

극지 수중로봇 활용 대상 탐사지역 환경 데이터 취득 및 분석

A Study on acquisition and analysis of environmental
data in exploration areas for polar underwater robots



연구 기관

극 지 연 구 소

2020. 11. 30.

선 박 해 양 플 란 트 연 구 소

제 출 문

선박해양플랜트연구소장 귀하

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

2020 . 11 . 30.



연구수행기관명 : 극지연구소 기술지원실

연구책임자 : 신 동 섭

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

보고서 초록

과제고유 번호	PG20010	해당단계 연구기간	20.3.1~20.11.30	단계 구분	
연구사업명	중사업명				
	세부사업명	위탁과제			
연구과제명	대과제명	극지 빙하 탐사와 원격 모니터링을 위한 수중로봇 ICT원천기술 개발			
	세부과제명	극지 수중로봇 활용 대상 탐사지역 환경 데이터 취득 및 분석 연구			
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	29
<ul style="list-style-type: none"> - 극지탐사환경을 고려한 극지환경 데이터 취득 및 분석 - 선진연구동향 조사 - 극지 탐사용 수중로봇 원천기술 분석 및 기술 적정성 검토 - 극지 탐사 항법기술 분석 - 극지무인로봇 ICT원천기술개발을 위해 극지 탐사 사례조사 및 시행착오경험을 분석하며 분석된 결과는 원천기술개발에 활용가능 					
색인어 (각 5개 이상)	한 글	극지 수중 무인로봇, 환경데이터, 수중음향			
	영 어	Polar underwater unmanned vehicle, Environment Data, Underwater acoustic			

요 약 문

I. 제 목

극지 수중로봇 활용 대상 탐사지역 환경 데이터 취득 및 분석 연구

II. 연구의 목적 및 필요성

극지 무인수중로봇 ICT원천기술개발을 위해 극지 수중로봇 활용예정 탐사지역에 대한 환경 분석과 극지 무인수중로봇설계에 있어 기존 로봇기술과 필요한 기술에 대한 분석연구가 필요하다. 활용될 지역에 대한 환경데이터 획득 및 분석자료는 극지 탐사용 무인수중로봇 설계에 반영하고 기존 기술분석 및 필요 주요기능에 대한 연구는 ICT원천기술 확보를 위한 무인로봇 개발 설계에 필요하다.

III. 연구내용 및 범위

- 극지 탐사환경을 고려한 극지환경 데이터 취득 및 분석
- 극지 탐사용 수중로봇 원천기술 분석 및 기술 적정성 검토

IV. 연구결과

- 극지 탐사 활용지역에 대한 환경 분석
- 극지 사용 수중로봇 기술 분석 및 기술 활용 수중로봇 탐사사례 분석

S U M M A R Y

I. Title

A study on acquisition and analysis of environmental data in exploration areas for polar underwater robots

II. Object and necessity

The objective of this study is to be necessary to analyze 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 existing technical analysis and research on the necessary main functions 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
- Analysis of original technology of underwater robot for polar exploration and review of technology adequacy

IV. Result

- Environmental analysis for polar exploration areas
- Analysis of underwater robot technology using polar regions and analysis of underwater robot exploration cases using technology

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 극지용 수중로봇 기술분석 및 적정성 연구.....	12
2.1. 극지탐사용 수중로봇 기술	12
2.2. 빙붕/해빙하부 탐사 사례.....	16
2.3. 무인수중로봇 최신동향	25
제3장 결론	27

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	Polar underwater robot technology analysis and adequacy research.....	12
Chapter 3	Conclusion	27



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 기존 수중로봇기술분석과 기술 적정성 연구가 핵심이다. 본 연구를 위해 크게 두 가지로 연구목표를 설정하였다. 크게 극지 무인 수중로봇 탐사지역 환경데이터 획득과 극지탐사에 사용되어온 로봇기술분석과 최신기술 연구로 나눌 수 있다. 각 연구목표별 세부사항은 아래와 같다.

- 극지탐사환경을 고려한 극지환경 데이터 취득 및 분석
- 극지 탐사용 수중로봇 원천기술 분석 및 기술 적정성 검토

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 원천기술 분석 및 기술 적정성 검토 :
 - 극지탐사에 취적화된 원천기술 연구
 - 최상의 탐사결과도출을 위한 선진 탐사기술 사례 분석
 - 최적의 운용을 위한 로봇기구기준 도출

제2장 본론

제1절 극지 수중로봇 탐사지역 환경데이터 획득 및 분석

1.1 극지탐사를 통한 탐사지역 해양환경 데이터 획득

극지방은 최근 이슈가 되고 있는 지구온난화를 연구할 수 있는 가장 최적의 장소로 지구온난화를 리딩하는 지역이다. 극지환경연구는 지구온난화 원인을 밝히는데 중요한 역할을 할 것이다. 거대 빙붕이 붕괴되고 남극과 북극의 얼음이 다 녹으면 해수면 상승으로 어떤 나라들은 지도에서 사라질 수도 있다는 얘기와 더불어 최근 몇 년 동안 예전대비 많은 얼음분포변화가 있음을 전문가들은 말하고 있다.

극지바다위에 떠있는 얼음들은 극지해양환경연구를 함에 있어 많은 어려움을 주고 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 빙붕하부 탐사에 어려움이 있다. AUV와 같은 케이블없이 탐사가 가능한 수중로봇은 배터리로 운영되는 관계로 탐사반경에 한계를 느낄 수밖에 없다. 이로 인해 최신기술을 활용한 극지환경에 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 올해 8~9월동안 베링해를 지나 척치 해까지 북극 해양탐사를 수행하였다. 수중로봇이 수면 위에 있는 경우는 대기환경에 영향을 받으므로 탐사기간 동안 자동기상관측장치(AWS)를 통한 통합대기관측데이터를 획득하고 극지해양환경데이터(수온, 염분, 전도도등)관측은 CTD장비를 사용하여 총 89개 지점에서 해양관측을 실시하였다. 이번에 획득된 관측데이터는 극지수중로봇설계에 반영이 될 예정이다.

