여 위치를 보다 정확하게 추정할수 있도록 하여 빙봉 아래에서도 정교하고 안전하게 운항할 수 있는 장비이다. Hugin 무인잠수정의 상세 제원은 <https://www.km.kongsberg>.

[com/ks/web/nokbg0397.nsf/AllWeb/76ABD1760DA9C064C1257B470029C7A5/\\$file/3823](http://com/ks/web/nokbg0397.nsf/AllWeb/76ABD1760DA9C064C1257B470029C7A5/$file/3823)

[09\\_hugin\\_product\\_specification.pdf?OpenElement](#) 에서 확인할 수 있다.

호주에서는 2017년에 남극 빙저 탐사를 위해 International Submarine Engineering 사의 Explorer 무인 잠수정을 구매하였다. 이 최신 잠수정은 140km를 24시간동안 배터리 충전없이 운항할 수 있으며 DVL 뿐만아니라 음향 신호를 활용한 정확한 위치 추정이 가능하다. 현재 호주에서는 2018/19 남극 하계 시즌에 탐사를 수행하는 것을 목표로 테스트 중에 있다. Explorer AUV의 상세 제원은 그림 10과 같다

극지연구소에서는 16/17 남극 하계 탐사시 미국의 UC Davis, Columbia Univ., 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 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. 그림 11은 무인 잠수정 탐사에서 획득한 멀티빔 자료와 Side Scan Sonar 자료이다. 본 탐사를 통해 난센 빙봉 상부에 있는 채널이 빙봉 하부에도 발달되어 있음을 확인하였고 이를 바탕으로 빙봉에 발달된 채널이 빙봉 안정도에 미치는 영향을 연구하여 Nature와 Science Advanced 두 학술지에 발간하였다.

기존 빙봉 상부에 형성된 다수의 융빙호는 결국 빙봉 붕괴를 촉진한다는 이론이 일반적으로 받아들여졌는데 극지연구소는 난센빙봉 정밀 탐사와 연구를 통해 빙봉의 형태에 따라서는 융빙호 간 하천망이 연결되고 효과적으로 융빙수가 해양으로 배출된다면 빙봉은 안정도를 되찾고 더 이상 붕괴 위험이 사라질 수 있음을 보여주었다. (그림 12 Bell, 2017, Nature) 빙상동역학 수치모델에 따르면 연간 빙봉 표면이 1.5m 가량 용융이 생기면 빙봉이 붕괴되기 시작한다고 추정하는데, Manning 방정식을 적용해 볼 때 약 21일간 용융수가 난센빙봉처럼 잘 발달된 하천망을 통해 효과적으로 배출된다면 빙봉은 안정도를 되찾아 더 이상 붕괴위험이 사라짐을 이 연구를 통해 새롭게 제시되었다. 이는 빙봉 위에 융빙호가 형성되면 결국 빙봉 붕괴가 가속화되고, 전지구 기온 상승 추세에 따라 남극전역에 이와 같은 현상이 빈번하게 발생할 것으로 예상되기 때문에 해수면 상승률이 IPCC AR5에서 제시한 결과보다 크게는 2배가량 빠를 것이라는 기존의 연구 결과를 수정할 필요성이 있음을 제기하였다.

하지만 위와 같은 현상은 지역적인 특성에 기인함을 염두에 두고 결국 2016년 빙봉 끝부분이 붕괴된 점을 상기할 때, 다음과 같은 또 다른 중요한 과학적 질문을 제기할

수 있다.

1. 빙봉 상부 하천은 어떻게 형성되었으며, 빙봉 끝부분 붕괴는 언제 어떻게 시작되었는가?

2. 이와 같은 빙봉 끝부분 붕괴는 극지역에서 일반적으로 관찰되는 현상인가?

첫 번째 질문을 해결하기 위해 난센빙봉 형성에 관해 먼저 살펴보자면, 빙봉 상류에서 부터 Reeves 및 Priestly 빙하가 흘러내려 한 곳에서 만나기 시작하는데, 서로간의 이동속도가 달라 만나는 부분에서 해수 침투가 용이하게 일어나 빙봉 하부 용융이 가속화된다. 움푹 파인 빙봉 하부 구조는 2011년 10월 미국 공동연구진(UTIG)이 ICECAP 과제의 일환으로 실시한 항공지구물리탐사와 무인잠수정탐사 결과를 통해 확인할 수 있다(그림 11). 이 탐사를 통해 해수에 의해 빙봉 하부 용융이 일어난 부분과 빙봉 상부 하천망이 형성된 부분의 위치가 일치함이 발견되었다. 이는 hydrostatic equilibrium으로 설명 가능하며, 빙봉 하부 채널이 상부의 하천망 형성에 기여했음을 지시하는 결정적인 증거이다. 2016년 4월 발생한 빙봉 끝부분 붕괴(ice front calving)의 시작은 Landsat 인공위성 자료를 통해 1987년 최초로 식별되었으며, 빙봉의 이동에 따라 커다란 크기의 변동 없이 하류로 동반 이동을 하였음을 확인할 수 있다. 2013년에 들어서면서 ice fracture 크기가 크게 증가하다 2014년 빙봉 상부 거대 용융수 하천망 형성시 붕괴직전까지 압박한 상황이 관측되었고 강이 지형의 기복에 따라 형성되어 흐르고 빙봉 상부 기복은 빙봉 하부 채널의 모습에 크게 영향 받는 사실 및 강줄기 한복판에 ice fracture가 형성되었다는 사실은 항공지구물리탐사와 무인잠수정 탐사를 통해 규명되었는데, ice fracture의 폭 및 길이가 2015년에 왜 급격히 증가했는가에 관한 의문이 여전히 남는다. 이를 규명하기 위해 DEM 및 인공위성을 통한 빙봉 이동속도로부터 빙봉의 strain을 계산해 보았다. 탐사에서 확인한 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, 빙봉 이동 흐름 방향과 평행한 extensional strain이 우세하기 시작하여 확장폭이 크게 증가하게 되었음을 알 수 있다. 특히 크게 확장된 rift에 2014년 1월 엄청난 양의 용빙수가 유입되어 hydrofracturing 현상이 지속적으로 발생하고 결국 2016년에 붕괴가 일어나게 된 것으로 판단된다.

2018년 1월 미국 University of Washington과 Columbia 대학의 LDEO 연구소는 극지연구소 아라온호를 이용하여 남극 아문젠 해 닷슨 빙봉에 접근하여 빙봉하부 탐사를 수행할 3대의 Seagliders 무인잠수정을 투입하였다. 본 사업은 마이크로소프트 공동창업자인 폴알렌으로부터 200만 달러의 펀드를 받아 진행되었다. 국가 연구 펀드가 아닌 개인 펀

딩을 통한 남극연구는 현재 해수면 상승과 빙권변화 문제 해결에 대한 의지가 전 세계에 퍼져있음을 보여준다. Seaglider는 Kongsberg사에서 개발한 글라이더로 부력변화에 의한 상하 움직임을 전진하는 힘으로 변환하여 움직여서 에너지 효율이 매우 뛰어나 수개월에 걸친 운항이 가능하다. 그림 16은 Seaglider의 운항모식도로 일반적인 잠수 사이클은 다음과 같다

1. 이리듐 위성 통신을 통해 원격통신 수행
2. 수면에서 GPS를 이용해 위치 확인
3. 잠수 상태에서는 3축 나침반(방향), 압력센서와 압력고도계(깊이)를 이용해 항법을 정한다
4. 목표 깊이까지 잠수하면서 해양자료를 수집
5. 수면으로 복귀후 자료는 위성으로 전송되고 새로운 명령을 전송받아 운항을 시작함

그러나 아문제에 투입된 글라이더는 상부가 얼음으로 막힌 빙저 탐사를 위해 2번 과정이 생략되었다. 일단 투입된 글라이더는 빙봉 하부로 진행하여 수면까지 올라오지 않고 수층에서 상하운동을 반복하면서 진행하며 해양물리 관측을 수행하게 된다 (그림 17). 수면으로 정기적으로 올라와서 GPS위치를 확인하는 과정은 GPS 위치와 dead reckoning position 과의 위치 차이를 확인하여 해류를 파악하고 다음 위치에 도달하기 위해서 경로를 보정하기 위해 필요하네 이 과정이 생략될 경우 해류에 의한 위치변화와 자체 dead reckoning position 오차가 누적되어 진행하면서 경로가 크게 벗어날 수 있다. 이 프로젝트에는 이를 방지하기 위하여 빙봉 앞면에 acoustic beacon을 계류하여 음향신호를 이용하여 글라이더가 위치를 정확하게 확인할 수 있도록 하였다. 올해 계류된 글라이더는 현재 해당 지역 얼음 밑에 있다. 이들은 대부분의 시간은 반동면 상태로 수층에서 체류하다 매달마다 1대의 글라이더는 기상 신호를 받아 빙봉 하부에서 탐사를 수행하면서 염도, 온도, 산소농도 등의 정보를 수집하고 돌아온다. 이들 글라이더는 해빙이 열리면 해수면으로 완전히 올라온 후 위성으로 자료를 전송할 것이다



