

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



2017.12.28

선박해양플랜트연구소

제 출 문

선박해양플랜트연구소장 귀하

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

2017. 12. 15.

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 | PES9230 | 해당단계 연구기간 | 2017.07.01~11.30 | 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 | |
| <ul style="list-style-type: none"> - 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 - 극지역에서는 자남극과 실제남극 방향의 차이인 편각이 크고 GPS 수신 문제로 인하여 무인잠수정 운용에 어려움이 있음 - 해빙에 의한 손상을 방지하기 위해 고도의 장애물 회피 기술이 필요하며 해빙이 생성되는 시기에는 물속에서 작은 얼음 부유물로 인하여 장애물 인식이 어려움이 있을 수 있음 - 쇄빙연구선 아라온 탐사를 통해 획득한 해수물성 자료에 의하면 빙하 하부용융에 의해 유출된 초저온수가 존재하며 수온과 염분이 급격히 변하여 비중이 일정하지 않다. 이로 인한 잠수정의 상하 위치제어에 어려움이 발생할 수 있음 - 고위도의 위성 통신 문제로 인한 무인잠수정과 연결 단절 문제, 결빙으로 인한 센서 이상 작동, 저온에서의 배터리 방전이 발생할 수 있음 - 영국 BAS나 미국 WHOI등에서는 다수의 탐사 경험축적을 바탕으로 빙붕 하부탐사를 수행 - 극지 이상작동의 원인이 될수 있는 초저온수 등의 분포와 해수순환등 현장 자료 분석을 통해 극지용 무인잠수정 개발 시행착오를 줄일 수 있음 | | | | | |
| 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

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. 연구개발의 내용 및 범위

본 연구에서는 극지에서 활용 가능한 무인항법 개발에 필요한 극지 해양 환경 정보를 제공함으로써 항법 개발 시행착오를 줄이고 현장 활용 시기를 앞당기고 극지에서 해양로봇 활용 사례 및 개발 계획을 조사하여 기존에 발생한 문제점과 기술 개발 동향을 제시하고자 한다. 또한 극지역 실측한 해수의 물리적 특성, 빙저 하부 구조 등 탐사 예정지 해양환경 정보를 제공하여 모사실험 환경 구성에 필요한 정보를 제공하고 개발된 기술을 안전하게 테스트할 수 있는 탐사 예정지를 제시한다.

IV. 연구개발결과

극지역에서는 자남극과 실제남극 방향의 차이인 편각이 크고 이동 시 편각의 변화가 크기 때문에 보정이 필요하다. 해빙에 의한 손상을 방지하기 위해 고도의 장애물 회피 기술이 필요하며 해빙이 생성되는 시기에는 물속에서 작은 얼음 부유물로 인하여 장애물 인식이 어려움이 있다. 쇄빙연구선 아라온 탐사를 통해 획득한 해수물성 자료에 의하면 빙하 하부용융에 의해 유출된 초저온수가 존재하며 수온과 염분이 급격히 변하여 비중이 일정하지 않다. 이로 인한 잠수정의 상하 위치제어에 어려움이 발생할 수 있다. 또한 고위도의 위성 통신 문제로 인한 무인잠수정과 연결 단절 문제, 결빙으로 인한 센서 이상 작동, 저온에서의 배터리 방전 등도 주의해야 할 점이다. GPR 탐사를 통해 빙봉의 하부구조를 미리 아는 것은 탐사 위험요소를 줄일 수 있다.

V. 연구개발결과의 활용계획

극지의 혹독한 환경에 적합하도록 개발된 항법 기술은 극지뿐만 아니라 국내에서도

지금까지 접근하기 어려웠던 지역의 해저 탐사, 수중구조물 유지관리 분야에 활용될 수 있으며 개발된 기술은 무인 관측의 시공간적 영역을 확장시켜 해저 광물, 생명 자원 개발 분야에서 경제적 이득을 창출할 수 있을 것이다.

본 연구의 탐사 목표인 지반선은 빙붕 빙하의 경계지역이자 해양과의 상호작용이 활발히 일어나는 곳으로 빙하와 빙붕 거동 예측에 있어서 핵심적으로 관측해야 할 지역이다. 지반선 부근에서의 충돌을 피하고 안전하게 접근하기 위한 빙붕 하부 자율항법 기술개발을 통해 지반선 인근까지 빙붕 하부 탐사를 수행한다면 지반선에서의 빙하와 빙붕 거동 물리기작 규명에 있어 결정적인 단서를 제시할 것이며 빙저 실측 자료 획득을 통해 보다 정확한 빙하와 빙붕 거동 예측을 가능케 하여 빙상용융과 연관된 해수면 변동 예측의 정확도 향상에 기여할 것으로 기대한다.



S U M M A R Y 및 KEYWORDS

(영 문 요 약 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, and weak GPS signals and big magnetic declination require more developed navigation system. Sea ice and its melting water also threat safe operations. 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 share the process and results of the AUV survey performed in the Ross Sea, Antarctica. 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, Explorations 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----- | 13 |
| Chapter 3. KOPRI's survey in the Ross Sea----- | 23 |
| Chapter 4. Conclusion----- | 47 |
| Chapter 5. References----- | 48 |

목 차

| | |
|-------------------------------|----|
| 제 1 장 연구개발의 목적, 필요성----- | 8 |
| 제 2 장 무인잠수정을 활용한 빙저탐사 현황----- | 13 |
| 제 3 장 극지 현장 탐사 결과----- | 23 |
| 제 4 장 결론----- | 47 |
| 제 5 장 참고문헌----- | 48 |



제 1 장 연구개발의 목적, 필요성

무인 로봇을 이용한 탐사는 인간이 지금까지 접근하지 못했던 극한 환경에 접근하여 직접 조사할 수 있는 기회를 제공하였다. 특히 심해환경 탐사는 무인 잠수정 기술 발달과 함께 이루어졌다고 해도 과언이 아니다. 유인 탐사에 비하여 적은 위험부담과 단순한 장비로 수행될 수 있는 무인 탐사는 해양자원조사, 해저 구조물 설치, 해저 지질 조사, 해양 생태환경 조사, 군사 작전 수행 등 많은 부분에서 영역을 넓혀가고 있다. 무인 잠수정 활용에 있어 가장 도전적인 장소는 극지역 해양으로 전 세계에서는 경쟁적으로 최신 무인 기술을 투입하여 탐사를 수행하고 있다. 극지에서 활용가능하다는 것의 의미는 다른 환경에서 무난하게 활용할 수 있다는 것뿐만 아니라 지구바깥 외계와 환경이 가장 유사한 곳으로 외계에서의 활용 가능성을 의미한다. 이에 외계행성 탐사를 위한 무인잠수정 역시 남극에서 테스트를 수행하고 있다 (<http://spaceref.com/jupiter/using-antarctica-to-prepare-for-europa-mission.html>).

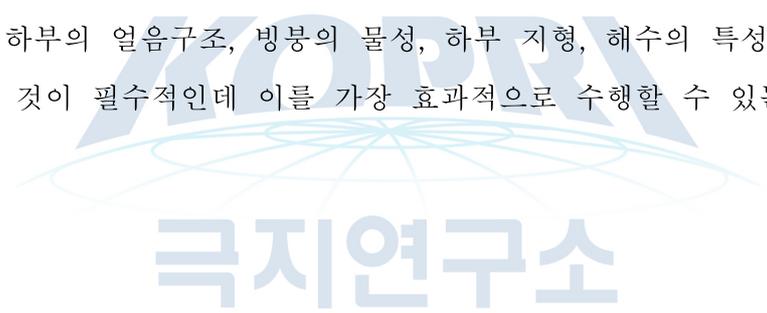
무인잠수정(Unmanned Underwater Vehicle, UUV)은 크게 유선으로 조종되는 ROV (Remotely Operated Vehicle)과 선 없이 자율 운항 프로그램을 바탕으로 모터와 프로펠러에 의해 움직이는 AUV (Autonomous Underwater Vehicle), 자율 운항을 하지만 프로펠러 없이 부력 변화나 파도 에너지를 이용하여 추진하는 Glider로 구분할 수 있다. ROV는 유선으로 사람이 직접 조종하여 다양한 환경에서 미세한 조종이 가능하고 선을 통한 전력 공급이 수월하여 다양한 기능의 모듈을 포함할 수 있다는 장점을 가지나 유선 로봇의 특성상 작업 거리가 한정적이라는 단점이 있다. 좁은 지역에서 정밀한 탐사가 가능한 ROV는 해저 구조물 수리, 시료 채취 등 복잡한 작업을 수행하는 데에 유리하다. AUV는 선이 없는만 먼 곳까지 접근이 가능하나 한정적인 전력공급으로 인하여 ROV처럼 다양한 작업 모듈 포함이 불가능하며 장애물이 많을 경우 고도의 자율운항 기술이 요구된다. Glider는 프로펠러가 아닌 부력변화에 의한 상하 움직임을 전진하는 힘으로 변환하거나 파도에너지, 태양에너지 등을 이용하여 추진하는 것으로 적은 에너지 소모로 장기 운항이 가능하다는 장점이 있으나 추진체가 없어 복잡한 운항이 불가능하여 접근 가능 영역이 한정적이라는 단점이 있다.

극지에서의 무인 잠수정의 활용은 주로 탐사선으로 관측하기 어려운 얼음 밑의 환경을 관측하는 것에 집중되고 있다. 최근 전 세계적으로 문제가 되고 있는 지구 온난화에 의한 빙상용융과 해양과 빙권 상호관계를 규명하기 위하여 극지역 빙저 탐사의 중요성이 점점 부각되고 있는데 이를 위해 각국에서는 극지용 무인잠수정을 개발하여 탐사를 추진하고 있

다. 해수면 상승은 1차적으로는 직접적인 침수피해 뿐만 아니라 2차적인 환경, 생태 변화까지 야기시키고 있어 이를 정확하게 예측하기 위한 노력이 전 세계적으로 수행되고 있다.

IPCC 5차보고서 (IPCC AR5, 2013년)에 의하면 지난 20세기에 전 지구 평균기온은 0.85°C 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, 2).

남극에서의 빙상용융은 대부분 서남극 지역에서 이루어지고 있는데 (Paolo *et al.*, 2015, Science, 그림 3) 지구 온난화에 의해 따뜻해진 해수가 빙붕 하부로 유입되어 하부용융을 가속화시킴에 의해 빙상용융이 빠르게 일어나고 있다. 특히 빙붕 하부 용융에 의한 빙붕이 붕괴될 경우 빙하의 바다로의 유출을 급속히 빨라지므로 해수면 변동과 관련된 빙상거동 예측에 있어 빙붕의 안정성 진단은 필수적이다. 빙붕의 안전성을 진단하고 향후 거동을 예측하기 위해서는 빙붕 하부의 얼음구조, 빙붕의 물성, 하부 지형, 해수의 특성과 물의 흐름 등을 정확하게 관측하는 것이 필수적인데 이를 가장 효과적으로 수행할 수 있는 것은 무인잠수정 탐사이다.