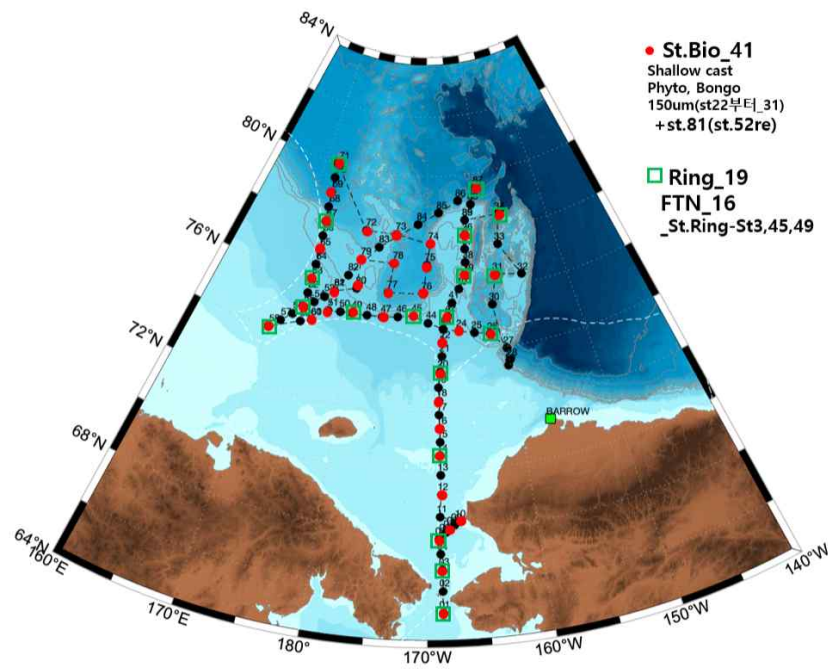


그림 1 북극해 탐사 경로

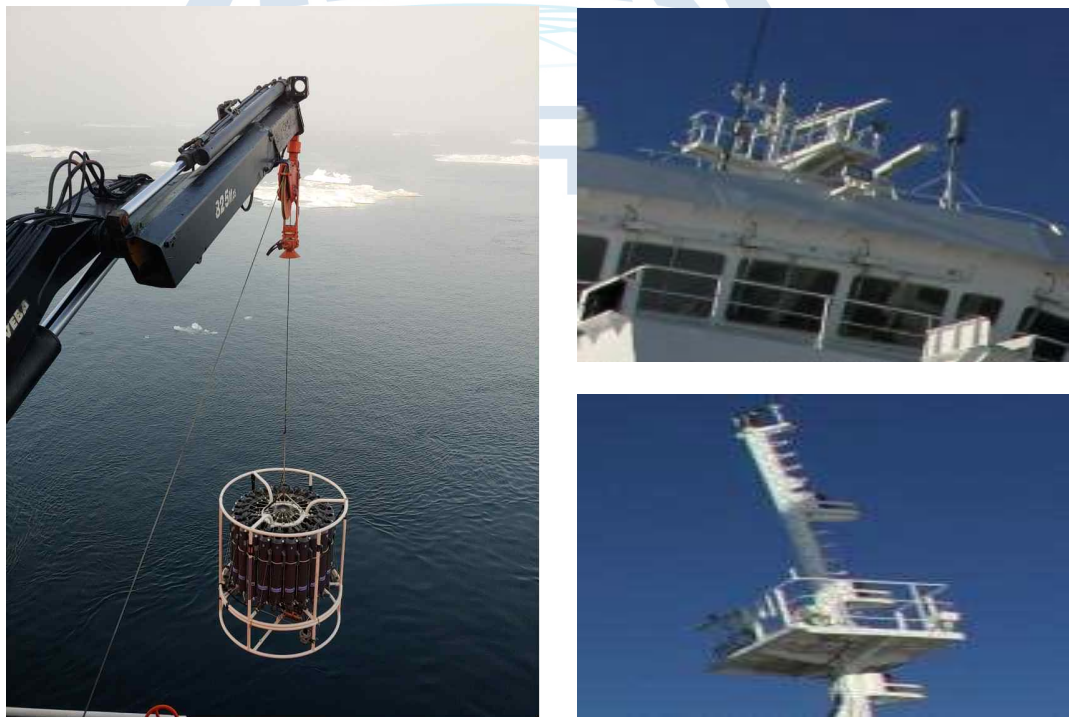


그림 2 북극해 환경데이터 획득에 사용된 장비들
(왼쪽부터 시계방향으로 CTD, Rada Mast에 설치된 기상관측장비, 선수에 설치된 기상관측장비)

1.2 북극지역 수중음향 데이터 획득

연구기간중 2개월에 걸쳐 아라온호를 활용한 북극 연구탐사가 수행되었다. 올해는 코로나바이러스 확산에 따라 북극연구를 최소화하여 실시함에 따라 예전 대비 해양탐사에 더 집중하여 연구를 수행할 수 있었다. 특히 올해는 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 센서손상방지를 위한 최소거리를 두고 송신기와 수신기를 각각 선수와 선미쪽에 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. 센서하부에 무게추를 달아 해류에 송신기와 수신기가 최대한 움직이지 않고 체위치에 있는 상태에서 측정할 수 있도록 하였다.

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

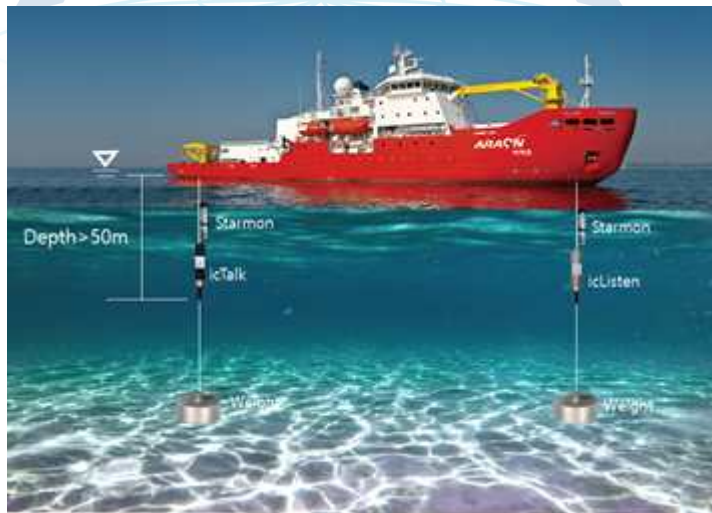


그림 3 아라온호를 활용한 수중음향 실험구성

그림 4는 이번에 탐사한 총89개 연구정점중 선정된 4곳의 위치를 보여주고 있으며 표1은 실제 관측한 GPS좌표정보이다. 보다 많은 지점에서 관측을 한다면 보다 신뢰도가 높은 데이터를 얻을 수 있었겠지만 아쉽게도 연구를 위한 시간이 부족하였던 점은 아쉬운 점이다.

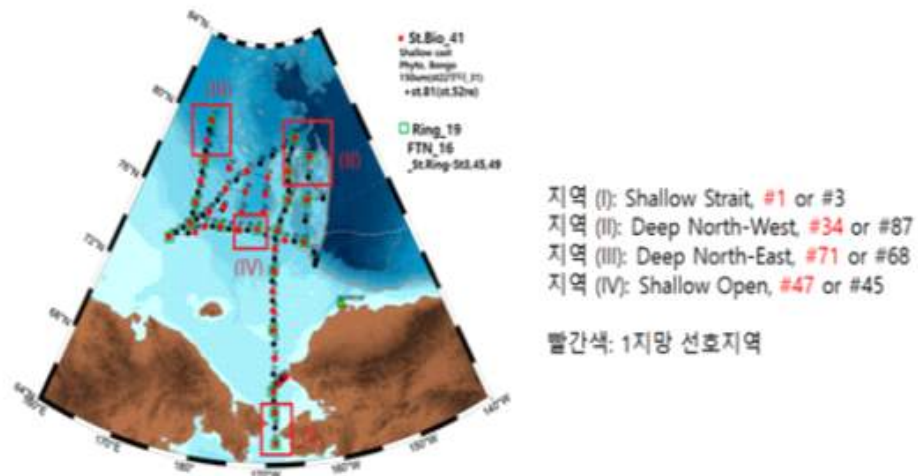


그림 4 수중음향 데이터 획득 지점

Station	Date	Time(utc)	Location	
			Latitude	Longitude
37	2020.08.12	18:00 - 18:50	79°0.1220'N	172°38.8048'E
51	2020.08.16	01:22 - 02:25	74°39.7474'N	172°22.2975'E
63	2020.08.18	16:00 - 16:50	74°59.3818'N	169°35.7019'W
78	2020.08.22	15:10 - 16:00	78°28.8582'N	158°4.3419'W

표 1 데이터 획득 시간 및 GPS좌표

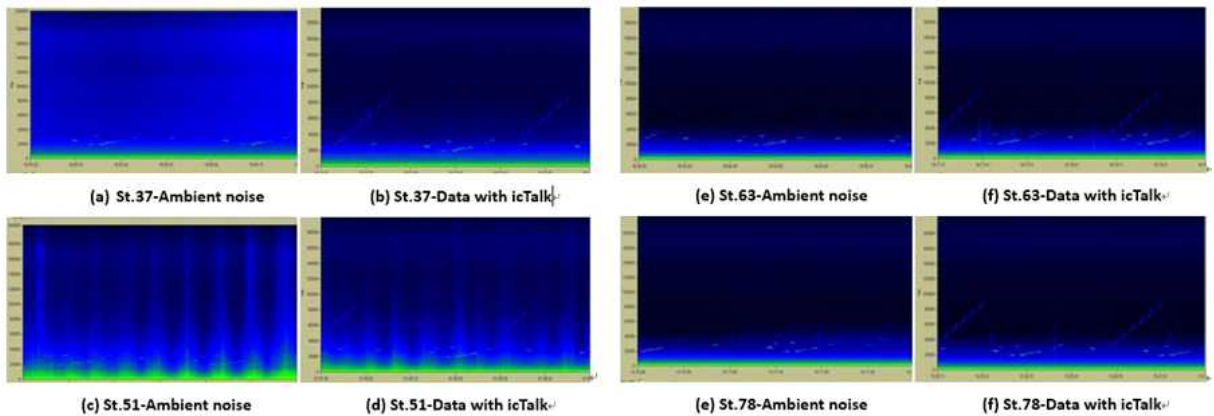


그림 5 총4곳의 실험결과

이번에 측정된 지역이 적치해이지만 보퍼트해에서만 볼 수 있는 음향신호가 장거리전송이 가능한 지역에서 다시 한번 측정된 것과 자료를 비교해 보는 것도 음향특성과 음향통신모듈 설계시 도움이 되지 않을까 생각된다.

