

표 지(주요사업)

(뒷면)

(측면)

(앞면)

주 의 (편집순서9) (16 포인트 고딕체) ↑ 15cm ↓	BSPE25070-142-12 남극 David 빙하 빙저호 지구물리 탐사기술 및 열수시추 기술개발 한국해양과학기술원 부설극지연구소 ↑ 3cm ↓	BSPE25070-142-12 (14포인트 중고딕체) ↑ 5cm ↓ 남극 David 빙하 빙저호 지구물리 탐사기술 및 열수시추 기술개발 (20 포인트 중고딕체) The Antarctic Korean Route Expedition and Development of Technologies for Deep Ice Coring and Hot Water Drilling (16 포인트 신명조체) ↑ 5cm ↓ 2026. 02. 28. (16 포인트 신명조체) 한 국 해 양 과 학 기 술 원 부 설 극 지 연 구 소 (17 포인트 명조계열) ↑ 4cm ↓
--	---	--



제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “남극 David 빙하 빙저호 지구물리 탐사기술 및 열수시추 기술개발”과제의 최종보고서로 제출합니다.

2026. 02.

연구책임자: 이 중 익

참 여 연 구 원:

김민철, 김홍귀, 한상우, 전성준, 곽호제, 이강현,
강승구, 이주한, 이춘기, 문홍수, 박상범, 김수관,
최용희, 최연진, 주현태, 김관수, 문성훈, 윤다영,
전용진, 윤지용, 강천윤, 박하동, 서상혁, 박제민,
문병국, 손은영, 김해련, 권도운, 김태환, 최산희,
박규리, 유인성, 강필모, 한승희, 김예동, 주해현,
이미정, 신준혁, 진영근, 박창근, 김화영, 이어진,
백종민, 손문정, 이승주, 김소윤, 소요한, 최우창,
이민제, 장일식, 이종학, 이창재, 김건희, 정성현

위탁연구기관명: 강원대학교

위탁연구책임자: 한 향 선

보고서 초록

과제관리번호	PE25070	해당단계 연구기간	2020.01.01.~2025.12.31.		단계 구분	2단계 / 총 2단계	
연구사업명	중 사 업 명	극지연구소 연구사업					
	세부사업명	주요사업(기관목적사업)					
연구과제명	중 과 제 명	기관고유사업					
	세부(단위)과제명	남극 David 빙하 빙저호 지구물리 탐사기술 및 열수시추 기술개발					
연구책임자	이종익	해당단계 참여연구원수	총 55 명 내부 23 명 외부 32명	해당단계 연구비	정부: 4,873,800 천원 기업: 천원 계: 4,873,800 천원		
연구기관명 및 소속부서명	극지연구소 빙하지권연구본부		참여기업명				
국제공동연구	상대국명(상대국연구기관명): 영국(BAS)						
위 탁 연 구	연구기관명(연구책임자): 강원대학교(한향선)						
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자이내)					보고서 면수	400	
※ 남극 내륙 빙저호 청정열수시추 연구를 위한 지구물리 탐사기술 및 열수시추 원천기술 개발 1. 심부 빙저호 물리탐사 ○ 극지 빙상전용 96채널 탄성파탐사 시스템 구축 ○ 빙하 레이더 자료 및 탄성파 자료 DB 구축 ○ 빙권 탄성파 수치 모델링 기술 및 빙권 탄성파 자료처리 전용 워크플로우 개발 ○ 정밀 탄성파 자료 분석을 통한 빙저호 2D, 3D 해석도 작성 ○ David 빙하 빙저호(청석호)에 대한 지구물리학적 특성 규명 및 빙저호 규모 파악 ○ 위성, 기상, 레이더, 탄성파 자료 기반한 최적의 빙저호 시추 위치 선정 2. 심부 빙저호 시추기술 개발 ○ 남극 내륙 심부 빙저호 시추탐사를 위한 인프라 구축 및 원천기술 확보 - 청정열수시추 시스템 및 시추캠프 운영을 위한 대규모 전력 공급용 이동식 발전모듈 제작 - 청정열수시추 현장연구를 위한 고단열 컨테이너 기반 이동식 청정실험실 및 멸균시스템 제작 - 2,700 m급 시추호스 전개·회수를 위한 이동식 호스릴, 캡스톤 타워 제작 - 빙저호 계측 및 샘플링용 3,000 m급 윈치 제작 - David 빙하 빙저호(청석호) 맞춤형 퇴적물 시추 시스템 설계 - Wellhead UV 유닛 제작 및 시스템 멸균 유효성 검증 - 보일러 및 열수순환시스템 제작, 시추캠프 설치 운영 및 통합시스템 호환성 테스트 3. 빙저호 시추 ○ David 빙하 빙저호(청석호) 시추탐사를 위한 포괄적 환경영향평가 대비 초기환경특성 분석 - 빙저호 시추 후보지역 생지화학적 특성 분석 및 DB 구축 - 빙저호 시추 후보지역 초기환경특성 분석 결과 보고서 작성 ○ 한-영 공동 빙저호 시추 프로그램 개발 - KOPRI-BAS 간 빙저호 시추 연구 협약 갱신 - 구체적인 청석호 열수시추 실행 계획 수립							
색 인 어 (각 5개 이상)	한 글	빙저호, 청정열수시추, 지구물리 탐사, 데이비드 빙하, 탄성파 탐사, 초기환경영향 평가					
	영 어	Sub-glacial lake, Clean hot water drilling, Geophysical survey, David Glacier, Seismic survey, Initial Environmental Evaluation (IEE)					

요 약 문

I. 제 목

남극 David 빙하 빙저호 지구물리 탐사기술 및 열수시추 기술 개발

II. 연구개발 목표

- 세계적 수준의 빙저호 탐사 및 자료 분석기술 보유
- 남극 심부 빙저호 시추 원천기술 확보
- 세계 최초 남극 심부 빙저호(2,000 m급) 청정열수시추를 위한 국제 공동 프로그램 개발

III. 연구개발의 내용 및 범위

- 세계적 수준의 빙저호 탐사 및 자료 분석기술 보유
 - 국내 최초 96채널 빙상 탄성과 탐사 시스템 구축
 - 빙저호 정밀관측을 위한 파동전파 모델링 기반 탄성과 분석기술 개발
 - 청석호 최적의 시추위치 선정
- 남극 심부 빙저호 시추 원천기술 확보
 - 빙저호 호소수 청정열수시추를 위한 이동식 청정실험실 및 멸균시스템 개발
 - 빙저호 퇴적물 시추 효율 향상을 위한 다중/ 피스톤 퇴적물 시추기 개발
 - 빙저호 청정열수시추 시스템 한-영 국제 공동 개발
- 남극 심부 빙저호(2,000 m급) 청정열수시추를 위한 국제 공동 프로그램 개발
 - 한-영 공동 빙저호 시추 연구 협약 체결 및 빙저호 시추 실행 계획 수립
 - 청석호 시추를 위한 환경영향평가 수행

IV. 연구개발결과

- 대한민국 독자적 남극 빙저호 정밀 물리탐사 역량 확보
 - 96채널 빙권 탄성과 탐사 시스템 및 탐사 기술 확보
 - 빙권 탄성과 수치 모델링 기술 및 빙권 탄성과 자료처리 전용 워크플로우 개발
 - 청석호에 대한 지구물리학적 특성 규명 및 규모 파악
 - 위성, 기상, 레이더, 탄성과 자료 기반 최적의 빙저호 시추 위치 선정

- 심부 빙저호 시추탐사를 위한 인프라 구축 및 원천기술 확보
 - 이동식 발전 컨테이너 2기, 이동식 청정실험실 1기, 이동식 멸균시스템 1기, 이동식 호스틸 & 윈치 시스템 1기, 샘플링 용 윈치 1기, 시추공 멸균용 UV unit 1기, 보일러 및 열수순환시스템 1기 등 이동식 모듈화 시추장비 개발 및 운영기술 확보
- 청석호 열수시추를 위한 초기환경영향평가 수행 및 시추 실행 계획 마련
 - 시추 후보지의 환경 기초 데이터 분석을 통해 연구활동에 의한 환경영향 예측 및 오염방지계획 수립 및 초기환경영향평가서(IEE) 작성
 - 한-영 빙저호 공동 시추 연구 협약(LoU) 갱신('25-'29) 및 향후 4개년 청석호 시추 세부 실행 로드맵 수립

V. 연구개발결과의 활용계획

- 지구물리 탐사기술 고도화를 통해 남극내륙의 다양한 신규 연구 후보지 발굴
- 심부 빙저호 시추를 통해 확보한 물 시료를 이용하여 과거 수십만년 이상 고립된 환경에서의 생태학적 진화, 우주 생물의 존재 가능성 등 생물학 분야의 첨단 연구 수행
- 빙저호 호수 퇴적물 시료 분석을 통해 빙하 생성 이전의 남극 과거 기후, 환경 변화 기록 복원
- 발전기 동력 시스템, 열수 공급 시스템, 멸균 시스템 및 퇴적물 시추 시스템 등 열수시추 시스템의 모듈화 장비 개발을 통해 제2빙저호 시추, 심부빙하코어 시추, 제3내륙기지 건설 등 향후의 남극 내륙 연구수요에 탄력적인 대응 및 연구비용 절감
- 빙저호 열수시추를 위한 환경영향평가 수행 과정에서 획득한 환경자료는 남극내륙 연구 기초자료로 활용

S U M M A R Y

I. Title

Development of technologies for geophysical survey and hot water drilling of the sub-glacial lakes below Antarctic David glacier

II. Purpose of R&D

- Acquirement of the most developed seismic survey system and data analytical technology
- Development of the source technology of clean hot water drilling for Antarctic sub-glacial lake
- Development of international cooperative program for Antarctic sub-glacial lake clean hot water drilling at David glacier

III. Contents and Extent of R&D

- Acquirement of the most developed seismic survey system and data analytical technology
 - Equipment of the 96 multi channels ice sheet seismic survey system
 - Improvement of precision and accuracy of seismic survey data analysis
 - Assignment of the optimum site for clean hot water drilling of the sub-glacial lake at David glacier
- Development of the source technology of clean hot water drilling for Antarctic sub-glacial lake
 - Development of the mobile in situ clean laboratory and sterilization system for clean hot water drilling
 - Development of the multiple corer and piston corer for sampling of sub-glacial lake sediment
- Development of international cooperative program for Antarctic sub-glacial lake clean hot water drilling at David glacier
 - Establishment of a comprehensive project implementation plan and Korea-UK subglacial lake joint research agreement
 - Initial environment estimation for the sub-glacial lake clean hot water drilling at David glacier

IV. R&D Results

- Acquisition of the capability for precision seismic survey for Antarctic sub-glacial lake
 - Securing the 96 multi channels ice sheet seismic survey system and data analytical technology
 - Development of numerical modeling technology and workflow for seismic survey data processing of sub-glacial lake
 - Determination of geophysical characteristics and scale of the Cheongsuk sub-glacial lake
 - Assignment of optimum site for clean hot water drilling of the Cheongsuk sub-glacial lake based on data of satellite, weather, radar, and seismic survey
- Infrastructure development and securing core technologies for Antarctic sub-glacial lake exploration
 - Establishment of the mobile drilling equipment, including two mobile power generation containers, one mobile clean laboratory, one mobile sterilization system, and one mobile hose reel & winch system, one sampling winch, one UV unit for sterilization of borehole passing equipment, one boiler & hot-water circulation system, and securing integrated operational technologies
- Execution of initial environmental evaluation (IEE) and implementation planning for subglacial lake Cheongsuk hot-water drilling
 - Analysis of the biogeochemical initial characteristics of the sub-glacial lake area and prediction of environmental impacts resulting from research activities and pollution preservation strategies
 - Renewal of the Letter of Understanding (LoU) for the Korea-UK subglacial lake joint research partnership ('25-'29) and development of a detailed four-year execution roadmap for the Cheongsuk hot-water drilling project

V. Application Plans of R&D Results

- Understanding of the geophysical characteristics of the sub-glacial lake at David glacier
- Assignment of optimum site for clean hot water drilling of sub-glacial lake at David glacier
- Acquisition of source technology of clean hot water drilling for deep sub-glacial lakes
- Sampling of 2,000m deep sub-glacial lake water and sediment at David glacier

목 차

제 1 장 서론	19
1. 연구개발의 필요성	19
가. 연구개발의 개요	20
나. 연구개발대상의 국내·외 기술, 산업동향	20
2. 연구개발의 목표 및 내용	28
가. 최종 및 단계별 성과목표	28
나. 상세 성과목표 및 내용	30
다. 연차별 연구개발 로드맵	45
제 2 장 연구실적	46
1. 계획대비 연구 수행의 적절성	46
가. 연구수행의 적절성	46
나. 예산집행의 적절성	285
2. 연구개발 성과의 달성도 및 우수성	291
가. 연구목표의 정상 추진 및 성과 우수성	291
나. 정량적 연구성과	317
다. KPDC 등록 이행실적	326
3. 기타 성과 (참고자료)	327
가. 인력활용/양성 성과	327
나. 국제화/협력 성과	327
제 3 장 향후 연구방향 및 성과활용 계획	330
1. 연구결과의 활용방안(기대효과)	330
2. 성과 활용계획	333
3. 기타사항	336
제 4 장 참고문헌	403

C O N T E N T S

Chapter 1 Introduction	19
Section 1.1 Necessity of R&D	19
1.1.1 Overview of R&D	20
1.1.2 Domestic and International Technology and Industry Trends Related to the Research Target	20
Section 1.2 Objectives and Contents of R&D	28
1.2.1 Final and Phased Performance Goals	28
1.2.2 Detailed Performance Goals and Contents	30
1.2.3 Annual R&D Roadmap	45
Chapter 2 Research Achievements	46
Section 2.1 Appropriateness of Research Implementation Compared to the Plan	46
2.1.1 Appropriateness of Research Execution	46
2.1.1 Appropriateness of Budget Execution	285
Section 2.2 Achievement Level and Excellence of R&D Outcomes	291
2.2.1 Proper Progress Toward Research Goals and Excellence of Outcomes	291
2.2.2 Quantitative Research Outcomes	317
2.2.3 KPDC Registration Performance	326
Section 2.3 Other Achievements (Reference Materials)	327
2.3.1 Human Resource Utilization and Training Outcomes	327
2.3.2 Internationalization and Collaboration Outcomes	327
Chapter 3 Future Research Directions and Utilization Plan	330
Section 3.1 Utilization of Research Results (Expected Impact)	330
Section 3.2 Performance Utilization Plan	333
Section 3.3 Other Matters	336
Chapter 4 References	403

그림 목차

그림 1	영국의 엘스워스호수 열수시추 장면	20
그림 2	미국 윌란스호수 열수시추 장면과 호숫물에서 발견된 미생물 세포의 형태학적 다양성	20
그림 3	빙저호 Ellsworth에서 사용된 중력 시추기	21
그림 4	빙저호 Ellsworth에서 사용된 격발식 피스톤 시추기	22
그림 5	빙저호 Whillans에서 사용된 UWITECH 다중 시추기	22
그림 6	Korean Route 사전조사 및 탐사계획	23
그림 7	2016년 1월 5일 MBC 뉴스데스크 뉴스플러스 보도 자료	23
그림 8	시추장비 운송을 위한 탐사선단 구축	23
그림 9	빙저호 시추후보지 캠프	23
그림 10	40m 급 열수 시추기 개발 및 데이비드 빙하 빙저호 후보지 탄성과 탐사	24
그림 11	2017~2019년 코리안루트 남극내륙진출루트	24
그림 12	탄성과 탐사 결과 및 David 빙하 빙저호 수괴 파악	25
그림 13	2018년도 한-영 공동 연구 논의를 위한 Dr. David Vaughan 방한	25
그림 14	2019년 KOPRI-BAS 빙저호 열수시추기 공동개발을 위한 정례 모임	25
그림 15	제조사(Geometrics)와 장비 구축에 따른 사용 설계 논의	45
그림 16	사양서-계속	46
그림 17	REPEATER 사양서	47
그림 18	탄성과 탐사기	48
그림 19	탄성과 탐사기	48
그림 20	탄성과 탐사기	48
그림 21	Digital interface cable	48
그림 22	탄성과 케이블	48
그림 23	탄성과 케이블	48
그림 24	Signal Repeater	48
그림 25	사양서	49
그림 26	RADIO TRIGGER 사양서	50
그림 27	Radio trigger	51
그림 28	2019년도 구매 제품	52
그림 29	단점이 보완된 2020년 버전-지오로드 덮개 단면도	52
그림 30	단점이 보완된 2020년 버전-지오로드 오픈 단면도	52
그림 31	지오로드 센서 사양서	53
그림 32	사양서 계속	54
그림 33	사양서	55
그림 34	2020년 버전 지오로드 50개 구매 완료	56
그림 35	데이비드 빙하 D2지역 지도 및 레이더 탐사 축선 표시	57
그림 36	데이비드 빙하 D2 빙저호 지역 레이더(IPR) 자료 GIS DB 구축	57
그림 37	D2지역 레이더 탐사자료 GIS 기반 DB, IPR 축선 및 고도, 얼음두께 그리고 반사강도 추정도	58
그림 38	레이더 자료 3D 도시화	58
그림 39	QGIS DataBase. 탄성과 축선 및 자료(Shot gather) 및 레이더 자료 도시화	59
그림 40	탄성과 자료 GIS DB 구축	59

그림 41	2021/22 시즌 탄성과 탐사 계획	60
그림 42	엇격자 유한차분법 방법 사용	61
그림 43	Test 모델 모형	62
그림 44	shot location 0.3km, water thickness 6.25m의 모델링 1.1sec 경과 후 결과 단면도	62
그림 45	Test 모델 shot location 0.3km, water thickness 6.25m shot gather	62
그림 46	Test 모델 shot location 0.3km, water thickness 12.5m shot gather	63
그림 47	Test 모델 shot location 0.3km, water thickness 25m shot gather	63
그림 48	Test 모델 shot location 0.3km, water thickness 50m shot gather	63
그림 49	Test 모델 shot location 3km, water thickness 6.25m shot gather	64
그림 50	Test 모델 shot location 3km, water thickness 12.5m shot gather	64
그림 51	Test 모델 shot location 3km, water thickness 25m shot gather	64
그림 52	Test 모델 shot location 3km, water thickness 50m shot gather	65
그림 53	Test 모델 shot location 6km, water thickness 6.25m shot gather	65
그림 54	Test 모델 shot location 6km, water thickness 12.5m shot gather	65
그림 55	Test 모델 shot location 6km, water thickness 25m shot gather	66
그림 56	Test 모델 shot location 6km, water thickness 50m shot gather	66
그림 57	빙저호 모델 모형	67
그림 58	shot interval 0.36km, water thickness 50m의 모델링 1.25sec 경과 후 결과 단면도	67
그림 59	Shot location 3km shot gather	67
그림 60	Water thickness 10m, 100m 폭의 크레바스 3개 설정된 모델	68
그림 61	100m 폭 크레바스 3개, water thickness 10m의 모델링 1.25sec 경과 후 결과 단면도	68
그림 62	shot gather	69
그림 63	고단열 컨테이너 단열패널 구조(철도연)	70
그림 64	고단열 컨테이너 외부 도면	71
그림 65	고단열 컨테이너 진공단열재 설계 도면	71
그림 66	단열 패널 - 우레탄층	72
그림 67	단열 패널-진공단열재층	72
그림 68	단열 패널- 내부 알루미늄층	72
그림 69	단열패널 결합	72
그림 70	고단열 컨테이너 완성품 외관	72
그림 71	고단열 컨테이너 완성품 내부	72
그림 72	고단열 컨테이너 운송용 눈썰매 도면	73
그림 73	눈썰매 외관	74
그림 74	사용자용 발판	74
그림 75	슬라이드식 사다리 전개	74
그림 76	슬라이드식 사다리 폴딩, 고정	74
그림 77	안전 핸드레일-1	74
그림 78	안전 핸드레일-2	74
그림 79	이동식 청정 실험실 평면도	75
그림 80	이동식 청정 실험실 천정 평면도	75
그림 81	이동식 청정 실험실 장비 및 덕트 평면도	76
그림 82	이동식 청정 실험실 전기 평면도	76
그림 83	이동식 청정 실험실 단면도	77
그림 84	이동식 청정 공조 흐름도	77
그림 85	실험실 내부 장비 배치도	80

그림 86	청정 실험실 내부 연구 장비	80
그림 87	BAS/ UWITEC 고안 퇴적물 시추기	81
그림 88	Whillans호 퇴적물 시추에 활용된 UWITEC 다중시추기	82
그림 89	WISSARD 피스톤 시추기	83
그림 90	WISSARD 유압 타격 시추기	83
그림 91	엘스워스 빙저호 표층 시추기	84
그림 92	Ellsworth 빙저호 타격 시추기	85
그림 93	Ellsworth 빙저호 중력 시추기	85
그림 94	발전기 및 전용 컨테이너 설계도	87
그림 95	발전기 제작 견적서-계속	88
그림 96	발전기 제작 견적서	89
그림 97	발전기 컨테이너 내외관 및 운송 사진	90
그림 98	SLCECs의 위치와 물류수송 예상도	91
그림 99	SLCECs 열수 시추 캠프 운영 모식도	92
그림 100	SLCECs 열수 시추 시스템	93
그림 101	열수시추 멸균 시스템	94
그림 102	시추공에 들어가는 호스 멸균을 위한 UV 장치	95
그림 103	빙설시료 채집 모식도	96
그림 104	빙설시료 채취 현장	96
그림 105	대기시료 포집 장치 및 환경 데이터 수집 센서	96
그림 106	환경시료 수집 지역의 환경데이터	97
그림 107	빙설시료의 pH와 전기전도도	97
그림 108	이온크로마토그래피 분석 결과	98
그림 109	빙설 시료 내 미생물 군집	100
그림 110	유전체 분석 결과	100
그림 111	빙설시료의 DAPI 염색과 형광현미경 분석	101
그림 112	David Glacier D2 빙저호 지역 정밀 탄성과 탐사 측선 계획	103
그림 113	지하의 A 지점에서 반사된 3번의 파동을 수신하여 탄성과 자료 획득. 3번 중첩(3-fold)된 신호를 획득하여 지구물리학적 특성(매질 탄성 속도) 도출 가능	103
그림 114	하나의 측선에 8번의 인공 지진파를 발생시켜 8중첩(8-fold)으로 기록하여 중첩될수록 자료품질(S/N) 향상. '19년도 자료대비 고품질의 정밀 자료 획득 가능	104
그림 115	'21/22시즌 남극 현장 탄성과 탐사 중첩(fold)수 계산	104
그림 116	중첩 전 탄성과 자료에 대한 신호대 잡음 비(S/N ratio) 향상을 위한 자료처리 과정	105
그림 117	'19년 빙저호 탐사자료 최종 단면 (Line X)	106
그림 118	19년 빙저호 탐사자료 최종 단면 (Line Y)	106
그림 119	파동전파 모델링을 통해 임의로 설정한 빙저호 모델에서 계산한 인공합성자료	106
그림 120	이동식 청정 실험실 내부 테스트 포인트	108
그림 121	열수시추 멸균시스템	115
그림 122	열수 멸균시스템 설계도면-1	116
그림 123	열수 멸균시스템 설계도면-2	116
그림 124	열수 멸균시스템 설계도면-3	117
그림 125	열수 멸균시스템 설계도면-4	117
그림 126	열수 멸균시스템 설계도면-5	118
그림 127	열수 멸균시스템 제작 완료품	119
그림 128	D2 빙저호 시추용 열수시추 시스템 구축 예상 비용 및 파트별 제조사 정보	138

그림 129	빙설시료에서 미생물 분리배양	141
그림 130	분리배양된 미생물 분석 결과	141
그림 131	분리배양된 미생물 유전체 분석 결과	142
그림 132	α -diversity 분석 결과	142
그림 133	β -diversity 분석결과	143
그림 134	Phylum 수준에서의 미생물 군집 구성	144
그림 135	Genus 수준에서의 미생물 군집 구성	144
그림 136	송신에너지원(PETN) 장약	145
그림 137	신기(Georod) 매설	145
그림 138	탄성과 시스템 운영 모습	145
그림 139	탄성과 자료 획득 모습	145
그림 140	탄성과 케이블 설치 모습 및 측선 전체 항공 사진	146
그림 141	21/22시즌 탄성과 탐사 측선	147
그림 142	탄성과 결과 (측선 21X)	147
그림 143	탄성과 결과 (측선 21Y)	148
그림 144	탄성과 결과 (측선 21XX)	148
그림 145	탄성과 결과 (측선 21YY)	149
그림 146	D2 빙저호 지역 기상 자료(2018.01 - 2022.04)	150
그림 147	측선 21X 단면 내 shot number 26-36 구간에서 호수 아래 퇴적층에 기인한 반사면 확인, 수심 약 80m 예상	150
그림 148	측선 21Y 단면 내 shot number 26-36 구간에서 호수 아래 퇴적층에 기인한 반사면 확인, 수심 약 80m 예상	151
그림 149	D2 빙저호 최적 시추 위치 표시, 노란 실선 박스	151
그림 150	전원공급장치 및 호스 제작	152
그림 151	멸균시스템 열수 펌프 정상 작동여부 확인	152
그림 152	멸균시스템 내부의 UV 램프 설치 및 정상 작동여부 확인	153
그림 153	4단계 필터 카트리지를 장착 및 정상여부 확인	156
그림 154	멸균시스템 실제 운영 점검	157
그림 155	멸균시스템 유효성 검사를 위한 시료채취	157
그림 156	BEAMISH 시추프로그램에 사용된 타격식 퇴적물 시추기	167
그림 157	영국 BEAMISH 시추시스템의 원치, 캡스턴타워, 컨트롤보드	168
그림 158	릴 도면	169
그림 159	캡스턴 타워 도면	170
그림 160	Ellsworth 시추프로그램용 프로브 설계도	171
그림 161	Ellsworth 시추프로그램용 프로브의 현장 배치테스트 사진	172
그림 162	BEAMISH 시추프로그램의 카메라(좌) 시스템과 프로브 시스템(우)	173
그림 163	영국 BAS Ellsworth호 시추시스템의 드릴 호스 및 원치 컨테이너 모듈	173
그림 164	영국 보관 중인 Ellsworth호 시추시스템(발전기, umbilical 호스 및 부품, 드릴 호스 및 원치 컨테이너)	174
그림 165	고압순환 모듈	175
그림 166	보일러 모듈	175
그림 167	열교환 모듈	175
그림 168	저압순환 모듈	175
그림 169	분배(매니폴드) 모듈	175
그림 170	분전 모듈	175

그림 171	빙저호 과제 현황 소개	177
그림 172	D2 빙저호 탄성파탐사 결과 소개	177
그림 173	BAS 빙저호 프로그램 소개	177
그림 174	BAS 열수시추시스템 소개	177
그림 175	BAS 장비 개발 현황 파악	177
그림 176	SLE 시추장비 점검	177
그림 177	CECs 시추장비 견학	177
그림 178	한-영 공동 빙저호 시추 프로그램 개발 협의	177
그림 179	빙저호 시추 후보지 샘플링 지점	178
그림 180	항공 레이더 기반 지구물리학적 수치 결과	194
그림 181	항공 레이더 자료 기반 지구물리학적 수치 결과, Surface/Bed/Hydraulic Head/Hydraulic Slope DEM	195
그림 182	Pseudo 3D 탄성과 구조 해석	196
그림 183	DDInSAR 자료 - 신규 빙저호 탐색	197
그림 184	신규 시추 후보지(D3 주변) 해상도 1.5m 초고해상도 SAR 위성 자료	197
그림 185	심부빙저호 열수시추기의 시추호스 현장 활용 예	198
그림 186	시추호스의 외형 및 단면 사진	199
그림 187	제작 완료된 2,700급 시추호스	199
그림 188	컨테이너 시스템 - 미국 Willans 빙저호 시추캠프	200
그림 189	컨테이너 시스템 - 영국 Ellsworth 빙저호 시추캠프	200
그림 190	모듈화 시스템 - 영국 BEAMISH 프로젝트 시추캠프	201
그림 191	SLCECs 시추프로그램의 캠프 레이아웃	201
그림 192	D2 빙저호 지역 기상 자료(2020.01.~2022.04.)	202
그림 193	열수시추 3D 삽화	203
그림 194	D2 빙저호용 샘플링 윈치 도면-1	205
그림 195	D2 빙저호용 샘플링 윈치 도면-2	205
그림 196	D2 빙저호용 샘플링 윈치용 시브휠 도면	206
그림 197	D2 빙저호용 샘플링 윈치 현장배치 계획	206
그림 198	2023년 8월 중순 한-영 방문 연구협의(좌) 및 갱신 예정 LOU 문건 표지(우)	207
그림 199	데이비드 빙하 내부 레이더 감쇠율 추정	209
그림 200	레이더 자료 처리 워크플로우 최신화	210
그림 201	상대적인 반사계수 (rR23) 제안으로 반사계수 R23의 편향 문제 해결	211
그림 202	감쇠율 Na에 따른 빙하 하부 반사 계수 비교	211
그림 203	Sentinel-1 위성 자료로부터 SLC 활동성 확인	212
그림 204	ICESat-2 위성 자료로부터 2019-2022년 동안 SLC 수위 증가 확인	212
그림 205	SLC 영역 추정	213
그림 206	빙하 내부 레이더 감쇠율에 따른 SLC 표면적 비교	213
그림 207	SLC 정밀 분석 및 구조해석. (a) 빙하 표면 DEM, (b) 빙하 하부 기반암 DEM, (c) 수두 DEM, (d) 수력 구매 map, (e) 빙하 하부 기반암 상대 반사 강도, (f) 빙저호 추정 영역(◇) 표시	214
그림 208	레이더 자료를 바탕으로 SLC 지역 3D mapping. (좌) 빙하 표면 고도 DEM, (우) 기반암 고도 DEM	214
그림 209	신규 (D3) 빙저호 열수시추 후보지 해상도 1m급 위성 자료 확보 예정	215
그림 210	신규 빙저호 후보지 위성 자료 DEM 분석	215
그림 211	멸균에 필요한 미생물 종류별 UV 조사량	216

그림 212 Wellhead UV 유닛 구성도	217
그림 213 제작된 Wellhead UV 유닛과 컨트롤 패널(좌), UV reactor 내부 사진(우)	218
그림 214 BAS Wellhead UV unit 용 하우징 및 냉각장치 프로토타입	218
그림 215 Wellhead UV 유닛 하우징 설계도면	219
그림 216 Wellhead UV 유닛용 냉각장치 설계도면	219
그림 217 D2 빙저호 지역 기상 자료(2020.01.~2022.04.)	220
그림 218 2개동 연결형 시추텐트의 단일 섹션 모식도 (각 폭10m × 깊이6m × 높이4.65m)	221
그림 219 방수지퍼로 2개동을 연결한 시추텐트 모식도 (폭10m × 깊이12m × 높이4.65m)	222
그림 220 방수, 단열, 난연 소재의 내부 라이닝과 내부 개폐부(환기구)	225
그림 221 드릴 텐트 구성	225
그림 222 드릴텐트 전용 PVC 캐링백	226
그림 223 플랜트 텐트 모식도	227
그림 224 플랜트 텐트 수치도	228
그림 225 Monmuth Scientific 사 CleanTent Model 1700	229
그림 226 내부 3중 격벽이 적용된 ISO 20ft 탱크컨테이너 설계도면	230
그림 227 항공유(JET A-1) 20,000L 충전 후 아라온 선적 완료한 ISO 20ft 탱크 컨테이너	234
그림 228 청석호(D2 빙저호) 시추캠프 레이아웃	234
그림 229 D2 빙저호 청정열수시추 시스템의 물순환 개략도	235
그림 230 영국 Structure-flex 사의 30,000L Open top tank	236
그림 231 가열 루프 순환펌프 - Grundfos 사의 CR 15-5 AFAE-HQQE 모델사양	237
그림 232 가열 루프 순환펌프 - Grundfos 사의 CR 15-5 AFAE-HQQE 모델사양	237
그림 233 Alkota Model 1060 외관(좌), 열교환기 타입의 배기열 회수장치(중, 우)	238
그림 234 판형 열교환기 구조 및 시판 형태	239
그림 235 판형 열교환기 팔레트 모듈	239
그림 236 판형 열교환기 팔레트 모듈	240
그림 237 BEAMISH 시추프로그램용 umbilical 구조 및 운용방법	241
그림 238 엄빌리컬 설치, 회수를 위한 지브&롤러, 반달형 롤러 시브	243
그림 239 Sentinel-1 위성 자료로부터 SLC 활동성 확인	248
그림 240 ICESat-2 위성 자료로부터 2019-2022년 동안 SLC 수위 증가 확인	249
그림 241 2021-2024년 동안 SLD2 (SLC)의 수위 감소 확인	249
그림 242 D2 빙하 표면 변위 및 빙저호 예상 부피 변화 (Southoff et al. 2025 in Review)	249
그림 243 탄성과 해석 기반 D2 빙저호 속도 예측 모델	250
그림 244 현장자료(좌), 정밀수치 모델링 Model 1(중앙), Model 2(우)	250
그림 245 레이더 자료를 바탕으로 업데이트 된 SLC 지역 3D mapping. (좌) 빙하 표면 고도 DEM, (우) 기반암 고도 DEM	251
그림 246 탄성과 자료를 바탕으로의 SLC pseudo 3D mapping	251
그림 247 빙저호 구조, 클린 환경, 기상을 고려한 시추 후보 지역 선정	252
그림 248 SLC 상부 지역에 존재하는 소규모 신규 빙저호 확인	252
그림 249 Weatherhaven S4 프레임 아치 텐트 내부 및 중장비 활용 설치	255
그림 250 Weatherhaven S4 프레임 아치 텐트 설치 구성품 리스트	255
그림 251 100kW 발전 컨테이너 가동 시험	260
그림 252 이동식 청정실험실 가동 시험	261
그림 253 호스릴 컨테이너 가동 시험 및 2,700m 시추호스 스펀링	262
그림 254 캡스턴&시추타워 및 컨트롤패널 설치 및 가동 시험	264
그림 255 열수&순환시스템 호환성 테스트 흐름도	266

그림 256	청정 열수시추 시스템 모니터링 개념도	268
그림 257	청정열수시스템 모니터링 설치 및 종류 개념도	268
그림 258	빙저호 계측 및 시료 채집용 샘플링 윈치 - 케이블 스펙링 테스트	271
그림 259	David 빙하 주변 빙저호 지역 Sentinel-1 DDInSAR 기법을 통한 지표 변위 산출. 빙저호 상부 변화 및 물리적 특성 해석	278
그림 260	David 빙하 주변 빙저호 지역 Sentinel-1 DDInSAR 기법을 통한 신규 빙저호 확인. 신규 빙저호 상부 변화 및 물리적 특성 해석	278
그림 261	David D2 빙저호 상부 빙상 표면 고도의 시계열 변화율	278
그림 262	Line X processed shot gathers	294
그림 263	고단열 컨테이너용 개발 패널 구조 및 이동식 청정실험실 전용 썰매 도면	295
그림 264	이동식 청정실 내부 배치도 및 개발 완료된 이동식 청정실험실과 화물썰매 세트	295
그림 265	발전기 및 전용 컨테이너 설계 도면	296
그림 266	개발 완료된 100kw급 모듈형 시추동력 발전기 2기	296
그림 267	빙저호 지역 정밀 탄성과 탐사 수행('21.11.28.~12.20.)	297
그림 268	탄성과 단면으로부터 빙저호 정밀구조 파악 및 지구물리학적 특성 규명 연구	297
그림 269	열수시추 멸균시스템 설계도면	289
그림 270	개발 완료된 열수시추 멸균시스템	289
그림 271	빙저호 퇴적물 시추기 2종 설계도면	299
그림 272	탄성과 자료 2차원 해석도(측선 21X)	300
그림 273	탄성과 자료 2차원 해석도(측선 21Y)	300
그림 274	D2 빙저호 최적 시추 위치 표시, 노란 실선 박스	300
그림 275	빙저호 시추용 윈치시스템 설계도면	301
그림 276	제작 완료된 빙저호 시추용 윈치시스템	301
그림 277	열수 멸균시스템 시험 운영 완료	302
그림 278	열수 멸균시스템의 멸균 유효성 검증서	302
그림 279	항공 레이더 기반 지구물리학적 수치 모델 결과	303
그림 280	규 시추 후보지(D3 주변) 해상도 1.5m 초고해상도 SAR 위성 자료	303
그림 281	고성능 소재 적용 2,700m 시추호스	304
그림 282	빙저호 계측 및 청정시료 채집용 샘플링 윈치	304
그림 283	KOPRI-BAS 간 LOU 문건 표지(좌) 및 준비 중인 한-영 빙저호 과제 공동제안서(우)	305
그림 284	SLC 정밀 분석 및 구조해석. (a) 빙하 표면 DEM, (b) 기반암 DEM, (c) 수두 DEM, (d) 수력 구배 map, (e) 기반암 상대 반사 강도, (f) 빙저호 (◇)	306
그림 285	레이더 자료를 바탕으로 SLC 3D mapping	306
그림 286	신규 빙저호 위성 모니터링	306
그림 287	Wellhead UV unit 모식도(좌) 및 제작된 유닛의 UV reactor 내부/컨트롤 패널(우)	307
그림 288	초기환경영향평가서 초안(Draft IEE)	308
그림 289	정밀 수치 모델링 결과(좌)와 현장 자료(우)와의 비교	309
그림 290	D2 빙저호 상부 지역에 존재하는 소규모 신규 빙저호 확인	309
그림 291	제작 완료된 보일러&순환시스템 구성요소	310
그림 292	Wellhead UV 시스템 멸균 유효성 검증	310
그림 293	초기환경영향평가서 최종본 [부록 참조]	311
그림 294	탄성과 자료를 바탕으로 SLC pseudo 3D mapping	318
그림 295	Wellhead UV 시스템의 멸균 유효성 테스트 결과	319
그림 296	Weatherhaven S4 프레임 아치 텐트 중장비 활용 설치 및 내부	319
그림 297	보일러&순환시스템 호환성 테스트 모식도(좌), 샘플링 윈치-케이블 호환성 테스트(우)	319

그림 298 최종 초기 환경영향평가(Final IEE) 보고서	320
그림 299 '20년 지질학회(추계) 지면광고 게재	324
그림 300 '22년 지질학회(추계) 지면광고 게재	324
그림 301 빙권 탄성과 탐사, 레이더 탐사 및 위성 영상 분석 기술 확보	325
그림 302 지구물리 탐사를 타 연구와의 연계 활용 가능	325
그림 303 독립적 기능을 갖춘 이동식 컨테이너 모듈의 남극 연구 활용 예	325
그림 304 독일우주청(DLR) TRIPLE 시스템 모식도(좌) 및 IceCraft 시추기 남극 실증 테스트 모식도(우)	326
그림 305 미항공우주국(NASA)의 유로파 시추탐사 모식도(위) 및 ORCAA 팀의 '23년 알래스카 현장연구 사진(아래)	327
그림 306 고정밀 탄성과 탐사	328
그림 307 극지 자료 공유 & 협력강화	328
그림 308 한-이태리 국제 공동 탄성과 탐사 협의	328
그림 309 빙저호 청정시료 확보를 통한 생물 진화과정 연구(왼) 및 동남극 빙상의 과거 거동 변화 연구(오)	329



표 목차

표 1	1단계 성과목표 및 평가 기준	28
표 2	2단계 성과목표 및 평가기준	31
표 3	연차별 연구목표 및 내용	34
표 4	실험실 부하 표	78
표 5	실험실 열관류율 표	79
표 6	연구진도 적정 수행여부	274
표 7	1단계 1차년도(2020년) 집행 내역	280
표 8	1단계 2차년도(2021년) 집행 내역	281
표 9	1단계 3차년도(2022년) 집행 내역	282
표 10	2단계 1차년도(2023년) 집행 내역	283
표 11	2단계 2차년도(2024년) 집행 내역	284
표 12	2단계 3차년도(2025년) 추정 집행 내역	285
표 13	목표 대비 달성도	286
표 14	대표적 우수성과	294
표 15	정량적 연구성과	312



제 1 장 서론

1. 연구개발의 필요성

- 극지연구소에서는 2014년 동남극 빅토리아랜드에 장보고 과학기지를 건설하고 남극 내륙으로 진출할 수 있는 교두보를 마련함
- 최근 심부빙하코어 시추, 빙저호 시추 등 남극내륙연구가 거대화, 융복합화 되는 국제적인 추세에 따라 극지연구소도 국제적 이슈를 주도할 수 있는 대형 연구주제 발굴이 시급함
- 현재 남극에는 약 400여개의 빙저호가 있는 것으로 알려져 있으며, 외부환경과 오랜 기간 단절되어 있는 환경 특성 상 빙저호 시료가 생물진화, 외계 생명체 연구 등의 최첨단 극지연구를 수행할 수 있는 환경시료로 여겨짐
- 또한, 빙저호 하부에 존재할 것으로 예측되는 빙저호 퇴적물을 시추하여 과거 기후변화 기록을 복원한다면 현재 급격히 진행 중인 남극 빙상의 붕괴를 보다 정확히 예측할 수 있는 자료를 제공하고 향후 전 지구 해수면 상승에 따른 국가적 경제-사회적 피해 경감 대책 마련에 적극 활용할 수 있을 것으로 기대함
- 극지연구소에서는 2017~2019년 동안 ‘남극내륙 진출루트 개척과 심부빙하, 빙저호 시추 기술개발’ 기관 고유사업을 수행하였으나, 한정된 인력으로 내륙 진출루트 개척의 로지스틱과 빙저호 시추 연구를 모두 수행하는 데에는 한계가 있음
- 이에 제5기 기관 고유사업 개편을 통해 기존의 K루트 사업에서는 ‘남극내륙 진출루트 개척과 지원 시스템 구축’이라는 로지스틱 분야의 전문성 확보에 집중하는 것으로 사업계획을 변경함
- 2019/20 시즌 동안 David 빙하 D2 지역에서의 탄성과 탐사 결과, 2000m 빙하 하부에 수심 100m 급의 호수의 존재가 확인되어 빙저호 열수시추를 위한 교두보 마련
- 남극 David 빙하 빙저호 다학제간 연구를 위한 정밀 탄성과 탐사, 열수 시추기 확보, 환경영향 평가 대응 등의 선도적 연구 및 기술 개발이 필요한 시점임
- 빙저호 시추는 전 세계적으로 러시아·미국·영국 등 소수 국가만이 도전한 고난도 연구영역임. 1,000m 급 빙저호 시추는 '18년 영국이 유일하게 성공하였으며, 2,000 m 이상의 빙하 하부 빙저호에서 오염되지 않은 물과 퇴적물을 동시에 확보한 사례는 아직 존재하지 않음
- 빙저호 시추는 우주탐사에 버금가는 최고 수준의 기술력과 탐사지원이 필요한 연구과제로서 본 연구가 목표로 하는 2,000급 빙저호 시추는 국제적으로 최초의 사례가 될 가능성이 매우 높으며, 시추 성공 시 빙저호 생태계의 기원과 진화 과정, 동남극의 과거 기후 복원, 극한환경 생명체의 에너지 대사 방식, 이 모든 부분에서 세계적인 선도 연구가 가능할 것이라 기대함
- 그러나 1,000m 이상의 빙하 아래 존재하는 빙저호 시추는 남극 진출국 중 영국 (2018년) 만이 유일하게 시추에 성공하는 등 우주탐사에 버금가는 최고 수준의 기술력과 탐사지원이 필요한 연구과제로서 극지연구소의 역량을 극대화 할 수 있는 연구과제임

가. 연구개발의 개요

- 남극내륙 심부 빙저호 탐지 및 물리특성 파악을 위한 지구물리 탐사 기술 고도화
- 국제 공동 심부 빙저호 열수시추 시스템 개발 및 원천기술 확보
- 남극내륙 심부 빙저호 시료 채집, 분석을 위한 멸균 시스템 및 청정 분석 시스템 개발
- 데이비드 빙하지대 2,000m 급 심부 빙저호 시추 및 빙저호 호소수와 퇴적물 시료 확보
- 연구기간 : 2020. 06. 01. ~ 2025. 12. 31.
- 연구비 (직접비) : 48.7 억원

나. 연구개발대상의 국내·외 기술, 산업동향

1) 국외 기술, 산업동향

- 러시아
 - 1975년 처음으로 존재 확인하여 보스토르크호로 명명, 1990년 시추 시작하여 1998년 3,580m에 도달한 뒤 시추 중단, 2007/08년에 3,668m 척빙에서 시추 기술 문제 및 호수 오염의 가능성이 제기된 작업을 중단함
 - 척빙을 대상으로 하여 미생물, 화학 분석이 진행되었으며, 1ml 당 약 100개의 세균이 존재함을 확인 및 10℃의 저온에서 자라는 미생물 배양을 성공함. 유전자 염기서열이 100% 호열성 미생물과 유사한 점과 지층의 온도 분석을 통하여 지열에 의하여 호수형성 가능성 제시함
 - 2011/12년 얼음과 물의 경계면에 도달하였으나 얼음을 뚫자마자 물의 압력에 의해 호수물이 시추공으로 분출 및 부동액(kerosin)이 호수로 유입되어 수체 오염 야기됨. 2015년 1월 시추에 성공하여 호수 표층수를 채집에 성공하였다고 발표하였으나, 오염문제가 지속적으로 제기됨
- 영국
 - 서남극 빙하 약 3,400m 아래에 위치한 엘스워스호 탐사 시도. 호수 길이는 12km, 표면적 30km², 최대수심 150m로 약 50만년 동안 격리되어 진화되었다고 보고됨. 상대적으로 작은 규모로 이해하기 쉽고, 연구 장비의 운반, 설치 및 보관이 용이한 장점을 지님
 - 1996년 존재 확인 후, 영국 연구팀은 2012년 12월 탐사를 실시하였고, 5단계의 정수시스템을 통하여 자외선으로 소독한 순수한 형태의 물 6만 리터를 준비하였고, 5미터 길이의 실린더 티타늄 탐사기를 시추공으로 내려 보내는 작업을 계획함
 - 탐사 중 발생한 기술적인 문제로 인하여 연구진은 2012년 12월에 시추 포기를 선언하였으며, 현재까지 시추 실패 원인 분석 및 대응방안을 마련하고 추가 연구비 확보를 모색 중임
 - 2018/19 시즌, BEAMISH 프로젝트를 통해 영국 BAS 연구팀은 서남극 러트포드 빙하 (Rutford Ice Stream) 지대에서 2,000m 두께의 빙하 아래 존재하는 빙저호 퇴적물 시료 채취에 성공함
 - 2단계 빙저호 연구 대상으로 Ellsworth 호수에서 약 20km 떨어진 CECs 호수가 선정되었으며, 2,650m 두께 빙하 아래 표면적 18km², 깊이 약 310m 규모로 추정됨. 지난 10년 동안 고도 변화가 관찰되지 않은 호수로 고립 환경에서의 생물 진화, 서남극 빙역학 등 연구 예정이었으나, COVID-19로 인한 남극 활동 제한, 물류, 펀드 등의 문제로 프로그램이 취소됨



그림 1 영국의 엘스워스호수 열수시추 장면

○ 미국

- 남극 서부의 로스빙붕 가장자리의 윌란스호는 800m 두께의 얼음 밑에 위치, 호수 표면적이 60km², 평균 수심은 2m, 수온은 -4.9℃이며, 호수의 유출수가 로스해로 유입됨
- 2007년 ICESat data에서 빙하 하부 유체 활동으로 얼음 표면에 변형이 생긴 것이 밝혀짐. 이후, 지구물리탐사 및 GPS 등으로 지형조사가 자세히 이루어지면서, 시추작업에 대한 사전 연구가 꾸준히 이루어짐. 미국 전역에 걸쳐 3개의 대형 연구과제가 NSF 지원을 통해 추진되었으며, 13개 대학과 8개의 연구소가 참여하였음
- 2013년 1월 미국 연구팀은 세계 최초로 빙저호의 물과 퇴적토 수집에 성공하여 생명체의 존재를 확인하였고, 2014년 네이처에 연구결과 발표함
- 2018/19 시즌, 미국 Subglacial Antarctic Lakes Scientific Access (SALSA) 연구팀은 윌란스호로부터 약 40km 떨어진 Mercer 호수지역에서 1,067m 두께의 빙하 아래 표면적 160km², 평균 수심 10~15m인 Mercer 호의 빙저호 물과 약 1.7 m 깊이의 퇴적물 코어 채취에 성공함

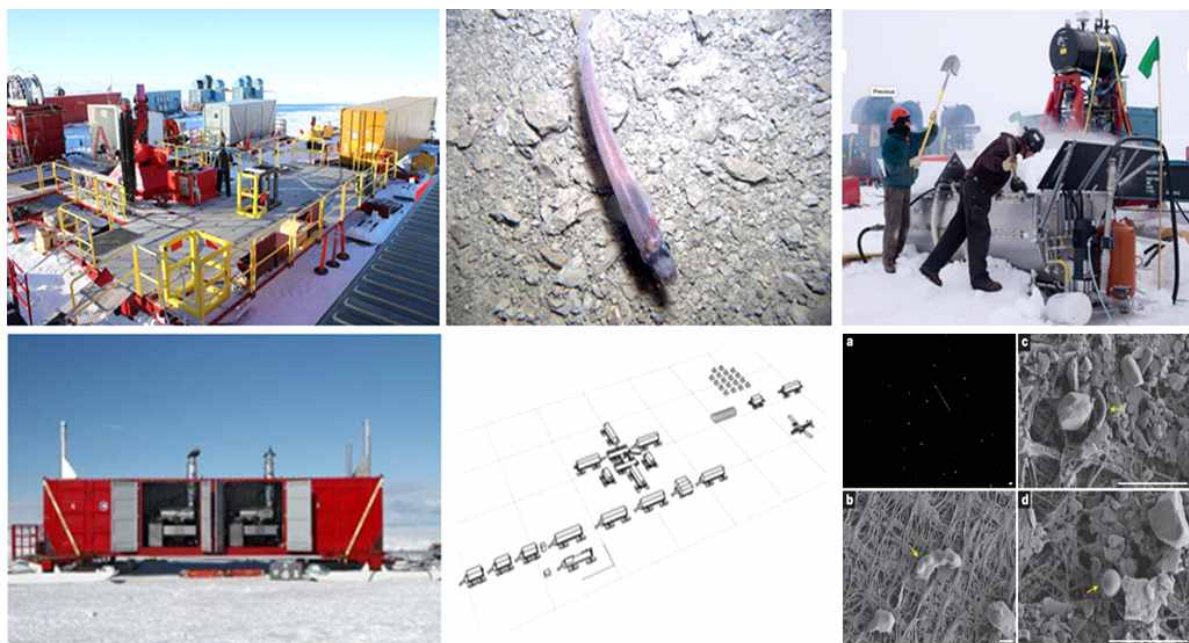


그림 2 미국 윌란스호수 열수시추 장면과 호숫물에서 발견된 미생물 세포의 형태학적 다양성

<빙상/빙붕 밑 그리고 빙저호 퇴적물 시추>

○ 빙붕 밑 퇴적물 시추

- 기존의 일반적인 해양 퇴적물 시추기는 중력 방식, 피스톤 방식과 드릴 방식으로 나누어짐
- 단순한 형태의 중력 방식의 시추기는 크게 웨이트, 바렐, 헤드 부분으로 이루어져있고 자유낙하를 통해 해저 밑 퇴적물이 획득되고, 피스톤 방식은 중력 방식의 단점인 압밀(compaction)을 최소화 하는 피스톤이 장착되어있고, 드릴 방식은 헤드에 드릴을 장착하여 고화된 퇴적물과 수 킬로미터의 퇴적층이 획득 가능함
- 빙붕 밑 퇴적물 시추기가 빙하의 좁은 시추공(borehole)을 통과해 퇴적층까지 도달하기 위해서는 기존 모양보다 일정한 형태를 갖춘 시추기가 이용됨. 그렇지만, 일반적인 해양 퇴적물 시추기의 방식들이 그대로 적용되어 제작됨.
- 1978년과 1979년 Ross Ice Shelf Project (RISP)의 일부 중 남극 로스해 빙붕 밑 퇴적물 시추가 이루어짐. 당시 3 m 길이의 중력 시추기이며, 거의 1 m 이하 길이가 획득됨
- 빙붕 밑 미고화 퇴적물 시추 장비는 독일 AWI에서 제작된 단순한 중력 시추기부터 압밀, 드릴 방식의 시추기가 이용되며 보통 2 m 이내 깊이의 퇴적물이 대상임
- 1975년부터 빙붕이 아닌 해빙 위 플랫폼을 갖춘 드릴링 지질 사업이 시작됨. 여기에 드릴 방식의 시추기가 이용되었으며, Dry Valley Drilling Project Site 15, McMurdo Sound Sediment and Tectonic Studies (MSSTS), Cenozoic Investigations in the Western Ross Sea (CIROS)와 Cape Roberts Project (CRP)가 포함됨
- 2010년과 2011년 ADNDRILL-MIS는 hot water drill (HWD) 시스템을 적용하여 빙붕 밑 퇴적물을 드릴하여 획득한 최초의 프로젝트임
- 최근 영국 BAS는 Ronne, Larsen과 George VI 빙붕 밑에서 약 3 m에 이르는 반고화(semi-consolidated) 상태의 빙하 퇴적물을 획득함

○ 빙상 밑 퇴적물 시추

- 1988년과 2000년 사이에 미국 Caltech 연구팀이 Siple Coast 빙하류(ice stream)에서 1,030 m 길이의 HWD로 만들어진 시추공 아래 퇴적물에 접근할 수 있는 Caltech 피스톤 시추기를 제작함.
- 이 시추기는 바렐과 헤드 및 피스톤으로 구성되어있지만, 단순하게 중력 시추기로 사용 가능하며, 이를 통해 3 m 이내의 수많은 퇴적물을 획득함

○ 빙저호 퇴적물 시추

- 2000년대 초 서남극 빙상의 후퇴 주변부에 위치한 빙저호 Lake Hodgson에서 UWITEC 중력 시추기로 표층 퇴적물이 약 2 m 정도 획득하였고 격발식 피스톤 시추기를 통해 합계 3.76 m 길이의 퇴적물이 획득됨. 하지만 시추기 자체는 오염된 상태로 퇴적물이 얻어짐
- 최초의 무균 상태로 시추된 퇴적물은 WISSARD 프로젝트의 일부로 빙저호 Lake Whillans에서 얻어짐. 2013년 HWD 시스템으로 빙저호에 도달하여 세 가지 다른 방식의 퇴적물 시추기가 이용됨. 빙저호 바닥 아래 약 0.8 m의 퇴적물이 획득됨

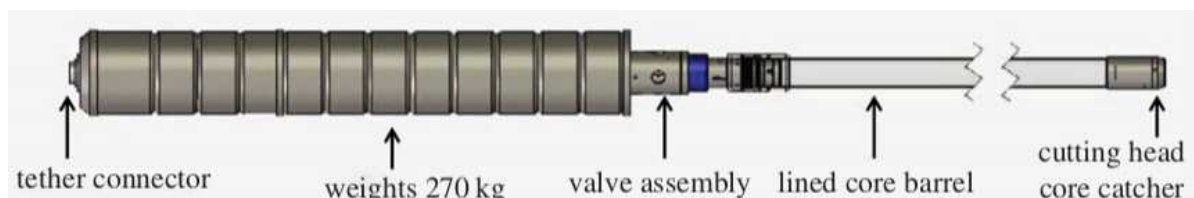


그림 3 빙저호 Ellsworth에서 사용된 중력 시추기

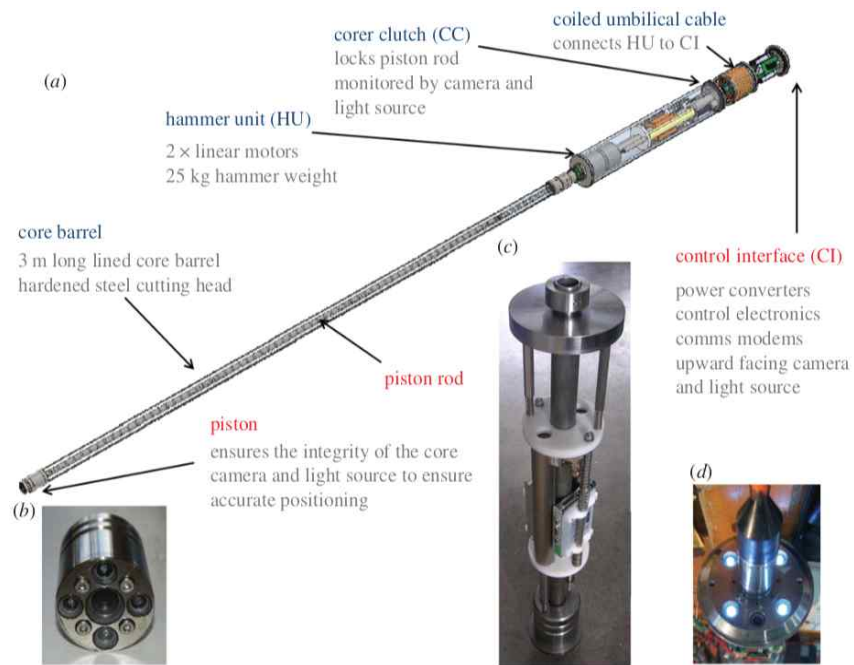


그림 4 빙저호 Ellsworth에서 사용된 격발식 피스톤 시추기



그림 5 빙저호 Whillans에서 사용된 UWITECH 다중 시추기

2) 국내 기술, 산업동향

- 2015~2017년 동안 '남극 빅토리아랜드 Korean Route 사전조사와 빙저호 탐사를 위한 기획연구' 및 '남극 대륙 열수시추기술 확보를 위한 기획연구' 등 2개 기획연구를 통해 장보고기지 기점 180km 지점까지의 최대 위험구간에 대한 사전조사 수행 및 대국민 홍보

