

극지 수중로봇 활용 탐사기술 조사 및 환경 데이터 획득

Exploration technology research using polar underwater
robots and environmental data acquisition



연구기관

극지연구소

2021. 11. 30.

선박해양플랜트연구소

제 출 문

선박해양플랜트연구소장 귀하

본 보고서를 “극지 빙하 탐사와 원격 모니터링을 위한 수중로봇 ICT원천기술 개발”에 관한 연구과제(위탁과제 “극지 수중로봇 활용 탐사기술 조사 및 환경 데이터 획득”에 관한 연구)의 보고서로 제출합니다.

2021 . 11 . 30.



연구수행기관명 : 극지연구소 기술개발지원실

연구책임자 : 신 동 섭

참여연구원 : 이 주 한
김 수 환
최 형 규
정 창 현
윤 동 진
김 형 권
김 태 완

보고서 초록

| | | | | | |
|--|---------------|---|---|-------------|---|
| 과제고유 번호 | PG21050 | 해당단계 연구기간 | 21.3.1~21.11.30 | 단계 구분 | |
| 연구사업명 | 중사업명 | | | | |
| | 세부사업명 | 위탁과제 | | | |
| 연구과제명 | 대과제명 | 극지 빙하 탐사와 원격 모니터링을 위한 수중로봇 ICT원천기술 개발 | | | |
| | 세부과제명 | 극지 수중로봇 활용 탐사기술 조사 및 환경 데이터 획득 | | | |
| 연구책임자 | 신동섭 | 해당단계 참여연구원수 | 총 : 명 내부: 명 외부: 명 | 해당단계 연구비 | 정부: 천원 기업: 천원 계 : 천원 |
| | | 총연구기간 참여연구원수 | 총 : 8 명 내부: 8 명 외부: 명 | 총 연구비 | 정부: 2,000천원 기업: 천원 계 : 2,000천원 |
| 연구기관명 및 소속부서명 | 극지연구소 기술개발지원실 | | 참여기업명 | | |
| 국제공동연구 | | | | | |
| 위탁연구 | | | | | |
| 요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내) | | | | 보고서 면수 | 35 |
| <ul style="list-style-type: none"> - 극지탐사환경을 고려한 수중로봇 활용 탐사기술 조사 - 극지탐사환경을 고려한 극지 환경 데이터 취득 - 극지 수중로봇 활용 빙방·빙저 탐사기술 조사 - 극지 시추 선진국 탐사기술 동향 조사 - 극지무인로봇 ICT원천기술개발을 위해 극지 수중로봇 활용 탐사기술 조사 및 시행착오경험을 분석하며 분석된 결과는 원천기술개발에 활용가능 | | | | | |
| 색인어 (각 5개 이상) | 한 글 | 극지 수중 무인로봇, 환경데이터, 수중음향, 탐사기술, 빙저호 | | | |
| | 영 어 | Polar underwater unmanned vehicle, Environment Data, Underwater acoustic, exploration technology, subglacial lake | | | |

요 약 문

I. 제 목

극지 수중로봇 활용 탐사기술 조사 및 환경 데이터 취득

II. 연구의 목적 및 필요성

극지 무인수중로봇 ICT원천기술개발을 위해 극지 수중로봇 활용예정 탐사지역에 대한 환경자료 획득과 극지 무인수중로봇설계에 있어 기존 로봇기술과 필요한 기술에 대한 분석연구가 필요하다. 활용될 지역에 대한 환경데이터 획득 및 분석자료는 극지 탐사용 무인수중로봇 설계에 반영하고 기존 극지 빙붕·빙저 탐사기술 분석 및 필요 주요기능에 대한 연구는 ICT원천기술 확보를 위한 무인로봇 개발 설계에 필요하다.

III. 연구내용 및 범위

- 극지 탐사환경을 고려한 극지 환경 데이터 획득
- 극지 수중로봇 활용 빙붕·빙저 탐사기술 조사

IV. 연구결과

- 극지 탐사 활용지역에 대한 환경 자료 획득
- 극지 사용 수중로봇 활용 빙붕·빙저 탐사기술 및 사례 분석

S U M M A R Y

I. Title

Exploration technology research using polar underwater robots and environmental data acquisition

II. Object and necessity

The objective of this study is to be necessary to acquire the environment of the exploration area to be used for the polar underwater robot and the existing robot technology and necessary technologies in the design of the polar unmanned underwater robot. Environmental data acquisition and analysis data on the area to be used are reflected in the design of the unmanned underwater robot for polar exploration, and the research on existing polar ice shelf and subglacial lake exploration are necessary for the development and design of the unmanned robot to secure the ICT source technology.

III. Contents and Extents

- Acquisition and analysis of polar environment data considering polar exploration environment
- Research on ice shelf and subglacial lake exploration technology using polar underwater robots

IV. Result

- Environmental analysis for polar exploration areas
- Analysis of Ice shelf and subglacial lake exploration technology and case using underwater robots

C O N T E N T S

| | | |
|-----------|---|----|
| Chapter 1 | Introduction | 5 |
| Section 1 | Object of research | 5 |
| Section 2 | Substance of research | 5 |
| Chapter 2 | Main Chapter | 6 |
| Section 1 | Acquisition and analysis of environmental data of the polar underwater robot exploration area | 6 |
| Section 2 | Research on exploration technology using polar underwater robots..... | 10 |
| Chapter 3 | Conclusion | 35 |



목 차

| | |
|--------------------------------------|----|
| 제1장 서론 | 5 |
| 제1절 연구목표 | 5 |
| 제2절 연구내용 | 5 |
| 제2장 본론 | 6 |
| 제1절 극지 수중로봇 탐사지역 환경데이터 획득 및 분석..... | 6 |
| 1.1 극지탐사를 통한 탐사지역 해양환경 데이터 획득..... | 6 |
| 1.2 북극지역 수중음향 데이터 획득..... | 8 |
| 제2절 극지 수중로봇 활용 탐사기술 연구..... | 10 |
| 2.1. 극지 빙붕·빙저 탐사 역사 | 10 |
| 2.2. 극지 빙붕·빙저 탐사 방법..... | 15 |
| 2.3. 해외 선진 빙붕·빙저탐사 기술 연구 | 18 |
| 2.4. 극지 수중로봇 활용 빙붕·빙저 탐사 사례 연구 | 27 |
| 제3장 결론 | 35 |

제1장 서론

제1절 연구목표

본 과제는 극지 빙하 탐사와 원격 모니터링을 위한 수중로봇 ICT원천기술 개발을 위해 필요한 극지 수중로봇 활용 대상 탐사지역 환경 데이터 취득분석 및 극지 수중로봇을 활용한 탐사기술 연구가 핵심이다. 본 연구를 위해 크게 두 가지로 연구 목표를 설정하였다. 크게 극지 무인 수중로봇 탐사지역 환경데이터 획득과 극지 빙붕과 빙저호 탐사 기술과 탐사시 사용되었던 수중로봇기술분석과 최신기술 연구로 나눌 수 있다. 각 연구목표별 세부사항은 아래와 같다.

- 극지탐사환경을 고려한 극지환경 데이터 취득 및 분석
- 극지 탐사용 수중로봇 활용 빙붕·빙저호 탐사 기술 연구

제2절 연구내용

위의 세부 목표에 따른 주요 연구내용은 아래와 같다.

- 극지탐사환경을 고려한 극지환경 데이터 취득 및 분석 :
 - 극지 무인수중로봇설계에 필요한 탐사지역에 대한 환경데이터 취득 및 분석
- 극지 탐사용 수중로봇 활용 빙붕·빙저호 탐사 기술 연구 :
 - 극지탐사에 취적화된 원천기술
 - 극지 시추 선진국 탐사기술 동향
 - 미래 빙붕·빙저 탐사기술 예측
 - 극지 수중로봇 운용 활용방안

제2장 본론

제1절 극지 수중로봇 탐사지역 환경데이터 획득 및 분석

1.1 극지탐사를 통한 탐사지역 해양환경 데이터 획득

기후변화로 인해 지구 곳곳에선 이상 기후현상들이 나타나고 있다. 극지는 지구온난화에 가장 민감하게 반응하는 지역으로, 온난화원인을 밝히기 위한 가장 최적의 장소로 지구온난화를 리딩하는 지역이다. 국제학술지 빙권(The Cryosphere)에 따르면 1994년부터 2017년까지 전 세계 28조 톤의 얼음이 사라졌고 그 속도도 빨라지고 있다는 영국 리즈대 극지 관측 및 모델링센터 연구팀의 연구결과를 소개하고 있다. 북극이나 남극과 같은 극지방의 빙하의 녹는 속도가 빨라지고 있음은 이미 많은 연구결과를 통해 알려지고 있다.

지구온난화연구를 위해 극지의 얼음연구는 중요한 부분중 하나이지만 극지바다 위에 떠있는 얼음들을 연구하는데 있어 많은 어려운 요소들이 존재하고 있다. 얼음을 깨고 나갈 수 있는 쇄빙연구선 조차도 얼음의 규모에 따라 쇄빙이 어렵기때문에 연구해역에 진입을 할 수 없으며 ROV와 같이 케이블에 연결되어 선상에서 운영되는 경우엔 케이블 길이 제한으로 빙봉하부 탐사에 어려움이 있다. AUV와 같은 케이블없이 탐사가 가능한 수중로봇은 배터리로 운영되는 관계로 탐사반경에 한계를 느낄 수밖에 없다. 이로 인해 최신기술을 활용한 극지 환경에 맞는 수중로봇 개발의 필요성은 점점 더 커져가고 있다.

극지탐사를 위한 수중로봇 개발에 있어 수중환경 분석은 중요한 부분이다. 극지바다 속에서 통신을 위해서는 일반 전자기파로는 물속에서 흡수도가 높아 먼 곳까지 전달이 되지 않는다. 이러한 이유로 수중통신을 위해서는 음향신호를 사용하게 된다. 음향신호는 주파수에 따라 수중에서 장거리통신까지도 가능하기 때문에 대부분의 수중로봇 통신을 위해 음향신호를 사용하고 있다.

음향신호는 바닷속 수온과 염분도에 영향을 받으며 극지바다는 수온과 염분도 특성이 다르다. 이러한 극지바다의 특성은 극지탐사용 수중로봇 설계 시 반드시 반영이 되어야하며 이를 위해서는 극지바다의 수온과 염분도 측정데이터는 수중통신 설계에 있어 중요한 부분이다.

극지연구소가 운영 중인 국내 최초 쇄빙 연구선인 아라온호는 COVID-19의 장기화에 따라 올해 7~9월동안 베링해를 지나 척치 해와 동시베리아해까지 연구원과 승무원 교대없이 한국에서 출발하여 다시 한국으로 돌아오는 긴 일정으로 북극 해양탐사를 수행하였다. 수중로봇이 수면위에 있는 경우는 대기환경에 영향을 받으므로 탐사기간 동안 자동기상관측장치(AWS)를 통한 통합대기관측 데이터를 획득하고 극지해양환경데이터(수온, 염분, 전도도등)관측은 CTD장비

를 사용하여 다양한 지점에서 해양관측을 실시하였다. 이번에 획득된 관측데이터는 극지수중로봇설계에 반영이 될 예정이다.