북극해에서 장거리 수중통신[2]

남극과 북극을 통틀어 특정지역에선 다른 지역과 달리 근400km까지 수중통신이 가능한 지역이 관측되었다. 미국의 대표적인 해양연구소인 우즈홀 해양연구소(Woods Hole Oceanography Institution)에서는 ITP(Ice-Tethered Profiler)를 활용하여 얼음하부 수중통신실험을 함에 있어 장거리통신이 가능한 지역을 발견하였다. 그림 6과 같이 얼음위에 구멍을 내어 설치하는 ITP는 상부에 GPS안테나와 IRIDIUM안테나가 설치되어 있어 얼음하부와 같이 GPS가 수신이 안되는 지역에도 자기위치를 추적할 수 있도록 ITP가 있는 지역의 GPS값과 필요한 데이터를 송수신이 가능하다. 북극의 보퍼트해에서만 볼 수 있는 특이한 지역으로 이는 지구온난화로 인해 상층엔 베링해로부터 따뜻한 바닷물이 들어오고 하부엔 따뜻한 대서양물이 들어옴에 따라 형성된 지역으로 대략 수심50m에서 200m사이구간을 말한다. 아래 그림 7에서 보는바와 같이 기존 깊이별 수온분포와는 상당히 다른 분포를 보여줌을 볼 수 있다. 앞서 언급한 바와 같이 음향신호전파속도인 음속은 수온에 따라 달라지므로 그림 8과 같이 이 지역의 깊이별 음속변화그래프상의 sound duct효과를 보이는 지역이 난류와 한류로 인해 생기는 급격한 온도변화 구간과 일치함을 볼 수 있다. 이 지역에서 수중로봇을 이용한 탐사를 수행시 sound source와 sound receiver가 sound duct내 있다면 그림 9와 같이 전송손실결과표를 보면 거의 400km까지 전송이 되기 때문에 얼음으로 덮혀있는 지역의 얼음하부 바다에서도 장거리 송수신이 가능함으로 이는 탐사로봇 설계 및 운용시 고려가 된다면 보다 효율적인 탐사가 가능할 것이다.

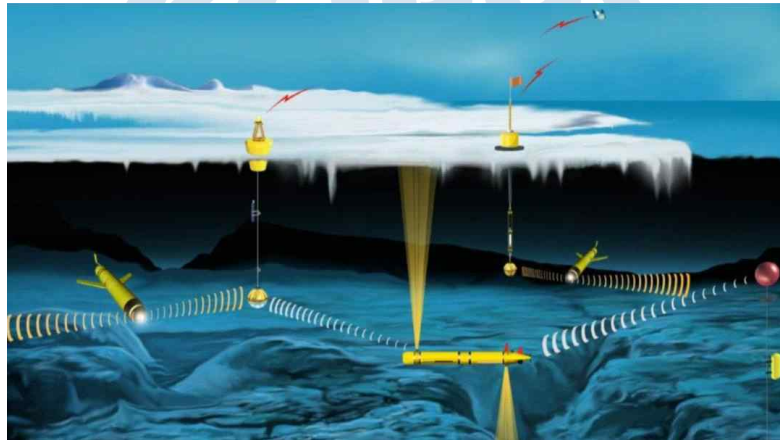


그림 6 북극 해빙하부 수중음향통신 실험

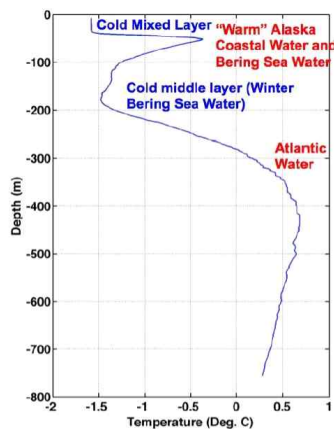


그림 7 수심별 수온분포

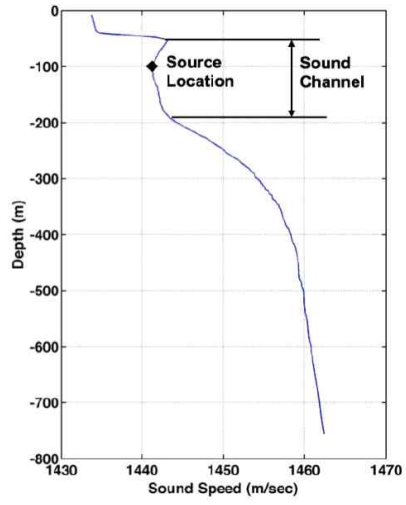


그림 8 수심별 음파속도

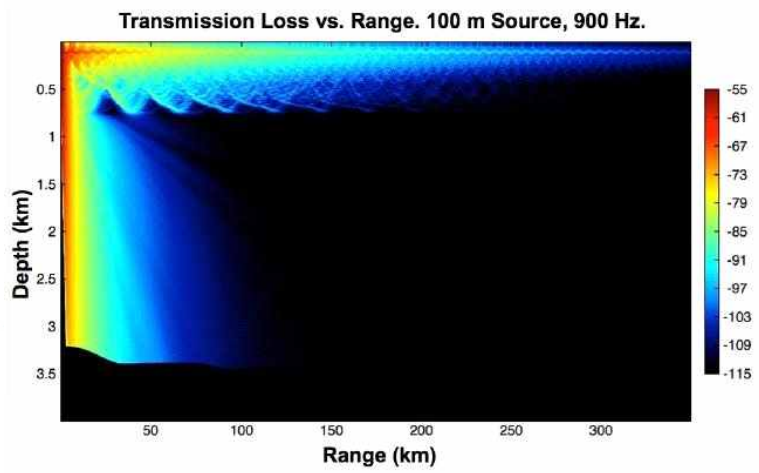


그림 9 깊이별 전송 손실

제2절 극지용 수중로봇 기술분석 및 적정성 연구

2.1 극지탐사용 수중로봇 기술

최초로 극지방에서 얼음하부 탐사를 시도한 대표적인 극지 탐험가인 Fridtjof Nansen은 1893년 나무로 만든 목선을 타고 북극탐사를 수행하였다. 지금까지 수많은 연구진들이 북극과 남극을 탐사하며 연구를 하고 있다. 지구상 전체바다의 12%가 얼음으로 덮힌바다이며 이는 모두 남극과 북극에 분포되어있다.

보통 수중로봇 이라하면 케이블에 연결되어 탐사를 수행하는 ROV(Remotely Operated Vehicle), 케이블이 없이 탐사를 하는 AUV(Autonomous Underwater Vehicle)가 대표적이며 이외에도 수중드론, 수중 글라이더 등 다양한 로봇들이 등장하고 사용되고 있다. 이러한 수중로봇의 기술은 크게 플랫폼, 수중통신, 센서와 같이 3가지로 분류해 볼 수 있으며 이를 극지탐사를 기준으로 수중로봇 기술을 살펴보고자 한다.

가.수중로봇 기술

1)플랫폼(Platform)

플랫폼기술은 과거에 비해 더 견고해지고 목적에 따라 더 소형화 또는 대형화 되고 무게는 더 경량화 되고 속도는 더 빨라지고 있다. 이는 과거에 비해 부품을 비롯한 수중로봇 기술이 발전됨에 따라 보다 다양한 연구를 할 수 있음을 보여주는 것이다. 또한 전력공급장치 면에서는 배터리기술의 발달로 AUV와 같이 케이블 연결 없이 장시간 탐사도 가능한 시대가 열리고 있다. 빙봉하부 탐사를 위해서는 보통 빙봉하부의 수평거리가 1,000km정도까지 되는 곳도 있기 때문에 배터리기술은 이러한 장거리탐사를 하는데 있어 중요한 역할을 하게 될 것이다. 현재로서는 영국해양연구소에서 개발되어 운영중인 Autosub long range 1500이 range가 6,000km정도로 가장 장거리 탐사가 가능한 수중로봇이다[22].



그림 10 Autosub long range 1500[22]

무엇보다 수중항법기술은 얼음으로부터 덮힌 극지와 같은 곳에서는 기존의 항법기술로는 많은 한계에 부딪쳐 실제로 잦은 고장과 유실과 같은 많은 시행착오를 해오고 있다.

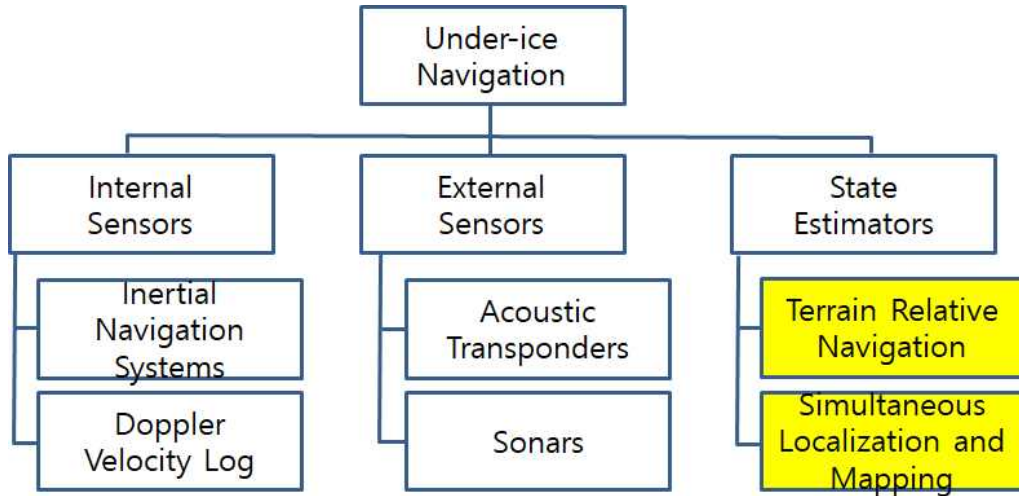
○ 수중항법(Under Ice Navigation)

극지탐사를 위한 수중항법은 말 그대로 도전, 또 도전의 과제이다. 얼음하부 환경은 지형과 달리 아래 그림 10처럼 대부분의 형상이 비슷하여 어디가 어딘지 구분하기가 어렵다.