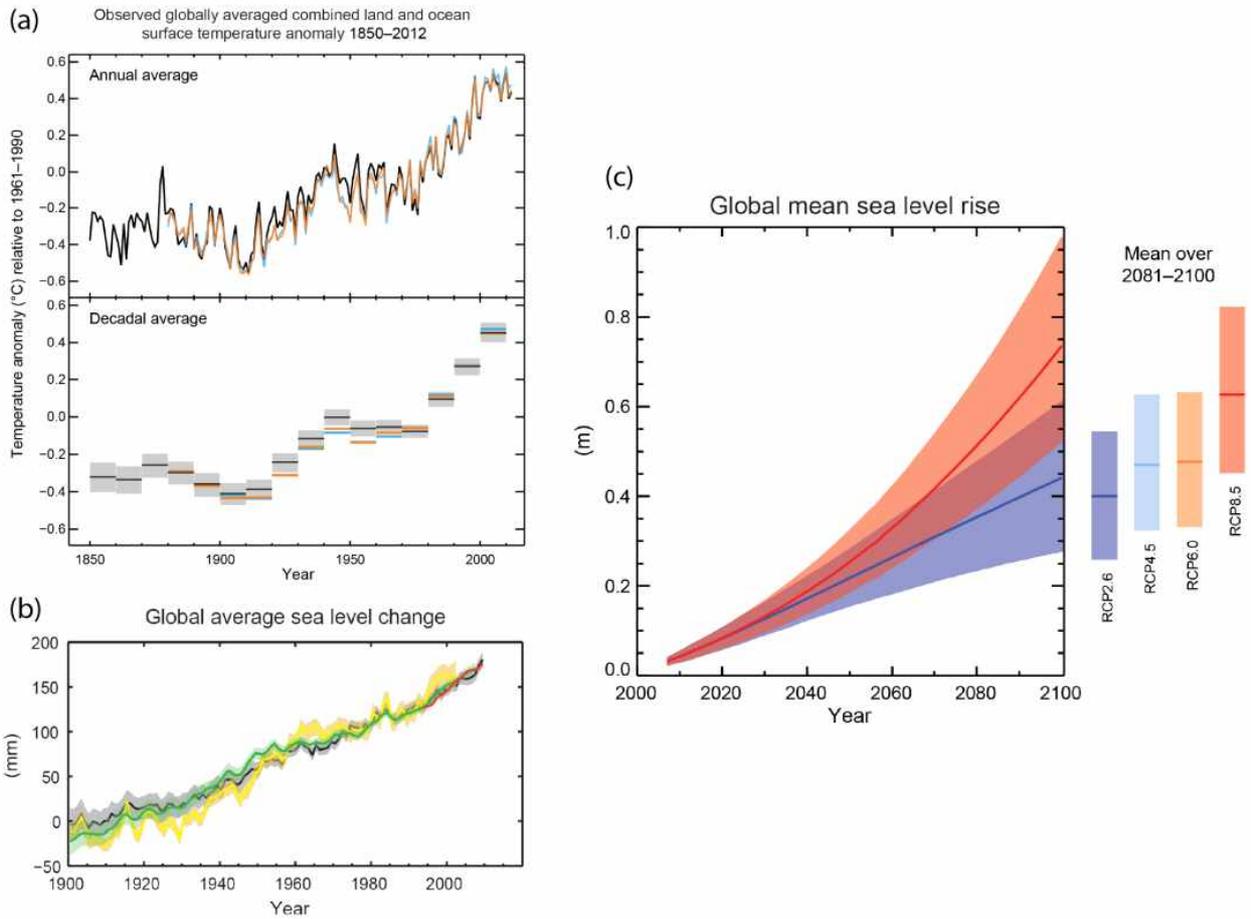


그림 1. (a) 1850-2012년간 표층 온도와 1961년부터 30년간 평균 기온 간의 차이. 1980년 이후 급격한 상승이 관찰됨. (b) 1900년 이후 해수면 변동. 1990년대부터 가파른 해수면 상승 추세가 관측됨. (c) 4가지 RCP 시나리오를 반영한 2100년까지의 해수면 변동 예측. RCP1)8.5 가정시 최대 0.98m까지 해수면 상승이 예측됨 [IPCC AR5, 2013].

1) Representative Concentration Pathways(온실가스 배출 시나리오). RCP2.6: 지금부터 즉시 온실가스 감축을 실행하는 경우, RCP4.5: 온실가스 저감정책이 상당히 실현되는 경우, RCP6.0: 온실가스 저감정책이 어느 정도 실현되는 경우, RCP8.5: 저감 없이 온실가스가 현재 추세로 배출되는 경우

Contributions to Sea Level Rise 1993-2008 average

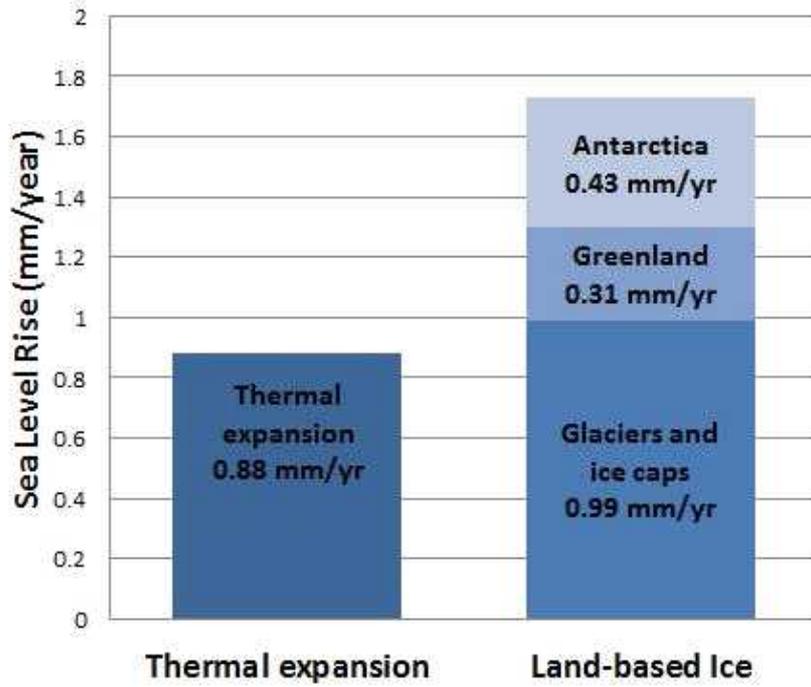


그림 2. 전지구 해수면 상승에 영향을 주는 주요 인자(1993-2008년간 평균값). 남극 및 그린랜드 빙상 용융이 전체의 약 28%를 차지하고 있음 (Church *et al.*, 2011, Oceanography).

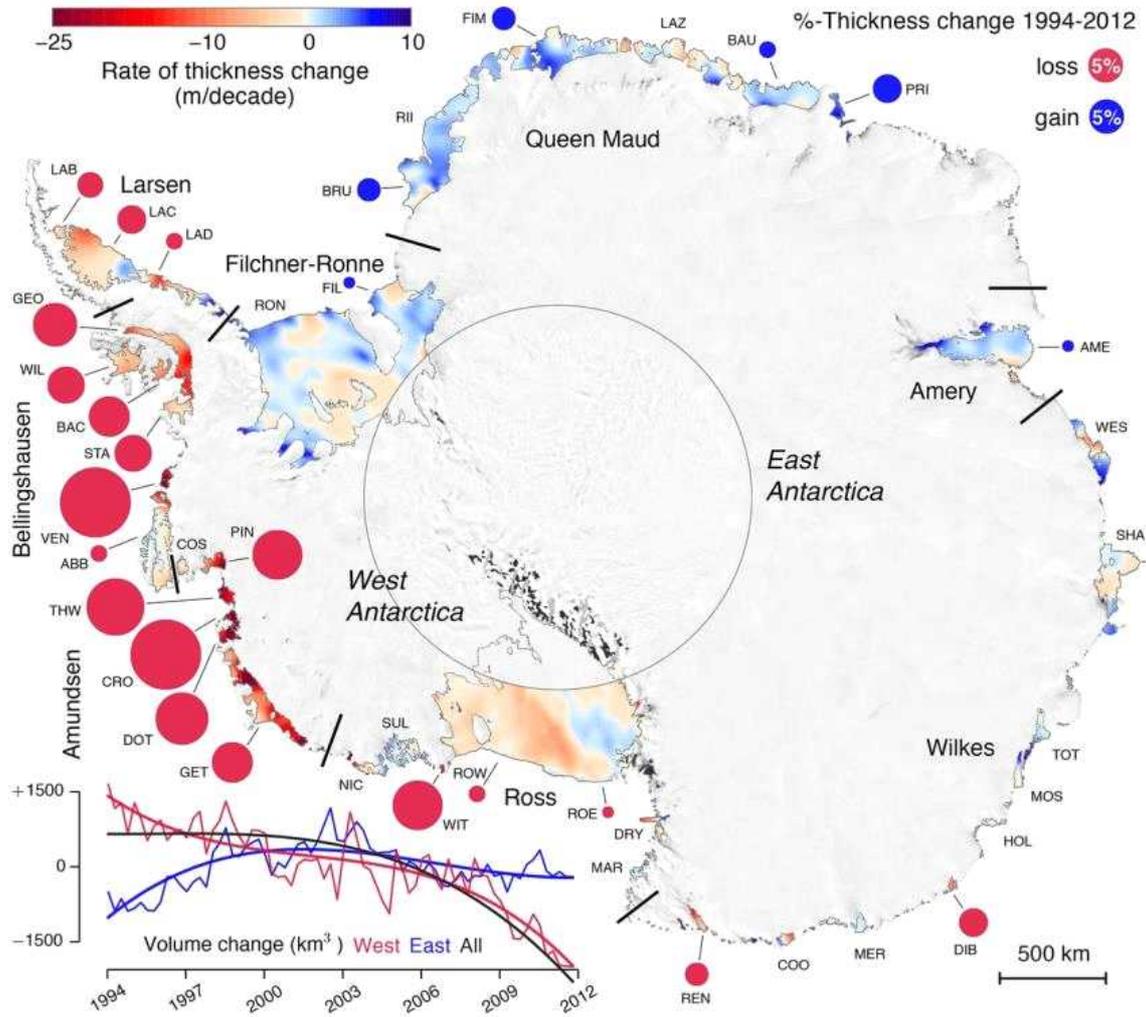


그림 3. 1994-2012년간 남극 빙상 두께 변화. 대부분의 빙상 부피 감소가 서남극에서 발생하였으며, 특히 남극반도 및 아문젠해역 부근에서 많은 양의 얼음이 바다로 빠져나감 (Paolo *et al.*, 2015, Science).

제 2 장 무인잠수정을 활용한 빙저탐사 현황

극지역 얼음 하부의 무인 잠수정 탐사는 영국의 BAS (British Antarctic Survey) 와 미국 WHOI (Woods Hole Oceanographic Institution) 등을 필두로 시도되었으며 상용AUV를 활용한 탐사도 시도되고 있다. 2007년 Gavia AUV 를 이용하여 북극 Beaufort Sea 해빙 하부 지형 매핑 수행하였으며 (그림 4) 2009년에는 영국 BAS와 NOC (National Oceanography Centre), 미국 LDEO (Lamont-Doherty Earth Observatory) 3개 기관이 협력하여 Autosub3 (그림 5) 무인잠수정을 이용하여 서남극 Pine Island 빙봉 하부를 4일간 510km 탐사에 성공하였는데 이 탐사에서 상부와 하부를 동시해보는 sonar를 이용하여 빙봉의 하부와 빙봉 밑 해저면 매핑을 성공적으로 수행하였다. 빙봉하부 탐사는 정확한 경로를 따라 빙봉 입구로 잠수정이 다시 돌아와야지만 잠수정 회수가 가능하다는 점에서 해빙탐사와는 다르게 매우 위험하며 보다 정확한 항법 기술이 필요하다. 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 판별할수 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>).

WHOI의 SeaBED Jaguar는 해저 사진 자료 수집과 고화질 sonar 이미지 획득이 가능한 무인 잠수정으로 북극과 남극에서 해빙 하부 매핑을 수행하였고 (그림 6, 7), ALTEX 무인 잠수정은 노르웨이 북극해에 투입되어 해빙 하부 탐사를 수행하였다(Bellingham *et al.*, 2008). 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 수행하였다(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 Icefin 을 개발하여 남극에서 테스트를 수행하였다(Spears *et al.*, 2016). Icefin은 일반적인 AUV와는 다르게 광학 케이블로 연결되어 작동하며 얼음을 뚫고 하부로 직접 투입되도록 디자인 되어 있다(그림 8). 본 AUV는 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 사용한다.

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/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 있다.

호주에서는 2017년에 남극 빙저 탐사를 위해 International Submarine Engineering 사의 Explorer 무인 잠수정을 구매하였다. 이 최신 잠수정은 140km를 24시간동안 배터리 충전 없이 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.



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).

| 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.