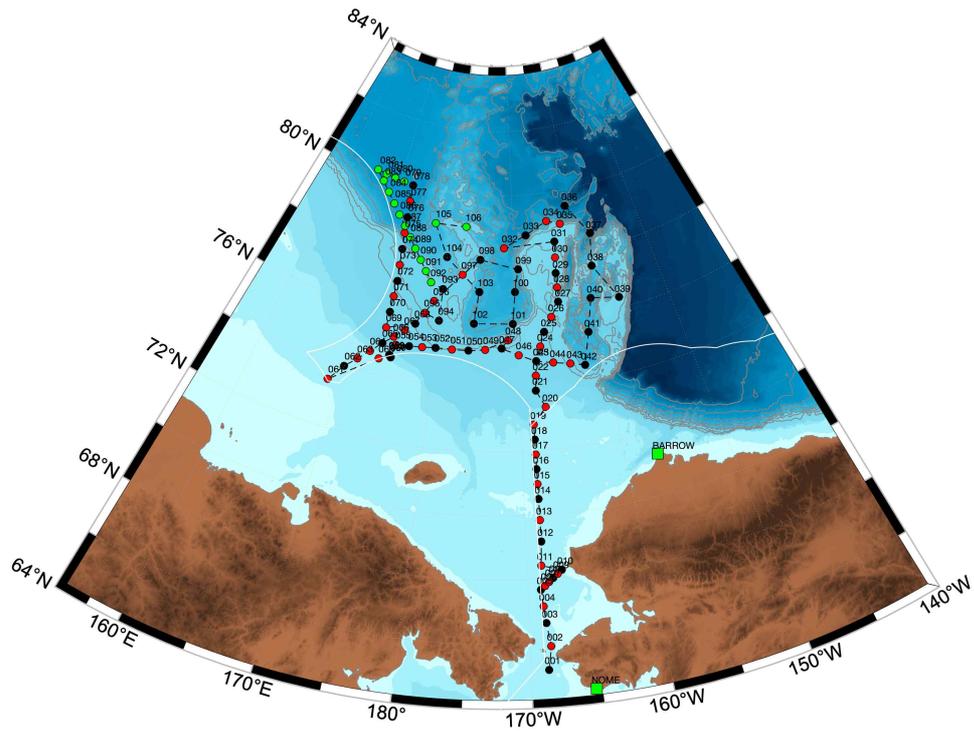


그림 1-1 북극해 탐사 경로

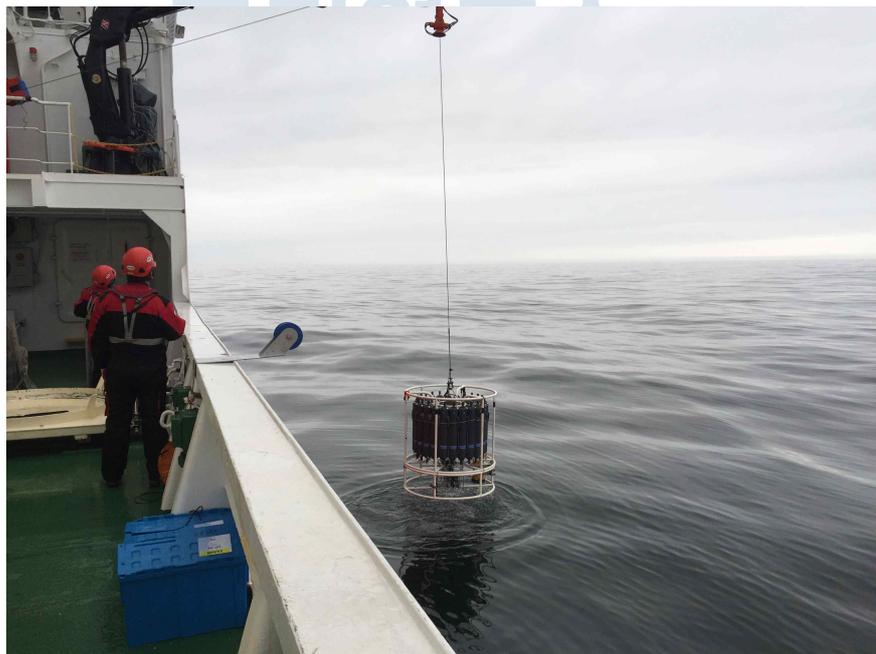


그림 1-2 북극해 환경데이터 획득을 위한 연구활동

1.2 북극지역 수중음향 데이터 획득

연구기간 중 2개월에 걸쳐 아라온호를 활용한 북극 연구탐사가 수행되었다. 작년에 이어 올해도 코로나바이러스 확산에 따라 북극연구를 최소화하여 실시함에 따라 예전대비 해양탐사에 더 집중하여 연구를 수행할 수 있었다. 작년과 같이 올해도 소형 음향 송,수신기를 활용하여 북극바다의 수중음향특성을 총4개의 지점에서 관측을 하였다. 만약 2척의 선박이 있다면 송신기와 수신기거리를 멀리하여 보다 더 다양한 데이터를 획득할 수 있겠으나 북극과 같은 결빙지역엔 일반 선박을 이용한 탐사가 힘들어 아라온호에만 의지할 수 밖에 없었다. 아라온호의 선박길이가 110m이며 선미 추진기의 프로펠러로 부터 센서 손상방지를 위한 최소거리를 두고 송신기와 수신기를 각각 선수와 선미 쪽에 두고 측정을 실시하였다. 송,수신기는 해수면으로부터 약50미터위치에 두고 송신기로부터의 신호없이 수신기만으로 배경잡음을 먼저 측정하고 송신기로부터 전송한 신호를 약100m거리에 있는 수신기가 수신하는 형태로 측정을 실시하였다. 원래 계획했던 지점과 실제 측정한 지점은 약간의 차이가 있었으며 이는 해도상의 수심정보와 실제 측정한 수심정보의 차이가 있어 센서가 해저면에 부딪힘을 방지하기 위해 좀 더 이동하여 측정가능한 수심이 확보되는 지역으로 이동하였기 때문이다. 센서 하부엔 무게 추를 달아 해류에 송신기와 수신기가 최대한 움직이지 않고 제 위치에 있는 상태에서 측정할 수 있도록 하였다.

아래 그림 1-3은 아라온호에서 센서를 설치하며 실험한 방법을 보여주고 있다.

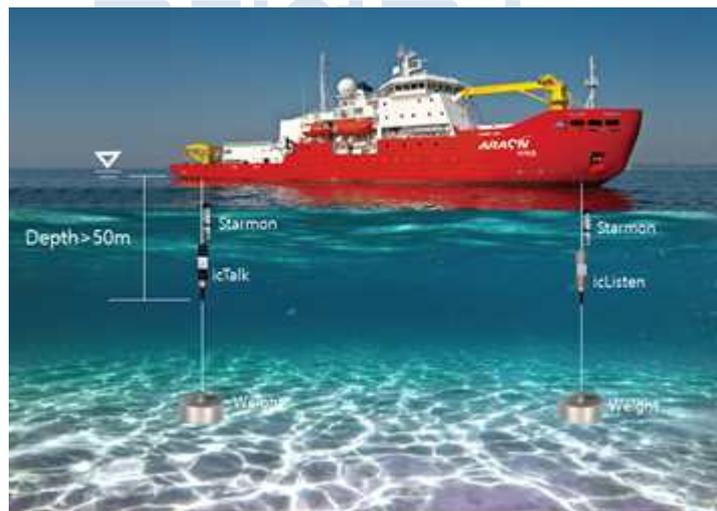
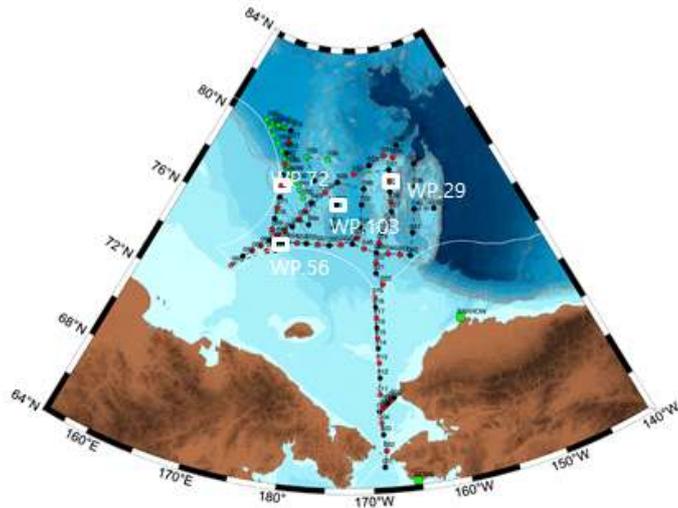


그림 1-3 아라온호를 활용한 수중음향 실험구성

그림 1-4는 이번에 탐사한 연구정점 중 선정된 4곳의 위치를 보여주고 있으며 표1-1은 실제 관측한 GPS좌표정보이다. 보다 많은 지점에서 관측을 한다면 보다 신뢰도가 높은 데이터를 얻을 수 있었겠지만 아쉽게도 연구를 위한 시간이 부족하였던 점은 아쉬운 점이다.



WP.29: 300m deep
 WP.56: 70m deep
 WP.72: 760m deep
 WP.103: 2,000m deep

그림 1-4 수중음향 데이터 획득 지점

| Station | Date | Time(utc) | Location | |
|---------|------------|---------------|-------------|--------------|
| | | | Latitude | Longitude |
| 29 | 2021.08.11 | 18:00 - 18:50 | 77°28.335'N | 164°7.079'W |
| 56 | 2021.08.15 | 01:22 - 02:25 | 74°38.178'N | 174°54.980'E |
| 72 | 2021.08.17 | 16:00 - 16:50 | 76°30.000'N | 173°36.000'E |
| 103 | 2021.08.22 | 15:10 - 16:00 | 76°0.000'N | 175°30.000'W |

표 1-1 데이터 획득 시간 및 GPS좌표

이번에 측정한 지역은 척치해와 동시베리아 지역이지만 보다 측정영역을 다양화할 수 있으면 수중로봇 설계시 데이터 신뢰도를 높이는데 도움이 될 것으로 판단된다.

제2절 극지용 수중로봇 활용 탐사기술 연구

2.1 극지 빙붕·빙저 탐사 역사

빙붕과 빙저호와 같은 빙저환경을 연구하는 것은 극지연구의 많은 부분을 차지할 정도로 연구의 중요성이 증대되고 있다. 특히 지구온난화가 가장 빠르게 일어나는 지역이 극지방이며 온난화 원인규명을 위해 극지방의 얼음연구와 얼음과 연관된 환경연구는 극지를 연구하는 많은 연구원들이 가장 선호하는 연구 테마 중 하나이기도 하다. 얼음은 남극뿐만 아니라 북극공해상, 그리고 북극 연안 국가 주변과 그린란드 같은 곳에서도 관찰할 수 있으나 아주 두꺼운 얼음하부에 존재하는 빙저호(Subglacial Lake)는 아주 특이하면서도 흥미로운 연구 장소로 남극대륙에서만 볼 수 있다.

1969년에 전파탐사(RES:Radio Echo Sounding)방법으로 처음 남극에 빙저호의 존재가 알려진 이후 지금까지 약 400개 이상의 빙저호가 남극의 두꺼운 얼음 밑에 존재하는 것으로 알려져 있다. 두꺼운 얼음을 뚫고 직접 호수를 탐사하는 기술이 개발되기 전에는 주로 빙붕과 빙저호 등을 탐사하는데 있어 탄성파(Seismic Wave)탐사방법과 전파탐사(RES)방법을 주로 사용하여왔다. 빙붕속으로 VHF 전파가 통과되고 여러 층의 경계면에서 반사와 굴절을 하는 성질을 이용한 RES탐사방법으로 아래 그림과 같이 반사파의 강도와 시간 계산을 통해 빙저호의 존재를 알 수 있었다. 60MHz 전파가 4km두께이상의 얼음도 통과되는 가장 탐사에 적합한 주파수로 확인되어 지금까지 수많은 RES탐사에 사용되고 있다[12].

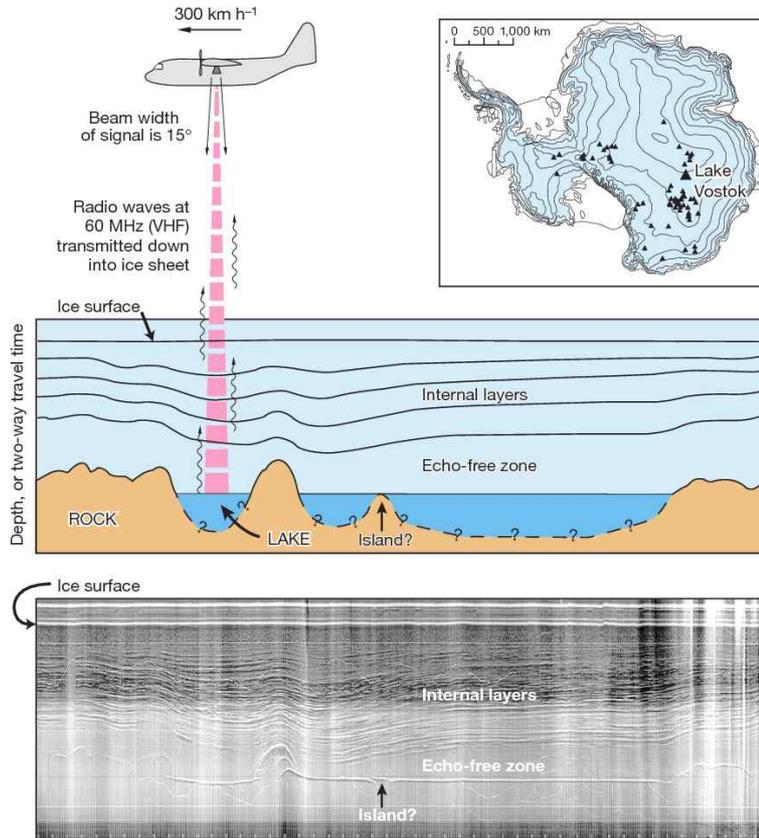


그림 2-1 airborne radio-echo sounding technique

(<https://www.semanticscholar.org/paper/Physical%2C-chemical-and-biological-processes-in-Lake-Siegert-Ellis-Evans/c7b1dc97fc3a6a35b64d341c733ee63ddc341428>)

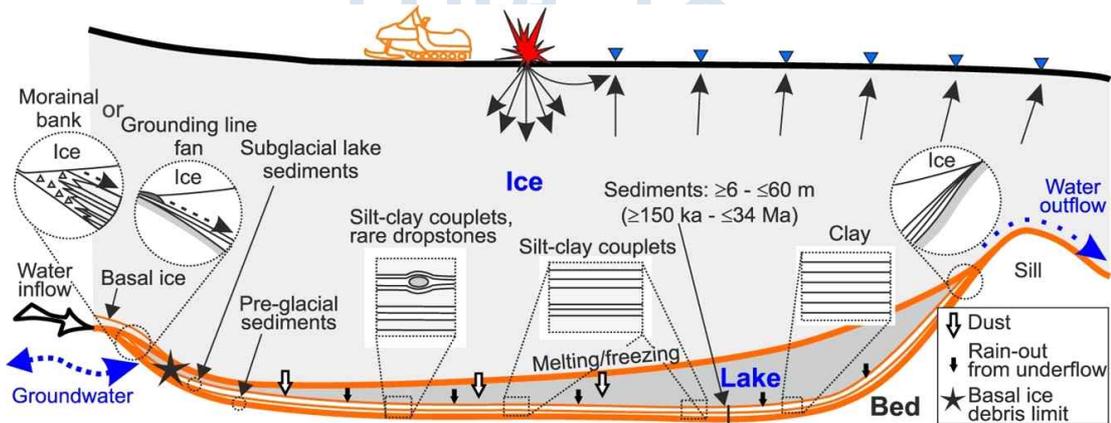


그림 2-2 Seismic survey technique

(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0012821X18305995>)

현재까지 발견된 빙저호중 5개정도의 빙저호는 실제 탐사를 진행했거나 진행중에 있다. 그 중 Vostok호수는 1974년 12월에 RES탐사를 통해 현재까지 발견된 빙저호중 가장 규모가 큰 호수로 길이가 250km, 폭이 50km에 이르는 초대형 빙저호로 극지 연구자들의 높은 관심을 받았었다. Whillans호수는 상대적으로 작은 호수이며 위성탐사를 통해 발견이 되었으며 뒤에 미국 빙저호탐이

WISSARD(Whillans Ice Stream Subglacial Access Research Drilling)프로그램을 통해 탐사를 하게 된다. Ellsworth호수는 2007-2009년까지 지표면 지구물리 탐사를 통해 얼음표면 아래 약 3-3.3km깊이에 존재한다는 것이 발견되었으며 길이는 약14km, 폭 2-3km, 예상수심이 160m정도 되며 2012년에 영국 극지연구소 BAS의 주도하에 열수를 이용한 시추를 시도하게 된다.