그림 10 얼음하부[21]

또한 빙붕과 같은 것은 아주 서서히 움직이지만 빙하와 해빙과 같은 얼음들은 지속적으로 회전하고 움직임에 따라 이 또한 항법에 있어 불리한 점으로 들 수 있다. 얼음하부 탐사를 위해서는 쇄빙연구선은 접근에 한계가 있기 때문에 일반 수중항법으로는 극지 얼음지역 탐사는 힘들다. 얼음에 구멍을 뚫어 장비를 넣어 탐사를 하거나 얼음으로 떨어진 곳에 진수하여 얼음 쪽으로 이동하는 형태로 탐사가 진행되며 이와 관련된 장비와 시설들까지 준비하는데 시간과 더 많은 비용이 소요된다. 이러한 점들 때문에 수많은 연구자들은 계속된 시행착오를 통해 장비를 개량하고 새로운 탐사방법 등을 시도해 오고 있다. 수중항법을 좀 더 세분화해보면 아래와 같은 형태로 정리해 볼 수 있다.



수중항법을 위해서는 항법에 필요한 내부, 외부 센서들이 있으며 지형상대항법(Terrain Relative Navigation)과 위치측정 및 동시 지도화 방법(Simultaneous Localization and Mapping)과 같은 상태 추정방법으로 나눌 수 있다. 내부 항법 센서들 중 대표적인 것은 관성항법장치(INS)와 도플러 속도계를 들 수 있으며 외부 항법 센서로는 음향트랜스폰더와 소나를 들 수 있다. 상태 추정방법으로 주로 지형상대항법(TRN)을 많이 사용하며 극지와 같은 곳에서는 지형상대항법(TRN)과 위치측정 및 동시 지도화 방법(SLAM)을 같이 병행해서 사용하는 편이다[21].

2) 수중통신(Underwater Communication)

일반적인 공간에서는 통신을 위해 전자기파를 많이 사용한다. 그만큼 많은 종류의 다양한 통신모듈들도 개발되어있으며 수중보다 상대적으로 수요가 많기 때문에 빠른 속도로 발전되고 있다. 하지만 수중과 같은 물속에서는 전자기파는 얼마 진행되지않아 다 흡수되어버려 장거리 통신이 불가하기 때문에 사용이 불가하다.

수중에선 음향신호를 사용한다. 음향신호는 바깥 공기 중보다 수중에서 전파 속도가 훨씬 빠르며 주파수가 낮을수록 더 멀리까지 전송이 가능하여 수중통신을 위해서는 모든 장비들은 음향신호를 사용하게 된다. 보다 먼 곳에서도 오류 없이 수신을 위해 디지털 음향 전송시스템을 주로 사용한다.

3) 센서(Sensors)

극지탐사 초창기에 사용된 수중로봇에는 기술력의 한계로 다양한 센서들을 장착하지 못하였으나 최근에는 기술이 많이 발전되어 센서 크기가 소형화되고 무게도 경량화 되었으며 소비전력도 줄어들어 장거리탐사를 위해서도 많은 센서들이 사용되고 있다. 이는 곧 한 번의 탐사로 다양한 양질의 데이터 획득이 가능하기 때문에 탐사시기가 제한된 극지에서 보다 다양한 탐사를 가능하게 하였다. 가장 많이 사용되는 센서로는 CTD, Sonar, ADCP, USBL,

DVL등이 있다.

나. 탐사실패 주요원인

앞서 언급한 바와 같이 극지탐사는 여러 가지 탐사시 변수들이 존재하여 지금까지 수많은 탐사시 성공사례도 많지만 이에 못지않게 실패사례도 종종 보고되고 있다. 실패한 경우를 살펴보면 대부분 일반 수중탐사에서는 잘 발생하지 않는 원인이 대부분임을 알 수 있다. 대표적인 실패사례 몇 가지를 살펴보면 water-density gradient가 커서 temperature gradient가 너무 크면 seal이 깨짐에 따라 탐사실패의 원인이 된다. GPS나 이리듬과 같은 위성통신을 위해 해수면으로 올라왔을 때 상대적인 추운 외기온도로 안테나에 살얼음이 생겨 통신이 안 되는 경우이다. 이 경우는 무인로봇뿐만 아니라 극지탐사에 사용되는 모든 장비에 해당된다. 때에 따라 탐사 후 장비청소를 위해 사용했던 물이 내부에 남아있는 경우 탐사시 차가운 온도로 인해 얼어서 문제가 발생하기도 한다. 차가운 온도는 많은 문제를 발생할 수가 있기 때문에 장비 메인바디가 얼거나 낮은 온도에서 배터리를 충전하게 되면 배터리성능이 떨어짐에 따라 탐사에 장애를 일으키기도 한다.

때때로 차가운 온도로 인해 하드웨어에 문제가 발생하여 전원이 들어오지 않거나 네트워크가 동작하지 않아 통신이 되지 않는 경우도 마찬가지로 탐사시 문제가 된다. 2010년도에 REMUS 100모델로 북극 탐사시 telemetry link와 회수시 용이하도록 하기 위해 설치된 tether가 AUV propeller에 의해 절단되어 통신두절로 문제가 된 적도 있다[11].

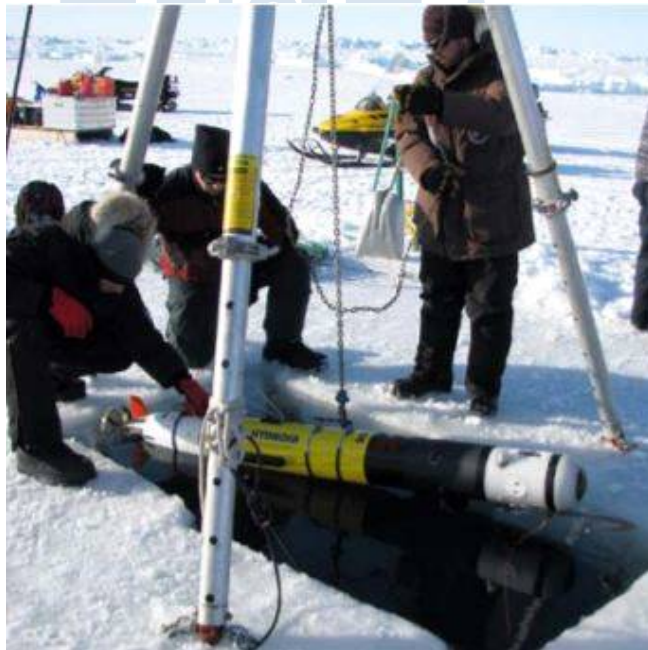


그림 11 REMUS 100[11]

2.2 빙봉/해빙하부 탐사 사례

전 세계적으로 이슈가 되고 있는 지구온난화 원인을 밝힘에 있어 어느 곳보다 빠른 속도로 변화가 관측되는 남극과 북극은 좋은 연구지역이며 특히 육지와 연결된 대형얼음인 빙봉 하부는 탐사가 쉽지 않은 지역이라 지금까지 많은 탐사를 시도하곤 있지만 여전히 도전적인 탐사임에는 틀림없다. 본 연구와 관련하여 극지에서 수행된 수많은 탐사 중 얼음하부탐사가 가장 탐사가 어려운 경우이기 때문에 얼음에 종류에 따라 수중로봇의 종류에 따라 지금까지 있었던 탐사 사례연구를 실시하였다.

극지연구에 사용된 무인수중로봇들은 크게 ROV, AUV로 나눌 수 있지만 tether에 연결된 ROV는 빙봉저 탐사에 한계가 있어 주로 AUV를 많이 활용하고 있다. ROV와 AUV는 각각 탐사특성에 따라 장점과 단점을 가지고 있다. ROV는 선박으로부터 지속적으로 파워공급이 가능하여 장시간 탐사는 가능하지만 연결된 케이블로 인해 빙봉하부와 같은 곳에는 탐사에 제한적이다. 반면 AUV는 연결된 케이블이 없어 빙봉하부 깊숙이까지 탐사는 가능하지만 외부로부터 파워공급을 받을 수 없어 오랜 시간 탐사에 한계점이 있다. 최근엔 이러한 AUV의 단점보완을 위해 Docking System이라는 개념이 나오고 있으나 아직 극지에서 일반적인 탐사에 사용하기엔 무리가 있어 보인다. 이러한 문제점 때문에 최근 몇 년 전 부터는 극지탐사에 있어 더 오랫동안 더 멀리 탐사가 가능한 AUV가 개발되고 있으며 ROV가 가지는 장점과 AUV장점을 결합한 형태인 Hybrid Underwater Robot도 극지탐사에 사용되고 있는 것을 볼 수 있다. 얼음하부인 빙저탐사를 위한 무인수중로봇의 탐사동향을 연구함에 있어 빙봉하부 탐사사례와 해빙하부 탐사사례로 나눠 살펴보고자 한다. 또한 각 탐사사례에 사용된 수중로봇을 Tether연결 타입과 Tether가 없는 타입, 두 가지를 결합한 Hybrid타입으로 연구를 수행했으며 해빙하부연구의 경우엔 수중글라이더도 많이 사용되고 있어 하나의 구분형태로 추가하였다.