국시인토

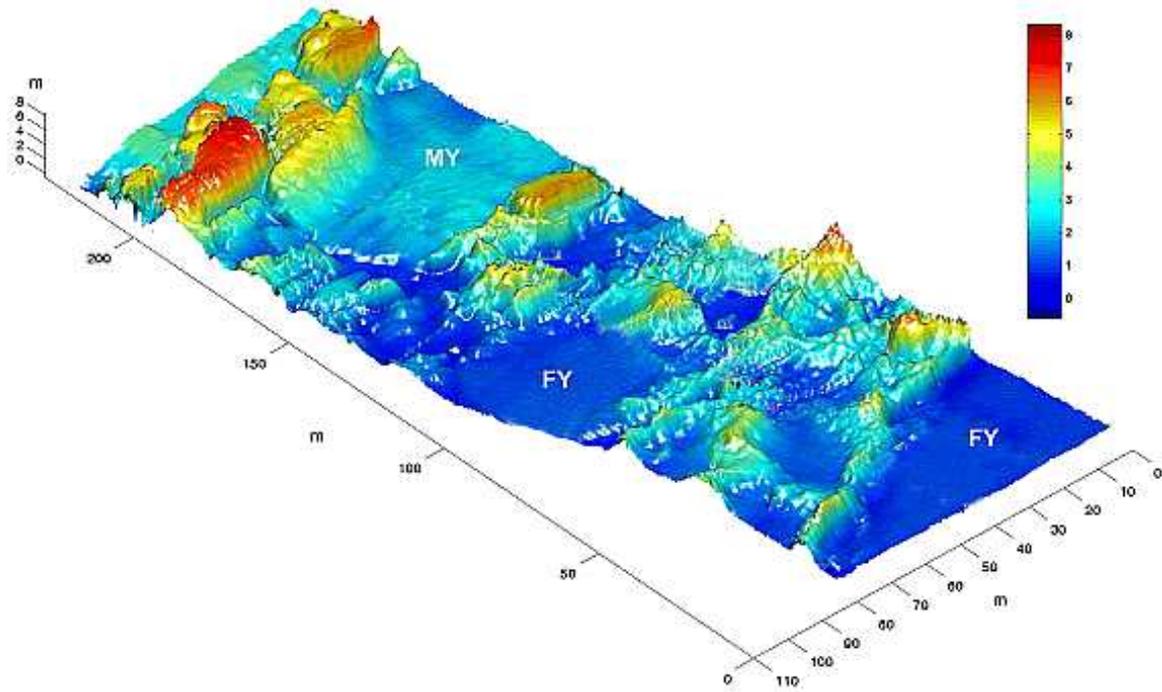


그림 4. GAVIA AUV를 이용한 북극 Beaufort Sea 해빙 하부 지형 매핑 수행 결과 (Wadhams, *et al.*, 2008)





그림 5. 영국 BAS와 NOC에서 개발한 빙봉 하부 탐사용 무인 잠수정 Autosub3



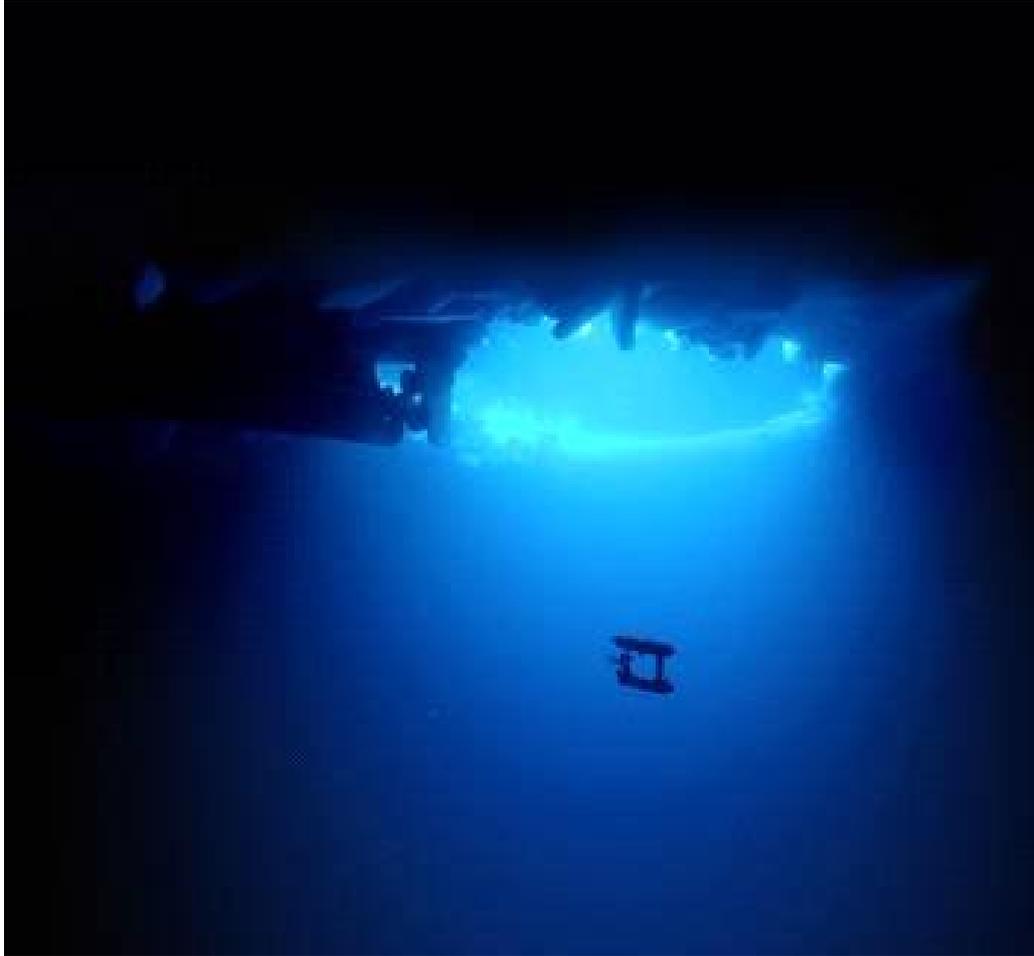


그림 6. 호주 쇄빙선 Aurora의 2012년 SIPEX-II 연구항차에서 남극 해빙 밑에 투입된 SeaBED 'Jaguar' AUV (<https://www.who.edu/news-release/SeabedAntarctc>).

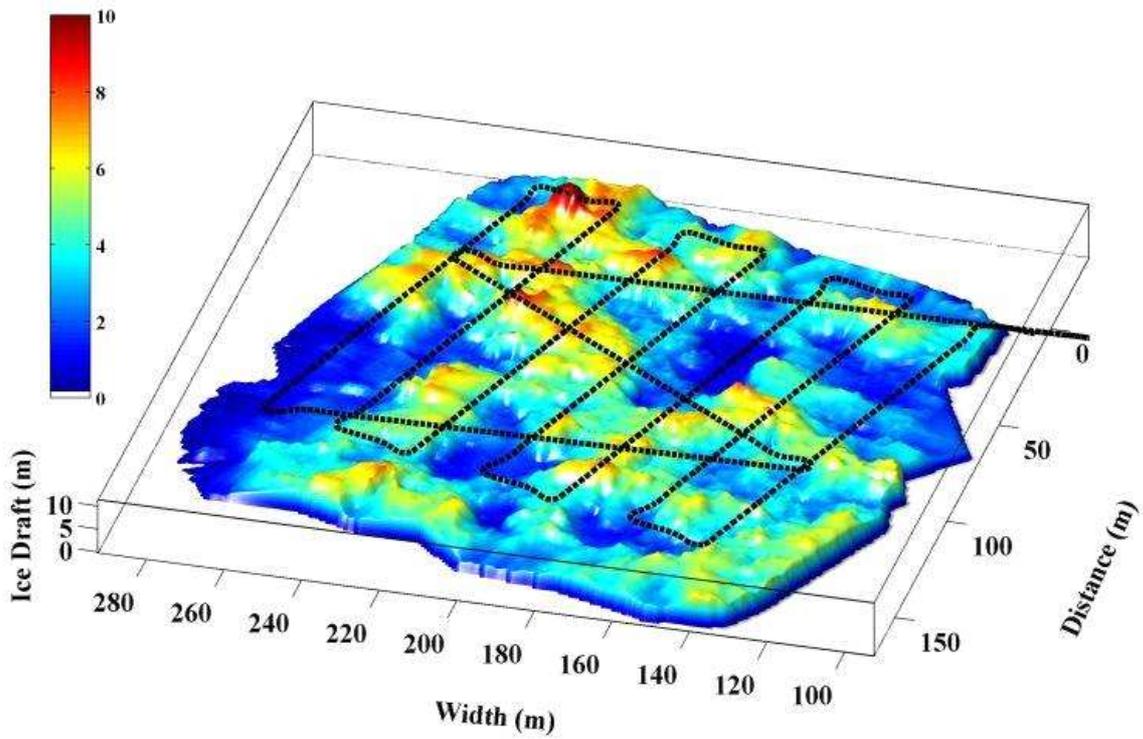


그림 7. 2012년 Jaguar 무임잠수정 해빙하부 탐사를 통해 획득한 남극 해빙 두께 3차원 지도 (<http://www.antarctica.gov.au/news/2012/first-3-d-map-of-under-the-east-antarctic-sea-ice>).

극지연구소

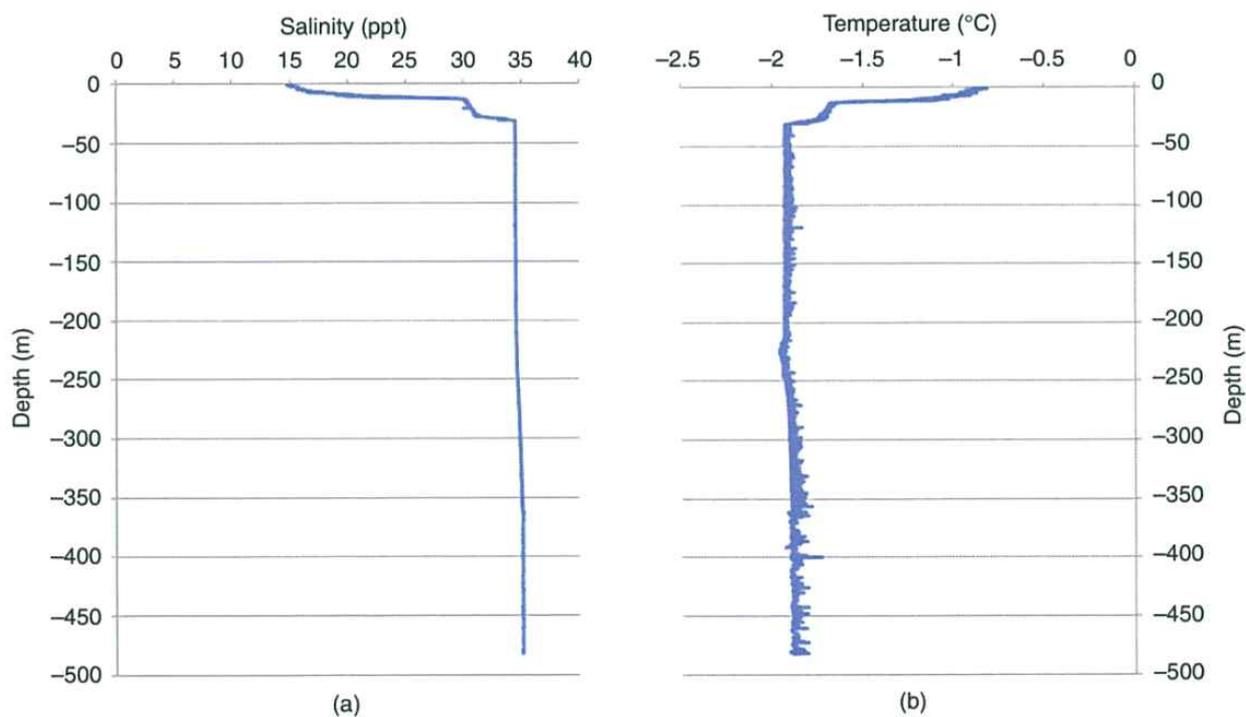


그림 9. Icefin 탐사를 통해 획득한 남극 McMurdo 빙봉 하부 해수의 염도와 온도 관측 결과(Spear *et al.*, 2016).