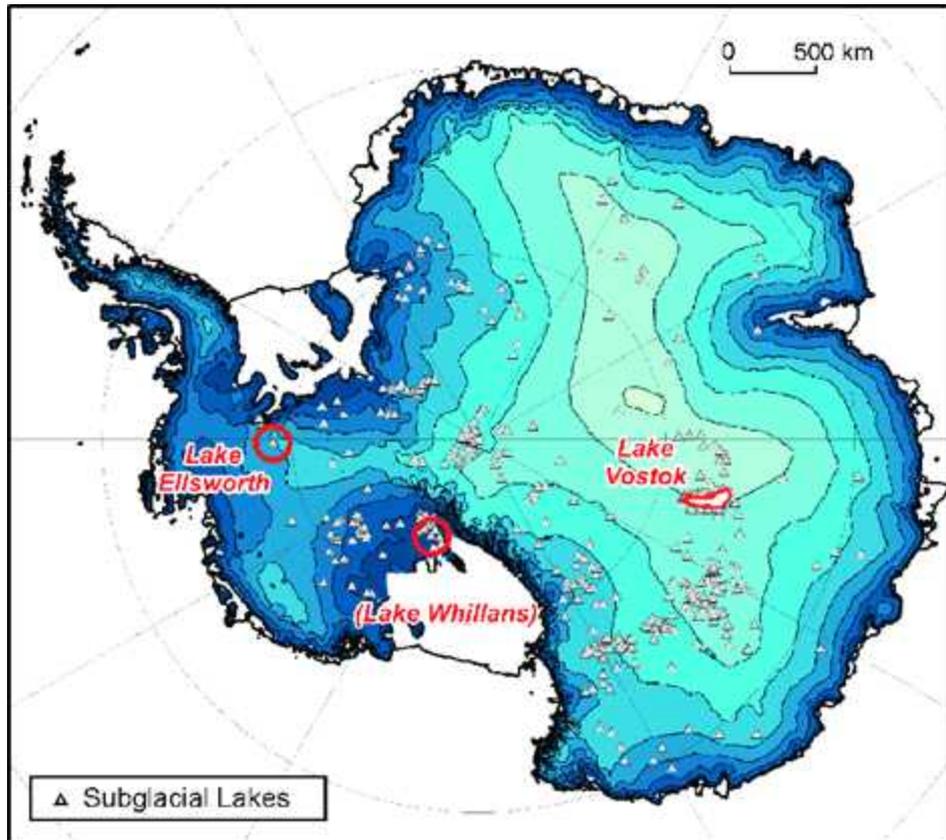


그림 2-3 남극에 존재하는 빙저호 분포

기존의 탄성파와 전파를 활용한 존재유무만을 알 수 있는 탐사기술로는 빙저호 환경연구가 불가하기 때문에 보다 더 높은 수준의 기술이 요구되었다. 풍부한 극지탐사경험을 보유한 나라들을 중심으로 빙저호탐사를 위한 기술개발이 있었으며 마침내 2012년 러시아가 세계 최초로 얼음을 뚫고 빙저호내 시료를 채취하는 성과를 발표하였다[11]. 3,400m정도 두께의 얼음을 뚫어 시료채취까지 수행한 역사적인 과학성과였다. 탐사에 성공한 빙저호 Vostok은 현재까지 직접 탐사를 수행한 빙저호 중 가장 규모가 크지만 드릴링시 사용된 오일(hydrocarbon based drilling fluids)이 빙저호를 오염시킴에 따라 연구성과를 인정받지 못하게 되었다.

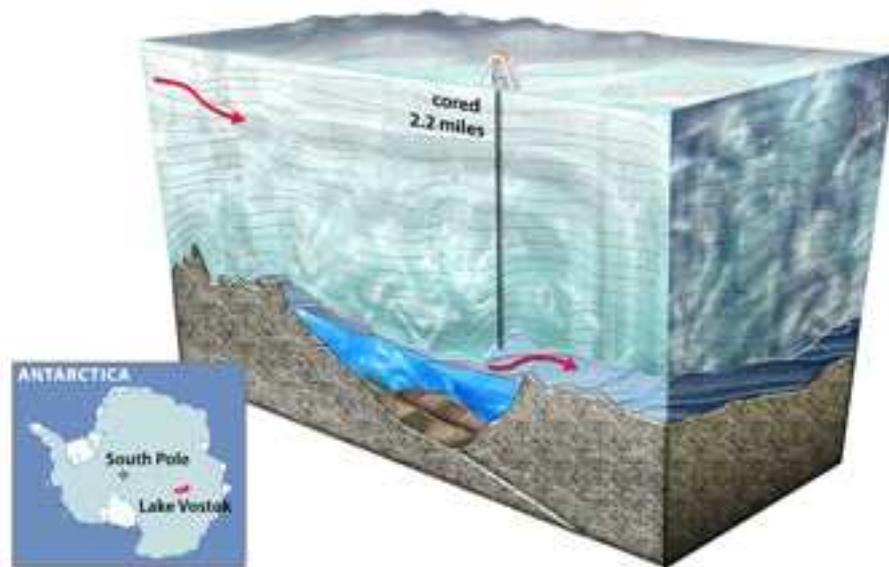


그림 2-4 남극에서 가장 큰 빙저호 Vostok

(<https://www.nationalgeographic.com/science/article/120208-russians-lake-vostok-antarctica-drilling-science>)

공학적인 면에서는 빙저호까지 직접 접근방식으로 성공한 성과를 보였으나 과학적인 측면에서 빙저호 환경을 오염시킴에 따라 새로운 탐사기술이 요구되게 되었다. 빙저호와 빙봉과 같은 두꺼운 얼음을 탐사하는 기술로는 다양한 기술이 있으나 현재로서는 남극의 환경오염을 하지않으면서 연구환경을 최대한 보존할 수 있는 방법으로 대부분의 국가에서 열수시추(How Water Drill)방식을 사용하고 있다.

2012년엔 해양강국인 영국의 극지연구소(BAS:British Antarctic Survey)가 중심이 되어 또 다른 대형 빙저호중 하나인 Ellsworth호수 연구를 시도한 방법이 열수시추방법으로 장비의 결함으로 실패하게 된다. 이후 장비를 개량하여 2019년에 2,000m이상 드릴링을 성공하여 가능성을 보았으며 2020년에 보다 더 향상된 시스템을 개발완료하고 실전투입만 기다리고 있다.

상대적으로 미국도 2013년부터 열수시추방법을 활용하여 상대적으로 규모가 작은 편인 두 곳(Whillans, Mercer)의 빙저호탐사를 성공하게 된다.

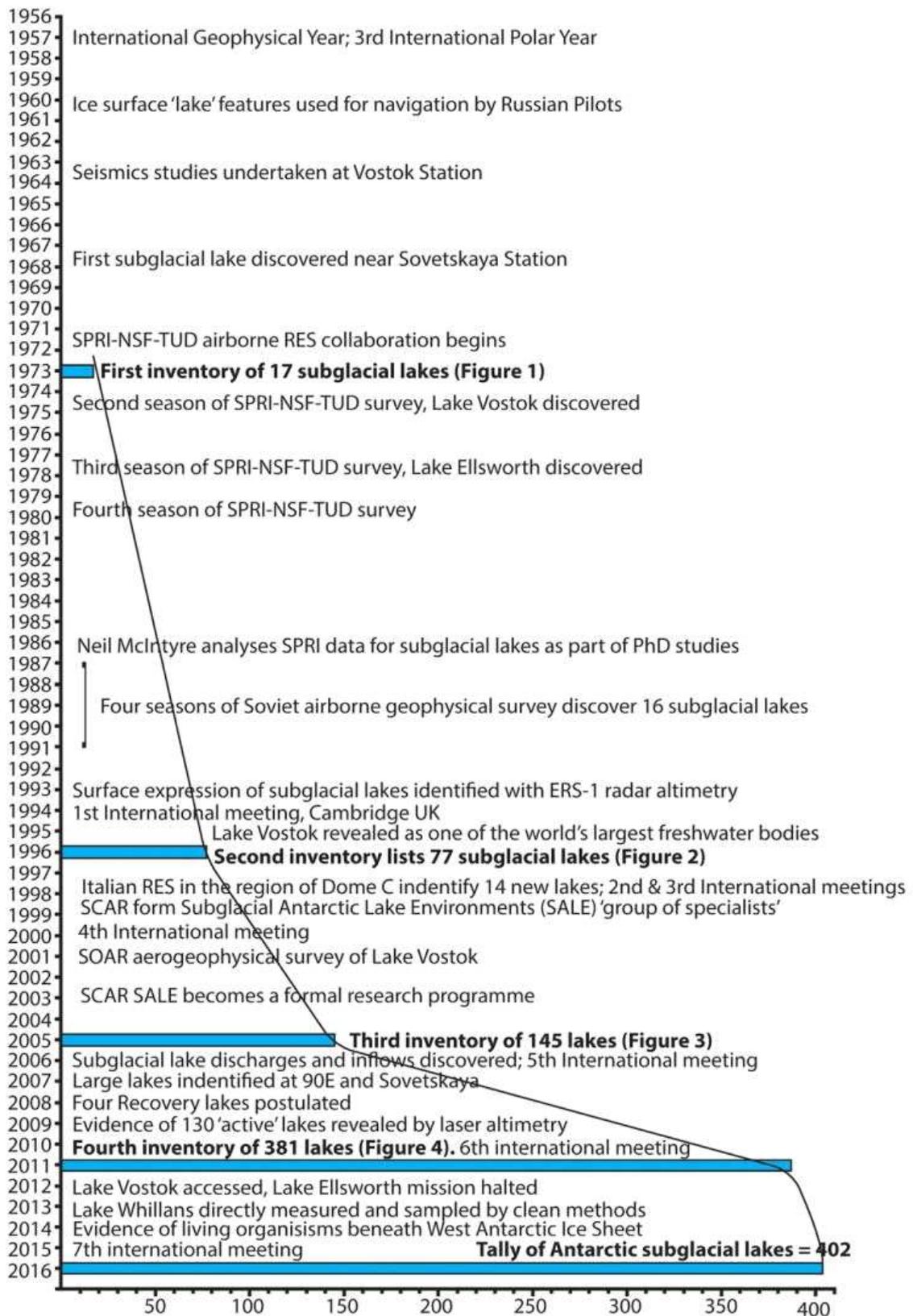


그림 2-5 빙저호 탐사 기록. 파란색 라인은 년도별 발견된 빙저호 개수를 의미함.

(<http://sp.lyellcollection.org>)

| Name | Lake Depth(m) | Ice Thickness |
|----------------|---------------|---------------|
| Lake Vostok | 510 | 3,800 |
| Lake Ellsworth | 150 | 3,150 |
| Lake Whillans | 2 | 800 |
| Lake Mercer | 15 | 1,092 |
| Lake CECs | - | 2,650 |

표 2-1 연구중인 대표 빙저호들

지금까지 러시아를 시작으로 영국, 미국, 독일, 뉴질랜드등 수많은 극지연구 국가에서 빙저호탐사를 경쟁적으로 수행하고 있다. 무엇보다 기술과 경험면에서 가장 앞서있는 미국과 영국을 중심으로 지금도 보이지 않는 기술경쟁을 하고 있다.

2.2 극지 빙붕 · 빙저 탐사 방법

얼음이 바다를 만나 평형하게 얼어붙은 거대한 얼음 덩어리인 빙붕(Ice Shelf)과 빙붕하부, 얼음표면으로부터 수천미터 아래 존재하는 빙저호(Subglacial Lake)내부 연구는 극지를 연구하는데 있어 기후온난화연구에도 필수적인 연구 대상이다.

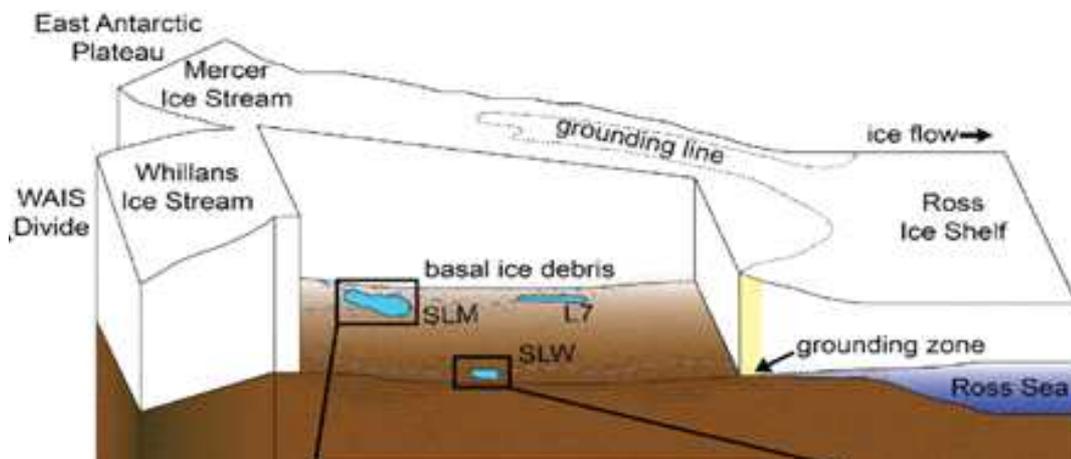


그림 2-6 Ross Ice Shelf와 Subglacial Lake(Lake Whillans/Lake Mercer)

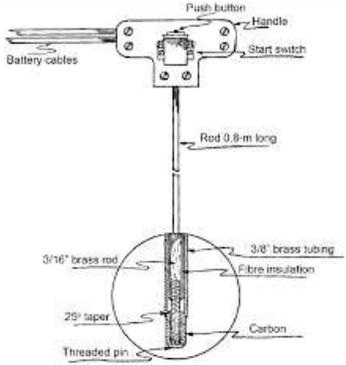
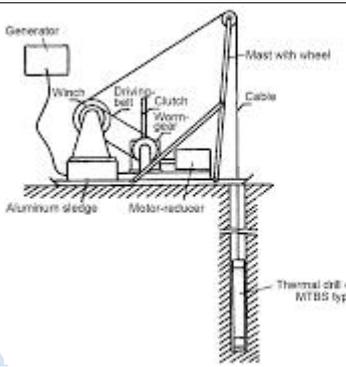
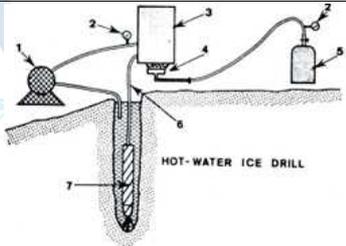
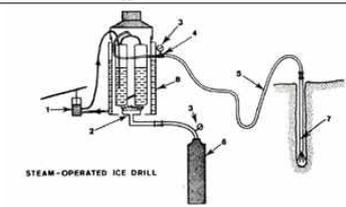
(<https://salsa-antarctica.org>)

전 세계적으로 이슈가 되고 있는 지구온난화 원인을 밝힘에 있어 어느 곳보다 빠른 속도로 변화가 관측되는 남극과 북극은 좋은 연구지역이며 특히 육지와 연결된 대형얼음인 빙붕 하부와 빙저호는 탐사가 쉽지 않은 지역이라 지금까지 많은 탐사를 시도하곤 있지만 여전히 도전적인 탐사임에는 틀림없다. 본 연구와 관련하여 극지에서 빙붕 하부와 빙저호 등과 같은 도전적인 연구에 다양한 탐사가 시도되고 있고 특히 남극환경에 영향을 주지 않는 청정 연구방법은 계속 개발되고 있다.