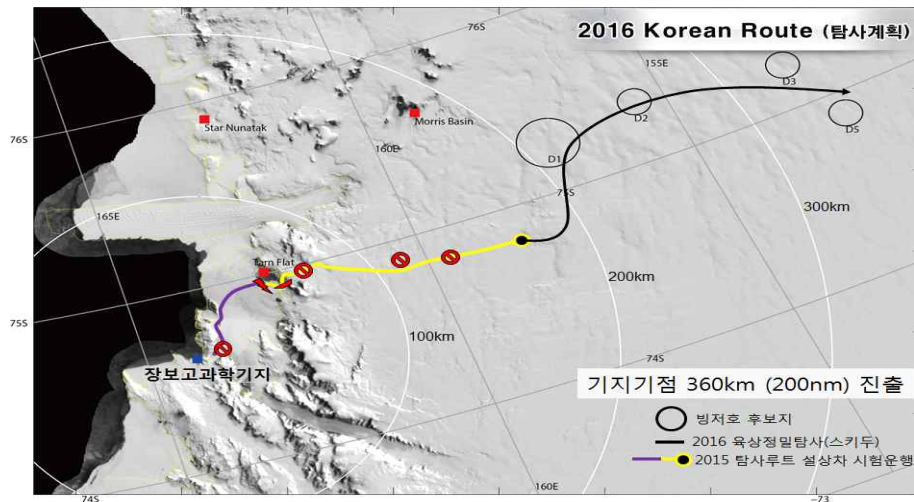


그림 6 Korean Route 사전조사 및 탐사계획



그림 7 2016년 1월 5일 MBC 뉴스데스크 뉴스플러스 보도 자료

- 2017~2019년 동안 선행과제인 '남극내륙진출루트 개척과 심부빙하/빙저호 시추 및 활용기술 개발' 기관 고유사업을 통해 설상차, 카라반, 화물썰매, 연료탱크 썰매 등 남극 내륙 빙저호 시추장비 운송 및 시추캠프 운영을 위한 기본 인프라 구축



그림 8 시추장비 운송을 위한 탐사선단 구축



그림 9 빙저호 시추후보지 캠프

- ‘남극내륙진출루트 개척과 심부빙하/빙저호 시추 및 활용기술 개발’ 기관 고유사업을 통해 위성 원격 탐사, 항공 레이더 탐사, 탄성과 탐사 등 지구물리 탐사 수행

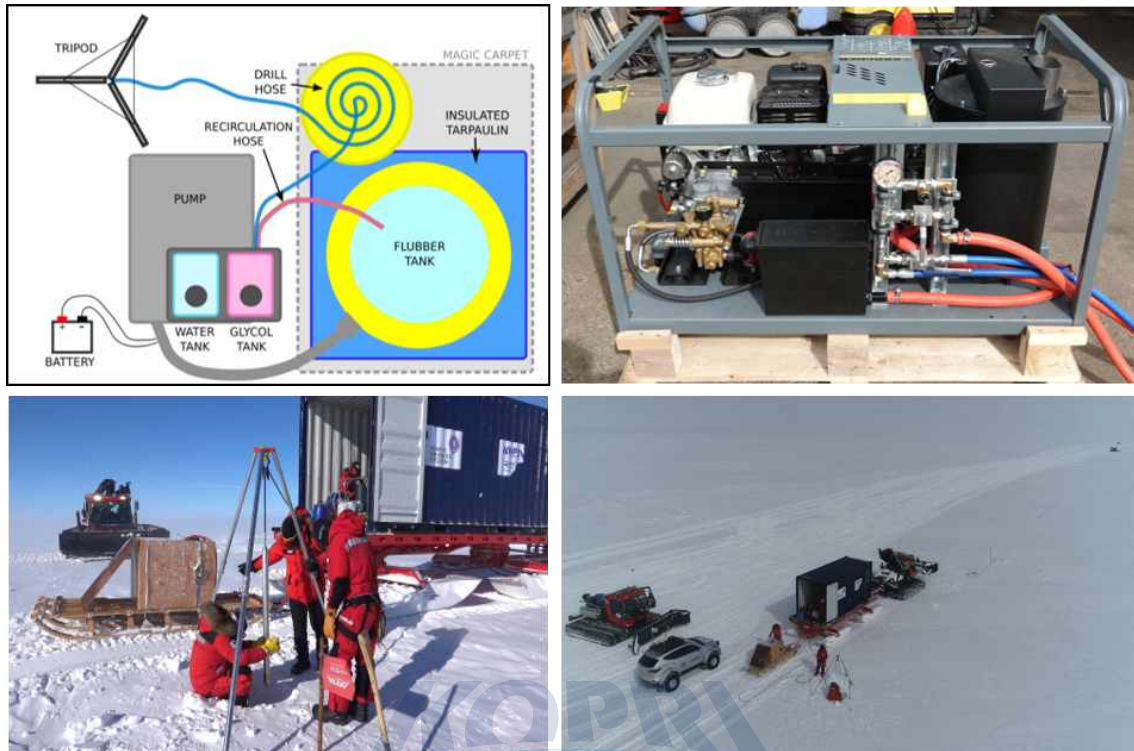


그림 10 40m 급 열수 시추기 개발 및 데이비드 빙하 빙저호 후보지 탄성과 탐사

- 지구물리 탐사자료를 통해 장보고기지로부터 기지기점 450km 지점의 빙저호 유력 시추후보지 파악, 장보고기지-빙저호 시추후보지 간 진출루트 확보 및 빙저호 수괴 존재 확인

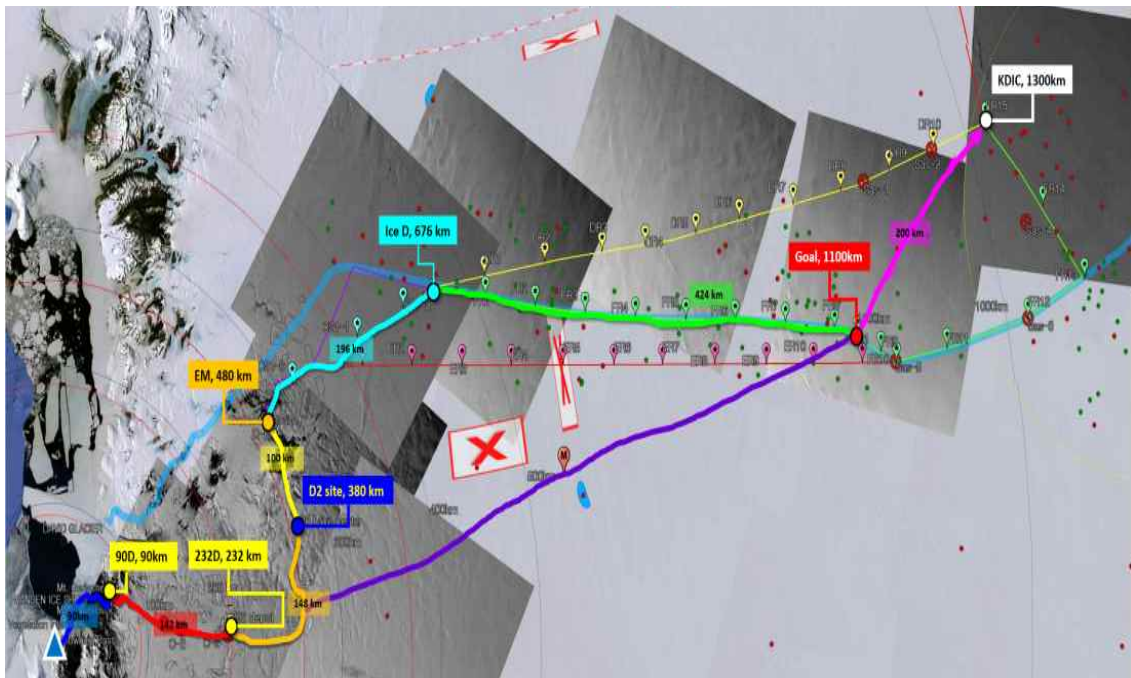


그림 11 2017~2019년 코리아안루트 남극내륙진출루트

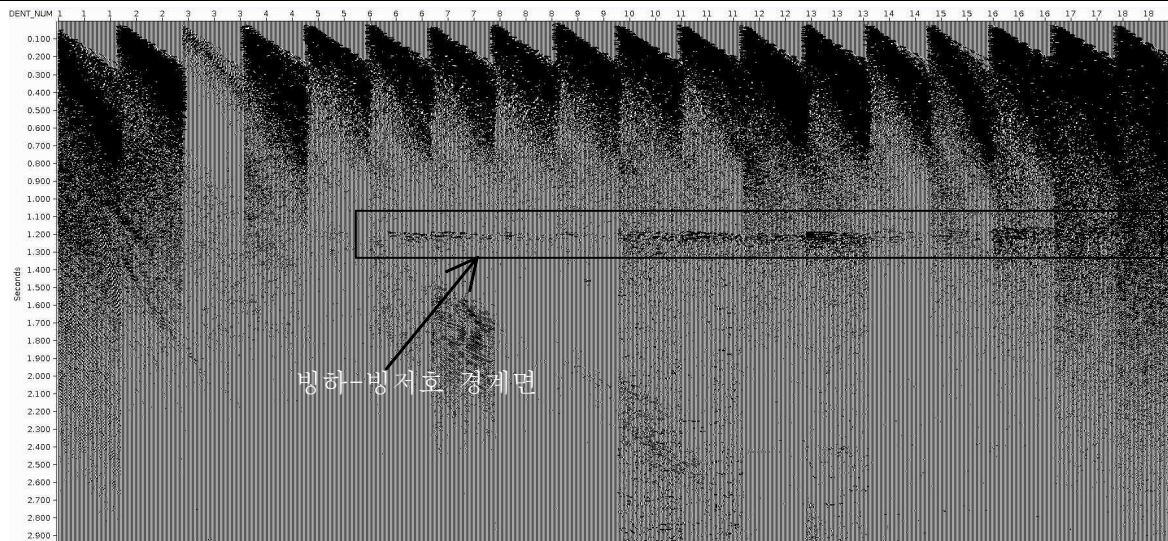


그림 12 탄성과 탐사 결과 및 David 빙하 빙저호 수괴 파악

- 한-영 남극 빙저호 시추 국제공동연구를 위한 연례 모임 정례화를 통해 빙저호 시추기 공동 개발 및 빙저호 공동 시추 합의



그림 13 2018년도 한-영 공동 연구 논의를 위한
Dr. David Vaughan 방한



그림 14 2019년 KOPRI-BAS 빙저호 열수
시추기 공동개발을 위한 정례 모임

3) 특허동향

- 없음

2. 연구개발의 목표 및 내용

가. 최종 및 단계별 성과목표

1) 최종목표

- 세계적 수준의 빙저호 지구물리 탐사 기술 확보
 - 남극내륙 심부 빙저호 탐사기술 확보
 - 정밀 탐사자료 확보 및 분석기술 고도화를 통한 데이비드 빙하 빙저호 시추 최적지점 선정
 - 차세대 남극내륙 거대과학 수행을 위한 신규 빙저호 시추 후보지 추가 확보
- 남극내륙 심부 빙저호 열수시추 원천기술 보유
 - 심부 빙저호 열수시추기 국제 공동 개발을 통해 열수시추 원천기술 확보
 - 심부 빙저호 청정 시추를 위한 멸균 시스템 및 이동식 청정 분석 시스템의 독자적 개발
 - 심부 빙저호 퇴적물의 시추효율 향상을 위한 호소퇴적물 시추시스템 개발
- 세계 최초 동남극 2,000m 급 심부 빙저호 시추
 - 독자적인 청정 열수시추 시스템을 이용한 데이비드 빙하 2,000m 급 심부 빙저호 시추
 - 생태계 진화, 우주 생물학, 신물질 개발, 고기후/환경 변화기록 복원, 빙하 이동 등 차세대 첨단 극지연구 수행을 위한 심부 빙저호 호소수 및 퇴적물 시료 확보
 - 심부 빙저호 시추경험을 바탕으로 대한민국 주도의 국제 공동 빙저호 연구 프로그램 추진

2) 성과목표

가) 1단계 성과목표(2020.06.01 ~ 2022.12.31)

- 심부 빙저호 물리탐사
 - 데이비드 빙하 빙저호 광역 탄성과 탐사 (십자형 측선) 및 정밀 탄성과 탐사 (격자형 측선) 수행
 - GIS 기반 레이더 자료 DB 구축 및 파동전파 모델링 기반 탄성과 탐사자료 정밀 분석기술 개발
 - 탄성과 탐사 자료 해석을 통한 데이비드 빙하 빙저호 물리특성 파악 및 시추 최적지점 선정
- 심부 빙저호 시추기술 개발
 - 청정열수시추를 위한 멸균시스템 및 시료오염 최소화를 위한 이동식 현장시료 분석시스템 국내 개발
 - 심부 빙저호 퇴적물 채집 효율 향상을 위한 호소퇴적물 시추 시스템 개발
 - 심부 빙저호 열수시추기 국제 공동 개발을 통한 열수시추 원천기술 확보
- 빙저호 시추
 - 한-영 국제 공동 빙저호 시추 프로그램 개발을 통한 서남극 빙저호 시추 현장연구 참여
 - 데이비드 빙하 빙저호 지역 환경특성 조사 및 분석 보고

나) 2단계 성과목표(2023.01.01 ~ 2025.12.31)

- 심부 빙저호 물리탐사
 - 지구물리자료 분석기술 고도화 및 D2 빙저호 정밀구조 확인 및 3차원적 종합해석
 - 신규 빙저호 열수시추 후보지 위성자료 확보
- 심부 빙저호 청정열수시추 기술 개발
 - 2,000m급 심부 빙저호 청정열수시추 시스템 구축 및 멸균유효성 검증
 - 데이비드 빙하 빙저호(D2) 시추 캠프 구축
 - 심부 빙저호 청정열수시추 시스템 국제 공동 개발(활용)을 통한 열수시추 운영기술 확보
- 빙저호 시추
 - 한-영 국제 공동 2,300m급 데이비드 빙하(D2) 빙저호 시추 및 시료(호숫물, 퇴적물) 확보
 - 빙저호 시료 연구를 위한 한-영 국제 공동 연구프로그램 개발
 - 빙저호 시추과정 전반에 걸친 오염방지 시스템 효율 검증 및 종합 환경영향평가(CEE) 보고서 제출



나. 상세 성과목표 및 내용

1) 정량적 성과목표 및 평가 기준

표 1 1단계 성과목표 및 평가 기준

구분	년도	성과목표	지표	세계최고 수준주 (보유국/보유기관)	목표치	가중치 (%)	평가기준
1단계 성과목표	2020~2022	심부 빙저호 물리탐사	탄성과 탐사를 통한 빙저호 지구물리학적 특성 분석	영국/BAS	3건	5%	[R&R 연계목표] ○ 탄성과탐사 시스템 구축 및 운용기술 확보 1건 ○ 정밀 십자형 측선 자료 (8 fold 수를 가지는 96 채널 탄성과 자료 8km 이상)에 대한 KPDC 등록 1건 ○ 2차원/3차원 탄성과 해석도 제시 1건
			정밀 지구물리자료 분석기술 개발	영국/BAS	2건	5%	[R&R 연계목표] ○ GIS기반 레이더 자료 KPDC 등록 1건 ○ 파동모델링 기반 탄성과 분석기술 개발 1건
			탄성과 자료 분석 및 해석단면 작성	영국/BAS	2건	5%	[R&R 연계목표] ○ 정밀 탄성과 자료에 대한 탄성과 단면 제시 1건 ○ 빙저호 지구물리학적 특성 제시 1건
			탄성과 자료기반 최적 시추위치 선정	영국/BAS	1건	5%	[R&R 연계목표] ○ 탄성과 해석기반 최적 빙저호 시추위치 제시 1건
		심부 빙저호 시추기술 개발	열수시추 멸균시스템 개발	영국/BAS	3건	15%	[R&R 연계목표] ○ 이동식 청정실험실 제작 1건 ○ 열수 멸균시스템 제작 1건 ○ 열수시추 멸균 시스템 현장 운영 자료 KPDC 등록 1건
			빙저호 퇴적물 시추 시스템 개발	영국/BAS	7건	15%	[R&R 연계목표] ○ 빙저호 퇴적물 시추 시스템 자료 수집·자문 보고서 제출 1건 ○ 퇴적물 시추용 청정원치/ 피스톤 시추기/ 다중 시추기 설계 3건 ○ 빙저호 퇴적물 시추용 청정 원치/ 피스톤 시추기/ 다중 시추기 제작 3건
			빙저호 열수시추기 국제 공동 개발	영국/BAS	3건	15%	[R&R 연계목표] ○ 열수시추기 동력발전 모듈 개발 1건 ○ 열수시추기 열수순환 시스템 개발 1건 ○ 열수시추기 시추 probe 개발 1건
		빙저호 시추	국제 공동 프로그램 개발	영국/BAS	3건	10%	[R&R 연계목표] ○ 한-영 국제공동 빙저호 시추 프로그램 협약 체결 1건 ○ 서남극 빙저호 시추프로그램(SLCECs) 최신 동향 파악 및 공동 프로그램 관련 협의 ○ 한-영 공동 빙저호 시추 프로그램 개발 재협의, 협약 추진
			빙저호 지역 환경특성 조사를 통한 초기환경영향평가(IEE)	영국/BAS	3건	5%	[R&R 연계목표] ○ David 빙하 빙저호 지역 생물학적 환경 특성 분석 자료 KPDC 등록 1건 ○ David 빙하 빙저호 지역 생지화학적 환경 특성 분석 자료 KPDC 등록 1건 ○ 빙저호 시추후보지 초기환경 예비조사 종합 분석 결과 보고 1건
		논문	mrnIF 40이상 80미만	-	1건	5%	○ mrnIF 40이상 80미만 논문 게재 1건
			mrnIF 80이상	-	4건	15%	○ mrnIF 80이상 논문 게재 4건

1차년도	2020	심부 빙저호 물리탐사	탄성과 탐사를 통한 빙저호 지구물리학적 특성 분석	영국/ BAS	1건	10%	[R&R 연계목표] ○ 탄성과탐사 시스템 구축 및 운용기술 확보 1건
			정밀 지구물리자료 분석기술 개발	미국/ 스탠포드	2건	15%	[R&R 연계목표] ○ GIS기반 레이더 자료 DB 구축 1건 ○ 파동 모델링 기반 탄성과 자료 분석기술 개발 1건
		심부 빙저호 시추기술 개발	열수시추 멸균시스템 개발	영국/ BAS	1건	15%	[R&R 연계목표] ○ 이동식 청정실험실 제작 1건
			빙저호 퇴적물 시추 시스템 개발	영국/ BAS	1건	15%	[R&R 연계목표] ○ 빙저호 퇴적물 시추 시스템 자료 수집·자문 보고서 제출 1건
			빙저호 열수시추기 국제 공동 개발	영국/ BAS	1건	15%	[R&R 연계목표] ○ 열수시추기 동력발전 모듈 개발 1건
		빙저호 시추	국제 공동 프로그램 개발	영국/ BAS	1건	5%	[R&R 연계목표] ○ 빙저호 국제 공동 열수시추 프로그램 협약 체결 1건
			빙저호 지역 환경특성 조사를 통한 초기환경영향평가(IEE)	영국/ BAS	1건	5%	[R&R 연계목표] ○ David 빙하 빙저호 지역 생물학적 환경 특성 분석 자료 KPDC 등록 1건
		논문	mrnIF 40이상 80미만	-	1건	20%	○ mrnIF 40이상 80미만 논문 게재 1건
2차년도	2021	심부 빙저호 물리탐사	탄성과 탐사를 통한 빙저호 지구물리학적 특성 분석	영국/ BAS	1건	10%	[R&R 연계목표] ○ 정밀 십자형 측선 자료(8 fold 수를 가지는 96채널 탄성과 자료 8km 이상)에 대한 KPDC 등록 1건
			탄성과 자료 분석 및 해석단면 작성	영국/ BAS	1건	10%	[R&R 연계목표] ○ 정밀 탄성과 자료에 대한 탄성과 단면 제시 1건
		심부 빙저호 시추기술 개발	열수시추 멸균시스템 개발	영국/ BAS	1건	15%	[R&R 연계목표] ○ 열수 멸균시스템 제작 1건
			빙저호 퇴적물 시추 시스템 개발	영국/ BAS	3건	15%	[R&R 연계목표] ○ 퇴적물 시추용 청정원치/ 피스톤 시추기/ 다중 시추기 설계 3건
			빙저호 열수시추기 국제 공동 개발	영국/ BAS	1건	10%	[R&R 연계목표] ○ 열수시추기 열수순환 시스템 개발 1건
		빙저호 시추	국제 공동 프로그램 개발	영국/ BAS	1건	5%	[R&R 연계목표] ○ 영국 SLCECs 시추프로그램 최신 동향 파악 및 공동 프로그램 관련 추가 협의
			빙저호 지역 환경특성 조사를 통한 초기환경영향평가(IEE)	영국/ BAS	1건	5%	[R&R 연계목표] ○ David 빙하 빙저호 지역 생지화학적 환경 특성 분석 자료 KPDC 등록 1건
		논문	mrnIF 80이상	-	2건	30%	○ mrnIF 80이상 논문 게재 2건

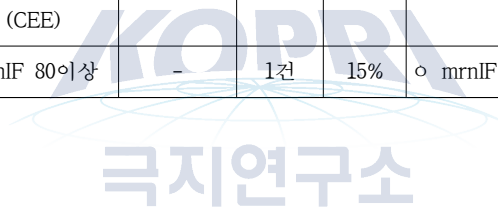
3차년도	2022	심부 빙저호 물리탐사	탄성과 탐사를 통한 빙저호 지구물리학적 특성 분석	영국/ BAS	1건	10%	[R&R 연계목표] ○ 2차원/3차원 탄성과 해석도 제시 1건
			탄성과 자료 분석 및 해석단면 작성	영국/ BAS	1건	10%	[R&R 연계목표] ○ 빙저호 지구물리학적 특성 제시 1건
			탄성과 자료기반 빙저호 최적 시추위치 선정	영국/ BAS	1건	10%	[R&R 연계목표] ○ 탄성과 해석기반 최적 빙저호 시추위치 제시 1건
		심부 빙저호 시추기술 개발	열수시추 열수시스템 개발	영국/ BAS	1건	10%	[R&R 연계목표] ○ 열수시추 열수 시스템 현장 운영 자료 KPDC 등록 1건
			빙저호 퇴적물 시추 시스템 개발	영국/ BAS	3건	10%	[R&R 연계목표] ○ 빙저호 퇴적물 시추용 청정원치/ 피스톤 시추기 / 다중 시추기 제작 3건
			빙저호 열수시추기 국제 공동 개발	영국/ BAS	1건	10%	[R&R 연계목표] ○ 열수시추기 시추 probe 개발 1건
		빙저호 시추	국제 공동 프로그램 개발	영국/ BAS	1건	5%	[R&R 연계목표] ○ 한-영 공동 빙저호 시추 프로그램 개발 재협약, 협약 추진
			빙저호 지역 환경특성 조사를 통한 초기환경영향평가(IEE)	영국/ BAS	1건	5%	[R&R 연계목표] ○ 빙저호 시추후보지 초기환경영향평가(IEE) 보고서 제출 1건
		논문	mrnIF 80이상	-	2건	30%	○ mrnIF 80이상 논문 게재 2건

표 2 2단계 성과목표 및 평가기준

구분	년도	성과목표	지표	세계최고 수준주 (보유국/보유기관)	목표치	가중치 (%)	평가기준
2단계 성과목표	2023~2025	심부 빙저호 물리탐사	빙저호 지구물리탐사(탄성파) 자료 분석 기술 고도화	영국/ BAS	2건	4%	[R&R 연계목표] ○ D2 빙저호 지구물리학적 수치 모델 작성 ○ 탄성파 자료 분석 기술 고도화 ○ 빙저호 표면적, 저수량 계산법 제시
			위성 자료 기반 신규 열수시추 후보지 광역 관측	미국/ NASA	1건	4%	[R&R 연계목표] ○ 신규 시추 후보지 1m급 초고해상도 SAR 위성 영상 자료 확보
			레이더 자료 분석 기술 고도화	미국/ UTIG	1건	4%	[R&R 연계목표] ○ 레이더 자료 분석 기술 고도화 ○ 레이더 결과 3D 단면도 작성
			신규 빙저호 열수시추 후보지 위성자료 확보	유럽, 미국/ EU, NASA	1건	4%	[R&R 연계목표] ○ 신규 빙저호 열수시추 후보지 위성 자료 확보
			신규 시추 후보지 선정	-	1건	4%	[R&R 연계목표] ○ 신규 열수시추 후보지 선정 1건
		심부 빙저호 청정열수시추 기술개발	심부 빙저호 청정열수시추 시스템 개발	영국/ BAS	3건	15%	[R&R 연계목표] ○ 2,000m급 시추호스 제작 1건 ○ Wellhead UV 유닛 제작 1건 ○ 청정열수시추 시스템 멸균 유효성 검증 1건
			심부 빙저호 시추캠프 구축	영국/ BAS	3건	15%	[R&R 연계목표] ○ 빙저호 시추캠프 설계 1건 ○ 빙저호 시추캠프 텐트유닛 제작 1건 ○ 빙저호 시추캠프 설치 운영 1건
			빙저호 열수시추기 국제 공동 개발	영국/ BAS	3건	15%	[R&R 연계목표] ○ 빙저호 샘플러 개발 1건 ○ 보일러&순환시스템 개발 1건 ○ 통합시스템 호환성 테스트 1건
		빙저호 시추	국제 공동 심부 빙저호 시추연구 프로그램 개발	영국/ BAS	3건	10%	[R&R 연계목표] ○ 한-영 공동 D2 빙저호 시추 프로그램 협약 체결 1건 ○ 한-영 국제공동 빙저호 시추프로그램 계획 수립 1건 ○ 한-영 공동 D2 빙저호 시추 프로그램 현장연구 수행 1건
			빙저호 시추를 위한 포괄적환경영향 평가(CEE)	영국/ BAS	1건	5%	[R&R 연계목표] ○ 빙저호 시추후보지의 환경 특성 분석 자료 KPDC 등록 1건 ○ 환경특성 자료 기반 초기 환경영향평가서 초안 (Draft IEE) 작성 ○ 빙저호 시추를 위한 최종 초기 환경영향평가 (Final IEE) 보고서 제출
		논문	mrnIF 40이상 80미만	-	2건	5%	○ mrnIF 40이상 80미만 논문 게재 3건
			mrnIF 80이상	-	3건	15%	○ mrnIF 80이상 논문 게재 3건

1차년도	2023	심부 빙저호 물리탐사	탄성과 자료 분석 기술 고도화	영국/ BAS	1건	10%	[R&R 연계목표] ○ D2 빙저호 지구물리학적 수치 모델 작성
			위성 자료 기반 신규 열수시추 후보지 광역 관측	미국/ NASA	1건	10%	[R&R 연계목표] ○ 신규 시추 후보지 1m급 초고해상도 SAR 위성 영상 자료 확보
		심부 빙저호 청정열수시추 기술개발	심부 빙저호 청정열수시추 시스템 개발	영국/ BAS	1건	15%	[R&R 연계목표] ○ 2,000m급 시추호스 제작 1건
			심부 빙저호 시추캠프 구축	영국/ BAS	1건	15%	[R&R 연계목표] ○ 빙저호 시추캠프 설계 1건
			빙저호 열수시추기 국제 공동 개발	영국/ BAS	1건	15%	[R&R 연계목표] ○ 빙저호 샘플러 개발 1건
		빙저호 시추	국제 공동 심부 빙저호 시추연구 프로그램 개발	영국/ BAS	1건	10%	[R&R 연계목표] ○ 한-영 공동 D2 빙저호 시추 프로그램 협약 체결 1건
			빙저호 지역 환경특성 조사를 통한 포괄적 환경영향평가 (CEE)	영국/ BAS	1건	5%	[R&R 연계목표] ○ David 빙하 빙저호 지역 환경 특성 분석 자료 KPDC 등록 1건
		논문	mrnlF 40이상 80미만	-	1건	5%	○ mrnlF 40이상 80미만 논문 게재 1건
			mrnlF 80이상	-	1건	15%	○ mrnlF 80이상 논문 게재 1건
2차년도	2024	심부 빙저호 물리탐사	레이더 자료 분석 기술 고도화	미국/ UTIG	1건	10%	[R&R 연계목표] ○ 레이더 자료 분석 기술 고도화
			신규 빙저호 열수시추 후보지 위성 자료 확보	유럽, 미국/ EU, NASA	1건	10%	[R&R 연계목표] ○ 신규 빙저호 열수시추 후보지 위성 자료 확보
		심부 빙저호 청정열수시추 기술개발	심부 빙저호 청정열수시추 시스템 개발	영국/ BAS	1건	15%	[R&R 연계목표] ○ Wellhead UV 유닛 제작 1건
			심부 빙저호 시추캠프 구축	영국/ BAS	1건	15%	[R&R 연계목표] ○ 빙저호 시추캠프 텐트유닛 제작 1건
			빙저호 열수시추기 국제 공동 개발	영국/ BAS	1건	15%	[R&R 연계목표] ○ 보일러&순환시스템 개발 1건
		빙저호 시추	국제 공동 심부 빙저호 시추연구 프로그램 개발	영국/ BAS	1건	10%	[R&R 연계목표] ○ 한-영 국제공동 빙저호 시추프로그램 계획 수립 1건
			빙저호 지역 환경특성 조사를 통한 포괄적 환경영향평가 (CEE)	영국/ BAS	1건	5%	[R&R 연계목표] ○ 환경특성 자료 기반 초기 환경영향평가서 초안 (Draft IEE) 작성
		논문	mrnlF 40이상 80미만	-	1건	5%	○ mrnlF 40이상 80미만 논문 게재 1건
			mrnlF 80이상	-	1건	15%	○ mrnlF 80이상 논문 게재 1건

3차년도	2025	심부 빙저호 물리탐사	빙저호 지구물리 탐사 자료 분석 기술 고도화	미국/UTIG	1건	10%	[R&R 연계목표] ○ 레이더 자료 분석 기술 고도화 ○ 빙저호 표면적, 저수량 계산법 제시 ○ 레이더 결과 3D 단면도 작성
			신규 시추 후보지 선정	-	1건	10%	[R&R 연계목표] ○ 신규 열수시추 후보지 선정 1건
		심부 빙저호 청정열수시추 기술개발	심부 빙저호 청정열수시추 시스템 개발	영국/BAS	1건	15%	[R&R 연계목표] ○ 시스템 멸균 유효성 검증 1건
			심부 빙저호 시추캠프 구축	영국/BAS	1건	15%	[R&R 연계목표] ○ 빙저호 시추캠프 설치 운영 1건
			빙저호 열수시추기 국제 공동 개발	영국/BAS	1건	15%	[R&R 연계목표] ○ 통합시스템 호환성 테스트 1건
		빙저호 시추	국제 공동 심부 빙저호 시추연구 프로그램 개발	영국/BAS	1건	15%	[R&R 연계목표] ○ 한-영 공동 D2 빙저호 시추 프로그램 현장연구 수행 1건
			빙저호 지역 환경특성 조사를 통한 포괄적 환경영향평가 (CEE)	영국/BAS	1건	5%	[R&R 연계목표] ○ 빙저호 시추를 위한 최종 초기 환경영향평가 (Final IEE) 보고서 제출
		논문	mrnIF 80이상	-	1건	15%	○ mrnIF 80이상 논문 게재 1건



2) 연차별 연구목표 및 내용

(단위 : 천원)

표 3 연차별 연구목표 및 내용

구분	년도	성과목표	연구내용	연구범위	연구비 (직접비)
1단계 1차년도	2020	심부 빙저호 물리탐사	○ 빙저호 지구물리탐사 장비 및 활용기술 확보 - 탄성과 탐사장비 및 활용기술 확보 - 빙저호 탐사 후보지역에 대한 GIS기반 레이더 자료 DB구축 및 활용 - 레이더 탐사자료 기반 탄성과 탐사측선 설계 - 빙저호 정밀분석을 위한 파동전파 모델링 기반 탄성과 자료 분석기술 개발	- 탐사장비 확보 - 탐사자료 DB 구축 - 탐사자료 분석기술 고도화	400,000
		심부 빙저호 시추기술 개발	○ 이동식 청정 실험실 개발 - 고단열 컨테이너를 활용한 이동식 청정실험실 개발 - 이동식 청정실험실 운송용 눈 썰매 제작 - 시료 처리용 내부 장비 구입 및 배치 ○ 빙저호 퇴적물 시추 시스템 개발 - 국외 빙저호 퇴적물 시추 시스템 자료 수집 및 자문 ○ 빙저호 열수시추기 개발 - 모듈형 시추동력 발전기 제작	- 시스템 설계/ 제작 - 자료 수집/ 자문	350,000
		빙저호 시추	○ 한-영 공동 빙저호 시추 프로그램 개발 - 서남극 빙저호 공동시추 프로그램 협약 ○ 빙저호 지역 환경특성 예비조사 - 미생물 생물량, 중 조성 등 빙저호 지역 생태환경시료 특성 분석 및 DB 구축	- 협약 체결 - 극지환경시료 분석	250,000
1단계 2차년도	2021	심부 빙저호 물리탐사	○ 빙저호 지역 정밀 탄성과 탐사 및 자료해석 - 8 fold 수를 가지는 96채널 정밀 탄성과 탐사자료 (십자형 측선) 8km 확보 - 속도분석 및 구조보정이 포함된 정밀 자료처리 워크플로우 작성 - 정밀 속도분석/구조보정 과정을 통한 탄성과 단면 제시	- 탄성파탐사 현장연구 수행 - 십자형 측선 8km 탐사자료 확보 및 해석 - 빙저호 단면도 작성	400,000
		심부 빙저호 시추기술 개발	○ 이동식 청정 실험실 개발 - 이동식 청정실험실 극지 현장 테스트 수행 ○ 열수시추 멸균시스템 자체개발 - 열수시추 멸균시스템 제작(다중 필터 및 자외선 기반 시스템) ○ 빙저호 퇴적물 시추 시스템 개발 - 퇴적물 시추용 청정원치, 피스톤/다중 시추기 설계 - 빙저호 퇴적물 시추 운영 시스템개발 ○ 빙저호 열수 시추기 개발 - 수조, 보일러, 펌프 등 열수 순환 시스템 제작	- 시스템 개발 및 극지 현장 시험운영 - 시스템 설계	400,000
		빙저호 시추	○ 한-영 공동 빙저호 시추 프로그램 개발 - 영국 SLCECs 시추프로그램 최신 동향 파악 및 공동 프로그램 관련 추가 협의 ○ 빙저호 지역 환경특성 예비조사 - 빙설시료, 미세먼지 등 빙저호 지역 지화학적 특성 분석 및 DB 구축	- 공동 프로그램 협의 - 극지환경시료 분석	200,000

1단계 3차년도	2022	심부 빙저호 물리탐사	○ 정밀 탄성과 탐사 자료 분석 및 최적 빙저호 시추위치 선정 - 정밀 탄성과 자료 분석을 통한 2D, 3D 해석도 작성 - D2 빙저호에 대한 지구물리학적 특성 규명 - 탄성과 자료 기반 빙저호 시추 위치 선정	- 2D/3D 탄성과 해석도 작성 - 빙저호 지구물리학적 특성 파악 - 탄성과 해석기반 최적 시추위치 제시	400,000
		심부 빙저호 시추기술 개발	○ 열수시추 열균시스템 개발 - 열수시추 열균시스템 시험 운영 - 생물학적 활성 테스트를 통한 열균 유효성 검증 ○ 빙저호 퇴적물 시추 시스템 자체개발 - 빙저호 시추용 청정원치, 피스톤/다중 시추기 제작 ○ 빙저호 열수 시추기 개발 - 열수시추기 시추 probe 개발	- 시스템 개발 및 극지 현장 시험운영 - 열수시추 열균시스템 특허 출원	500,000
		빙저호 시추	○ 한-영 국제 공동 프로그램 개발 - 한-영 공동 빙저호 시추 프로그램 개발 재협약, 협약 추진 ○ 심부 빙저호 시추를 위한 초기환경특성 조사 및 보고	- 국제 공동 프로그램 협약 추진 - David 빙하 빙저호 지역 환경특성 조사 및 분석자료 확보	100,000
2단계 1차년도	2023	심부 빙저호 물리탐사	○ 탄성과 자료 분석 기술 고도화 - D2 빙저호 지구물리학적 수치모델 작성 ○ 위성 자료 기반 신규 열수시추 후보지 광역 관측 - David 빙저호 후보지 1.5m급 초고해상도 SAR 위성 영상 자료 확보	- 지구물리학적 수치 모델 작성 - 위성영상자료 DB 구축	43,000
		심부 빙저호 청정열수시추 기술개발	○ 심부 빙저호 청정열수시추 시스템 개발 - 2,000m급 시추호스 제작 ○ 심부 빙저호 시추캠프 구축 - 빙저호 시추캠프 설계 ○ 심부 빙저호 열수시추기 국제 공동 개발 - 빙저호 샘플러 개발	- 시스템 제작 - 캠프 설계 - 샘플러 공동개발	500,000
		빙저호 시추	○ 국제 공동 심부 빙저호 시추연구 프로그램 개발 - 한-영 공동 D2 빙저호 시추 프로그램 협약 ○ 빙저호 시추 지역 환경특성 조사 및 분석 자료 종합 - 환경 시료의 이화학적 특성 분석 - 환경 시료의 생물학적 특성 분석	- 국제공동연구 협약 체결 - 빙저호 환경 시료 분석 자료 획득	280,000

2단계 2차년도	2024	심부 빙저호 물리탐사	○ 레이더 자료 분석 기술 고도화 - BRP(bed reflection power) 자료처리 및 mapping 기술 고도화 ○ 신규 빙저호 열수시추 후보지 위성자료 확보 - 해상도 1m급 위성 자료 확보	- 분석기술 고도화 - 위성 자료 확보	28,000
		심부 빙저호 청정열수시추 기술개발	○ 심부 빙저호 청정열수시추 시스템 개발 - Wellhead UV 유닛 제작 ○ 심부 빙저호 시추캠프 구축 - 빙저호 시추캠프 텐트유닛 제작 ○ 심부 빙저호 열수시추기 국제 공동 개발 - 보일러&순환시스템 개발	- 시스템 제작 - 시스템 공동 개발	336,000
		빙저호 시추	○ 국제 공동 심부 빙저호 시추연구 프로그램 개발 - 한-영 국제공동 빙저호 시추프로그램 계획 수립 ○ 빙저호 시추를 위한 초기 환경영향평가서 초안 작성 - 빙저호 시추 지역 환경조사 자료를 기반으로 초기 환경영향평가 초안 작성	- 국제공동연구 계획 수립 - 초기 환경영향평가서 초안 (Draft IEE) 작성	196,000
2단계 3차년도	2025	심부 빙저호 물리탐사	○ 빙저호 지구물리 탐사 자료 분석 기술 고도화 - 레이더 자료 분석 기술 고도화 - 빙저호 표면적, 저수량 계산법 제시 - 레이더 결과 3D 단면도 작성 ○ 신규 시추 후보지 선정 - AWS 설치 및 기상 모니터링 - 신규 시추 후보지 선정	- 레이더 자료 분석 기술 고도화 - 신규 열수시추 후보지 선정	28,000
		심부 빙저호 청정열수시추 기술개발	○ 심부 빙저호 청정열수시추 시스템 개발 - 시스템 멸균 유효성 검증 ○ 심부 빙저호 시추캠프 구축 - 빙저호 시추캠프 설치 운영 ○ 심부 빙저호 열수시추기 국제 공동 개발 - 통합시스템 호환성 테스트	- 시스템 유효성 검증 - 시추캠프 설치운영 - 시스템 통합 테스트	336,000
		빙저호 시추	○ 국제 공동 심부 빙저호 시추연구 프로그램 개발 - 한-영 공동 D2 빙저호 시추 프로그램 현장연구 수행 ○ 빙저호 시추를 위한 포괄적 환경영향평가(CEE) 최종안 제출 - 포괄적 환경영향평가 초안 (Draft CEE) 제출에 따른 평가를 기반으로 최종안 (Final CEE) 작성	- 국제공동 현장연구 수행 - 초기환경영향평가 보고서 최종안(Final IEE) 제출	196,000

3) 연차별 연구 상세내용

1단계 1차년도(2020년) 연구개발 내용 상세기술
1. 심부 빙저호 물리탐사 ○ 탄성과 탐사장비 및 활용기술 확보 - 24채널 탄성과 탐사기 3세트 확보, 총 72채널 이상의 수신기 추가 구성 - 빙원에서의 탄성과 탐사를 위한 지오폰 72개 주문제작 - 보유 중인 24채널 장비와 함께 구성 시 최대 96채널 수신기를 활용한 탐사 가능 - 향상된 효율과 중합단면 구축이 가능한 정밀 탄성과 자료 획득 가능 - 국내최초 96채널 지오폰 시스템을 활용한 빙상 탄성과 탐사시스템 구축 및 활용기술 확보 - 빙저호 탐사 전용 자료처리 워크플로우 개발 ○ 데이비드 빙하 빙저호 지역 레이더 자료 DB구축 - 확보된 D2지역 레이더 탐사자료의 GIS기반 DB구축 - GIS기반 레이더 자료 DB를 활용한 최적의 광역 탄성과 탐사측선 설계 - 위성자료로부터 빙저호 후보지역 표층변위를 관측할 수 있는 시스템 개발 ○ 빙저호 정밀분석을 위한 파동전파 모델기반 분석기술 개발 - 탄성과 탐사자료 정밀분석을 위한 파동전파 모델링(격자크기 2미터 이하) 기술개발 - 파동전파 모델링으로부터 계산된 인공합성자료와 현장자료와의 비교분석을 통해 빙저호 정밀분석과 지구물리학적 특성규명 연구 수행 ○ 국제 공동 남극 심부 빙저호 열수시추기 개발 - 대한민국 주도로 열수시추기 시추동력 발전모듈 개발 2. 심부 빙저호 시추기술 개발 ○ 데이비드 빙하 빙저호 시료 오염 최소화를 위한 청정 분석 시스템 개발 - 고단열 컨테이너 및 극지전용셀매를 활용하여 극지 현장에서 시료 전처리 및 분석 수행이 가능한 국내 최초의 다목적 이동식 청정 실험 모듈 개발 ○ 빙저호 퇴적물 시추 시스템 개발 - 국외 빙저호 퇴적물 시추용 청정 원치-피스톤/다중 시추 장비 기술에 대한 자료 수집 - 빙저호 퇴적물 시추 시스템 구축 자문 3. 빙저호 시추 ○ 빙저호 열수 시추를 위한 한-영 국제 공동 프로그램 개발 - 온라인 매체를 활용하여 극지연구소와 영국 BAS 간 국제 공동 빙저호 시추 프로그램 협의 및 MOU 협약 체결 ○ 심부 빙저호 시추 초기 환경영향평가 대응을 위한 데이비드 빙하 빙저호 지대 생물학적 특성 파악 - 극지연구소 기 보유중인 데이비드 빙하 빙저호 지대 환경시료의 생체량, 생물종 다양성 분석 등 생물학적 특성 분석 수행 - 데이비드 빙하 빙저호 지역 생물학적 특성 분석결과 KPDC 등록

1단계 2차년도(2021년) 연구개발 내용 상세기술

1. 심부 빙저호 물리탐사

- 빙저호 시추 후보지역 광역적 탄성과 탐사
 - 10km 측선 2개로 설계된 십자형 측선에 대한 탄성과 탐사 수행, 총 20 km 탐사자료 획득
 - 현장상황에 따라 최대 96채널로 구성된 수신기를 통한 자료획득
 - 음원의 경우 현장상황에 따라 지면에서 최대 30 m 아래 800g 다이내마이트 장약 후 발파
- 탄성과 자료처리 및 단면구축
 - 신호처리 기반 탄성과 자료처리 수행 (주파수 필터링, 디콘볼루션, 속도분석 등)
 - 최종 탄성과 단면구축 및 2차원적 분석도 제시
 - 파동전파모델링에 의한 인공합성자료와의 비교분석 및 빙저호 특성규명

2. 심부 빙저호 시추기술 개발

- 데이비드 빙하 빙저호 시료 오염 최소화를 위한 청정 분석 시스템 개발
 - 이동식 청정 실험 모듈 극지 현장 시험 운영
 - 다중 필터 및 자외선 조사 시스템을 활용한 심부 빙저호 열수시추 멸균시스템 제작
 - 빙저호 퇴적물 시추 시스템 (피스톤 시추기, 다중 시추기, 청정 원치) 설계
 - 열수 시추기 발전기 및 동력 모듈 개발
- 빙저호 퇴적물 시추 시스템 개발
 - 남극 심부 빙저호 호소퇴적물 시추를 위한 청정 원치 시스템 설계
 - 남극 심부 빙저호 호소퇴적물 시추를 위한 피스톤/다중 시추기 설계
- 국제 공동 남극 심부 빙저호 열수시추기 개발
 - 수조, 보일러, 펌프 등의 심부 빙저호 열수시추기 열수 순환 시스템 개발 및 국내 연구진의 개발과정 참여

3. 빙저호 시추

- 한-영 국제 공동 서남극 빙저호 열수시추 프로그램 현장연구 세부계획 수립
 - 극지연구소-BAS 간 온/오프라인 협의를 통해 서남극 빙저호 열수시추 현장연구 세부계획 수립
- 심부 빙저호 시추 초기 환경영향평가 대응을 위한 데이비드 빙하 빙저호 지대 생지화학적 특성 파악
 - 데이비드 빙하 빙저호 지역 기상 모니터링 자료 확보
 - 데이비드 빙하 빙저호 지역 빙설시료의 생지화학적 분석 수행
 - 데이비드 빙하 빙저호 지역의 기상환경 및 생지화학적 환경 특성 DB 구축

1단계 3차년도(2022년) 연구개발 내용 상세기술

1. 심부 빙저호 물리탐사

- 정밀 탄성과 자료 분석을 통한 2D, 3D 해석도 작성
 - 2021/22 남극 하계시즌 연구활동을 통해 D2지역 빙저호에 대한 2차 정밀 탄성과 탐사 수행 (탐사 일수 : 33일, 탐사인원 : 12명)
 - 기존 48채널 1 fold 수 자료와 비교하여 96채널 8 fold 수 자료를 획득하기 위해 탐사 수행 기간 증가 (10일 -> 33일), 사용 폭약 수량 증가(54kg -> 240kg), 탄성과 시스템 장비(48채널 -> 96채널) 소요됨
 - 탄성과 음원은 96채널을 충분히 커버할 수 있도록 빙하 표면에서 최대 30 m 아래 1,600g PETN 폭약을 장약 후 발파하여 생성
 - 하나의 측선에 8번의 송신(발파)으로 8 fold 자료와 4번의 송신(발파)으로 4 fold 자료를 각각 획득 하도록 탐사 설계
 - 8 fold로 설정된 탐사 측선 21X, 21Y와 4 fold로 설정된 탐사 측선 21XX, 21YY에 대한 양질의 탄성과 자료 획득 (4개 측선 총 측선거리 17 km)
 - 슬럼버저社에서 개발한 탄성과 자료처리 전용 플랫폼 Omega2를 활용, 빙권 탄성과 자료에 맞춘 잡음처리 프로세스 개발, 원시 탄성과 자료에 적용, 신호대 잡음비 (S/N ratio)향상
 - 빙권 탄성과 자료용 잡음처리 프로세스, 정밀 속도 분석 및 구조보정과정을 거쳐 최종 탄성과 단면 구축, 2019년 광역 탄성과 자료 대비 정확한 빙하 두께, 호수의 수심과 규모 파악 완료
 - 정확한 구조해석을 위한 3D 탄성과 해석도 작성 중
- D2 빙저호에 대한 지구물리학적 특성 규명
 - 기반암 구조에 따라 빙하 두께 2,200 - 2,350m 확인
 - 속도 분석을 통해 빙하 내부 탄성과 P파 속도 약 3,800m/s 확인
 - 빙저호 호수 수심 최대 80m로 추정
- 탄성과 자료 기반 빙저호 최적 시추 위치 선정
 - 최근 4년간 기록된 기상 자료와 탄성과 탐사 자료를 종합하여 시추 위치 선정
 - 1년 내내 주 풍향이 남서풍으로 기록, 오염 최소화를 위해 베이스 캠프로부터 오염물질이 바람을 통해 전달되지 않았을 것으로 추정되는 베이스 캠프 남쪽을 시추 후보지로 고려
 - 탐사 측선의 경우 인공 에너지원인 PETN 폭약으로 인한 오염이 있을 것으로 판단, 이에 따라 탄성과 측선구역은 시추 후보지에서 제외.
 - 탄성과 단면상에서 빙하-호수의 경계(역전된 위상을 가지는 강한 반사면)가 분명히 나타나며 그 아래 퇴적층으로부터 기인한 반사면이 존재하는 구간을 빙저호 열수시추 후보지로 판단
 - 2019-20시즌 그리고 2021-22시즌에 걸쳐 획득한 총 6개의 탄성과 측선에 대한 종합적 공간해석을 통해 측선 21X의 shot number 26-36구역과 측선 21Y shot number 4-11구역이 교차되는 지점 인근(노란 실선 박스로 표시)구역을 최적의 빙저호 시추 후보지로 선정

2. 심부 빙저호 시추기술 개발

- 열수시추 열균시스템 극지 시험운영 및 열균 유효성 확인
 - 장보고기지 인근 지역에서 열수시추 열균시스템 시험운영 및 열균 유효성 확인
- 빙저호 퇴적물 시추 시스템 개발
 - 심부 빙저호 호소퇴적물 시추를 위한 청정원치, 피스톤/다중 시추기 제작
 - 독자적인 빙저호 호소퇴적물 시추 운영 기술 정립

3. 빙저호 시추

- 한-영 국제 공동 프로그램 개발
 - 한-영 공동 빙저호 시추 프로그램 개발 재협의, 협약 추진
- 빙저호 시추를 위한 초기 환경 특성 조사 및 보고
 - 남극조약 협약 당사국 회의(ATCM)의 환경영향평가 가이드라인에 따른 초기 환경영향평가 수행
 - 초기 환경특성 조사 결과 보고

2단계 1차년도(2023년) 연구개발 내용 상세기술

1. 심부 빙저호 물리탐사

○ 탄성과 자료 분석 기술 고도화

- 수치해석 기반 파동전파 모델링을 통한 빙하-수층-퇴적층 구조에 대한 탄성과 거동 관측, 실제 현장자료와의 비교를 통한 D2 빙저호 지구물리학적 수치 모델 작성

○ 위성 자료 기반 신규 열수시추 후보지 광역 관측

- DDIInSAR 자료 기반한 신규 시추 후보지 탐색
- 신규 시추 후보지 1m급 초고해상도 SAR 위성 영상 DB 확보
- SAR 위성 영상 분석을 통한 신규 시추 후보지의 육상 접근로 파악

2. 심부 빙저호 청정열수시추 기술 개발

○ 데이비드 빙하 빙저호(D2) 시료 오염 최소화를 위한 청정열수시추 시스템 개발

- 원치 작업과 멸균 과정에 대한 유연성과 내구성을 확보한 2,000m급 고압 시추호스 제작

○ 데이비드 빙하 빙저호(D2) 지역 오염 최소화를 위한 심부 빙저호 시추캠프 구축

- 시추지점 주 풍향을 고려한 캠프 위치 선정과 오염물 비산 방지를 위한 텐트 기반의 고정식 시추캠프 설계

○ 빙저호 청정열수시추기 국제 공동 개발을 통한 원천기술 확보

- 오염되지 않은 빙저호 청정시료 확보를 위한 호숫물 및 퇴적물 샘플러 국제 공동 개발

3. 빙저호 시추

○ 국제 공동 심부 빙저호 시추연구 프로그램 개발

- 극지연구소와 영국 BAS간 국제 공동 데이비드 빙하 빙저호(D2) 시추 프로그램 협의 및 협약 체결

○ 빙저호 시추를 위한 환경특성 조사 및 분석

- 빙저호 시추 지역의 생지화학적 환경특성 조사 및 종합 자료 취합

2단계 2차년도(2024년) 연구개발 내용 상세기술

1. 심부 빙저호 물리탐사

○ 레이더 자료 분석 기술 고도화

- 빙저호 증거 주요 인자인 BRP (bed reflection power) 자료처리 및 mapping 기술 고도화
- 빙저호의 표면적(km²) 및 저수량(km³) 계산법 제시

○ 신규 빙저호 열수시추 후보지 위성자료 확보

- 신규 빙저호 열수시추 후보지 해상도 1m급 위성 자료 확보

2. 심부 빙저호 청정열수시추 기술 개발

○ 데이비드 빙하 빙저호(D2) 시추 오염 최소화를 위한 청정열수시추 시스템 개발

- 빙저호와 직접 접촉이 가능한 시추공으로 투입되는 모든 장치의 최종 멸균 처리를 위한 시추공 최상부 배치용 관통형 Wellhead UV 유닛 제작

○ 데이비드 빙하 빙저호(D2) 지역 오염 최소화를 위한 심부 빙저호 시추캠프 구축

- 가열 모듈, 고압 및 저압 순환 모듈, 열교환 모듈 등의 벌크 플랜트 모듈과 시추공 주변 샘플링 장비들의 직관적 배치운용이 가능한 시추캠프 텐트 유닛 제작

○ 빙저호 청정열수시추기 국제 공동 개발을 통한 원천기술 확보

- 시추수에 열에너지를 전달하는 1차 가열라인, 보일러 배기 폐열을 회수해 재사용하는 열 회수라인, 멸균 상태를 유지하며 시추공으로 분사되는 시추수 순환 라인으로 구성된 보일러&순환시스템 제작

3. 빙저호 시추

○ 국제 공동 심부 빙저호 시추연구 프로그램 개발

- 한-영 국제 공동 데이비드 빙하 빙저호(D2) 시추프로그램 세부계획 수립

○ 빙저호 시추를 위한 포괄적 환경영향평가(CEE) 초안 제출 및 평가

- 빙저호 시추 지역 환경 조사 결과를 기반으로 초기 환경영향평가서 초안 (Draft IEE) 작성 및 제출

2단계 3차년도(2025년) 연구개발 내용 상세기술

1. 심부 빙저호 물리탐사

- 빙저호 지구물리 탐사 자료 분석 기술 고도화
 - 레이더 자료 분석 기술 고도화
 - 빙저호 증거 주요 인자인 BRP (bed reflection power) 자료처리 및 mapping 기술 고도화
 - 빙저호의 표면적(km²) 및 저수량(km³) 계산법 제시
 - 레이더 결과 3D 단면도 작성
- 신규 열수시추 후보지 선정
 - 신규 시추 후보지 기상 자료 획득을 위한 자동기상관측장비(AWS) 설치 및 모니터링
 - 클린 환경을 위해 해당 연구지역 기상 자료를 고려하여 시추 후보지 선정
 - 빙저호 지구물리 탐사 자료를 바탕으로 신규 시추 후보지 선정