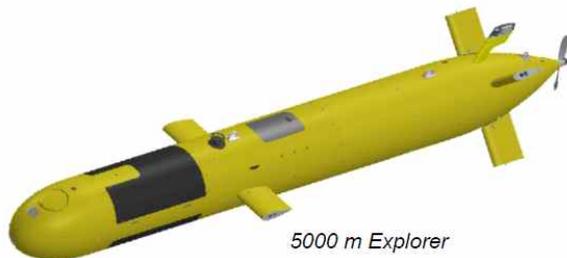
ISE's Explorer family of AUVs are the result of 35 years of AUV development and provide unprecedented stability and adaptability for subsea survey missions. Explorers are outfitted with forward and aft control planes, providing unmatched stability and delivering high quality data in the most challenging 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 ¹ | 0.74 m Ø x 6.25 m long |
| Weight in air ¹ | 1500 kg |
| Cruise speed | 3 kts |
| Maximum speed | 5 kts |
| Cruise endurance ¹ | 25 hours |
| Cruise range ¹ | 140 km |
| Maneuvering | 2 x fore planes + 4 x aft planes |
| Stability | 0.2° per second roll, pitch and yaw |

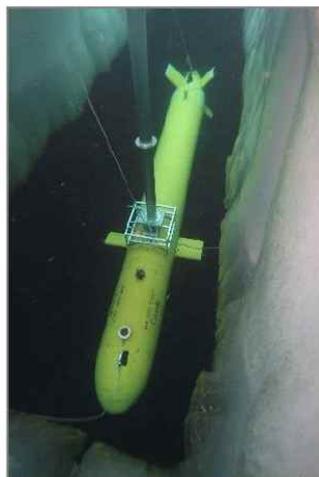
¹Final weight, dimensions and endurance are dependent on vehicle configuration



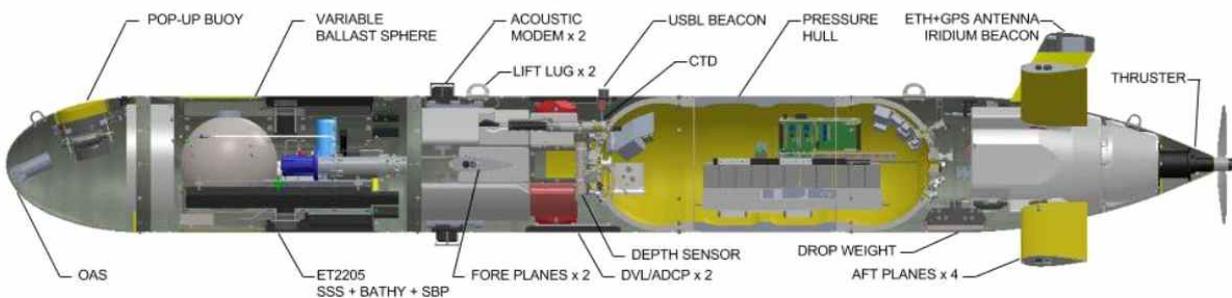
5000 m Explorer

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.

제 3 장 극지 현장 탐사 결과

극지에서의 무인잠수정 운용은 몇 가지 난관이 있다. 첫 번째 낮은 기온으로 인한 불안정한 전력 공급과 결빙 문제이다. 극지의 저온 환경은 더 빠른 배터리 방전을 유발하고 저온과 결빙에 의한 기계 이상 동작 등의 문제를 발생시킬 수 있다. 또한 큰 자기편각과 낮은 GPS 위성 각도로 인하여 위성항법시스템을 활용하기가 쉽지 않아 정확한 위치 파악이 어렵다. 극지연구소에서는 2016/18 남극 하계 탐사에서 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. 글라이더는 8일간 투입되어 수온, 염도 등을 측정한 뒤 회수되었다(극지연구소 2017, 105-118). 글라이더 장비는 조디악 보트를 이용하여 장보고기지로 이동된 후 freewave와 이리듐 위성을 이용한 통신 테스트를 수행하였고 성공적인 통신이 이루어지는 것을 확인하였다. 글라이더는 주변에 인공적인 금속이 없는 곳으로 이동하여 글라이더를 돌리면서 나침반 테스트를 수행하였고 그 보정 작업 결과는 표 2와 같다(극지연구소 2017, 105-118).

글라이더의 나침반 보정 작업을 마친 후 테스트 운항을 하였는데 극지역에서 자남극(magnetic south pole)과 실제 남극 방향의 차이로 인하여 글라이더 운항 방향에서 문제가 있음이 밝혀졌다. 따라서 이를 보정하여 운항 명령을 전송하였다(그림 11). 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 하였다. 이후에 본격적인 탐사를 위하여 글라이더를 투입하였고 투입된 글라이더는 수차례에 걸친 잠수와 해수면에 올라오는 작업을 반복하면서 임무를 수행하던 중 목표 깊이까지 내려가지 못하는 현상이 발생하였다. 이상 동작은 그림 12과 같다. 이후 글라이더의 이상 동작과 빠른 배터리 소모 때문에 글라이더를 예정보다 빠르게 회수하게 되었다. 아라온을 글라이더 인근 위치로 접근한 후에 freewave 통신을 이용하여 회수를 하였는데, 글라이더 회수 시에 글라이더의 gps와 이리듐 모듈이 있는 부분에 얼음이 얼어 있는 것을 발견할 수 있었다(그림 13). 이 얼음이 통신을 방해하여 정상적인 동작을 방해한 것으로 추정된다. 글

라이더 탐사의 항적도는 그림 14와 같고 이 탐사에서 획득한 해수 온도 분포는 그림 15과 같다 (극지연구소 2017, 105-118).

본 탐사에 활용된 Gavia는 극지역 빙봉 하부탐사에 테스트 된 적이 없기 때문에 보다 안전한 탐사를 위하여 줄에 묶어 조디악 보트로 보조하면서 탐사를 수행하였다. 본 탐사에서 AUV 잠수 시 내려가는 진행 각도가 계속해서 바뀌는 문제로 인하여 최초 목표한 깊이 까지 내려가지 못하는 문제가 발생하였다. 본 탐사에서는 빙봉 하부를 관측을 위해 DVL(Doppler Velocity Log)과 ping을 상부로 쏘면서 탐사를 수행하였다. AUV 운항프로그램에는 해저면과의 충돌을 방지하기 위해 ping이 강한 반사면을 만나게 되었을 경우 다시 떠오르도록 방향으로 전환을 하게 된다. 탐사를 수행한 기간에는 해빙이 생성되기 시작하면서 물속에 해빙 파편들이 부유하고 있었는데 (그림 16) 해빙 파편에 의한 ping 산란으로 인하여 잠수가 중지되고 진행각도가 위로 변경된 것으로 추정된다. 이에 DVL 기능을 끈 후 정상적으로 잠수가 진행됨을 확인하였고 난센빙봉 하부의 구조 관측에 성공하였다. AUV 탐사를 통해 얻은 빙봉 하부 이미지는 그림 17와 같다 (극지연구소 2017, 105-118).

극지에서 무인잠수정의 성공적인 운항을 하기 위해서는 부력에 영향을 미치는 해수의 온도 염도를 파악하고 해수 순환 정보를 미리 획득하는 것이 중요하다. 극지연구소에서는 쇠빙연구선 아라온호를 이용하여 2015/16 남극 하계 탐사시 드라이갈스키 빙설(DIT)과 테라노바만(TNB), 로스 빙봉(RIS) 주변에서 CTD와 ADCP 관측을 수행하였다(그림 18).

로스 빙봉 앞에서는 3 정점에서 CTD와 LADCP 관측을 하였는데 각 정점의 정보는 표 3과 같고 정점에서의 CTD/LADCP 관측 결과는 그림 19~21에 그래프로 나타내었다.

드라이갈스키 빙설 북단을 따라 4개 지점에서의 수온과 염도 분포는 그림 22와 같다. 육지에서 멀어질수록 표면 수온이 높아지고 염도가 낮아짐을 확인할 수 있다(극지연구소 2016, 76-89).

극지연구소에서는 2014/15 남극하계탐사시 뉴질랜드 NIWA 연구소와 협력하여 종합 해양물리 관측장비를 드라이갈스키 빙설 북쪽에 설치하였다가 2015/16 시즌에 회수하였다. 본 계류 장비에는 상부 중간부 하단부에 해류와 해수온도와 염분을 관측할수 있는 장비를 달았는데 여기에 기록된 1년간의 자료는 그림 23~28에 그래프로 표시하였다(극지연구소 2016, 76-89).

앞서서 집중적으로 해양 물성 관측이 이루어진 드라이갈스키 빙설은 3면이 열려 있는 구조로 1면만이 열려있는 빙봉과는 다르게 무인 잠수정 탐사시 빠져나오기가 용이한 편이다. 드라이갈스키 빙설은 아라온이 매년 방문하는 장보고 기지 인근에 위치하고 있어 매년 접근이 가능한 곳으로 무인잠수정 실험을 시작하기에 안전한 장소라 할 수 있다. 드라이갈스

키 빙설의 위치와 구조는 그림 29에서 확인할 수 있다 (Stevens *et al.*, 2017).



표 2. 일반 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° |



표 3. CTD/LADCP 관측 정점 정보

| StN | Date (UTC) | Latitude | Longitude | Total depth (m) | Deployed depth (m) |
|-----|-------------------|--------------|---------------|-----------------|--------------------|
| 6 | Dec-11-2015 9:30 | 77° 41.597'S | 178° 20.620'E | 745 | 734 |
| 7 | Dec-11-2015 15:40 | 77° 45.172'S | 178° 26.222'W | 685 | 674 |
| 8 | Dec-12-2015 1:55 | 77° 42.273'S | 178° 54.893'E | 720 | 709 |



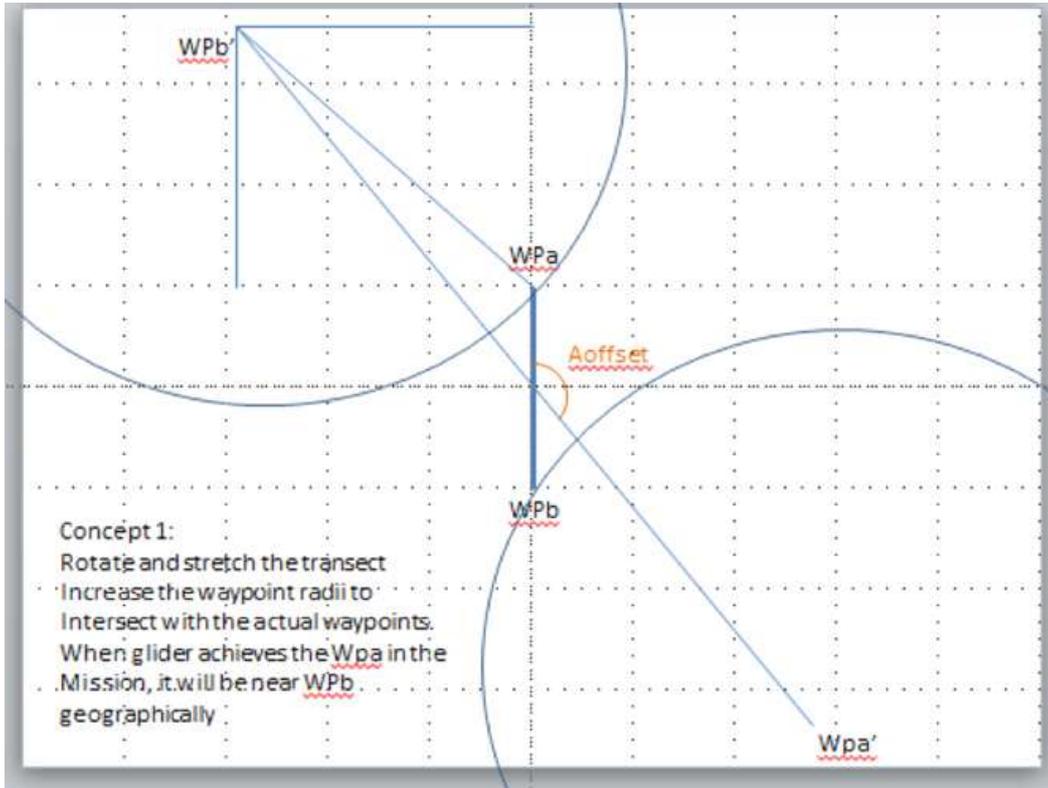


그림 11. 자기 편각으로 인한 진행 방향 오차를 해결하기 위한 사용한 보정 방법. 차이만큼 아랫방향으로 내려가는 동작을 추가하여 최종 목적지에 도달할 수 있도록 함.