특히 빙저호 탐사는 빙붕으로부터 여러 가지 기록들과 지구의 기후변화연구에 중요한 역할을 하게 된다. 또한 갇혀진 극한환경에서 빙저호에서 살고 있는 독특한 생물과 생태계 연구 또한 과학계에 많은 관심을 불러 일으키기에 충분한 연구소재이다. 남극은 외부로부터 오염되지 않은 곳으로 연구를 함에 있어 외부환경이 영향을 받은 경우의 연구결과는 우수한 연구성으로 인정받는데 어려움이 있을 수 있다. 빙붕이나 빙저호 탐사를 함에 있어 얼음을 뚫는 것은 직접적인 시료를 채취하는데 효과적인 방법이나 뚫는 과정에 있어 이물질이 영향을 주면 되지 않기 때문에 주로 열을 이용하는 시추방법이 가장 많이 사용되고 있다.

열을 활용한 시추방법으로 많이 사용되는 방식을 아래와 같이 정리해 볼 수 있다.[10]



| 종류 | 내용 | 시스템 구성 |
|--------------------------------|---|---|
| Hot-point drills | 코어링없이 깊이 얇은 범위 내에서 사용 |  |
| Electric thermal coring drills | 전기를 활용하여 열을 발생하고 발생한 열을 drill tip에 전달하여 사용 |  |
| Hot-water drilling systems | 물을 끓여 뜨거운 물을 직접적으로 분사하여 얼음을 녹이면서 코어링 |  |
| Steam drills | 보일러를 통해 증기를 발생시키고 고온의 증기를 drill tip에 전달하여 코어링 |  |

위에 열거된 방식 중 얼음이 두꺼우며 큰 시추공이 필요한 경우, 다른 방식보다 시스템규모가 커질 수 있지만 비용과 효율 면에서 우수한 열수시추(Hot Water Drilling)방법을 많이 사용하고 있다.

아래 그림은 대표적인 열수시추시스템의 구성도를 나타낸 것으로 히터를 통해 가열된 뜨거운 물을 hose로 이동시켜 호스 끝에 연결된 분사 노즐을 통해 고압으로 분사시켜 구멍을 뚫어가는 방식으로 그림 2-7과 같이 대략적으로 얼음표면으로부터 일정깊이 아래 사용된 물을 재활용하기 위한 공간(Water Storage)를 두어 물을 계속 순환시키는 구조로 함에 따라 추가적인 물 공급없이 오랜 시간동안 시추를 계속할 수 있는 형태로 동작하게 된다.

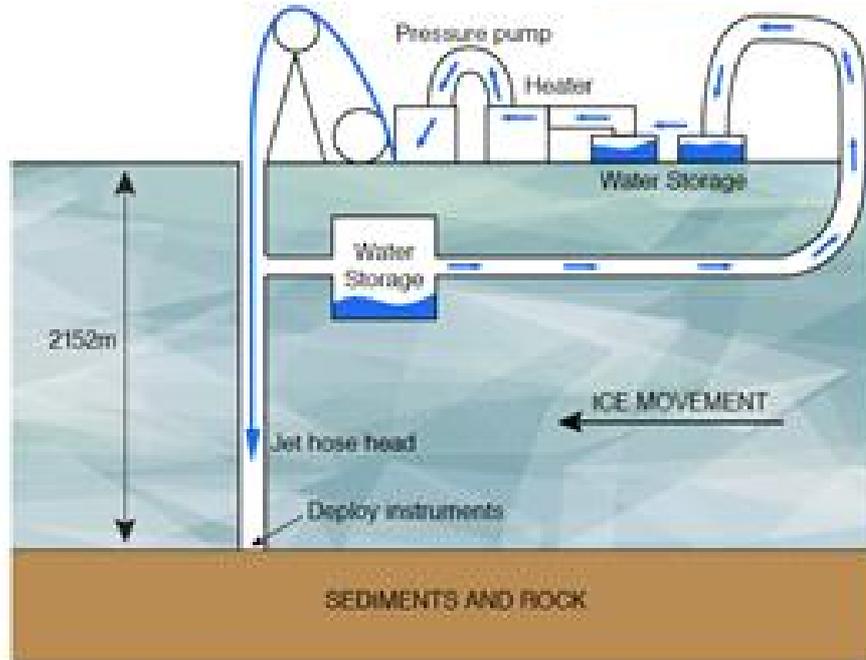


그림 2-7 열수시추시스템 개념도

열수시추를 함에 있어 외부로부터 환경을 차단한 청정 방식으로 시추를 하여야 하기 때문에 시스템 설계 및 설치 시 고려되어야 할 사항들이 있다. 시추장소까지 엄청난 양의 물을 운반하기 어렵기 때문에 현장에서 눈을 녹인 물을 사용하게 되며 이때 선택되는 눈은 차량이나 비행기 또는 사람의 행동으로 인해 발생한 이물질 등의 영향을 받지 않은 깨끗한 눈을 사용하여야 하며 시추호스가 내려가는 쪽으로 바람이 오지 않도록 바람방향을 고려하여 설치가 되어야 한다. 시추에 사용되는 물들은 청정상태를 유지하여야 하기 때문에 다단계 필터를 통해 최대한 깨끗하게 정화된 물을 사용할 수 있도록 하며 얼음 속에 들어가는 드릴 호스의 바깥면은 UV살균과 과산화수소등을 이용하여 자동 세척될 수 있는 시스템을 갖추고 있어야 한다.

2.3 해외 선진 빙봉·빙저 탐사 기술 연구

2012년 러시아가 Vostok호수를 탐사한 것을 시작으로 현재까지 수많은 국가에서 빙봉과 빙저호 탐사를 수행하고 있다. 앞서 살펴본 바와 같이 얼음을 직접 뚫어 탐사하는 방식으로 가장 많이 사용되는 열수시추 기술은 미국과 영국이 최고수준의 기술을 보유하고 있다. 영국은 2012년 Ellsworth호수를 시작으로 미국은 2013년 Whillans호수를 시작으로 계속적으로 시스템을 개선하고 있다.

미국은 두 번에 걸친 성공적인 빙저호 탐사 경험을 보유하고 있다. 첫 번째 탐사인 Whillans호수는 WISSARD(Whillans Ice Stream Subglacial Access Research Drilling) 프로그램으로 수행되었다. Whillans호수는 얼음두께가 약

800m, 호수깊이는 2m정도로 작은편에 속하지만 이때 소형 로봇(MSLED)을 활용하여 실제 호수내부 영상과 시료 채취를 한 최초의 열수시추방식을 사용한 성공적인 빙저호 탐사로 기록되고 있다.[14]

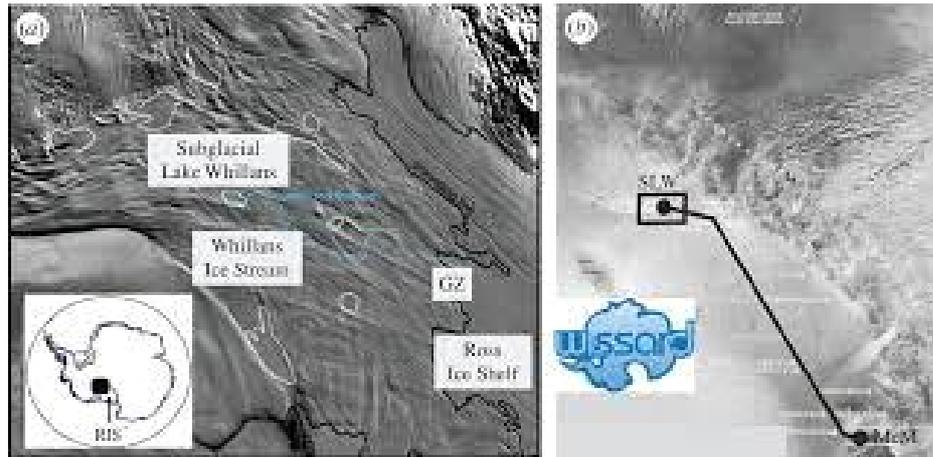


그림 2-8 Whillans호수 위치

(<https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rsta.2014.0305>)

열수시추시스템구성을 보면 물을 끓이는 히터를 비롯하여 순환을 통한 물을 재활용함에 있어 UV살균과 다단계 필터를 통해 깨끗한 물을 순환할수 있는 구조가 반영되어 있다. Whillans호수 탐사는 시추하여 시료채취까지 총11가지 단계를 통해 탐사가 이뤄졌다.

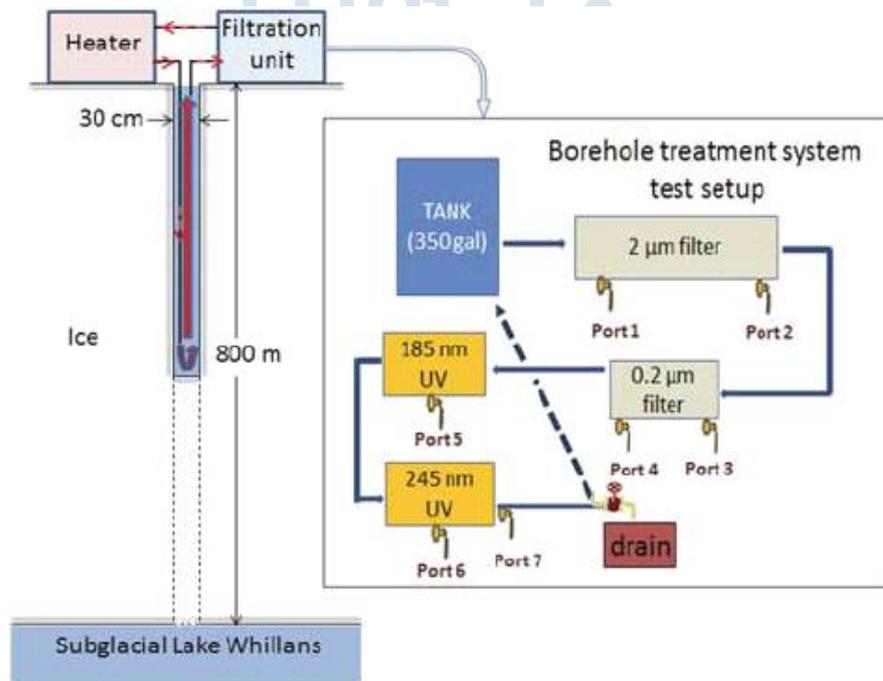


그림 2-9 WISSARD프로젝트에 사용된 열수시추시스템 구성도

(https://www.researchgate.net/figure/Map-showing-the-location-of-Subglacial-Lake-Whillans-green-star-5-SLW-84237-8-S_fig1_259437028)

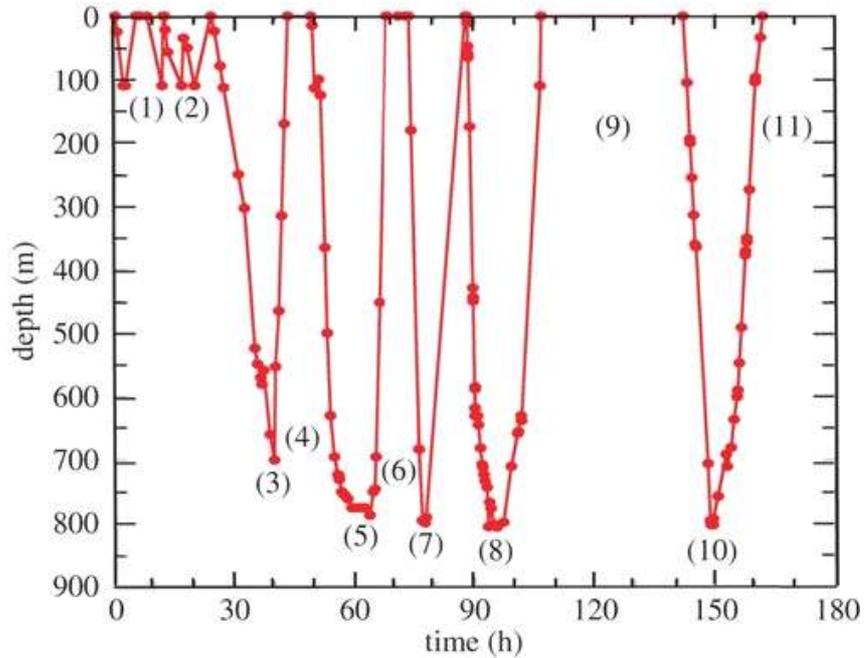


그림 2-10 단계별 시간에 따른 열수시추 진행표

미국의 두 번째 성공적인 탐사로는 Mercer호수로 2018-2019년에 SALSA(Subglacial Antarctic Lakes Scientific Access) 프로젝트를 통해 수행되었다. Mercer호수는 시추를 위한 얼음두께가 1,092m이며 호수 깊이는 15m 정도로 알려져있다. WISSARD프로젝트에 비해 수년간에 걸친 시스템 개선으로 보다 많은 연구를 수행한 탐사였다. 특히 빙저호탐사를 위해 제작된 특수 수중로봇인 SCINI ROV를 활용하여 다양한 자료를 얻을수 있었으며 SCINI로봇에 대한 내용은 2.4 극지 수중로봇 활용 빙붕·빙저 탐사 사례 연구에서 설명하고자 한다.