그림 7. 영국 BAS와 NOC에서 개발한 빙봉 하부 탐사용 무인 잠수정 Autosub3



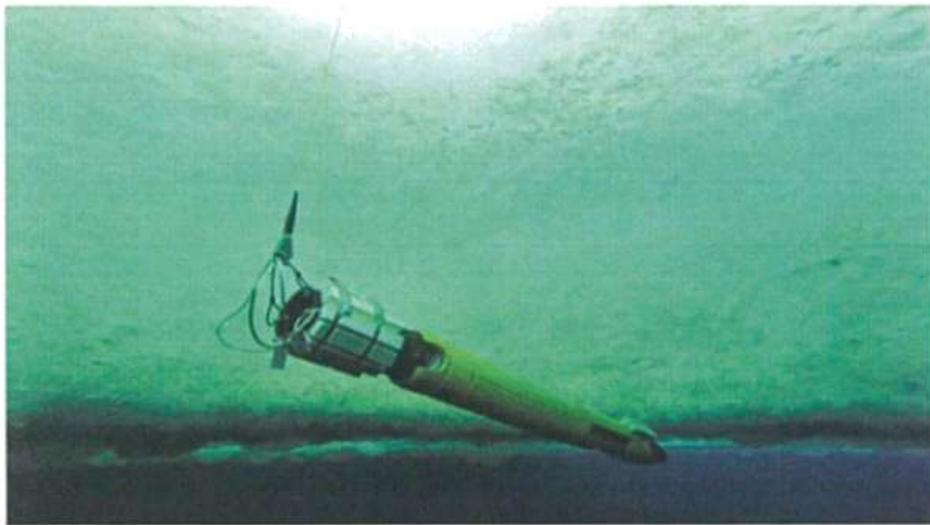
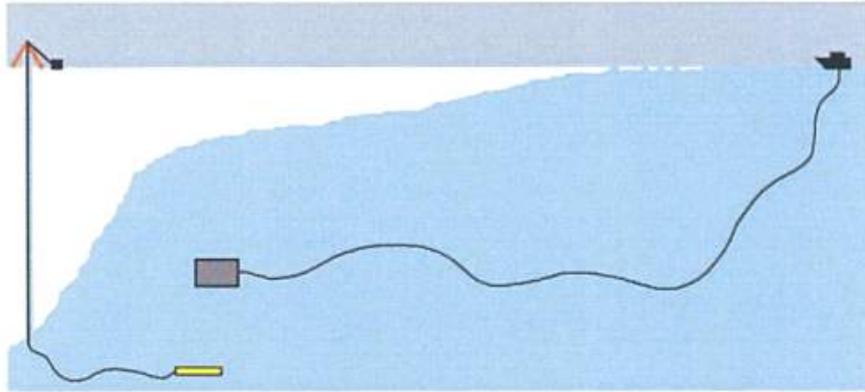


그림 8. (상) 빙봉을 직접 뚫어 투입되는 Icefin (노란색) 운영 방법과 일반적인 빙봉 하부 무인잠수정 탐사(회색) 모식도 (하) 남극 McMurdo 기지 주변 열수시추 구멍을 통해 투입된 Icefin의 모습 (Spear *et al.*, 2016)

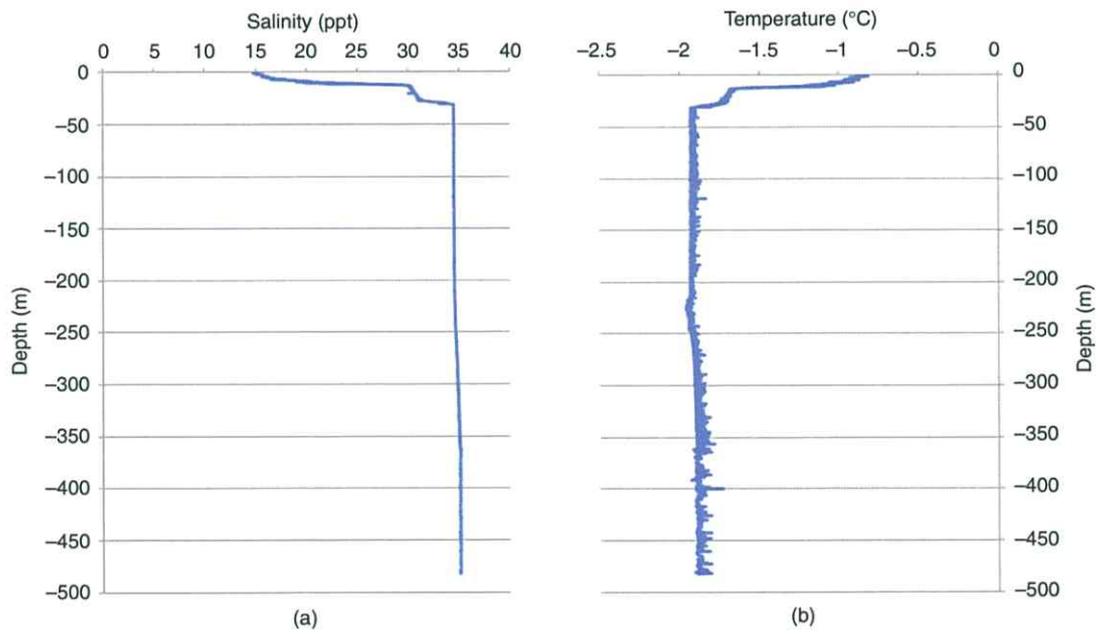


그림 9. Icefin 탐사를 통해 획득한 남극 McMurdo 빙봉 하부 해수의 염도와 온도 관측 결과(Spear et al., 2016).



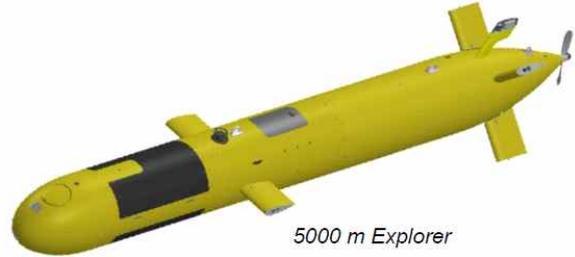
ISE's Explorer family of AUVs are the result of 35 years of AUV development and provide unprecedented stability and adaptability for subsea survey missions. Explorers are outfitted with forward and aft control planes, providing unmatched stability and delivering high quality data in the most challenging environments. The Explorer also offers the largest dry payload volume in its class – allowing for simple integration of payloads and electronics. Explorer is the most effective tool for delivering your payload to the ocean floor, anywhere on the planet.

**Specifications**

**Vehicle:**

Depth rating	5000 m
Power pack	18 kWh lithium Ion (11 x 1.6 kWh)
Dimensions <sup>1</sup>	0.74 m Ø x 6.25 m long
Weight in air <sup>1</sup>	1500 kg
Cruise speed	3 kts
Maximum speed	5 kts
Cruise endurance <sup>1</sup>	25 hours
Cruise range <sup>1</sup>	140 km
Maneuvering	2 x fore planes + 4 x aft planes
Stability	0.2° per second roll, pitch and yaw

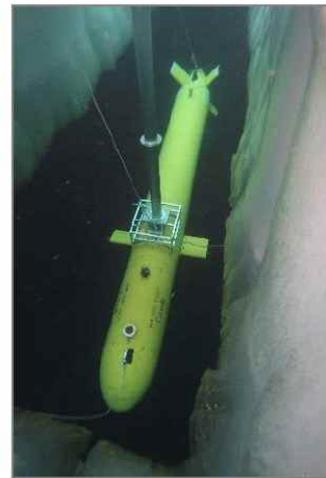
<sup>1</sup>Final weight, dimensions and endurance are dependent on vehicle configuration



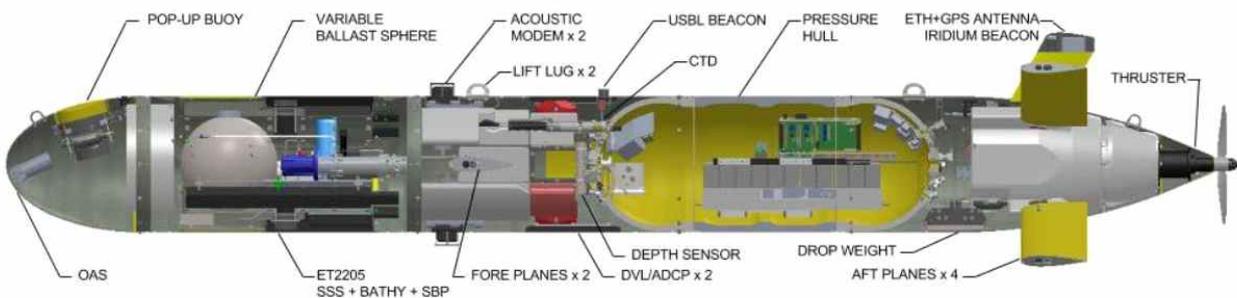
5000 m Explorer

**Standard Equipment:**

INU	iXBlue PHINS
Velocity sensor	RDI Workhorse DVL/ADCP x 2
Acoustic telemetry	Sercel MATS (with up & down facing modems)
Acoustic positioning	iXBlue GAPS transponder
Surface positioning	GPS
Depth sensor	Paroscientific Digiquartz
Operating system	ISE ACE
Surface communication	2.4GHz Ethernet radio
Beacons	Iridium and strobe Light
Ballast	50 kg actively variable + fixed
Emergency ascent	Drop weight
Obstacle avoidance sonar	Forward looking multi-beam
3D Mission planning tool	
Pop-up buoy	
Emergency battery	
Cradle and carriage	
Battery charger	



Explorer charging beneath Arctic ice



AUV cross section

그림 10. 호주에서는 2018/19 남극 하계 시즌에 탐사를 수행하는 것을 목표로 테스트 중에 있는 Explorer AUV의 상세 제원.

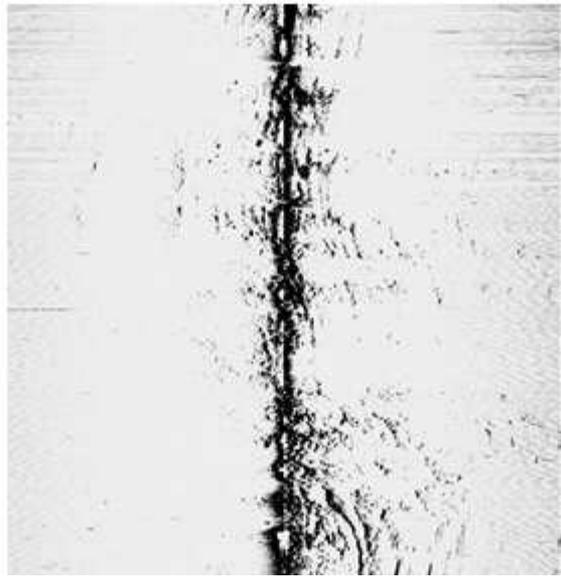
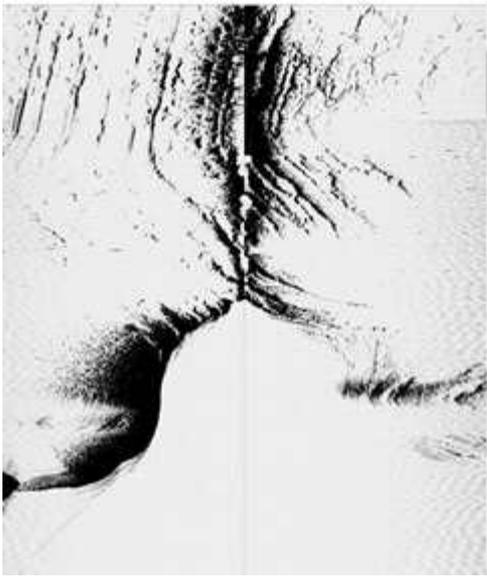
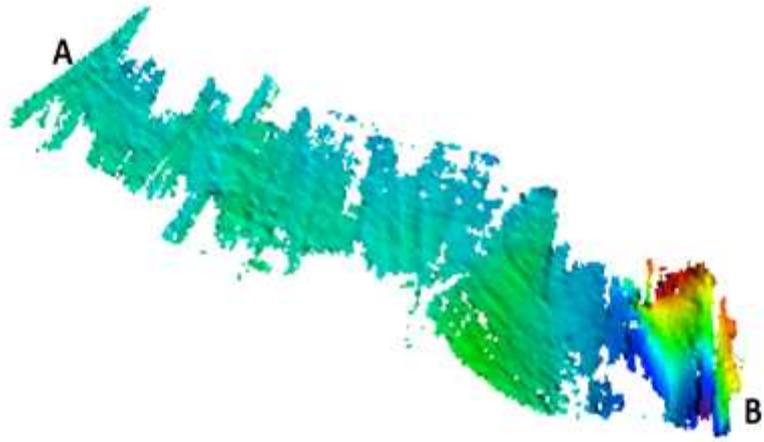