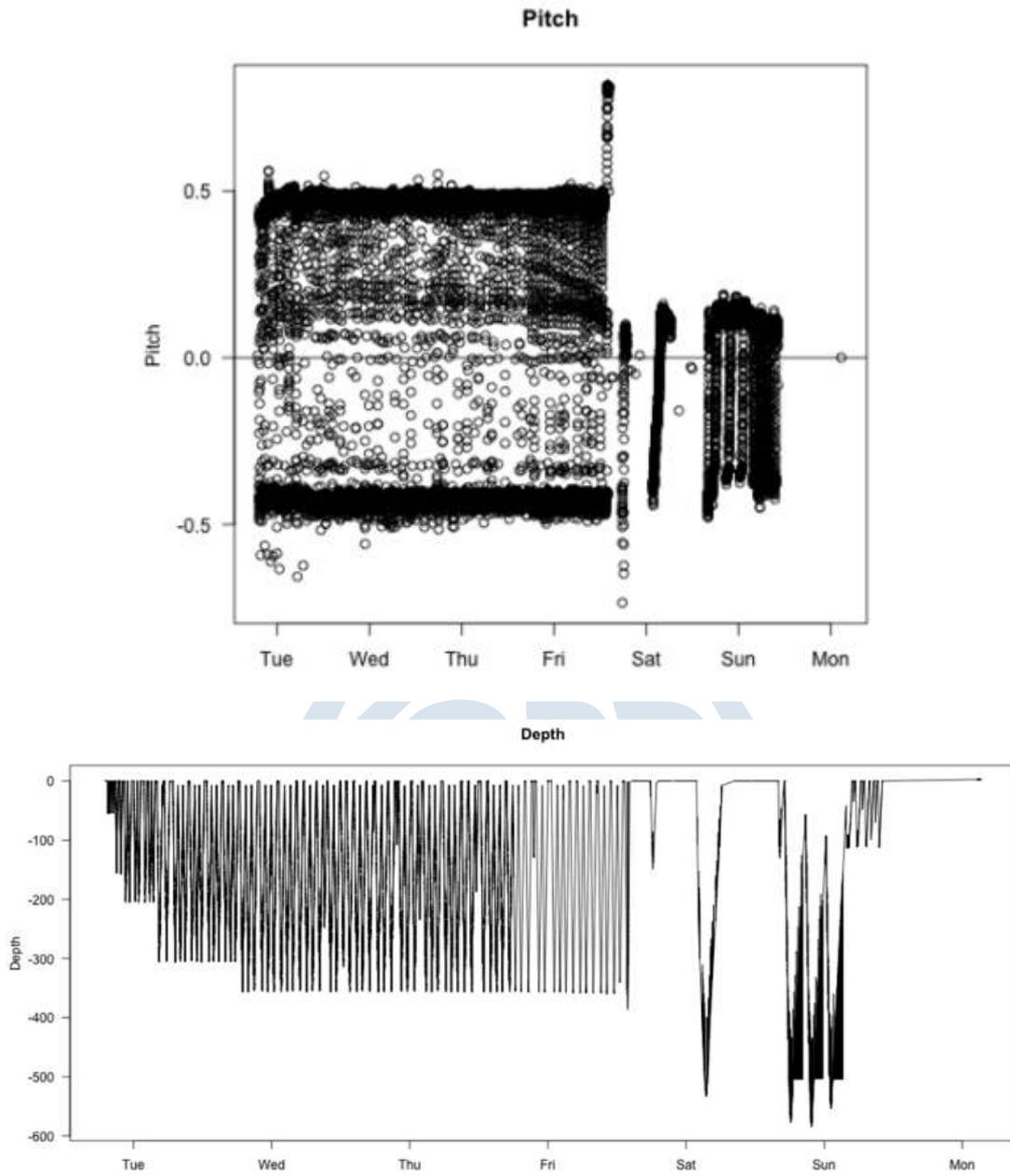


그림 12. 글라이더 이상 동작. Pitch(위)와 잠수 깊이(아래) 기록



그림 13. 글라이더 회수 당시 통신 모듈에 얼음이 맺힌 모습



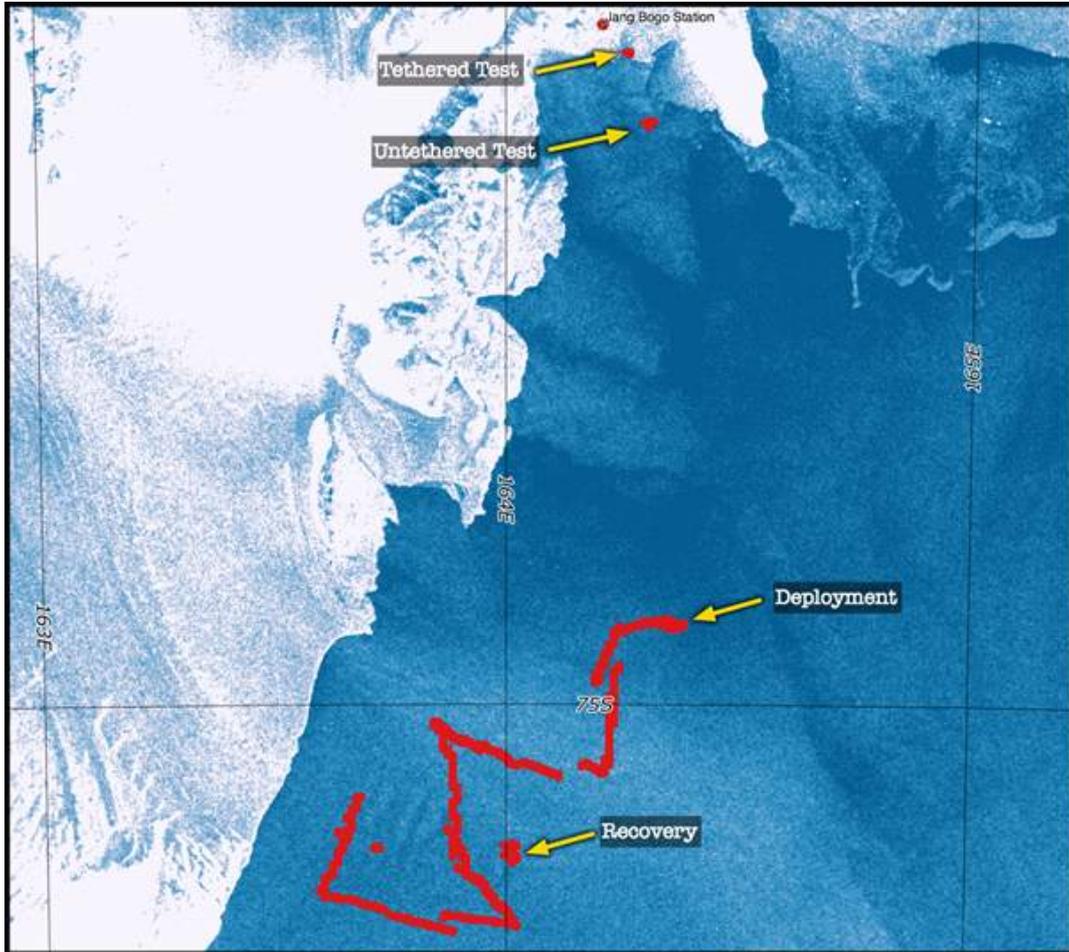


그림 14. 글라이더의 테스트 지점과 항적도

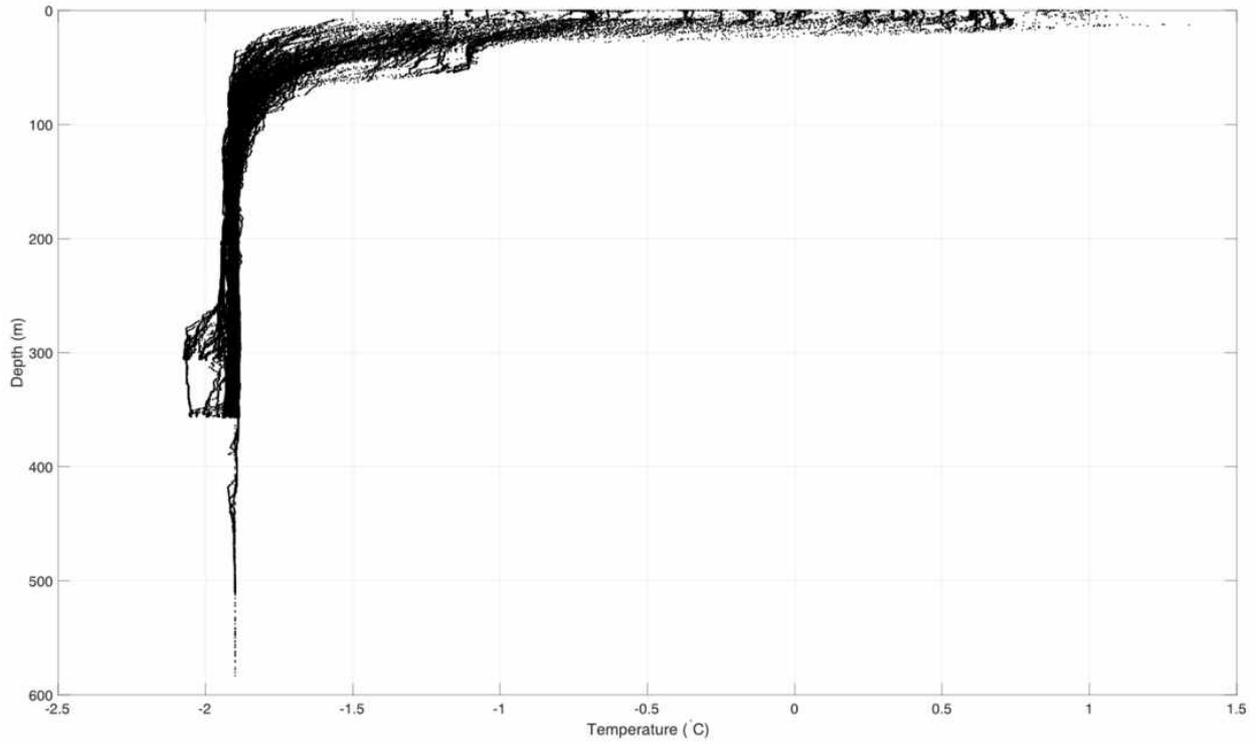


그림 15. 글라이더가 측정한 난센빙봉 주변 해양의 온도 프로파일.





그림 16. 2/14 탐사에서의 해수면 상태와 해저에서의 촬영한 AUV와 해빙 파편들

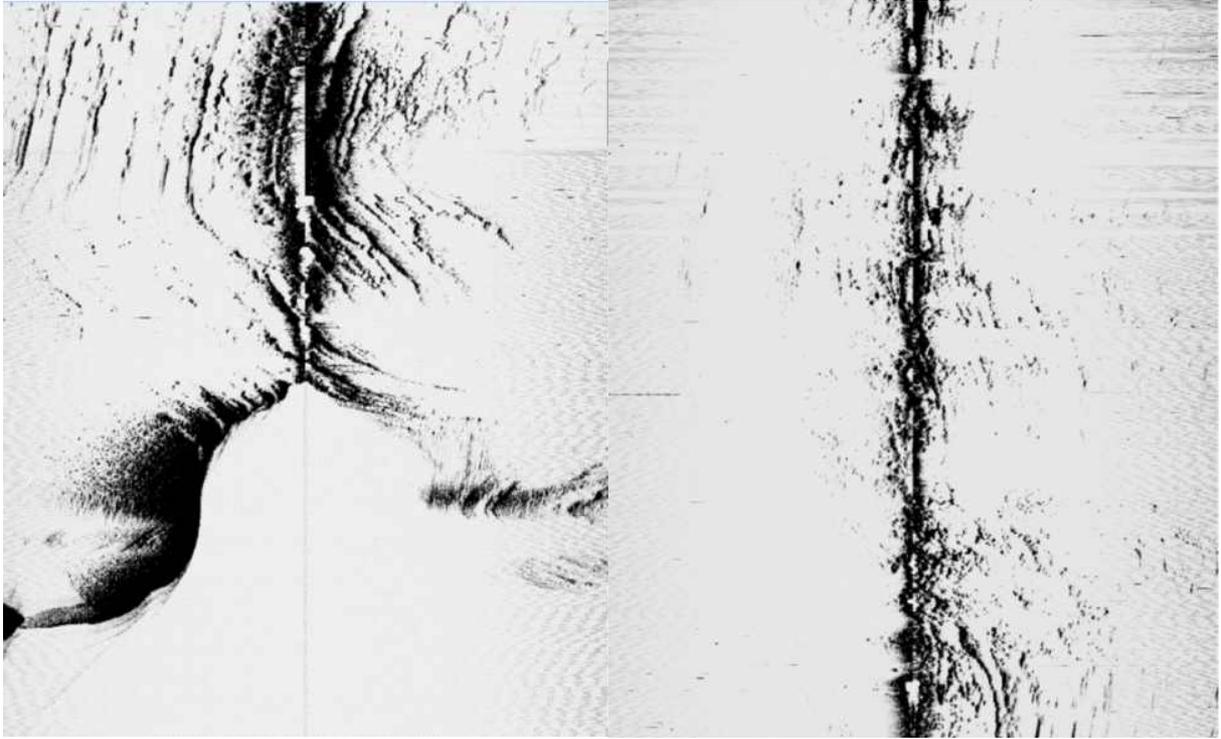
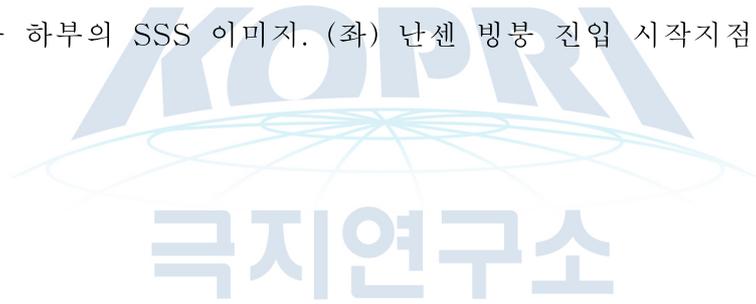