가.빙봉하부 탐사사례

빙봉은 남극의 경우 남극해안선의 44%를 차지하기 때문에 남극탐사에서는 중요한 탐사지역이다. 대형 빙봉 중 하나로 알려진 Ross Ice Shelf는 면적이 472,960km²으로 한반도 전체면적의 2배 이상인 크기이다. 빙봉하부의 탐사가 가능 수평거리는 1,000km정도까지 되기 때문에 현재 개발되어있는 AUV로도 탐사에 한계를 많이 느끼고 있다. 하루에 수 미터씩 움직이는 빙봉은 탐사에 있어 또다른 어려움이 되어 지금까지 수많은 탐사를 시도함에 있어 실패하는 경우도 보고되고 있다. 극지탐사를 함에 있어 빙봉하부는 아직까지 많은 탐사가 이뤄지지 않아 알려지지 않은 미지의 세계로 수많은 과학자들이 더 깊이 더 멀리 탐사를 하고 싶은 지역중 하나이다. 탐사사례를 연구함에 있어 3가지 무인로봇형태로 구분을 하였으나 빙봉하부의 깊은 곳은 Tether타입의 ROV는 제한

반경 내에서만 탐사가 가능하여 주로 탐사반경이 큰 AUV를 탐사시 많이 사용하고 있다.

○ Untethered Vehicles

1972년 최초로 북극의 Fletcher's Ice Island에서 UARS AUV[7]로 탐사를 시작한 이후 올해 2020년까지 꾸준한 탐사들이 이뤄져왔다. 이중 특별한 사건이 하나있었는데 2004년도엔 성공적으로 임무를 완수했던 영국해양연구소에서 개발한 AutoSub2[9]모델이 2005년 미션팬 얼음하부에 갇혀버리는 사건이 있었다. 이때 문제점을 개선하고 시스템을 업그레이드하여 곧이어 AutoSub3가 개발되어 2009년부터 더 많은 탐사를 수행하고 있다[10].



그림 12 AutoSub3

AUV에는 수많은 센서들이 장착되어있는 엄청 고가장비중 하나라 AUV가 유실되면 연구에 많은 차질이 발생할 수 있기 때문에 탐사성공을 위해선 다경험의 수중로봇설계기술과 탐사노하우가 필요하다. 우리나라 경우 아직까진 국내에서 제작된 AUV로 극지를 탐사한 사례는 없으며 해외 AUV보유기관과 공동연구형태로 수차례 남극과 북극에서 탐사를 수행해오고 있다. 공동연구를 수행한 사례로는 호주 타즈메니아대학의 nupiri muka[12]를 활용하여 남극 빙봉탐사를 수행하였으며 2022년 상반기때 다시 남극 빙봉탐사를 계획하고 있다. MBARI와 스웨덴 예테보리대학의 AUV를 활용해 남극과 북극탐사를 일부 진행했었고 추후 계획을 추진하고 있다.



그림 13 Nupiri muka

탐사 시기	로봇종류	특징
1972	UARS	450m depth, 50kHz LBL, acoustic positioning and communication system
1982	ARCS	DVL, Gyrocompass, LBL, Obstacle avoidance sonars
1989	ACTV	3axis(non-gimbaled) magnetometer, depth, pitch/roll sensor, CTD
2004/ 2005	AutoSub2	Fiber-optic Gyroscope(FoG), upward-downward DVL Greenland landfast sea ice 450km mission success Trapped under ICE(2005)
2009/ 2014	AutoSub3	increased attention to robustness and redundancy of critical system 6 times(2009), 4 times(2014) in the Antarctica, 511km survey
2008	ENDURANCE	Lake Bonney, Taylor Valley, Antarctica DVL-aided Inertial Navigation System(INS), USBL system, Custom magnetic beacon system
2010	REMUS 100 AUV	Around Barrow, Alaska Arctic Deployments(4 times) LBL USBL, OWTT acoustic systems
2010/ 2011	ISE Explorer AUV	Canada's High Arctic
2013/ 2017	German Research Center for Artificial Intelligence	LBL, USBL, OWTT navigation, upward-downward looking DVL, FoG Maybe only test
2014	Teledyne Gavia-Class AUV	around McMurdo, Antarctica
2018	AutoSub Long Range AUV Boaty McBoatface	Filchner and Ronne Ice Shelves, Antarctica Magnetic compass, upward-downward looking DVL

2018/ 2020	nupiri muka	Sørstøl Glacier Antarctica Thwaites Glacier Antarctica(6 times launch and recovery)
2019	Hugin AUV	Floating tongue of Thwaites Glacier Antarctica
2020	Tethys-class AUV by MBARI and WHOI	lake ice in northern Maine, US

○ Tethered Vehicles

Tether가 연결된 타입은 탐사반경은 AUV에 비해 상대적으로 작지만 유실위험이 적고 때에 따라 실시간으로 데이터를 확인할 수 있기 때문에 경우에 따라서는 더 유용한 경우가 많은 편이다. 1992년 Theseus AUV는 AUV이지만 당시엔 AUV유실우려로 인해 tether를 연결해서 탐사를 하였으며 최근에는 AUV 탐사를 위해서 tether를 연결하여 사용하지는 않는 편이다. tether타입 중 눈여겨볼만한 탐사사례로는 2013년 2015년 2018년 2019년에 걸쳐 북극과 남극탐사를 성공적으로 수행했던 BRUIE(Buoyant Rover for Under-Ice Exploration)[13]는 NASA에서 2025년도에 Europa 위성연구를 위해 개발하였으며 빙봉하부 탐사는 발사 전 시험을 위해 4차례에 걸쳐 성공적으로 탐사를 완료한 무인수중로봇이다. 다른 AUV보다 특히 BRUIE가 특별한 점은 기존에 없던 얼음하부에 붙어 자동차처럼 다니며 영상촬영과 센서를 통해 데이터를 획득하는 방식이다. 울퉁불퉁한 얼음에 붙어서 다닐 수 있는 형태는 얼음하부에 살고 있는 생명체를 연구하는데 필수적인 기능이나 BRUIE를 제외하고는 아직 얼음하부에 붙어 이동하면서 연구한 사례가 보고된 바가 없다.

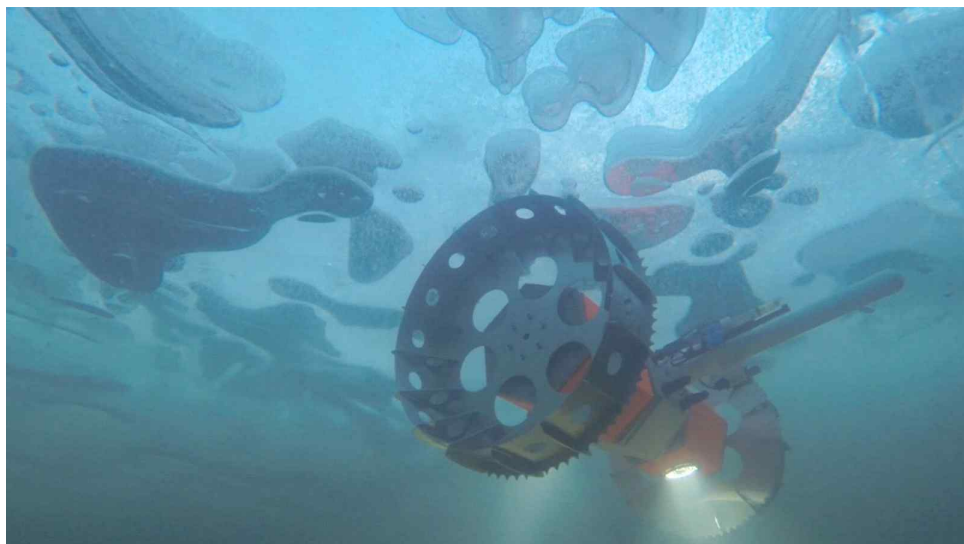


그림 14 BRUIE[13]