그림 11. 16/17 난센 AUV 탐사에서 획득한 멀티빔(상) 자료와 빙붕말단(하단좌측)과 안쪽(하단우측)의 Side Scan Sonar 이미지

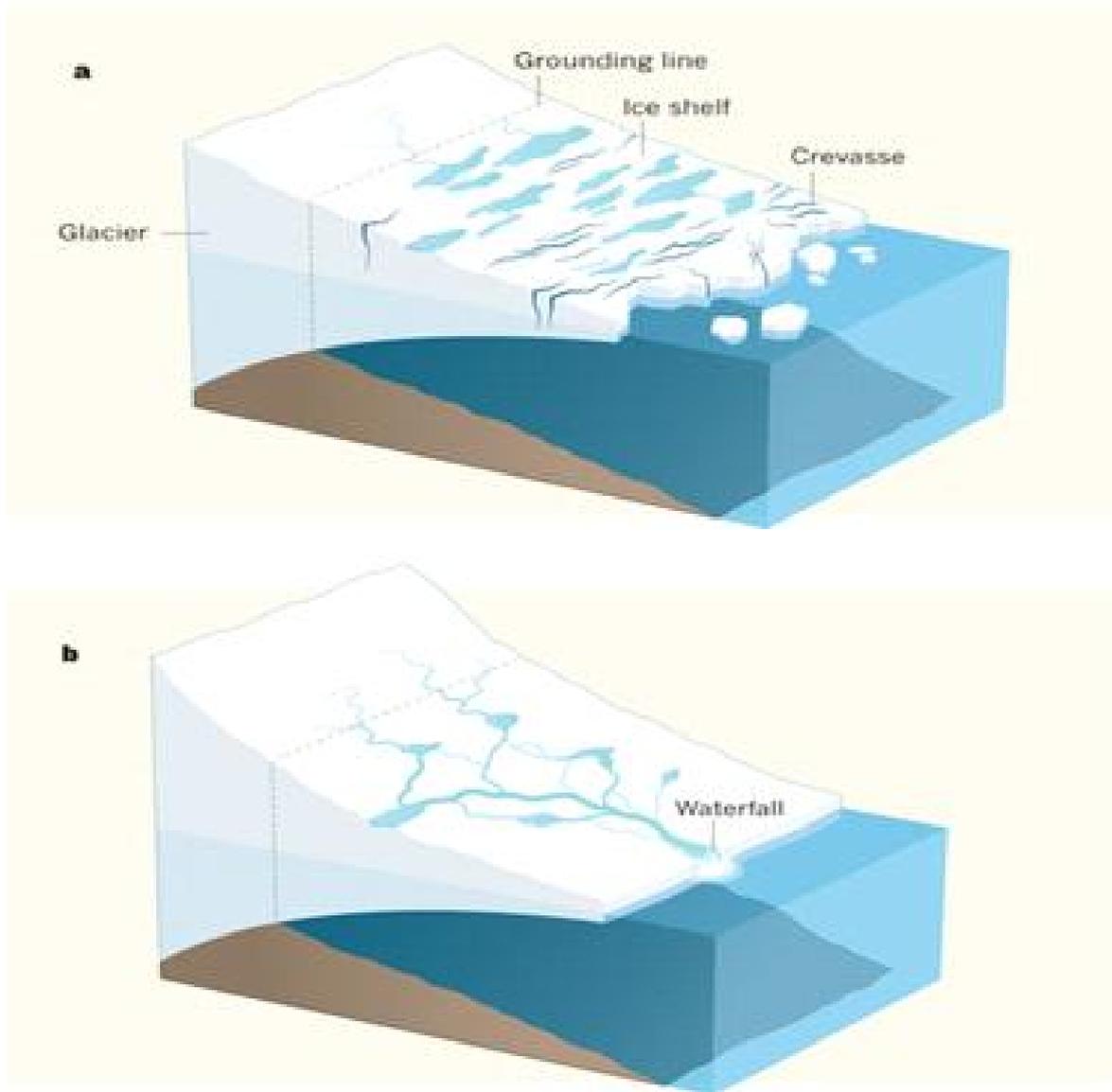


그림 12. (상) 기존 빙붕 상부에 형성된 다수의 용빙호는 결국 빙붕 붕괴를 촉진한다는 내용과 (하) 난센빙붕 연구를 통해 새롭게 제시된 모델로, 빙붕의 형태에 따라서는 용빙호 간 하천망이 연결되고 효과적으로 용빙수가 해양으로 배출된다면 빙붕은 안정도를 되찾고 더 이상 붕괴 위험이 사라짐을 확인함 (Bell, 2017, Nature)

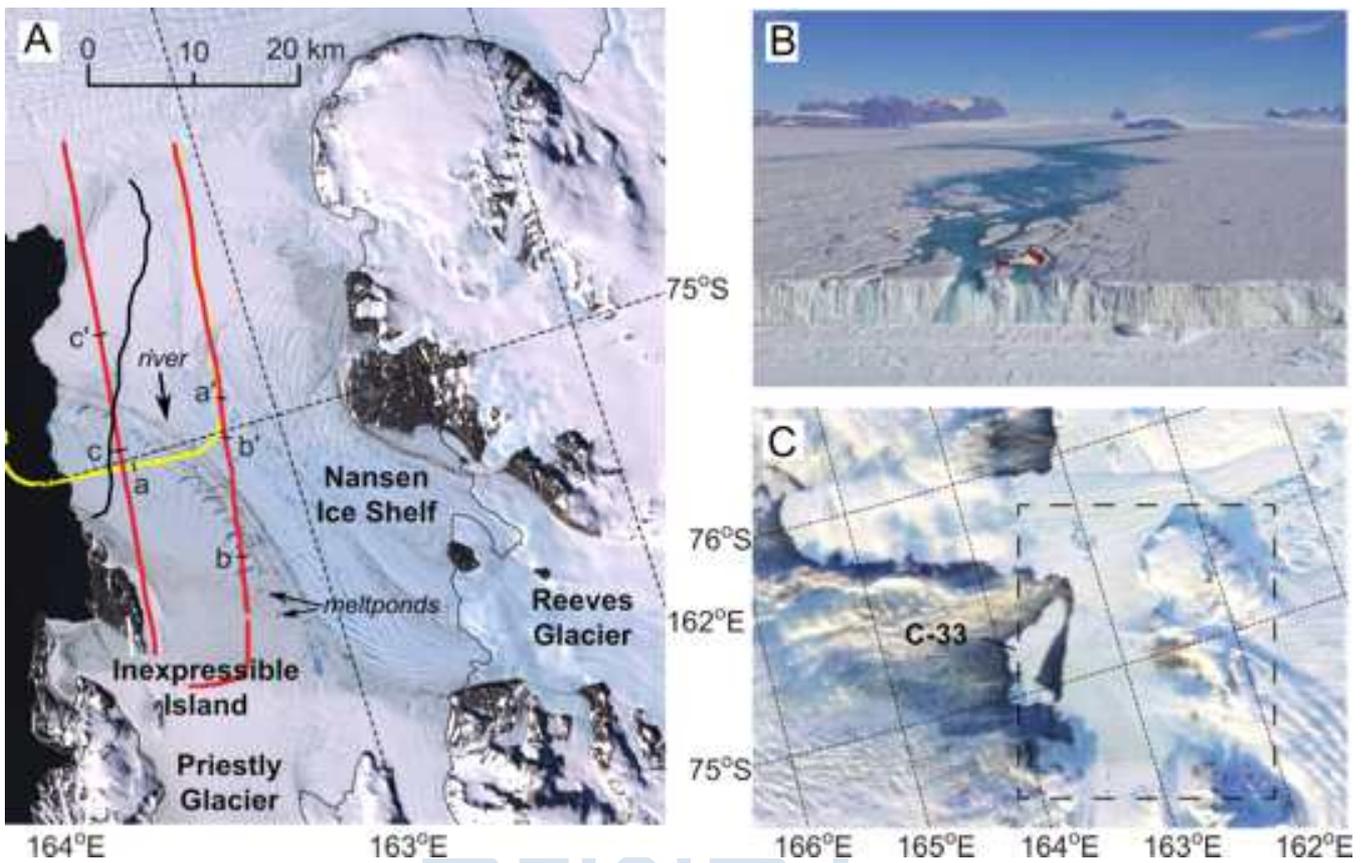


그림 13. 2016년 4월 난센빙붕에서 떨어져 나온 두 개의 빙산(c), 두 빙산 중 큰 쪽은 C-33으로 명명되어 현재까지 인공위성으로 위치를 추적 중(Dow *et al.*, 2018, Science Advances).