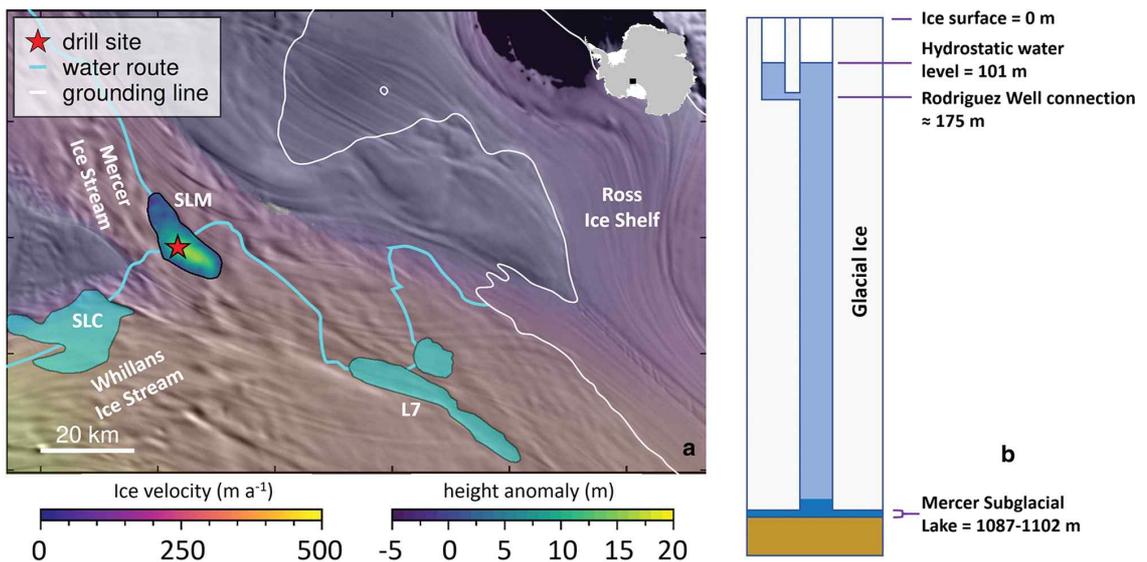


그림 2-11 Mercer호수 위치[9]

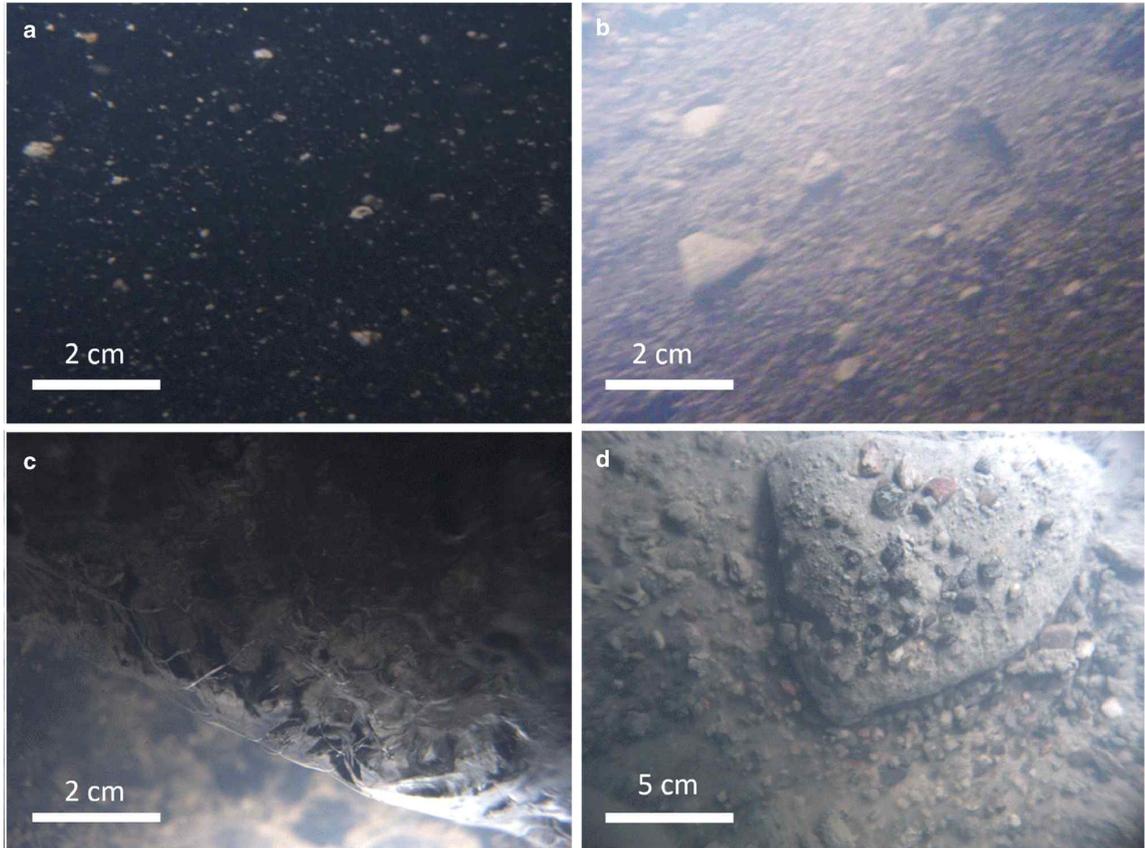


그림 2-12 빙저호내부에서 촬영된 이미지들[9]

(Scientific access into Mercer Subglacial Lake: scientific objectives, drilling operations and initial observations)

영국도 얼음두께가 3,150m에 호수깊이도 150m로 규모가 있는 Ellsworth호수 탐사에 도전하였으나 드릴용 호수를 섹션별로 연결하여 사용하다보니 섹션부위의 불량으로 인해 전체 프로그램을 포기하게 된다. 그 후 실패한 경험을 바탕으로 두 번에 걸친 전체 시스템을 개량하게 된다.

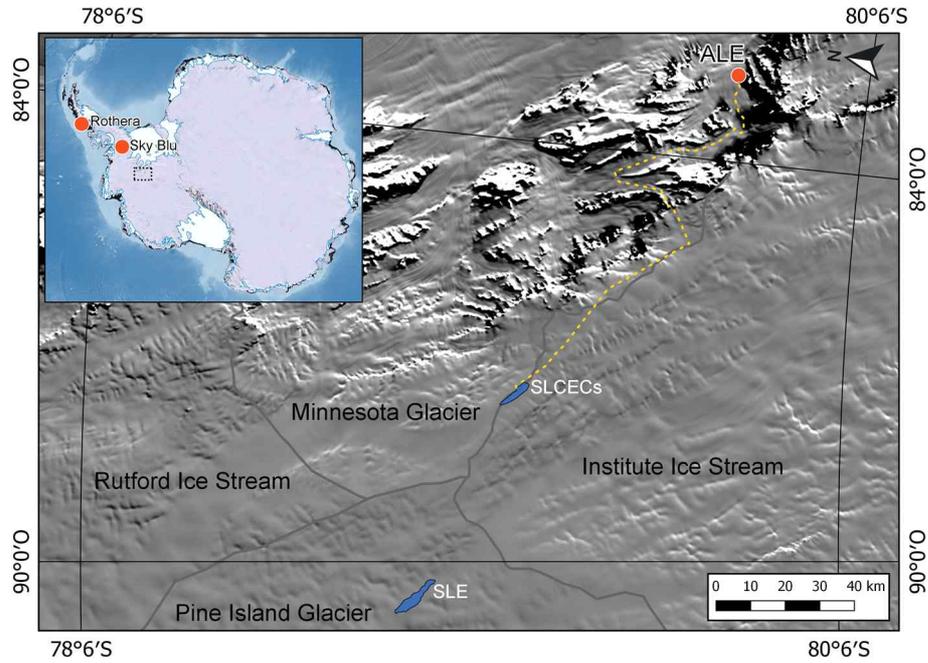


그림 2-13 SLCECs 호수 위치[8]

개선된 시스템은 2012년의 경험치에 2019년도에 BEAMISH(Bed Access, Monitoring and Ice Sheet History) 프로그램으로 Rutford Ice Stream의 한 지점을 타겟으로 열수시추를 시험하여 2,154m라는 당시 최고의 깊이까지 열수시추에 성공을 하게 된다. 이때는 열수순환을 위한 공간을 위해 총 30cm크기의 3개의 시추공을 뚫어 가능성을 확인하게 된다. 이후 2020년엔 깊이 2,650m의 CECs호수시추를 위해 SLCECs CHWD(Clean Hot Water Drilling)시스템으로 개선하여 실증 시험을 올해 시행예정이었다. 그러나 COVID-19의 장기화로 인해 계획은 미뤄져서 현재 계획으로는 2022-2023시즌에 시추할 예정이다.

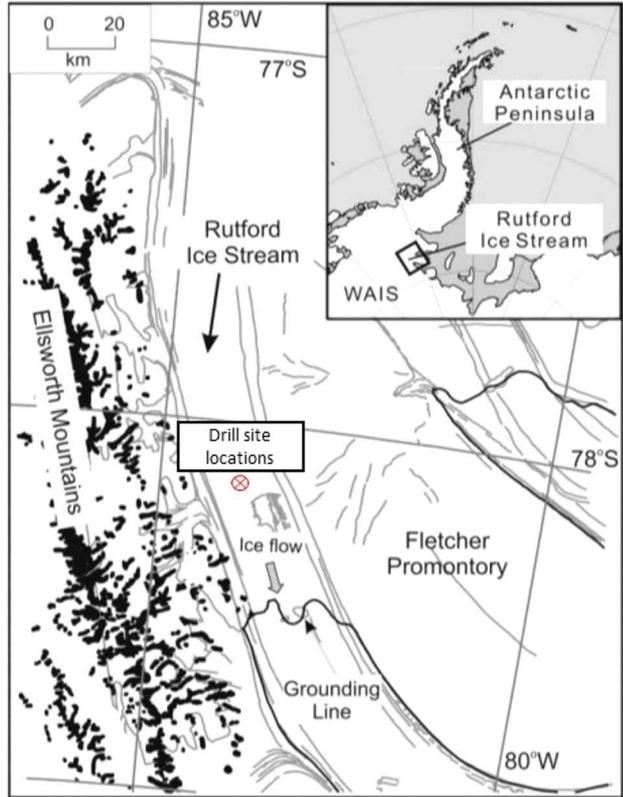


그림 2-14 BEAMISH 프로그램으로 시스템시험을 위한 시추지점

앞서 살펴본 미국과 영국의 시추에 사용된 열수시추시스템(CHWD)중 영국에서 최근에 개량한 시스템이 가장 최신기술을 반영하고 있어 열수시추기술 최신동향을 살펴보는 데 많은 도움이 될 것으로 판단된다.

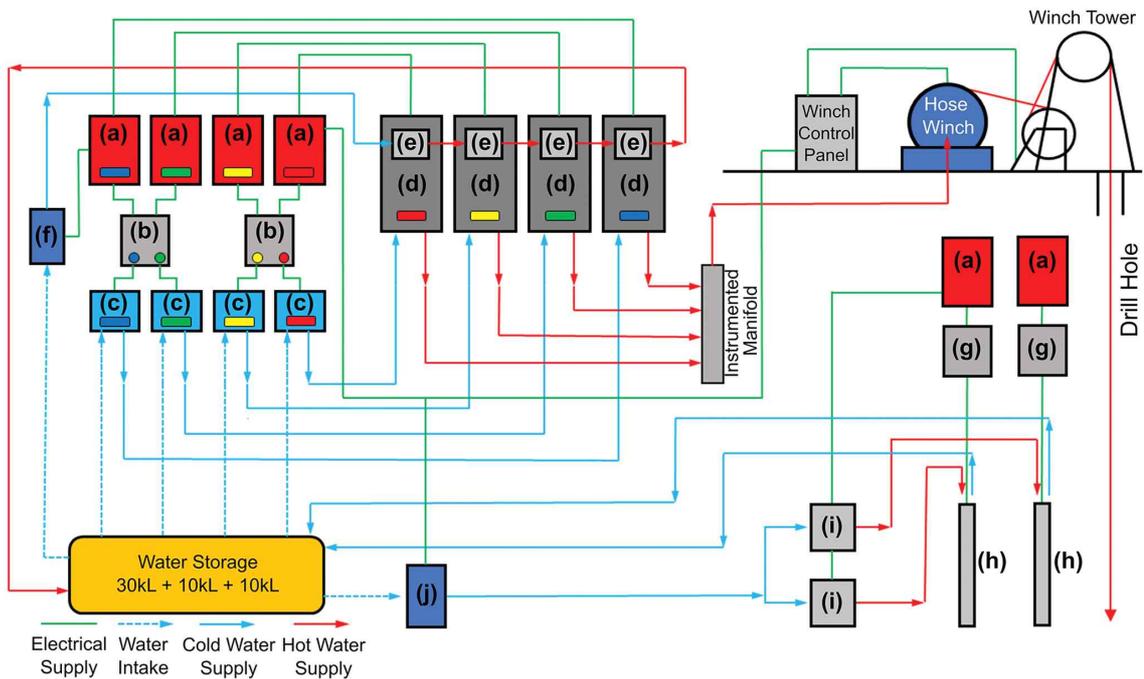


그림 2-15 BEAMISH 프로젝트에 사용된 열수시추시스템 구성도[2]

그림 2-15는 2019년에 시행된 BEAMISH프로그램때 사용된 시추시스템으로 좀 더 어려운 환경의 시추를 위해 2012년의 실패경험과 2019년의 성공경험을 결합한 SLCECs 열수시추시스템을 선보이게 된다. 새로운 시스템으로 개선을 위해 여러 가지 사항들을 추가적으로 반영하였으며 기존시스템과 대표적인 차별점은 하나의 기능에 문제가 생겨도 시추를 계속할 수 있도록 대부분의 시스템 구성을 이중화형태로 구성한 것을 볼 수 있다. 기존보다 더 나은 고온 고압 드릴 워터펌프를 반영하였고 기존보다 원활한 물 공급을 위한 물 저장소를 추가하였다.