탐사 시기	로봇종류	특징
1992	Theseus AUV	laid a fiber-optic cable from Ellsmere Island, Canada
1993/1994	ROBY ROV	inclinometers, magnetic compass, angular and linear accelerometers. Terra Nova Bay, Antarctica
1993	TROV	Modified Phantom S2 ROV, SHARPS Short Baseline(SBL) McMurdo Sound, Antarctica
1997/1998	ROMEO ROV	DVL,Gyroscope,Compass,inclinometers Terra Nova Bay, Antarctica
2008	SIR	deployment beneath Antarctic Ice Sheets
2012~2015	SCINI	LBL,SBL,USBL McMurdo Sound, Antarctica
2012/2013	MSLED	just under 2.0kg, MEMS IMU McMurdo Sound successfully tested. (Target:SLW, Antarctica)
2014/2015	Deep SCINI	Ross Iceshelf, Antarctica
2014 2017~2020	Icefin	only test(2014) redeveloped Icefin vehicle around McMurdo station(2017~2020)
2013/ 2015/ 2018/ 2019	BRUIE	a prototype of future rovers 3 times tested in the Arctic(2013/2015/2018), 1 time tested in the Antarctic(2019) Europa Clipper orbiter will be launched in 2025 to study Europa

○ Hybrid Tethered Vehicles

빙붕 하부를 탐사한 경험이 있는 Hybrid Tethered Vehicle로는 ARTEMIS(Autonomous Rovers/airborne-radar Transects of the Environment beneath the McMurdo IceShelf)가 있다. ARTEMIS[14]는 ROV와 AUV를 결합한 Hybrid타입이라기 보다는 광케이블 tether를 사용하는 타입으로 광케이블로 데이터송수신을 하며 전력공급은 되지 않는다. 특이사항으로는 시추공 같은 얼음구멍을 통해 빙붕 아래로 내려가서 탐사하고 다시 돌아와서 docking system으로 돌아와서 배터리 충전 후 다시 탐사를 갈 수 있는 타입으로 기존보다 좀 더 진보된 형태의 수중로봇이다. 아래그림은 docking system으로 docking하는 과정을 보여주는 그림으로 총5단계로 진행된다. docking을 위해 빛나는 docking bar를 인식(1)하고 근처까지 이동 후 앞부분을 docking bar에 넣고(2) docking bar에 걸리도록 아래로 이동 후(3) 90도로 회전하여 docking bar에 매달리게 된다(4). docking bar를 위로 올림에 따라 얼음표면 위 bot house로 들어오게 된다(5).

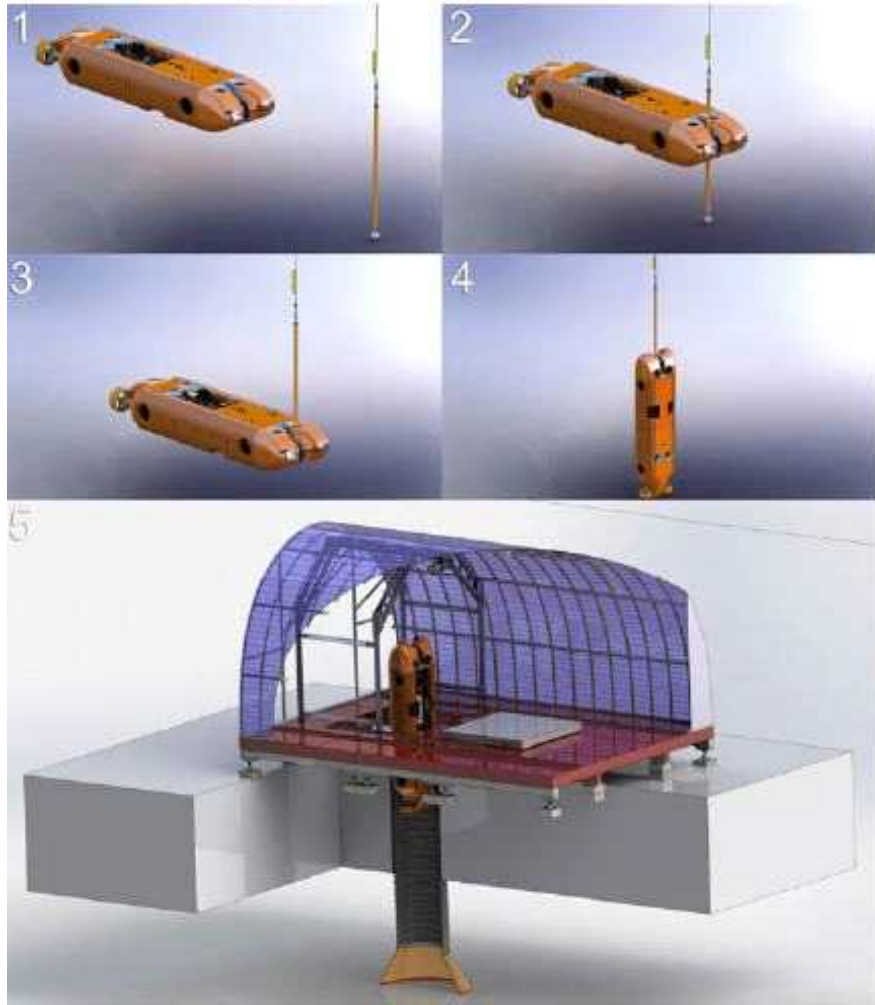


그림 15 ARTEMIS docking system[14]

나. 해빙하부 탐사사례

극지해양탐사지역은 위에서 살펴본 빙봉 뿐만 아니라 바다위에 떠다니는 커다란 해빙들이 많이 있다. 이러한 해빙하부탐사도 빙봉탐사에 이어서 중요한 탐사지역중 하나이다. 특히 해빙의 경우 빙봉과 달리 얼음이 회전도 하고 상대적으로 빠르게 이동하기 때문에 탐사에 있어 더 어려울 수도 있다. 빙봉과 마찬가지로 얼음하부까지는 GPS신호가 전송되지 않는 점도 수중항법에 있어 어려운 점중 하나이다. 상대적으로 많은 나라들이 남극보다 북극이 상대적으로 가깝기도 하고 최근 지구온난화영향으로 북극얼음이 녹으면서 북극항로가 개척되는 등 북극에 대한 관심도가 높아지면서 더 다양한 장비들이 북극에서 시험과 탐사를 하고 있다. 대부분의 거대한 빙봉은 남극에 있으며 북극은 해빙이 많은 편이라 해빙탐사사례의 대부분이 북극에서 이뤄지고 있다.

○ Untethered Vehicles

해빙하부 탐사사례를 살펴보면 1993년 Odyssey II급의 AUV[15]탐사가 북극에서 있었으며 이후로 여러 탐사들을 수행하고 있다. 위에서 언급한 것처럼 대부분의 탐사가 주로 북극에서 이뤄지고 있음을 알 수 있다. 우리나라 경우 MBARI와 공동연구를 통해 2017년에 해빙하부 탐사를 한 적이 있다. 여러 번의 미션중 해저면과 충돌로 인해 AUV가 고장이 나면서 더 이상의 탐사를 수행하지 못하였었다.



그림 16 MBARI AUV

탐사 시기	수중로봇 종류	특징
1993	Odyssey II-class vehicle	magnetometer, six-axis IMU, depth,LBL/USBL, Arctic
1998	AMTV(Autonomous Microconductivity Temperature Vehicle)	based upon the REMUS vehicle by WHOI, Arctic
2001	MBARI ALTEX AUV	Arctic
2001	Autosub2	Antarctic sea ice edge(2005 missing)
2002	Martin 150 AUV	Marginal Ice Zone(MIZ), Arctic
2007	two seabed-class AUVs Jaguar and Puma	Gakkel Ridge, Arctic
2007	Gavia AUV	first digital terrain mapping of the underside of drifting pack ice. Although operating autonomously, the vehicle was tethered to aid recovery.
2008	Kongsberg HUGIN 1000 AUV	DVL,USBL/LBL-aided INS, RF-based under-ice localization and communication system at 60m beneath sea ice
2010	two ISE Explorer AUV	DVL-aided INS, USBL, Canadian Arctic
2010/	WHOI seabed-class	Weddell, Bellingshausen seas, east Antarctic

2012/ 2015/ 2017	AUVs	Ice-relative navigation system, Arctic marginal Ice Zone(2015), Ross Sea ice pack(2017)
2013	PAUL(Polar Autonomous Underwater Laboratory) Bluefin 21 AUV	Fram Strait, Arctic
2017	MBARI's Dorado class AUV	iceberg mapping work was conducted near sermilik Greenland

○ Tethered Vehicles

ROV와 같은 tethered 타입도 이뤄지고 있으나 연결된 tether케이블로 인해 탐사반경이 작아 해빙하부탐사는 쉽지않은 편이다. 해빙하부탐사에 사용된 ROV사례중 해빙에 시추공을 뚫어 구멍으로 ROV를 넣어 탐사하는 경우도 많이 볼수있으며 이경우에 사용되는 ROV는 주로 소형이 많이 사용된다. 2016년에 스웨덴 Ocean Modules에서 제작한 V8 M500 ROV는 북극에서 탐사를 수행하였고 이는 2019년 9월부터 올해 10월까지 있었던 MOSAiC[6] 탐사때도 탐사를 수행하였다.