2. 심부 빙저호 청정열수시추 기술 개발

- 데이비드 빙하 빙저호(D2) 시료 오염 최소화를 위한 청정열수시추 시스템 개발
 - 빙저호 청정열수시추 시스템 전반에 걸친 오염방지 시스템 유효성 검증
- 데이비드 빙하 빙저호(D2) 지역 오염 최소화를 위한 심부 빙저호 시추캠프 구축
 - 빙저호 시추 현장연구를 위한 이동식 중장비 및 고정식 텐트 기반의 빙저호 시추캠프 설치 운영
- 빙저호 청정열수시추기 국제 공동 개발을 통한 원천기술 확보
 - 단계별 자체 구축 장비 및 공동 개발(활용) 장비 통합 테스트

3. 빙저호 시추

- 국제 공동 심부 빙저호 시추연구 프로그램 개발
 - 한-영 국제 공동 데이비드 빙하 빙저호(D2) 시추프로그램 현장연구 수행
- 빙저호 시추를 위한 포괄적 환경영향평가 최종안 (Final CEE) 제출
 - 초기 환경영향평가 초안(Draft IEE)에 대한 남극조약 협약 당사국 회의(ATCM)의 평가를 기반으로 최종 보고서 (Final CEE) 작성
 - 초기 환경영향평가 보고서 최종안 (Final IEE) 제출

다. 연차별 연구개발 로드맵

1) 총연구기간 로드맵(2020~2025)

연 도		1 단 계			2 단 계		
		2020	2021	2022	2023	2024	2025
성 과 목 표	심부 빙저호 물리 탐사	빙저호 탄성과 탐사 장비 확보	David 빙하 빙저호 광역 탄성과 탐사	David 빙하 빙저호 정밀 탄성과 탐사	빙저호 탐사 및 자료 분석 기술 고도화		
		심부 빙저호 탐사자료 분석 기술 개발		David 빙하 빙저호 시추 최적지 선정			
		빙저호 지표 변위 정밀 관측 기술 개발 및 모니터링			David 빙하 지표 변위 광역 관측	신규 시추 후보지 위성 탐사	신규 시추 후보지 선정
	심부 빙저호 시추 기술 개발	열수시추 열군 시스템 개발 (한정 청정실습실 제작)	열수시추 열군 시스템 제작 (한정 열군 시스템 제작)	열수시추 열군 시스템 시험 운영	2,000m급 시추호스 제작	Wellhead UV 유닛 제작	시추 시스템 열군 유효성 검증
		빙저호 퇴적물 청정시추 시스템 자문	빙저호 퇴적물 청정시추 시스템 설계	빙저호 퇴적물 청정완치, 파스톤/다중시추기 제작	빙저호 시추캠프 설계	빙저호 시추캠프 텐트유닛 제작	빙저호 시추캠프 설치 운영
		빙저호 열수시추기 국제 공동 개발 (시추 동력 발전 등)			빙저호 열수시추기 (보완 및 순환 시스템)	빙저호 열수시추기 (보완 및 순환 시스템)	빙저호 열수시추기 (보완 및 순환 시스템)
	빙저호 시추	빙저호 시추 프로그램 최신 동향 파악	한-영 빙저호 시추 프로그램 개발 협의	한-영 빙저호 시추 프로그램 협약 추진	한-영 빙저호 시추 프로그램 협약 체결	한-영 빙저호 시추 프로그램 계획 수립	한-영 빙저호 시추 프로그램 현장 연구
		빙저호 시추 후보지 초기 환경 특성 조사 (IEE)			빙저호 시추 후보지 종합 환경 특성 조사 (CEE)		

2) 1단계 로드맵(2020~2022)

연 도		1 단 계		
		2020	2021	2022
성 과 목 표	심부 빙저호 물리 탐사	국내 최초 96채널 빙저호 탄성과 탐사 시스템 구축	David 빙하 빙저호 광역 탄성과 탐사	David 빙하 빙저호 정밀 탄성과 탐사
		심부 빙저호 탐사자료 분석 기술 개발	David 빙하 빙저호 물리 특성 파악 및 단면도 작성	David 빙하 빙저호 3차원 단면도 작성 및 시추 최적지 선정
		빙저호 지표 변위 정밀 관측 기술 개발 및 모니터링		
성 과 목 표	심부 빙저호 시추 기술 개발	열수시추 열군 시스템 개발 (0 동식 한정 청정실습실 제작)	열수시추 열군 시스템 제작 (여과/자외선 조사방식 열군 시스템 제작)	빙저호 열수시추 열군 시스템 극지 현장 시험 운영
		빙저호 퇴적물 청정시추 시스템 자문	빙저호 퇴적물 청정시추 시스템 설계	빙저호 퇴적물 청정완치, 파스톤/다중시추기 제작
		빙저호 열수시추기 한-영 국제 공동 개발 (시추 동력 발전 등)		
	빙저호 시추	한-영 빙저호 시추 국제 공동 프로그램 개발	한-영 빙저호 시추 국제 공동 프로그램 계획 수립	서남극 빙저호 시추 현장 연구 참여
		빙저호 지역 생물 다양성 환경 특성 분석	빙저호 지역 지화학 환경 특성 분석 (빙저호 지역 지화학 환경 특성 분석)	빙저호 지역 지화학 환경 특성 분석 (빙저호 지역 지화학 환경 특성 분석)

3) 2단계 로드맵(2023~2025)

연 도		2 단 계		
		2023	2024	2025
성 과 목 표	심부 빙저호 물리 탐사	빙저호 탐사 및 자료 분석 기술 고도화		
		David 빙하 지표 변위 광역 관측	신규 시추 후보지 위성 탐사	신규 시추 후보지 선정
		2,000m급 시추호스 제작	Wellhead UV 유닛 제작	시추 시스템 열군 유효성 검증
성 과 목 표	심부 빙저호 시추 기술 개발	빙저호 시추캠프 설계	빙저호 시추캠프 텐트유닛 제작	빙저호 시추캠프 설치 운영
		빙저호 열수시추기 국제 공동 개발 (보완 및 순환 시스템)	빙저호 열수시추기 국제 공동 개발 (보완 및 순환 시스템)	빙저호 열수시추기 국제 공동 개발 (보완 및 순환 시스템)
		빙저호 열수시추기 (보완 및 순환 시스템)	빙저호 열수시추기 (보완 및 순환 시스템)	빙저호 열수시추기 (보완 및 순환 시스템)
	빙저호 시추	한-영 빙저호 시추 프로그램 협약 체결	한-영 빙저호 시추 프로그램 계획 수립	한-영 빙저호 시추 프로그램 현장 연구
		빙저호 시추 후보지 종합 환경 특성 조사 (CEE)		

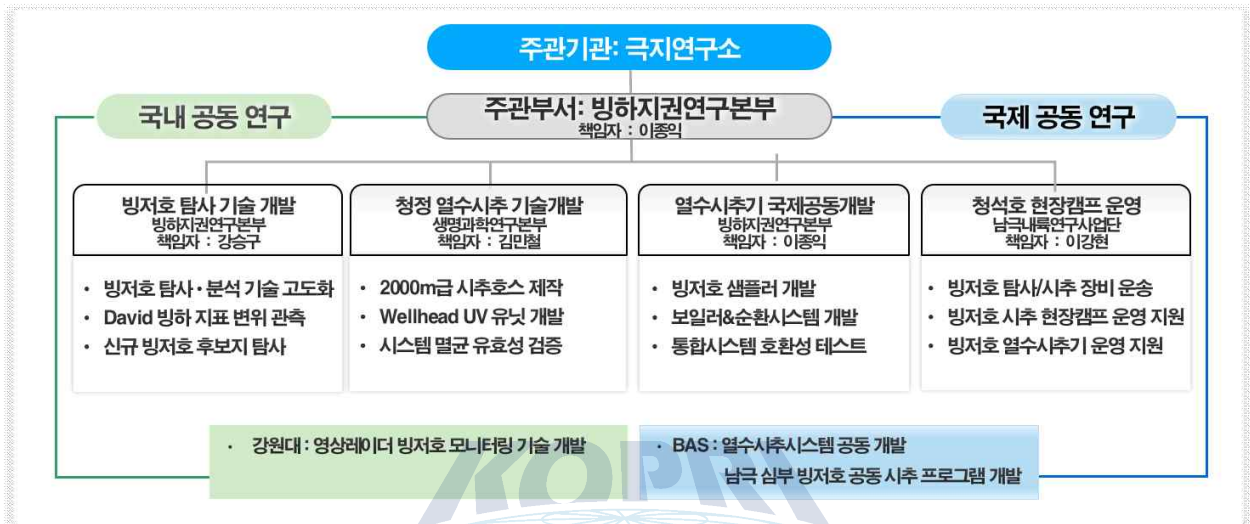
제 2 장 연구실적

1. 계획대비 연구 수행의 적절성

가. 연구수행의 적절성

1) 연구개발 추진체계 및 수행방법

[연구개발 추진체계]



1단계 1차년도 (2020년)	1. 심부 빙저호 물리탐사		
	1-1. 빙저호 지구물리탐사 장비 및 활용기술 확보		
	○ 탄성과 탐사장비 및 활용기술 확보		
	- 극지방 빙상전용 24채널 탄성과 탐사기 4세트, 총 96채널 수신기 확보		
	- 극지방 빙상 설치용 고감도 수신기 100개 구입 (96채널 지오폰 설치용)		
	- 향상된 효율과 중합단면 구축이 가능한 정밀 탄성과 자료 획득 가능		
	- 송신수가 2배 증가할 경우, 자료는 4배 증가되어 신호 대 잡음 비율 2배 향상		
	- 탄성과 탐사장비 구성 현황		
	장비 구성	보유대수	용도
	GEODE	4	24채널 수신기 운용 시스템
	Signal Repeater	3	수신기 신호 증폭 및 GEODE 간 신호 전달
	무선 트리거 신호기	1	발파 트리거 신호 전달 시스템(무선화를 통한 작업능률 증대)
	탄성과 케이블	8	탄성과 케이블 8개(96채널 수신기 시스템 운용)
	지오로드	100	극지방 빙상 설치용 고감도 수신기

- 탄성과 탐사 장비 확보 완료 (2020.05.01.~2020.09.09.)

장비명	보유현황		용도
	2019	2020	
GEODE	1	4	- 탄성과 메인 시스템 - 케이블 및 수신기 제어 - 트리거 신호 입력
REPEATER	0	3	- GEODE간 신호 증폭
CABLE	2 (24채널)	8 (96채널)	- 1개당 24채널 수신기 연결
RADIO TRIGGER	0	1	- 트리거 신호기 - 무전기를 사용하여 무선으로 트리거 신호 전달
GEOROD	50	100	- 탄성과 신호 수신기

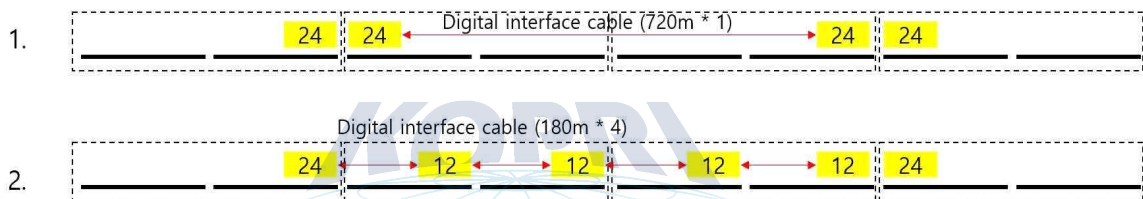


그림 15 제조사(Geometrics)와 장비 구축에 따른 사용 설계 논의

SPECIFICATIONS | Geode Exploration Seismograph

Configurations: 8, 12, 16, or 24 channels in weatherproof field-deployable Geode module. Geode is operated from either Windows XP/7/10-based laptop or by Geometrics' ruggedized StrataVisor NZ field computer/seismograph. Basic operating software controls one Geode. It can also be optionally expanded to control multiple Geodes, as well as do marine surveying, continuous recording, GPS synchronization, and seismic surveillance.

A/D Conversion: 24-bit result using Crystal Semiconductor sigma-delta converters and Geometrics proprietary oversampling.

Dynamic Range: 144 dB (system), 110 dB (instantaneous, measured) at 2 ms, 24 dB.

Distortion: 0.0005% @ 2 ms, 1.75 to 208 Hz.

Bandwidth: 1.75 Hz to 20 kHz, 0.6 and DC, low frequency option available.

Common Mode Rejection: > 100 dB at <= 100 Hz, 36 dB.

Crosstalk: -125 dB at 23.5 Hz, 24 dB, 2 ms.

Noise Floor: 0.20 μ V, RFI at 2 ms, 36 dB, 1.75 to 208 Hz.

Stacking Trigger Accuracy: 1/32 of sample interval.

Maximum Input Signal: 2.8 V PP, 0 dB.

Input Impedance: 20 kOhm, 0.02 μ f.

Preamplifier Gains: Standard factory configuration is 24 and 36 dB. Optional configurations include 12 and 24 dB or 0 dB.

Anti-alias Filters: -3 dB at 83% of Nyquist frequency.

Acquisition and Display Filters:

- **Low Cut:** OUT, 10, 15, 25, 35, 50, 70, 100, 140, 200, 280, 400 Hz, 24 or 48 dB/octave, Butterworth.
- **Notch:** 50, 60, 150, 180 Hz and OUT, with the 50 dB rejection bandwidth 2% of center frequency.
- **High Cut:** OUT, 32, 64, 125, 250, 500 or 1000 Hz, 24 or 48 dB/octave.

Sample Interval: 0.02, 0.03125, 0.0625, 0.125, 0.25, 0.5, 1.0, 2.0, 4.0, 8.0, 16.0 ms.

Correlation: Optional (with SGOS, standard with MGOS) high-speed hardware correlator available in each Geode for fast cycle time with vibrators and pseudo-random sources. Correlates 16K record, unlimited channels, in under 1 second.

Record Length: 16,384 samples standard, 65,536 samples optional.

Pre-trigger Data: Up to full record length.

Delay: Full record length to +100 sec.

Data Transmission: Uses Ethernet transmission standard over CAT-5 copper or multimode fiber-optic cable. Distance between boxes: CAT 5 cable up to 0.25 km; fiber-optic cable up to 1.5 km.

Event Trigger: Based on seismic event; criteria set by user.

Continuous Recording (optional): Record GPS-synchronized, gapless data in SEG-2 format.

Auxiliary Channels: All Geode channels can be programmed as either AUX or DATA.

Roll-along: Built-in, no external roll box required.

Geophone Testing: Pulse test measures resistance, sensitivity, natural frequency, and damping.

Instrument Tests: Optional analog testing available. Measure noise, crosstalk, CMR, dynamic range, gain similarity and trigger accuracy. Additional built-in oscillator required.

Data Formats: SEG-2 standard, SEG-D and SEG-Y available as options.

System Software: Basic operating software includes full complement of acquisition, display, plotting, filtering and storage features. Numerous optional features available; see SCS data sheet.

Bundled Applications Software: SeisImager/2D Lite refraction analysis software from OYO.

Data Storage: Stores data locally in SEG-2 on laptop/PC media. Drivers available for tape/disk storage in SEG-2/D/V.

Plotters: Drives any Windows-compatible plotter or printer.

Triggering: Positive/negative TTL or contact closure, software adjustable threshold. STA/LTA-like algorithm for triggering on seismic waveform.

Power: Requires 12V external battery. Uses 0.5 W/channel during acquisition (0.25 ms sample rate). A single 12 Amp-hour battery is sufficient for a typical day of data acquisition; standby mode reduces power consumption by 70%.

Environmental: Operates from -50°C to +70°C (-58°F to +158°F). Waterproof and submersible. Withstands a 1m drop onto concrete on 6 sides and 8 corners. Passes MIL-810E/F vibration.

Physical: L: 25.4 cm; W: 30.5 cm; H: 17.75 cm; Weight: 3.6 kg (10x12x7 in; 8 lb). Uses waterproof Bendix 61-pin connector for geophone input.

Operating System: Windows XP/7/10.

Warranty: Three years standard, extended warranty available.

Optional Built-In Test Functions

Instrument:	Geophone:
• Noise	• Natural Frequency
• DC Offset	• Resistance
• Gain Accuracy	• Damping
• Gain and Phase Similarity	• Sensitivity
• Distortion	
• Crossfeed	
• CMR	
• Bandwidth	
• Timing Accuracy	

Specifications subject to change without notice. GeodeDS_v1 (0518)



GEOMETRICS INC. 2190 Fortune Drive, San Jose, California 95131, USA
Tel: 408-954-0522 • Fax: 408-954-0902 • Email: sales@geometrics.com

GEOMETRICS EUROPE 20 Eden Way, Pages Industrial Park, Leighton Buzzard LU7 4TZ, UK
Tel: 44-1525-383438 • Fax: 44-1525-382200 • Email: chris@georentals.co.uk

GEOMETRICS CHINA Laurel Geophysical Instruments Limited
8F, Building 1, Damei Plaza, 7 Qingnian Road, Chaoyang District, Beijing, 100025 China
Tel: +86-10-85850099 • Fax: +86-10-85850991 • laurel@laurelgeophysics.com.cn

그림 16 사양서-계속



GEOMETRICS

Simplify your search

Geode Repeater Module Specification Sheet

Repeater module, used to boost signal between Geodes separated by greater than 250 m, includes one power cable.

The repeater module is nearly the same as an 8-ch Geode. It contains one 8-ch acquisition board. Since it is just a repeater, it does not have a Bendix connector. Exact same specs environmentally as a geode.

Power: Requires 12V external battery.

Environmental: Operates from -50°C to +70°C (-58°F to +158°F). Waterproof and submersible. Withstands a 1m drop onto concrete on 6 sides and 8 corners. Passes MIL810E/F vibration.

Physical: L: 25.4 cm; W: 30.5 cm; H: 17.75 cm; Weight: 3.6 kg (10x12x7 in; 8 lb).



그림 17 REPEATER 사양서



그림 18 탄성과 탐사기

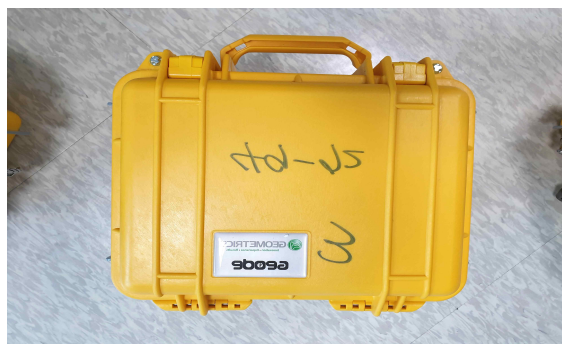


그림 19 탄성과 탐사기

그림 20 탄성과 탐사기

그림 21 Digital interface cable



그림 22 탄성과 케이블

그림 23 탄성과 케이블

< 탄성과 탐사 96채널 시스템 구성 완료 >

그림 24 Signal Repeater

10._ SPECIFICATIONS

PHYSICAL:

CARRYING CASE: 19.75" x 15.50" x 7.50" H (501.65mm x 394.46mm x 189.48mm)
Foam lined, Waterproof to IP67/MIL-STD 810F-512.4
SIZE each unit: 5.8L x 3.9W x 4.5H inches 14.7 x 9.9 x 11.4 cm with handles
WEIGHT each unit: 3 pounds, 1.3 kg, with batteries
POWER: 6 size "C" alkaline flashlight batteries, internal battery holder
BATTERY LIFE: up to 200 hours with alkaline "C" cells, less with speaker on

TRANSMITTER:

KEYS: XMT (transmit), TST (test), ON (power on), OFF (power off)
LIGHTS: low battery (flashes), transmit, trigger sent, power on (flashes)
AUTO OFF: power turns off if no trigger has been sent for 40 to 50 minutes
XMIT TIME: auto mode: 20 seconds max, manual mode: 50 seconds max
TRIGGER INPUT: PIN A trigger input, 470 ohm pullup resistor to +5V, falling edge signal causes trigger
PIN B common for pins A and C
PIN C ready input, 470 ohm pullup resistor to +5V, falling edge starts auto transmit mode, latched
MATING CONNECTOR: Cannon KPT06B8-3P
OUTPUT TO RADIO: PIN A signal output, AC coupled, 0-0.7 VAC adjustable
PIN B common for pin A, AC coupled
PINS C and D, SPST NO relay contacts for push to talk switch function, isolated from other signals
MATING CONNECTOR: Cannon MS3116F8-4S
SIGNAL: frequency shift keying (FSK), mark = 2750Hz, space = 2250Hz
START GEOPHONE: Optional high sensitivity trigger input. Triggers on any positive or negative change in voltage exceeding threshold voltage. Threshold adjustable from 0.12 to 1.8 volts. Works with a geophone or trigger switch.

RECEIVER:

KEYS: SPK (speaker), TST (test), ON (power on), OFF (power off)
LIGHTS: low battery (flashes), receiving tone, trigger received, power on (flashes)
AUTO OFF: power turns off if no trigger has been received for 40 to 50 minutes
INPUT FROM RADIO: PIN A speaker or headphone signal from radio, 0.05-2.0 VAC, AC Coupled, adjustable
PIN B common for pin A, AC coupled
PIN C and D external speaker output, 8 ohms, 250mW, adjustable
MATING CONNECTOR: Cannon MS3116F8-4P
TRIGGER OUTPUT: PIN A trigger output, open collector NPN, turns on for 50ms at trigger, needs external pullup resistor in seismograph to maximum of +18 volts current limited to 100ma, has reverse polarity protection
PIN B common for pins A and C
PIN C ready output, open collector NPN, turns on whenever valid tone is being received, follows RECV light, needs external pullup resistor to maximum of +18 volts, current limited 100ma, reverse polarity protected
MATING CONNECTOR: Cannon KPT06B8-3P
DELAY: Total system delay of trigger 2.5 milliseconds.
Jitter (variation from trigger to trigger) less than 0.1 milliseconds.

그림 25 사양서



**GISCO RADIO TRIGGER LINK
MODEL G-ST-10
OPERATION MANUAL**
REVISED 1/2012



GISCO
6323 Cambridge St.
Minneapolis, MN 55416 USA

1-800-523-1526 952-929-8000 FAX-952-926-5498
email: service@giscogeo.com website: <http://www.giscogeo.com>

JHN 1/2012

그림 26 RADIO TRIGGER 사양서



그림 27 Radio trigger

- 탄성과 탐사를 위한 지오로드 100개 구성
- 지오로드 수신기 단점 보완 및 구매 (2020.05.01.~2020.09.09.)

지오로드	구매년도	수량	구매 내용
보유현황	2019	50	기존 제품이 가진 단점을 제조사에 문의하여 보완된 제품 주문제작
	2020	50	
기존 제품 보완점	- 기존 제품은 센서를 에폭시로 마감 처리되어 수리 불가능 - 에폭시 대신 덮개를 사용하여 센서 교체, 수리 가능하도록 보완함		

Request

The use of Georods in the snow is perfect.

However, even if only one of Georods four sensors fails, it may not be usable or performance may be degraded.

To improve this I suggest. Instead of using epoxy, it would be better to configure hardware that can open and close.

Answer

I've talked with Sridhar some as well and we've come to the conclusion to leave the Georod the same shape, but instead of epoxying the geophones in, we'll put a lid on with screws so that the sensors can be changed should one go bad. We're working on the CAD for that now and will update you soon!

< 지오로드 단점 보완을 위한 제조사 문의 및 답변 >



그림 28 2019년도 구매 제품

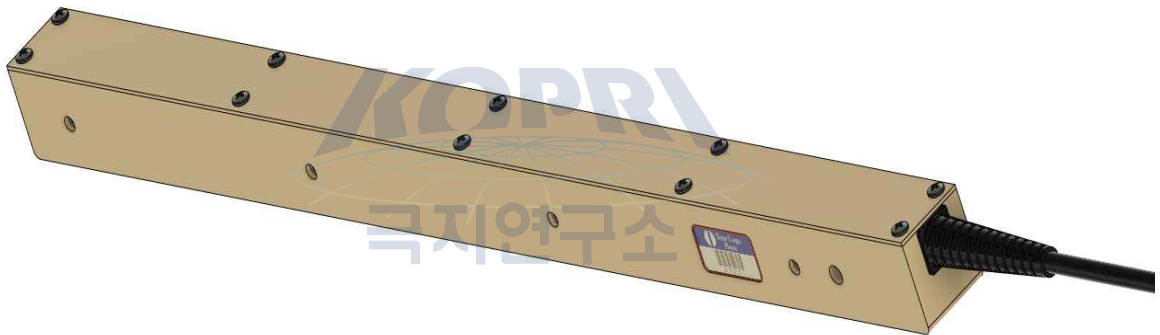


그림 29 단점이 보완된 2020년 버전-지오로드 덮개 단면도

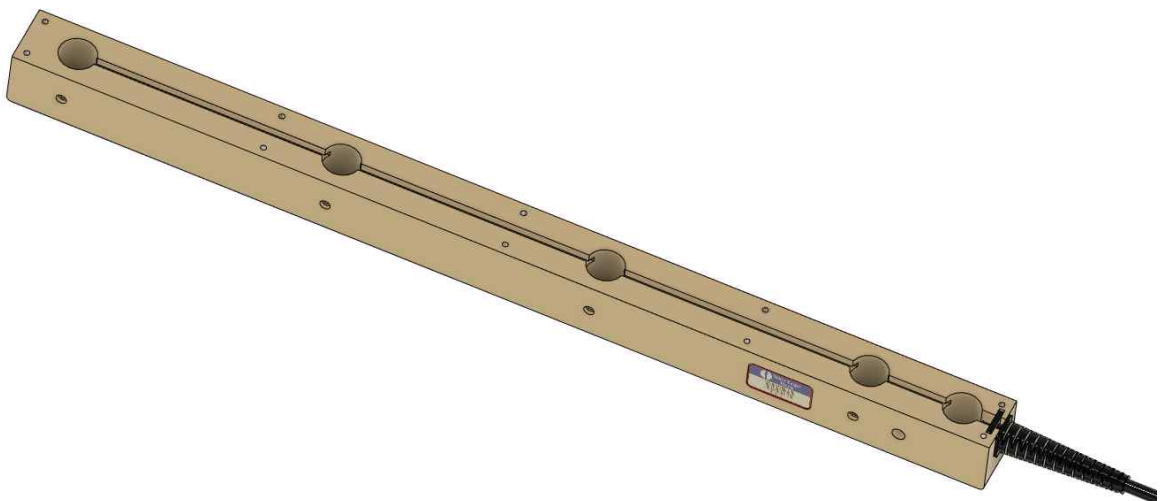


그림 30 단점이 보완된 2020년 버전-지오로드 오픈 단면도

	DESCRIPTION OF CHANGE	ECO NO	CHG BY	DATE

SENSING SYSTEMS ENGINEERING

PRODUCT / CUSTOMER SPECIFICATION

FOR

GS-20DM 40Hz-270Ω OMNITILT

P / N

98131



© OYO GEOSPACE
Houston, Texas
PROPRIETARY NOTICE

This document, whether patentable or non-patentable subject matter, embodies proprietary and confidential information and is the exclusive property of OYO GEOSPACE. It may not be reproduced, used or disclosed to others for any purpose except that for which it is loaned, and it shall be returned on demand. All rights reserved.

OYO GEOSPACE
Houston, Texas U.S.A.

DATE DWN.

10/21/05

CHECK BY

TITLE

GS-20DM 40-270 OMNITILT

SHEET 1 OF 3

APP. BY

SPECIFICATION #

S- 98131

REV.

그림 31 지오로드 센서 사양서

**PRODUCT/CUSTOMER
SPECIFICATION**

GEOPHONE MODEL: GS-20DM
ORIENTATION: OMNITILT

FREQUENCY: 40 Hz
PART NUMBER: 98131

DC RESISTANCE: 270 Ω

<u>DESCRIPTION</u>	<u>SPECIFICATION @ 25°C</u>	<u>TOL±</u>
NATURAL FREQUENCY	<u>40 Hz</u>	<u>7.5%</u>
TILT ANGLE, MEASURE FROM <u>HORIZONTAL</u>	<u>±90 °</u>	
FREQUENCY SHIFT AT TILT ANGLE	<u>N.S.</u>	
NATURAL FREQUENCY WITH TILT	<u>40 Hz</u>	<u>7.5%</u>
CLEAN BAND PASS	<u>> 850 Hz</u>	
DC RESISTANCE @ 25°C (R _c)	<u>270 Ω</u>	<u>5.0 %</u>
INTRINSIC VOLTAGE SENSITIVITY (G)	<u>0.384 V/in/sec, 0.151 V/cm/sec</u>	<u>10 %</u>
NORMALIZED TRANSDUCTION CONSTANT Coil Resistance (R _c) <u>270 Ω</u>	<u>.0234 $\sqrt{R_c}$ V/in/sec</u>	
OPEN CIRCUIT DAMPING (B _o)	<u>.42</u>	<u>15 %</u>
MOVING MASS (M)	<u>5.6 gr</u>	<u>5 %</u>
COIL EXCURSION P-P	<u>> .04 in, >.10 cm</u>	
HARMONIC DISTORTION @ <u>40 Hz</u> WITH DRIVING VELOCITY OF .7 in/sec (1.8 cm/sec) P-P @ TILT <u>±90°</u>	<u>< .50%</u> <u>< .50 %</u>	
DAMPING CONSTANT (B _c R _c)	<u>81.2</u>	
OPERATING AND STORAGE TEMPERATURE	<u>- 45 to +100 °C</u>	
MAXIMUM OPERATING TEMPERATURE	<u>100 °C continuous duty</u>	
DIMENSIONS		
WEIGHT	<u>1.5 oz, 43 gr</u>	
DIAMETER	<u>0.875 in, 2.22 cm</u>	
HEIGHT (Less Stud)	<u>1.04 in, 2.64 cm</u>	

OYO GEOSPACE

SHEET 2 OF 3

S-98131

그림 32 사양서 계속

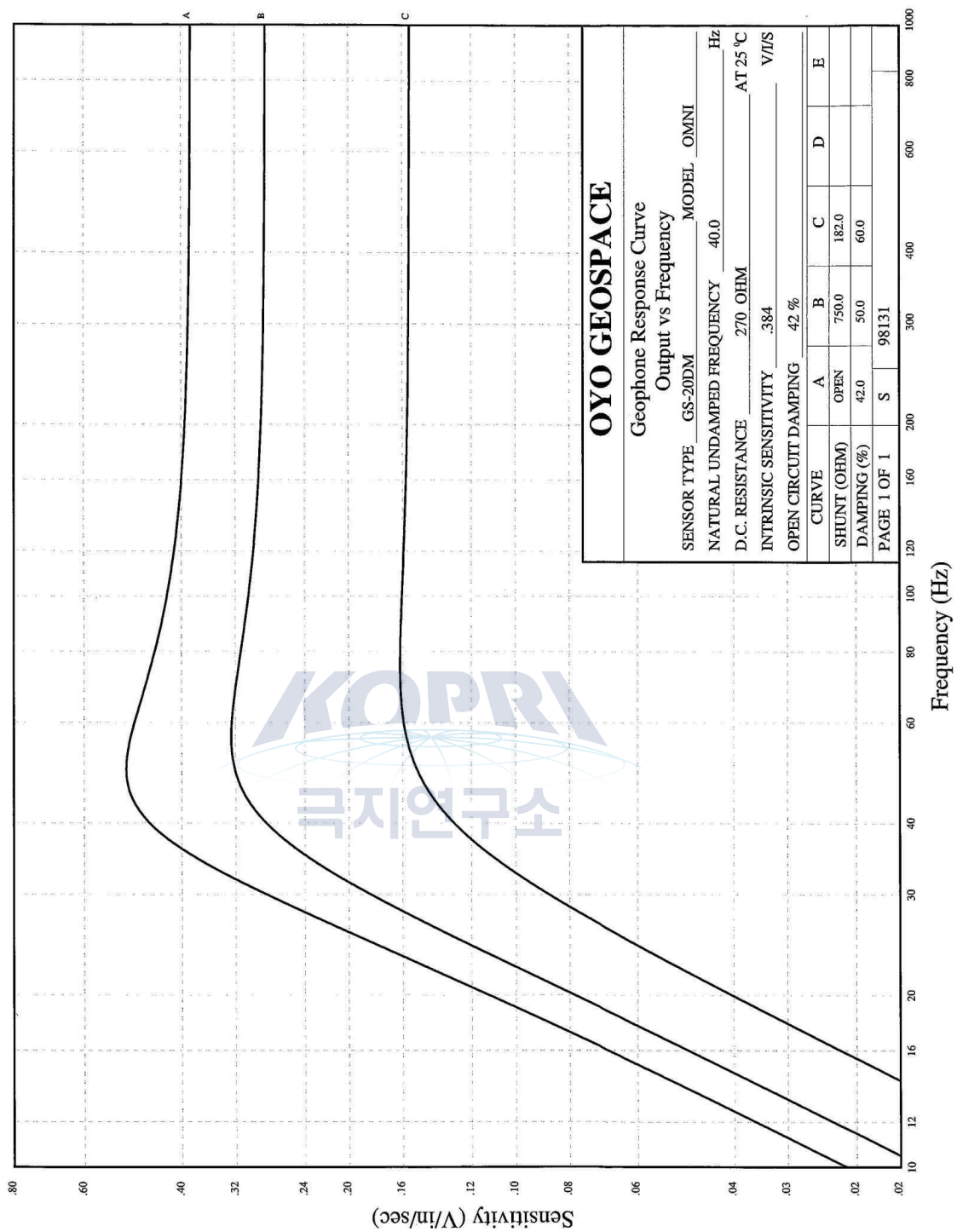


그림 33 사양서



그림 34 2020년 버전 지오로드 50개 구매 완료

- 빙저호 탐사 후보지역에 대한 GIS기반 레이더 자료 DB구축 및 활용
 - 소내 보유중인 레이더/탄성과 탐사자료에 대한 체계적인 위치기반 분석을 위한 GIS 소프트웨어 기반 레이더 탐사자료 DB구축
 - 데이비드 D2지역 레이더 자료(821 km²)의 효율적 관리, 탐사지역에 대한 광역적 지질정보 확보

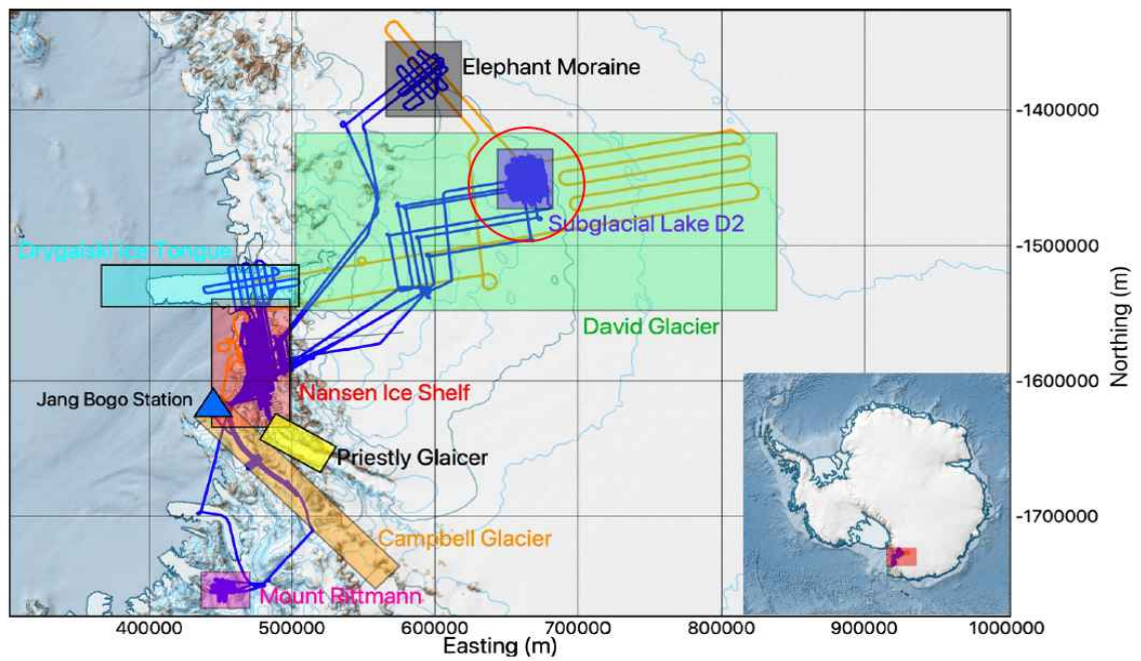


그림 35 데이비드 빙하 D2지역 지도 및 레이더 탐사 측선 표시

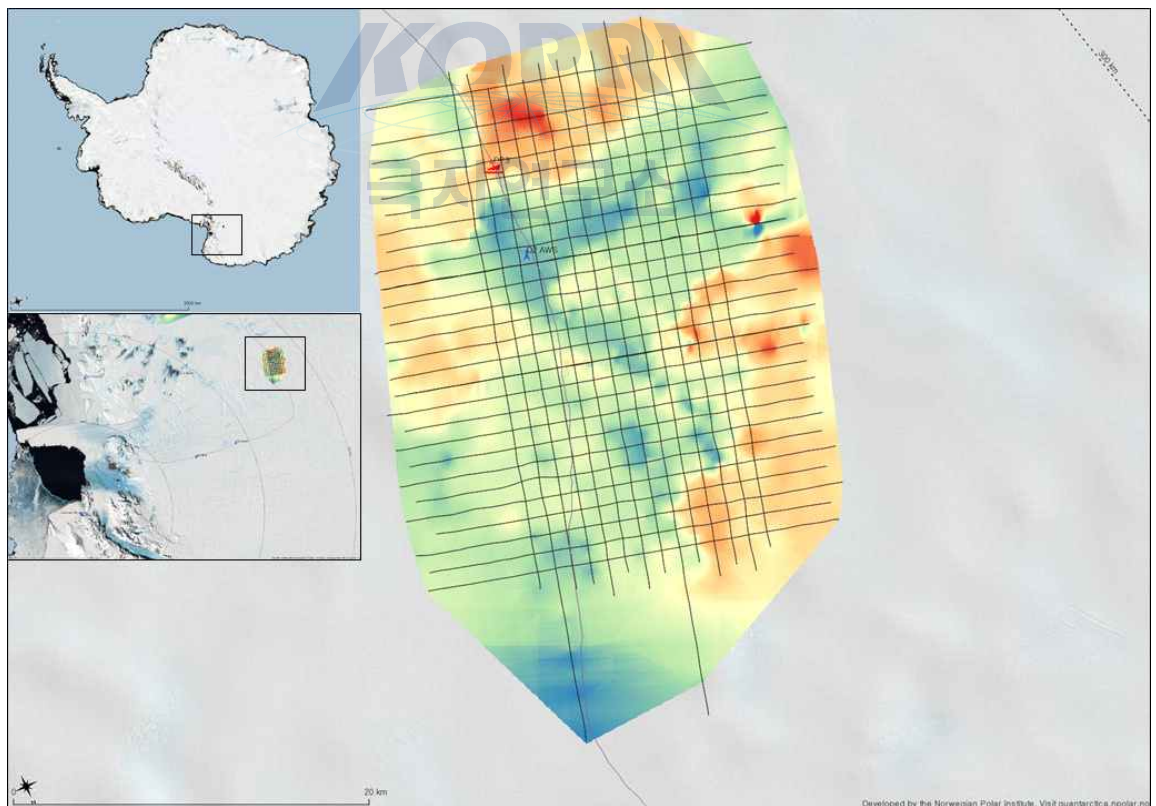


그림 36 데이비드 빙하 D2 빙저호 지역 레이더(IPR) 자료 GIS DB 구축

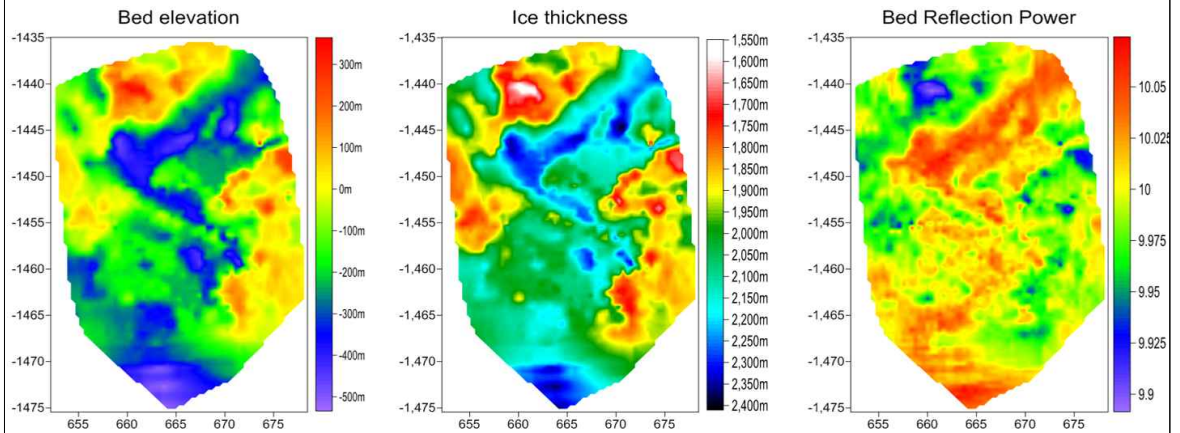


그림 37 D2지역 레이더 탐사자료 GIS 기반 DB. IPR 측선 및 고도, 얼음두께 그리고 반사강도 추정도

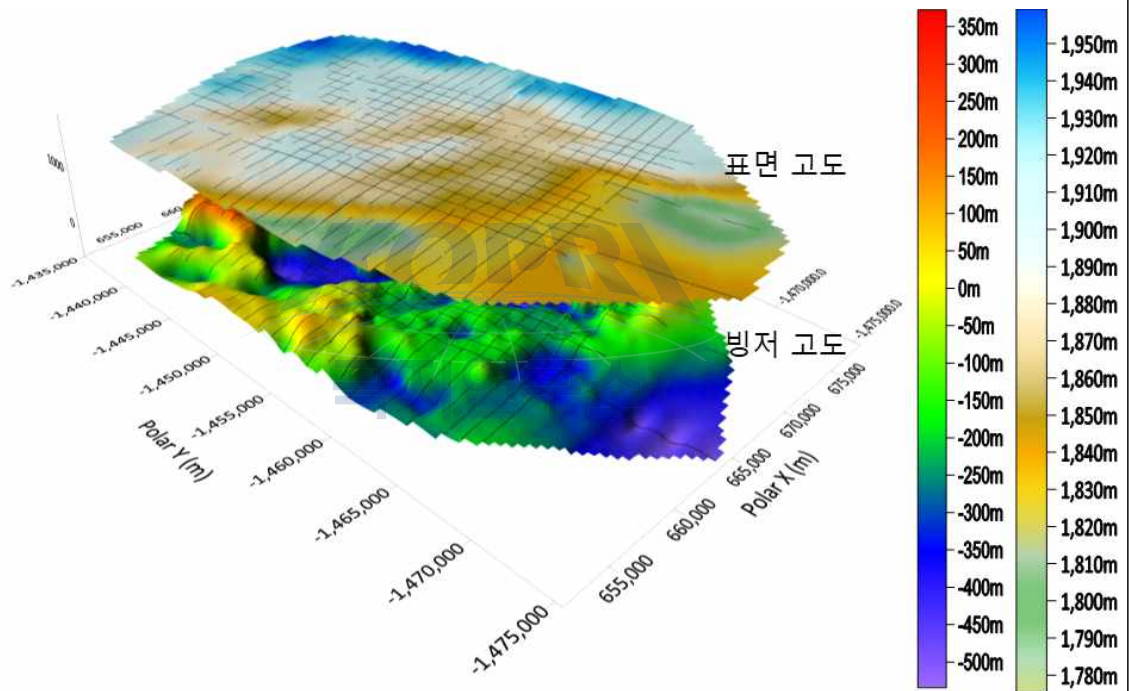


그림 38 레이더 자료 3D 도시화

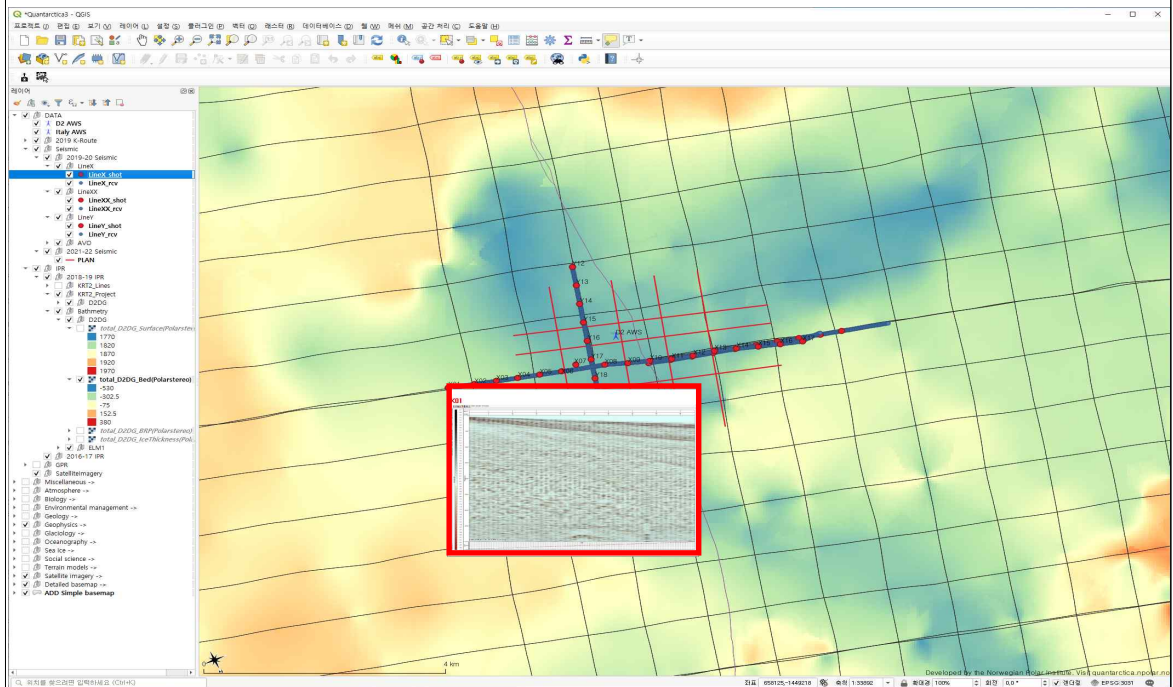


그림 39 QGIS DataBase. 탄성과 축선 및 자료(Shot gather) 및 레이더 자료 도시화

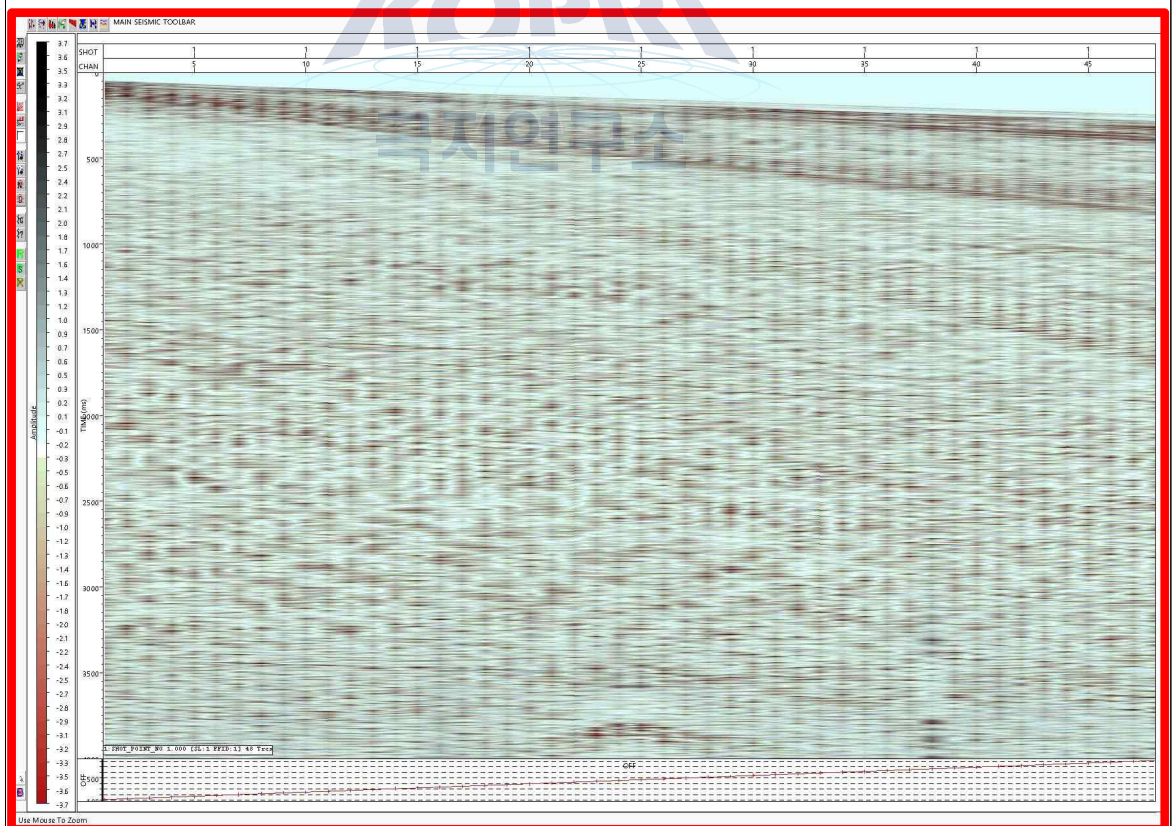


그림 40 탄성과 자료 GIS DB 구축

○ 탄성과 탐사측선 설계

- 2021/22년 시즌 탄성과 탐사 측선 설정을 위해 레이더 자료 및 탄성과 탐사 자료 활용
- 2019/20년 시즌 탄성과 자료를 기초하여 빙저호의 깊이가 깊고, 빙하-빙저호 경계면의 반사 강도가 뚜렷한 지역을 중점으로 2021/22년 추가 탄성과 탐사 계획 측선 설정 완료
- 우선 순위에 따른 측선 Plan A, B, C 설정 완료

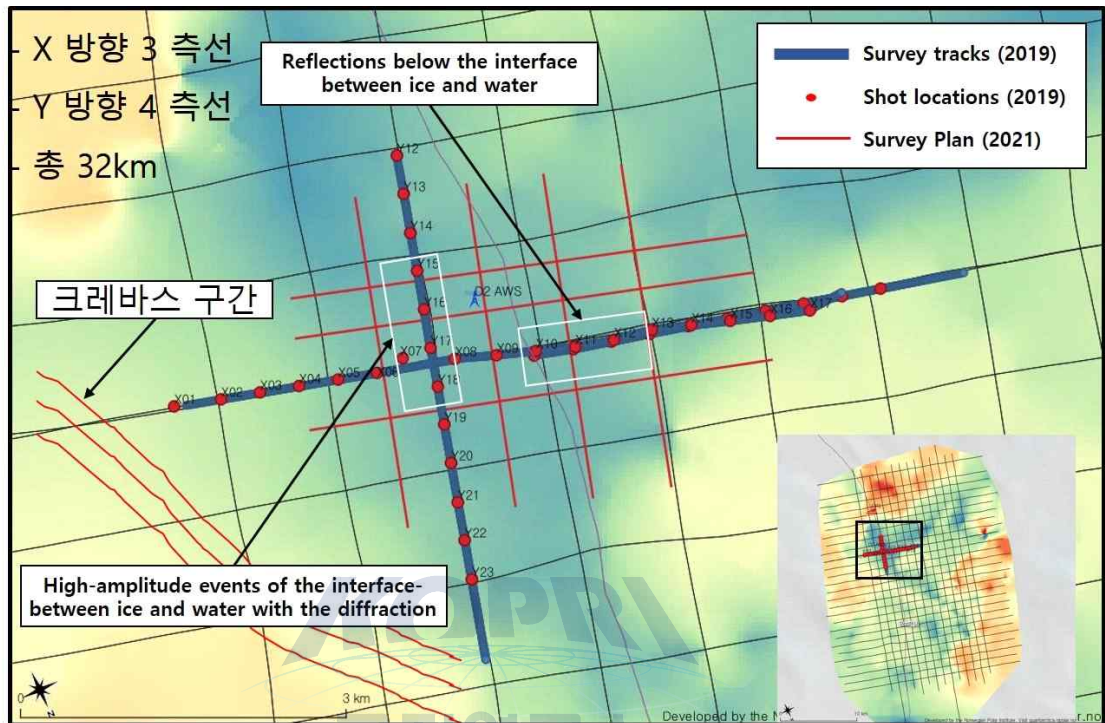


그림 41 2021/22 시즌 탄성과 탐사 계획

○ 빙저호 정밀분석을 위한 파동전파 모델링 기반 탄성과 자료 분석기술 개발

- 빙저호 탄성과 단면구축을 위한 상용 자료처리 소프트웨어(오메가2)기반 워크플로우 개발 및 활용
- 탄성과 탐사자료 정밀분석을 위한 파동전파 모델링(격자크기 2m 이하) 기술개발
- 빙저호 분석용 파동전파 모델링 개발 및 활용을 통한 David 빙하 빙저호의 지구물리학적 특성 분석, 모델링을 통해 계산된 인공합성 자료와 실제 현장에서 획득한 탐사자료와의 직접적인 비교를 통해 빙저호에 대한 심도 있는 해석과 정확한 지구물리학적 특성분석
- 2019년 획득된 D2 빙저호 현장 탄성과 탐사 결과를 기초로 탐사 현장 환경과 동일한 조건을 고려한 모델 완성(탐사장비 사양, 빙저호에 대한 지질학적 배경 및 크레바스 위치와 같은 탐사환경 일치)

Unit Cell for Staggered-Grid Formulation

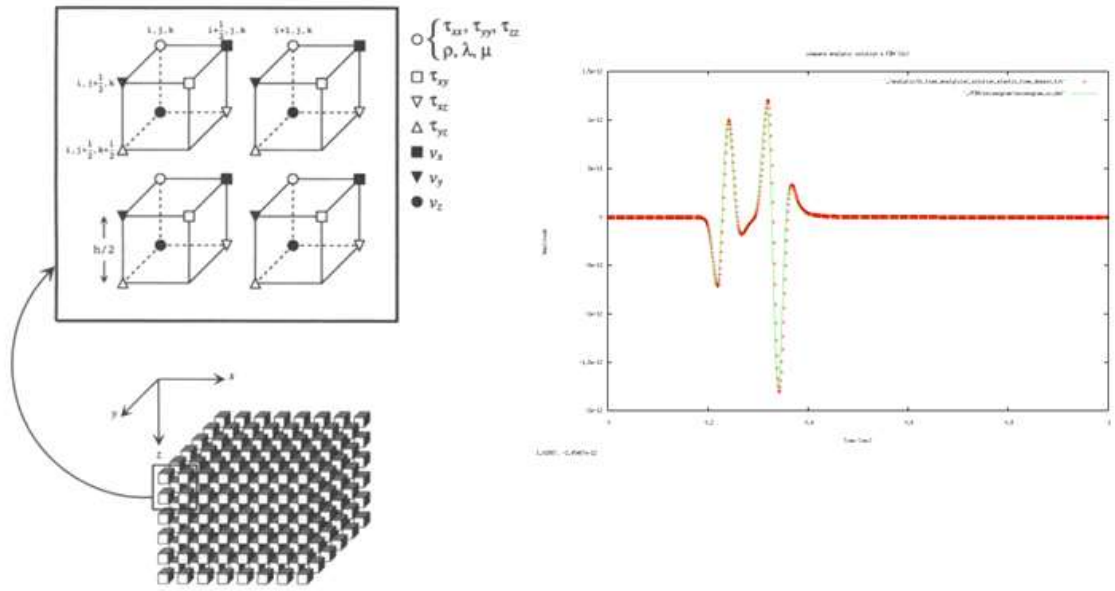


그림 42 엇격자 유한차분법 방법 사용

< Test 모델 정보 >

구분	모델 사양		
Model size	8 km (Width) X 3.3 km (Depth), 1.5 m grid		
Layer	Layer	thickness	velocity
	ice	2.3 km	3.84 km/sec
	water	6.25 m 12.5 m 25 m 50 m	1.44 km/sec
	basement	1.0 km	1.8-3.0 km/sec
Source	Ricker wavelet zero-phase, 0.02km depth		
Shot location	0.3 km, 3 km, 6 km		
Receiver	Surface, Full seismogram		
Receiver interval	0.015 km		
Modeling grid size	0.001 km		
Recording time	4 sec		
Sampling rate	0.0001 sec (10 kHz)		