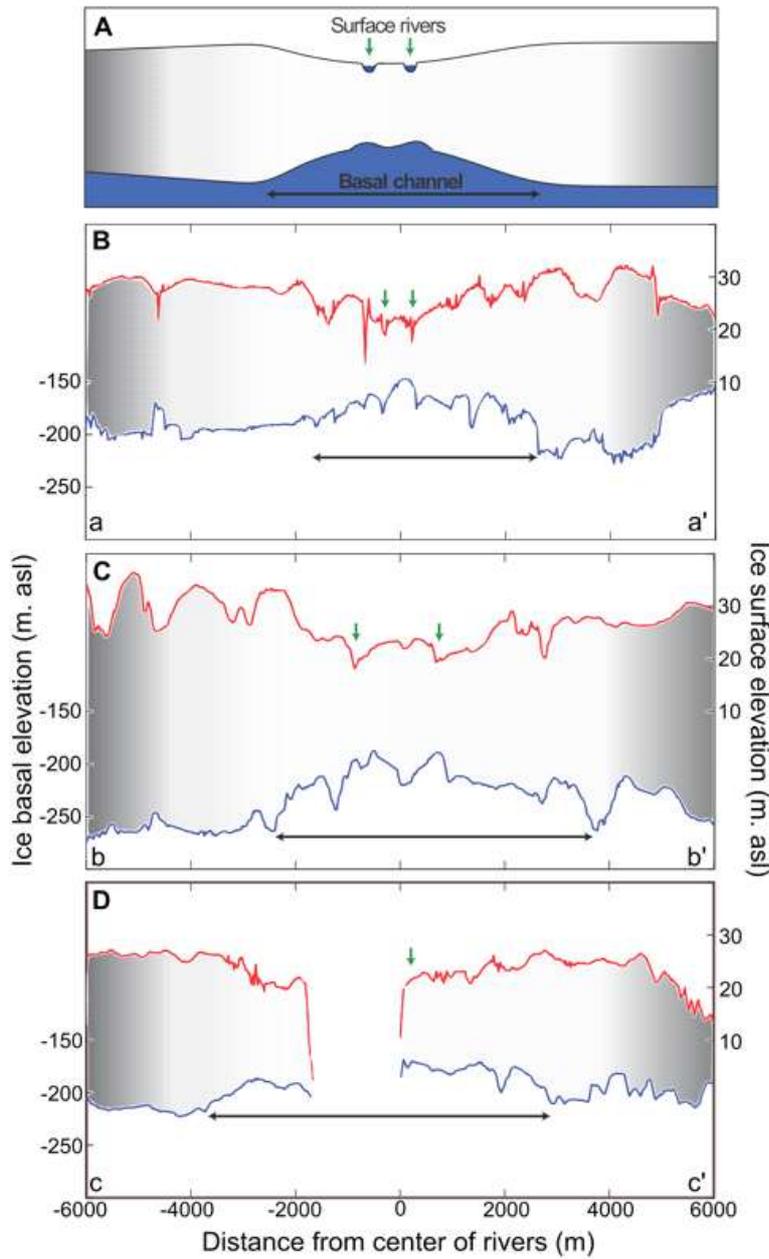


그림 14. (A) 빙붕 상, 하에 형성된 채널 모식도, (B) ICECAP 결과 획득된 빙붕 단면도, 녹색 화살표는 Landsat 인공위성에서 식별된 빙붕 상부 하천망 위치, 검정색 화살표는 항공지구물리탐사로 규명된 빙붕하부 채널(Dow *et al.*, 2018).

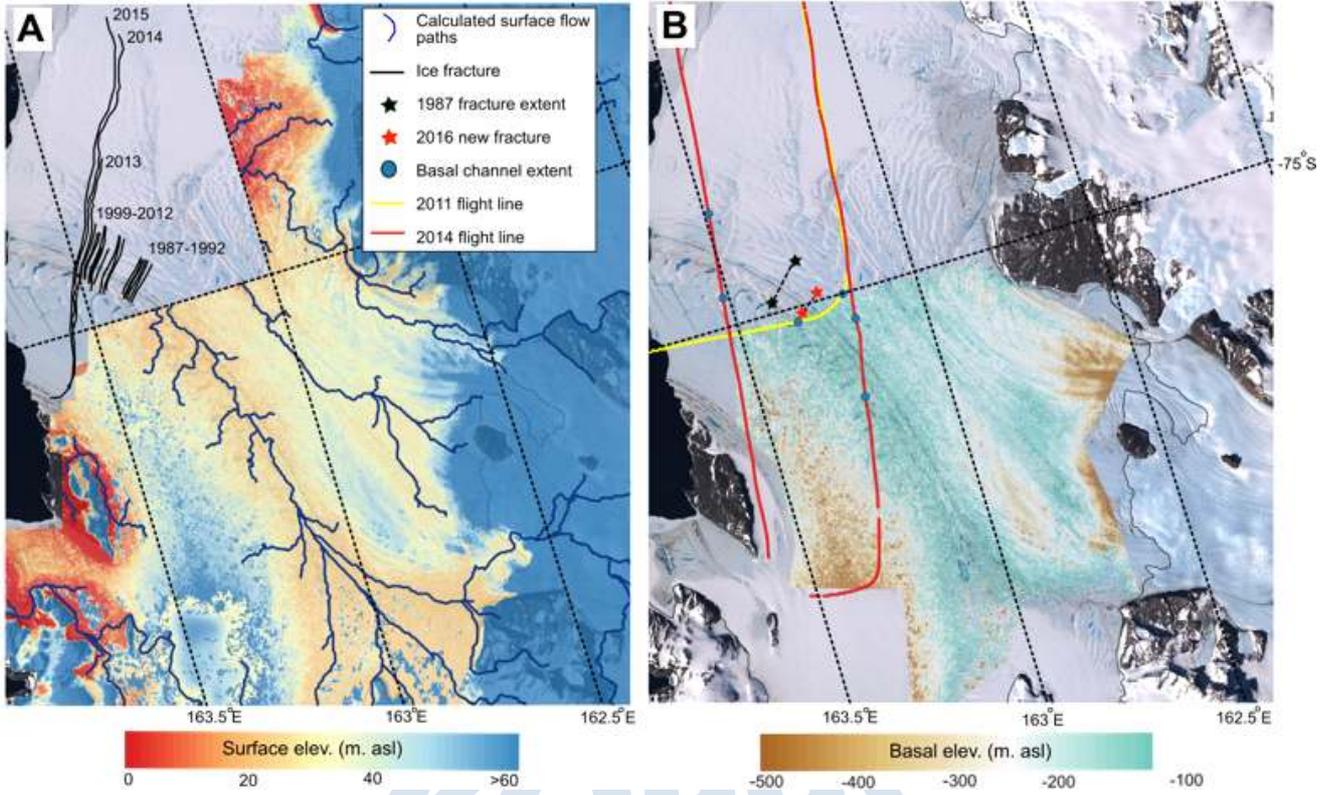


그림 15. 인공위성 자료분석을 통해 획득된 난센빙붕 Digital Elevation Model(DEM), A. 상부 DEM, B. 하부 DEM. 1987-2012 간 크기 변동이 거의 없다가 2014년에 이르러 붕괴 직전까지 확장됨(Dow *et al.*, 2018).