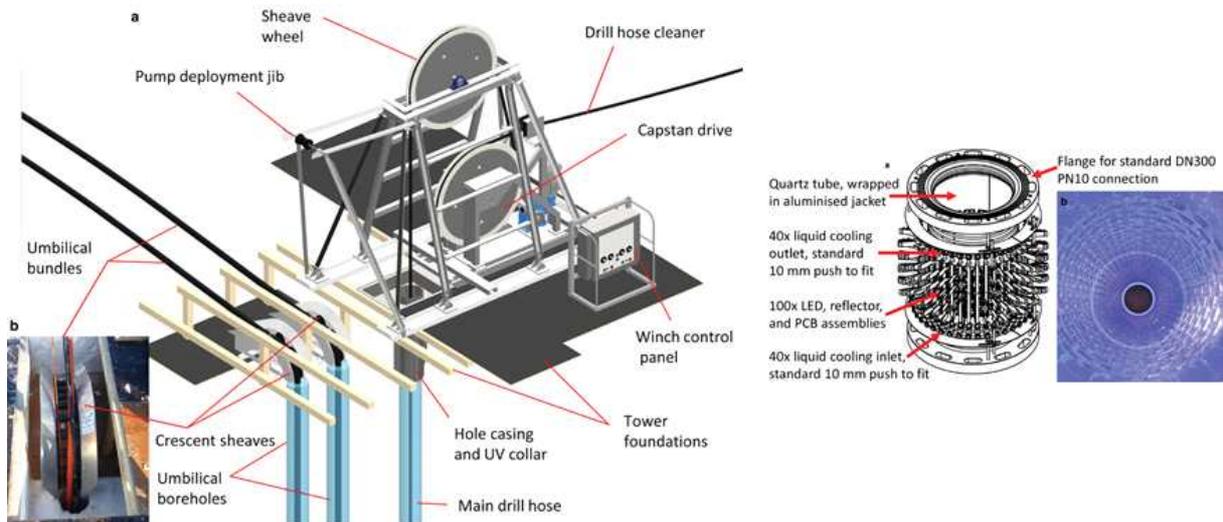


그림 2-16 드릴호스 세척과 소독을 위한 LED UV시스템[8]

드릴호스를 세척하고 소독하기 위한 LED UV시스템, 새로운 디젤타입의 발전기, 추가적인 열수생산장치, 기존 드릴호스를 32mm 시추드릴호스로 교체, 열수순환 폐회로시스템, 열교환기등 많은 부분을 개선한 것을 볼 수 있다. 아래 그림 2-17은 기존 시스템을 개선한 새로운 SLCECs 열수시추 시스템의 구성을 보여주고 있다.[9]

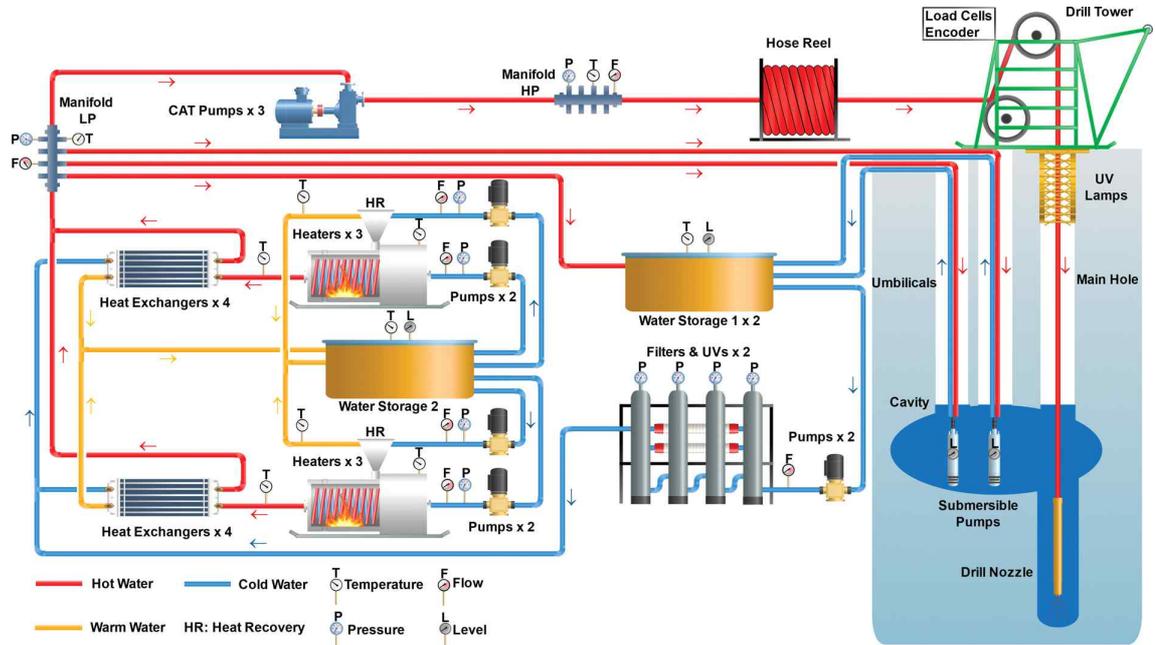


그림 2-17 SLCECs 프로젝트에 사용된 열수시추 시스템 구성도[8]

SLCECs 열수시추 시스템은 기존의 좋은 구조를 그대로 살린 부분도 많으며 이 중 특히 열수를 분사노즐까지 전달하는 Umbilical 구조는 BEAMISH에서 성공적으로 사용된 경우라 그대로 반영을 하였다. 2012년에는 전력케이블과 열수호스가 그대로 힘을 받음에 따라 늘어나는 정도의 차이로 시스템운용에 어려움이 많이 발생하였음을 개선하기 위해 내부에 강도가 높은 Kevlar 케이블을 추가로 반영하고 주위에 각 기능을 담당하는 케이블을 배치하는 형태로 하여 성공률을 올리게 되었다.

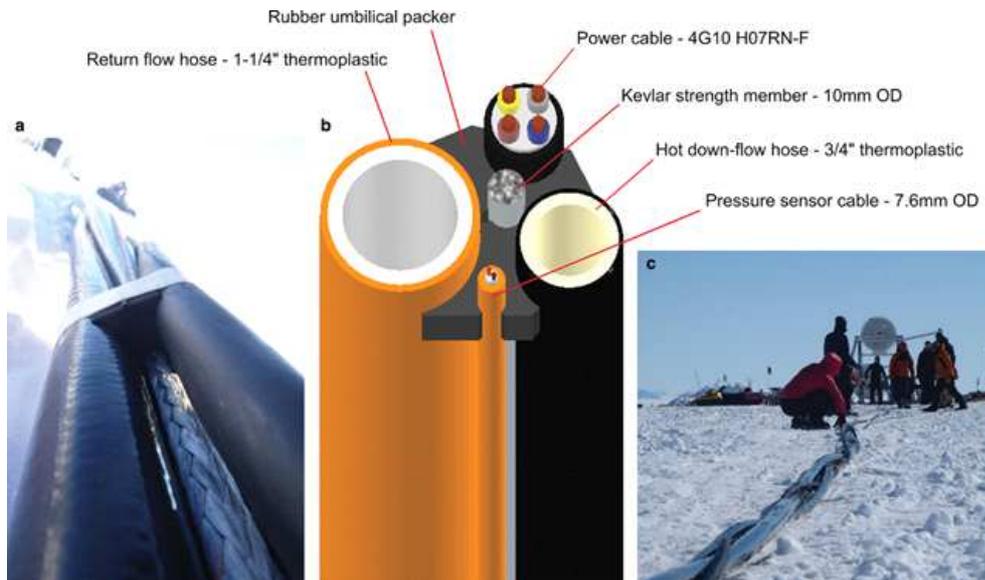


그림 2-18 Umbilical 구조[2]

아래 그림 2-19는 기존 BEAMISH시스템과 개선된 SLCECs시스템의 열수시추방

법에 대한 차이점을 보여주고 있다.

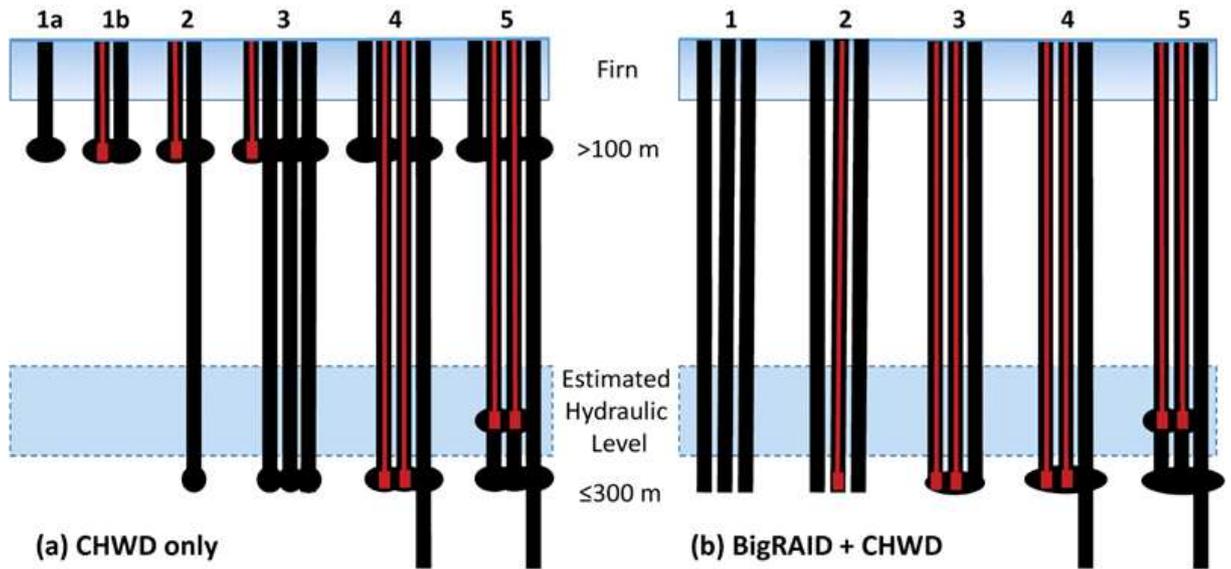


그림 2-19 두가지 드릴링 방법의 차이[8]

그림 2-19 왼쪽의 CHWD(Clean Hot Water Drill) only는 BEAMISH때 사용한 방식으로 열수시추만 하는 방식이며 열수순환 구조를 만들기 위해 얼음표면으로부터 100m아래지점과 예상되는 Hydrostatic Water Level지점에 두 곳에 공간을 만들었으나 우측의 BigRAID+CHWD경우는 100m지점의 공간을 볼 수가 없다. 또한 시추시간을 단축하기 위해 SLCECs 시스템은 열수순환 공간 깊이까지 RAID(Rapid Access Isotope Drill)방식으로 빠르게 드릴링 후 열수방식으로 시추를 하는 형태로 되어있다. 두 시스템 모두 열수순환을 위한 Umbilical은 이중화로 되어있는 것을 볼 수 있다.

SLCECs CHWD은 열수시추가 끝난 후 시추공의 상태를 모니터링하기 위해 시추공 측정시스템(Borehole measurement system)을 개발하여 사용하고 있다.[2][9] 여기엔 카메라와 LED, echo sounder, 데이터로거 등 다양한 센서들이 설치되어있어 CECs호수의 성공적인 시추를 위한 준비를 다 갖추고 있다고 볼 수 있어 추후 Ellsworth호수의 성공적인 탐사를 기대해 볼 수 있지 않을까 생각해 본다.

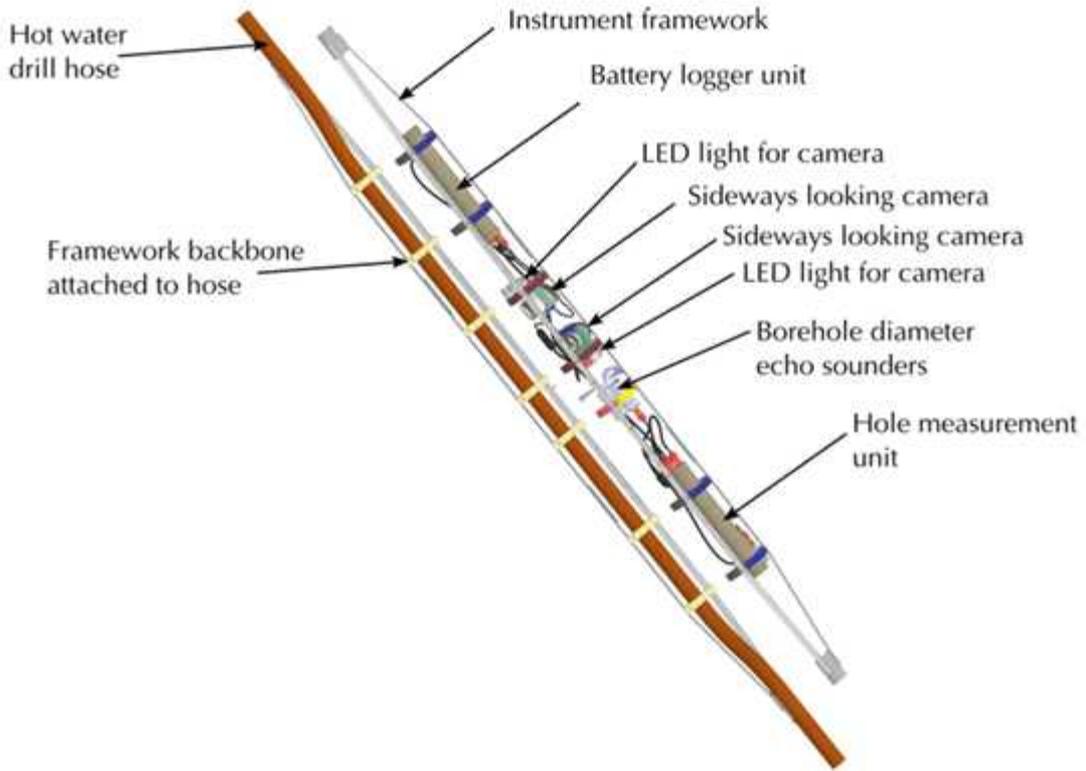


그림 2-20 시추공 측정 시스템(Borehole measurement system)

지금까지 미국과 영국의 최고수준의 빙저호 탐사기술에 대해 살펴보았다. COVID-19로 지금은 두 나라의 경쟁이 주춤해 보이지만 서로 빙저호 탐사기술의 우위를 차지하기 위하여 미국과 영국은 보이지 않는 경쟁을 계속하고 있다.

2.4 극지 수중로봇 활용 빙봉·빙저 탐사 사례 연구

지금까지 러시아의 Vostok호수 시추를 시작으로 보이지 않는 빙저호 탐사기술 우위선점을 위한 미국과 영국의 자존심대결에 따른 기술의 발전 동향을 살펴보았다. 앞서 잠시 언급하였지만 열수시추방법을 사용한 빙저호를 탐사함에 있어 여러 특수 수중탐사로봇이 활용되었으며 여기선 각 로봇에 반영된 기술에 대해 살펴보고자 한다.

빙저호 탐사에 사용된 로봇들은 좁은 시추공을 통해 탐사로봇을 내려 보내야 하기 때문에 기존 수중로봇과는 형상에 있어 많은 차이가 있다. 조사한 결과를 보면 지금까지 총4가지 로봇이 사용되었으며 이중 ENDURANCE를 제외하곤 모두 시추공에 최적의 형상을 하고 있다.