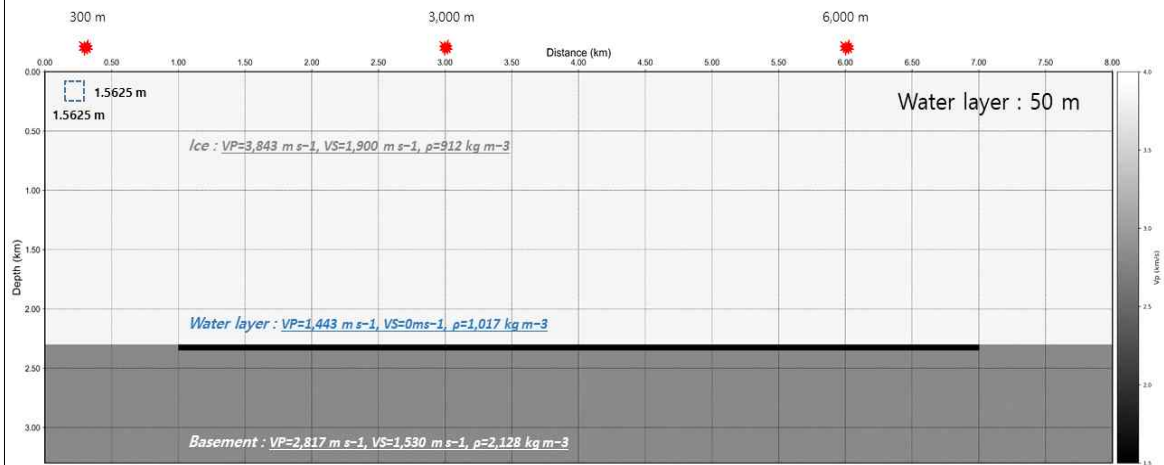


그림 43 Test 모델 모형

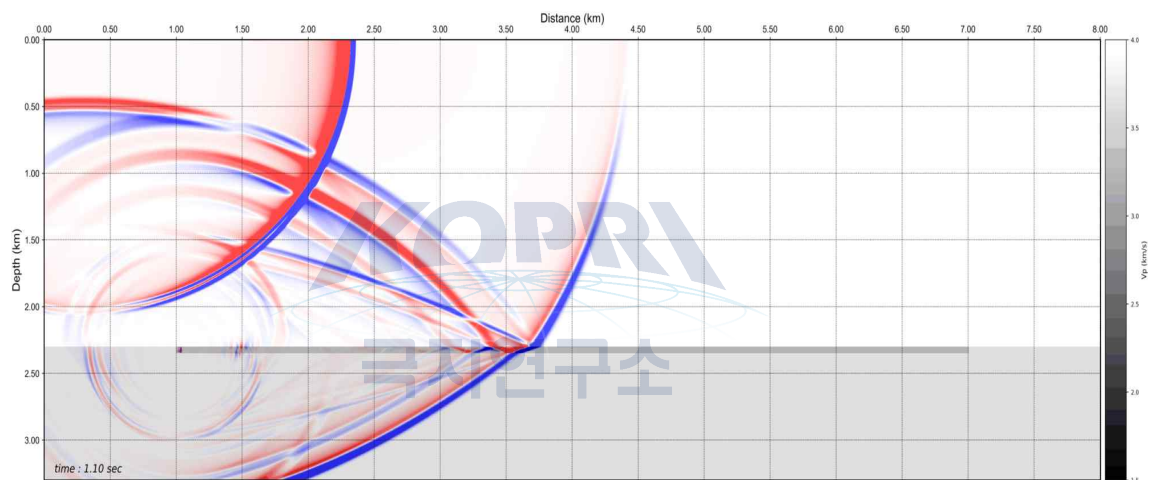


그림 44 shot location 0.3km, water thickness 6.25m의 모델링 1.1sec 경과 후 결과 단면도

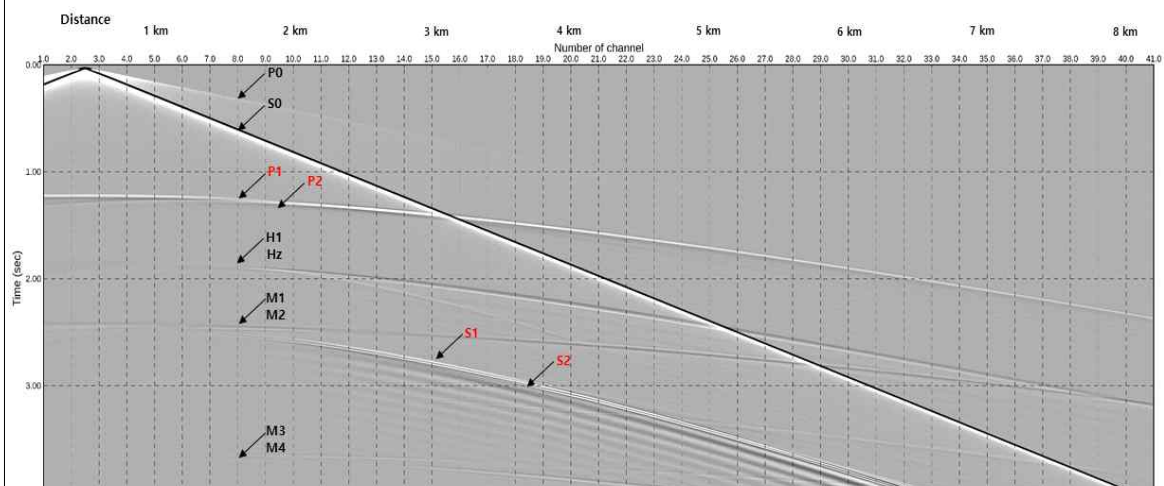


그림 45 Test 모델 shot location 0.3km, water thickness 6.25m shot gather

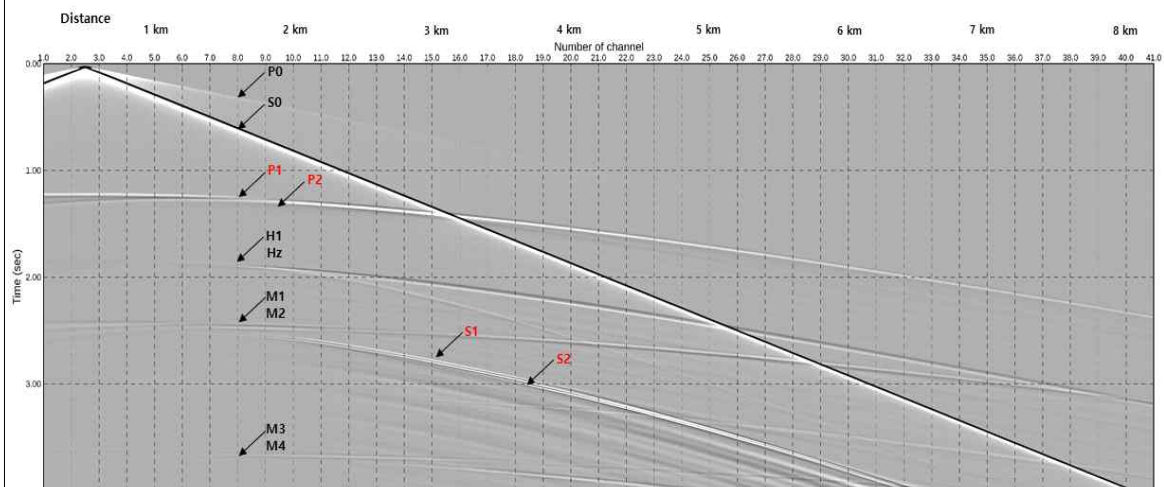


그림 46 Test 모델 shot location 0.3km, water thickness 12.5m shot gather

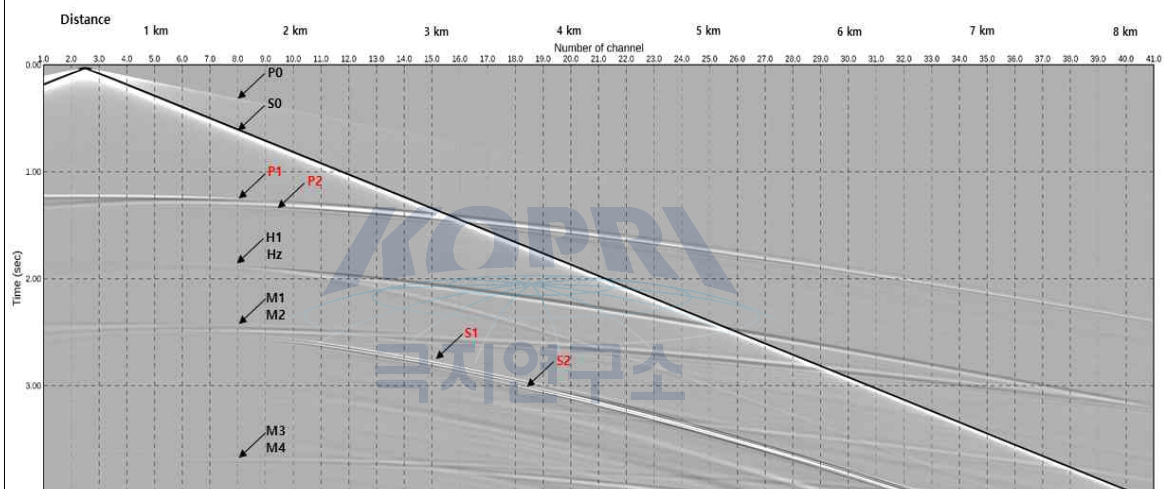


그림 47 Test 모델 shot location 0.3km, water thickness 25m shot gather

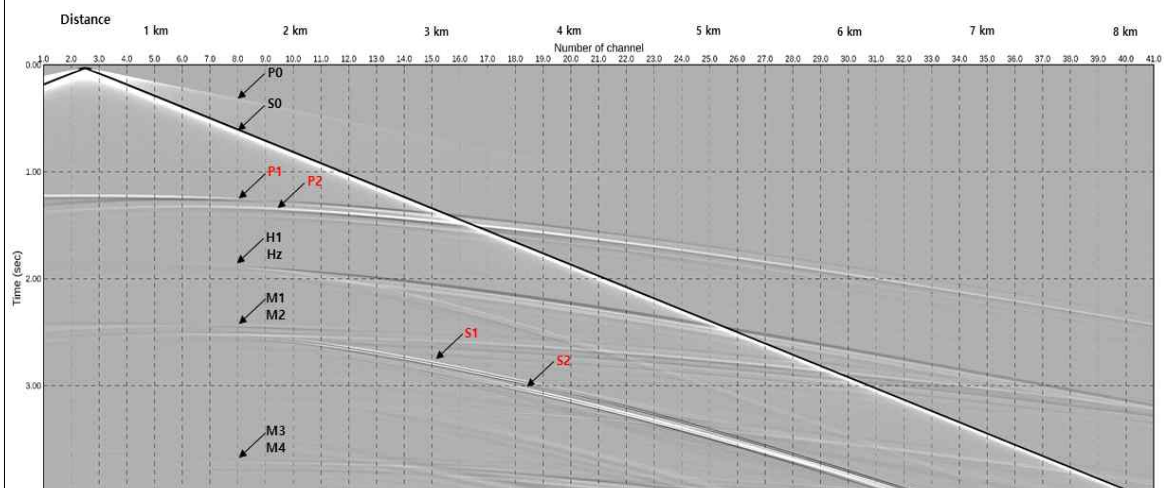


그림 48 Test 모델 shot location 0.3km, water thickness 50m shot gather

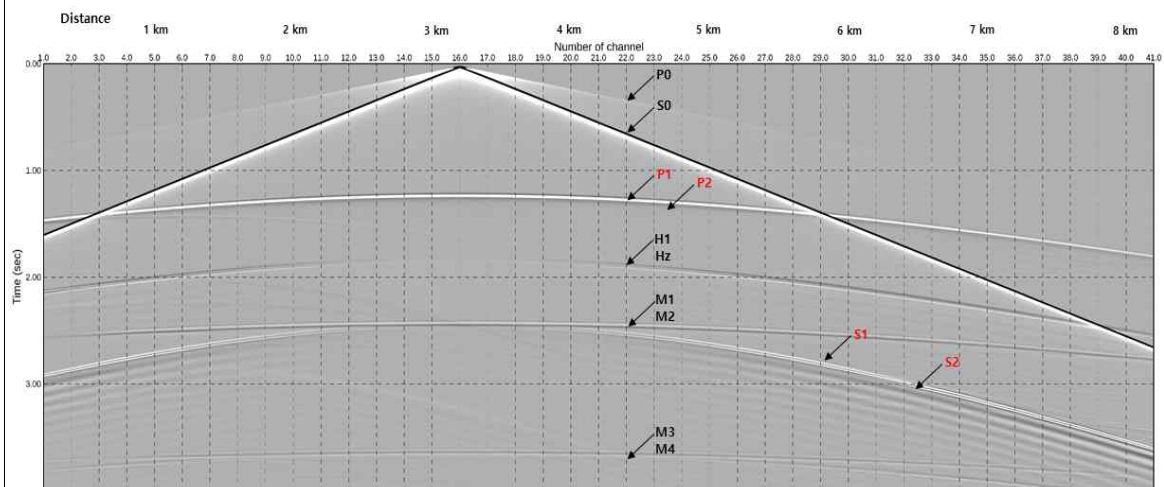


그림 49 Test 모델 shot location 3km, water thickness 6.25m shot gather

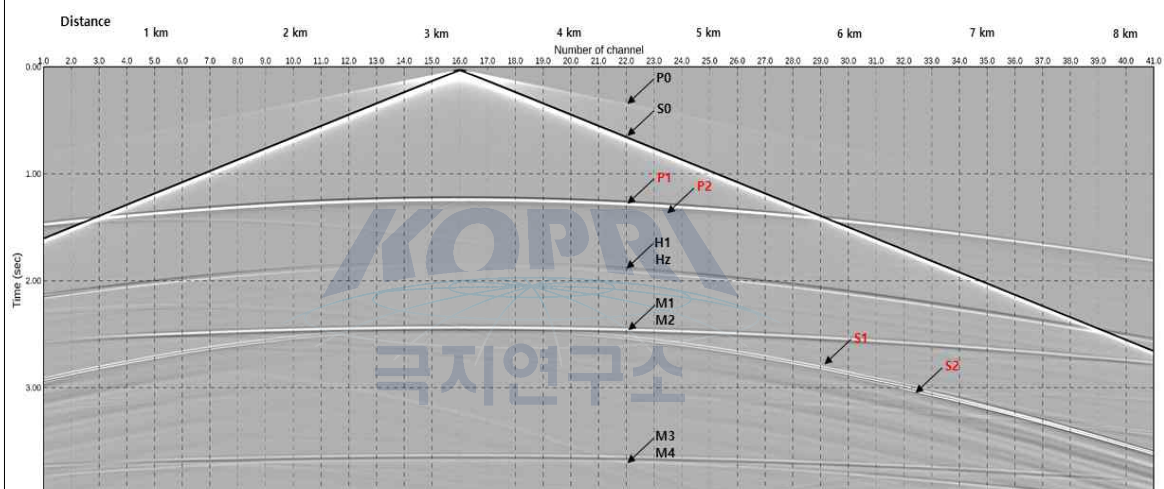


그림 50 Test 모델 shot location 3km, water thickness 12.5m shot gather

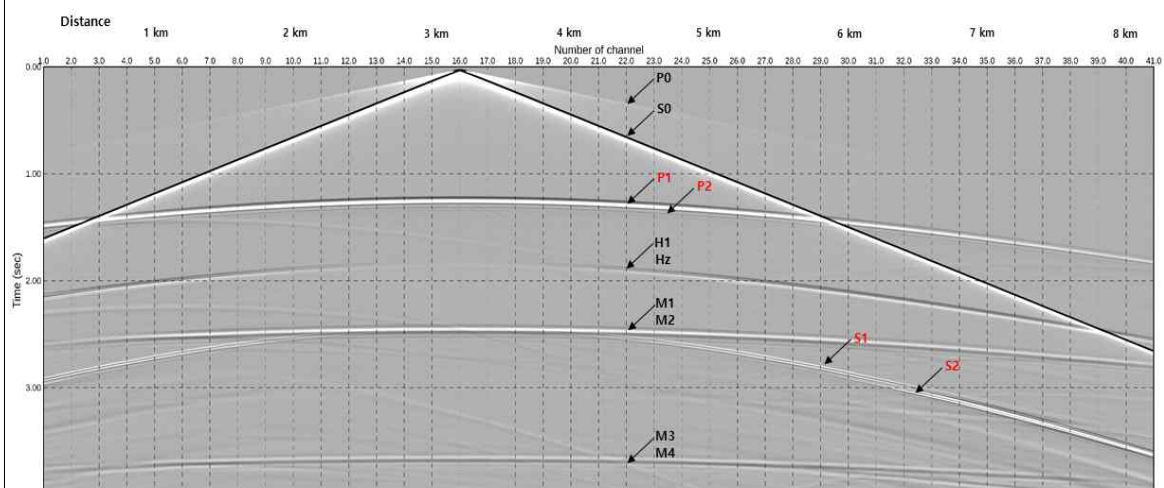


그림 51 Test 모델 shot location 3km, water thickness 25m shot gather

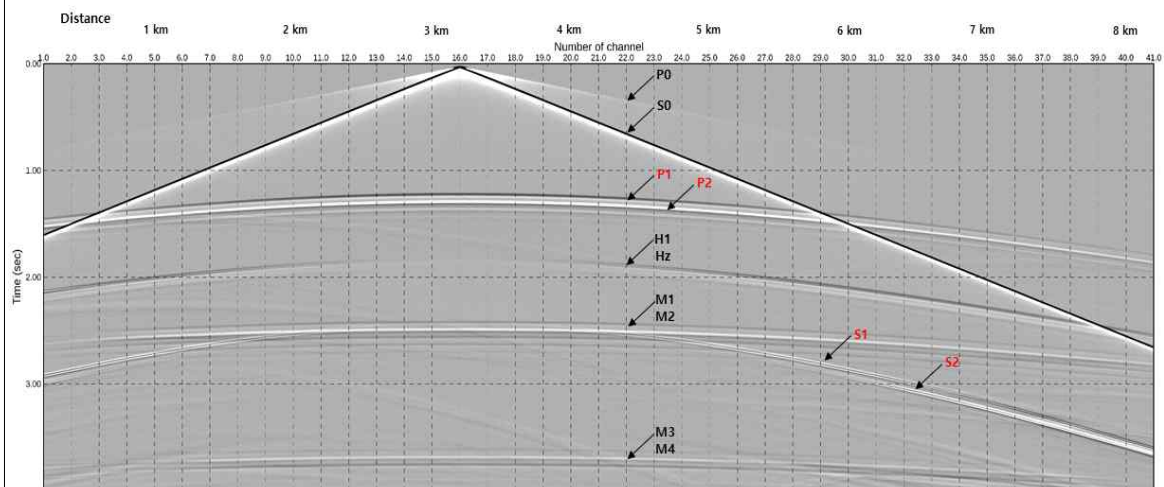


그림 52 Test 모델 shot location 3km, water thickness 50m shot gather

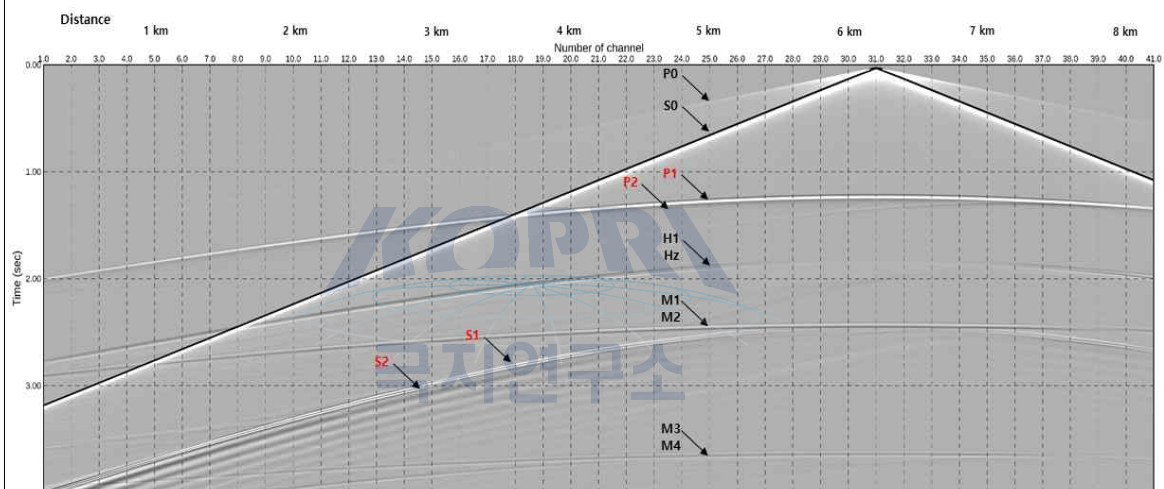


그림 53 Test 모델 shot location 6km, water thickness 6.25m shot gather

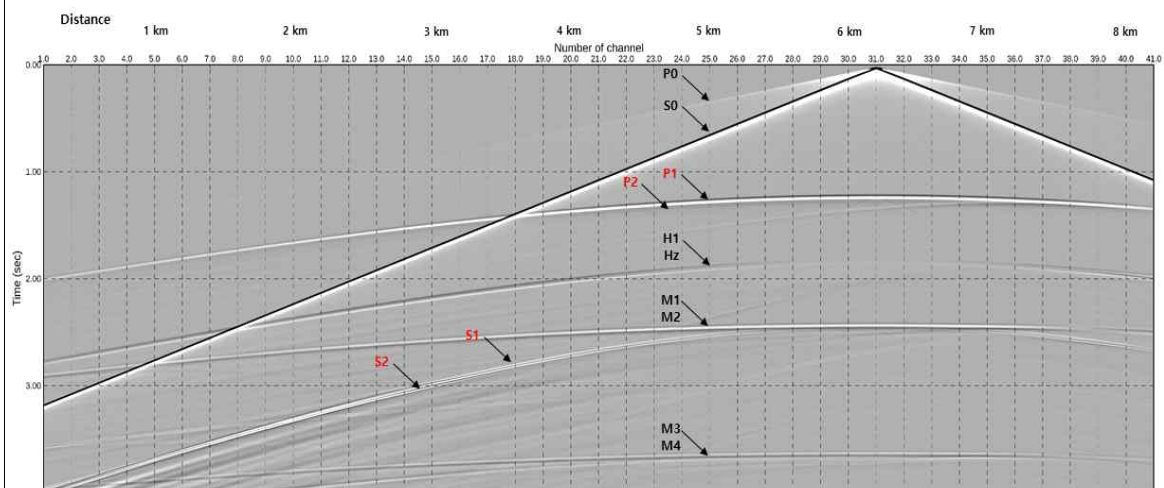


그림 54 Test 모델 shot location 6km, water thickness 12.5m shot gather

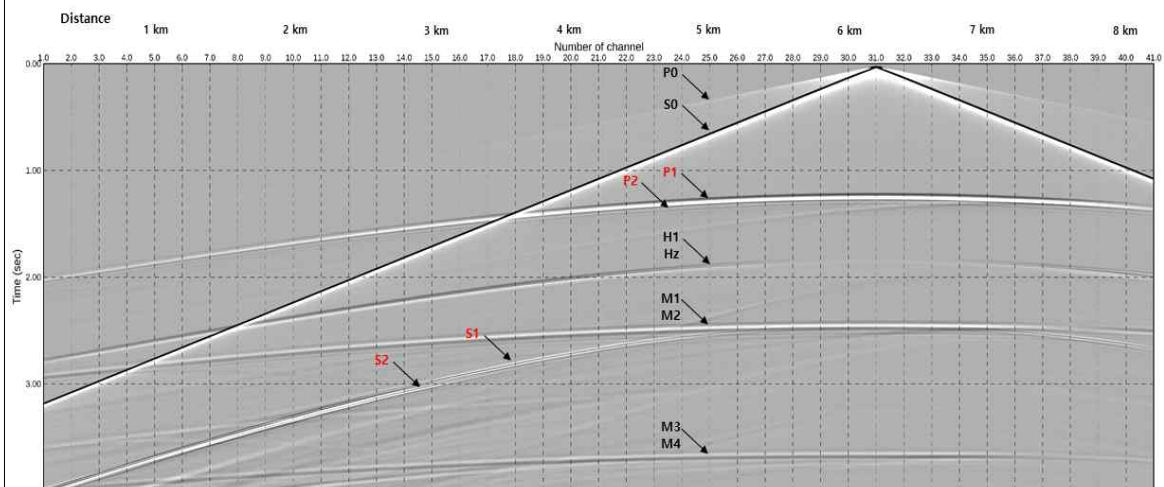


그림 55 Test 모델 shot location 6km, water thickness 25m shot gather

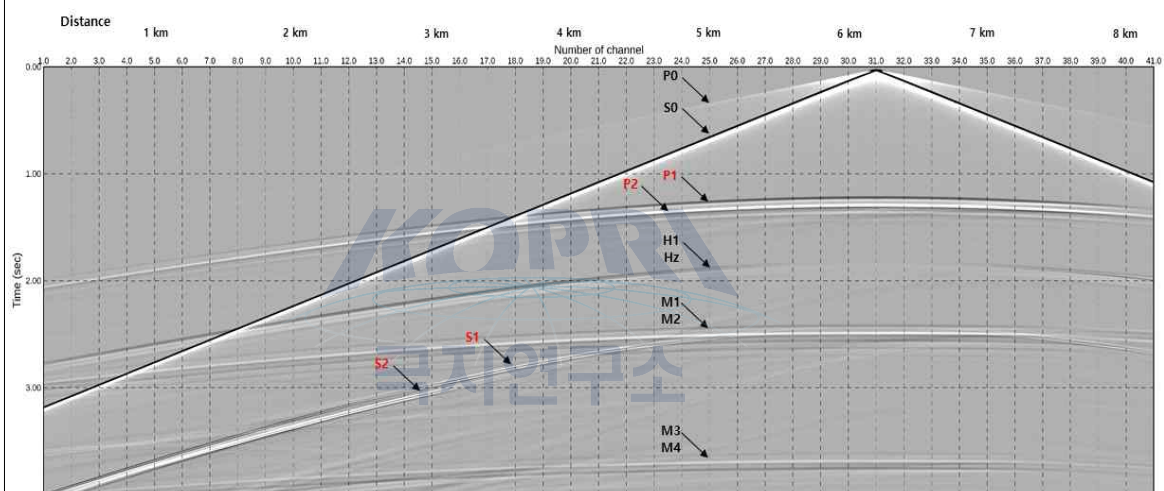


그림 56 Test 모델 shot location 6km, water thickness 50m shot gather

<빙저호 모델 정보>

구분	모델 사양		
Model size	8 km (Width) X 3.3 km (Depth), 1.5 m grid		
Layer	Layer	thickness	velocity
	ice	2.3 km	3.84 km/sec
	water	0.05 km	1.47 km/sec
	basement	1.0 km	1.8-3.0 km/sec
Source	Ricker wavelet zero-phase, 0.02km depth		
Shot interval	0.36 km		
Receiver	Surface, Full seismogram		
Receiver interval	0.015 km		
Modeling grid size	0.001 km		
Recording time	4 sec		
Sampling rate	0.0001 sec (10 kHz)		



그림 57 빙저호 모델 모형

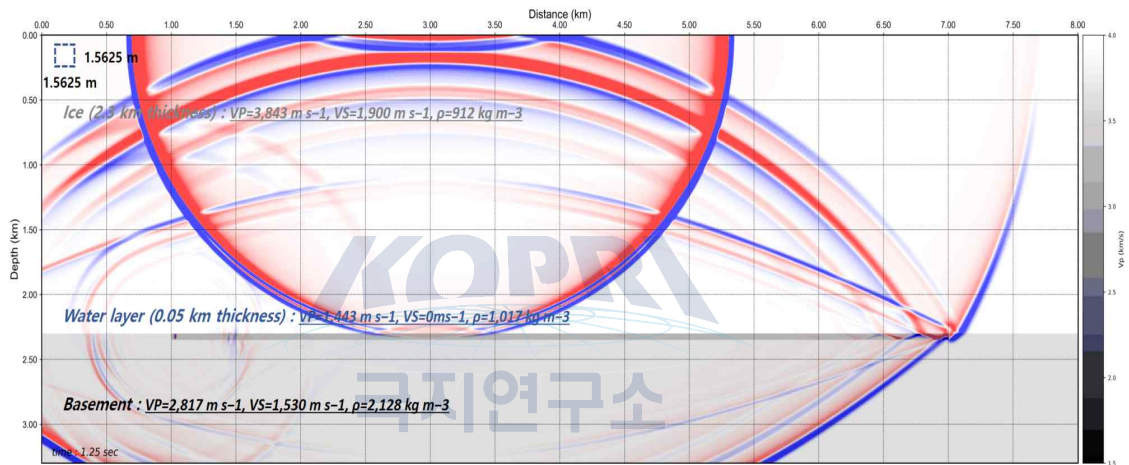


그림 58 shot interval 0.36km, water thickness 50m의 모델링 1.25sec 경과 후 결과 단면도

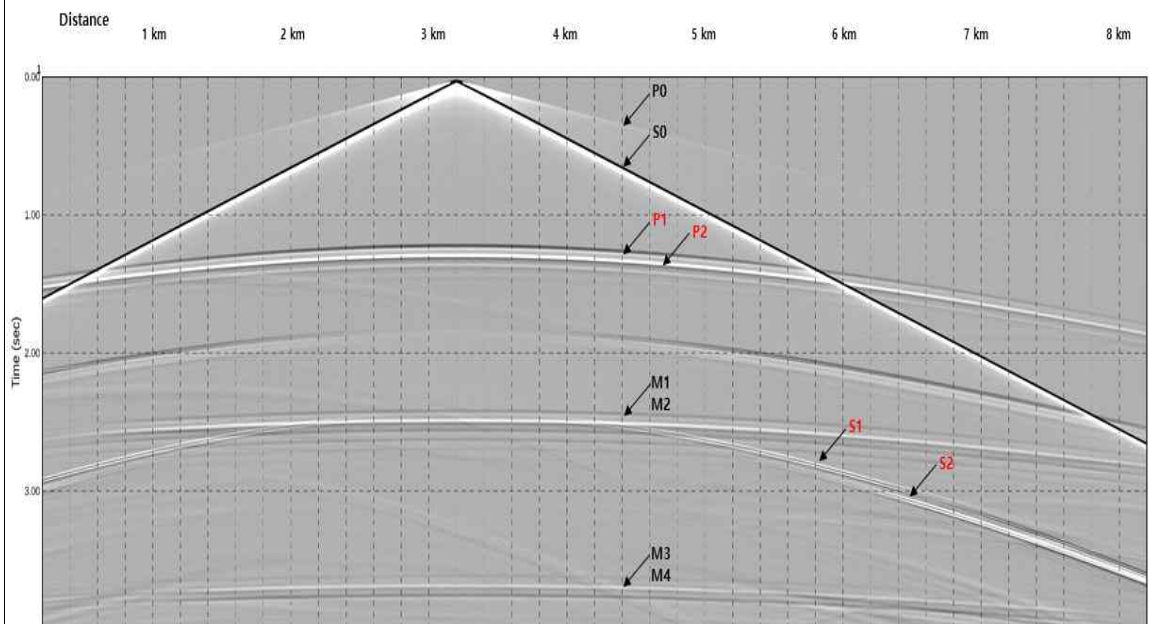


그림 59 Shot location 3km shot gather

< 빙저호 모델 정보 >

구분	모델 사양		
Model size	8 km (Width) X 2.6 km (Depth), 1.5 m grid		
Layer	Layer	thickness	velocity
	crevasse	0.01 km	0.33 km/sec
	ice	2.3 km	3.8 km/sec
	water	0.01 km	1.47 km/sec
	basement	0.29 km	1.8-3.0 km/sec
Source	Ricker wavelet zero-phase, 0.02km depth		
Shot interval	0.36 km		
Receiver	Surface, Full seismogram		
Receiver interval	0.015 km		
Modeling grid size	0.001 km		
Recording time	4 sec		
Sampling rate	0.0001 sec (10 kHz)		

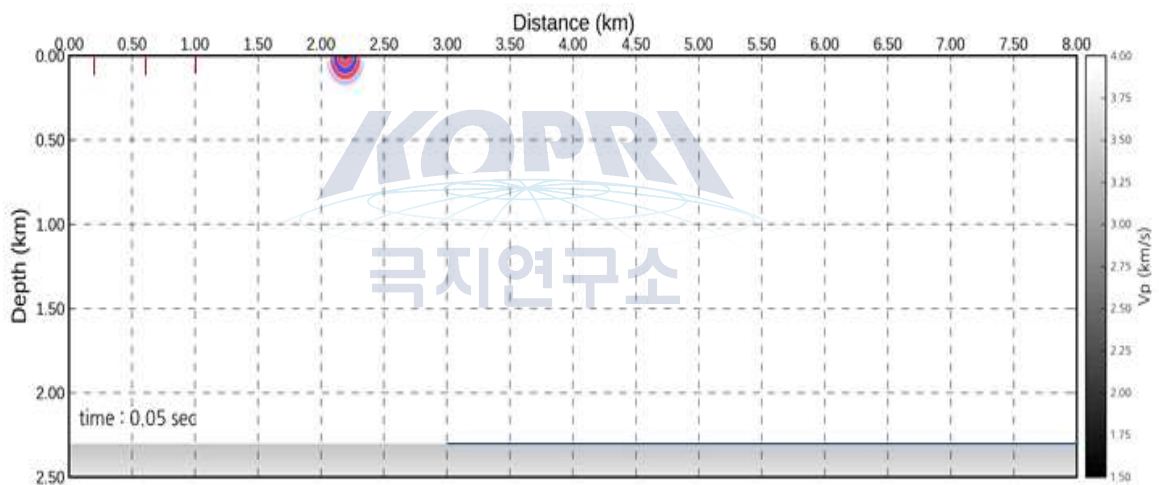


그림 60 Water thickness 10m, 100m 폭의 크레바스 3개 설정된 모델

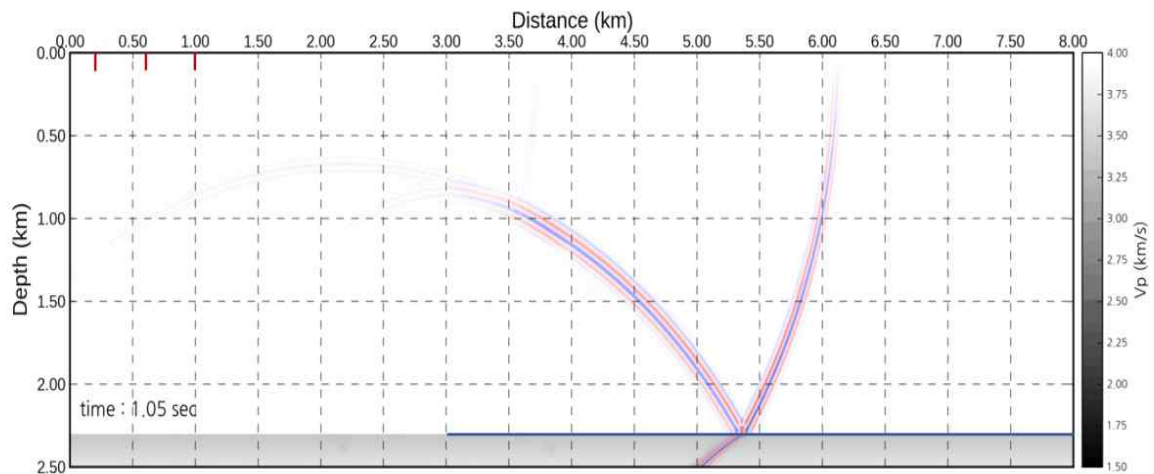


그림 61 100m 폭 크레바스 3개, water thickness 10m의 모델링 1.25sec 경과 후 결과 단면도

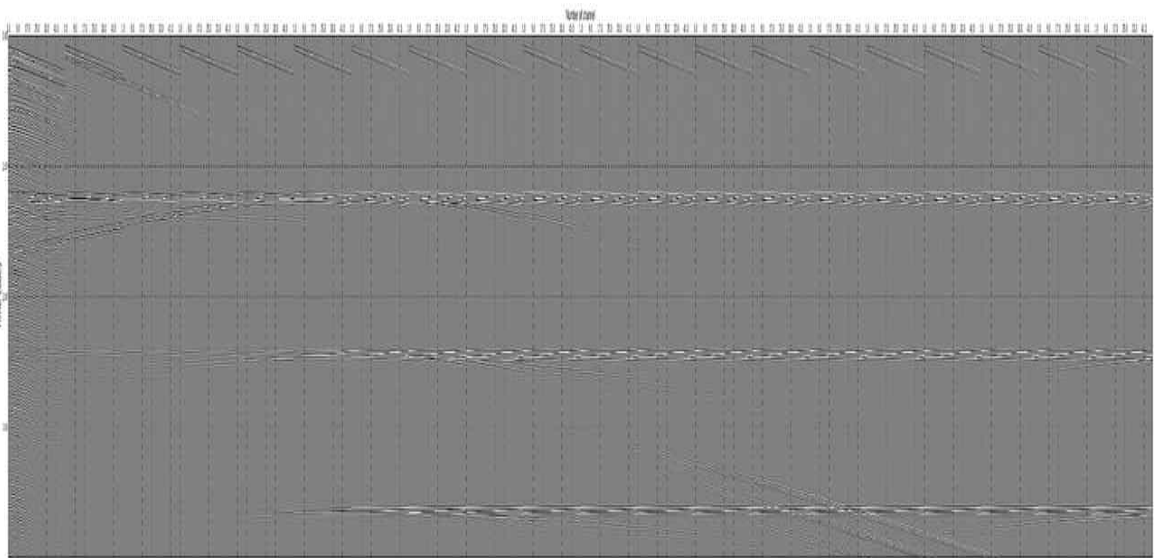


그림 62 shot gather



2. 심부 빙저호 시추기술 개발

2-1. 이동식 청정실험실 개발

○ 고단열 컨테이너를 활용한 이동식 청정실험실 합체 제작

- 고도의 단열성과 혹독한 환경에서의 내구성을 확보하여 남극의 극저온 환경과 설면 이동 시의 충격으로부터 연구장비를 보호할 수 있는 컨테이너 설계 제작
- 단열성을 극대화할 수 있는 우레탄폼-진공단열재 일체형 패널 철도연 공동 개발
- 내부에 실험실 전기 공급(열발생) 시 축열, 동력(전기) 차단 시 발열하는 상변화물질(PCM)을 추가로 설치하여 이동 시 내부 온도를 0℃ 이상으로 유지 가능

< 고단열 컨테이너 제작 개요 >

외규격	- 내부공간 확보를 위한 특수 제작 규격(L×W×H: 6,990×2,990×3,030 mm)
외부구조	- 내구성 확보를 위한 요철구조
단열구조	- 강판+진공단열재+폴리우레탄+내부보강재+알루미늄판 구조 - 우레탄폼 진공단열재 결합(일체)형
단열성능	- (외기 -40℃, heat loss 25% 기준) 내기 0℃ 이상 10시간 지속 가능
활용	- 남극 내륙에서 시료의 전처리 및 분석 수행 등 이동식 현장연구에 활용 - 태양광 축전 등의 친환경 에너지 하베스팅 및 저장기술 등이 적용된 고도화 고단열 컨테이너 개발을 위한 현장 테스트베드로 활용

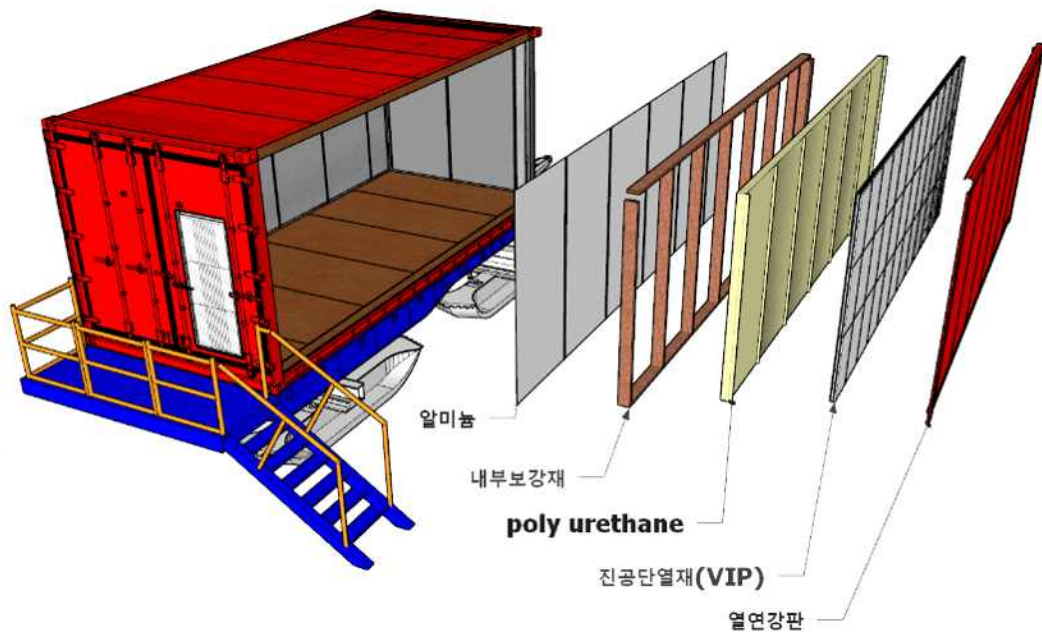


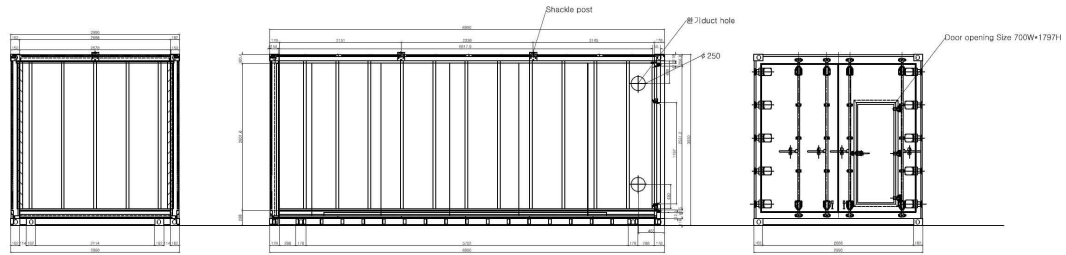
그림 63 고단열 컨테이너 단열패널 구조(철도연)

전진방향

NO	NAME OF PART	MATERIAL(규격)	WEIGHT	QUANTITY	REMARK(비고)
1차개량	2차개량	개량내역			
년 월 일	SCALE	UNIT	공시명		극치연구소용 진공단열탑
2020.06.11	1/N	MM	PROJECT		
제 도	설 계	검 도	승 인	도 명	외장도면
				TITLE	
 진성냉기산업주식회사 JIN SUNG REFRIGERATOR IND CO.,LTD.				도 번 DWG. NO.	

※제작 내역

- 외장페인트 우레탄계열 유광 MIN 110u
내부 0.8t Aluminum 외부 열연강판 1.6t (F-308012 yellow color)
하부 Base frame under coating Black-110u)
- Non ISO type
- Roof Panel : 열연강판 1.6t+진공단열재 40t+poly urethane
압축발포 110t+알미늄 0.8t 내부보강재 (C-channel 30*60*1.6t) 삽입
- 바닥 Panel : 알루미늄판 0.8t+진공단열재 40t+poly urethane
압축발포 90.6t+합판 18t 미강
내부보강재 (2.5t) 삽입
- Over Lap 양개도어 Sub door (인력 출입용 700W*1800H) 제작



20FT container ISO Dimension 6058L*2438W*2591h
하부Base Frame Twist Lock Size 2287W*5891L

그림 64 고단열 컨테이너 외부 도면

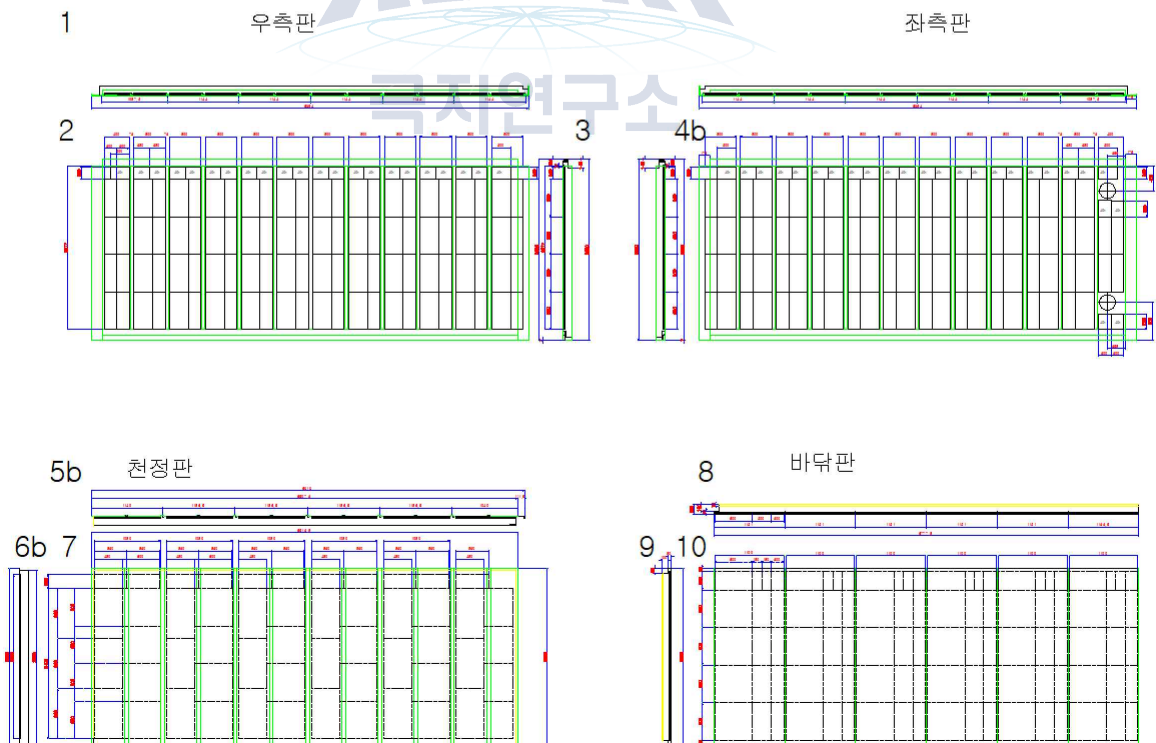


그림 65 고단열 컨테이너 진공단열재 설계 도면

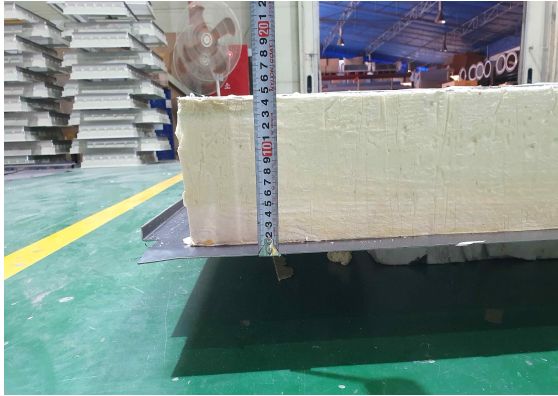


그림 66 단열 패널 - 우레탄층



그림 67 단열 패널-진공단열재층

그림 68 단열 패널- 내부 알루미늄층

그림 69 단열패널 결합



그림 70 고단열 컨테이너 완성품 외관



그림 71 고단열 컨테이너 완성품 내부

○ 고단열 컨테이너 운송용 눈썰매 제작

- 남극 병원의 굴곡진 설면에서 이동식 청정실험실을 안정적이고 편리하게 적재 및 운송할 수 있는 전용 눈썰매 제작
- ISO 규격 컨테이너 규격이 아닌 고단열 컨테이너의 특수 규격에 맞춰 적재 플랫폼(데크) 제작하여 완전 고정, 운송 가능
- 이동식 청정실험실 활용 인원의 출입 편의성 및 안전성을 위하여 출입자 전용 발판과 슬라이

이드식 계단, 핸드 레일을 조립식으로 특수 제작

- 눈썰매의 재원 및 구성

- 자체 중량 약 6톤, 최대 10톤의 화물을 데크에 적재, 운반 가능
- Main skeleton frame, 4 Skis, Axles, Deck
- Main frame based on the cargo trailer skeleton structure
- Cargo trailer type ballrace axis in the front skis
- stress-proof rubber block on each skis
- 8 m × 3 m wide cargo deck with plywood on the metal frame
- Axle connected via pivoting adaptors with oilon caps
- Side rails drilled to suit bolting walkways on
- Access stairway (No handrails) slide underneath walk

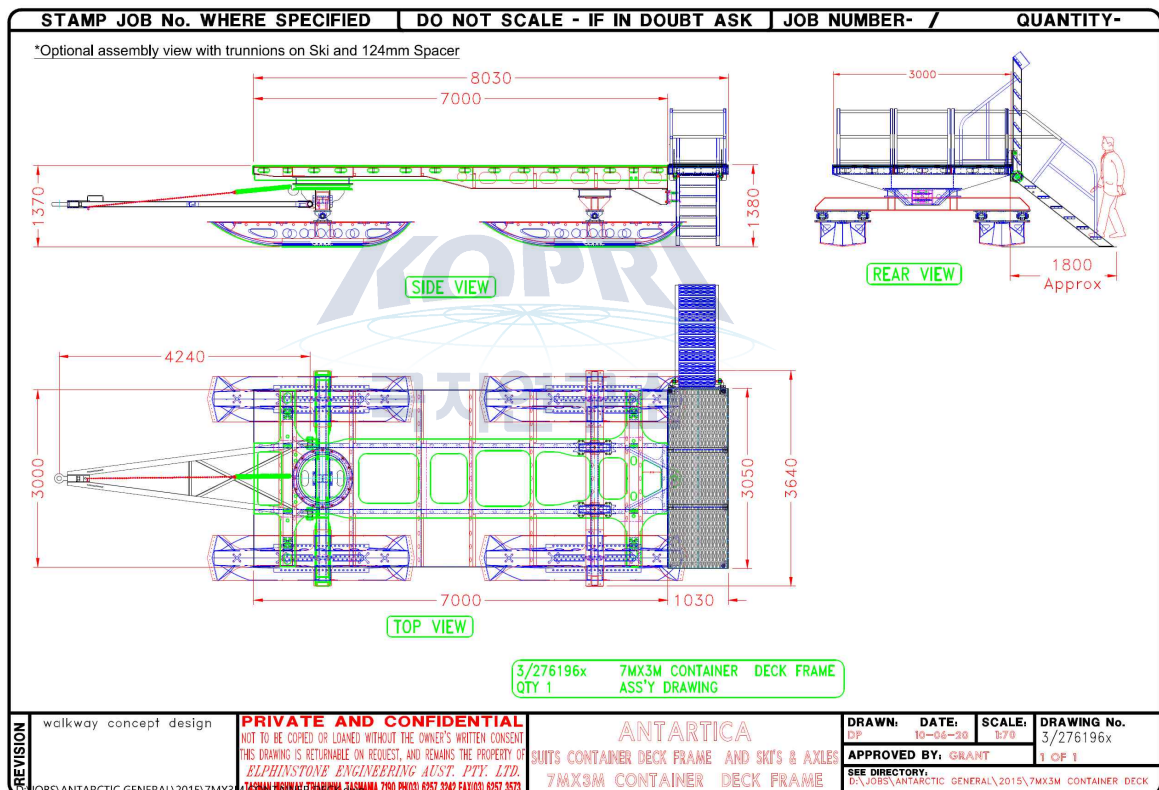


그림 72 고단열 컨테이너 운송용 눈썰매 도면



그림 73 눈썰매 외관



그림 74 사용자용 발판



그림 75 슬라이드식 사다리 전개



그림 76 슬라이드식 사다리 폴딩, 고정



그림 77 안전 핸드레일-1



그림 78 안전 핸드레일-2

○ 이동식 청정실험실 내부 설계

- 내부 실험 공간을 최대한 확보하기 위해 7000 x 3000 x 2900 컨테이너 설계
- 실험실의 단열 성능, 청정도 유지, 사용자 동선을 고려하여 기술실 위치 선정, 천정 덕트 배치, 전기 시설 등을 설계함