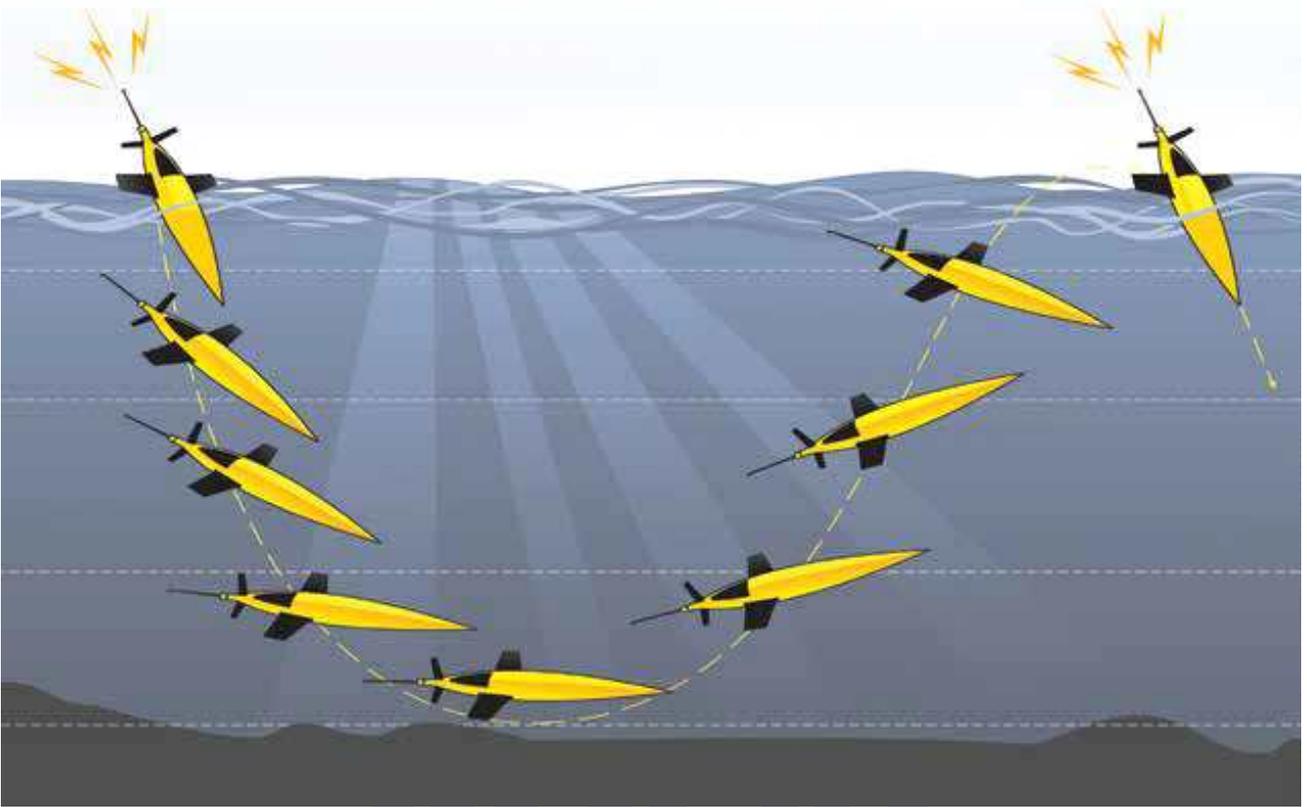


그림 16. Seaglider 운항 모식도

극지연구소

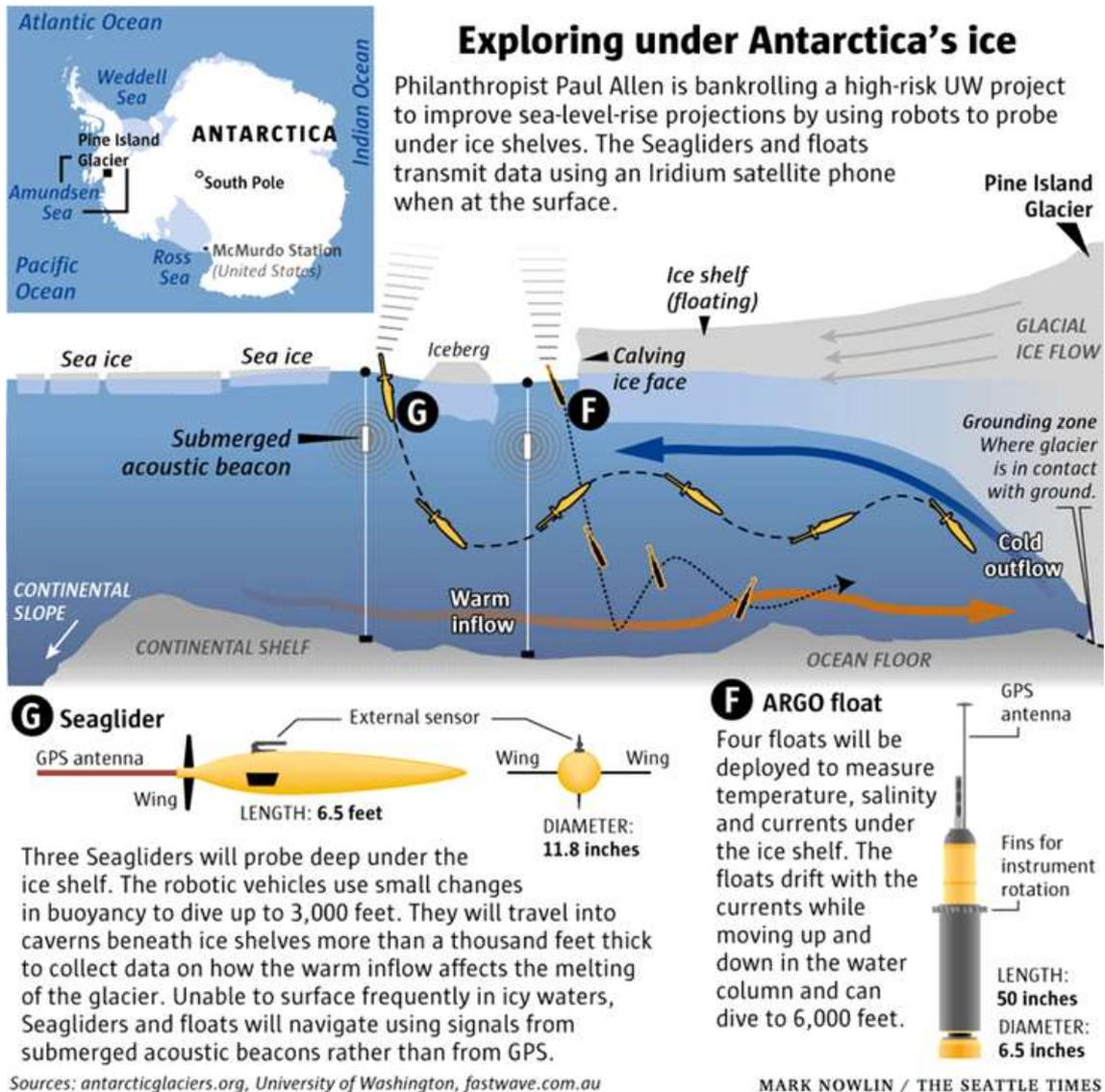


그림 17. 아문젠 해에 투입된 글라이더 탐사 모식도

표 1. 얼음 하부 탐사에 필요한 기능(좌)과 해당 기능을 갖춘 개발된 AUV 종류(중), Icefin 무인 잠수정에 구현된 기술(우) (Spear *et al.*, 2016).

<b>Under-Ice Mission Requirement</b>	<b>Capable Vehicles</b>	<b>Icefin Design Solution</b>
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.

## 제 3 장 빙봉 하부 무인 잠수정 관측 요소

환남극 심층수에 의한 빙봉 하부용융 프로세스를 이해하고 용융이 어떻게 진행될 것인지를 예측하기 위해서는 빙봉 하부 해수순환 모델링 연구가 필수적이며 모델링 연구를 위해서는 빙봉 하부의 공간의 모양, 해수의 물리적 특성 (온도 염분), 해류, 빙봉 하부 얼음의 물성 등의 정보가 필요하다.

### (1) 빙봉 하부 구조

일반적으로 빙봉하부 공간의 모양은 빙봉 얼음층 두께 관측 결과와 중력관측 결과를 역산하여 얻어낸다. 빙봉의 두께는 첫 번째로 물 위에 떠있는 얼음의 높이와 잠긴 두께가 일정한 비를 이루는 것을 이용하여 인공위성 고도자료를 이용하여 두께를 추정할 수 있다. 이 방법은 물위에 자유롭게 떠 있는 상태인 빙봉 말단부에서는 비교적 정확하게 관측할 수 있으나 지반선으로 갈수록 정확도가 현저하게 떨어진다. 이를 보완하기 위해서는 빙하 투과 Radar 탐사를 통해 얼음의 두께를 관측할 수 있다. 지표 한 지점에서의 얼음층의 두께를 관측하기 위해서는 ApRES (Automated phase sensitive Radio Echo Sounding) 장비를 활용한다. 이 장비는 200~400 MHz 대의 레이더파 관측을 통해 얼음층의 두께를 관측할 수 있으며 위상변화 등을 분석할 경우 얼음 층의 물성도 함께 얻어낼 수 있다(그림 18). 넓은 지역은 항공 레이더 탐사를 통해 빙봉의 두께를 관측할 수 있으며 보다 정밀한 관측이 필요할 경우에는 지상레이더 탐사인 GPR 탐사를 수행할 수 있다. 그러나 빙봉 하부 해수 결빙 층이 있을 경우 높은 염도를 가지는 얼음으로 인하여 하부 경계신호가 약해지고 전혀 경계가 확인되지 않는 경우도 있다. 이 경우에는 정확한 얼음의 두께를 알기 어려우며 하부 얼음의 물성을 파악하기 어려우므로 무인잠수정 탐사를 통해 상부 멀티빔 관측을 수행함으로써 보완할 수 있다.

빙봉 얼음층의 두께가 구해진 상태에서 해저면 고도 및 해수층 두께를 파악하기 위하여 항공 중력 탐사가 필요하다. 물과 지각의 밀도 차이에 의해서 발생하는 중력차이를 복합 역산을 이용하여 대략적인 해수층의 두께를 추정할 수 있으나 높은 공간 해상도의 정보를 얻기 어렵다. 빙봉 하부의 해저지형은 무인 잠수정 멀티빔 실측을 통해 정확하게 관측할 수 있다. 멀티빔 실측은 일반적인 연구선에서 행해지는 멀티빔 관측과 동일하나 가장 큰 차이점은 실측점의 위치 정확도이다. 연구선 멀티빔 관측에서는 GPS로 연구선의 위치를 상시로 수신하여 관측값과 결합하여 지형도를 구현해낸다. 그러나 무인잠수정을 이용한

얼음 하부 탐사 시에는 실측점의 위치를 GPS로 확인할 수 없기 때문에 다른 방법을 통해 위치를 추정하여야 한다. 빙봉 하부에서 위치추정은 일반적으로 항법기술과 밀접하게 연관되어 있다. 빙봉 하부 탐사시 빙봉 진입 전에 GPS로 위치를 확인하고 진행 방향과 거리를 통해 선체의 위치를 추정하게 되는데 이 경우 빙봉 말단부에서는 비교적 정확하게 위치추정이 가능하지만 안쪽으로 진입하게 되면 오차가 누적되어 정확한 위치 추정이 어렵게 된다. 무인 잠수정 관측 결과로부터 정확한 빙저 구조 지도를 만들기 위해서는 정확한 위치 추정이 선행되어야 한다.

## (2) 수온과 염분, 해수 흐름

빙봉 하부 해수의 수온과 염분은 해수에 의한 빙봉 하부 용융을 규명하기 위해 반드시 필요한 정보이다. 빙봉 앞쪽에서의 해수 흐름과 수온 염분 정보를 활용하여 모델링을 통해 내부에서의 빙봉 하부의 수온과 염분 해류를 계산할 수 있으나 내부로 들어갈수록 오차가 클 수 밖에 없다. 이 오차를 줄이기 위해서는 실측자료가 필요하다. 실측 자료를 얻는 한가지 방법으로 빙봉에 구멍을 뚫어 해양 계류장비를 설치할 수 있다. 다음 그림은 난센 빙봉에 설치된 시추 계류 장비이다. 해당 계류장비는 시간적으로 연속된 관측자료를 획득할 수 있다는 장점이 있으나 공간적인 해상도를 확보하기는 어렵다. 무인 잠수정을 통한 해양 물성 관측은 공간적으로 넓은 범위의 수온 염분 자료를 관측함으로써 빙봉 용융에 의한 해수 물성 변화와 빙봉하부 전체 해수 순환을 관측할 수 있다. 그러나 AUV 무인 잠수정의 경우 일반적으로 극지방은 여름에만 탐사가 가능한데 이는 계절적인 변화 요소가 반영되지 못해 편향된 결과를 도출할 수 있다. 그러나 2018년 1월에 남극 아문젠 해 dotson 빙하지역에 투입된 글라이더는 AUV와는 다르게 대부분의 동력을 부력 조절로 얻음으로 긴 시간동안 운항이 가능하다. 이 글라이더는 대부분의 시간을 에너지를 최저한도로 소모하는 동면모드로 있다가 1달에 1번씩 잠에서 깨워 빙봉 또는 하부의 해수물성을 측정하는 작업을 겨울기간동안 수행한 후에 해빙이 열리면 수면으로 올라와 위성을 통해 자료를 전달할 계획이다.