가.ENDURANCE

ENDURANCE(Environmentally Non-Disturbing Under-ice Robotic Antarctic Explorer)는 미국의 STONE Aerospace에서 제작한 수중로봇으로 2007-2008시즌동안 미국의 McMurdo기지인근 Bonney호수에서 기능 시험 및 조사를 수행한 로봇이다. Bonney호수는 위에 얼음으로 덮혀 있지만 수천미터아래 완전히 고립된 환경의 빙저호는 아닌 일반적인 호수에 얼음이 덮힌 정도의 호수이다. ENDURANCE의 시스템 제원은 아래와 같으며 사진은 Bonney호수 탐사를 위해 연구원이 시스템을 점검하는 모습이다.

| | |
|------------------|----------------------|
| Manufacturer | STONE Aerospace |
| Dimension(m) | 2.13 x 1.52 |
| Depth(m) | 1,000 |
| CTD | Yes |
| Selected Imaging | Optical, Sonar, ADCP |



그림 2-21 ENDURANCE 탐사 전 점검

나.SCINI

SCINI(Submersible Capable of under Ice Navigation and Imaging)는 Moss

Landing Marine Lab에서 제작된 로봇으로 빙저호 탐사시 가장 많은 활약을 한 로봇중 하나이다. SCINI는 ROV형 로봇이라 Tether가 달린 채 이동하면서 채집한 다양한 자료들을 실시간으로 전송하는 형태로 연구를 수행하였다. 2007-2009년까지 Ross 빙봉조사 활약을 시작으로 2019년 SALSAPRO그램을 통한 Mercer 빙저호 조사 때 본격적인 활약을 하였다.

| | |
|------------------|-------------------------|
| Manufacturer | Moss Landing Marine Lab |
| Dimension(m) | 0.15 x 1.4 |
| Depth(m) | 300 |
| CTD | Yes |
| Selected Imaging | Optical, Sonar |

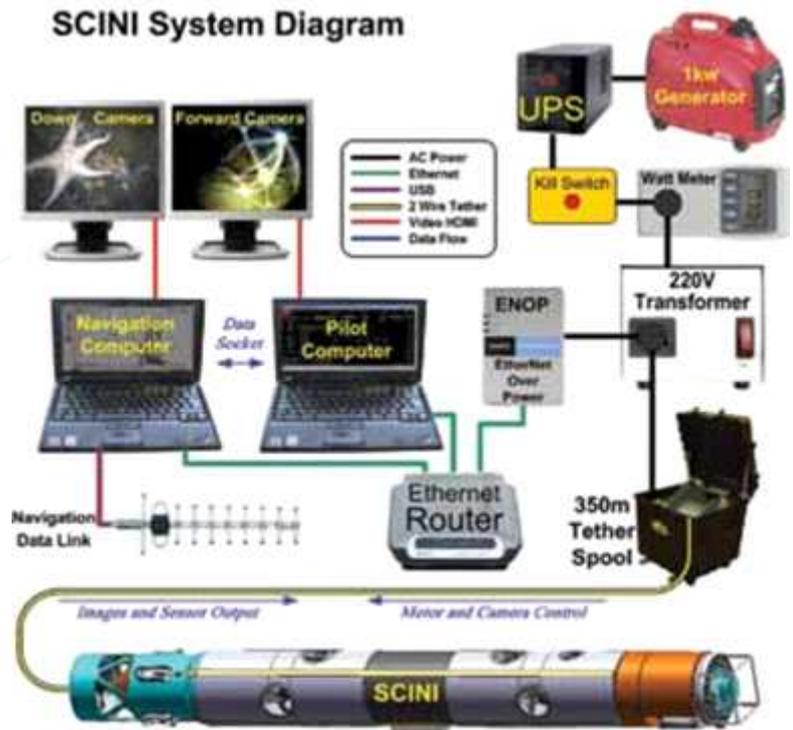


그림 2-22 SCINI 시스템 연결도

시스템 구성으로 ROV형태이기 때문에 Tether에 연결되어 자체 추력장치를 이용하여 이동하면서 관측을 수행할 수 있도록 되어있다. 시추공하부까지 내려가서 SCINI가 자유롭게 탐사를 수행할 수 있도록 무게 추에 350m Tether가 연결되어 있다.

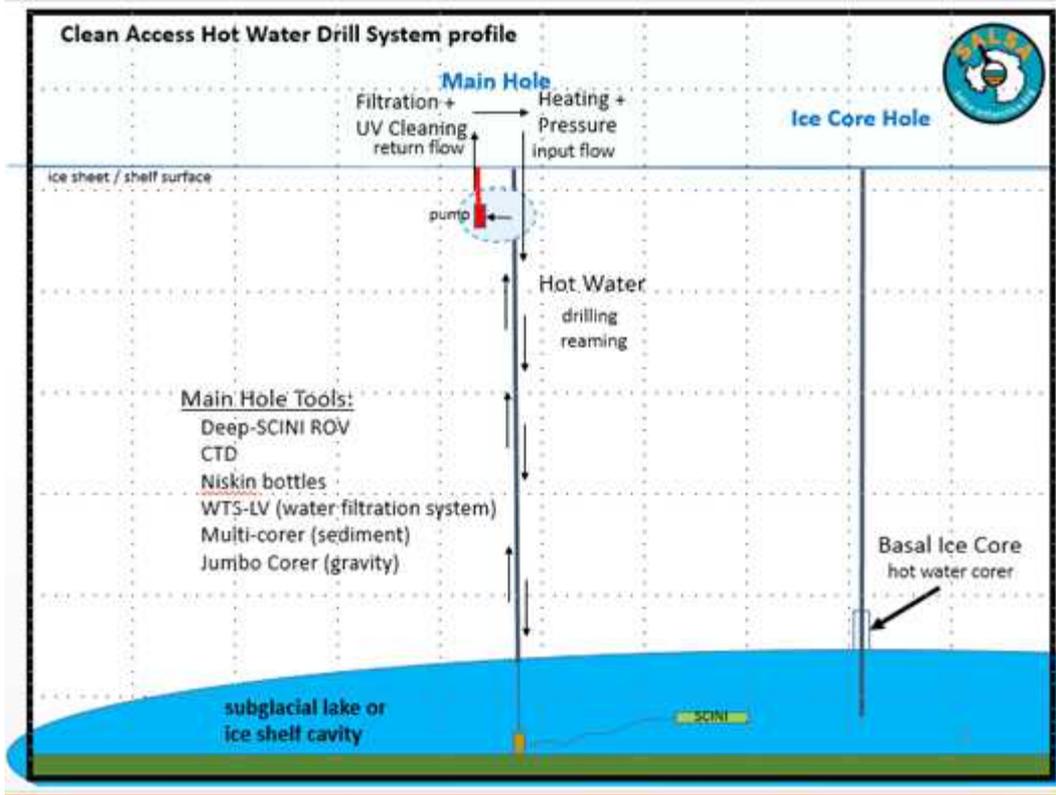


그림 2-23 SCINI 탐사 개념도



그림 2-24 SCINI 진수 준비

다.ESL Probe

ESL(Ellsworth Subglacial Lake) Probe는 Subglacial Lake Ellsworth Consortium에서 제작한 Probe로 자체 주행은 불가능하다. 2012년 Ellsworth호수 조사때 사용을 위해 개발하였으나 열수시추가 실패함으로써 사용되지는 못하였다.

크기에 비해 다양한 센서와 시료채취 장치를 갖추고 있다. CTD를 비롯하여 pH센서, Sonar, 영상촬영용 카메라, 소형 코어러, 빙저호 물 채취를 위한 워터샘플러 등이 있어 추후 탐사에 사용하게 되면 한 번에 다양한 자료들을 취득할 수 있어 유용한 역할을 할 수 있을 것으로 기대된다.

| | |
|------------------|---------------------|
| Manufacturer | SLE Consortium |
| Dimension(m) | 0.2 x 3.5 |
| Depth(m) | 4,000 |
| CTD | Yes |
| Selected Imaging | Optical, Sonar, DVL |

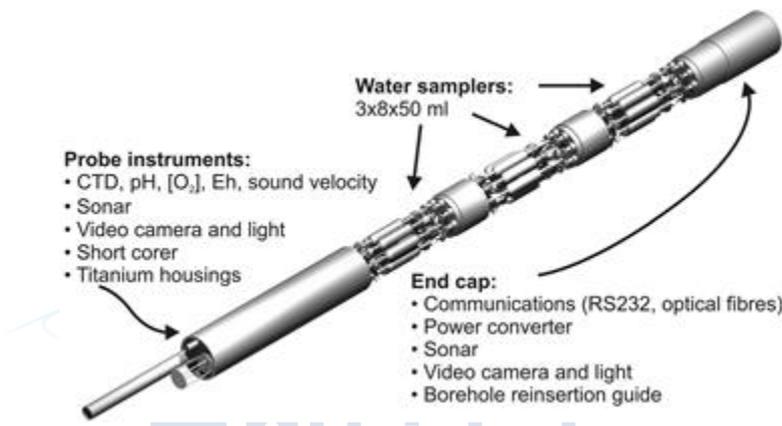


그림 2-25 ESL Probe 구성

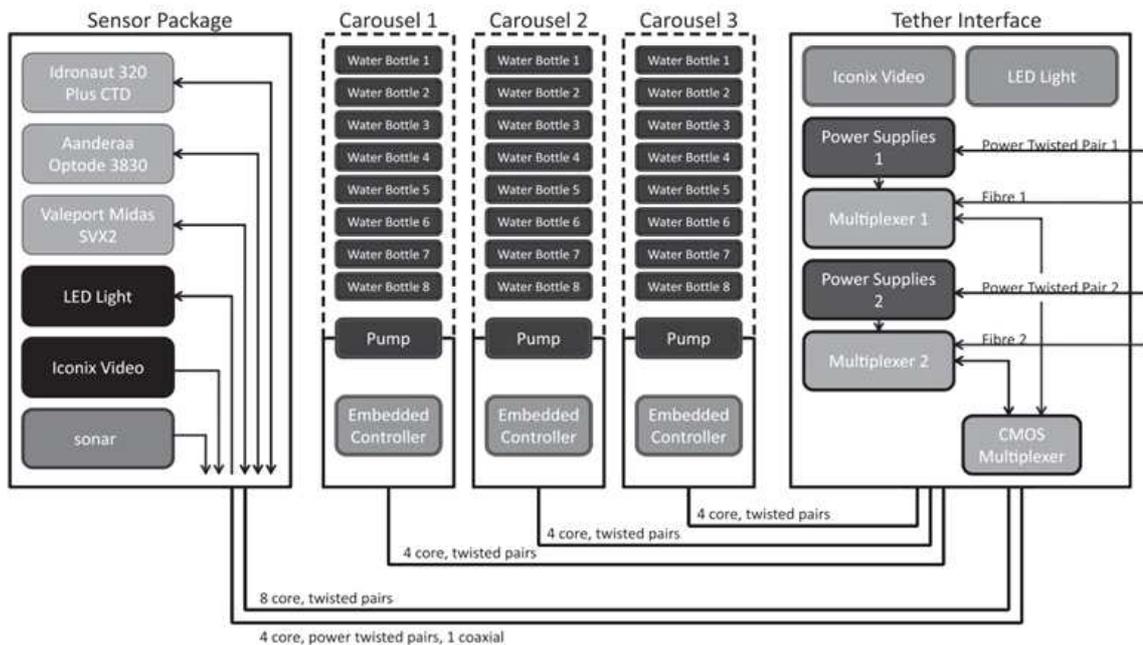


그림 2-26 ESL Probe 기능별 세부 연결도

위의 그림 2-26은 기능별 시스템 구성도로 크게 센서부와 해수채수부, Ground Station과 통신을 위한 Tether Interface로 구성된다. 각 기능별 통신을 위해 동축 케이블과 네트워크 케이블 등이 사용되었다.

라.MSLED

MSLED(Micro Subglacial Lake Exploration Device)는 1,000m급으로 가장 소형으로 만들어진 로봇으로 2011-2013시즌 중 WISSARD프로젝트에 배치되어 탐사를 수행하였다. MSLED는 물리화학 조사를 위해 온도, 압력, 염분 등을 측정하였고 카메라를 통해 부유물과 수생생물과 퇴적층표면에 대한 영상자료를 취득하였다. 시스템은 크게 Ground Station과 Mothership, 그리고 MSLED로 구성된다. Ground Station은 최종적인 데이터를 처리하고 운영을 담당하는 역할을 하며 Mothership은 optical link를 통해 MSLED와 통신을 하게 된다. Mothership은 강철케이블과 다중섬유 케이블로 로프로 연결되며 시추공 영상 조사 및 수심감지 등을 수행한다.[13]

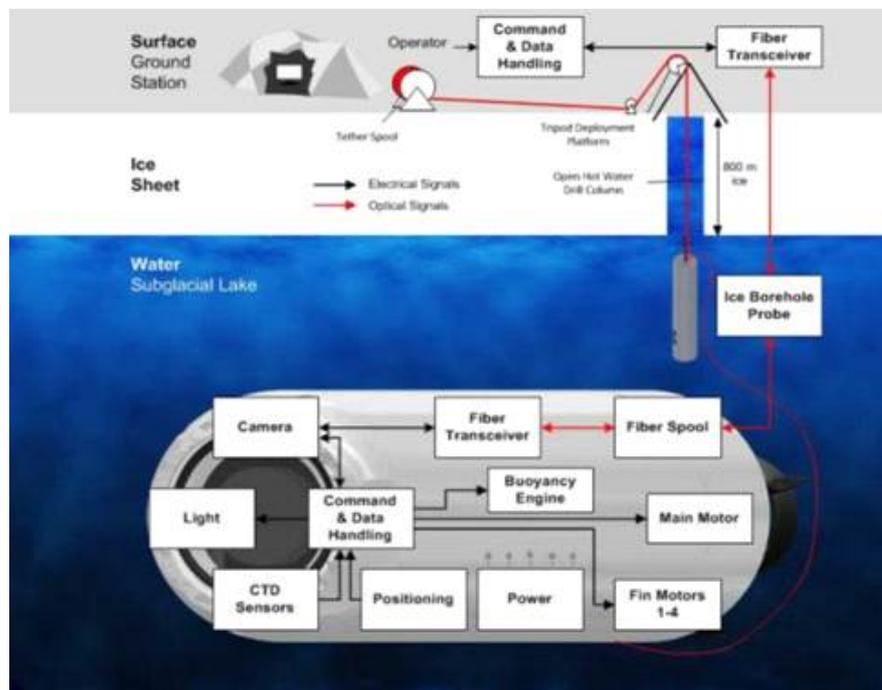


그림 2-27 MSLED 시스템 구성도

| | |
|---------------|-----------------------------|
| Camera | 1,280 x 1,024 resolution |
| Dimension | 0.14 x 0.7 |
| Depth(m) | 1,200 |
| Sensor | CTD |
| Communication | Fiber-optic link to surface |