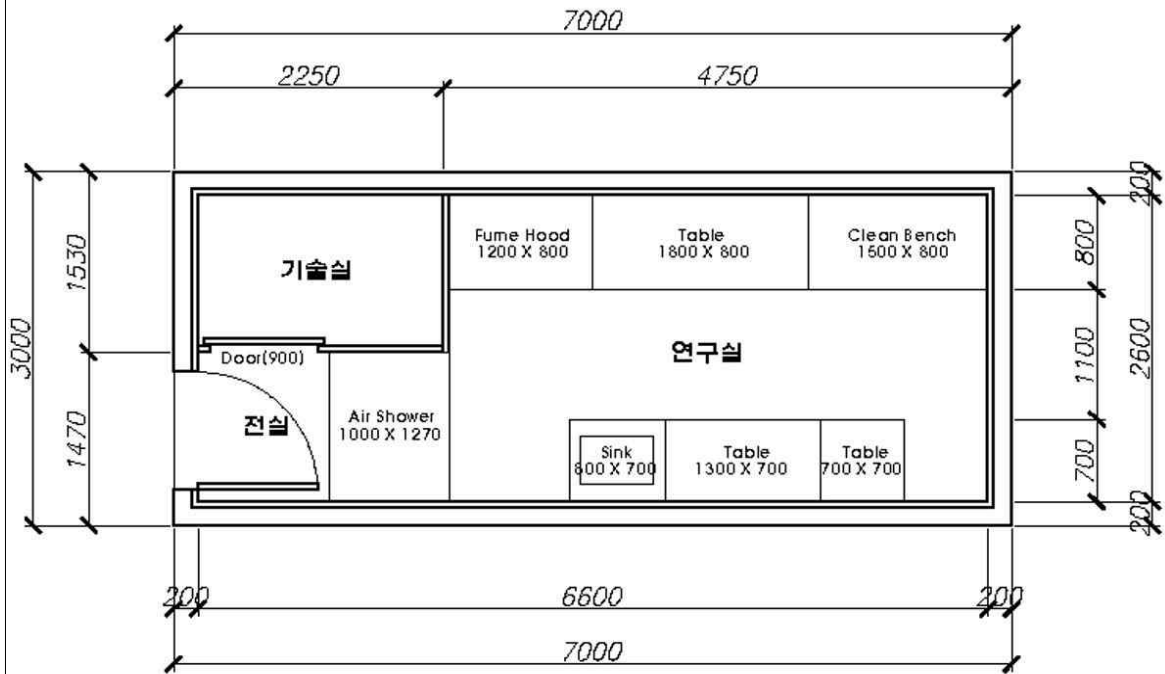


그림 79 이동식 청정 실험실 평면도

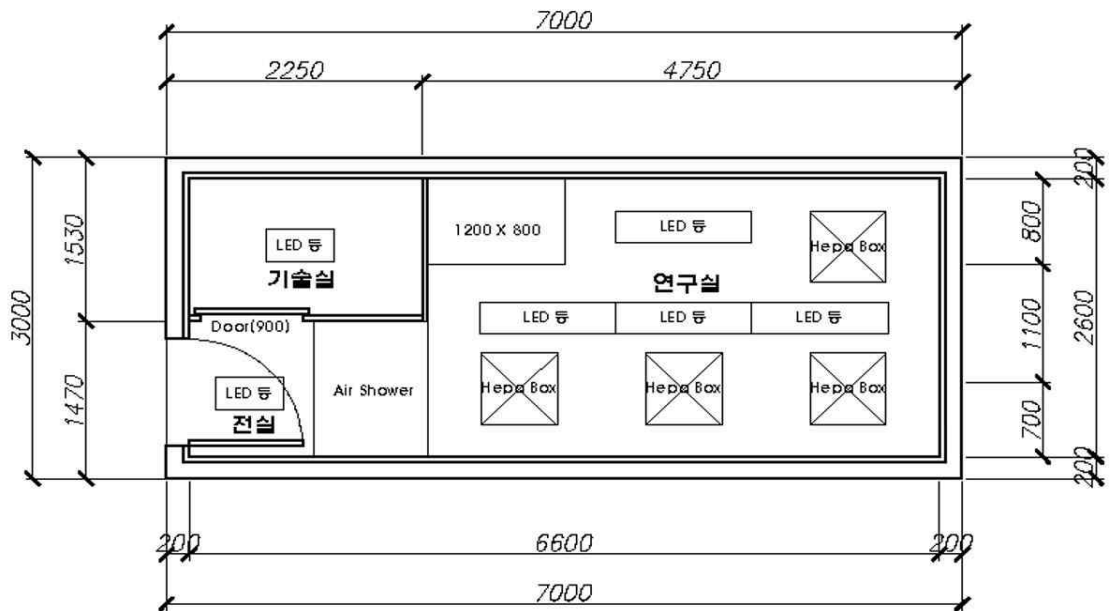


그림 80 이동식 청정 실험실 천정 평면도

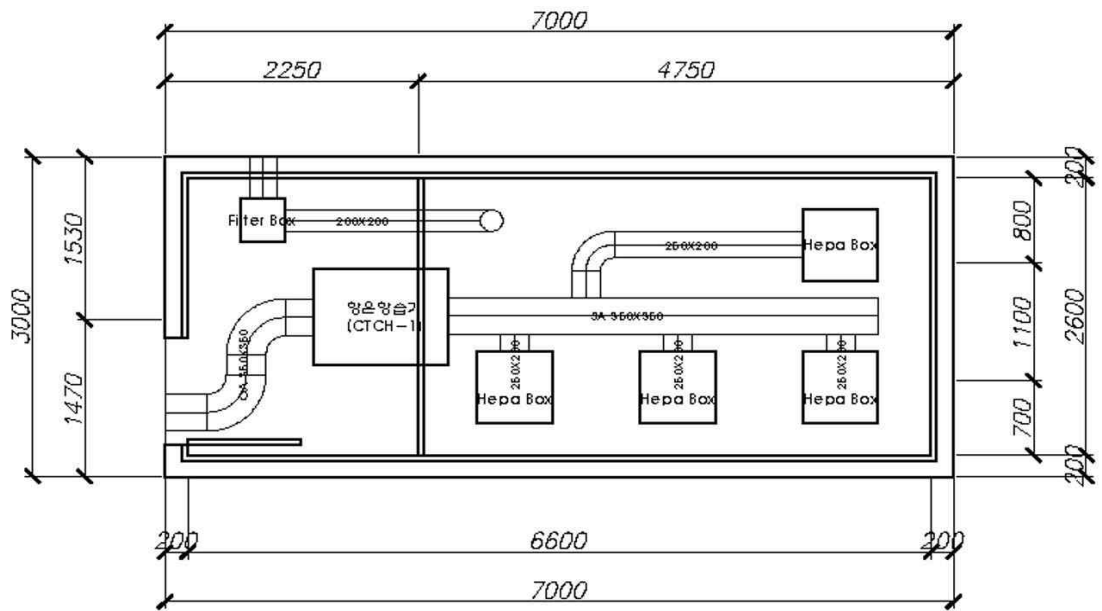


그림 81 이동식 청정 실험실 장비 및 덕트 평면도

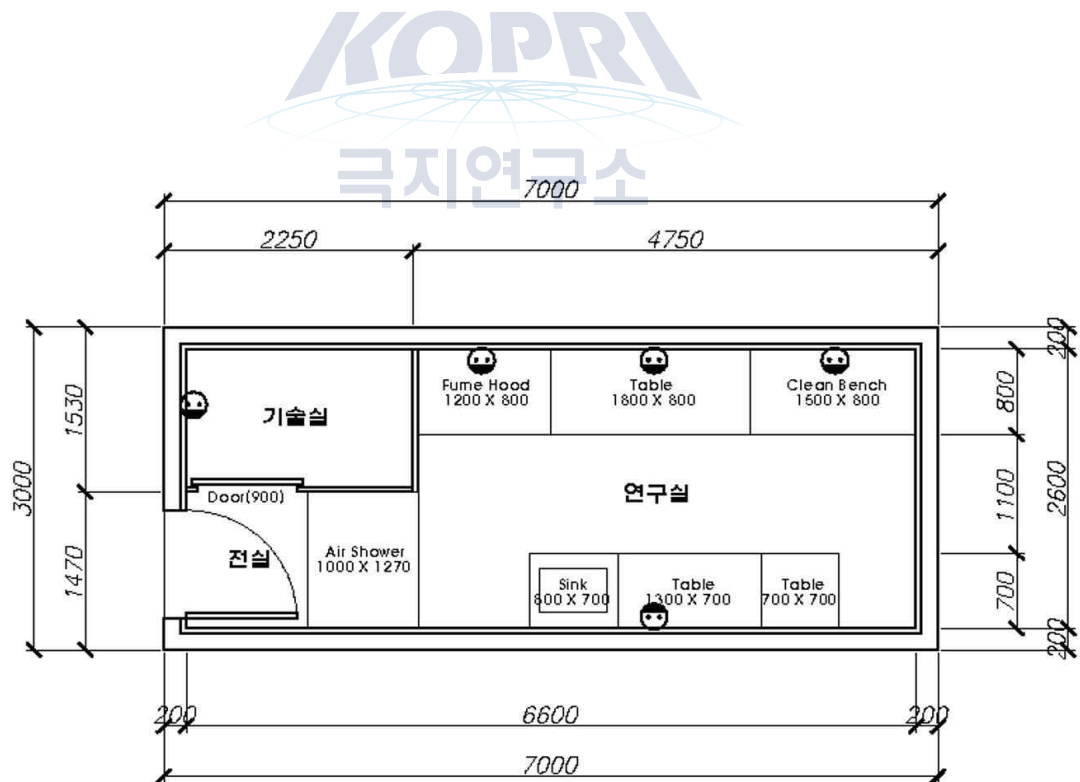


그림 82 이동식 청정 실험실 전기 평면도

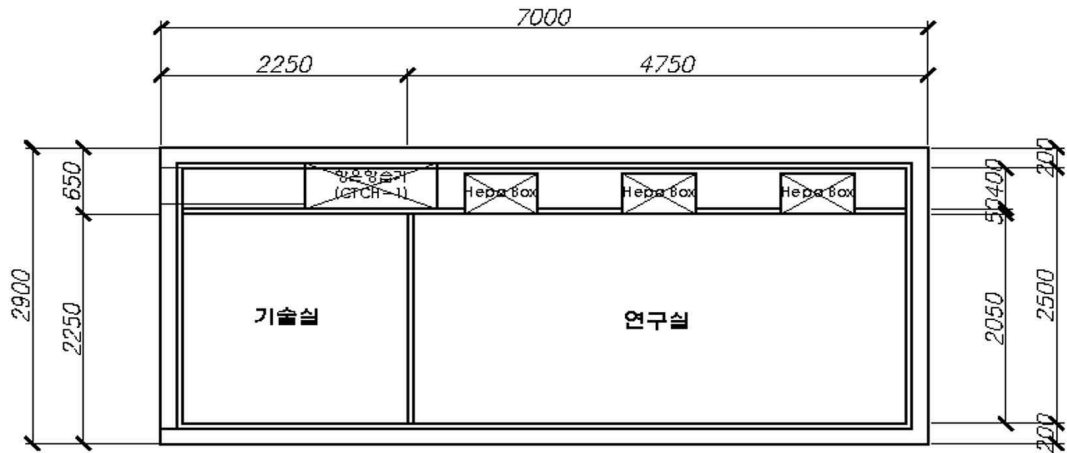


그림 83 이동식 청정 실험실 단면도



- 내부 온도 유지와 청정도, 연구자의 안전을 고려한 공기조화장치 배치와 흐름도 설계

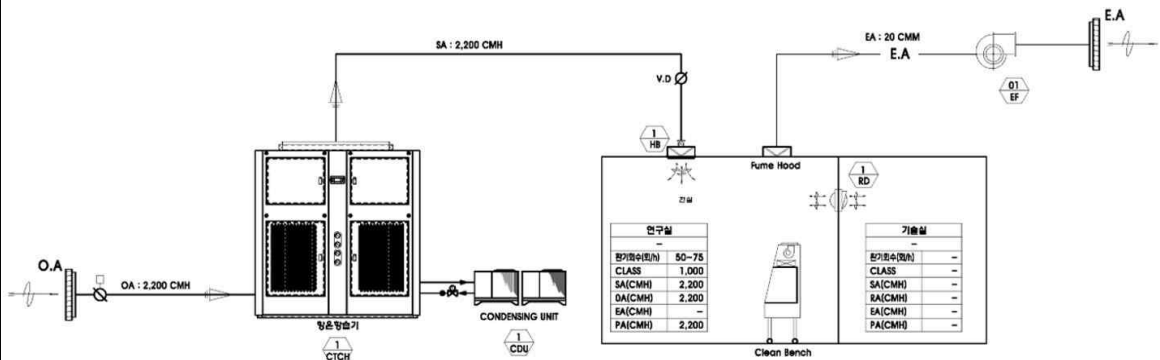


그림 84 이동식 청정 공조 흐름도

- 실험실 내부 설계에 적합한 기자재 및 설비 선정을 위해 열손실과 전기 부하 예측

표 4 실험실 부하 표

[illegible]

표 5 실험실 열관류율 표

구조체명	재료의 명칭	두께 (mm)	열전도율(λ) (kcal/m.h.℃)	열전도 저항 (m ² .h.℃/kcal)
지붕	외부표면	-		0.0500
	폴리에테르강판	1.2	80	0.0000
	우레탄	110	0.03	3.6667
	진공단열재	40	0.03	1.3333
	AL	0.8	204	0.0000
	PVC	5	0.163	0.0307
	내부표면	-		0.1000
계 산	열전도 저항의 계		$\Sigma R =$	5.1807
	열관류율 $K = 1 \div \Sigma R =$	0.1930	선택 $K =$	0.1930
열관류율 기준 $K = 0.30 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{℃}$		열관류율 $K = 0.20 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{℃}$		

구조체명	재료의 명칭	두께 (mm)	열전도율(λ) (kcal/m.h.℃)	열전도 저항 (m ² .h.℃/kcal)
벽체	외부표면	-	0.05	0.0500
	폴리에테르강판	1.2	80	0.0000
	진공단열재	40	0.03	1.3333
	AL	0.8	204	0.0000
	우레탄	50	0.03	1.6667
	PVC	5	0.163	0.0307
				0.0000
				0.0000
	내부표면	-	0.1	0.1000
계 산	열전도 저항의 계		$\Sigma R =$	3.1807
	열관류율 $K = 1 \div \Sigma R =$	0.3144	선택 $K =$	0.3144
열관류율 기준 $K = 0.30 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{℃}$		열관류율 $K = 0.32 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{℃}$		

구조체명	재료의 명칭	두께 (mm)	열전도율(λ) (kcal/m.h.℃)	열전도 저항 (m ² .h.℃/kcal)
바닥	외부표면	-	0.05	0.0500
	폴리에테르강판	1.2	80	0.0000
	진공단열재	40	0.03	1.3333
	AL	0.8	204	0.0000
	우레탄	90	0.03	3.0000
	합판	18	0.14	0.1286
	PVC	5	0.163	0.0307
				0.0000
				0.0000
				0.0000
	내부표면	-	0.1	0.1000
계 산	열전도 저항의 계		$\Sigma R =$	4.6426
	열관류율 $K = 1 \div \Sigma R =$	0.2154	선택 $K =$	0.2154
열관류율 기준 $K = 0.30 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{℃}$		열관류율 $K = 0.22 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{℃}$		

○ 시료 처리용 내부 장비 구입 및 배치

- 이동식 청정실험실 내에서 환경시료 전처리 및 분석에 필요한 장비의 내부 위치 선정과 구매 진행함

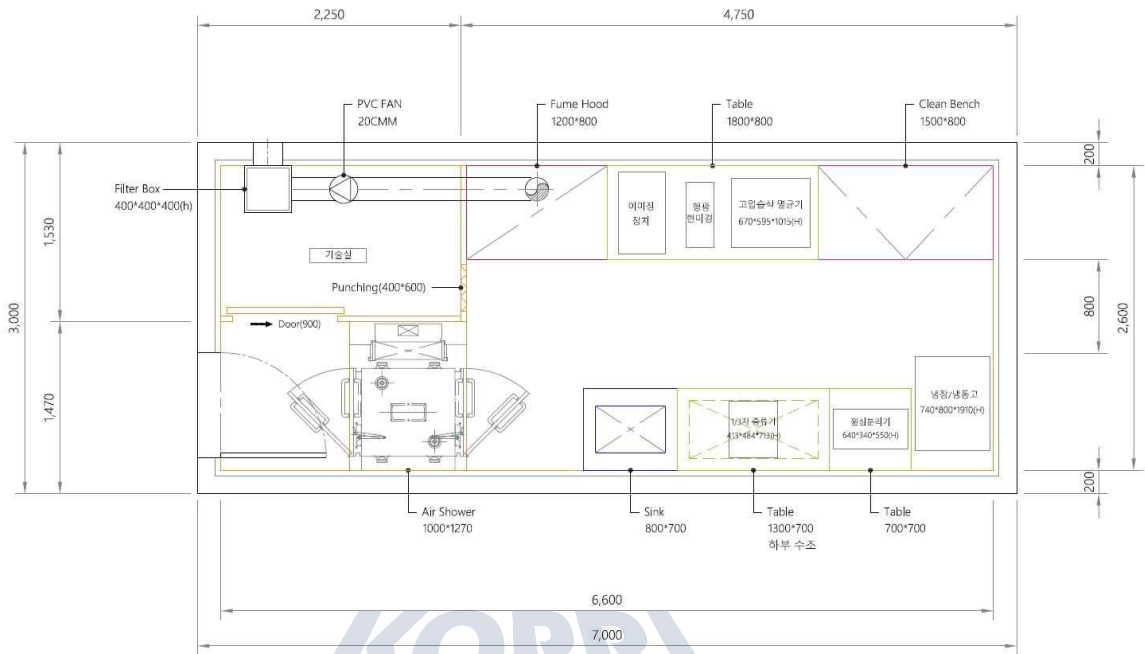


그림 85 실험실 내부 장비 배치도

극지연구소



그림 86 청정 실험실 내부 연구 장비

2-2. 빙저호 퇴적물 시추 시스템 개발

○ 국외 빙저호 퇴적물 시추 시스템 자료 수집 및 자문

- 향후 독자적인 퇴적물 시추기 제작을 위하여 해양 지질 및 기기 제작 분야 국내 전문가 자문을 통해 기존에 개발된 퇴적물 시추시스템 분석

가. 빙붕과 빙하류 하부 환경을 위해 고안된 퇴적물 시추기

- BAS가 오스트리아 엔지니어링 회사인 UWITEC과 공동 개발
- 시추 코어는 코어 커터, 코어 포수, 라인 3m 길이의 스틸 배럴로 구성
- 타격은 타격판이 있는 해머 로드와 장착된 수동 작동 해머를 통해 구동
- 더 깊은 빙저호 위치에서 시추기는 무게가 상승되도록 변형되었다가 트리거된 해제 메커니즘에 의해 자동으로 방출되어 더 효율적인 타격 발생
- 현장에서 시추기는 다빋 윈치를 통해 또는 'A' 프레임 스위브를 통해 시추기를 스키두 (skiddoo)에 연결하여 배치
- 비교적 단단한 준고화 빙하 퇴적물에서도 퇴적물 획득에 효과가 있는 것으로 입증된 시추기에는 최대 5개의 11kg의 해머 무게 추가 가능
- BAS는 또한 밸브 헤드와 라이너로 구성된 짧은 중력 시추기를 사용하여 미변형 표층 시료 수집

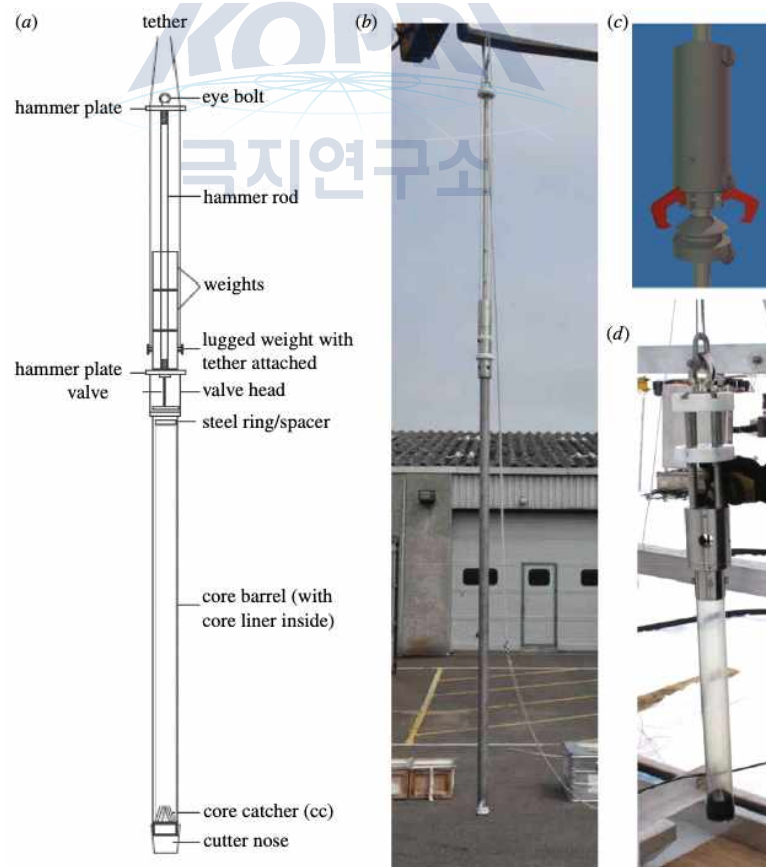


그림 87 BAS/ UWITEC 고안 퇴적물 시추기

나. 빙하기저부와 천해 빙저호 내 퇴적물 시추를 위해 고안된 퇴적물 시추기

◦ 변형 UWITEC 다중시추기

- 온전한 표층 퇴적물과 비변형 침전물-수면 표면을 획득하기 위해 약간 수정된 시스템
- 자체-트리거 시추 캐처가 있는 프레임에 장착된 3개의 표준 UWITC 시추기로 구성되어 있으며, 경량 원치에서 배치
- 스테인리스강 '핀'은 접촉 중 보어홀 벽에 '스케이팅'을 위한 가이드 블레이드로 시추 장치 사이의 중앙 로드와 탑재되어 있어 해제 메커니즘이 빠르게 트리거 되지 않도록 함
- 관통력을 높이기 위해 스테인리스강 중량을 추가
- 해저의 물 샘플에도 효과적으로 표층 퇴적물 압출기와 슬라이서를 사용하여 시추를 이산 간격으로 절단하여 가장 표층의 빙저호 퇴적물을 순차적으로 샘플링 수행
- UWITEC 시스템은 일반적으로 잘 작동했지만 코어-캐처 이탈 메커니즘에서 동결 문제가 발생



그림 88 Whillans호 퇴적물 시추에 활용된
UWITEC 다중시추기

◦ WISSARD 피스톤 시추기

- 캘리포니아 산타크루즈 대학교 칼텍 설계에 기초하여 만들어진 시추기로 비변형 퇴적물을 채취하기 위해 개발
- 칼텍에서 제조된 2.5인치 버전의 업그레이드 버전으로, 훨씬 더 커짐

- 스테인리스강 시추기로 코어 배럴은 3m, 자체 경량 윈치와 케이블이 있으며 다양한 무게로 더할 수 있어 최대의 시추 효과를 얻을 수 있음
- 피스톤과 튜브에 코일링된 케블러 이탈 코드가 있으며, 해저층의 수미터 위에서 유선 메신저에 의해 촉발됨



그림 89 WISSARD 피스톤 시추기

- WISSARD 유압 타격 시추기
 - 더 깊은 곳의 고화된 퇴적물을 회수하기 위해 고안된 시추기로, 다목적 윈치의 강화된 광섬유 케이블을 통해 Willans 빙저호 빙하기저부에 도달하도록 설계
 - 깊이에 의해 강하게 고화된 빙저호 퇴적물에 최대 5 m 길이의 코어 배럴을 박을 수 있어 마지막 최대 빙하기보다 오래된 기록을 복원할 수 있음
 - 이 기술은 중력과 피스톤 코어를 사용해 접근 가능한 퇴적물 깊이와 대규모 회전식 드릴링 기술을 이용해 달성할 수 있는 퇴적 깊이 사이의 간격을 메워
 - 타격 시추기가 전개되면 케이스 내부에서 연장 섹션 위치의 센서 부분과 유압 피스톤 부분 사이)을 풀어서 케이스 내부에서 900 kg의 질량 방출

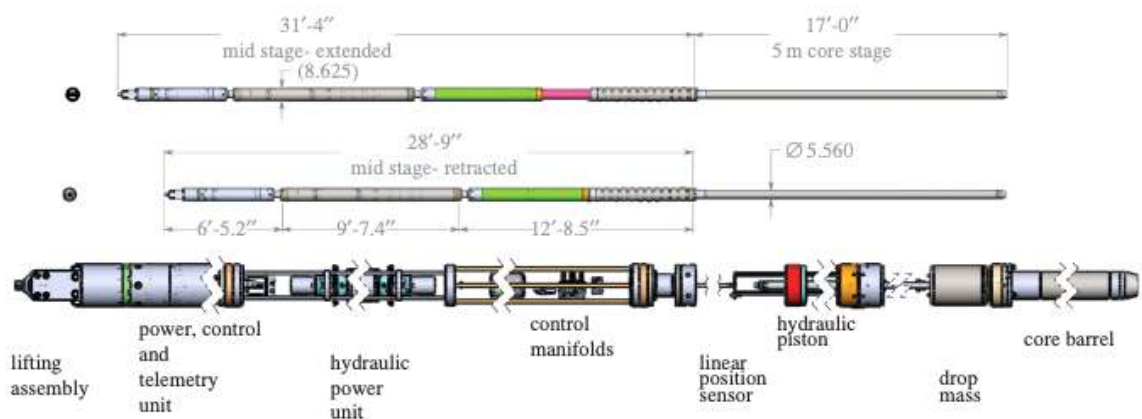


그림 90 WISSARD 유압 타격 시추기

다. 심층 대륙붕 빙저호를 위한 퇴적물 시추기

◦ Ellsworth 빙저호 표층 시추기

- 생명체의 증거를 찾을 가장 가능성이 높은 위치로 간주된 온전한 침전물-물 경계부를 포함하여 호수 바닥에서 상위 몇 센티미터의 침전물을 샘플링할 수 있도록 설계된 소형 시추기
- 납 나사 구동 피스톤 시추기로 빙저호 샘플링 프로브 끝에 장착되었으며, 내부 피스톤과 배럴 연장 끝에서 활성화된 볼 밸브 기반 코어 캐처와 더불어 기계적으로 활성화된 시추기 배럴(25 mm 직경)로 구성

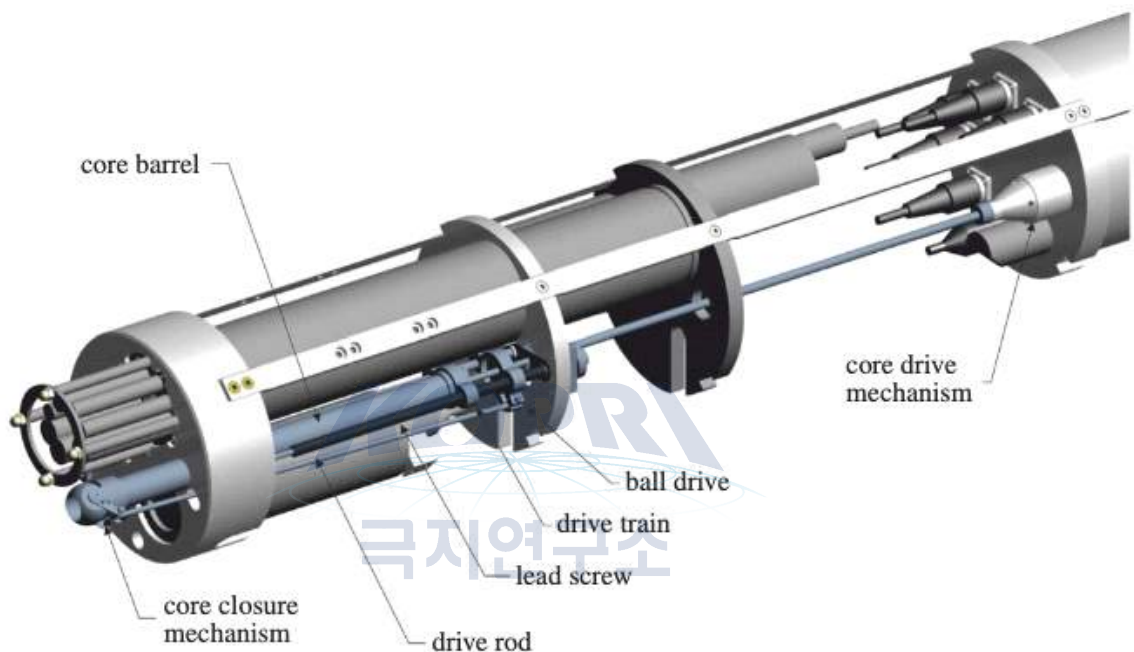


그림 91 엘스워스 빙저호 표층 시추기

◦ Ellsworth 빙저호 타격 시추기

- 호수 시료 채취 탐침 및 중력 시추기와 동일한 통신 테더를 사용하며 청정 조건에서 조립하여 무균 전개 시스템 내에 보관하도록 설계, 최대 3.8 m 길이의 퇴적물 시추 가능
- (i) 피스톤 로드 및 고정 피스톤이 있는 제어 인터페이스(CI) 하우징과 (ii) 코어-바렐에 부착된 해머 유닛(HU) 두 개의 어셈블리로 구성
- 코일 처리된 줄은 HU와 CI를 연결하여 두 장치 사이의 전원과 통신을 제공하고 시추의 활성화 시 코일링을 이탈
- 전개 전 CI와 HU가 전단핀과 함께 묶여 있어 HU가 피스톤 로드로 미끄러져 내려가지 것 방지



그림 92 Ellsworth 빙저호 타격 시추기

◦ Ellsworth 빙저호 중력 시추기

- 광통신 케이블 내 통신 장애와 시료의 중복성을 확보하기 위해 소형 파트로 구성된 간단한 기계적 중력 시추기
- 내경 6 cm, 3.7 m 길이의 코어 배럴과 270 kg의 헤드 무게를 가진 시추기로 코어 지름(좁은 코어러가 침전물에 더 깊이 침투)과 코어 중량(더 큰 중량은 침투는 더 크지만 회수하려면 더 강한 케이블이 필요하다) 사이의 적절한 균형을 이루고 있음
- 케이블을 내려서 작동할 수 있으며 무게에 의한 중력으로 퇴적물 포집
- 타격 시추기와 마찬가지로 표층에서 전기 원치에 의해 회수
- 중력 시추기는 일반적으로 샘플링 성공률이 높지만 퇴적물을 과도하게 투과하거나 압축하거나 변형시킬 수 있다는 단점 존재



그림 93 Ellsworth 빙저호 중력 시추기

2-3. 빙저호 열수시추기 국제 공동 개발

○ 모듈형 시추동력 발전기 제작

- 빙저호 시추 현장연구 시, 연구캠프 및 연구장비 운영에 필요한 전원을 공급할 수 있는 100 kW급 발전기 컨테이너 2대 제작 완료

- 사용 용도

- 다수의 연구인력이 1개월 이상 장기간 현장 연구캠프에 체류하면서 연구를 수행함에 있어 필요한 전력 공급
- 빙저호 열수 시추 시스템은 극지 현장의 빙설을 가열하여 열수를 공급하므로 열수를 생산하기 위해 필요한 대규모 전력 공급
- 이동식 청정실험실을 활용하여 빙저호 시추 시료의 현장 분석을 실시할 예정인 바, 분석 장비의 안정적인 운영에 필요한 대규모 전력 공급

- 장비 구성

- Model : Caterpillar C7.1 100kW 상용 generator
- CYCLE & CYLINDER : 4 STROKE 6 CYLINDERS IN LINE
- INTAKE SYSTEM : TURBOCHARGED AFTERCOOLED
- EXHAUST SYSTEM : FLEXIBLE FLANGE
- CONTROL SYSTEM : CAT ELECTRONIC GOVERNOR / EMCP 4.1 AUTO START / STOP
- COOLING SYSTEM : RADIATOR / JACKET WATER HEATER
- FUEL SYSTEM : FUEL INJECTOR , FUEL FILTER, FUEL LINE
- LUBE SYSTEM : LUBE OIL STARTING
- SYSTEM : DC 24V ELECTRIC STARTING MOTOR
- AC GENERATOR : AC 380/220V, 50HZ, 3P4W, PF 0.8 PMG
- INSULATION : NEMA "H" CLASS, EFF,90% 이상
- VIBRATION SYSTEM : LINEAR VIBRATION ISOLATOR

- 장비 운영 및 활용 계획

- 미답지탐사단의 연구캠프 구축 및 지원 미션과 연계하여 중장비 운영 기술원 인력을 활용, 전문 양성하여 장비를 전담 운영할 계획
- 추가로 남극 현장 연구에 참여하는 중장비 및 발전, 전기 분야 등 장기계약 채용하는 외부 전문 인력 활용
- 발전기 제작 업체와의 현장 활용 피드백, 주기적인 관리·운영 교육을 통하여 장비 활용 인력의 전문성 및 장비의 현장 활용성 제고
- 발전기 외부 컨테이너는 보온제로 보강된 패널을 적용하여 남극내륙 현장에서 활용 후 외부 야적 및 보관(월동) 가능
- 발전기, 전기판넬, 보조연료탱크 등 내부에 설치되어 있는 각종 시설 및 장비는 남극 내륙 설면에서의 이동충격에 의한 흔들림, 이탈, 파손을 최소화하기 위해 고박장치로 고정 활용
- 남극 내륙 하계 연구 활동 시, 상시 활용이 가능하도록 운영 및 관리 예정

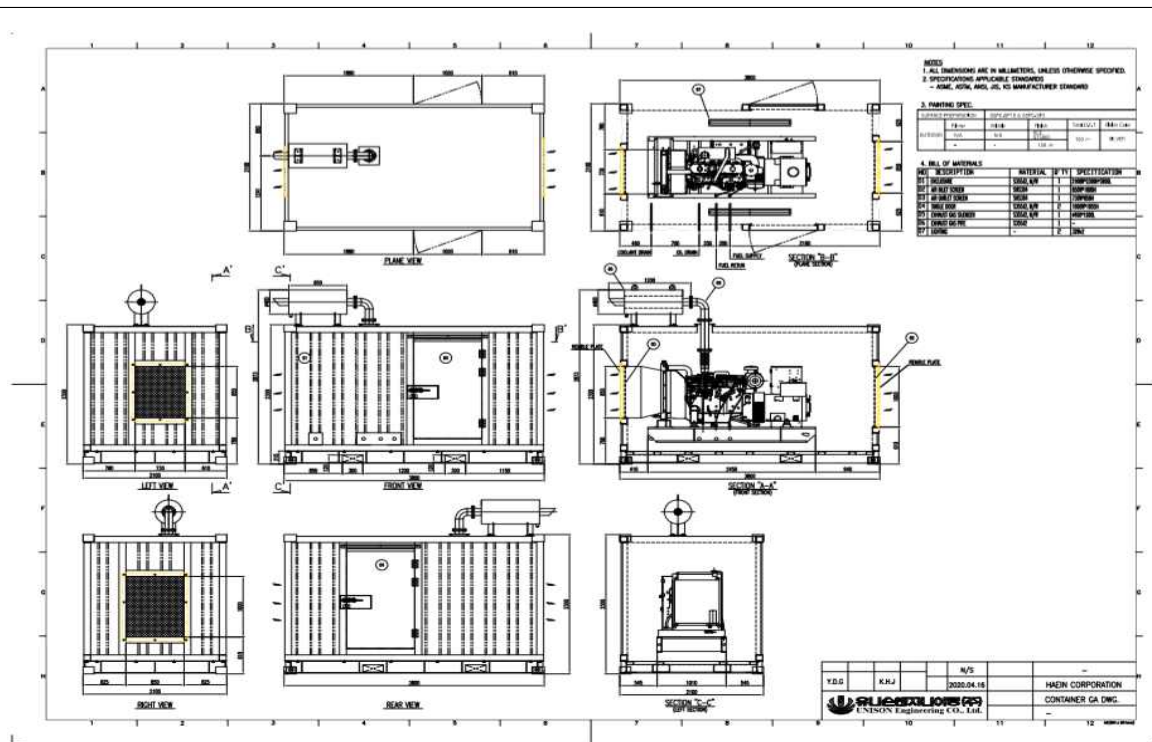


그림 94 발전기 및 전용 컨테이너 설계도





견 적 서



한국해양연구원 부설극지연구소 귀중
PROJECT : k2원정대 상용 발전기 견적
담 당 : 김 흥 귀 반장님 귀하
전 화 : 032-770-8515
금액:구천구백오십만원정(부가세 포함)
₩99,500,000

해성파워텍(HAESEONG POWER TEC)
대구광역시 중구 북성로28-13(서야동)
代表理事 姜 盛 鐘
POWER SYSTEM 사업부 영남지사
사무실 : TEL(053)256-5634
: FAX(053)256-5636
H P : (010)3538-8072

아래와 같이 견적드립니다.

견적번호 : E2000-04-S024			견적일자(DATE) : 2020. 04. 24		
NO	적 요	단위	수량	단 가	금 액
1.	디젤발전기 셋트: CATERPILLAR C7.1 100KW 상용 GENERATOR SET (수입완제품)	SET	1	₩40,500,000	₩ 40,500,000
2.	EDG CONTAINER: ISO 20FT CONTAINER 설계기준 -40도	SET	1	₩ 47,000,000	₩ 47,000,000
3.	PRE STARTING GEN-SET: ENGINE HEATING & LIGHTING 용 / 10KW 220V /60HZ	SET	1	₩ 3,000,000	₩ 3,000,000
	총 소 계				₩ 90,500,000
	부가가치세 10%				₩ 9,050,000
	SUB TATAL				₩ 99,550,000
	절 사 금 액				
	합 계			(VAT 포함)	₩ 99,500,000
** 제 외 공 사 : 발전기 실내외 공사 / 대관업무 / 건축공사 / 급기덕트공사					

특 기 사 항 :

1. 견적 유효기간 : 견적후 30일 이내
2. 납 기 일 : 계약후 180일 이내 공급
3. 대금지불조 건 : 계약금30% 납품시 60%시운전완료후 10% 현금결제조건입니다.
4. 인 도 조 건 : 현장 설치 시운전도
5. 하자 보증 기간 : 비상용 사용 24개월
6. 상기 금액은 부가세 별도입니다.



그림 95 발전기 제작 견적서-계속

(을) 見 積 書

NO	적 요	단위	수량	단 가	금 액
1.	디젤발전기 세트: CATERPILLAR C7.1 100KW 상용 GENERATOR SET (수입완제품) CATERPILLAR MODEL: C7.1 CYCLE & CYLINDER : 4 STROKE 6 CYLINDERS IN LINE INTAKE SYSTEM : TURBOCHARGED AFTERCOOLED EXHAUST SYSTEM : FLEXIBLE FLANGE CONTROL SYSTEM : CAT ELECTRONIC GOVERNOR / EMCP 4.1 AUTO START / STOP COOLING SYSTEM : RADIATOR / JACKET WATER HEATER FUEL SYSTEM : FUEL INJECTOR , FUEL FILTER, FUEL LINE LUBE SYSTEM : LUBE OIL STARTING SYSTEM : DC 24V ELECTRIC STRATING MOTOR AC GENERATOR : AC 380/220V, 60HZ, 3P4W, PF 0.8 PMG INSULATION : NEMA "H" CLASS, EFF,90% 이상 VIBRATION SYSTEM : LINEAR VIBRATION ISOLATOR SPARE PARTS : FILTER (AIR , FUEL , OIL , WATER) 1회 교환분				
	소 계	SET	1	₩40,500,000	₩ 40,500,000
2.	EDG CONTAINER				
1)	ISO 20FT CONTAINER W/BASE, FOLKLIFT HOLE 2100W X 2300H X 3800L	SET	1	24,000,000	24,000,000
2)	INSULATION(CONTAINER ISSIDE (M/W, 80K, 50T+GI, 0.8T PUNCHING PLATE)	SET	1	1,700,000	1,700,000
3)	INLET MOVABLE PANEL W/SCREEN SIZE :850W X 1000H	SET	1	900,000	900,000
4)	OUTLET REMOVABLE PANEL W/SCREEN SIZE : 730W X 850H	SET	1	1,000,000	1,000,000
5)	OUTLET CANVAS	SET	1	1,000,000	1,000,000
6)	CABLE TRAY & WALK WAY	L/S	1	1,600,000	1,600,000
7)	INSULATION FOR EXH, GAS PIPING (ONLY INTERNAL PARTS)	L/S	1	1,500,000	1,500,000
8)	EXHAUST GAS SILENCER, PIPING &SUPPORT SIZE : Ø400 X 850L	SET	1	4,200,000	4,200,000
9)	EXPANSION JOINT (SUS304) SIZE : 100A X 300L	SET	1	600,000	600,000
10)	MOUNTING (DG-SET)& PIPING (FUEL,DRAIN,EXH)	L/S	1	1,700,000	1,700,000
11)	ELECTRIC FACILITY (CABLE, CONDUIT, S/W,WIRING)	L/S	1	1,800,000	1,800,000
12)	DISTIBUSTION BOX (CARBON STEEL W/PAINT)	LOT	4	750,000	3,000,000
13)	LIGHTING (LED)	SET	1	800,000	800,000
14)	PAINT	LOT	1	3,200,000	3,200,000
	소 계				₩ 47,000,000
3.	PRE STARTING GEN-SET				
	M O D E L : EX11000DXS ENGINE MODEL : GX620K1 형 식 : 공냉식4행정, OHV,2실린더 / 배기량 614CC 최 대 출 력 : 3600 RPM / 20PS A C 출 력 : 60HZ / 10KW 연료탱크용량(L) : 26.8L / 소모량 : 4.8 발전기 제원 : 900 X 520 X 555 116KG				
		SET	1	₩3,000,000	₩ 3,000,000

그림 96 발전기 제작 견적서



그림 97 발전기 컨테이너 내외관 및 운송 사진

3. 빙저호 시추

3-1. 한-영 공동 빙저호 시추 프로그램 개발

○ 서남극 빙저호 공동시추 프로그램 협약

- 국제적 COVID-19 상황으로 인해 한-영 공동 빙저호 시추 프로그램 협약을 위한 상세 협의 불가하여, 온라인 협의를 통해 현재 영국에서 준비하고 있는 2,500m급 심부 빙저호 청정열수시추 시스템 기술 및 프로그램 개발 자료 상호 검토

- 심부 빙저호 호소수 채취를 위한 최신의 청정열수시추 시스템 분석을 통해 극지연구소의 빙저호 시추환경에 최적화된 열수시스템 개발과 공동 시추 프로그램 개발에 필요한 자료 확보

○ 서남극 SLCECs 빙저호 시추와 CHWD (clean hot water drill) 시스템 최신동향

- 남극의 빙저호 시추

◦ 현재까지 남극에서 400여개의 빙저호가 발견됨

◦ 빙저호 시추는 오염이 없고 생태계 영향을 최소화 하면서 SCAR (Scientific Committee on Antarctic Research)의 COC (Code of Conduct)를 준수하는 것이 중요함

◦ 최초의 빙저호 시추가 Vostok 호수에서 진행되었으나 hydrocarbon 기반의 시추 시스템으로 인한 오염문제가 발생함

◦ 대표적으로 오염문제 없이 수행된 빙저호 시추는 WISSARD (Whillans Ice Stream Subglacial Access Research Drilling, 2013, 빙하두께 800m, 호수깊이 2m) 프로젝트와 SALSA (Subglacial Antarctic Lakes Scientific Access, 2018, 빙하두께 1092m, 호수깊이 15m) 프로젝트가 있음

◦ Ellsworth 호수 (SLE) 에서도 2012년 시추가 시도되었으나 기술적 문제로 중단됨

◦ 그 후 지속적인 열수시추 시도 과정을 거쳐 2019년, 영국 BAS에서 진행된 BEAMISH (Bed Access, Monitoring, and Ice Sheet History, 빙하두께 2154m) 프로젝트가 성공했고 현재까지 열수시추 방식을 사용한 가장 깊은 시추 사례로 남아있음

◦ 2014년 칠레 연구팀 (CECs) 에 의해 SLE에서 20km 떨어진 위치에서 깊이 2650m의 빙저호 (SLCECs)를 발견했고, 이후 CECs와 BAS의 공동연구로 빙저호의 깊이가 약 310m 일 것으로 추측됨

◦ 추가적으로 진행된 연구를 통해, 비교적 얕은 빙하두께, ALE (Antarctic Logistics and Expeditions)를 물류수송의 기점으로 활용 가능한 점, 추가적인 탄성과 탐사로 빙저호 바닥이 확인된 점 등을 미루어 다음 빙저호 시추를 위한 가장 이상적인 후보지로 선정됨

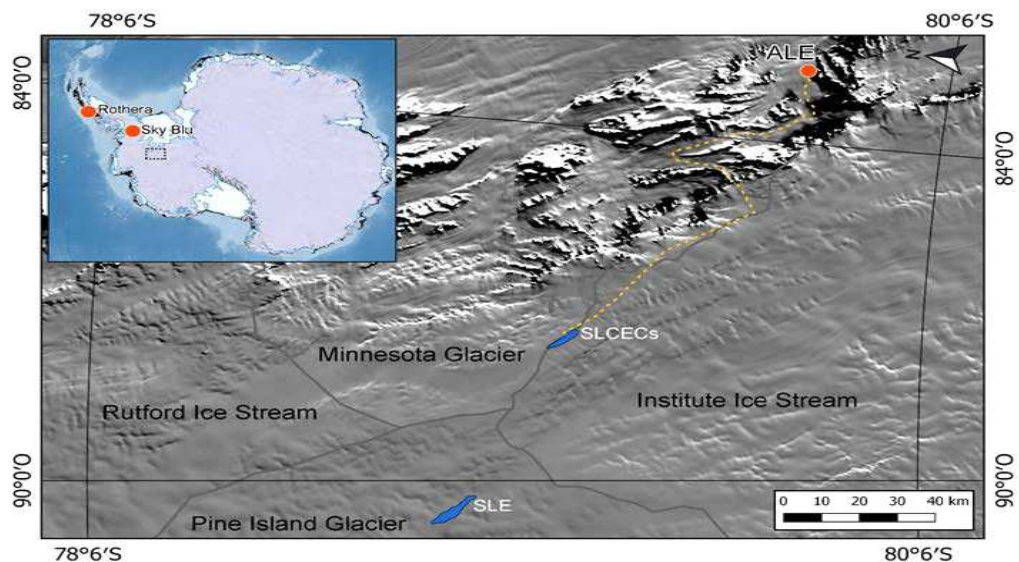


그림 98 SLCECs의 위치와 물류수송 예상도

- 영국의 BAS와 칠레의 CECs는 파트너십을 맺고 SLCECs를 개선된 CHWD 방법으로 시추하기로 함
 - 이 프로젝트는 BEAMISH에서 사용된 장비를 SLCECs로 옮기고 개선된 장비를 추가함으로써 성공적인 빙저호 시추를 그 목적으로 함
 - 이 프로젝트의 진행을 위해 추가되는 장비는 영국에서 테스트 과정을 거친 후 남극으로 수송되고, 기존에 있던 BEAMISH 장비와 통합된 후 남극에서 추가적인 테스트를 통해 최적화 과정을 진행할 예정임
 - 우선적으로 500m 시추를 진행하여 장비 테스트뿐만 아니라 생물학적 분석과 현장 환경 점검을 통해 SCAR에서 제시하는 COC를 따라 최종적인 시추 승인이 이뤄진 후 빙저호 시추가 진행될 예정임
- 빙저호 시추 캠프 운영
- BEAMISH 프로젝트에서 발견된 취약점을 바탕으로 SLCECs 프로젝트에서는 남극 환경에 대비해 텐트를 구축하고 시추 장비 운영을 텐트 내에서 하는 것을 핵심으로 함
 - 시추를 진행하는 드릴 텐트와 지원 장비 운영을 위한 플랜트 텐트, 두 파트로 나누어 운영하게 됨
 - 드릴 텐트에는 시추에 사용되는 장비뿐만 아니라 호스를 멸균하기 위한 멸균 시스템과 시료 채취시 오염없이 시료를 확보하기 위한 클린룸이 포함됨
 - 플랜트 텐트에는 시추에 사용되는 물을 가열하는 히터 및 펌프를 비롯해 열수의 멸균을 위한 2단계 멸균 시스템이 포함됨
 - 열수시추를 시작하기 위해 종자물(seed water)를 만드는데 사용되는 표층수의 오염여부와 남극 여름 시즌에 부는 바람의 영향을 고려하여 빙저호 시추 캠프의 설치 방향을 결정함

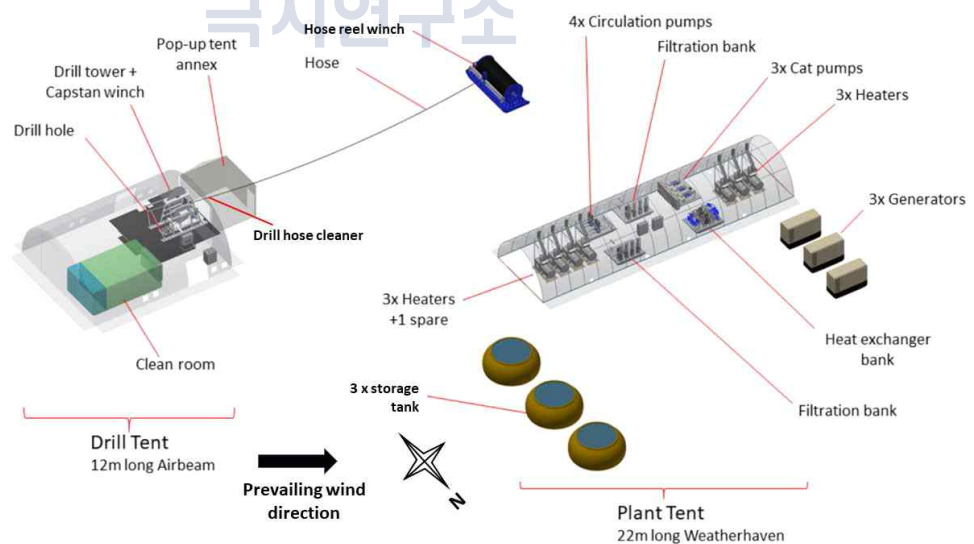


그림 99 SLCECs 열수 시추 캠프 운영 모식도

- 열수 시추 시스템 (CHWD) 구축
- SLCECs의 열수시추 시스템은 기존에 검증된 BEAMISH와 SLE의 통합하는 것을 기본 골자로 하는 것으로 가장 핵심적인 변화는 열수 멸균 시스템 강화에 있음
 - 또한 열수 가열을 위한 시스템과 시추를 위한 시스템을 분리하고, 전체 시추 시스템의

수압을 10분의 1로 낮춤으로서 안전성을 높이고자 함

- 열수 가열 시스템은 독립적인 두 개의 폐쇄형 장비로 만듦으로서 각각의 고장이 서로에게 영향을 주지 않도록 설계함
- 드릴 시스템은 펌프, 필터, UV 장치를 두 쌍으로 운영하여 어느 한 부분의 고장으로 인해 시추가 중단되지 않도록 함
- 드릴에 사용될 물은 공급되기 전 매니폴더 장치에 의해 나눠져서 낮은 온도의 물을 다시 가열하는데 사용하거나 장비들이 저온에서 동결되지 않도록 하는데 사용함
- 드릴 시스템에 사용되는 거의 모든 장비는 멸균을 위해 스테인리스 스틸을 사용함

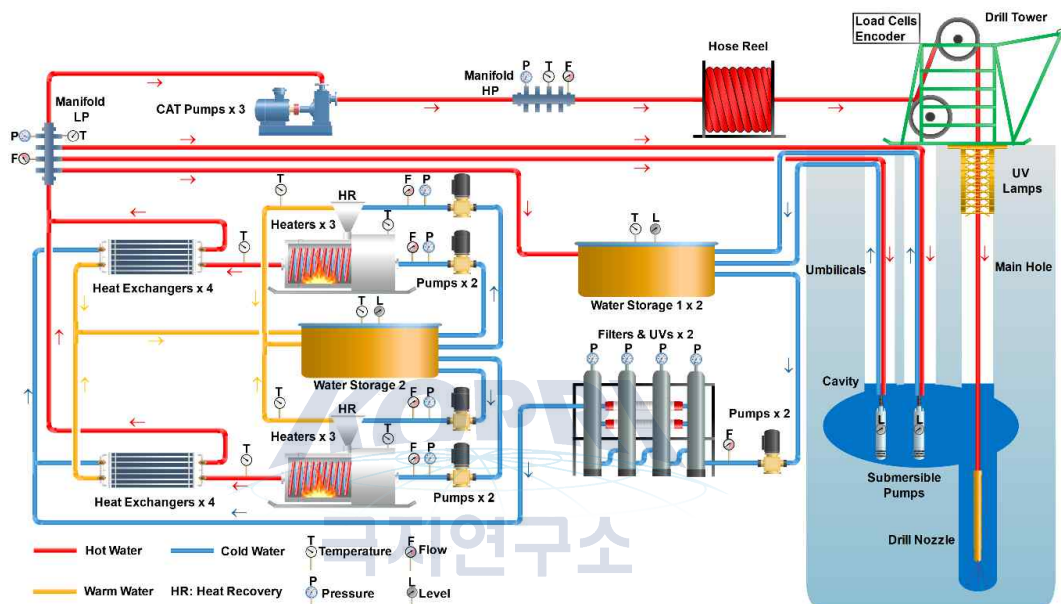


그림 100 SLCECs 열수 시추 시스템

- 열수 시추 시스템 (CHWD)의 열수 멸균

- 멸균 시스템은 크게 필터를 사용한 여과장치와 UV를 사용한 멸균 장치로 구성됨
- 여과장치는 드릴에 사용하기 위해 녹인 물속에 있는 다양한 크기의 파티클과 미생물을 물리적으로 제거하는 방법으로, 필터의 pore 크기가 20, 5, 1, 0.1 um 인 4개의 필터를 물이 차례로 지나면서 여과되는 방식임
- UV 장치는 254nm 고강도 200W 살균 램프가 장착되어 미생물을 멸균하고 추가적으로 80W (185nm) UV장치를 설치하여 용존 유기탄소를 산화시킴
- 여과장치에는 압력센서가 장착되어 필터가 막혀 여과가 되지 않는 상황을 모니터링하여 즉각적으로 여분의 멸균 시스템으로 전환 할 수 있도록 설계함
- 전체 시추 시스템에서 물의 멸균 상태를 추적할 수 있도록 물을 샘플링할 수 있는 장치가 마련되어 있어 실시간으로 모니터링 함

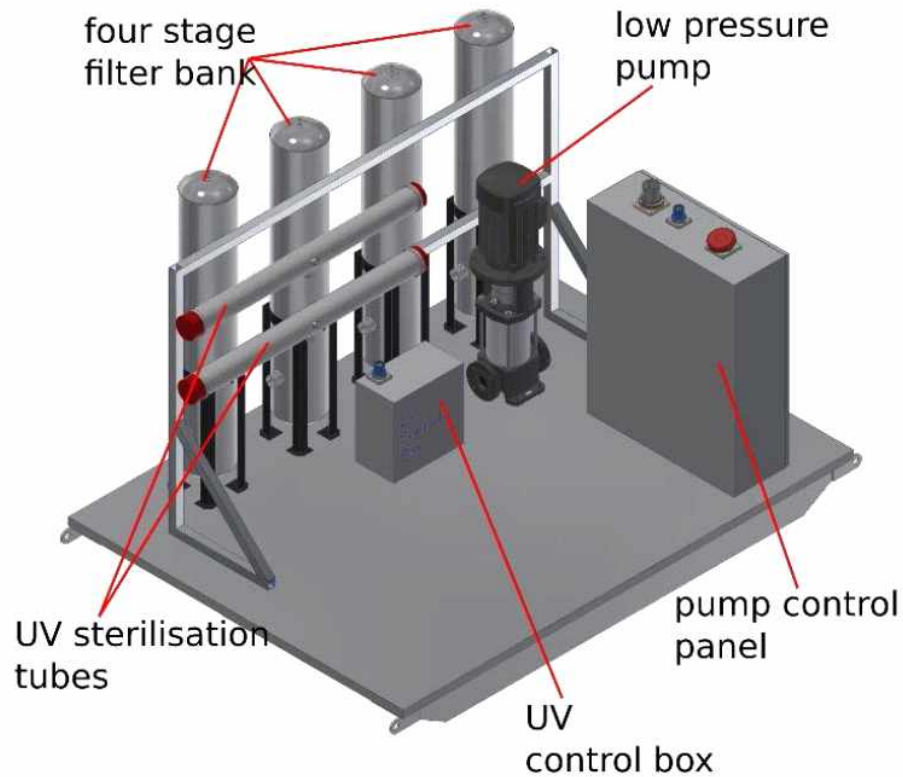


그림 101 열수시추 멸균 시스템

- 열수 시추 시스템 (CHWD)의 호스 멸균
 - 시추에 사용되는 호스의 멸균을 위해 세척과 UV 멸균, 두 방법으로 수행됨
 - 호스는 시추공으로 들어가기 전, 멸균된 물의 고압분사를 통해 표면이 세척되고 표면에 남아 있는 물방울도 제거됨
 - 호스가 지나가는 가이드롤러는 정기적으로 70% 에탄올과 3% 과산화수소로 세척함
 - 호스가 가이드롤러를 지나 시추공으로 들어가기 전 UV 장치에 의해 다시한번 표면이 멸균됨
 - 이 멸균 장치는 spore를 형성하는 박테리아와 병원성 박테리아를 기준 수치 아래로 멸균할 수 있음
 - 모든 멸균이 끝난 호스는 표면을 면봉으로 문질러 채취 후, 멸균 상태를 확인하는 과정을 거침
 - 멸균에 사용되는 UV는 수은램프와 달리 즉각적인 멸균이 가능하고 내구성이 뛰어나
 - 이러한 UV 멸균이 장비 사용자에게 영향을 주지 않도록 UV광선 노출방지 장치도 마련함

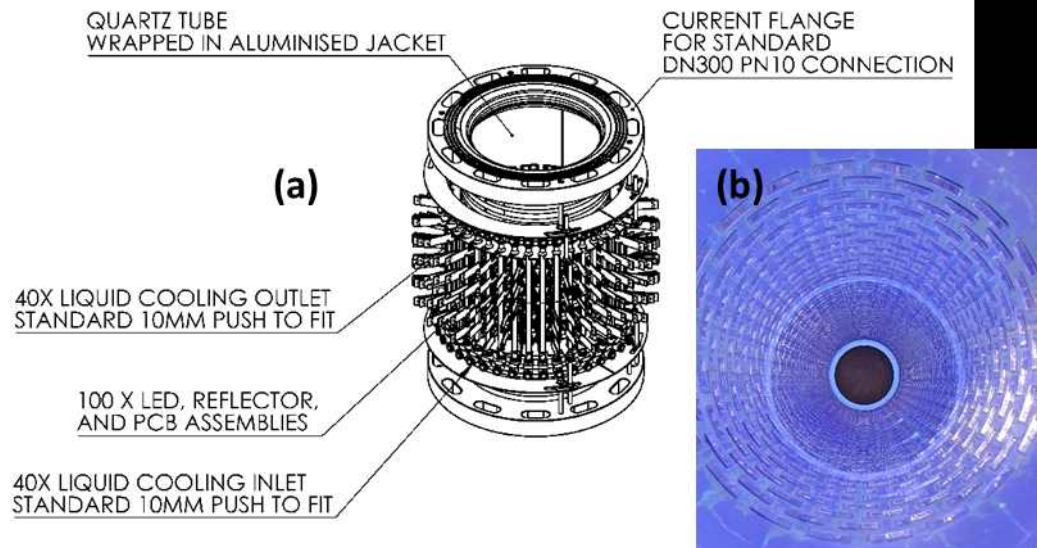


그림 102 시추공에 들어가는 호스 멸균을 위한 UV 장치

3-2. 빙저호 지역 환경특성 예비조사

- 미생물 생물량, 종 조성 등 빙저호 지역 생태환경시료 특성 분석 및 DB 구축
 - 빙저호 시추 지역 환경 시료 및 환경 데이터 수집
 - 빙저호 시추 조사를 위한 베이스캠프 주변에서 빙설, 대기 및 환경 데이터 수집