(<https://www.geekwire.com/2018/scientists-report-successful-start-undersea-drones-antarctic-sea-ice-study/>)

해류를 측정하는 ADCP 장비는 기본적으로 배를 정선하고 측정하는 LADCP와 원리는 동일하다. 이는 Acoustic Doppler 효과를 이용하여 해류와 방향과 속도를 계산해내는데 관측장비가 완전히 멈춰있는 상태에서는 관측값이 곧 해류가 된다. 그러나 관측이 본체가 움직이는 동안에 이루어지는 경우에는 본체의 움직임을 보정해주어야 정확한 해류값을 얻

어낼 수 있다. 이 장비 자체는 수평방향에서 초당 수 센티미터 (Firing and Gordon 1990), 수직방향으로는 초당 수 밀리미터에 달하는 정확도로 해류를 측정할 수 있지만(Thurnherr 2011) 본체의 움직임이 정확하게 보정되지 않으면 측정 오차는 커질 수 밖에 없다. 일반 연구선에서는 선체의 방향과 pitch(앞뒤의 흔들림)와 roll(선체좌후의 흔들림)이 보정에 사용된다. 본체의 자세를 파악하는데는 자기 나침반과 가속도계가 주로 사용되는데 자기나침반의 경우에는 때로는 15도가 넘는 오차를 만들어낸다. (Thurnherr *et al.*, 2017). 자기 나침반을 이용한 heading 보정은 특히 자기 복각이 큰 극지역에서는 자기 수평 성분이 약해져서 더욱 어려울 수 있다. 그림 20 은 2017/18 아라온 남극하계 탐사시 획득한 LADCP 해류 관측값(녹색화살표)과 Ship ADCP 해류 관측값(파란색 화살표)이다. 이 그림에서 둘 사이에 큰 차이가 있음을 알 수 있을 뿐 아니라 움직이면서 측정하는 Ship ADCP 값은 가까운 관측점에서도 큰 차이를 보여주는데 이는 실제 해류의 차이일 가능성 보다는 선체의 움직임으로 인한 오차일 수 있다. 극지역에서의 자기 특성은 무인 잠수정 항법에도 영향을 미치지만 동시에 관측값 보정에 영향을 미쳐 정확한 관측값을 획득하는데에도 방해요인이 된다.

최근 글라이더 관측센서로 주목을 받고 있는 turbulence profiler는 더욱 더 정확한 선체 운동 보정이 필요하다. 이 장비는 해류보다 미세한 구조의 수평 흐름을 측정하므로서 난류(turbulence) 의한 분산률(Dissipation rate)를 측정할 수 있다. 이 측정 장비를 활용하면 용빙수의 혼합과 열전달 과정을 보다 정확하게 이해할 수 있기 때문에 빙봉 하부 탐사에 활용수요가 점점 늘어나고 있다. 극지연구소에서는 18/19 남극 하계 탐사시 16/17년에 활용한 Slocum G2 glider에 turbulence 측정장비인 Rockland 사의 MicroRider-100LP를 장착하여 탐사를 수행할 예정이다. 이 장비는 본래 끈에 장비를 매달아 수중에서 천천히 자유낙하하듯이 투입하면서 관측이 되어야 하는 장비로 낙하 속도를 조절하기 위해 그림과 같이 장비 윗부분에 술이 달려있다. 본 장비는 본체의 움직임이 빠르거나 모터 진동이 있을 시 관측 값에 오차가 커지기 때문에 AUV 보다는 글라이더에서의 활용에 상당히 적합하다.(Wolk *et al.*, 2009)

터블런스 관측 센서의 글라이더 활용에서 가장 중요한 부분은 정확하게 수평방향 난류 관측값을 보정할 수 있도록 글라이더의 heading과 본체 움직임을 파악하는 것이다. 터블런스 관측보정을 위해 본 장비에는 자기 나침반과 가속도계가 포함되어 있지만 앞에서 설명한 ADCP 관측 보정의 문제점과 마찬가지로 극지역에서는 자기 나침반을 이용한 heading 측정값 정확도가 떨어진다는 문제점이 있다. 자기장이 약한 지역에서 움직이는 선체의 정확한 heading을 알기 위해서는 선체의 시간에 따른 위치변화를 정확하게 파악하여야 한다. 최근

에는 음향을 이용한 위치파악이 최신 AUV와 Glider에 적용되어 활용되고 있다. 특히 2018년 아문젠 해에 투입된 Kongsberg사의 Seaglider는 수중음향 신호를 이용한 삼각 측량으로 위치를 파악하는 방식을 사용하여 주로 얼음이 없는 열린 해역에서만 활용되던 글라이더가 빙봉하부 탐사에까지 활용될 수 있음을 보여주어 많은 관심을 받고 있다. 음향신호를 이용한 삼각 측량 방법은 수중 계류장비 위치추적에 사용되는 triangulation과 방식과 기본 원리는 동일하다. 음향 신호 수신에 걸린 시간으로부터 물체의 거리를 계산하고 역산을 통해 위치를 결정한다. 그림 24는 해양계류장비에 적용된 triangulation 방법의 예시로 회색점은 음향 신호를 보낸 지점의 위치, 붉은색 점은 역산으로 찾아낸 해양계류장비의 위치이다. 빙봉 하부 무인 잠수정 위치를 추정하는데 있어 정확도는 위치결정 기준점이 될 Acoustic beacon 설치 커버리지가 중요하다. 아문젠 해에 투입된 Seaglider 탐사에서는 빙봉 바깥에 어쿠스틱 비컨이 설치하였다. 이 경우 선체가 빙봉안쪽으로 깊게 진입할 경우 위치 오차차가 커질 수 있다. 이를 보완하기 위해 빙봉 열수 시추 계류장비(그림 21)를 설치할 때 acoustic beacon을 넣을 경우 보다 높은 정확도로 무인잠수정의 위치를 계산할 수 있다.

상부가 얼음으로 막힌 환경에서의 무인잠수정 운용은 해수면으로 올라와 위치 확인이 불가능하며 하부 크레바스나 구조에의 충돌 위험성이 존재하기 때문에 다른 어떤 지역보다 유실 위험이 높다. 그럼에도 불구하고 세계 각국에서 빙봉 하부의 무인 잠수정 탐사를 수행하는 이유는 무인잠수정 탐사를 통해 미래의 빙권 거동을 예측하는데 핵심적인 요소를 관측할 수 있기 때문이다. 고가의 관측 장비와 선체를 유실위험을 감수하고 관측을 수행하기 때문에 정확한 관측값을 획득하는 것은 무엇보다도 중요한 일이라고 할 수 있다.