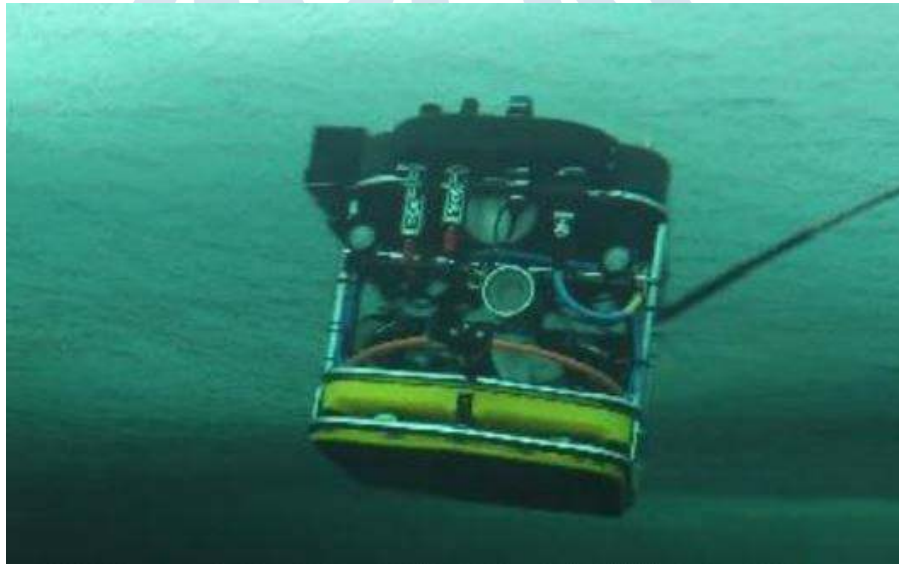


그림 17 V8 M500 ROV

탐사 시기	수중로봇 종류	특징
2002/ 2005	ROV Global Explorer	Arctic Ocean
2005/ 2008/ 2009	Modified Phantom S2 ROV	Antarctic
2011	V8 Sii ROV	Arctic
2016	V8 M500 ROV	Arctic

○ Hybrid tethered Vehicles

하이브리드형 수중로봇으로 불리는 무인로봇이 꽤 있으나 극지탐사에서 많은 경험을 가지고 있는 것은 우즈홀 해양연구소(WHOI)와 존스홉킨스 대학이 공동으로 개발하여 운용중인 NUI(Nereid Under-Ice)[16]가 유일하다. NUI는 Hybrid ROV로 불러 HROV라고도 많은 문헌에서 표현을 하기도 한다. 물론 조사한 바에 의하면 중국의 Polar ARV[17]가 언급은 되어있으나 NUI처럼 ROV와 AUV의 장점을 결합한 타입은 아니다.

NUI는 선박이 접근할 수 있는 범위내에서 최대한 빙붕이나 해빙 가까운 곳까지 이동 후 ROV모드로 진수하여 연결된 광케이블을 통해 20km까지 빙붕이나 해빙하부로 이동이 가능하다. 기존 ROV 경우 연결된 케이블 길이가 20km까지 가능하기 위해서는 케이블을 감고 있을 윈치의 크기가 커지기 때문에 운용자체가 쉽지않다. NUI는 20km길이의 광케이블만 사용하기 때문에 부피와 무게면에서 강점을 가지게 된다. 20km까지 케이블에 연결된 채로 얼음하부 탐사를 마치고 귀환할때는 광케이블없이 AUV모드로 귀환하도록 설계되었다. AUV모드로 진행시 Tow Body에 연결된 Micro-Tether가 분리되어 내장된 배터리를 동력원으로 하여 연구선박으로 복귀하게 된다. NUI는 더 깊이, 더 멀리, 더 오랜시간동안 운용가능하도록 시스템을 개선하고 있다.

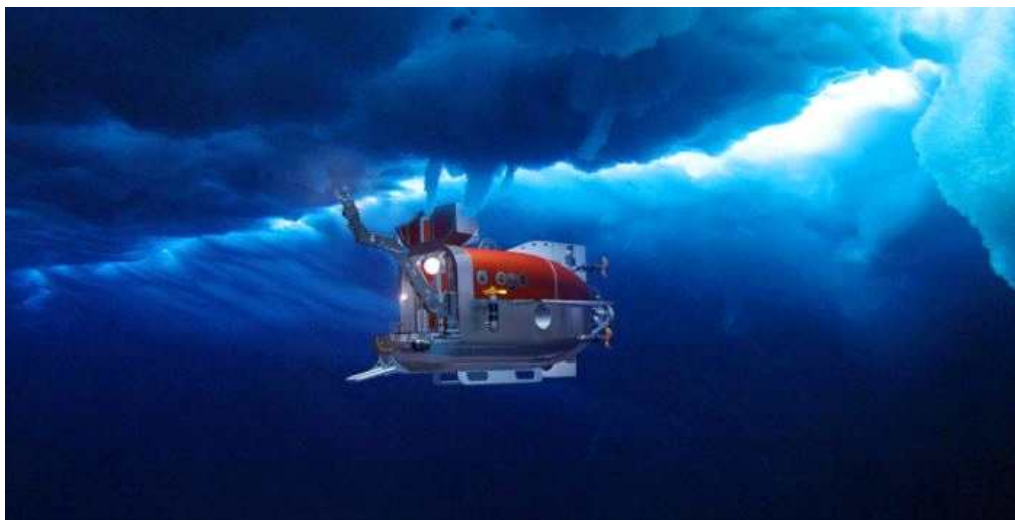


그림 18 NUI HROV[16]

탐사 시기	로봇종류	특징
2014/ 2016	NUI(Nereid Under-Ice)	lightly-tethered hybrid AUV/ROV(HROV) for under fixed or moving ice, Arctic
2014	Polar-ARV	lightly tethered vehicle, 6 th Chinese National Arctic Research Expeditions(CHINARE)

○ Underwater Glider

수중글라이더는 앞서 언급한 ROV와 AUV와는 달리 앞으로 전진을 하기 위해 프로펠러 추진기를 사용하지 않는 독특한 수중로봇중 하나이다. 1960년대 처음으로 사용되었으며 2000년 초반에 제대로 된 수중글라이더가 등장하게 된다. 글라이더는 앞으로 전진을 위해 부력엔진을 사용하며 저속력으로 상승과 하강을 반복하며 움직이는 형태로 에너지소모가 적어 장기간 탐사에 유용하다. 최근엔 프로펠러 추진방식을 결합한 하이브리드형 글라이더들이 개발 중인 곳도 있으나 아직까진 기존방식의 글라이더를 많이 활용하고 있다. 해빙하부탐사에 주로 사용되고 있는 수중글라이더는 2가지 모델로 모두 아라온호를 통해 탐사경험을 해본 수중로봇들이다.

탐사 시기	로봇종류	특징
2010/ 2011	Slocum Glider[18]	Antarctic
2014/ 2016	Seaglider[20]	Davis Strait, Antarctic. SODA experiment, Arctic

2.3 무인수중로봇 최신동향

기존 수중로봇기술과 빙봉과 해빙하부 탐사사례를 살펴보았다. 현재도 많은 연구단체에서 새로운 기술을 적용한 다양한 무인수중로봇들을 개선하고 신규개발하고 있다. 이러한 것이 가능한 이유로는 기술의 향상이 뒷받침되었기 때문이다. 더 멀리까지 갈 수 있는 탐사거리가 길어지고 수중통신기술의 발전과 정확도가 높아진 수중항법, 더 고화질의 영상과 최근엔 인공지능과 빅데이터까지 반영한 장비들이 나오고 있다. AUV의 탐사반경이 길어질 수 있었던 가장 큰 원인은 에너지저장기술의 발전이다. 로봇 설계시 저 전력으로 동작할 수 있도록 설계를 한다고 해도 배터리와 같이 저장된 에너지의 한계가 있을 경우 큰 효과를 기대하긴 힘들다. 최근에 사용되는 관성항법장치의 성능은 과거에 비해 2배 이상 좋아졌다고 하며 광학모뎀의 경우 더 많은 양의 데이터전송이 가능하며 물속으로 150m까지 전송이 가능하다고도 한다.

과도에너지나 수심에 따라 다른 바다의 온도에너지를 이용하는 재생에너지도 개발 중이다.

제작사가 다른 수중로봇끼리 현재로선 통신이 잘 되지 않는다. 이는 통신방식

이 제각각이다보니 수중로봇끼리 의사소통이 되지않기 때문이다. 통신을 위한 약속인 프로토콜이 다름에 따라 NATO Center에선 수중로봇을 위한 통신표준을 만들고 있다. 수중로봇을 위한 오픈소스 기반의 JANUS란 것도 있다.