< 수집한 환경시료 리스트 >

Site	Type	Depth / Time	Coordinate	Altitude(m)	Volume
D2 set1-1	Snow	0-5cm	S 75°42.587' E 155°47.050'	1938	12 L
D2 set1-2	Snow	5-3cm	S 75°42.587' E 155°47.050'	1938	12 L
D2 set1-3	Snow	30-60cm	S 75°42.587' E 155°47.050'	1938	12 L
D2 set2-1	Snow	0-5cm	S 75°42.543' E 155°42.484'	1941	12 L
D2 set2-2	Snow	5-3cm	S 75°42.543' E 155°42.484'	1941	12 L
D2 set2-3	Snow	30-60cm	S 75°42.543' E 155°42.484'	1941	12 L
D2 set3-1	Snow	0-5cm	S 75°42.605' E 155°47.355'	1945	12 L
D2 set3-2	Snow	5-3cm	S 75°42.605' E 155°47.355'	1945	12 L
D2 set3-3	Snow	30-60cm	S 75°42.605' E 155°47.355'	1945	12 L
D2	Air	1day	S 75°42.523' E 155°42.436'	1942	48,000L (2000L/hr)
D2	Air	1day	S 75°42.523' E 155°42.436'	1942	48,000L (2000L/hr)
D2	Air	1day	S 75°42.523' E 155°42.436'	1942	48,000L (2000L/hr)
D2	Air	1day	S 75°42.523' E 155°42.436'	1942	48,000L (2000L/hr)

- 빙설 시료는 연구지역에서 3개 지점을 선정하고 각 지점당 3개 깊이로 나눠 시료를 채집하였고, 각 깊이별 12L씩 수집함

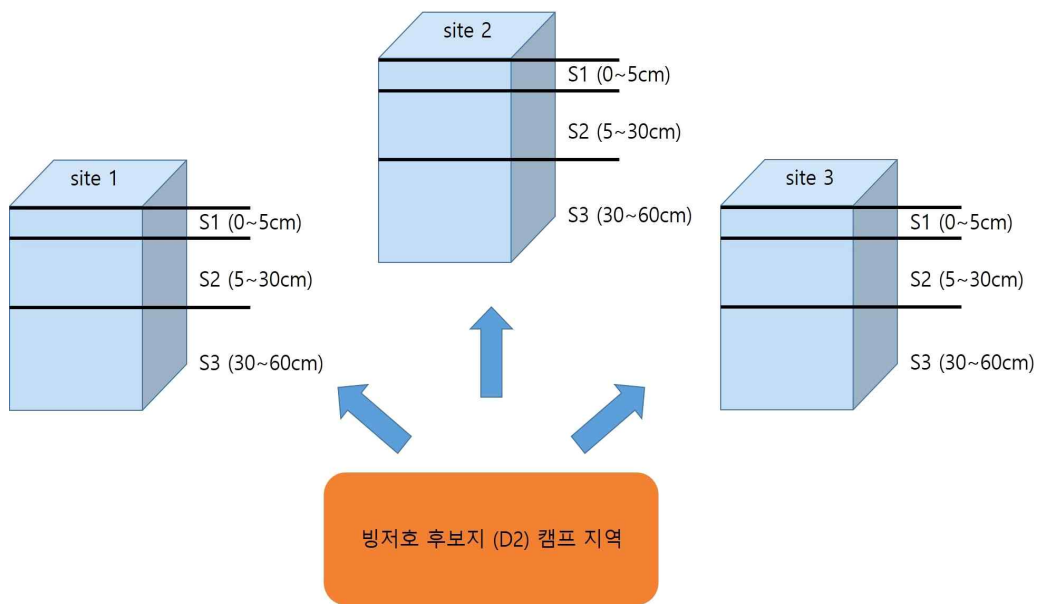


그림 103 빙설시료 채집 모식도



그림 104 빙설시료 채취 현장

- 대기시료는 베이스캠프 전방 50m 앞에서 공기포집을 위한 진공펌프 및 필터 장비를 설치하고 하루 24시간동안 총 48,000L의 대기를 하나의 필터에 포집하는 방식으로 4일간 포집. 총 4개의 대기포집 필터 획득함



그림 105 대기시료 포집 장치 및 환경 데이터 수집 센서

- 대기포집 장비에는 HOBO 로거 장치를 함께 설치하여 지상 1m 높이에서 대기온도, 대기 습도, 광량, PAR을 대기 포집 기간 동안 함께 수집함
- 환경 데이터 분석 결과, 하루 최고기온 영하 15도, 최저기온 영하 28도, 최대습도 80%, 최저습도 65%, 최대광량 650 W/m², 최저광량 50 W/m², 최대 PAR 1400 umol/m²/s, 최저 PAR 180 umol/m²/s를 기록함

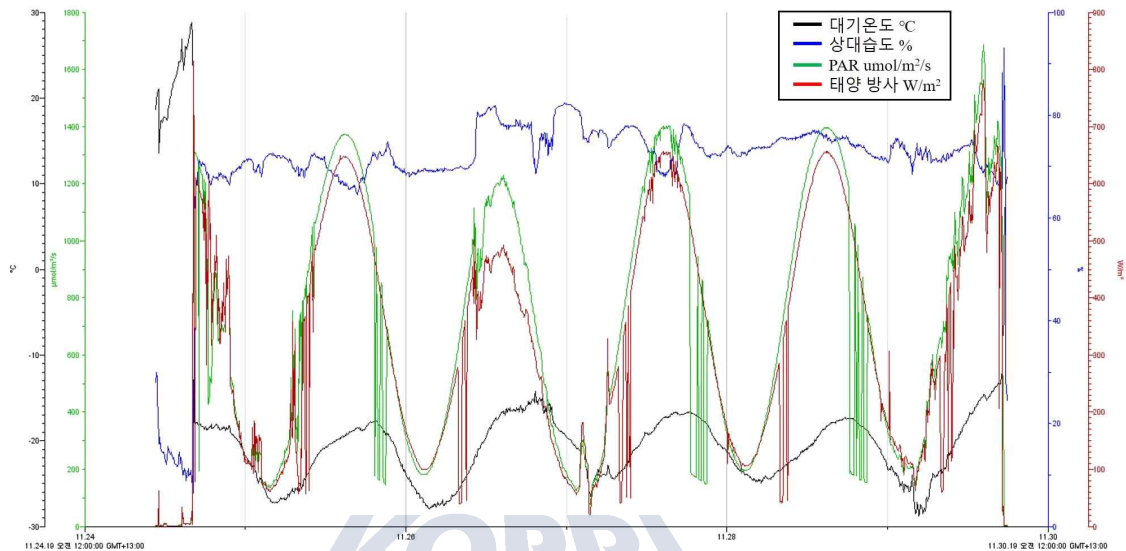


그림 106 환경시료 수집 지역의 환경데이터

- 빙설 시료의 화학적 특성 분석
 - 빙설시료의 화학적 특성을 파악하기 위해 pH, 전기전도도 (EC) 및 이온 크로마토그래피 분석을 진행함
 - 분석결과, 빙설시료는 평균 pH 5.68, 평균 전기전도도 20.8 uS/cm를 나타냈으며 pH는 깊이에 따라 증가하고 전기전도도는 깊이에 따라 감소하는 경향을 보임

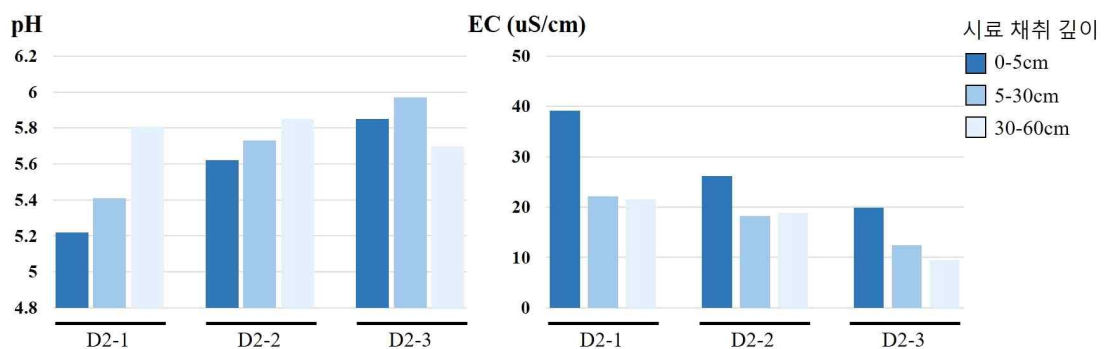


그림 107 빙설시료의 pH와 전기전도도

- 이온 크로마토그래피 분석결과, 대부분의 표층 빙설시료가 가장 높은 이온 농도를 보였고 Chloride, Nitrate는 깊이에 따라 이온의 농도가 낮아지는 경향을 보임

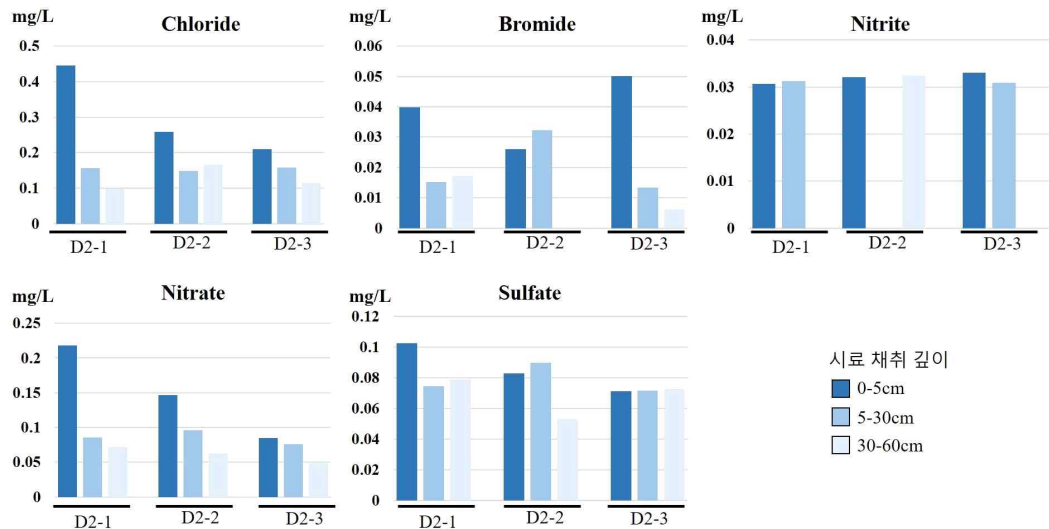


그림 108 이온크로마토그래피 분석 결과

- 빙설 시료의 생물학적 특성 분석

- 빙설 시료는 3개지점의 각 깊이별 4개의 샘플백에 나누어 수집되었고(약 3L) 3개의 샘플은 녹인 후, 약 1리터씩 여과를 하여 총 9개의 여과된 필터를 획득함. 이 중에서 각 샘플별 2개의 필터를 DNA 추출에 사용함
- DNA 추출 후, 나노드랍 장비를 이용하여 농도를 측정한 결과, 샘플에 따라 추출된 농도가 다양했으나 A260/280 값이 낮은 것을 볼 때 추출된 DNA의 순도가 낮은 것으로 예상됨

극지연구소

< DNA 추출 목록 >

Sample		pack 1					
Filter		①		②		③	
Site	Type	ng/ul	A260/A280	ng/ul	A260/A280	ng/ul	A260/A280
D2-1-S1	Snow	45.3	1.43	36.0	1.43	보관	
D2-1-S2	Snow	80.8	1.39	65.2	1.38		
D2-1-S3	Snow	10.9	1.4	95.5	1.34		
D2-2-S1	Snow	8.8	1.42	34.6	1.45		
D2-2-S2	Snow	4.4	1.5	20.8	1.44		
D2-2-S3	Snow	21.8	1.42	23.7	1.40		
D2-3-S1	Snow	5.1	1.76	27.1	1.41		
D2-3-S2	Snow	2.1	1.52	2.4	1.68		
D2-3-S3	Snow	2.0	2.51	41.6	1.38		
Sample		pack 2					
Filter		①		②		③	
Site	Type	ng/ul	A260/A280	ng/ul	A260/A280	ng/ul	A260/A280
D2-1-S1	Snow	4.9	1.48	9.1	1.43	보관	
D2-1-S2	Snow	2.6	1.34	19.1	1.44		
D2-1-S3	Snow	4.8	1.62	9.0	1.46		
D2-2-S1	Snow	9.5	1.38	46.9	1.42		
D2-2-S2	Snow	8.1	1.39	12.1	1.43		
D2-2-S3	Snow	3.2	2.1	25.9	1.39		
D2-3-S1	Snow	3.3	1.92	15.7	1.48		
D2-3-S2	Snow	2.9	1.56	44.4	1.40		
D2-3-S3	Snow	4.3	1.52	46.6	1.43		
Sample		pack 3					
Filter		①		②		③	
Site	Type	ng/ul	A260/A280	ng/ul	A260/A280	ng/ul	A260/A280
D2-1-S1	Snow	4.1	1.55	29.9	1.44	보관	
D2-1-S2	Snow	6.2	1.42	56.8	1.40		
D2-1-S3	Snow	3.0	1.37	34.5	1.45		
D2-2-S1	Snow	3.8	2.12	34.5	1.43		
D2-2-S2	Snow	3.3	1.42	54.7	1.39		
D2-2-S3	Snow	2.4	1.51	37.3	1.41		
D2-3-S1	Snow	1.3	1.72	40.8	1.43		
D2-3-S2	Snow	4.3	1.14	44.3	1.43		
D2-3-S3	Snow	2.1	1.74	48.6	1.41		
Sample		day1					
Filter		①		②			
D2	Air	ng/ul	A260/A280	ng/ul	A260/A280		
		3.4	1.47	보관			
Sample		day2					
Filter		①		②			
D2	Air	ng/ul	A260/A280	ng/ul	A260/A280		
		2.1	1.42	보관			
Sample		day3					
Filter		①		②			
D2	Air	ng/ul	A260/A280	ng/ul	A260/A280		
		6.0	1.55	보관			
Sample		day4					
Filter		①		②			
D2	Air	ng/ul	A260/A280	ng/ul	A260/A280		
		2.9	1.24	보관			

X

- 미생물 군집 분석을 위해 대용량 염기서열 분석을 진행하여 일부 병설 시료에 대한 군집 분석을 완료함
- 과 수준 (family level)에서, 두 시료 모두 Bacteroidetes와 Firmicutes 문에 속하는 Prevotellaceae, Streptococcaceae, Veillonellaceae 가 우점하는 것으로 나타남



그림 109 병설 시료 내 미생물 군집

- 병설시료에서 분리 배양된 미생물 (Sphingomonas)을 Pacbio 염기서열 분석법을 사용하여 전체 유전체 분석을 실시함
- 유전체 분석결과, 3개의 contig 서열을 획득하였고 각 contig당 3952, 171, 125개의 CDS (단백질을 코딩하는 유전자)가 존재하는 것을 예측함
- 기능 유전자로 분리된 염기서열을 기존에 알려진 유전자 서열과 비교한 결과, 빈영양 및 극한 환경에서 생존하는데 필요한 유전자들이 많은 것으로 밝혀짐

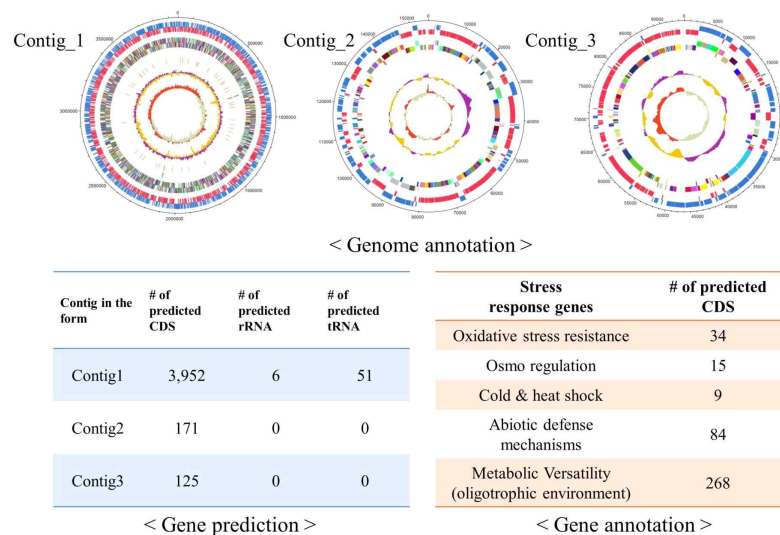


그림 110 유전체 분석 결과

- 빙설 시료 내 미생물을 현미경으로 확인하기 위해, 약 300ml의 빙설시료를 녹이고 여과지를 이용하여 여과한 뒤, DAPI 염색을 하여 형광 현미경으로 분석 진행함. 빙설시료 내 입자와 미생물 간 구별이 명확치 않아 향후 추가 정밀 분석 예정

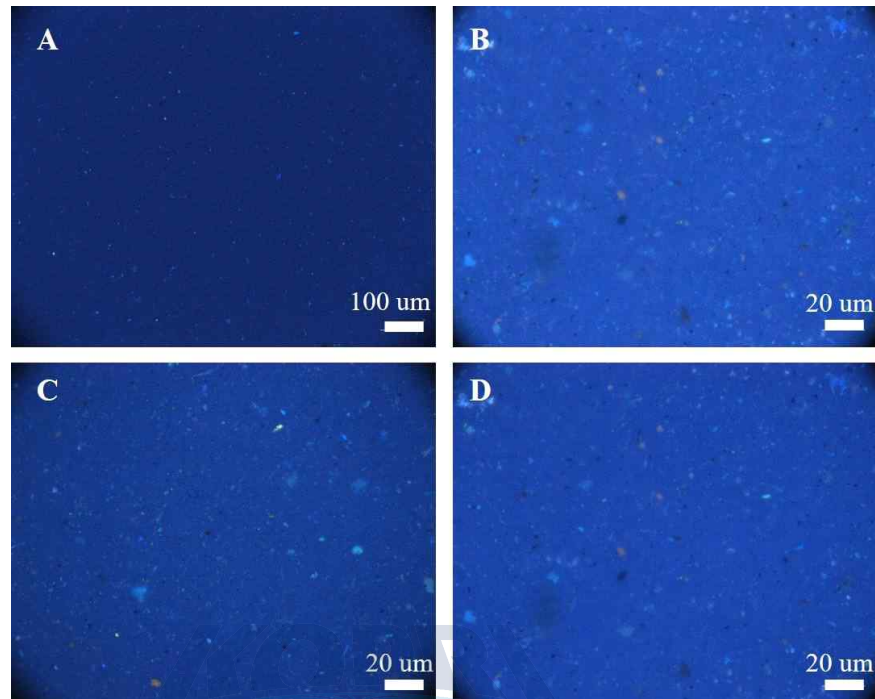


그림 111 빙설시료의 DAPI 염색과 형광현미경 분석

극지연구소

1단계 2차년도 (2021년)	1. 심부 빙저호 물리탐사 1-1. 빙저호 지역 광역 탄성과 탐사 및 자료해석 ○ '21/22 빙저호 지역 정밀 탄성과 탐사 - '19년 획득한 광역 탄성과 자료 분석을 통해 David 빙하 D2 지역 내 부존하는 빙저호의 확인과 탐사지역 빙하의 두께, 그리고 빙저호 구간 내 일정 부분에 대한 수심과 그 규모가 확인됨. 하지만, 탄성과 탐사의 주된 목적인 시추 위치 선정을 위해서는 보다 정확한 빙저호의 수심과 호수 아래 퇴적구조 및 기반암의 확인과 이에 대한 지구물리학적 정보가 요구됨. 이에 따라 추가적인 정밀 탐사가 필요하다고 판단 - 본래 '19년 최초 빙저호 탄성과 탐사에 이어 '20/21시즌에는 시추 위치 선정을 위한 정밀 탄성과 탐사 구간의 결정과 정확한 빙저호의 규모 확인을 위해 2차 광역적 탄성과 탐사를 계획하였으나 코로나19로 남극 하계출장이 전면 취소됨. 이에 따라 '19년 획득한 광역 탄성과 자료의 분석 결과를 기반으로 빙저호 시추 위치 선정을 위한 정밀 탄성과 탐사 필요구간을 선정, 장보고 기지 내 탐사용 폭약 재고량과 그 성능 보증기간이 '21/22 남극 하계시즌 내 도래됨을 고려하여 본래 3차연도에 계획되었던 정밀 탄성과 탐사를 이번 '21/22 남극 하계시즌을 활용하여 진행하고자 함 (그림 120) - 이번 탄성과 탐사는 빙저호에 대한 탄성과 속도모델과 중합 및 구조보정 단면 구축(그림 121)이 가능하도록 8개의 탄성과 트레이스가 중합되는 8 fold 수를 가지는 정밀 자료를 획득할 수 있도록 탐사를 설계함. 이를 통해 빙저호의 정확한 수심과 규모 그리고 호수 하부 퇴적구조 및 기반암에 대한 지구물리학적 정보의 확보와 시추 위치 선정 기대 (그림 122) - 96채널, 8개 트레이스가 중첩된 정밀 탄성과 자료를 획득하기 위해서는 기존 대비 인력과 시간, 폭약(사용 보증기간 도래) 등의 탐사자원이 기존 대비 4배 이상 소요 예상 - 본래 3차연도에 계획된 정밀 탄성과 탐사의 목표량은 fold 수를 고려하지 않은 기준으로 20km로 결정되었지만, 8 fold 수를 가지는 이번 탐사의 경우 해당 탐사목표를 십자형 측선 총 8km로 수정 - 탐사자료의 양은 기존의 20km에서 8km로 줄었지만, 8 fold로 중합이 가능한 탐사자료를 획득하여 속도분석을 통한 속도모델의 구축과 중합 및 구조보정 단면의 구축이 가능함. 이로써 빙저호 구조의 정밀 해석과 지구물리학적 특성 도출에 유리하다고 판단 - 기존 48채널 1 fold 수 자료와 비교하여 96채널 8 fold 수 자료를 획득하기 위해서는 탐사 필요 인력(5명 -> 6명), 탐사 수행 기간(10일 -> 20일), 사용 폭약 수량(54kg -> 300kg), 탄성과 시스템 장비(48채널 -> 96채널) 소요 예상 - 탄성과 음원은 96채널을 충분히 커버할 수 있도록 빙하 표면에서 최대 30 m 아래 1,200g PETN 폭약을 장약 후 발파하여 생성
---------------------------------	---

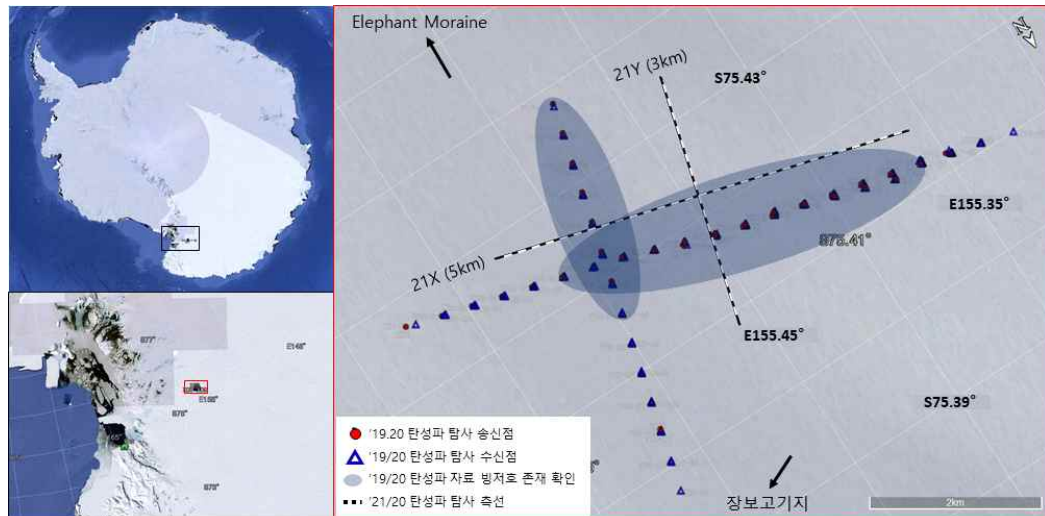


그림 112 David Glacier D2 빙저호 지역 정밀 탄성파 탐사 축선 계획

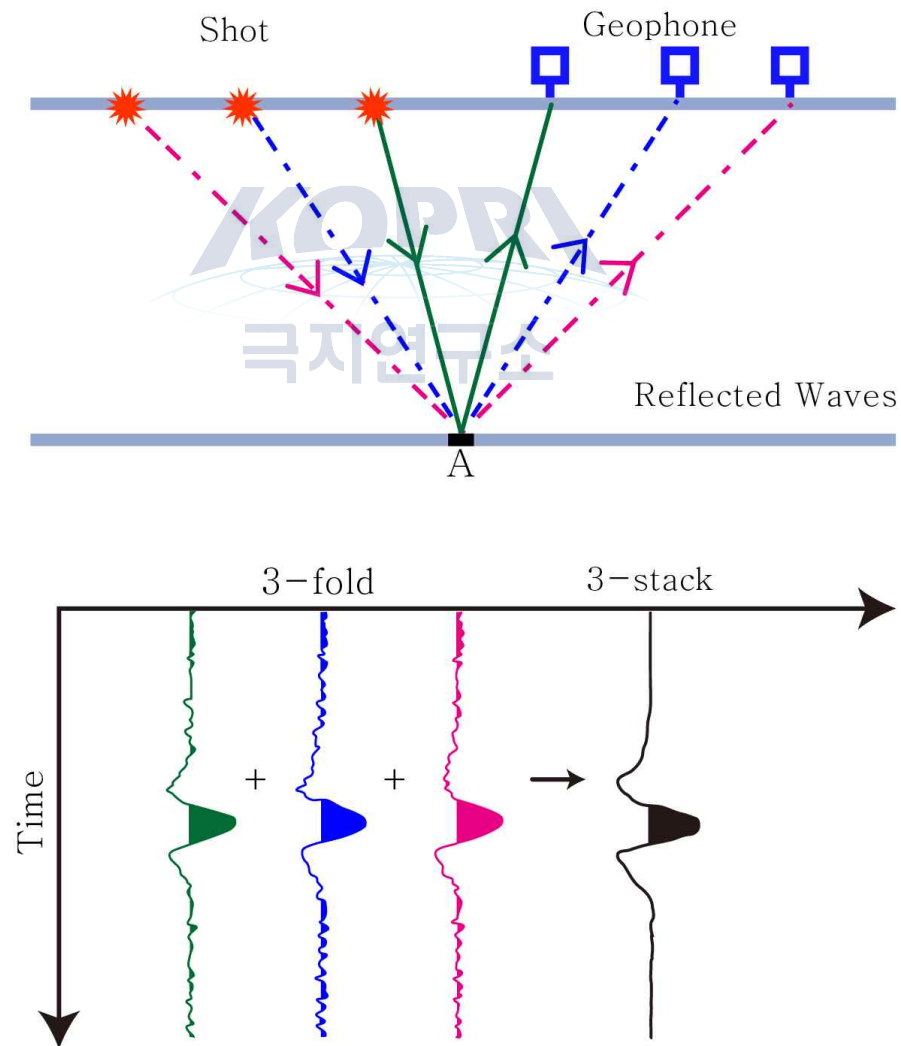


그림 113 지하의 A 지점에서 반사된 3번의 파동을 수신하여 탄성파 자료 획득. 3번 중첩(3-fold)된 신호를 획득하여 지구물리학적 특성(매질 탄성 속도) 도출 가능

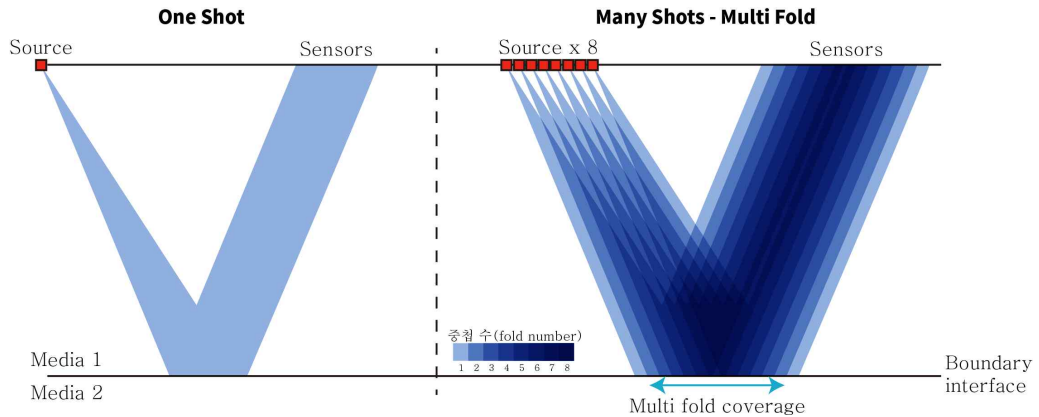


그림 114 하나의 측선에 8번의 인공 지진파를 발생시켜 8중첩(8-fold)으로 기록하여 중첩될수록 자료품질(S/N) 향상. '19년도 자료대비 고품질의 정밀 자료 획득 가능

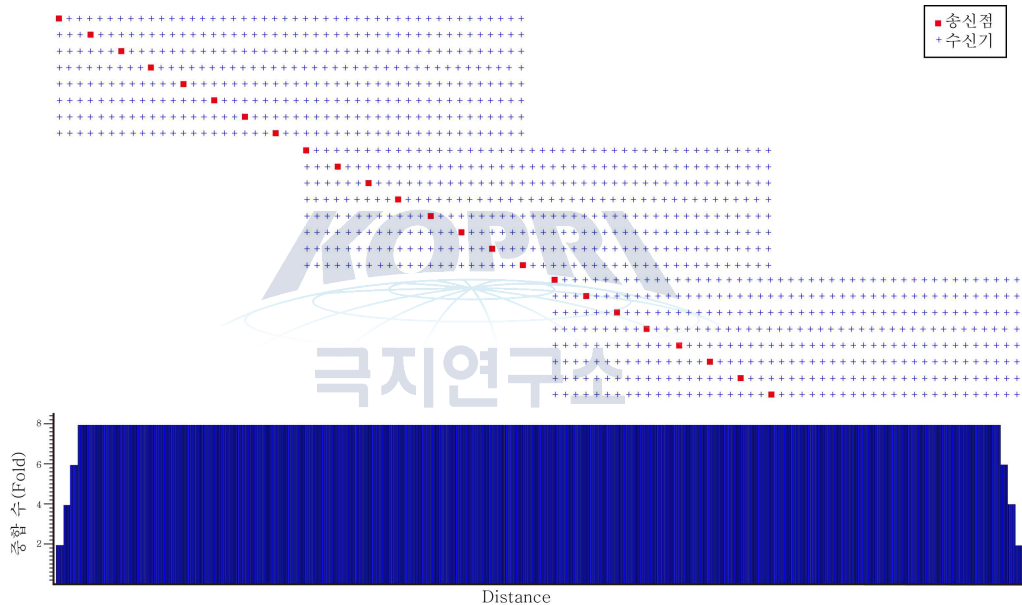


그림 115 '21/22시즌 남극 현장 탄성과 탐사 중첩(fold)수 계산

○ 탄성과 자료처리 및 분석

- 슬럼버저社에서 개발한 탄성과 전용 소프트웨어 Omega2에 포함된 정밀 필터링 기술과 신호처리 기반 잡음제거 기술 등을 활용한 탄성과 자료의 신호대 잡음비 (S/N ratio)향상 자료처리 워크 플로우 개발(그림 5). 이를 활용하여 원시자료 내 포함된 잡음을 제거, 실제 구조에 의한 반사 신호를 명확히 확인. 이로 인해 빙하의 두께와 빙저호 규모 추정 가능
- 잡음이 제거된 탄성과 자료를 바탕으로 빙하 속도를 고려한 NMO 과정을 통해 구축한 중첩 전 탄성과 단면에 대한 자료해석
- '19년도에 획득한 X측선에 대한 단면에서는 빙하의 두께는 약 2,280m로 추정, 1.25초 부근 역전된 위상의 강한 반사 신호를 바탕으로 빙하 아래 호수가 확인됨. 호수의 범위는 단면상에 6번에서 17번 사이에 분포된 것으로 추정, 단면 좌측 1번부터 10번 사이에는

크레바스에 기인한 것으로 추정되는 강한 잡음이 나타남. 단면 중앙부 1.4초 지점에 나타나는 반사 신호는 호수 아래 기반암 혹은 퇴적구조에 의한 신호일 가능성이 큰 것으로 생각됨. 이를 호수 바닥으로 판단한다면, 해당 부분에서는 수심이 약 80m로 해석(그림 125)

- '19년도에 획득한 Y측선에 대한 단면에서는 X단면과 같은 약 2,280m 두께의 빙하가 있고, 그 아래 호수가 존재하고 있는 형태로 확인됨. 호수는 측선 전 구간에 걸쳐 나타나고 있음이 확인됨. 호수 아래 바닥 혹은 기반암에 의한 반사 신호는 확인이 어려움. X단면의 경우와 같이 크레바스에 기인한 것으로 추정되는 강한 잡음이 단면의 상당 부분을 차지하고 있음. 특징으로는 굴절 신호가 관측되며, 이에 대한 보다 정확한 확인이 요구됨. 역전된 반사면과 그 아래 강한 반사면이 뚜렷하게 나타나고 있음이 확인됨(그림 126)
- 슬럼버저社의 탄성과 전용 소프트웨어 Omega2에 포함된 정밀 속도분석 및 구조보정 기술을 기반으로 정밀 탄성과 탐사 자료로부터 속도모델 및 최종 탄성과 단면 구축을 위한 워크 플로우 개발.
- 그림 8에는 지난해 수행된 연구를 통해 개발한 고정밀(격자크기 1미터) 파동전파모델링 기술을 통해 임의로 설정한 다양한 빙저호 바닥구조에 대해 잡음이 없는 인공합성 자료를 계산하고, 이를 바탕으로 호수 바닥 면의 모양에 따른 탄성과 자료 내 파형 구조를 분석하는 연구수행, 이로써 호수 바닥구조에 따라 탄성과 자료에 나타날 수 있는 파형 양상을 파악
- [21-22시즌 빙저호 정밀 탄성과 탐사자료 획득 후] 중합이 가능한 fold 수를 가지는 탄성과 자료에 대한 정밀 속도분석을 통해 탐사지역 빙저호 속도모델을 제시하고, 이를 바탕으로 중합 및 구조보정 단면 구축

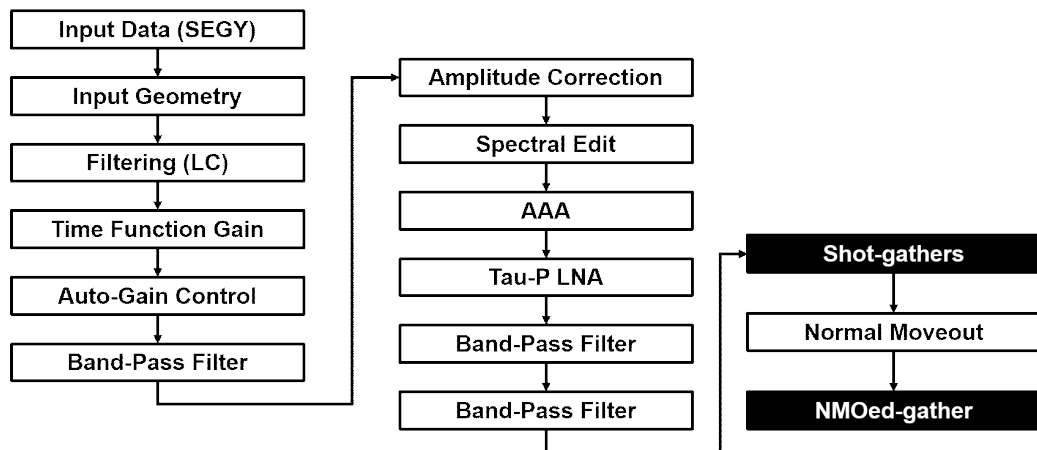


그림 116 중합 전 탄성과 자료에 대한 신호대 잡음 비(S/N ratio) 향상을 위한 자료처리 과정

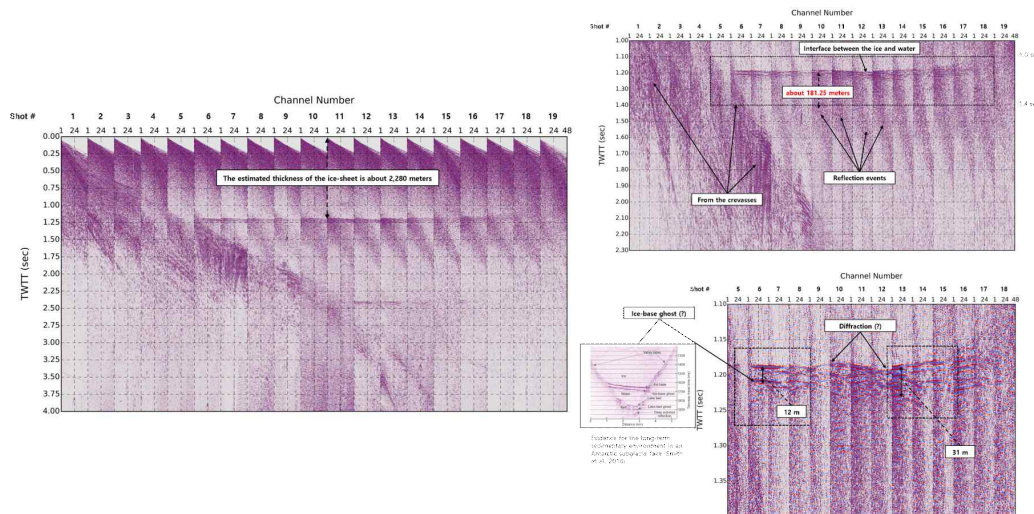


그림 117 '19년 빙저호 탐사자료 최종 단면 (Line X)

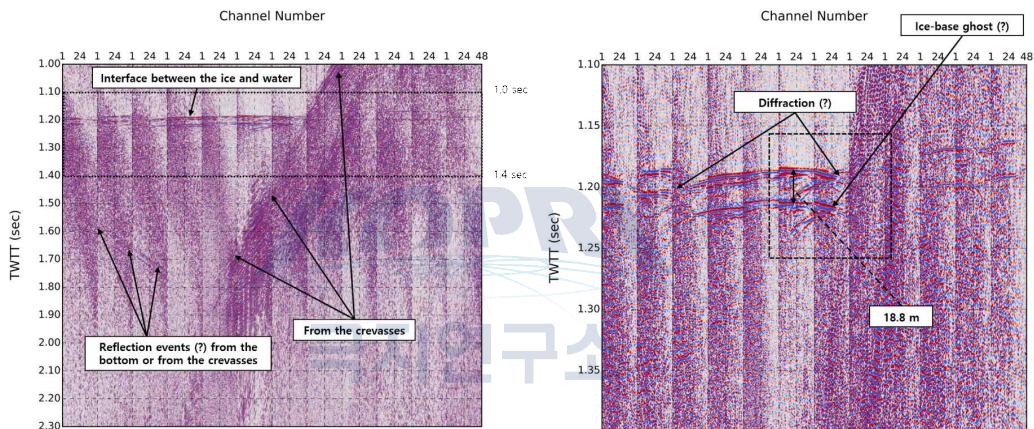


그림 118 19년 빙저호 탐사자료 최종 단면 (Line Y)

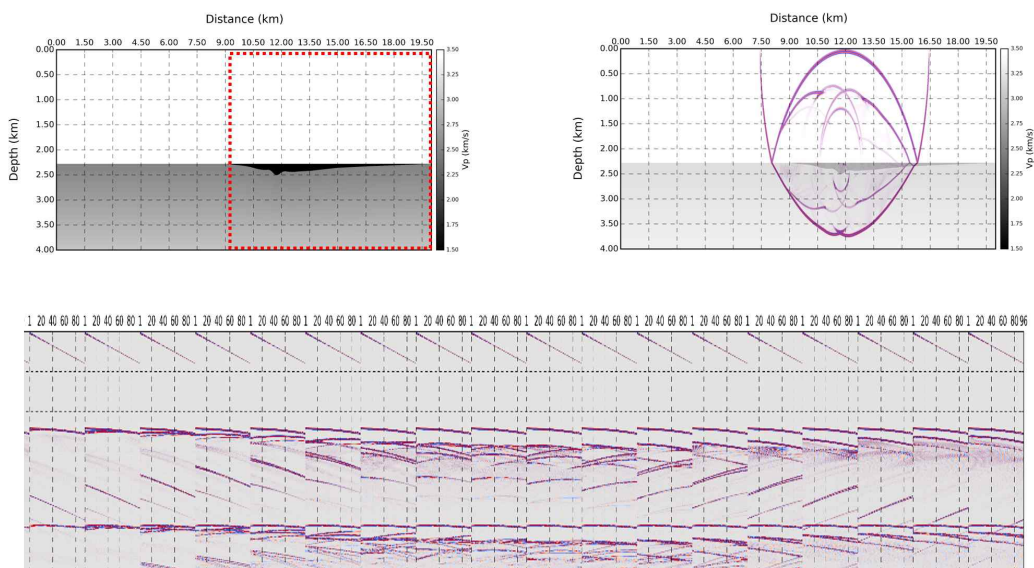


그림 119 파동전파 모델링을 통해 임의로 설정한 빙저호 모델에서 계산한
인공합성자료

2. 심부 빙저호 시추기술 개발

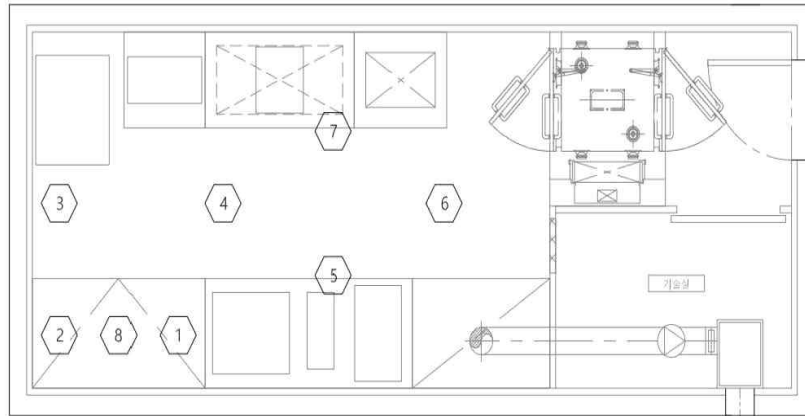
2-1. 이동식 청정실험실 개발

○ 이동식 청정 실험실 테스트 수행

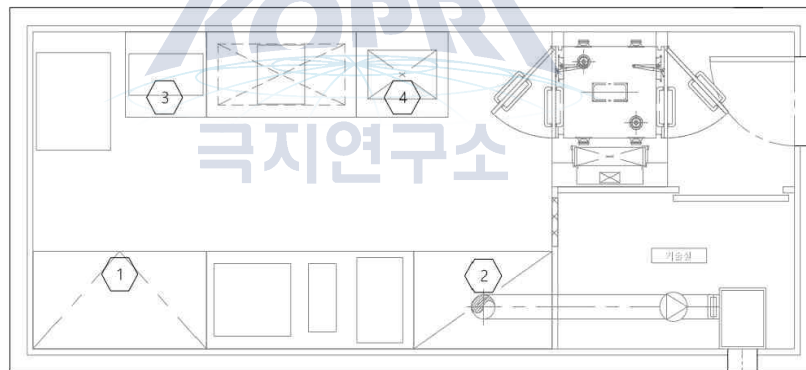
- 이동식 청정 실험실의 정상 작동 여부 테스트를 위해 실내청정도, 실내 소음도, 실내조도 항목으로 나누어 테스트 진행 및 정상 가동 확인 (테스트 결과서)
- 이동식 청정 실험실 내부 장비 설치 및 가동 테스트 수행결과, 냉장-냉동고, 3차 증류기, 원심분리기, 고압멸균기, 형광현미경 모두 정상 작동됨을 확인

측정항목	개요	참고사용기기
1. 실내청정도	* CLEAN ROOM의 청정도를 측정한다. -1측정점에서 1분간 측정 측정점 : CLEAN ROOM : 8 개소	PARTICLE COUNTER MODEL : METOEN 3400
2. 실내소음도	* CLEAN ROOM의 소음도를 측정한다. - 각 Point별 측정 측정점 : CLEAN ROOM : 4 개소	SOUND LEVEL METER MODEL : TES-1352A
3. 실내조도	* CLEAN ROOM의 소음도를 측정한다. - 각 Point별 측정 측정점 : CLEAN ROOM : 4 개소	Digital Light Meter MODEL : TES-1336A

< 이동식 청정 실험실 테스트 측정항목 개요 >



CLEAN ROOM PARTICLE CHECK POINT



CLEAN ROOM 소음, 초도 CHECK POINT

그림 120 이동식 청정 실험실 내부 테스트 포인트

1) PARTICLE TEST

CLEAN ROOM

설 계 치 : 1,000 CLASS(0.5 μ m 1,000개 이하)

* (첨부 자료)

1

SAMPLE 1 OF 1
LOCATION NAME:
Location1
AREA NAME:
Area1
GROUP NAME:
Default
2021-01-29 13:14:17
2021-01-29 13:15:17
FLOWRATE: 1.00 CFM
VOLUME: 1.001 FT³
SAMPLE TIME: 00:01:00
COUNT SCALE: Particles
SIZE(um) CUMUL. DIFF.

0.3	15	13
0.5	2	2
1.0	0	0
3.0	0	0
5.0	0	0
10.0	0	0

2

SAMPLE 1 OF 1
LOCATION NAME:
Location1
AREA NAME:
Area1
GROUP NAME:
Default
2021-01-29 13:15:29
2021-01-29 13:16:29
FLOWRATE: 1.00 CFM
VOLUME: 1.001 FT³
SAMPLE TIME: 00:01:00
COUNT SCALE: Particles
SIZE(um) CUMUL. DIFF.

0.3	5	5
0.5	0	0
1.0	0	0
3.0	0	0
5.0	0	0
10.0	0	0

3

SAMPLE 1 OF 1
LOCATION NAME:
Location1
AREA NAME:
Area1
GROUP NAME:
Default
2021-01-29 13:16:40
2021-01-29 13:17:40
FLOWRATE: 1.00 CFM
VOLUME: 1.001 FT³
SAMPLE TIME: 00:01:00
COUNT SCALE: Particles
SIZE(um) CUMUL. DIFF.

0.3	475	426
0.5	49	43
1.0	6	5
3.0	1	1
5.0	0	0
10.0	0	0

4

SAMPLE 1 OF 1
LOCATION NAME:
Location1
AREA NAME:
Area1
GROUP NAME:
Default
2021-01-29 13:17:52
2021-01-29 13:18:52
FLOWRATE: 1.00 CFM
VOLUME: 1.001 FT³
SAMPLE TIME: 00:01:00
COUNT SCALE: Particles
SIZE(um) CUMUL. DIFF.

0.3	155	138
0.5	17	14
1.0	3	3
3.0	0	0
5.0	0	0
10.0	0	0

< 이동식 청정 실험실 테스트 결과서-1 >

1) PARTICLE TEST

CLEAN ROOM

설 계 치 : 1,000 CLASS(0.5 μ m 1,000개 이하)

* (첨부 자료)

5

SAMPLE 1 OF 1
LOCATION NAME:
Location1
AREA NAME:
Area1
GROUP NAME:
Default
2021-01-29 13:19:36
2021-01-29 13:20:36
FLOWRATE: 1.00 CFM
VOLUME: 1.001 FT³
SAMPLE TIME: 00:01:00
COUNT SCALE: Particles
SIZE(um) CUMUL. DIFF.
0.3 689 617
0.5 72 50
1.0 22 21
3.0 1 1
5.0 0 0
10.0 0 0

6

SAMPLE 1 OF 1
LOCATION NAME:
Location1
AREA NAME:
Area1
GROUP NAME:
Default
2021-01-29 13:20:50
2021-01-29 13:21:50
FLOWRATE: 1.00 CFM
VOLUME: 1.001 FT³
SAMPLE TIME: 00:01:00
COUNT SCALE: Particles
SIZE(um) CUMUL. DIFF.
0.3 151 131
0.5 20 16
1.0 4 4
3.0 0 0
5.0 0 0
10.0 0 0

7

SAMPLE 1 OF 1
LOCATION NAME:
Location1
AREA NAME:
Area1
GROUP NAME:
Default
2021-01-29 13:24:50
2021-01-29 13:25:50
FLOWRATE: 1.00 CFM
VOLUME: 1.001 FT³
SAMPLE TIME: 00:01:00
COUNT SCALE: Particles
SIZE(um) CUMUL. DIFF.
0.3 206 187
0.5 19 16
1.0 3 2
3.0 1 1
5.0 0 0
10.0 0 0

8

SAMPLE 1 OF 1
LOCATION NAME:
Location1
AREA NAME:
Area1
GROUP NAME:
Default
2021-01-29 13:26:02
2021-01-29 13:27:02
FLOWRATE: 1.00 CFM
VOLUME: 1.001 FT³
SAMPLE TIME: 00:01:00
COUNT SCALE: Particles
SIZE(um) CUMUL. DIFF.
0.3 15 14
0.5 1 0
1.0 1 1
3.0 0 0
5.0 0 0
10.0 0 0

< 이동식 청정 실험실 테스트 결과서-2 >

2) NOISE TEST

CLEAN ROOM

소음 기준(dB) : ≤ 65

* (첨부 자료)

1		2	
3		4	

< 이동식 청정 실험실 테스트 결과서-3 >

3) LIGHTING LEVEL TEST

CLEAN ROOM

조도 기준(LUX) : 500≥

* (첨부 자료)

1		2	
3		4	

< 이동식 청정 실험실 테스트 결과서-4 >



교정성적서

CALIBRATION CERTIFICATE



성적서번호(Certificate No.) : 201127AE66
관 리 번 호(Control No.) : EE05-C69647

경기도 화성시 동탄첨단산업2로 72
Tel:031-379-5114, Fax:031-379-5115

페이지 (1) / (총 2)

1. 의뢰자 (Client)
기 관 명 (Name) : (주)삼기테크
주 소 (Address) : 서울특별시 금천구 가마산로 96 (가산동, 대륭테크노타운8차 13층 1311호)
2. 측정기 (Calibration Subject)
기 기 명 (Description) : PARTICLE COUNTER
제조회사 및 형식 (Manufacture & Model Name) : HACH / METONE3400
기기번호 (Serial Number) : 1507525023
3. 교정일자 (Date of Calibration) : 2020. 12. 07
4. 교정환경 (Environment Conditions)
온 도 (Temperature) : (20.0 ± 0.2) °C 습도(Humidity) : (50 ± 2) % R.H.
교정장소 (Location) : ■ 고정표준실(Perm. Lab.) □ 이동교정(Mobile Lab.) □ 현장교정(On Site Calibration)
(주소 : 경기도 화성시 동탄첨단산업2로 72)
5. 측정표준의 소급성 (Traceability)
교정방법 및 소급성 서술 (Calibration method and /or brief description) :
상기 기기는 입자 계수기의 교정절차서(SICT-CP-10615)에 따라 국가측정표준기관으로부터 측정의 소급성이 확보된 아래의 표준장비를 이용하여 교정되었음.

교정에 사용된 표준장비 명세 (List of used standards/specifications)

기기명 Description	제조회사 및 형식 Manufacture and Model	기기번호 Serial Number	차기교정예정일자 The due date of next Cal.	교정기관 Calibration Lab.
PARTICLE COUNTER CALIBRATION SYSTEM	LIGHTHOUSE / NONE	151199001	NCR	-
FLOW METER	TSI / 4043G	40431422017	2021. 01. 21	교정기술원(주)
PARTICLE COUNTER	P.M.S / LASAIR3 110	108381	2021. 04. 22	(주)에이치시티
PARTICLE SIZE STANDARDS	THERMO SCIENTIFIC / 0.3 µm	196947	2022. 09. 13	METAS
PARTICLE SIZE STANDARDS	THERMO SCIENTIFIC / 0.5 µm	193188	2022. 09. 16	METAS

극지연구소

6. 교정결과 (Calibration Results) : 교정결과 참조 (Refer attached file)
7. 측정불확도 (Measurement Uncertainty) : 교정결과 참조 (Refer attached file)

확 인 (Affirmation)	작성자 (Measurements performed by)	승인자 (Approved by)
	연락처 (Tel No.) : 031-5183-4207 이상욱	직 위 (Title) : 기술책임자(정) h.k. Min
	성 명 (Name) : 이상욱	성 명 (Name) : 민현기

위 성적서는 국제시험기관인정협력체(International Laboratory Accreditation Cooperation) 상호인정협정(Mutual Recognition Arrangement)에 서명한 한국인정기구(KOLAS)로부터 공인받은 분야의 교정결과입니다.
(The above calibration certificate is the accredited calibration items by Korea Laboratory Accreditation Scheme, which signed the ILAC-MRA.)

한국인정기구 인정

Accredited by KOLAS, Republic of Korea

교정기술원(주) 대표이사
Institute of Calibration & Technology Co., Ltd.



2020년 12월 08일

(Note) 이 성적서는 측정기의 정밀정확도에 영향을 미치는 요소(과부하, 온도, 습도 등)의 급격한 변화가 발생한 경우에는 무효가 됩니다.
(Note) If any significant instability or other adverse factor(overload, temperature, humidity etc.) manifests itself before, during or after calibration, it is likely to affect the validity of the calibration.

SICT-QP-15-01K(Rev.0) 위변조 확인 코드 : 54D5-72B8-EF69-2F10-9509-39BB-7407-C3E4

Institute of Calibration & Technology Co., Ltd.

< 이동식 청정 실험실 테스트 결과서-5 >



교 정 결 과

CALIBRATION RESULTS



성적서번호 : 201127AE66
모 델 : METONE3400

교 정 일 자 : 2020. 12. 07
차기교정예정일자 : 2021. 12. 07

1. 공기유량 (Flow Rate)

범 위 Range	측 정 값 Measured value	측정불확도 Measurement Uncertainty
28.30 L/min	27.01 L/min	0.13 L/min

2. 계수효율 (Counting Efficiency)

입자크기 Particle Size	기 준 값 Reference Value	측 정 값 Measured value	측정불확도 Measurement Uncertainty
0.3 μm	50 %	55.3 %	5.5 %
0.5 μm	100 %	103.2 %	5.5 %

3. 영점 점검 (Zero Counting)

0 개 (1분씩 10회 측정시 발생 개수)

※ 측정불확도(Measurement Uncertainty)

신뢰수준 약 95 %, $k = 2$ (The reported expanded uncertainty is based on a standard uncertainty multiplied by a coverage factor $k = 2$, providing a level of confidence of approximately 95 %.)

끝.

SICT-QP-15-02K(Rev.0)

※ KOLAS 공인교정기관 지정제도 운영요령 제40조 관련주기 : 12 개월
위변조 확인 코드 : 54D5-72B8-EF69-2F10-9509-39BB-7407-C3E4

Institute of Calibration & Technology Co.,Ltd.