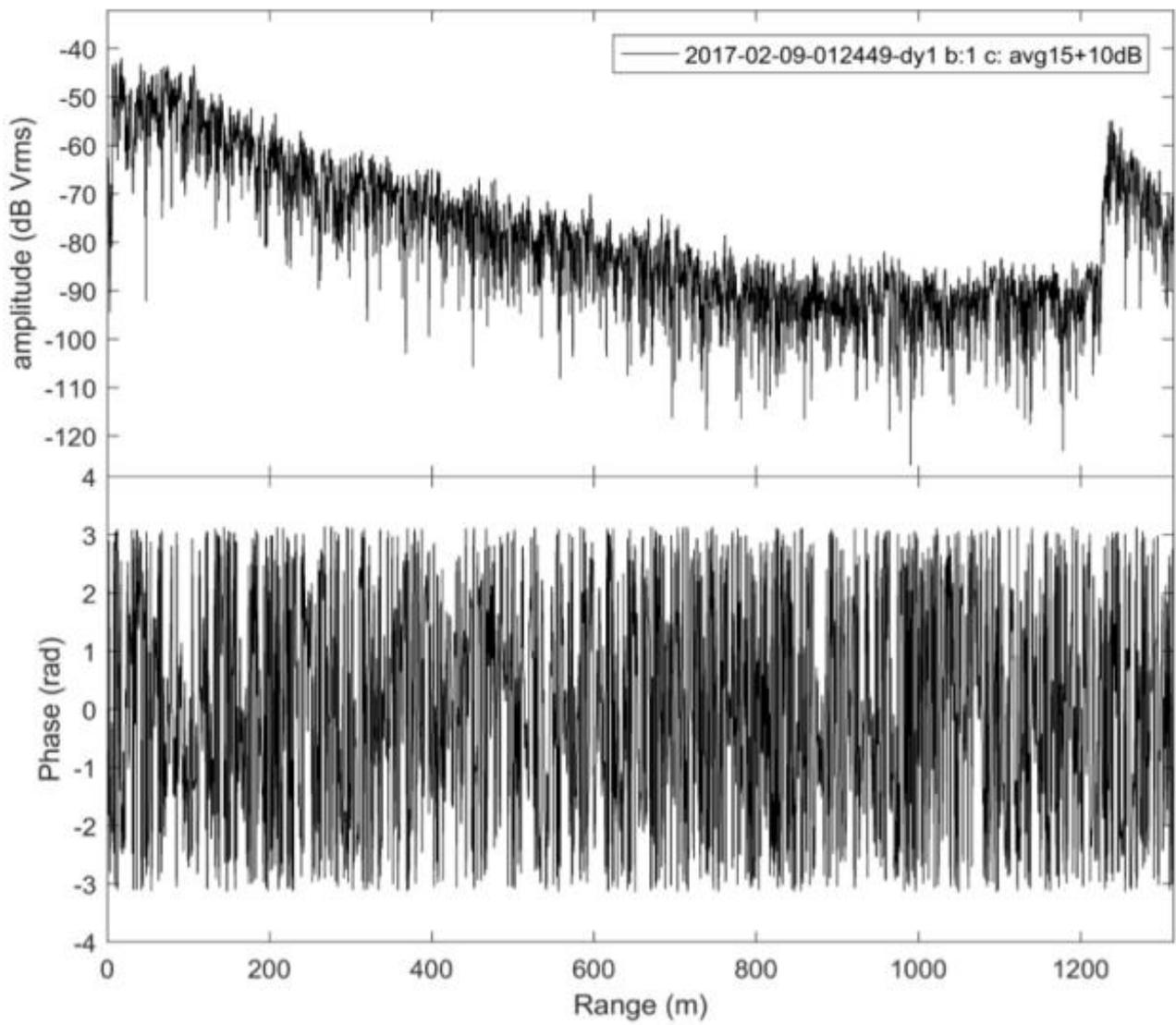


그림 18. Apres 레이더 반사파 관측결과 예시 빙붕 두께 1240m



그림 19. 헬리콥터 탑재 빙하투과레이더 시스템

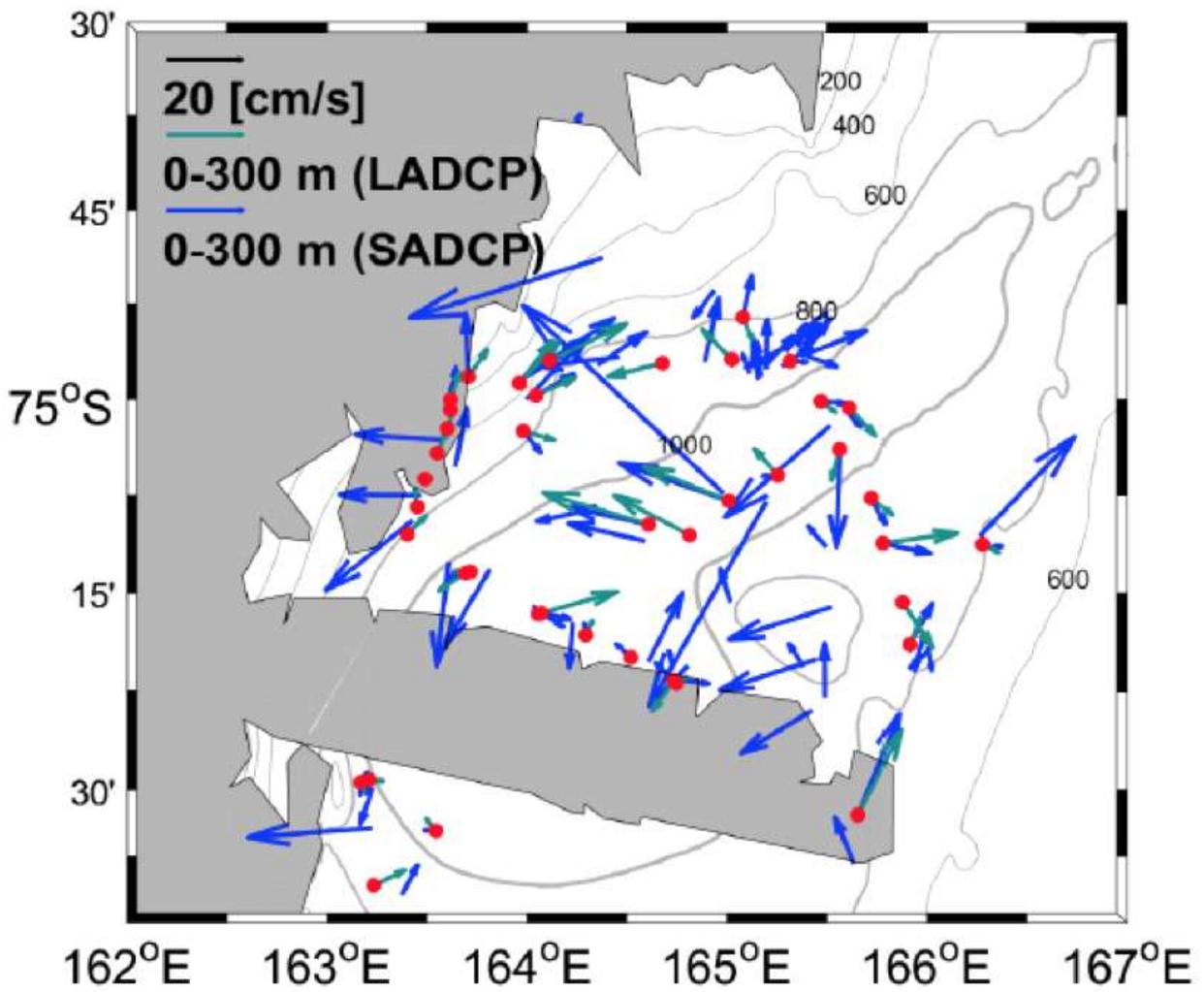


그림 20. 2017/18 아라온 남극하게 탐사시 획득한 LADCP 해류 관측값(녹색화살표)과 Ship ADCP 해류 관측값(파란색 화살표). 둘 사이에 큰 차이가 있음을 알 수 있다.

**Table 1: AMIGOS-II at Nansen Ice Shelf Components**

**Structure, Power, and CPU**

- CPU: Triton-3 single-board computer, internal ethernet, serial, and USB ports; Linux OS, watchdog function;
- Iridium modem and antenna;
- 10 cm tubular design, 3 m sections, total 6 m installed (0.5 m sub-surface, 5.5 m exposed);
- 8 x 100 amp-hr Pb gel-cell batteries

**Imaging: Surface / Sky condition**

- Camera system, Mobotix

**Weather / Climate**

- Vaisala WXT520 weather station;
- R. M. Young propeller wind-vector system at top of mast

**Ice Motion and Basal Melting**

- Dual-Frequency GPS – Topcon GRS-1
- BAS ApRES and GPS (provided by KOPRI / C-K Lee)

**Snow-Firn Energy Balance Sensors**

- Albedometer (dual Apogee SP-212 all-sky lightmeters);
- 36-meter PRT string; sensors at 1, 2, 4, 8, 12, 16, 24, 36m

**Sub-Ice Ocean Sensors**

- DTS laser fiber optic cable thermal profiling system;
- 2 SeaBird MicroCAT SBE-37IMP CT sensors, w/ press. port;
- 2 SeaBird Aqua-Dopp Doppler current meters;

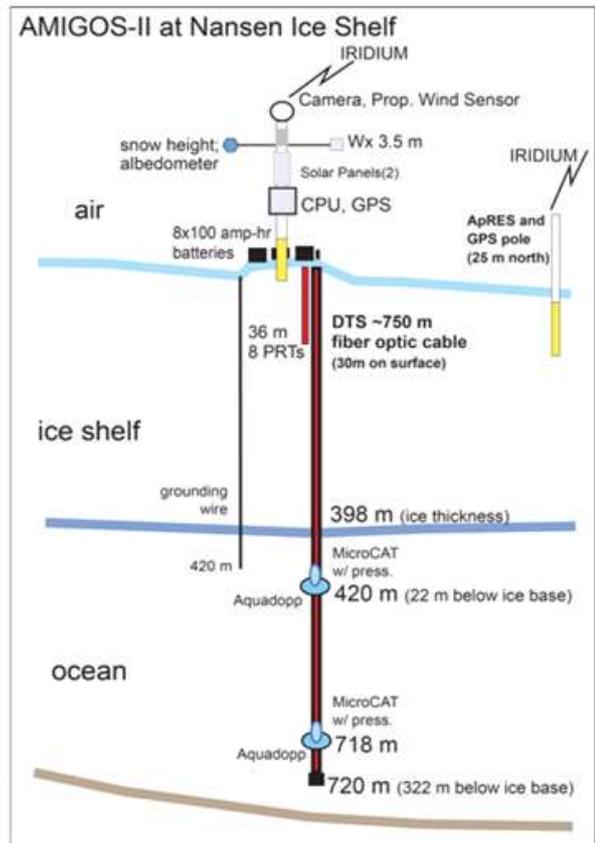


그림 21. 난센 빙봉에 설치된 시추 계류장비 모식도, 하부에 수온 염분 해류를 관측할 수 있는 센서가 달려있다.