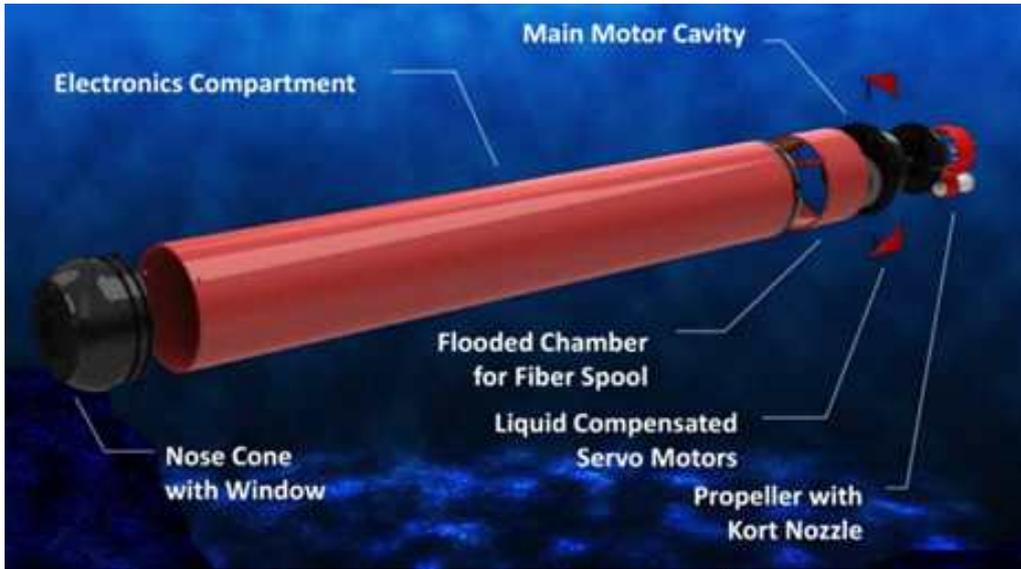


그림 2-28 MSLED 외형 구조

그림 2-28은 MSLED의 외부구조이며 뒤쪽에 Kort노즐을 포함한 프로펠러가 있어 자체 이동이 가능하다.

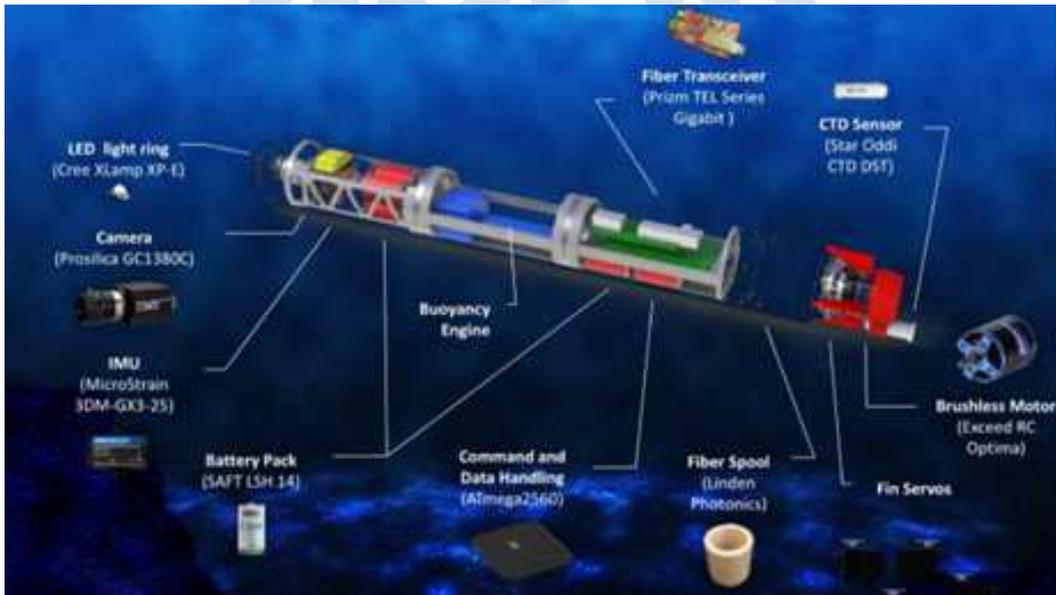


그림 2-29 MSLED 내부 구성도

그림 2-29는 MSLED의 내부시스템구성으로 끝부분에는 링타입의 LED를 장착하여 어두운 빙저호 내부에서 탐사가 가능하도록 하였으며 내부 카메라를 통해 영상자료 확보가 가능한 구조이다. 배터리는 SAFT사의 LSH14 1차 리튬전지를 사용하고 있다. 혹한에서 장시간 사용을 위해 배터리를 선정한 것으로 판단된다. 후면엔 CTD센서가 설치되어있어 기본적인 빙저호 내부 워터 모니터링이 가능하며 Mother Ship과 Optical Link를 통한 통신을 위해 Fiber Transceiver가 장착되어

있다.



그림 2-30 시추공으로 MSLED 투하

그림 2-30은 시추공에 MSLED를 투하하는 모습으로 Mothership과 통신을 위한 광케이블이 연결된 채로 투하하는 것을 볼 수 있다.

MSLED는 Whillans빙저호 탐사를 위해 60cm시추공을 통해 총5회 탐사를 수행하였으며 2.2m깊이의 호수에 도달하여 호수 퇴적표층 촬영을 하였다.

극지연구소

제3장 결론

극지연구를 위한 무인로봇 ICT 원천기술개발을 위해 탐사지역 환경데이터 획득과 극지 수중로봇 활용 탐사기술 연구를 위해 극지 빙붕·빙저호 탐사역사를 시작으로 극지 빙붕·빙저 탐사 방법과 해외 선진 빙붕·빙저 탐사 기술 연구, 마지막으로 빙붕·빙저호 탐사에 활용된 극지 수중로봇 탐사사례를 연구를 수행하였다. 국내에는 극지연구소가 빙붕·빙저호 탐사를 위한 기술을 영국으로부터 기술을 전수받는 형태를 진행하고 있다. 하지만 COVID-19의 장기화로 이것마저도 쉽지 않아 보인다. 또한 빙붕·빙저호 탐사와 같은 상황은 기존 극지탐사와는 또 다른 특수한 상황이라 성공적인 극지 무인로봇 ICT 원천기술개발을 통해 우리만의 한국형 얼음탐사로봇을 보유하는 것은 극지연구의 선진화에 많은 영향을 줄 수 있을 것으로 기대된다. 이번연구는 지금 개발진행중인 극지 빙하 탐사와 원격 모니터링을 위한 수중로봇 ICT 원천기술개발을 위해 연구 분석한 극지데이터를 개발과정에 반영할 수 있도록 하는데 중점을 두었다. 그동안 극지연구경험을 바탕으로 다양한 서적과 웹서핑과 연구논문 등을 참고하여 최대한 많은 데이터를 근간으로 해서 연구를 진행하였다. 작년부터 전 세계적으로 유행하는 COVID-19로 연구를 수행하는데 있어 어려움도 있었다. 하지만 이로 인해 관련 연구논문 등에 더 깊이 있게 접근할 수 있는 기회가 되었다. 이번에 분석된 기존기술과 탐사사례와 실패사례 등은 지금 진행 중인 개발업무에 연구 자료로 활용되게 될 것이다. 특히 기존 극지 빙붕·빙저호 탐사사례를 로봇종류별로 특징 있는 부분들을 조사한 자료들은 앞으로 나아가야 할 방향을 제시하는데 도움이 될 것이다. 예전대비 에너지보존기술이 발전되고 사용될 부품들의 성능이 좋아지면서 극지와 같은 혹한에서도 안정적이며 장시간 탐사가 가능하게 된다면 우리나라 극지연구가 세계극지 연구를 선도해 나가는데 많은 도움이 될 것이다.

결론적으로 본 연구를 수행함에 따라 극지무인로봇 ICT 원천기술개발에 필요한 사항들이 무엇인지를 제대로 파악하고 이해하였고 이는 앞으로 성공적인 원천기술개발이 가능토록 하는데 활용될 것으로 기대된다.

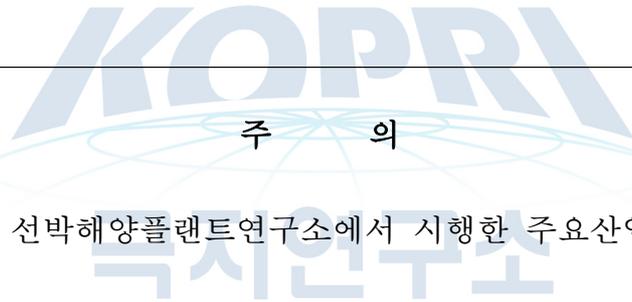
참고문헌

- 1.Olivier Alemany, Pavel Talalay, Boissonneau P, Jérôme Chappellaz, Chemin JF, Romain Duphil, Eric Lefebvre, Luc Piard, Philippe Possenti, Jack Triest (2021) The SUBGLACIOR drilling probe: hydraulic considerations. *Annals of Glaciology*, 62, (84), 131-142. doi: 10.1017/aog.2020.79. <https://doi.org/10.1017/aog.2020.79> 2021
- 2.Paul GD Anker, Keith Makinson, Keith W Nicholls, Andrew M Smith (2021) The BEAMISH hot water drill system and its use on the Rutford Ice Stream, Antarctica. *Annals of Glaciology*, 62, (85-86), 233-249. doi: 10.1017/aog.2020.86. <https://doi.org/10.1017/aog.2020.86> 2021
- 3.John W Goodge, Jeffrey P Severinghaus, Jay A Johnson, Delia Tosi, Ryan Bay (2021) Deep ice drilling, bedrock coring and dust logging with the Rapid Access Ice Drill (RAID) at Minna Bluff, Antarctica. *Annals of Glaciology*, 62, (85-86), 324-339. doi: 10.1017/aog.2021.13. <https://doi.org/10.1017/aog.2021.13> 2021
- 4.Dirk Heinen, Peter Linder, Simon Zierke, Christopher Wiebusch (2021) An efficient melting probe for glacial research. *Annals of Glaciology*, 62, (84), 171-174. doi: 10.1017/aog.2020.28. <https://doi.org/10.1017/aog.2020.28> 2021
- 5.Benjamin H Hills, Dale Winebrenner, Tim Elam, Paul Kintner (2021) Avoiding slush for hot-point drilling of glacier boreholes. *Annals of Glaciology*, 62, (84), 166-170. doi: 10.1017/aog.2020.70. <https://doi.org/10.1017/aog.2020.70> 2021
- 6.Yazhou Li, Pavel Talalay, Xiaopeng Fan, Bing Li, Jialin Hong (2021) Modeling of hot-point drilling in ice. *Annals of Glaciology*, 62, (85-86), 360-373. doi: 10.1017/aog.2021.16. <https://doi.org/10.1017/aog.2021.16> 2021
- 7.Keith Makinson, Daniel Ashurst, Paul GD Anker, James A Smith, Dominic A Hodgson, Peter ED Davis, Andrew M Smith (2021) A new percussion hammer mechanism for a borehole deployable subglacial sediment corer. *Annals of Glaciology*, 62, (85-86), 385-389. doi: 10.1017/aog.2020.83. <https://doi.org/10.1017/aog.2020.83> 2021
- 8.Keith Makinson, Paul GD Anker, Jonathan Garcés, David J Goodger, Scott Polfrey, Julius Rix, Alejandro Silva, Andrew M Smith, José A Uribe, Rodrigo Zamora (2021) Development of a clean hot water drill to access Subglacial Lake CECs, West Antarctica. *Annals of Glaciology*, 62, (85-86), 250-262. doi: 10.1017/aog.2020.88. <https://doi.org/10.1017/aog.2020.88> 2021
- 9.John C Priscu, Jonas Kalin, John Winans, Timothy Campbell, Matthew R Siegfried, Mark L Skidmore, John E Dore, Amy Leventer, David Harwood, Dennis V Duling, Robert Zook, Justin Burnett, Dar E Gibson, Edward Krula, Anatoly Mironov, Jim McManis, Graham Roberts, Brad E Rosenheim, Brent C Christner, Kathy Kasic, Helen A Fricker, Berry Lyons, Joel Barker, Mark Bowling, Billy Collins, Christina Davis, Al Gagnon, Christopher Gardner, Chloe Gustafson, Ok-Sun Kim, Wei Li, Alexander B Michaud, Molly O Patterson, Martyn Tranter, Ryan Venturelli, Trista J Vick-Majors, Cooper Elsworth, The SALSA Science Team (2021) Scientific access into Mercer Subglacial Lake: scientific objectives, drilling operations and initial observations. *Annals of Glaciology*, 62, (85-86), 340-352. doi: 10.1017/aog.2021.10. <https://doi.org/10.1017/aog.2021.10> 2021
- 10.F.Gillet(1975) INSTRUMENTS AND METHODS STEAM, HOT-WATER AND ELECTRICAL THERMAL DRILLS FOR TEMPERATE GLACIERS, *Journal of Glaciology*, Vol.14, No.70

- 11.Martin J.Siegert(2017) A 60-year international history of Antarctic subglacial lake exploration, Geological Society, London, Special Publications, 461, 7-21, 25 May 2017
- 12.Martin J.Siegert(2005) Lakes Beneath the ice sheet:The occurrence, analysis, and future exploration of Lake Vostok and Other Antarctic Subglacial Lakes, Annual Review of Earth and Planetary Sciences 33(1):215-45
- 13.Alberto E Behar, Eaming D Chen, Colin Ho, Emily McBryan, Christian Walter, Joseph Horen, Scott Foster, Tyler Foster, Andrew Warren, Sai H Vemprala, MSLED: The Micro Subglacial Lake Exploration Device, Underwater Technology Vol.33, No.1. pp.3-17
- 14.Frank R. Rack(2016) Enabling clean access into Subglacial Lake Whillans: development and use of the WISSARD hot water drill system, The Royal Society Publishing, Philosophical Transactions of the Royal Society A, Mathematical, Physical and Engineering Sciences







1. 이 보고서는 선박해양플랜트연구소에서 시행한 주요산업의 위탁연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 선박해양플랜트연구소에서 시행한 사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니됩니다.