< 이동식 청정 실험실 테스트 결과서-6 >

2-2. 열수시추 멸균시스템 개발

○ 열수 멸균시스템 개발 자료 분석

- 남극에서 사용할 수 있는 최적의 열수 시추 멸균 시스템을 제작하기 위해 기존에 사용되었던 시스템에 대한 자료 수집
- 영국은 BAS에서 진행된 BEAMISH 프로젝트를 기반으로 SLCECs 프로젝트에서는 보완된 열수시추 시스템을 개발 중임
- 멸균 시스템은 크게 필터를 사용한 여과장치와 UV를 사용한 멸균 장치로 구성됨
- 여과장치는 드릴에 사용하기 위해 녹인 물속에 있는 다양한 크기의 파티클과 미생물을 물리적으로 제거하는 방법으로, 필터의 pore 크기가 20, 5, 1, 0.1 μm 인 4개의 필터를 물이 차례로 지나면서 여과되는 방식임
- UV 장치는 254nm 고강도 200W 살균 램프가 장착되어 미생물을 멸균하고 추가적으로 80W (185nm) UV장치를 설치하여 용존 유기탄소를 산화시킴
- 중단없는 안정적인 열수 시추를 위해 멸균 장치는 듀얼 시스템으로 제작하고 여과장치에는 압력센서가 장착되어 필터가 막혀 여과가 되지 않는 상황을 모니터링하여 즉각적으로 여분의 멸균 시스템으로 전환 할 수 있도록 설계함
- 전체 시추 시스템에서 물의 멸균 상태를 추적할 수 있도록 각 장치의 입출구 배관에 물을 샘플링할 수 있는 장치가 마련되어 있어 실시간으로 모니터링 함

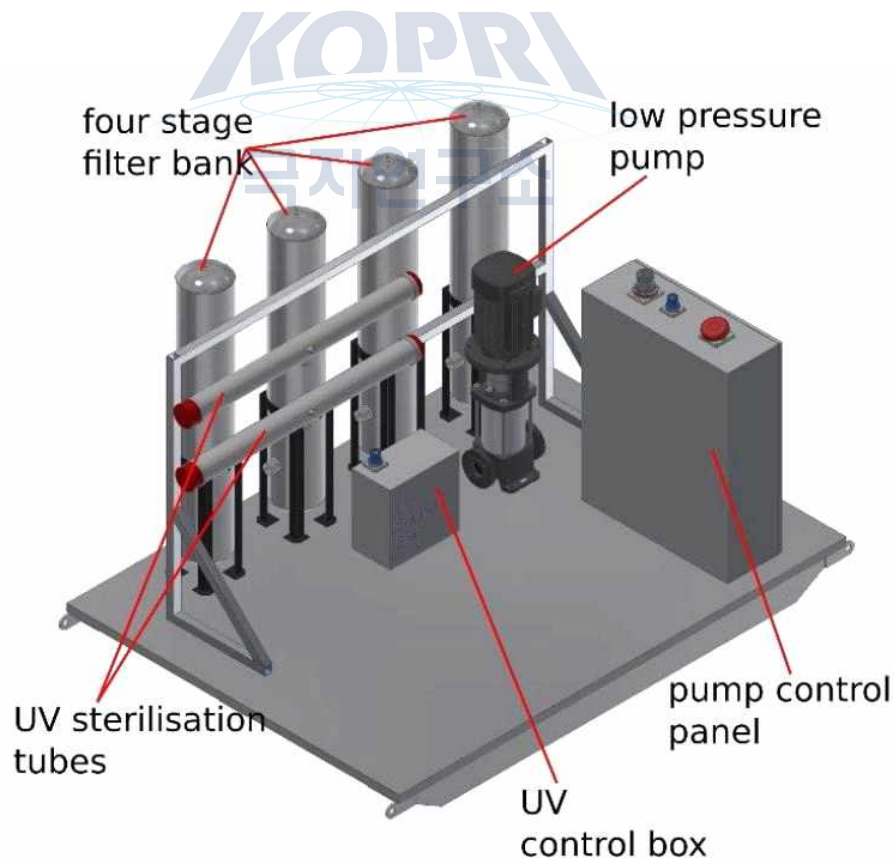


그림 121 열수시추 멸균시스템

○ 열수 멸균시스템 설계 및 제작

- 사전 조사를 바탕으로 빙저호 시추에 최적화된 멸균시스템 설계 완료 (설계도면)

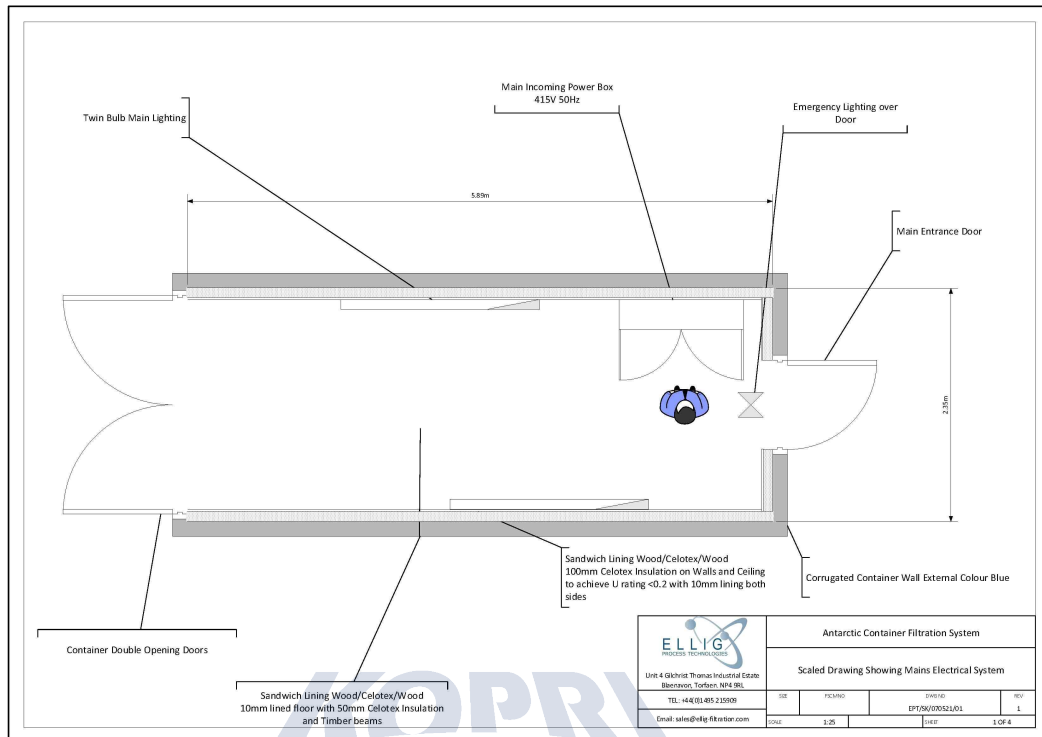


그림 122 열수 멸균시스템 설계도면-1

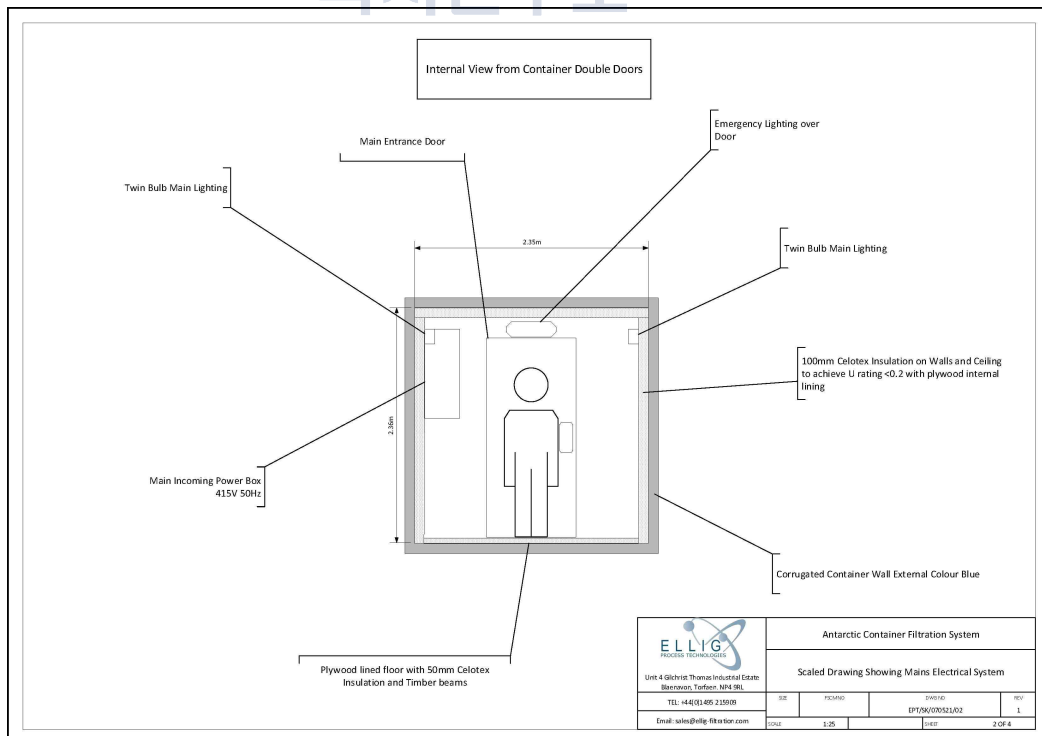


그림 123 열수 멸균시스템 설계도면-2

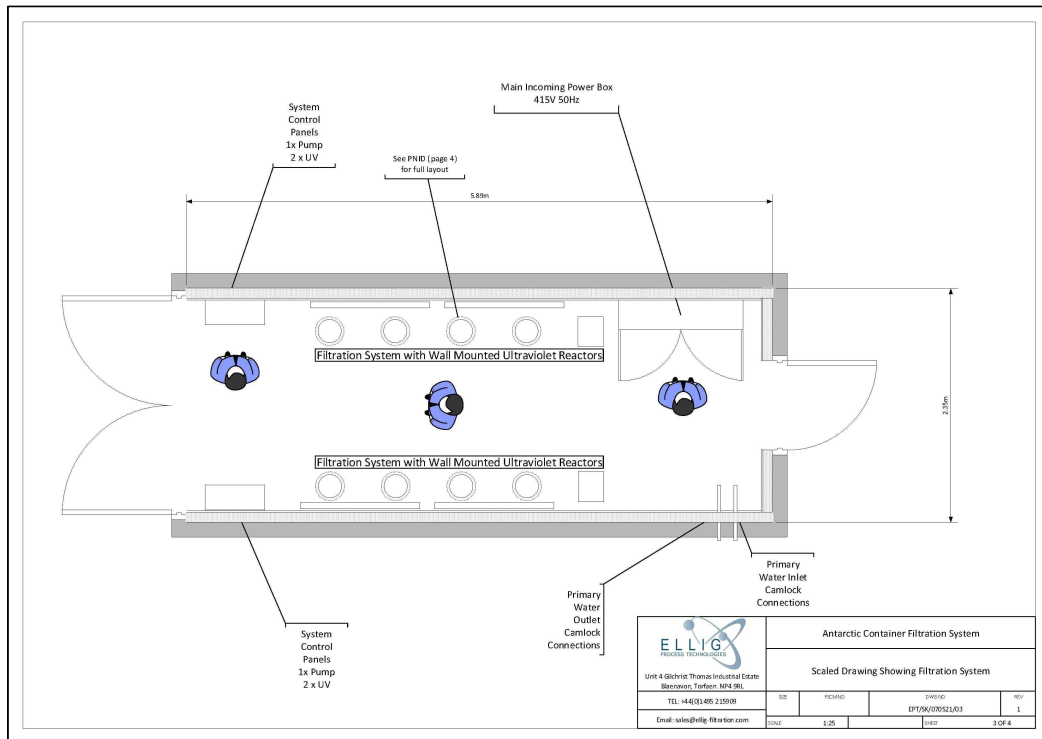


그림 124 열수 멸균시스템 설계도면-3

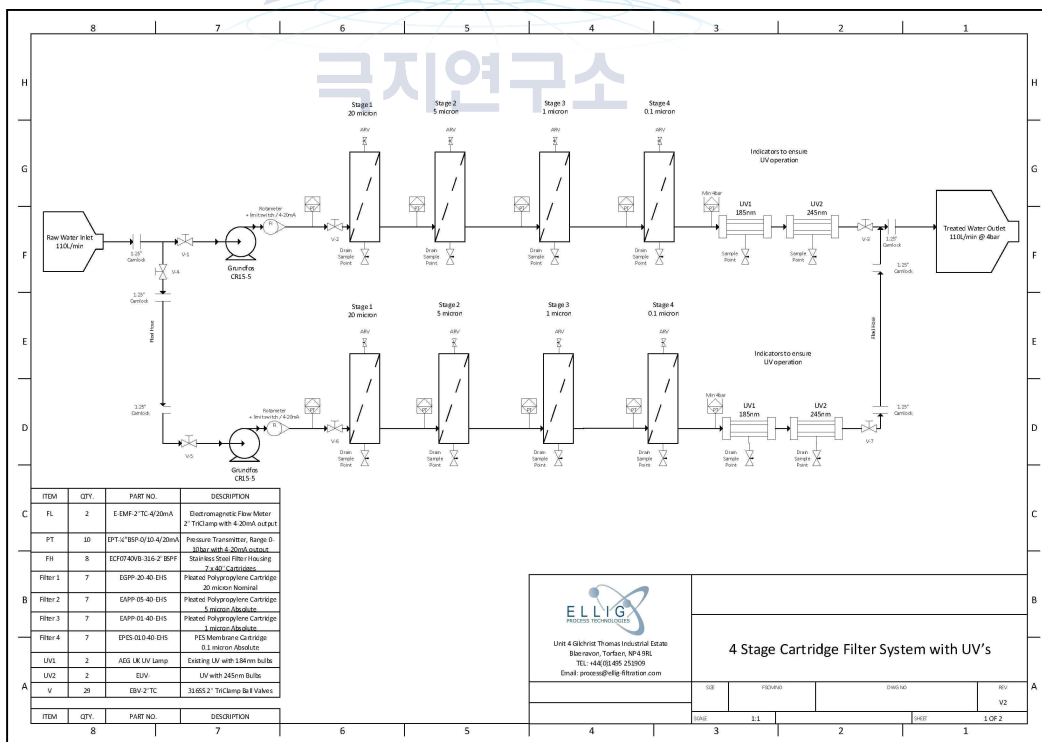


그림 125 열수 멸균시스템 설계도면-4

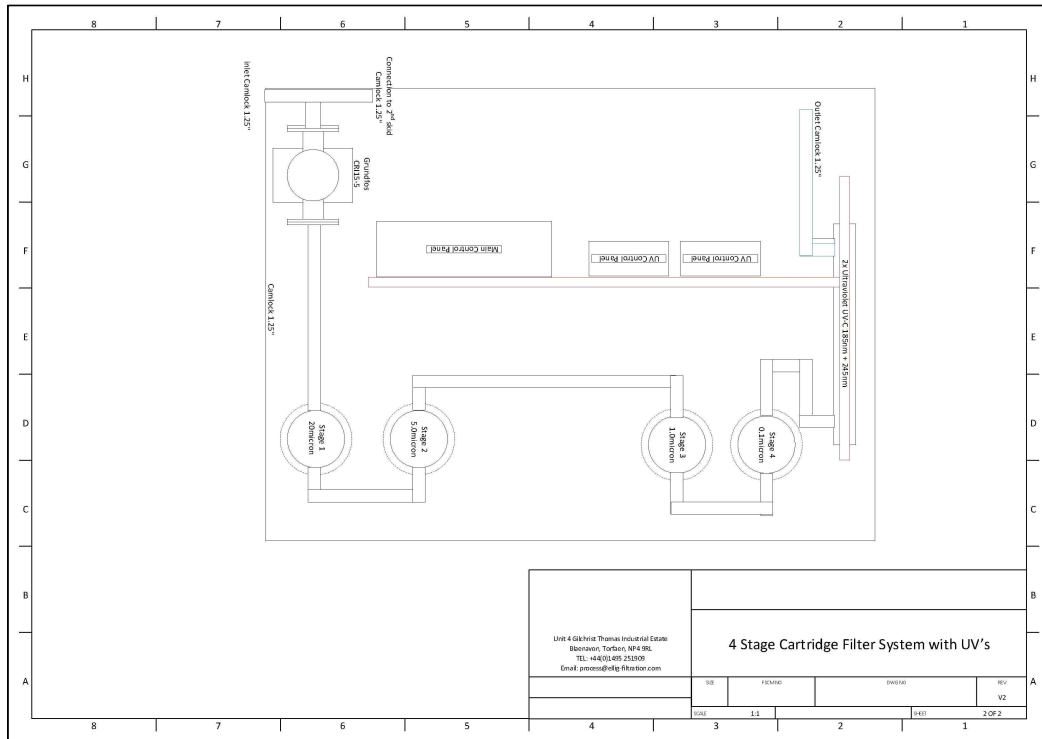


그림 126 열수 멸균시스템 설계도면-5

- 열수 멸균시스템 설계를 바탕으로 견적 완료

ELLIG
PROCESS TECHNOLOGIES

REF: EPT/CT/25052021/001

18 June 2021

Mr Mincheol Kim
Senior Research Scientist
Korea Polar Research Institute (KOPRI)
26, Songdomirae-Ro
Yeosu-Gu
Incheon 460-840
South Korea

RE: Containerised Parallel 4-Stage Filtration System

Dear Mincheol,

Following our recent discussion regarding building and supplying a containerized filtration system for use during your upcoming Antarctica research expedition, please find below our detailed quotation for consideration.

Design and build of Filtration System
Ellig Process Technologies Limited propose a 4 Stage Filtration system housed within a 20-foot shipping container, suitably insulated with Main Electrical Distribution Board. The filtration system will provide 4 levels of filtration, starting at 20 micron down to 0.1 micron. Duplication of the system will allow parallel or Duty/Standby operation depending on requirements.

Included in this quotation is video training, operation guide and delivery to South Korea (seaport)

ELLIG PROCESS TECHNOLOGIES
Performance Filtration

Unit 4, Gilchrist Thomas Industrial Estate, Blaenavon, Torfaen, NP4 9RL
Tel: +44(0)1495 215 909 Fax: +44(0)845 838 7882 Email: sales@ellig-filtration.com
www.ellig-technologies.com

ELLIG
PROCESS TECHNOLOGIES

Scope of Supply

- 20-Foot Shipping Container
 - Insulation and Lining
 - Electrical Distribution Board
 - Lighting
- Filtration System x2
 - Vertical Multistage Pump
 - 4 off 316 Stainless Steel Filter Housings with Tri clamp Connections
 - Full set of Filter Cartridges
 - Ozone Ultraviolet Reactor
 - Microbial Ultraviolet Reactor
 - 316 Stainless Steel Pipework with Tri clamp connections
 - 2 set of spare filters and bulbs
- Supporting Documentation
 - Layout Drawings
 - Process & Identification Drawings
 - Full Operation Guide
 - Operation Video Guide
- Delivery
 - CNF to seaport in South Korea

Total Project Cost	£100,000.00
	One Hundred Thousand Great British Pounds

Availability Current timeframe for manufacture and delivery is **8-12 weeks** from receipt of official purchase order

This quotation is valid until 31st December 2021

If you have any questions on the contents of this quotation, or require any additional assistance, please do not hesitate to contact us.

Kind Regards

C. Thomas
Craig Thomas
Managing Director.

ELLIG PROCESS TECHNOLOGIES
Performance Filtration

Unit 4, Gilchrist Thomas Industrial Estate, Blaenavon, Torfaen, NP4 9RL
Tel: +44(0)1495 215 909 Fax: +44(0)845 838 7882 Email: sales@ellig-filtration.com
www.ellig-technologies.com

< 열수 멸균시스템 제작을 위한 견적서 >

- 열수 멸균시스템 제작 및 인수(납품) 완료



그림 127 열수 멸균시스템 제작 완료품

2-3. 빙저호 퇴적물 시추 시스템 개발

○ 빙저호 퇴적물 채취용 시추기 설계

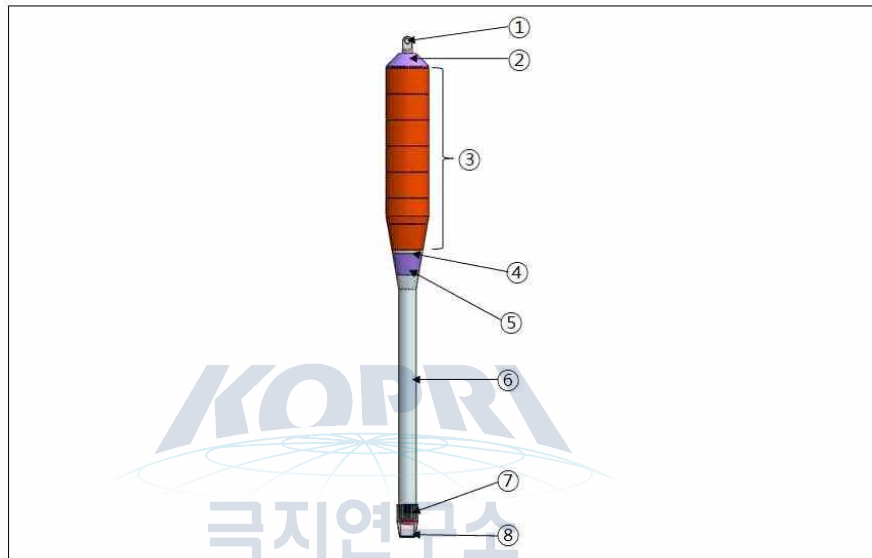
- 남극 빙저호(subglacial lake) 연구에 필수적인 빙저호 내의 퇴적물을 채취 하는 시추기로서 빙저호가 존재하는 얼음 위 시추공 내부로 퇴적물 시추기가 들어가 퇴적물을 효과적으로 획득할 수 있는 장비이며, 유압 또는 타격 방식의 특별한 기능이 포함되어 있는 시추기 설계
- 극지방 얼음 위에 시추공을 따라 내려서 사용할 수 있는 퇴적물 시추기 개발이 필요하며, 제작에 앞서 우선적으로 빙저호 퇴적물 획득에 최적화된 시추기 설계 수행
- 현재 빙저호 퇴적물 채취용 시추기는 상용화된 제품이 전혀 없으며, 이러한 시추기는 각 기관별 또는 대학 자체 설계 및 제작되고 있음
- 국내 연구자 독자적 운영이 가능한 빙저호 퇴적물 채취용 시추기 설계

제5장 시추기 구성 및 세부설계 사양

1. 각부 명칭도

(1) Single Gravity Corer

Single Gravity Corer의 구성은 <그림 5-1>, <표 5-1>과 같이 나타내었다.



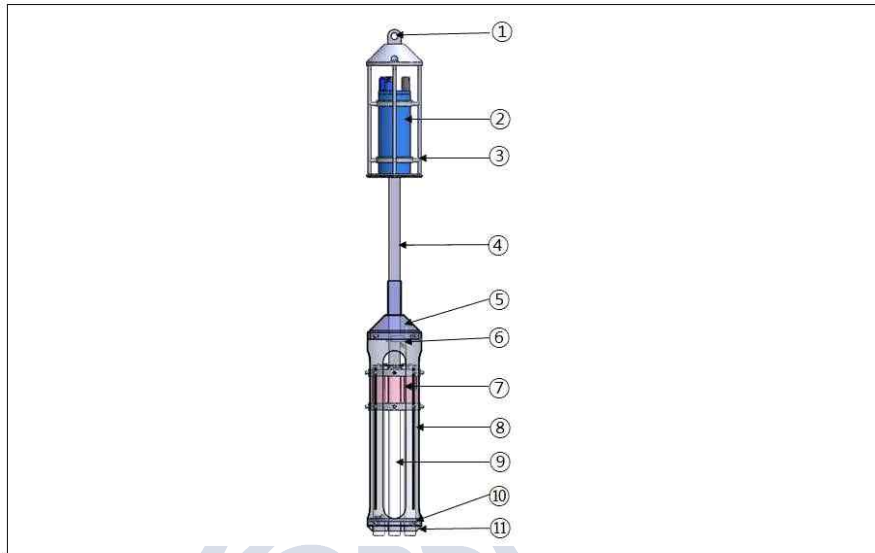
<그림 5-1> Single Gravity Corer 모식도

<표 5-1> Single Gravity Corer 명칭도

번호	명칭	재질	비고
1	와이어 고리	SUS316	
2	상부 댐퍼	SUS316	
3	무게추	SUS316	- 분리 착탈식 구조 - 1단추 무게 : 37kg - 2단추 무게 : 54kg - 3~7단추 무게 : 55kg
4	코어 바디	SUS316	
5	하부 댐퍼	Titanium	
6	코어 배럴	Titanium	- 외경 $\phi 101.6$
7	코어 캐치	Titanium	
8	코어 커터	Titanium	

(2) Multi Gravity Corer

Multi Gravity Corer의 구성은 <그림 5-2>, <표 5-2>와 같이 나타내었다.



<그림5-2> Multi Gravity Corer 모식도

<표5-2> Multi Gravity Corer 명칭도

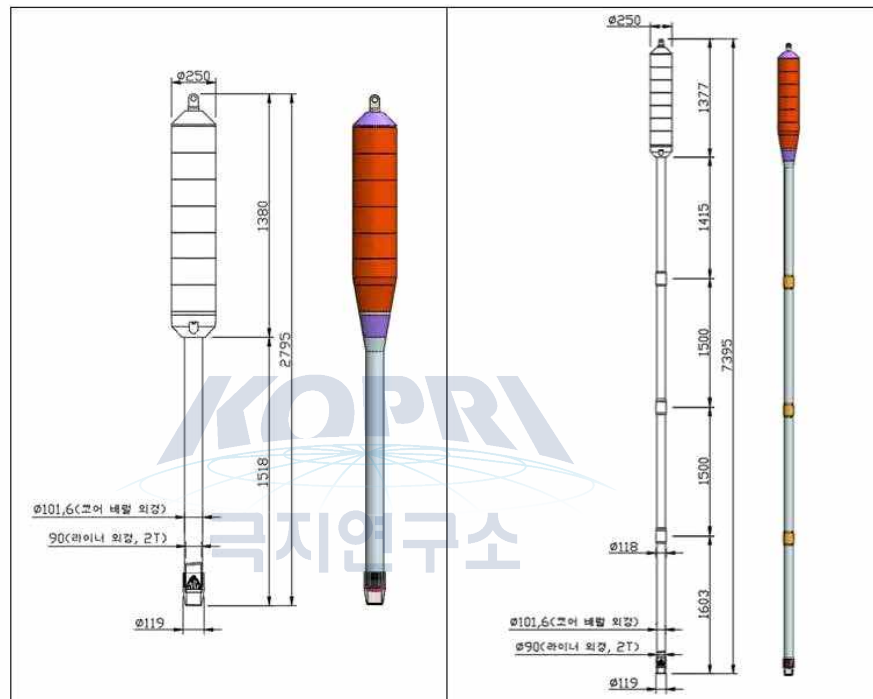
번호	명칭	재질	비고
1	와이어 코리	SUS316	
2	센서	-	- Oxygen Sensor - Turbidity Sensor - CT Sensor - Depth Sensor
3	센서 거치대	SUS316	
4	코어 바디	SUS316	
5	상부 댐퍼	SUS316	
6	트리거	SUS316	
7	무게추	SUS316	- 무게 25kg
8	코어 하우징	SUS316	
9	코어 라이너	PC(Polycarbonate)	- 외경 $\phi 50$
10	라이너 커버	SUS316	
11	하부 댐퍼	SUS316	

2. 세부 설계 사양

(1) Single Gravity Corer

Single Corer는 빙저호 및 빙봉의 작업환경을 고려하여 Single Gravity Corer로 설계하였다. 코어 최대직경은 $\phi 250$ 이며, 코어 배럴과 코어 라이너를 착탈식 구조를 적용하여 1단 연결 시 전체높이는 약 2.8m, 4단 연결 시 전체높이는 약 7.4m로 설계되었다.

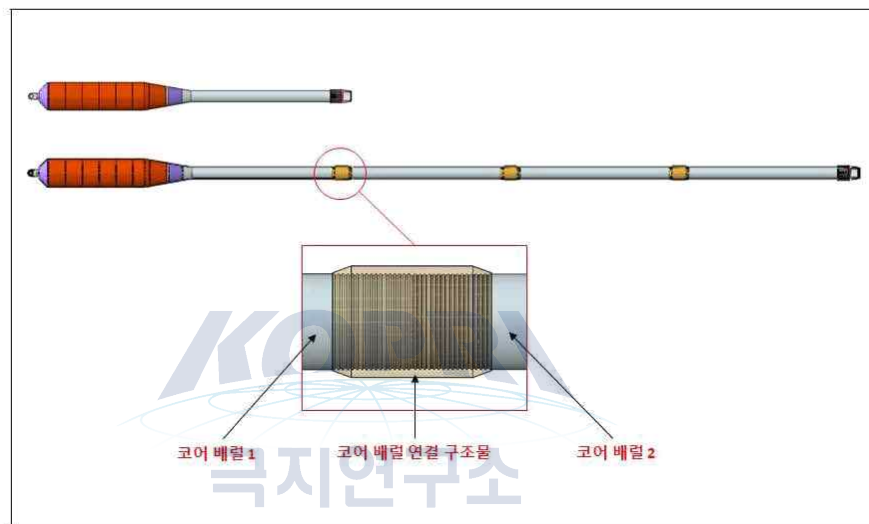
전체 수치도는 아래의 <그림 5-3>과 같이 설계 적용하였다.



<그림 5-3> Single Gravity Corer 수치도

1) 코어 배럴 및 코어 라이너 조립식 구조 적용

Single Gravity Corer는 경우에 따라 코어 배럴 및 코어 라이너를 1개에서 최대 4개까지 장착할 수 있는 조립식 구조를 적용하여 설계하였다. 각 코어 배럴의 길이는 각각 1500mm(1.5m)이고 4단의 코어 배럴을 조립할 경우 최대 6000mm(6m)까지 시추가 가능하다. 1단 코어 배럴을 하부 덤퍼에 조립할 수 있는 구조로 되어 있으며, 코어 배럴과 코어 배럴은 코어 배럴 연결 구조물에 의해 조립, 고정된다. 각 코어 배럴의 상, 하부에는 나사산을 가공하였고, 코어 배럴 연결 구조물 내경에도 나사산을 가공하여 쉽게 탈·부착이 가능하게 설계하였다. 코어 커터, 코어 캐치, 코어 배럴의 재질은 Titanium을 적용하여 높은 강도에도 견딜 수 있도록 설계하였다.

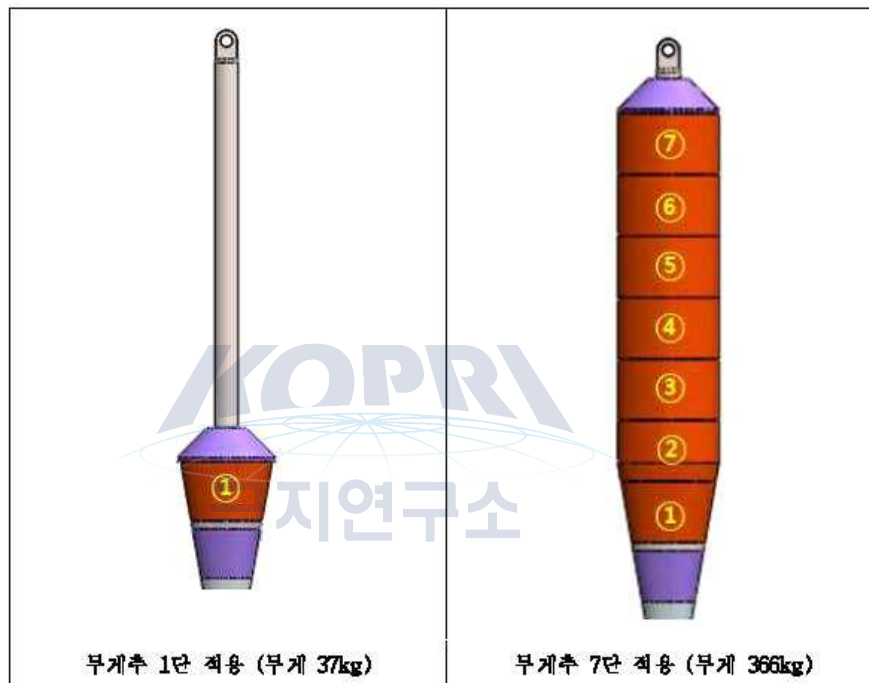


<그림 5-4> 조립식 코어 배럴 모식도

2) 무게추 조립형 착탈식 구조 적용

무게추는 코어 바디에 1개에서 최대 7개까지 조립이 가능한 조립형 착탈식 구조로 설계하였다. 코어 바디에 각 무게추를 쌓고 상부 댐퍼로 고정한다. 시추 깊이, 퇴적물의 제질 등에 따라 전체 무게추 무게를 조절할 수 있으며, 1단 무게추의 무게는 약 37kg, 2단 무게추의 무게는 약 54kg, 3~7단 무게추는 약 55kg로 최대 7개의 무게추를 장착할 경우 전체 무게추의 무게는 약 366kg이다.

또한 하부 댐퍼와 1단, 2단 무게추의 형상을 원추형으로 설계하여 Corer가 퇴적층에 시추될 때 퇴적물층 경계면과 Corer의 충격을 최소화하였다.

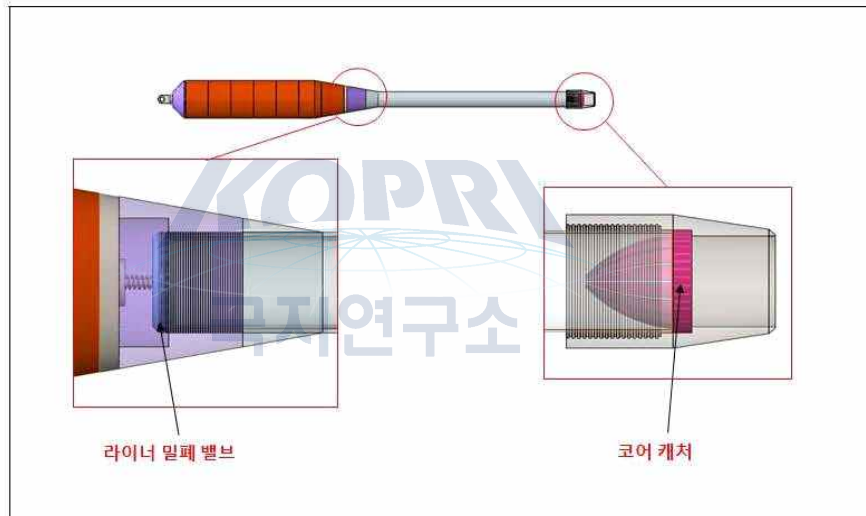


<그림 5-5> 무게추 조립형 구조 모식도

3) 퇴적물 이탈 방지구조 적용

Gravity Corer는 퇴적물 시추 후 지상으로 건인할 때 퇴적물이 코어 라이너 내부에서 이탈할 수 있다. 특히 빙저호 및 빙봉에서의 시추는 800m~2000m의 빙하를 뚫고 그 중공으로 시편을 채취하는 만큼 Corer가 상하 이동 시에 빙하의 중공에서 충돌로 퇴적물 이탈이 더 심할 수 있다. 이에 본 설계에서는 코어 바디 상부와 하부에 충격을 최소화하고 중공에서 이동이 용이하도록 원추형태의 상부, 하부 댐퍼를 장착하였다.

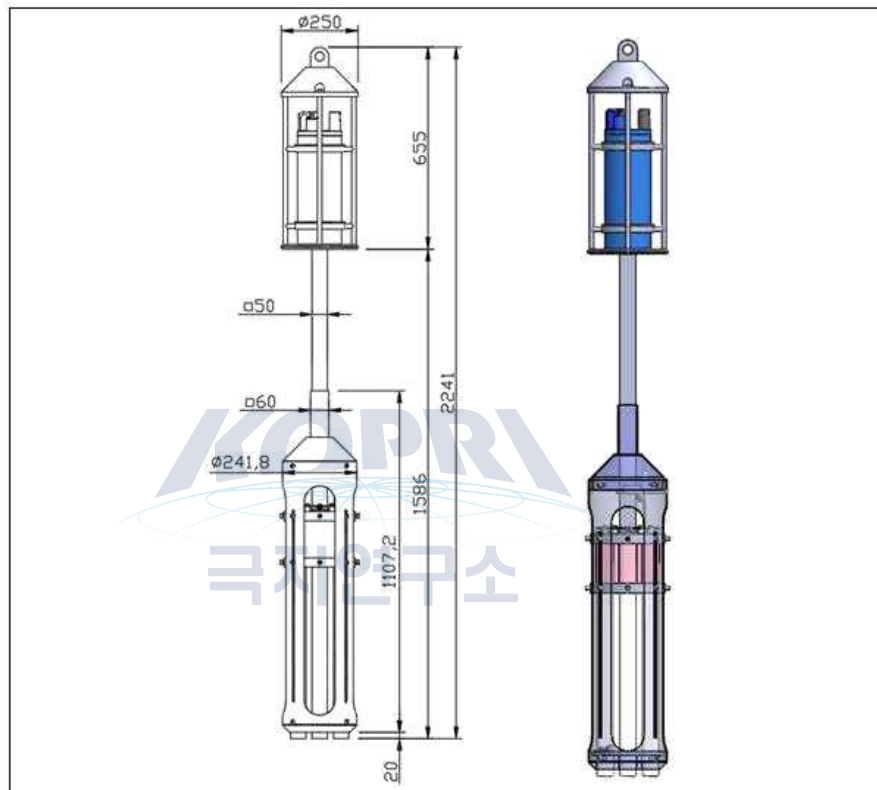
또한 코어 라이너 상부와 하부에 별도의 퇴적물 이탈 방지구조를 적용하였다. Corer 하부의 코어 커터 내부에 코어 캐치를 설치하여 퇴적물이 아래로 이탈되는 것을 최소화하였다. 코어 라이너 상부에는 라이너 밀폐 밸브를 설치하여 Corer가 퇴적물층 이탈 시 피스톤 효과에 의해 퇴적물이 이탈하지 않도록 하였다. 밀폐 밸브는 스프링에 의해 장력이 인가되고 스프링의 압축 높이는 조절할 수 있게 설계하여 밀폐 밸브에 인가되는 장력을 조절할 수 있게 하였다.



<그림 5-6> 퇴적물 이탈 방지구조 모식도

(2) Multi Gravity Corer

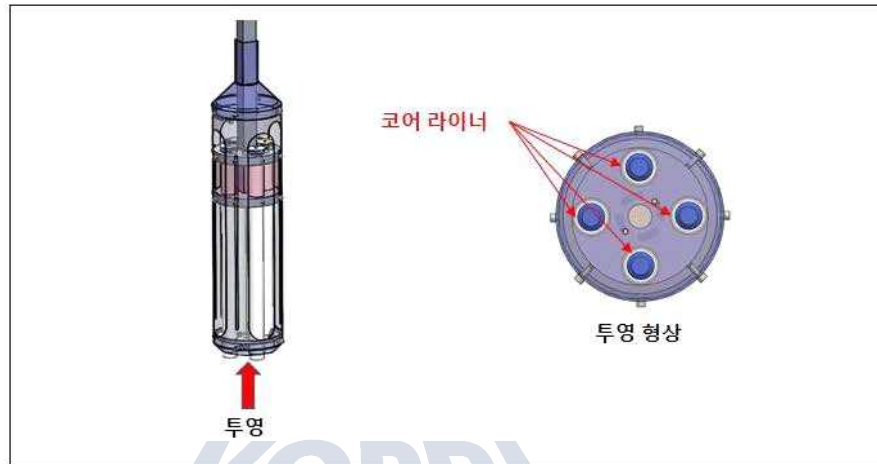
Multi Corer는 빙저호 및 빙봉의 작업환경에서 모두 사용하여야하는 조건을 고려하여 Multi Gravity Corer로 설계하였으며, 코어 상부에 해양환경으로 관측할 수 있는 센서를 배치하여 시추 시 수중의 온도, 전해도, 깊이, 산소포화도, 탁도 등의 수중자료 측정도 함께할 수 있도록 설계되었다. 코어 최대직경은 250mm, 전체높이는 약 22m로 설계되었으며, 전체 수치도는 아래의 <그림 5-7>과 같이 나타내었다.



<그림 5-7> Multi Gravity Corer 수치도

1) 4개의 코어 라이너 배치

Multi Gravity Corer는 코어 라이너를 90도 간격으로 4개 배치하여 허용된 Corer 최대 직경 $\phi 250$ 내에서 코어 라이너 수량을 최대로 설계하였다. 코어 라이너의 재질은 투명한 PC재질로 선정하였고, 상용으로 쉽게 구할 수 있는 표준 크기의 PC파이프 적용하여 코어 라이너의 치수는 외경 $\phi 50$, 내경 $\phi 46$, 두께는 2mm, 길이 600mm(0.6m)이다.



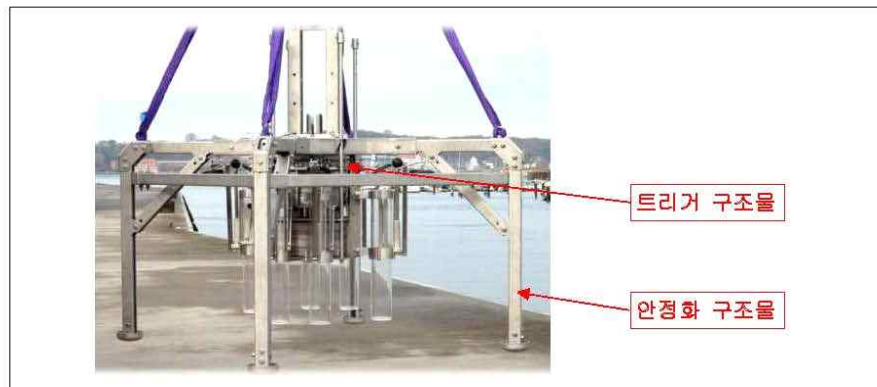
<그림 5-8> 코어 라이너 배치 모식도

극지연구소

2) 트리거 구조 적용

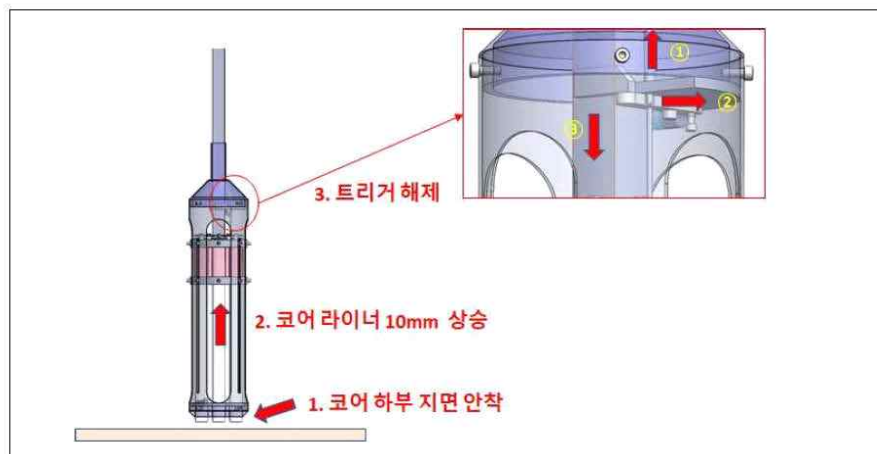
일반적으로 해상에서 흔히 사용되는 Multi Corer는 외부 제약(드릴링의 직경) 없는, 하부에 안정화 구조가 있어 퇴적물 경계면에 안착을 안정적으로 한 후 트리거가 작동하여 내부 코어 라이너 구조가 퇴적물에 박힐 수 있도록 구성되어 있다. <그림5-9>

그러나, 빙저호 및 빙봉용 Multi Corer는 빙하의 중공을 지나가기 때문에 직경에 제한이 있어 별도의 안정화 구조를 장착하기 힘들며, 트리거 구조 또한 적용이 힘들다.



<그림 5-9> 일반적인 해상용 Multi Corer 형상

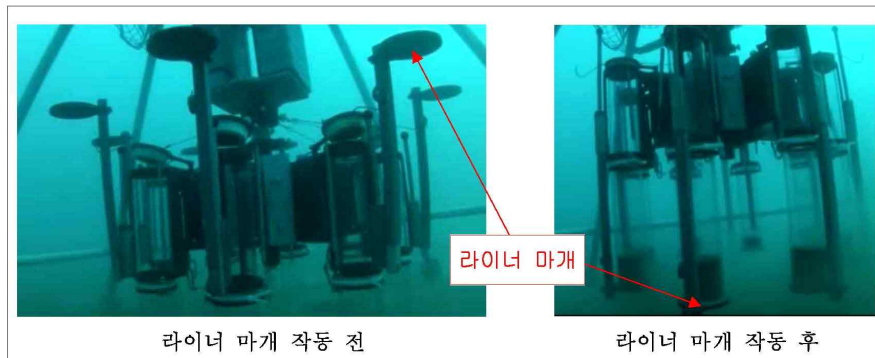
본 설계에서는 트리거를 안정화 구조 없이 코어 라이너 구조물에 직접 장착 방안을 고안하였으며, Corer가 퇴적물 경계면에 안착 시 코어 라이너가 10mm 정도 상부로 밀려 올라가고 코어 라이너 구조물에 부착된 트리거 핀이 걸쇠를 해제하여 트리거가 작동하도록 설계하였다. <그림 5-10>



<그림 5-10> 트리거 구조 작동 모식도

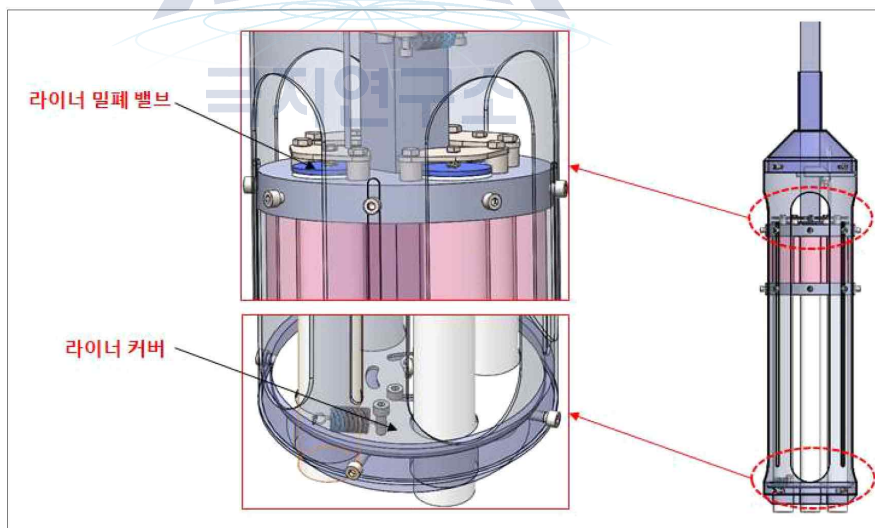
3) 코어 라이너 밀폐 구조 적용

일반적으로 해상에서 흔히 사용되는 Multi Corer는 하부에 별도의 라이너 마개가 존재하여 Corer가 시추 후 지상으로 견인 시 마개가 작동하여 퇴적물의 이탈을 막아준다. <그림 5-11>



<그림 5-11> 일반적인 해상용 Multi Corer의 라이너 마개 형상

본 설계에서는 퇴적물 이탈 방지를 위해 코어 라이너 상부에 라이너 밀폐 밸브 및 라이너 하부에 라이너 커버를 적용하였다. <그림 5-12>

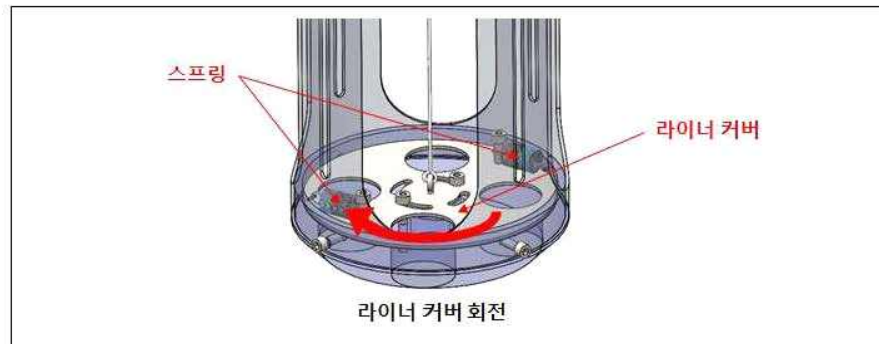


<그림 5-12> 코어 라이너 밀폐구조 모식도

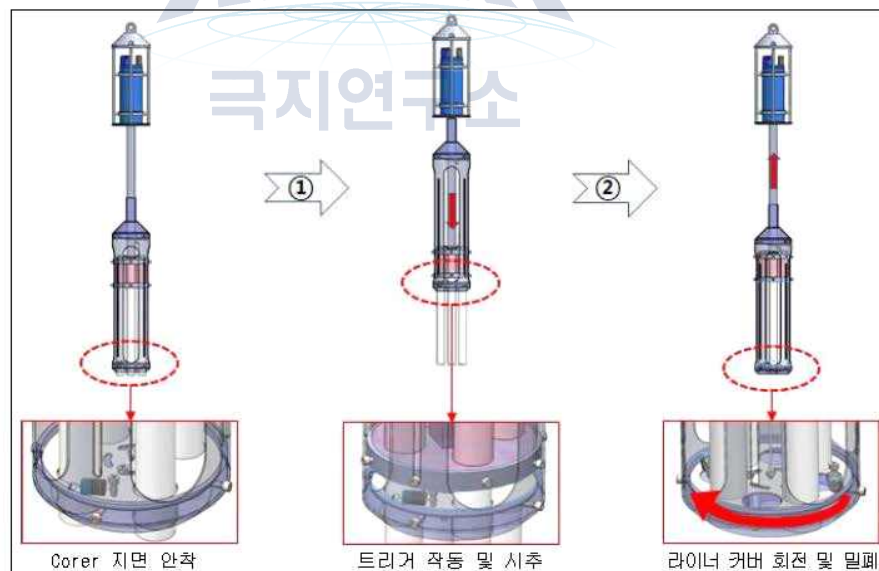
라이너 상부에 배치된 라이너 밀폐 밸브는 시추 시 피스톤 작용으로 퇴적물이 이탈하는 것을 방지한다.

라이너 하부에는 상대적으로 넓은 작업 반경을 요구하는 기존 라이너 마개 구조 대신에 협소한 공간에서 퇴적물의 이탈을 방지하는 회전형 라이너 커버를 적용하였다. 작동 원리는 라이너 커버에 스프링에 의한 회전 장력이 인가되어 라이너가 시추 후 라이너 커버보다 높게 위치하면 라이너 커버가 회전하여 라이너 하부를 막아주는 역할을 수행한다.

<그림 5-13> <그림 5-14>



<그림 5-13> 라이너 커버 협상



<그림 5-14> 라이너 커버 기작 모식도

4) 해양 관측자료 측정용 센서 부착

빙하호의 호수물 또는 빙봉의 해수에서 수온, 전해도 등의 해양 관측 자료를 측정하기 위해서는 별도의 센서 및 센서 거치대와 견인장치가 필요하다. 본 설계에서는 센서, 센서 거치대 및 데이터 로거를 Multi Gravity Corer의 상부에 장착하여 별도의 추가 작업 없이 퇴적물 시추 시 해양 관측 자료도 한 번에 측정할 수 있도록 설계하였다.