그림 22. 18/19 남극 하계 탐사에서 활용될 turbulence 측정장비가 장착된 Slocum 글라이더



그림 23. 연구선에서 터블런스 관측에 쓰이는 Rockland VMP250IR 장비

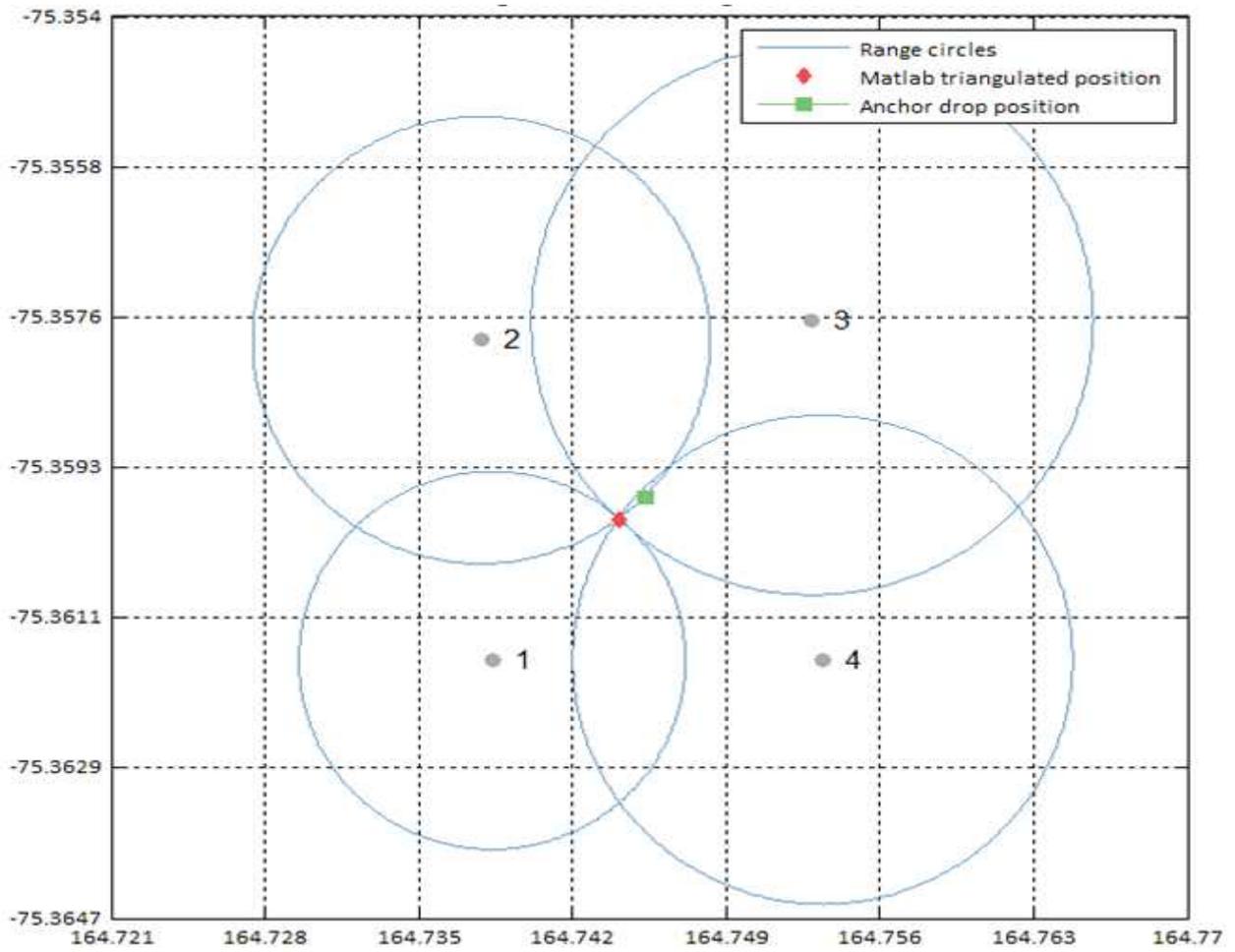


그림 24. 해양계류 장비에 적용된 triangulation 위치결정 방법의 예

## 제 4 장 북극 다산기지 GPS 관측 장비 설치 지원

극지연구소에서는 극지역 GPS 수신 환경 테스트를 위한 다산기지 관측장비 설치를 지원하였다. 다산기지는 북위 78도 55분 동경 11도 56분에 위치해있으며 평균기온 -6.3℃, 최저기온 -37℃로 극지에서 활용할 장비를 테스트하는 데에 적합하다. 다산기지는 니알슨 과학기촌 공용시설을 임차하여 사용하고 있는데 노르웨이 국영회사인 KingsBay사가 기지촌 관리를 맡아서 하고 있다. 극지연구소에서는 매년 2월에 북극 다산과학기지에서 현장활동을 진행하고자 하는 인원을 대상으로 수요조사를 시행하고 있다. 기지방문 신청 절차는 다음과 같다

- (가) 현장활동 계획서 및 기지방문 신청서류 제출 : 희망시기, 인원 목적등을 기재하여 제출
- (나) 극지활동 적격여부 검토 : 참가자의 안전 교육 이수 및 건강검진 결과 검토
- (다) 기지방문 승인 : 극지연구소 내부 규정에 의거하여 신청서 검토후 승인
- (라) RIS(Research In Svalbard) 프로젝트 등록 : 노르웨이 당국의 요청에 따라 스발바드에서 진행하는 모든 연구 프로젝트는 RIS온라인 사이트에 등록하여 활동을 신청함. 극지연구소 승인과 별도로 RIS에서 프로젝트 승인이 완료되어야 현장활동이 가능하다 (그림 24). 승인이 완료된 후에는 극지연구소에서 일정을 조율하여 극지연구소 지원팀에서 일괄적으로 니알슨 기지촌 입출 항공기, 숙소, 시설 활용 등의 사항을 예약함
- (마) 북극 현장활동 실시 : 사전 예약된 일정에 맞게 현장활동을 실시하며 현지에서 사전 예약 신청한 시설 예약내용을 변경하여 사용한 경우 반드시 현지 담당자와 기지지원팀으로 통보하여야 함

## Project

 Activity feed  Delete project  Edit project

RIS-ID  
11104

### FUNDAMENTAL TECHNOLOGY FOR UNDERWATER POSITIONING USING ACOUSTIC SOURCES AND MARITIME NAVIGATION IN POLAR ENVIRONMENT

Developing fundamental technology for estimation of positioning using acoustic sources and navigation of autonomous vehicle/ships considering polar regions environment ((high latitude, low temperature, floating ice etc)

#### BOOKINGS

There are no active or future fieldworks for adding a new booking.

Start editing your project to add fieldwork periods.

ID 11136: 2018-08-06 -> 2018-08-09 - Ny-Ålesund - Approved

Type	Period	From	To	Coordinates	Station	Location
Fieldwork	1	2018-08-06	2018-08-09	<a href="#">E434217, N8762401</a> <a href="#">78.916663°N, 11.933325°E</a>	KOPRI-Korea	Ny-Ålesund

#### SUMMARY

? Fundamental technology for underwater positioning using acoustic sources in polar regions environment (high latitude, low temperature, floating ice etc) - Positioning in LBL(long-range) navigation system constructed anomalously in polar regions environment - Characteristic analysis of navigation core sensors (IMU, DVL, etc.) in polar regions and elemental technique of integrated navigation for polar navigation - Survey and introductory experiment to perform navigation experiment of marine robot in polar ? Fundamental technology for maritime positioning and navigation in polar regions - Survey of user requirements and limitations for maritime positioning and navigation in polar regions - Testbed based on simulation for maritime positioning and navigation in polar regions - Study on fundamental technology for maritime positioning and navigation in polar regions using testbed ? Fundamental research on motion behaviour and technology for path identification of a slowly moving object in polar sea - Technology development trend analysis on prediction for drift routes of ice floes and ice management in polar sea - Basic research on motion behaviour of a slowly moving object and experimental techniques in ice tanks for positioning of in polar sea with ice - Basic research on towing stability in polar sea and feasibility study on utilization of related technologies for development of an ice management model

그림 25. KRISO 다산기지 GPS 설치 사업 RIS 승인 내역

## 제 5 장 결론

지구온난화로 남극 빙상이 녹아 바다로 유출되면서 해수면 상승이 일어나고 있으며 서남극에서는 수십년 내로 큰 규모의 빙붕 붕괴가 일어날 것으로 예상되고 있다, 빙붕 붕괴는 빙하의 흐름을 가속화시켜 더 빠르게 질량이 바다로 유출되도록 하는데 빙붕붕괴 시점과 빙상 질량유실을 보다 정확하게 예측하기 위해서는 빙붕 하부의 무인잠수정 탐사가 필수적이다. 극지 빙붕 하부에서의 안전한 탐사와 정확한 관측값 보정을 위해서는 본체의 위치와 움직임을 파악하는 것이 중요하나 환경적으로 GPS나 자기나침반 활용이 어렵기 때문에 다른 보완책이 필요하다. 미국에서는 2018년에 수중음향 신호를 이용하여 위치를 결정하여 운항하는 Glider가 남극 아문젠 해 빙붕에 투입되어 운항 중에 있으며 수중음향 위치결정 기능을 보유하고 있는 AUV 모델들의 빙붕 탐사가 계획 중에 있다. 정확한 위치 결정이 가능한 무인잠수정을 이용하여 빙붕하부의 해수 물리 특성과 해류 정보를 획득한다면 빙붕 용융 프로세스를 보다 정확하게 이해하여 붕괴 시점 예측 정확도를 높일 수 있을 것으로 기대한다.



## 제 6 장 참고문헌

- 극지연구소, 장보고기지 주변 빙권변화 진단, 원인규명 및 예측, 2016 11월 (인천: 동연구소, 2017), 76-89
- 극지연구소, 장보고기지 주변 빙권변화 진단, 원인규명 및 예측, 2017 6월 (인천: 동연구소, 2017), 105-118
- 극지연구소, 장보고기지 주변 빙권변화 진단, 원인규명 및 예측, 2018 6월 (인천: 동연구소, 2018), 70-218
- Baroni C and 12 others (2002) Relief Inlet Quadrangle (Victoria Land) (scale 1:250,000). Siena Museo de Antartide, PNRA
- R. E. Bell, W. Chu, J. Kingslake, I. Das, M. Tedesco, K. J. Tinto, C. J. Zappa, M. Frezzotti, A. Boghosian, W. S. Lee (2017) Antarctic ice shelf potentially stabilized by export of meltwater in surface river. *Nature* 544, 344-348.
- 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
- 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
- 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.A. Church, J.M. Gregory, N.J. White, S.M. Platten, and J.X. Mitrovica. (2011). Understanding and projecting sea level change. *Oceanography* 24(2):130 - 143, doi:10.5670/oceanog.2011.33.

Dinniman MS, Klinck JM and Smith WO (2003) Cross-shelf exchange in a model of the Ross Sea circulation and biogeochemistry. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 50(22), 3103-3120. (doi: 10.1016/j.dsr2.2003.07.011)

Dinniman, M.S., J.M. Klinck, W.O. Smith (2011) A model study of Circumpolar Deep Water on the West Antarctic Peninsula and Ross Sea continental shelves, *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 58, 13-16, 1508.

C. F. Dow, W. S. Lee, J. S. Greenbaum, C. A. Greene, D. D. Blankenship, K. Poinar, A. L. Forrest, D. A. Young, C. J. Zappa (2018) Basal channels drive active surface hydrology and transverse ice shelf fracture. *Sci. Adv.* 4, eaao7212.

IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp

Joughin, I., B. E. Smith, and B. Medley (2014), Marine Ice Sheet Collapse Potentially Under Way for the Thwaites Glacier Basin, West Antarctica, *Science*, 344(6185), 735 - 738.

F. S. Paolo, H. A. Fricker, L. Padman (2015). Volume loss from Antarctic ice shelves is accelerating, *Science*, 348, 327 - 331.

- 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.
- C. Stevens, Sang Lee, W., Fusco, G., Yun, S., Grant, B., Robinson, N., & Yeon Hwang, C. (2017). The influence of the Drygalski Ice Tongue on the local ocean. *Annals of Glaciology*, 58(74), 51-59. doi:10.1017/aog.2017.4
- P. Wadhams and M. J. Doble. (2008). Digital terrain mapping of the underside of sea ice from a small AUV, *Geophysical Research Letters*, 35(1)
- Wolk F, Yamazaki H, Seuront L and Lueck RG (2002) A new free-fall profiler for measuring biophysical microstructure. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 19, 780-793. (doi: 10.1175/1520-0426(2002)019<0780:ANFFPF>2.0.CO;2)

극지연구소



## 극지연구소 주 의

1. 이 보고서는 선박해양플랜트연구소에서 수행한 주요사업 위탁과제의 연구결과보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 선박해양플랜트연구소에서 수행한 주요사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안됩니다.