복합적인 연구를 위해서는 다양한 장비들끼리 하나의 팀으로 연구를 수행할 수 있다면 더 좋은 연구결과를 얻을 수 있을 것이다. 바닷속에선 수중로봇, 해수면에선 다양한 연구선박, 공중에는 드론과 비행체등 이 모든 것들을 통합관리하고 중앙에서 컨트롤타워를 해줄 수 있는 장비가 Aquabotix에서 개발하여 시험 및 일부에선 사용하고 있다. SwarmDiver란 장비로 현재는 주로 군사용으로 사용하고 있지만 추후 과학연구에도 활용된다면 상당한 연구에 진보가 있을 것으로 판단된다.



그림 19 SwarmDiver

수중에선 GPS신호 활용이 힘든 점을 개선하기위해 현재 DARPA와 BAE시스템이 협력하여 “GPS-like” capability를 개발하고 있다. 이것역시 군사목적으로 개발 중이지만 과학연구를 위해 추후 개방된다면 연구에 많은 도움이 될 것이다.

제3장 결론

극지연구를 위한 무인로봇 ICT원천기술개발을 위해 탐사지역 환경데이터 획득과 기존 극지 수중로봇 기술분석, 빙붕과 해빙하부 탐사사례, 마지막으로 최신기술동향 연구를 수행하였다. 국내에는 극지연구를 위한 무인로봇은 전무한 실정이다. 이번연구는 지금 개발진행 중인 극지 빙하 탐사와 원격 모니터링을 위한 수중로봇 ICT 원천기술개발을 위해 연구분석한 극지데이터를 개발과정에 반영할 수 있도록 하는데 중점을 두었다. 그동안 극지연구경험을 바탕으로 다양한 서적과 웹서핑과 연구논문 등을 참고하여 최대한 많은 데이터를 근간으로 해서 연구를 진행하였다. 올 초부터 전 세계적으로 유행하는 코로나바이러스여파로 연구를 수행하는데 있어 어려움도 있었다. 하지만 이로 인해 관련 연구논문 등에 더 깊이있게 접근할 수 있는 기회가 되었다. 이번에 분석된 기존기술과 탐사사례와 실패사례 등은 지금 진행 중인 개발업무에 연구자료로 활용되게 될 것이다. 특히 기존 극지 수중탐사사례를 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 ICT원천기술개발에 필요한 사항들이 무엇인지를 제대로 파악하고 이해하였고 이는 앞으로 성공적인 원천기술개발이 가능토록하는데 활용될 것으로 기대된다.

참고문헌

1. Nicholls, K.W.; Abrahamsen, E.P.; Buck, J.J.H.; Dodd, P.A.; Goldblatt, C.; Griffiths, G.; Heywood, K.J.; Hughes, N.E.; Kaletzký, A.; Lane-Serff, G.F.; et al. Measurements beneath an Antarctic ice shelf using an autonomous underwater vehicle. *Geophys. Res. Lett.* 2006, 33, 2 - 5.
2. Freitag, L.; Ball, K.; Partan, J.; Koski, P.; Singh, S. Long range acoustic communications and navigation in the Arctic. In *Proceedings of the OCEANS 2015 - MTS/IEEE Washington*, Washington, DC, USA, 19 - 22 October 2015; pp. 1 - 5.
3. Ackley, S.F.; Stammerjohn, S.; Maksym, T.; Smith, M.; Cassano, J.; Guest, P.; Tison, J.L.; Delille, B.; Loose, B.; Sedwick, P.; et al. Sea ice production and air-ice-ocean-biogeochemistry interactions in the Ross Sea during the PIPERS 2017 autumn field campaign. *Ann. Glaciol.* 2020, in press
4. Lee, C.M.; Thomson, J. An autonomous approach to observing the seasonal ice zone in the western Arctic Oceanography. *Oceanography* 2016, 30, 56 - 68.
5. Katlein, C.; Schiller, M.; Belter, H.J.; Coppolaro, V.; Wenslandt, D.; Nicolaus, M. A New Remotely Operated Sensor Platform for Interdisciplinary Observations under Sea Ice. *Front. Mar. Sci.* 2017, 4, 281.
6. Sommerfeld, A.; Rex, M.; Shupe, M.; Dethloff, K. The Multidisciplinary drifting Observatory for the Study of Arctic Climate (MOSAIC). In *Proceedings of the EGU General Assembly Conference Abstracts*, Vienna, Austria, 23 - 28 April 2017; p. 2115.
7. Francois, R.E.; Nodland, W.E. Unmanned Arctic Research Submersible UARS System Development and Test Report; Technical Report APL-UW 7219; University of Washington, Applied Physics Laboratory: Seattle, WA, USA, 1972
8. Francois, R.E. The Unmanned Arctic Research Submersible System. *Mar. Technol. Soc. J.* 1973, 7, 46 - 48.
9. Nicholls, K.W.; Abrahamsen, E.P.; Heywood, K.J.; Stansfield, K.; Østerhus, S. High-latitude oceanography using the Autosub autonomous underwater vehicle. *Limnol. Oceanogr.* 2008, 53, 2309 - 2320
10. McPhail, S.; Furlong, M.; Pebody, M.; Perrett, J.; Stevenson, P.; Webb, A.; White, D. Exploring beneath the PIG Ice Shelf with the Autosub3 AUV. In *Proceedings of the IEEE/MTS Oceans Conference and Exhibition*, Bremen, Germany, 11 - 14 May 2009; pp. 1 - 8.
11. Kukulya, A.; Plueddemann, A.; Austin, T.; Stokey, R.; Purcell, M.; Allen, B.; Littlefield, R.; Freitag, L.; Koski, P.; Gallimore, E.; et al. Under-ice operations with a REMUS-100 AUV in the Arctic. In *Proceedings of the IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles (AUV)*, Monterey, CA, USA, 1 - 3 September 2010; IEEE: New York, NY, USA, 2010; pp. 1 - 8.
12. Spain, E.; Gwyther, D.; King, P. Submarine ventures under Sørstøl Glacier. *Aust.*

Antarct. Mag. 2019, 18.

13. Berisford, D.F.; Leichty, J.; Klesh, A.; Hand, K.P. Remote Under-Ice Roving in Alaska with the Buoyant Rover for Under-Ice Exploration; AGU Fall Meeting Abstracts: San Francisco, CA, USA, 2013; Volume 2013, abstract ID C13C - 0684.

14. Peter W. Kimball; Evan B. Clark; Mark Scully; Kristof Richmond, The ARTEMIS under-ice AUV docking system, J of Field Robotics

15. Bellingham, J.G.; Leonard, J.J.; Vaganay, J.; Goudey, C.A.; Atwood, D.K.; Consi, T.R.; Bales, J.W.; Schmidt, H.; Chryssostomidis, C. AUV Operations in the Arctic. In Proceedings of the International Symposium of Unmanned Untethered Submersible Technology, Durham, NH, USA, 12 - 14 June 1993; pp. 1 - 9.

16. Jakuba, M.V.; German, C.R.; Bowen, A.D.; Whitcomb, L.L.; Hand, K.; Branch, A.; Chien, S.; McFarland, C. Teleoperation and robotics under ice: Implications for planetary exploration. In Proceedings of the 2018 IEEE Aerospace Conference, Big Sky, MT, USA, 3 - 10 March 2018; IEEE: New York, NY, USA, 2018; pp. 1 - 14.

17. Zeng, J.; Li, S.; Li, Y.; Wang, X.; Chen, Q.; Lei, R.; Li, T. The observation of sea ice in the six Chinese National Arctic Expedition using Polar-ARV. In Proceedings of the IEEE/MTS Oceans Conference and Exhibition, Washington, DC, USA, 19 - 22 October 2015; pp. 1 - 4.

18. Jones, C.; Webb, D.; Glenn, S.; Schofield, O.; Kerfoot, J.; Kohut, J.; Aragon, D.; Haldeman, C.; Haskin, T.; Kahl, A.; et al. Slocum Glider Expanding the Capabilities. In Proceedings of the 17th International Symposium on Unmanned Untethered Submersible Technology 2011 (UUST 2011), Portsmouth, NH, USA, 21 - 24 August 2011

19. Zhou, M.; Bachmayer, R.; deYoung, B. Mapping the underside of an iceberg with a modified underwater glider. J. Field Robot. 2019, 36, 1102 - 1117.

20. Webster, S.E.; Lee, C.M.; Gobat, J.I. Preliminary Results in Under-Ice Acoustic Navigation for Seagliders in Davis Strait. In Proceedings of the IEEE/MTS Oceans Conference and Exhibition, St. John's, NL, Canada, 14 - 19 September 2014; pp. 1 - 5.

21. Doupadi, B.; Zhi, L.; Hung, N.; et al, Technologies for Under-Ice AUV Navigation, 2016 IEEE/OES AUV, December 2016

22. Daniel T, Roper; Alexander B, Phillips; et al, Autosub long range 1500: An ultra-endurance AUV with 6000 Km range, OCEANS 2017, June 2017



주 의

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.