그림 17. 난센 빙붕 하부의 SSS 이미지. (좌) 난센 빙붕 진입 시작지점과 (우) 안쪽에서의 하부 이미지



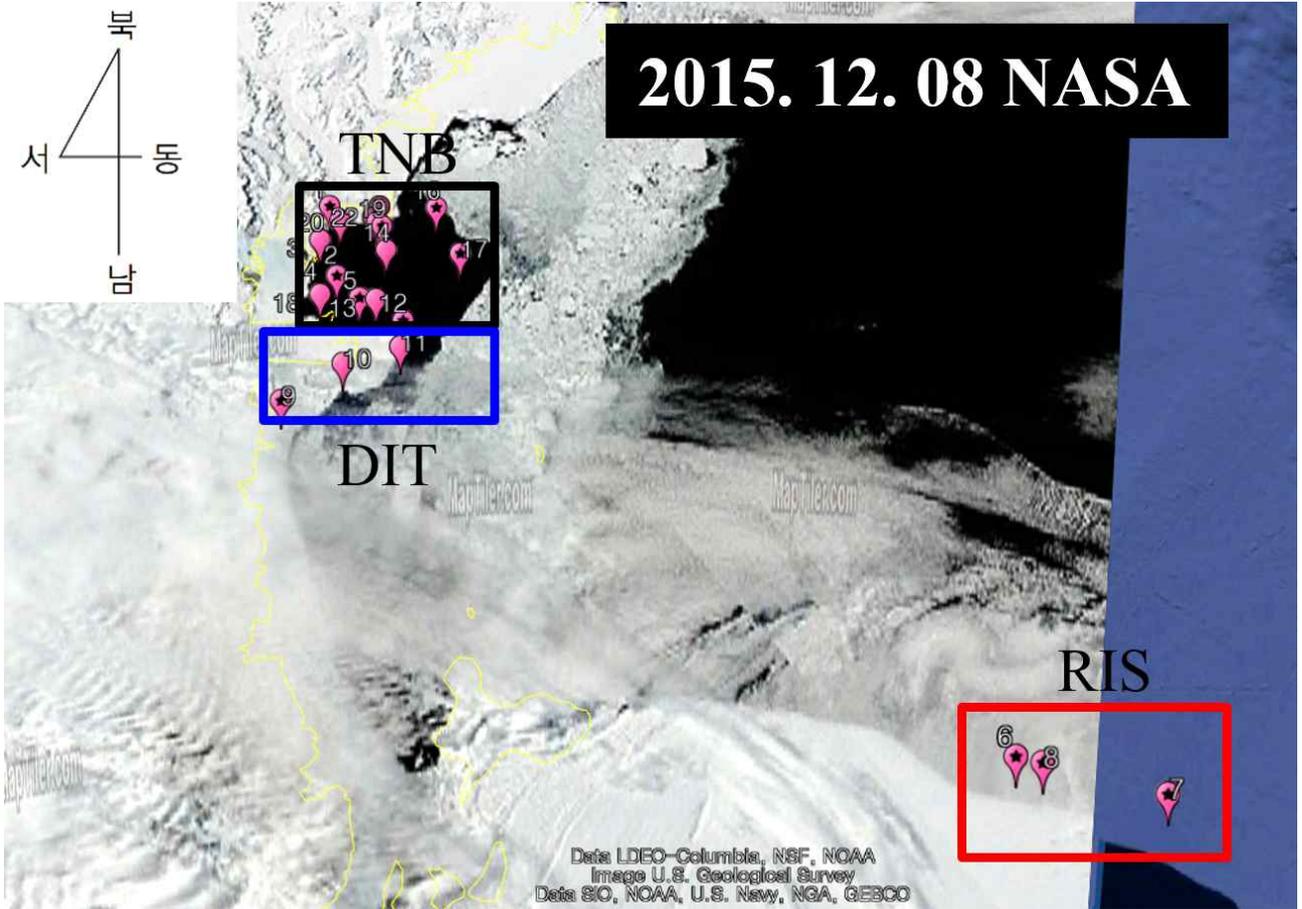


그림 18. 2015/16 남극하계 탐사 CTD 관측 위치

극지연구소

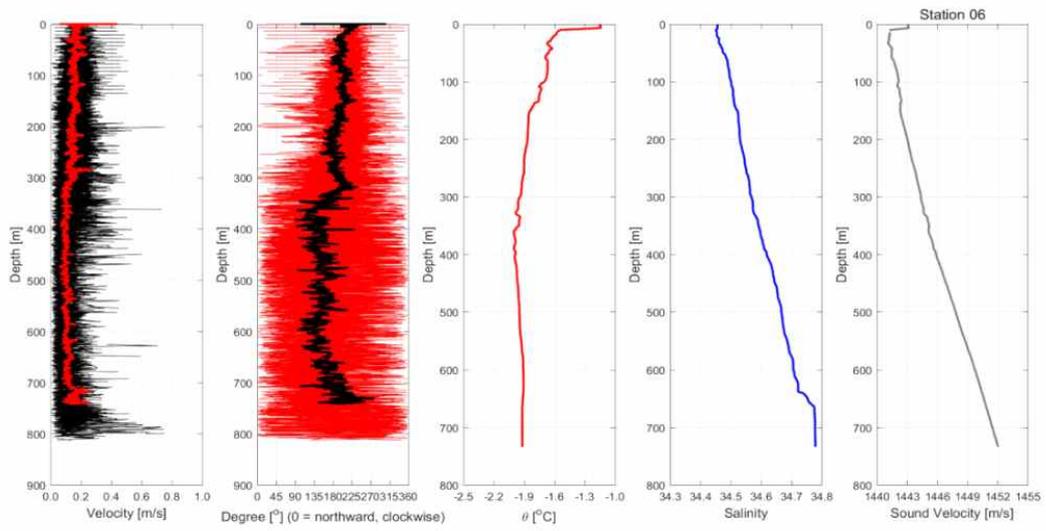


그림 19. 표 3의 6번 정점에서의 CTD/LADCP 관측 결과. 좌측부터 LADCP를 통해 관측한 해류의 유속, 해류의 방향, 수온, 염도, 음속 프로파일을 나타낸다.



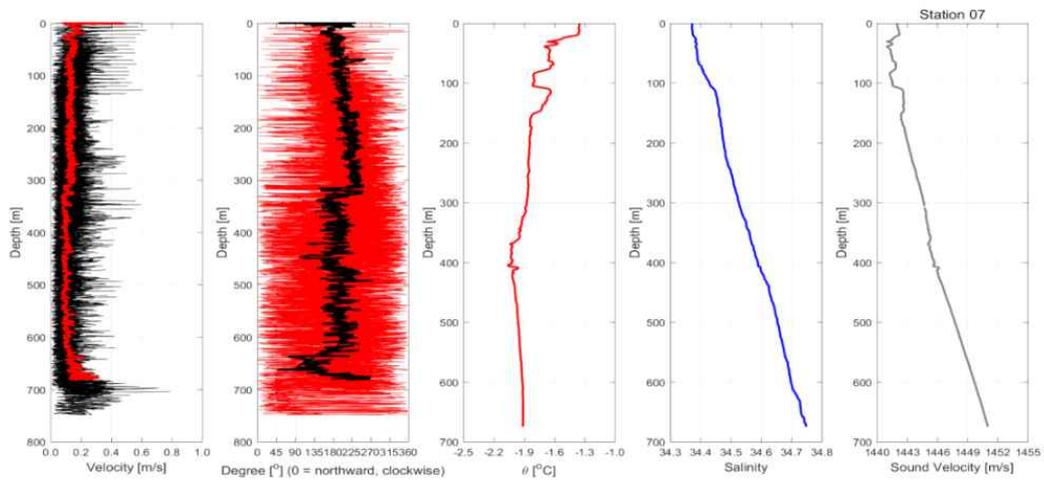


그림 20. 7번 정점에서 해류의 유속, 해류의 방향, 수온, 염도, 음속 프로파일



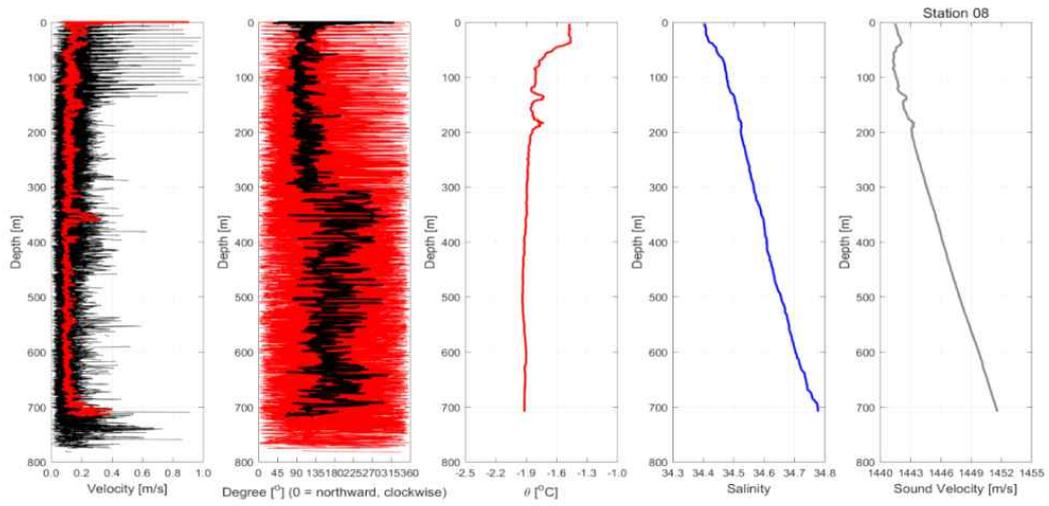


그림 21. 8번 정점에서 해류의 유속, 해류의 방향, 수온, 염도, 음속 프로파일



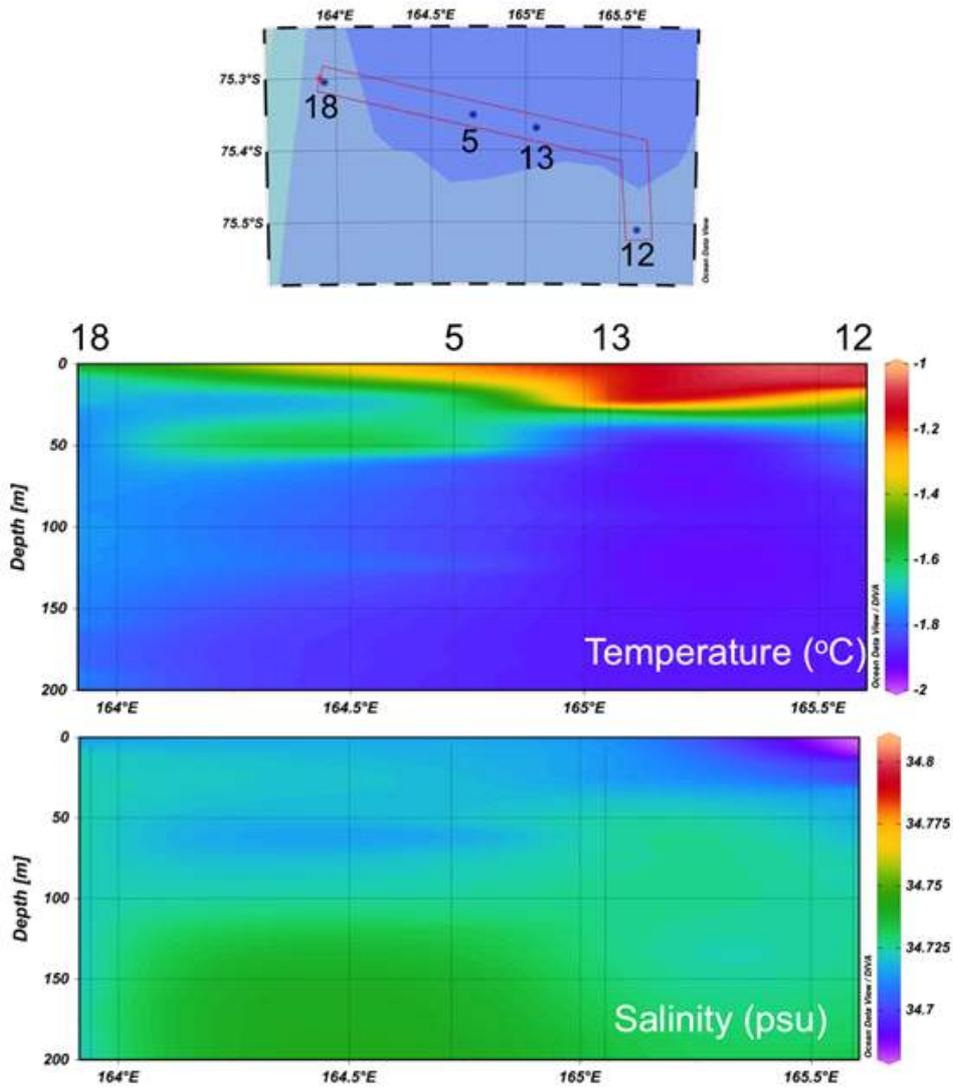


그림 22. 드라이갈스키 빙설 주변 CTD 관측을 통해 획득한 온도, 염도 변화

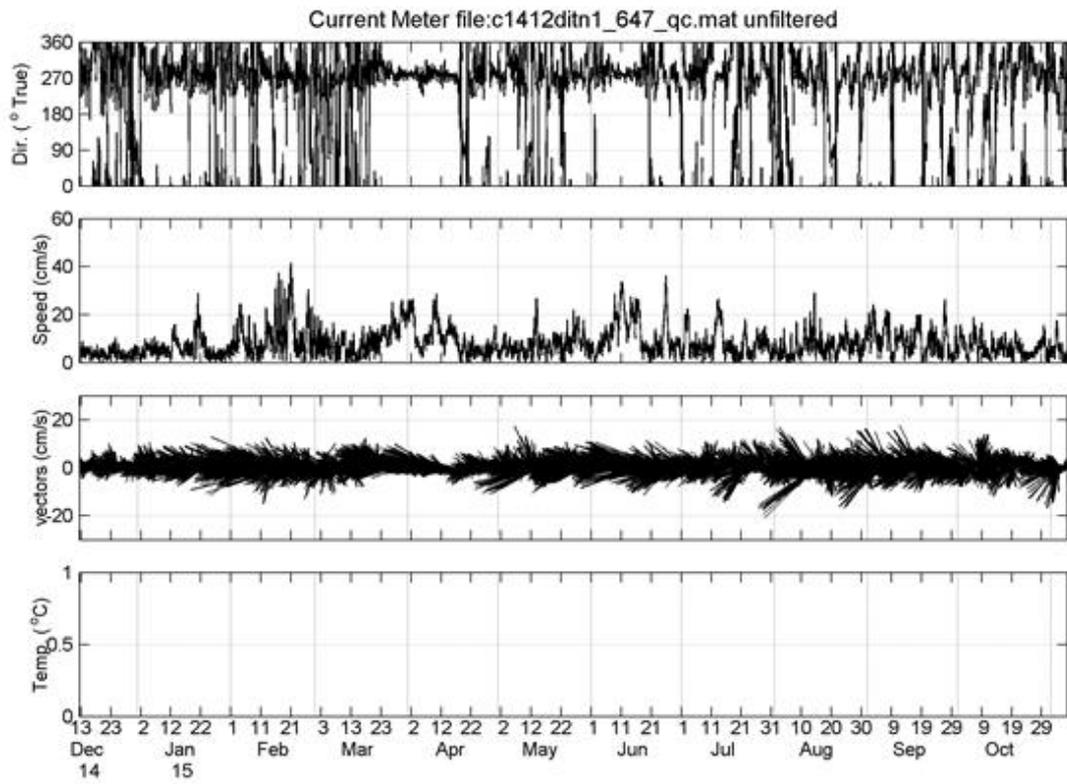


그림 23. 드라이갈스키 빙설 북부에 설치한 해양계류장비의 상부센서에 측정된 해류의 방향, 속도

극지연구소

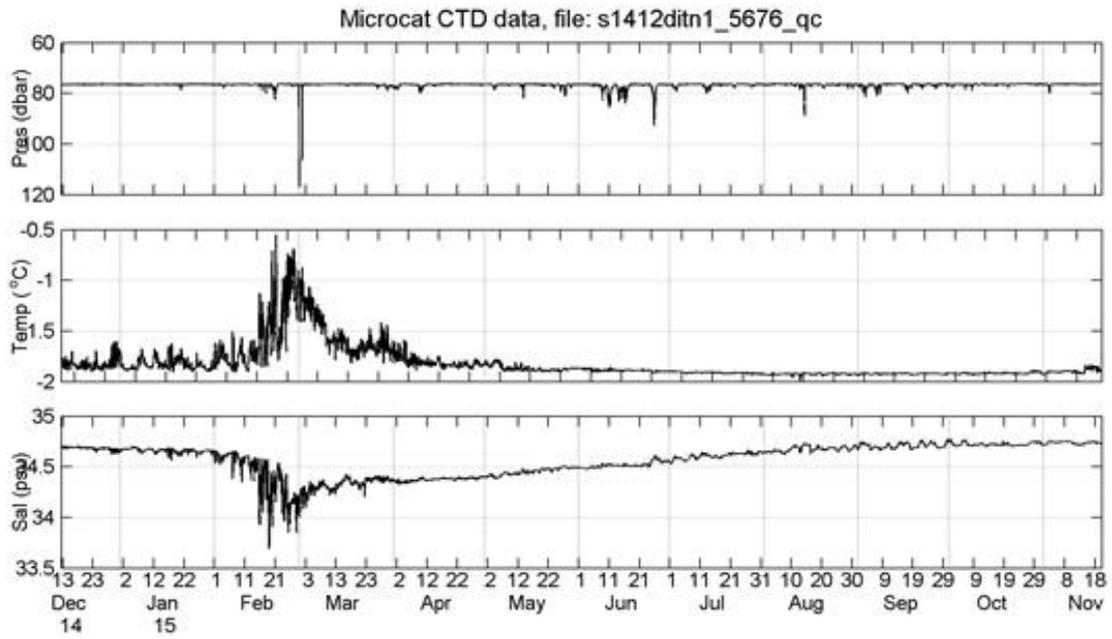


그림 24. 드라이갈스키 북부 해양계류장비 상부센서에서 측정된 해수의 압력, 온도, 염도.



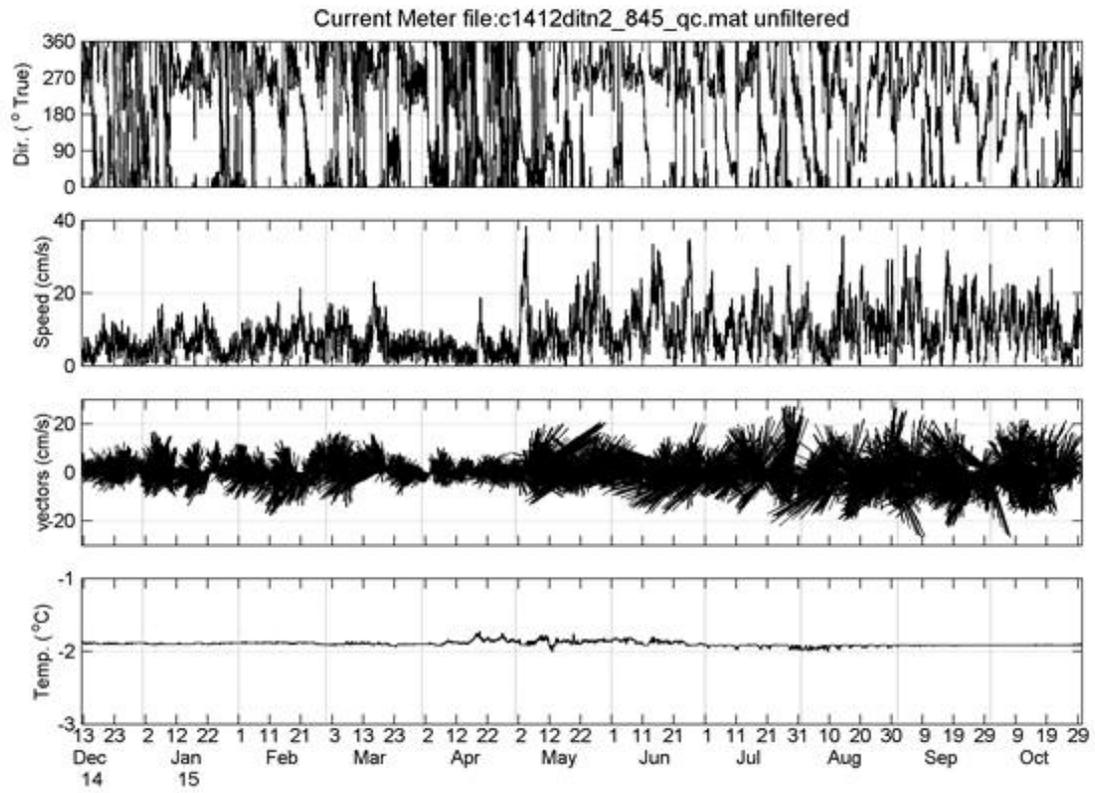


그림 25. 중간부 센서에서 측정된 해류, 온도

극지연구소

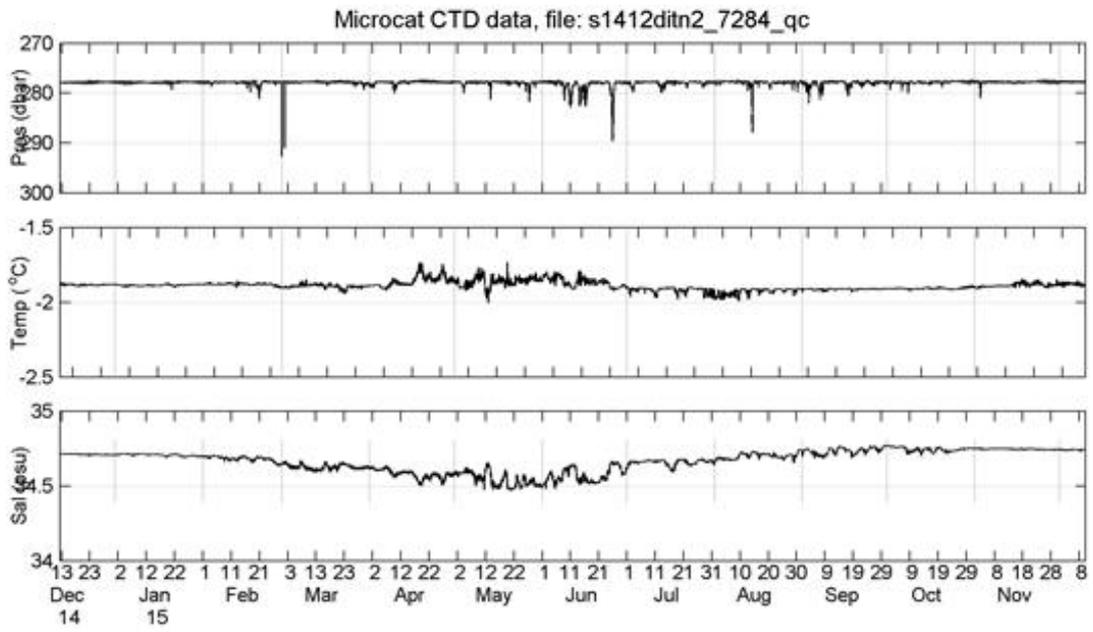


그림 26. 중간 깊이에서의 압력, 온도, 염도



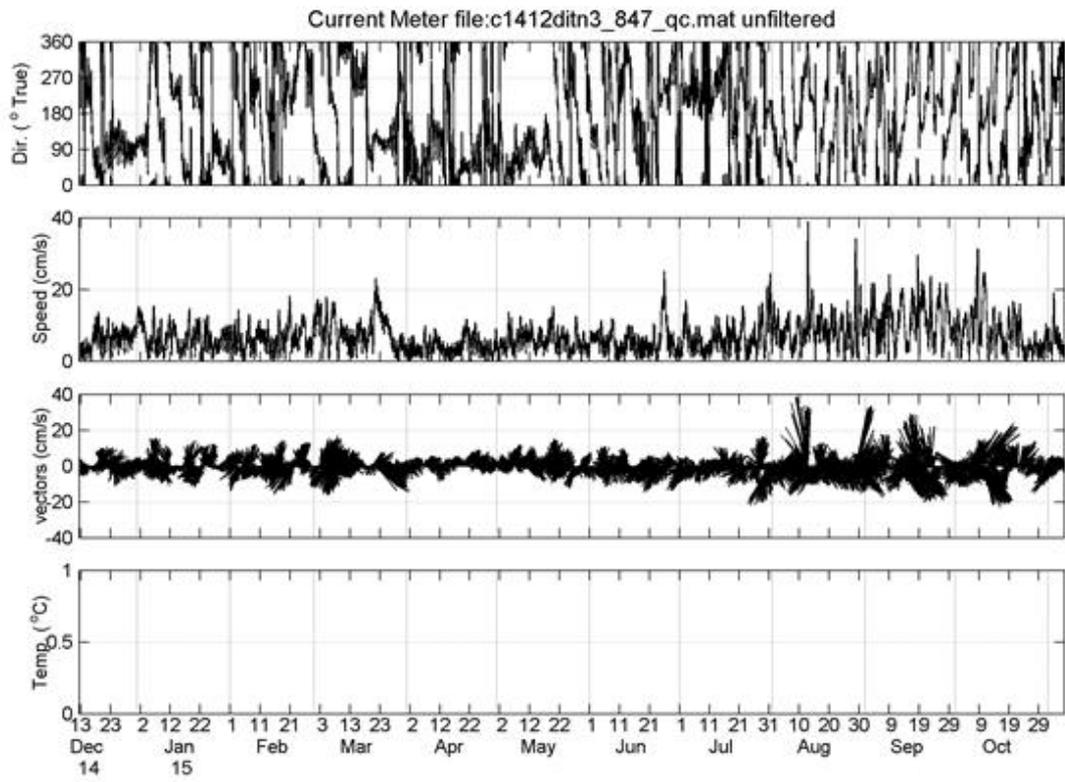


그림 27. 하단부 해류 측정 결과

극지연구소

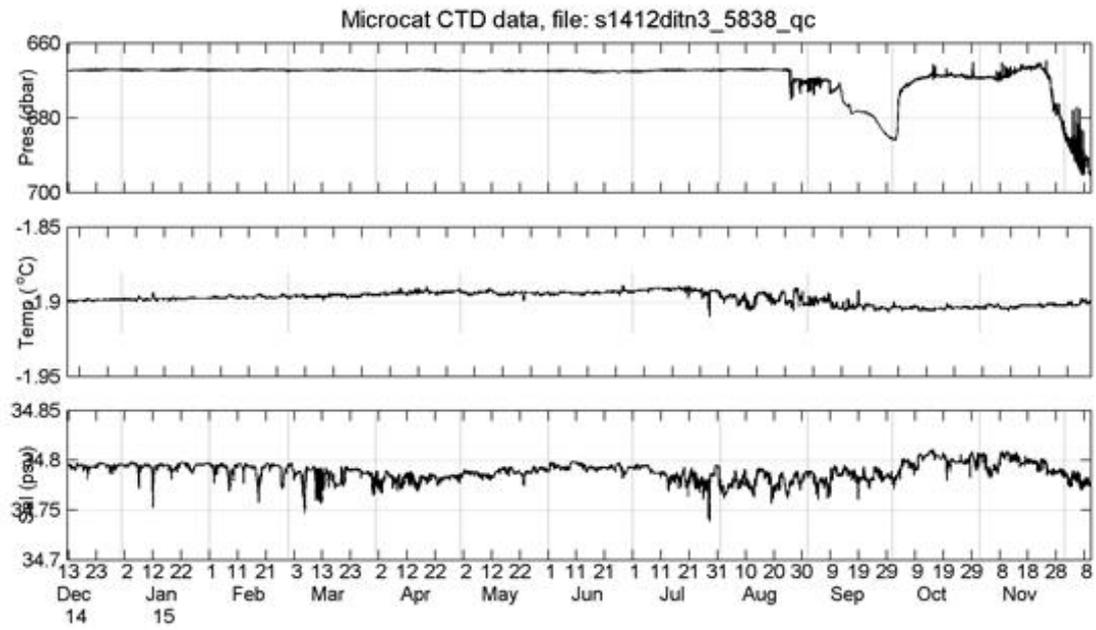


그림 28. 하단부 압력 온도 염도 측정 값



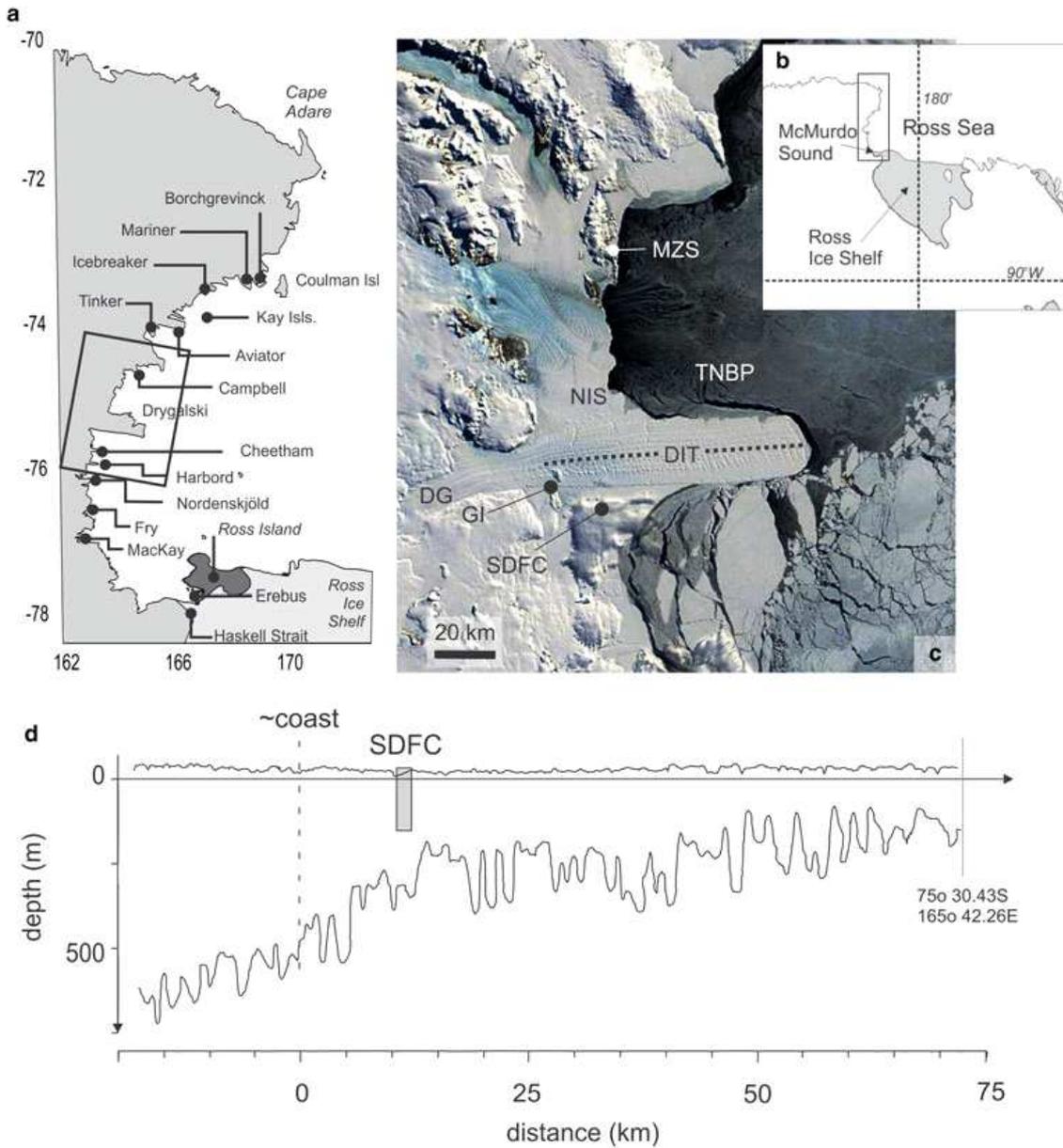


그림 29. (a) 남극 장보고기지가 위치한 빅토리아랜드 인근 연안의 빙하와 빙설 빙붕의 위치도 (b,c) 드라이갈스키 빙설의 위치와 위성사진 (d) 그림 (b)의 점선을 따라 자른 빙설의 단면도 (Baroni and others, 2002).

제 4 장 결론

본 연구에서는 세계 각국의 극지 무인잠수정 탐사 사례를 조사하고 극지연구소에서 직접 수행한 무인 잠수정 탐사에서 발생했던 문제를 정리함으로써 자체 극지용 무인잠수정 항법 개발의 시행착오를 줄일 수 있는 정보를 제공하였다. 또한 쇄빙연구선 아라온을 탐사에서 획득한 남극 빙설과 빙봉 주변의 해수 온도, 염분, 해류 정보는 극지용 무인 잠수정을 개발하는데 있어 자세 제어와 추진기의 목표 스펙을 설정하는데 있어 반드시 필요한 정보이다. 온도와 압력을 통해 계산된 음향 신호의 속도는 극지 수중 환경에서 음향신호를 활용한 위치 추정의 정확도를 향상시키기 위해서 필수적이다.

극지 무인잠수정 탐사는 북극 에너지 자원 개발과 항로 개척뿐 아니라 전 지구적인 당면 과제인 지구온난화에 의한 빙상용융 예측 정확도를 올리기 위해서 반드시 수행되어야만 한다. 탐사 목표인 지반선은 빙봉 빙하의 경계지역이자 해양과의 상호작용이 활발히 일어나는 곳으로 빙하와 빙봉 거동 예측에 있어서 핵심적으로 관측해야 할 지역이다. 지반선 부근에서의 충돌을 피하고 안전하게 접근하기 위한 빙봉 하부 자율항법 기술개발을 통해 지반선 인근까지 빙봉 하부 탐사를 수행한다면 지반선에서의 빙하와 빙봉 거동 물리기작 규명에 있어 결정적인 단서를 제시할 것이며 빙저 실측 자료 획득을 통해 보다 정확한 빙하와 빙봉 거동 예측을 가능케 하여 빙상용융과 연관된 해수면 변동 예측의 정확도 향상에 기여할 것으로 기대한다. 극지의 혹독한 환경에 적합하도록 개발된 무인잠수정 기술은 극지뿐만 아니라 국내에서도 지금까지 접근하기 어려웠던 지역의 해저탐사, 수중구조물 유지관리 분야에 활용될 수 있으며 무인 잠수정 탐사를 통한 보다 정확한 해수면 상승 예측은 관련된 재해에 사전 대비할 수 있게 되어 피해 경감에도 도움이 될 것으로 기대한다.

제 5 장 참고문헌

- 극지연구소, 장보고기지 주변 빙권변화 진단, 원인규명 및 예측, 2016 11월 (인천: 동연구
소, 2017), 76-89
- 극지연구소, 장보고기지 주변 빙권변화 진단, 원인규명 및 예측, 2017 6월 (인천: 동연구
소, 2017), 105-118
- Baroni C and 12 others (2002) Relief Inlet Quadrangle (Victoria Land) (scale 1:250,000).
Siena Museo de Antartide, PNRA
- 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.
- 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

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)



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.