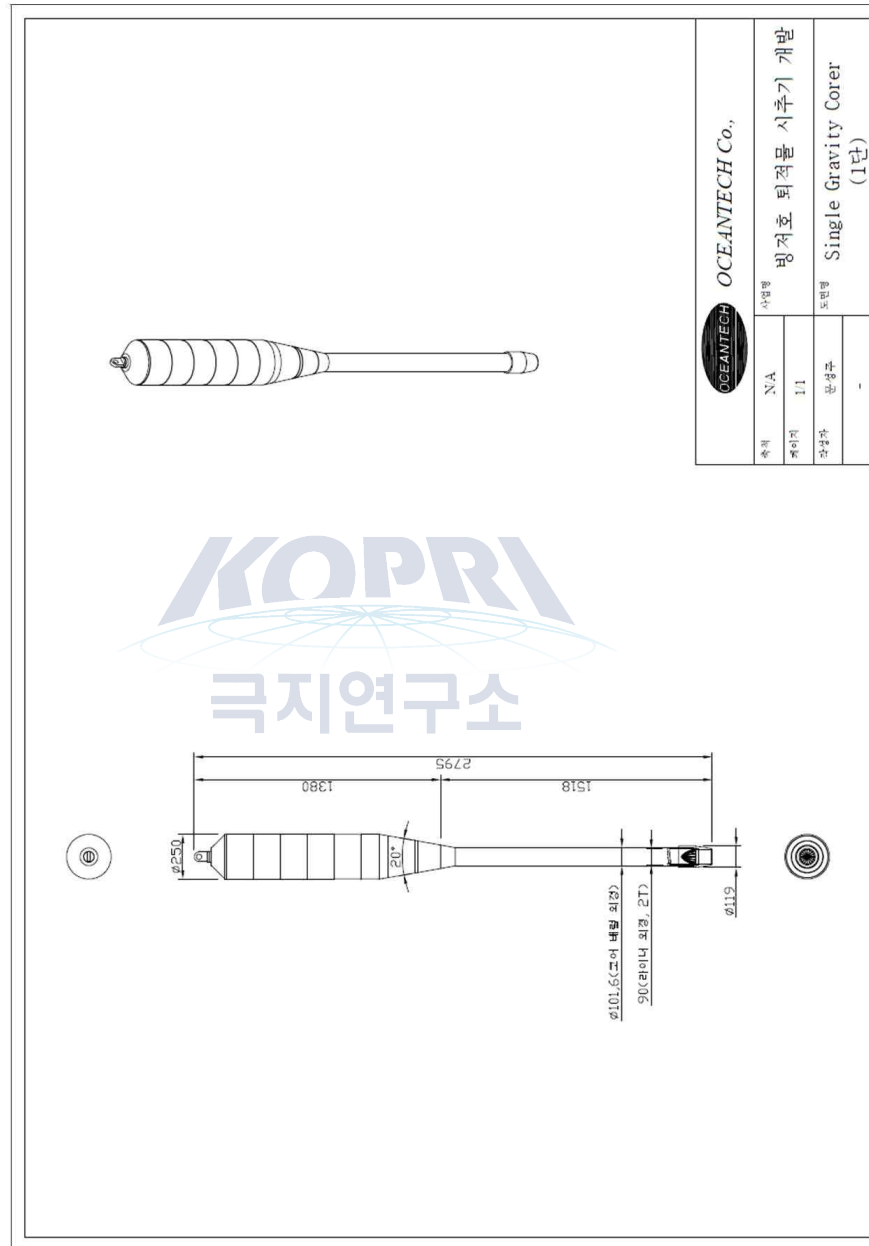
<그림 5-15>



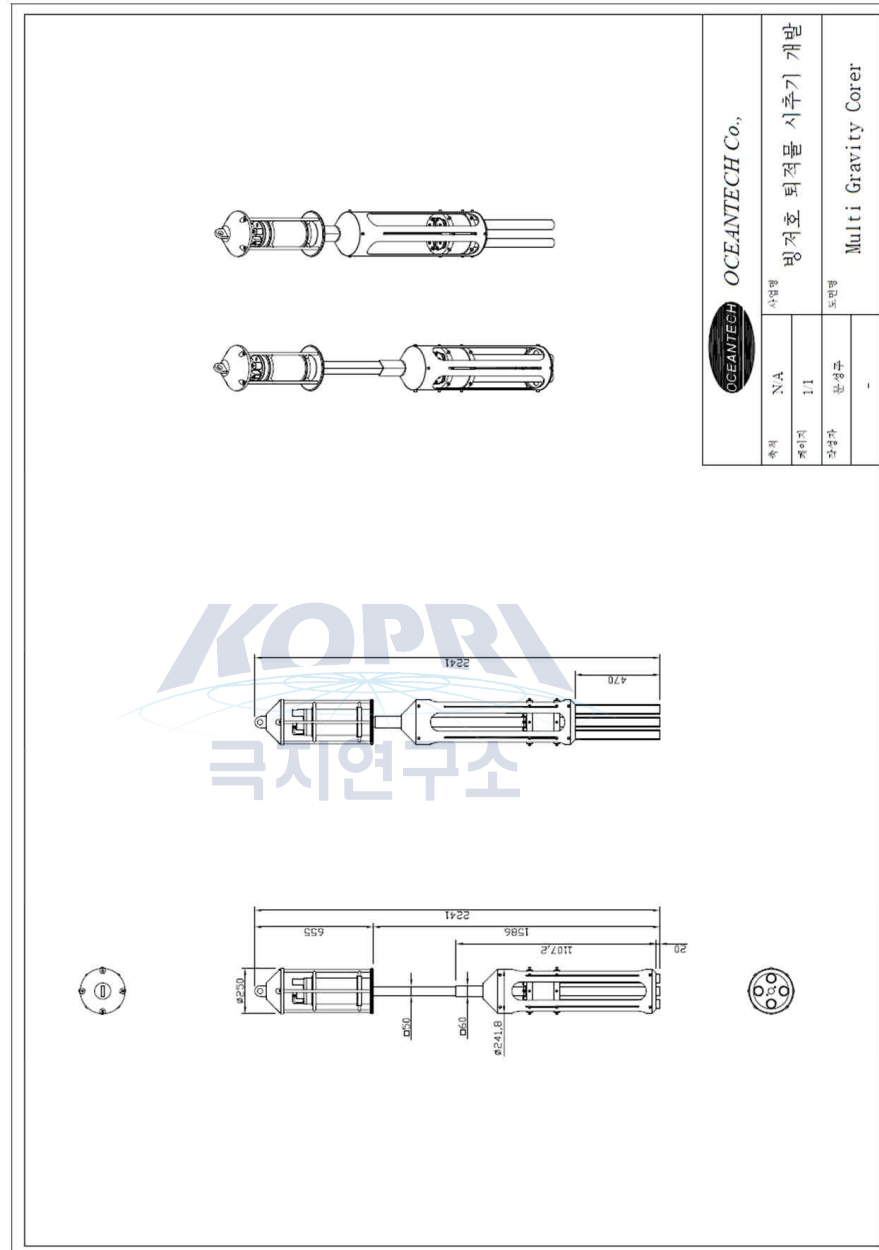
<그림 5-15> 센서 부착 모식도

1. 설계도면

(1) Single Gravity Corer (1단) 설계 수치도

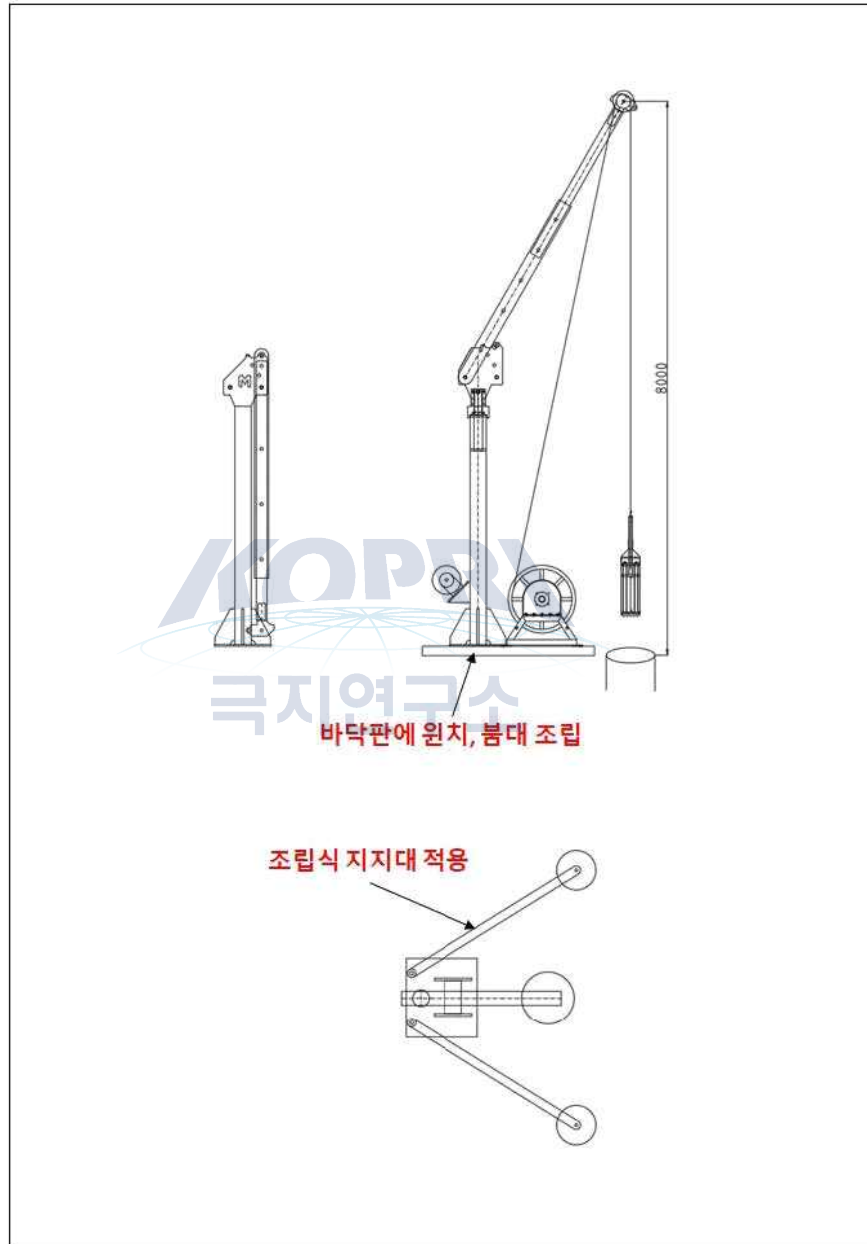


(3) Multi Gravity Corer 설계 수치도



2. 조립식 원치시스템

(1) 조립식 원치시스템 형상



2-4. 빙저호 열수시추기 국제 공동 개발

○ 수조, 보일러, 펌프 등 열수 순환시스템 제작

- 빙저호 청정열수 시추기는 발전기, 드릴 타워, 보일러 및 펌프시스템, 열균시스템 등의 다양한 파트가 결합된 대형 시스템으로, 현재 2,000m급 시추시스템 운영에 필요한 전력을 충분히 공급할 수 있는 100 kW급 모듈형 시추동력 발전기 2기를 1차년도에 구축 보유
- 시추시스템 일괄 제작에는 막대한 예산이 필요한 바, 한정적인 예산 범위 내에서 효율적인 시스템 구축을 위하여 독립 테스트 가능 여부, 기 구축 시스템과의 통합 테스트 가능 여부, 제조 기간 및 소요 예산 등을 고려하여 연차별 순차적인 하위 모듈 구축 계획을 수립
- 열수시추 시스템 구축 일정 단축과 효율적인 예산 활용을 위하여 D2 빙저호급 시추장비를 보유하고 있는 영국 BAS와의 협의를 통해 공동 활용이 가능한 파트를 지속적으로 협의하는 한편, 상호 호환 가능하도록 국내 시스템을 순차적으로 제작 중
- 당해연도 열수 순환 시스템 구축 계획이었으나 D2 빙저호 탄성과 정밀 현장탐사 준비 과정에서 발생한 추가 비용(COVID-19 지속 상황으로 인한 입남국 관문 도시에서의 격리시설 비용 등) 재원 확보와 당초 예상 대비 단가 상승으로 인하여 장비 제작 보류
- 대안으로 영국 BAS와 협의를 통해 Ellsworth호 시추프로젝트 이후 영국 BAS에서 보관 중인 드릴 호스 및 윈치 컨테이너 모듈 공동 활용 협의를 진행 중이며, 보다 정확한 구축 비용 계산을 위하여 D2 빙저호 시추 후보지에 적합한 2,000급 심부빙저호 열수시추 시스템의 상세 구축 비용을 분석 및 하위 모듈별 제조사 정보를 확보
- BAS 장비 공동 활용 협의 결과와 비용 분석 자료를 바탕으로 차년도 열수순환 시스템 제작 추진

극지연구소

D2 Clean Hot Water Drill (CHWD) cost estimates

Supplier	Item	No.	Item Cost	D2	D2 Total	D2 inc. 20% VAT
			£ 1,459,700.00		£ 1,751,640.00	
TBC	Generator ~50 kW at 2000 m elev	3	£ 18,000.00	1	£ 54,000.00	£ 64,800.00
TBC	Power conditioner??	1	£ 10,000.00	1	£ 10,000.00	£ 12,000.00
TBC	Generators ~7 kW at 2000 m elev	2	£ 7,000.00	1	£ 14,000.00	£ 16,800.00
TBC	Generators ~2 kW at 2000 m elev	2	£ 1,500.00	1	£ 3,000.00	£ 3,600.00
TBC	Power cables and connectors	30	£ 500.00	1	£ 15,000.00	£ 18,000.00
					£ -	£ -
Weatherhaven	Drill tower tent	1	£ 25,000.00	1	£ 25,000.00	£ 30,000.00
Weatherhaven	Drill tent	1	£ 25,000.00	1	£ 25,000.00	£ 30,000.00
TBC	Flooring matting	10	£ 500.00	1	£ 5,000.00	£ 6,000.00
Weatherhaven	Workshop tent (insulated and floor)	1	£ 25,000.00	1	£ 25,000.00	£ 30,000.00
Webasto	Webasto Air Top Evo 5500 heater and ducting kit for tents	2	£ 5,000.00	1	£ 10,000.00	£ 12,000.00
					£ -	£ -
Structure-Flex Ltd	Watertanks 30,000 litres	3	£ 6,000.00	1	£ 18,000.00	£ 21,600.00
Polyformes	Insulation	3	£ 500.00	1	£ 1,500.00	£ 1,800.00
TBC	Snow melt tank	1	£ 6,000.00	1	£ 6,000.00	£ 7,200.00
					£ -	£ -
Derwent	Low pressure pump and suction hoses	3	£ 2,500.00	1	£ 7,500.00	£ 9,000.00
Derwent	Filtration and UV	2	£ 46,000.00	1	£ 92,000.00	£ 110,400.00
Derwent	Filter set	3	£ 8,000.00	1	£ 24,000.00	£ 28,800.00
Derwent	Framework, piping, monitoring, control	1	£ 15,000.00	1	£ 15,000.00	£ 18,000.00
					£ -	£ -
Exchange and Nuway	Heater and burner units Estimate 200 kW at 2000 m elevation	6	£ 8,000.00	1	£ 48,000.00	£ 57,600.00
Able Engineering	Heat recovery unit	6	£ 2,500.00	1	£ 15,000.00	£ 18,000.00
TBC	Heat recovery pump and hoses	2	£ 2,500.00	1	£ 5,000.00	£ 6,000.00
TBC	Low pressure circulation pump for main heaters	3	£ 2,000.00	1	£ 6,000.00	£ 7,200.00
Able Engineering	Manifolds	2	£ 1,500.00	1	£ 3,000.00	£ 3,600.00
Able Engineering	Exhaust chimney	5	£ 1,800.00	1	£ 9,000.00	£ 10,800.00
TBC	Plate heat exchanger 1.25 MW	1	£ 25,000.00	1	£ 25,000.00	£ 30,000.00
					£ -	£ -
Cat Pumps (UK) Ltd	Pump & 22 kW? Motor Assembly 1531 & Accessories	3	£ 20,000.00	1	£ 60,000.00	£ 72,000.00
Kutting UK Ltd	1 1/4" ID 2000 psi WP 1A20 Hose with Hytrel sheath 2400 m	2	£ 71,000.00	1	£ 142,000.00	£ 170,400.00
Kutting UK Ltd	1.1/4"/DN32 High Pressure hose (surface)	2	£ 5,000.00	1	£ 10,000.00	£ 12,000.00
Cambs. Hydraulics	Surface hoses and connectors	20	£ 600.00	1	£ 12,000.00	£ 14,400.00
TBC	Hose clearing system compressor	1	£ 3,200.00	1	£ 3,200.00	£ 3,840.00
					£ -	£ -
Able Engineering	Hose reel, level wind, motor, gear box, rotary coupling	1	£ 71,000.00	1	£ 71,000.00	£ 85,200.00
Able Engineering	Winch modifications and tests	1	£ 15,000.00	1	£ 15,000.00	£ 18,000.00
Able Engineering	Capstan drive, motor, gearbox, tower	1	£ 43,000.00	1	£ 43,000.00	£ 51,600.00
Able Engineering	High tower	1	£ 33,000.00	1	£ 33,000.00	£ 39,600.00
Able Engineering	Sensors, connectors, alarms, e-stops	5	£ 2,500.00	1	£ 12,500.00	£ 15,000.00
Able Engineering	sensor manifold	1	£ 2,500.00	1	£ 2,500.00	£ 3,000.00
					£ -	£ -
TBC	Well head	1	£ 4,000.00	1	£ 4,000.00	£ 4,800.00
TBC	Hole UV collar and probe	1	£ 28,000.00	1	£ 28,000.00	£ 33,600.00
TBC	Drill hose cleaning and UV	1	£ 10,000.00	1	£ 10,000.00	£ 12,000.00
Rank Brothers	Drill Nozzle and reamers	2	£ 6,000.00	1	£ 12,000.00	£ 14,400.00
Able Engineering	Weight stack	2	£ 3,000.00	1	£ 6,000.00	£ 7,200.00
Spraying systems	Nozzle tips	8	£ 250.00	1	£ 2,000.00	£ 2,400.00
Various	Down hole instrumentation?	1	£ 40,000.00	1	£ 40,000.00	£ 48,000.00
Redlion, Omega	Surface instrumentation sensors and display (and control)?	12	£ 2,500.00	1	£ 30,000.00	£ 36,000.00
Toughbook	Drill laptop	2	£ 3,000.00	1	£ 6,000.00	£ 7,200.00
Software	Software	2	£ 3,000.00	1	£ 6,000.00	£ 7,200.00
					£ -	£ -
	NO UMBILICAL WINCH - Vehical deployment and recovery					
Kutting UK Ltd	Umbilical hoses 300 m	3	£ 10,300.00	1	£ 30,900.00	£ 37,080.00
Courtland	Umbilical 300 m power cable with strain member	3	£ 10,000.00	1	£ 30,000.00	£ 36,000.00
	Underwater power connectors (pair)	3	£ 2,200.00	1	£ 6,600.00	£ 7,920.00
TBC	Umbilical water level sensor, cable, and UW connector	5	£ 2,500.00	1	£ 12,500.00	£ 15,000.00
Caprari	Borehole Pumps	3	£ 5,000.00	1	£ 15,000.00	£ 18,000.00
Able Engineering	Pump spray blocks	3	£ 2,000.00	1	£ 6,000.00	£ 7,200.00
	Flow meters for in and out	6	£ 2,500.00	1	£ 15,000.00	£ 18,000.00
Able Engineering	Surface cresents	3	£ 2,000.00	1	£ 6,000.00	£ 7,200.00
Able Engineering	Bore hole pump instrumented manifold	2	£ 9,000.00	1	£ 18,000.00	£ 21,600.00
Able Engineering	Hose and cable reeling stand and motor	1	£ 10,000.00	1	£ 10,000.00	£ 12,000.00
					£ -	£ -
Gates	Hose crimping machine	1	£ 3,000.00	1	£ 3,000.00	£ 3,600.00
Various	tools	1	£ 10,000.00	1	£ 10,000.00	£ 12,000.00
					£ -	£ -
General	Site testing and equipment hire	1	£ 25,000.00	1	£ 25,000.00	£ 30,000.00
General	Delivery and transportation costs	1	£ 20,000.00	1	£ 20,000.00	£ 24,000.00
General	Small equipment cases, electrical, mechanical, hydraulic consumable?	1	£ 120,000.00	1	£ 120,000.00	£ 144,000.00
General	Major and extensive drill spares	1	£ 90,000.00	1	£ 90,000.00	£ 108,000.00
					£ -	£ -
Logistics	Equipment Pallets 8'x6' for polystyld and straps	10	£ 850.00	1	£ 8,500.00	£ 10,200.00
Logistics	Polystyld 72'x8' and fittings	2	£ 12,000.00	1	£ 24,000.00	£ 28,800.00

그림 128 D2 빙저호 시추용 열수시추 시스템 구축 예상 비용 및 파트별 제조사 정보

3. 빙저호 시추

3-1. 한-영 공동 빙저호 시추 프로그램 개발

- 서남극 빙저호 공동시추 프로그램 계획 작성
 - COVID-19 지속 상황으로 인해 대면 정례 협의 불가하여 온라인 협의를 통해 KOPRI의 심부빙저호 열수시추 시스템 구축 현황과 BAS의 서남극 SLCECs 빙저호 시추 프로그램 진행 상황 공유
 - 21/22시즌 SLCECs 빙저호 시추캠프 구축을 위한 연료 및 드릴 장비 등의 물자 수송을, 22/23 시즌에 테스트 시추 계획이었으나 COVID-19 지속 상황으로 인해 최근 시추 프로그램 취소 결정
 - SLCECs 시추 프로그램에 활용하고자 남극에 보관하고 있던 BEAMISH 시추시스템 장비들은 내년 여름 영국으로 반환, BAS는 향후 6개월 동안 제작 중인 드릴 모듈과 샘플링 툴을 완성 후 테스트할 예정이며, SLCECs 프로그램의 시추시스템은 영국 현지에서 보관 예정
 - 메인 프로그램 취소에 따라 서남극 빙저호 공동시추 프로그램 참여 계획 작성을 연기하고, 영국 BAS와 서남극 빙저호 공동시추 프로그램에 대한 지속적인 협의 진행

3-2. 빙저호 지역 환경특성 예비조사

- 빙저호 시추 후보 지역 환경 시료 확보
 - 빙저호 시추 후보지역 (D2)에서 빙설 시료 및 대기시료 확보완료
 - 확보한 빙설 및 대기시료로부터 DNA 추출 완료

sample ID	Type	Coordinate	Altitude (m)	nanodrop (ng/ul)	qubit (ng/ul)	A260/A280
D2_1-1	Snow	S 75°42.587' E 155°47.050'	1938	0.5	<0.01	2.24
D2_1-1	Snow	S 75°42.587' E 155°47.050'	1938	3.9	<0.01	1.48
D2_1-1	Snow	S 75°42.587' E 155°47.050'	1938	0.8	<0.01	1.97
D2_1-2	Snow	S 75°42.587' E 155°47.050'	1938	3.8	<0.01	1.51
D2_1-2	Snow	S 75°42.587' E 155°47.050'	1938	2.9	<0.01	1.46
D2_1-2	Snow	S 75°42.587' E 155°47.050'	1938	3.3	<0.01	1.58
D2_1-3	Snow	S 75°42.587' E 155°47.050'	1938	1.6	<0.01	2.07
D2_1-3	Snow	S 75°42.587' E 155°47.050'	1938	0.8	<0.01	2.54
D2_1-3	Snow	S 75°42.587' E 155°47.050'	1938	1.5	<0.01	1.85
D2_2-1	Snow	S 75°42.543' E 155°42.484'	1941	0.5	<0.01	1.8
D2_2-1	Snow	S 75°42.543' E 155°42.484'	1941	1.1	<0.01	2.11
D2_2-1	Snow	S 75°42.543' E 155°42.484'	1941	2.7	<0.01	1.66
D2_2-2	Snow	S 75°42.543' E 155°42.484'	1941	1.8	<0.01	1.61
D2_2-2	Snow	S 75°42.543' E 155°42.484'	1941	0.9	<0.01	2.32
D2_2-2	Snow	S 75°42.543' E 155°42.484'	1941	3.6	<0.01	1.55
D2_2-3	Snow	S 75°42.543' E 155°42.484'	1941	5	<0.01	1.56
D2_2-3	Snow	S 75°42.543' E 155°42.484'	1941	3.1	<0.01	1.54
D2_2-3	Snow	S 75°42.543' E 155°42.484'	1941	3.5	<0.01	1.48
D2_3-1	Snow	S 75°42.605' E 155°47.355'	1945	1.7	<0.01	1.59
D2_3-1	Snow	S 75°42.605' E 155°47.355'	1945	1.3	<0.01	1.68
D2_3-1	Snow	S 75°42.605' E 155°47.355'	1945	4	<0.01	1.5
D2_3-2	Snow	S 75°42.605' E 155°47.355'	1945	1	<0.01	2.78
D2_3-2	Snow	S 75°42.605' E 155°47.355'	1945	2.1	<0.01	1.36
D2_3-2	Snow	S 75°42.605' E 155°47.355'	1945	3.6	<0.01	1.6
D2_3-3	Snow	S 75°42.605' E 155°47.355'	1945	0.3	<0.01	1.6
D2_3-3	Snow	S 75°42.605' E 155°47.355'	1945	2.3	<0.01	1.73
D2_3-3	Snow	S 75°42.605' E 155°47.355'	1945	3	<0.01	1.84
D2-A1	Air	S 75°42.543' E 155°42.484'	1941	1.2	<0.01	2.12
D2-A2	Air	S 75°42.543' E 155°42.484'	1941	1.3	<0.01	1.82
D2-A3	Air	S 75°42.543' E 155°42.484'	1941	1.3	<0.01	1.99
D2-A4	Air	S 75°42.543' E 155°42.484'	1941	0.9	<0.01	2.68

< 확보된 환경시료 목록 >

○ 환경시료의 지화학적 특성 분석

- 빙설시료로부터 pH, 전기전도도, 양이온 및 음이온, 총탄소량, 총질소량, 무기탄소, 용존 유기탄소량 분석 완료
- 빙설시료의 pH는 평균 5.6으로 시료에 따라 큰 차이가 나타나지 않음. 기존에 남극 빙설 시료에서 보고된 pH와 유사함
- 전기전도도는 최대41.35, 최소 9.38로 시료 간 차이가 있지만 위치나 깊이에 따른 특정 경향은 보이지 않음
- 측정 가능했던 양이온과 음이온에서 Chloride, Nitrate, Sulfate가 전체 시료에서 상대적으로 농도가 높았고 각 이온은 표면 빙설 시료에서 높은 경향을 보임
- 빙설시료의 총탄소량, 총질소량, 무기탄소, 용존 유기탄소 농도는 표면시료에서 가장 높게 나타나고 깊어질수록 낮아지는 경향을 나타냄

sample ID	pH	EC	Fluoride	Chloride	Nitrite	Bromide	Nitrate	Phosphate	Sulfate	Lithium
D2_1-1	5.22	39.21	0.003274878	0.462940991	n.a.	n.a.	0.205821314	n.a.	0.10915103	n.a.
D2_1-1	5.61	37.68	0.004504957	0.467396199	n.a.	0.001957465	0.197356426	n.a.	0.116185643	n.a.
D2_1-1	5.5	41.35	n.a.	0.463065047	n.a.	n.a.	0.203901499	n.a.	0.107349853	n.a.
D2_1-2	5.41	22.12	0.004437829	0.119290806	0.005297446	0.000728022	0.041118841	n.a.	0.066159809	n.a.
D2_1-2	5.61	30.21	n.a.	0.174296317	n.a.	0.010512416	0.042305396	n.a.	0.067888365	n.a.
D2_1-2	5.57	28.39	0.004037628	0.12139363	0.005400527	0.000790851	0.043543016	n.a.	0.073073	n.a.
D2_1-3	5.81	21.49	n.a.	0.057033861	0.008721657	n.a.	0.021064745	n.a.	0.077110003	n.a.
D2_1-3	5.62	24.51	n.a.	0.058729095	0.009538265	n.a.	0.020004308	n.a.	0.081345786	n.a.
D2_1-3	5.57	18.98	n.a.	0.060974103	0.009050187	0.008342793	0.021391803	n.a.	0.077524966	n.a.
D2_2-1	5.62	26.14	n.a.	0.250090673	n.a.	0.001859901	0.089221445	n.a.	0.073013	n.a.
D2_2-1	5.5	28.32	0.003138292	0.247538527	n.a.	n.a.	0.08995269	n.a.	0.077109486	n.a.
D2_2-1	5.85	28.98	0.002695055	0.245778387	n.a.	n.a.	0.08845904	n.a.	0.075940058	n.a.
D2_2-2	5.73	18.3	0.003533429	0.100046857	0.004099606	n.a.	0.07872478	n.a.	0.089254908	n.a.
D2_2-2	5.44	21.32	0.003989634	0.150531024	n.a.	0.005867414	0.078096018	n.a.	0.084406585	n.a.
D2_2-2	5.61	17.44	0.003445833	0.098780139	0.004232059	n.a.	0.082416313	n.a.	0.08916187	n.a.
D2_2-3	5.85	18.85	0.003846225	0.105768997	0.005902547	0.001234233	0.031922234	n.a.	0.060588121	0.000150656
D2_2-3	5.74	19.36	0.003537815	0.106653853	0.005876335	7.14136E-05	0.031249872	n.a.	0.061755223	n.a.
D2_2-3	5.49	17.21	n.a.	0.10479003	0.006530978	n.a.	0.033345686	n.a.	0.063723307	n.a.
D2_2-3	5.84	19.87	n.a.	0.176104752	0.00630623	0.010208211	0.086002646	n.a.	0.101719433	n.a.
D2_3-1	5.65	22.35	n.a.	0.22655905	n.a.	0.004111736	0.091715901	n.a.	0.09619195	n.a.
D2_3-1	5.81	25.32	0.002106834	0.175398685	0.006373508	0.000350299	0.086411258	n.a.	0.093690679	n.a.
D2_3-2	5.97	12.51	n.a.	0.115838123	0.007286138	0.020680702	0.053592391	n.a.	0.051976555	n.a.
D2_3-2	5.82	15.32	0.00277342	0.114901835	0.008002106	0.002867726	0.053446926	n.a.	0.057674342	n.a.
D2_3-2	5.77	10.89	n.a.	0.114960042	0.007656859	n.a.	0.059937187	n.a.	0.059455937	n.a.
D2_3-3	5.7	9.38	n.a.	0.133602401	n.a.	n.a.	0.037794656	n.a.	0.064139514	n.a.
D2_3-3	5.45	15.65	0.002309416	0.082484435	0.004840007	0.008191585	0.044088227	n.a.	0.056584185	n.a.
D2_3-3	5.63	10.06	0.003141589	0.13508236	n.a.	0.009824731	0.039505855	n.a.	0.059687184	n.a.

< 환경시료 지화학적 분석 결과-1 >

sample ID	Sodium	Ammonium	Potassium	Magnesium	Calcium	IC(mg/L)	TC(mg/L)	TN(mg/L)	DOC(mg/L)
D2_1-1	0.139093284	0.055171427	0.085728836	0.015292377	n.a.	2.600673113	3.764130645	0.12910949	1.163457531
D2_1-1	0.144825956	0.056462135	0.010523336	0.015435436	n.a.	2.749345152	3.725562828	0.130580346	0.976217676
D2_1-1	0.141656529	0.05557005	0.010054595	0.015361441	n.a.	2.665587723	3.708839723	0.131400882	1.043252
D2_1-2	0.051304166	0.042432809	0.005093938	0.00527513	n.a.	0.538223055	2.561624761	0.10629612	2.023401706
D2_1-2	0.052180492	0.04285363	0.005121713	0.005260554	n.a.	0.522723131	2.557549906	0.105375907	2.034826775
D2_1-2	0.052462231	0.043012342	0.005304041	0.005341612	n.a.	0.521948134	2.524527382	0.108579726	2.002579247
D2_1-3	0.028062139	0.048105668	0.006377159	0.001965214	n.a.	0.643321799	2.38884842	0.098871329	1.745526622
D2_1-3	0.030930369	0.048605341	0.006338338	0.002028962	n.a.	0.664119459	2.359389836	0.095291233	1.695270377
D2_1-3	0.031945671	0.048880441	0.00654917	0.002137598	n.a.	0.653766897	2.39484232	0.097950465	1.741075423
D2_2-1	0.091720733	0.028175631	0.008554194	0.009913677	n.a.	1.736066491	2.966131994	0.106773407	1.230065503
D2_2-1	0.088675647	0.02892149	0.008368564	0.009847253	n.a.	1.825364565	2.898329898	0.10342727	1.072965332
D2_2-1	0.090735374	0.028440504	0.008385615	0.009954649	n.a.	1.755325726	2.873282624	0.105567015	1.117956898
D2_2-2	0.058417849	0.034605797	0.010891101	0.004989556	n.a.	0.278391108	2.097066379	0.089565891	1.81867527
D2_2-2	0.061959106	0.034923398	0.010758511	0.005067119	n.a.	0.296586169	2.100318786	0.088665132	1.803732616
D2_2-2	0.057241664	0.035001357	0.010580537	0.005078308	n.a.	0.301189878	2.068916234	0.087419644	1.767726356
D2_2-3	0.051770609	0.043254853	0.004512703	0.005142608	n.a.	1.378110767	1.999568933	0.09969509	0.621458165
D2_2-3	0.052809129	0.043258674	0.006004868	0.005177162	n.a.	1.455945837	1.900825354	0.096084621	0.444879517
D2_2-3	0.052927278	0.043323675	0.005793908	0.005194442	n.a.	1.454985767	1.88570976	0.101261315	0.430723993
D2_3-1	0.080011185	0.040747008	0.013360343	0.010770305	n.a.	0.29878392	2.088256218	0.114818022	1.789472298
D2_3-1	0.079539611	0.042025189	0.01312532	0.010851291	n.a.	0.367492541	2.078922682	0.113925112	1.711430141
D2_3-1	0.079848932	0.041704306	0.012669381	0.010742281	n.a.	0.31530175	2.024117753	0.114449848	1.708816003
D2_3-2	0.05165549	0.041941374	0.007537163	0.005370715	n.a.	0.446206711	2.628355183	0.0987817	2.182148472
D2_3-2	0.051396004	0.042942026	0.006001873	0.005582874	n.a.	0.399568132	2.575394531	0.10141809	2.175826399
D2_3-2	0.053779663	0.043022584	0.006076628	0.005534957	n.a.	0.381361504	2.59140734	0.101681535	2.210045836
D2_3-3	0.032923557	0.040237559	0.009042118	0.003715011	n.a.	0.261167685	1.499844677	0.107490867	1.238676992
D2_3-3	0.032809034	0.040818927	0.009645023	0.003692692	n.a.	0.302415992	1.477551358	0.105848501	1.175135366
D2_3-3	0.037139947	0.040469818	0.009001277	0.003687123	n.a.	0.285250403	1.485800758	0.1058464	1.200550355

< 환경시료 지화학적 분석 결과-2 >

○ 환경시료의 생물학적 특성 분석

- 빙설시료를 녹인 후, 여과하여 미생물 배양을 위한 배지 (TSA 0.01x)를 이용해 15°C 저온배양을 실시하여 하나의 미생물을 분리배양에 성공함

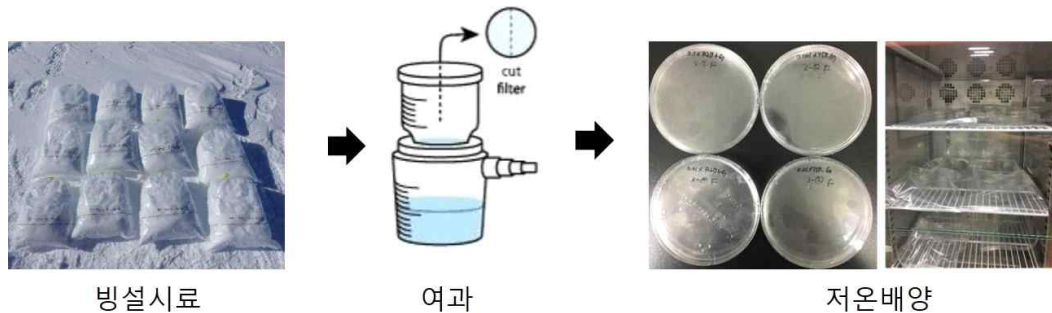
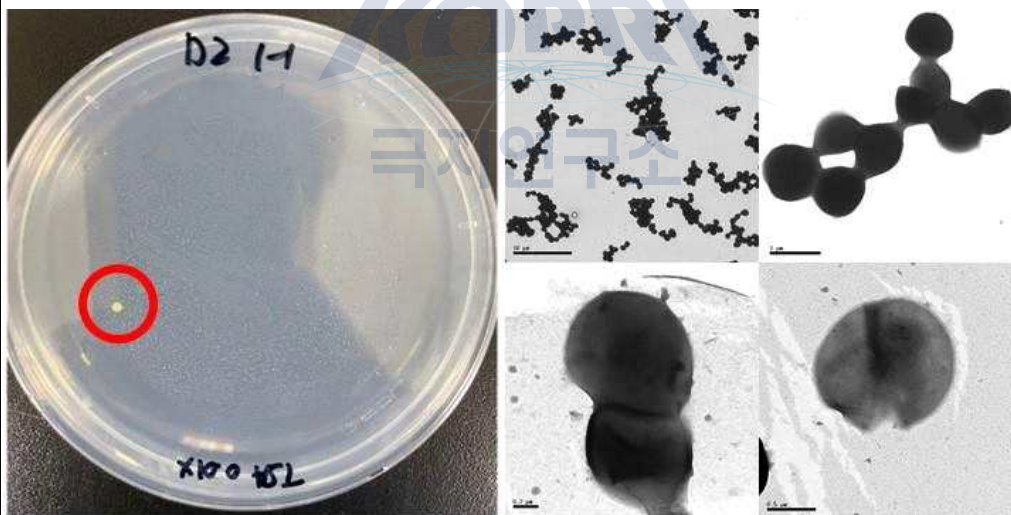


그림 129 빙설시료에서 미생물 분리배양

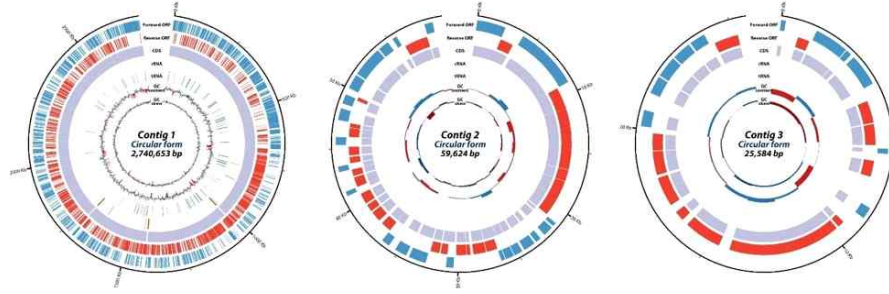
- 27개의 빙설시료에서 하나의 미생물을 분리배양에 성공하였고, 16S rRNA 유전자 분석으로 동정한 결과, *Kocuria marina* 종임을 밝힘. 이 종은 남극 해양에서 보고된 종임
- 투과전자 현미경을 활용하여 *Kocuria marina* D2의 형태를 분석한 결과, 둥근 모양의 구균임을 밝힘



Sampling site	Species	Gram stain	Culture media	Incubation Temperature
snow_D2	<i>Kocuria marina</i>	positive	TSA 0.01x	15°C

그림 130 분리배양된 미생물 분석 결과

- 분리배양된 미생물의 유전체 분석을 위해 Whole-genome sequencing (WGS) 분석을 수행하여 해당 미생물의 유전체 정보를 획득함
- 유전체 분석 결과, *K. marina* D2 균주는 2.8Mb의 유전체 크기에 chromosome 1개와 2개의 plasmid를 가진 것으로 분석됨
- 유전체의 유전자 특성을 분석한 결과 남극 빙영양 환경과 극한 환경에 적응하고 살아 남기 위한 스트레스 내성 유전자 서열을 많이 포함하고 있음을 확인함



Gene prediction	Contig	# CDS	# rRNA	# tRNA
	Contig1	2474	9	47
	Contig2	68	0	0
	Contig3	30	0	0

Gene annotation	genes related to adaptation to Antarctica	# of related sequences
	Oligotrophic environment	1048
	Response to stress	349

그림 131 분리배양된 미생물 유전체 분석 결과

- 27개 빙설시료와 4개의 대기시료에서 미생물 군집분석을 위해 DNA를 추출하여 full-length 16S rRNA gene sequencing 분석을 수행함
- 분석된 시료 중에서 8개의 빙설시료와 1개의 대기시료에서 염기서열 분석 결과를 획득함. 이것은 남극 내륙 빙설의 매우 낮은 생물량 때문인 것으로 사료됨
- 미생물 군집의 다양성 분석결과, α -diversity는 표면 빙설시료가 높게 나타는 경향을 보이고 빙설시료에 비해 대기시료의 다양성은 더 낮게 나타남

Sample	Type	Depth	Richness	Observed ASV	Shannon	Simpson
D2-2-1_2	snow	0-5cm	9.075	36	3.321	0.9759
D2-3-1_1	snow	0-5cm	4.928	19	2.803	0.9576
D2-3-1_2	snow	0-5cm	9.821	41	3.605	0.9878
D2-1-2_3	snow	5-30cm	6.005	22	2.65	0.9366
D2-3-2_1	snow	5-30cm	1.337	5	1.437	0.7878
D2-3-2_3	snow	5-30cm	6.114	23	2.835	0.9511
D2-2-3_2	snow	30-60cm	5.269	20	2.752	0.9521
D2-2-3_3	snow	30-60cm	3.17	12	2.401	0.9321
D2-A2	Air		2.847	10	1.916	0.8567

그림 132 α -diversity 분석 결과

- NMDS 분석을 통한 β -diversity는 빙설시료와 대기시료 사이에는 분명한 차이를 보이지만 빙설시료 내에서는 사이트 간 거리나 깊이에 따른 유의미한 차이가 없었음

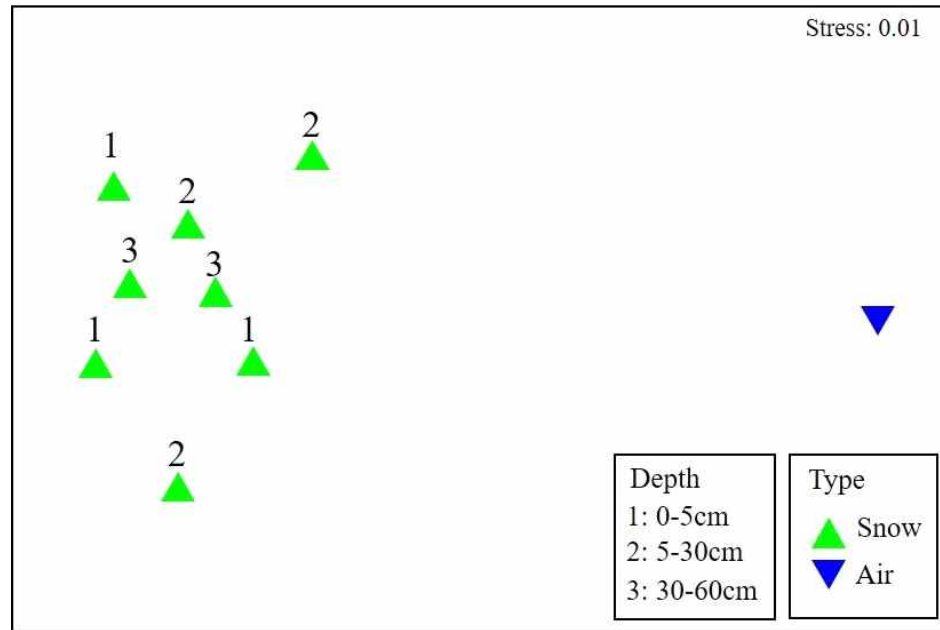


그림 133 β -diversity 분석결과

- Phylum 수준에서는 Acidobacteriota, Firmicutes, Proteobacteria가 가장 우점하였고 Genus 수준에서는 빙설시료에서는 Staphylococcus가 가장 우점하였고 대기시료에서는 Serratia가 가장 우점하는 것으로 나타남. Staphylococcus는 남극의 토양 또는 암석에서 보고된 바 있고, Serratia는 펭귄 등 남극 조류의 서식지나 분변에서 보고된 바 있음
- Species 수준에서는 Serratia 속하는 S. marcescens 종이 대기시료에서 우점했고 빙설시료에서는 남극의 Geothermal site에서 보고되었던 Bacillus megaterium 종이 우점하는 것으로 나타남

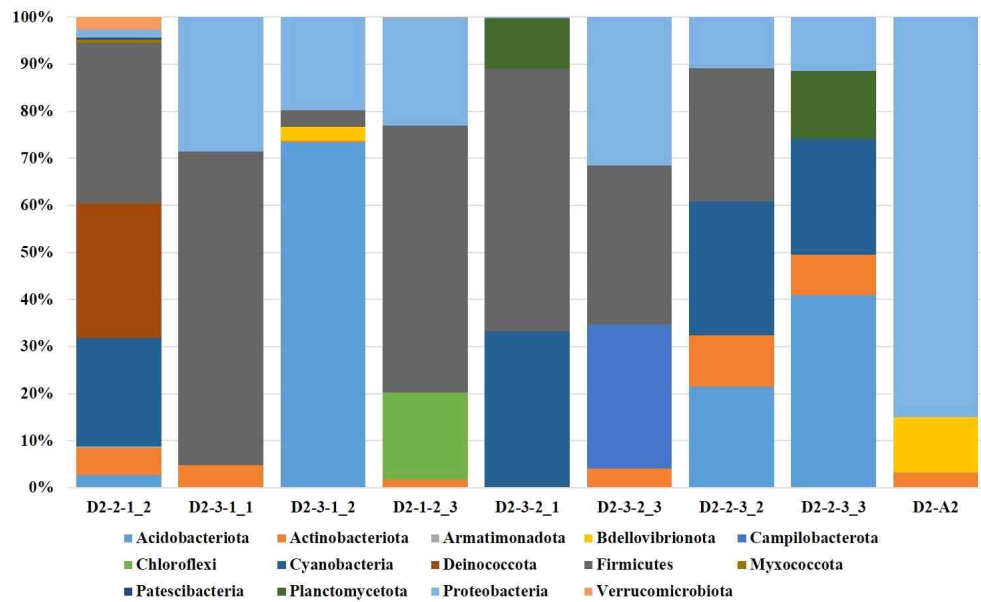


그림 134 Phylum 수준에서의 미생물 군집 구성

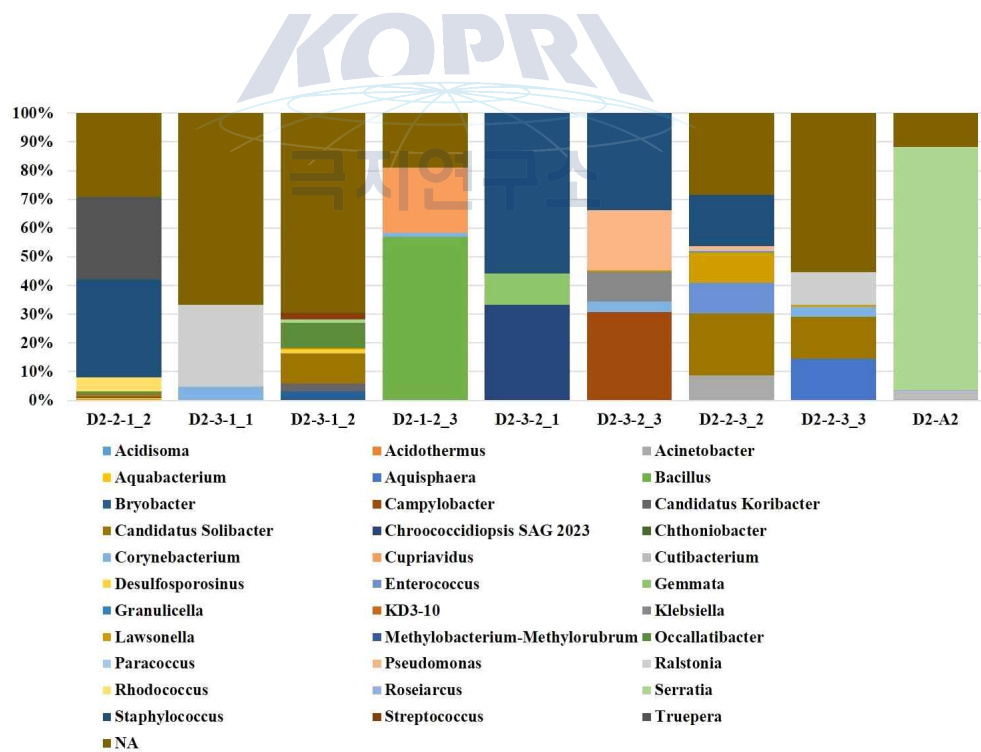


그림 135 Genus 수준에서의 미생물 군집 구성

1. 심부 빙저호 물리탐사

1-1. 정밀 탄성과 탐사 자료 분석 및 최적 빙저호 시추위치 선정

- 정밀 탄성과 자료 분석을 통한 2D, 3D 해석도 작성
 - 2021/22 남극 하계시즌 연구활동을 통해 D2지역 빙저호에 대한 2차 정밀 탄성과 탐사 수행 (탐사 일수 : 33일, 탐사인원 : 12명)
 - 기존 48채널 1 fold 수 자료와 비교하여 96채널 8 fold 수 자료를 획득하기 위해 탐사 수행 기간 증가(10일 -> 33일), 사용 폭약 수량 증가(54kg -> 240kg), 탄성과 시스템 장비(48채널 -> 96채널) 소요됨
 - 탄성과 음원은 96채널을 충분히 커버할 수 있도록 빙하 표면에서 최대 30 m 아래 1,600g PETN 폭약을 장약 후 발파하여 생성
 - 하나의 측선에 8번의 송신(발파)으로 8 fold 자료와 4번의 송신(발파)으로 4 fold 자료를 각각 획득 하도록 탐사 설계
 - 8 fold로 설정된 탐사 측선 21X, 21Y와 4 fold로 설정된 탐사 측선 21XX, 21YY에 대한 양질의 탄성과 자료 획득 (4개 측선 총 측선거리 17 km)

1단계
3차년도
(2022년)



그림 136 송신에너지원(PETN) 장약



그림 137 신기(Georod) 매설



그림 138 탄성과 시스템 운영 모습

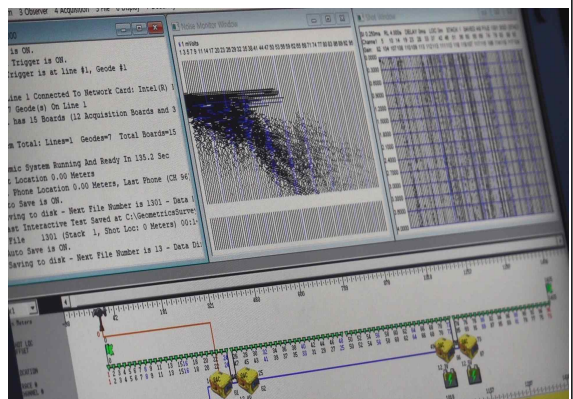


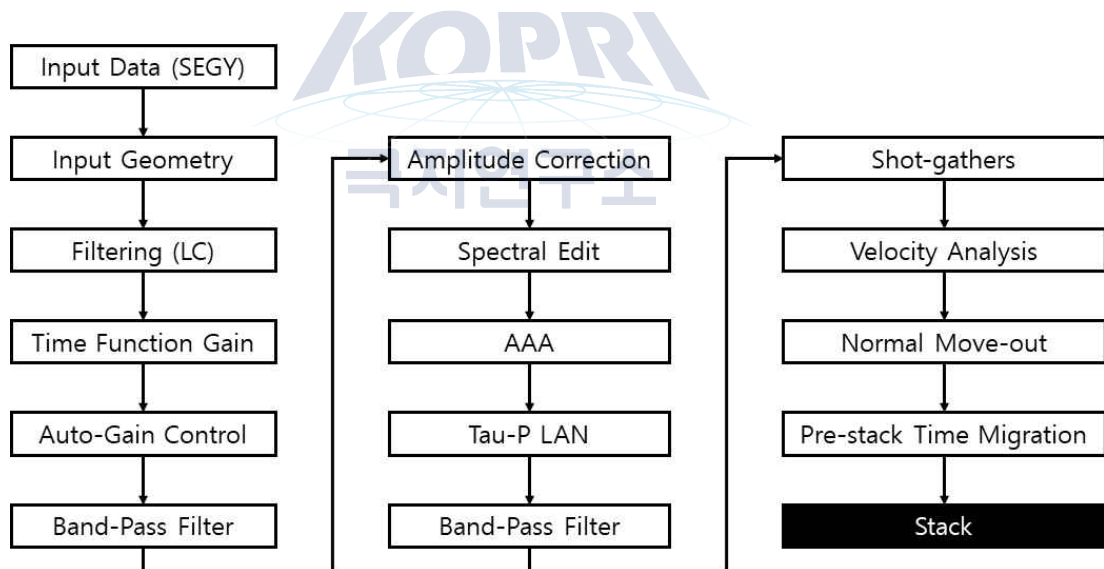
그림 139 탄성과 자료 획득 모습

< 탄성과 케이블 설치 모습 및 측선 전체 항공 사진 >



그림 140 탄성과 케이블 설치 모습 및 측선 전체 항공 사진

- 슬럼버저社에서 개발한 탄성과 자료처리 전용 플랫폼 Omega2를 활용, 빙권 탄성과 자료에 맞춘 잡음처리 프로세스 개발, 원시 탄성과 자료에 적용, 신호대 잡음비 (S/N ratio) 향상
- 빙권 탄성과 자료용 잡음처리 프로세스, 정밀 속도 분석 및 구조보정과정을 거쳐 최종 탄성과 단면 구축, 2019년 광역 탄성과 자료 대비 정확한 빙하 두께, 호수의 수심과 규모 파악 완료
- 정확한 구조해석을 위한 3D 탄성과 해석도 작성 중



< 탄성과 자료 품질(S/N ratio) 향상을 위한 빙권 탄성과 자료처리(잡음제거, 속도 분석, 중합 및 구조보정 단계 포함) 과정 >

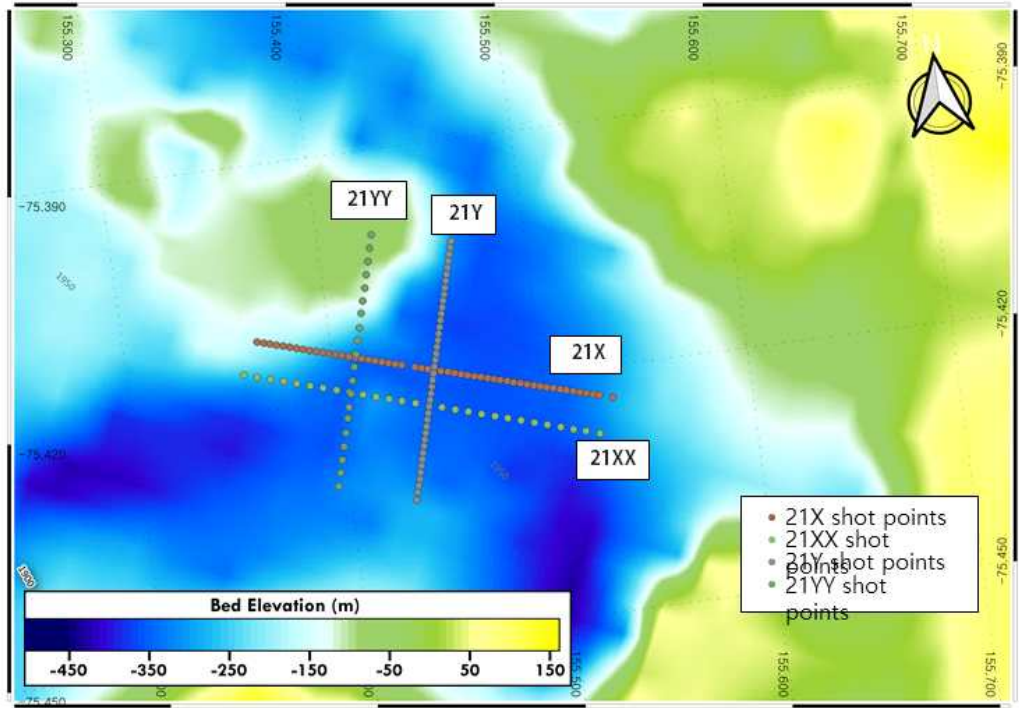


그림 141 21/22시즌 탄성과 탐사 축선

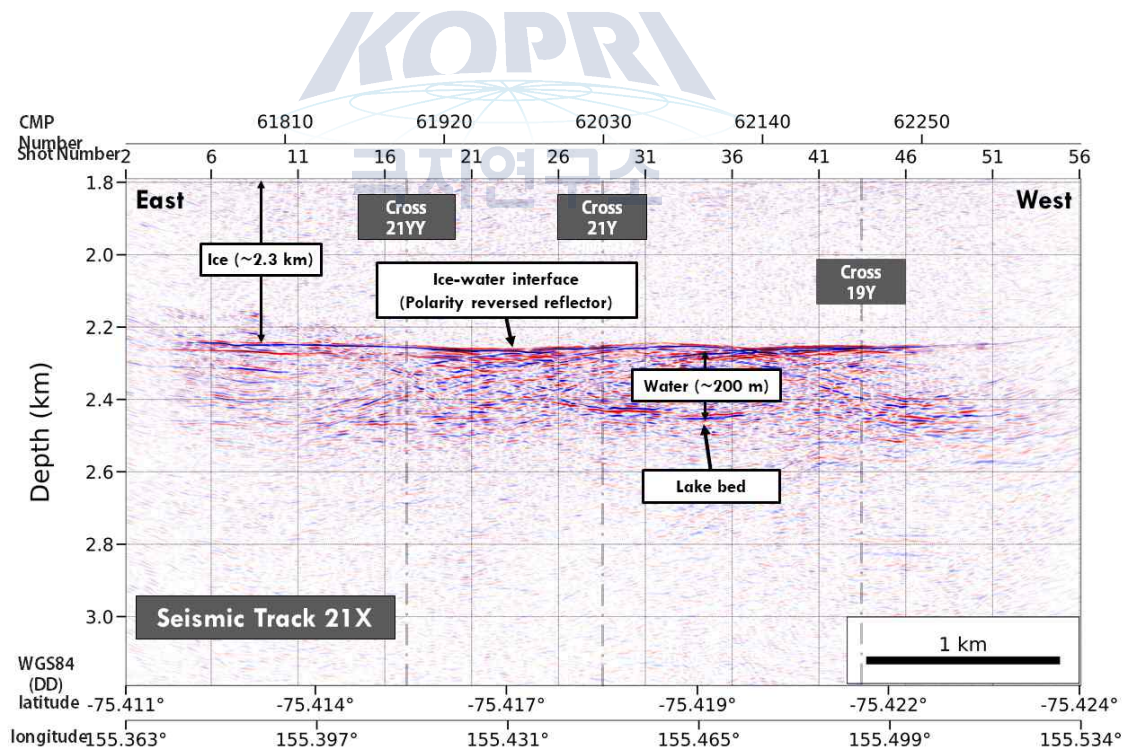


그림 142 탄성과 결과 (축선 21X)

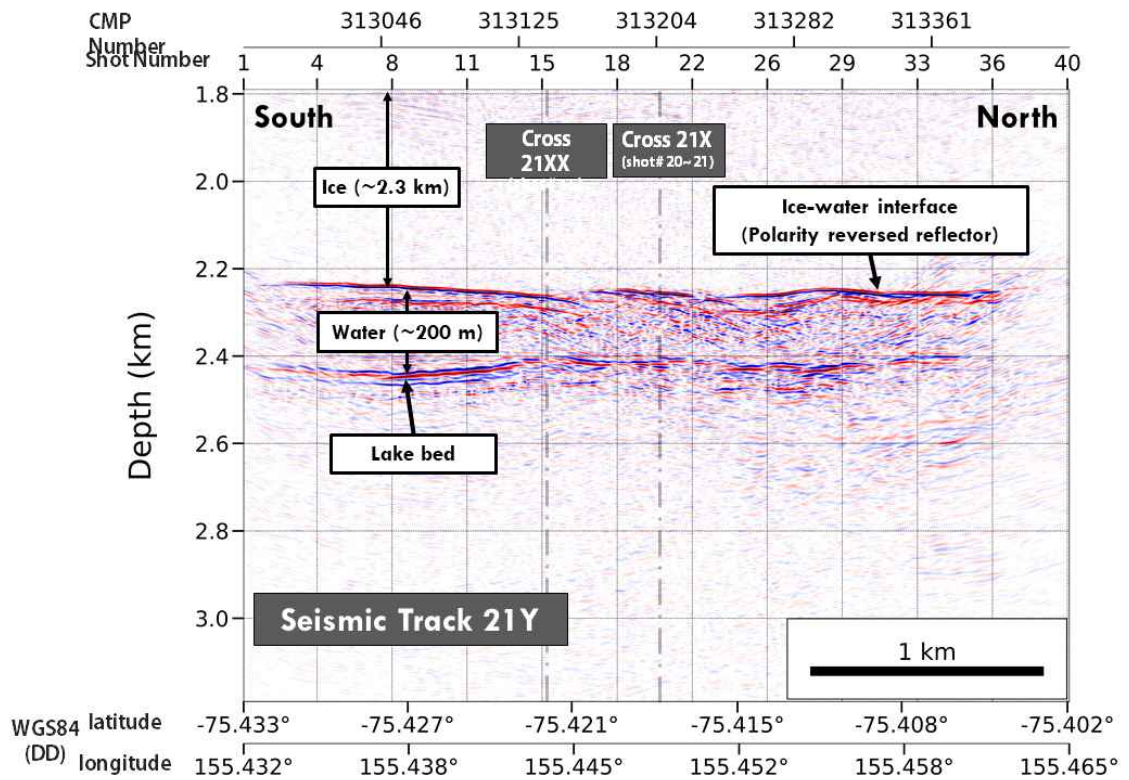


그림 143 탄성파 결과 (측선 21Y)

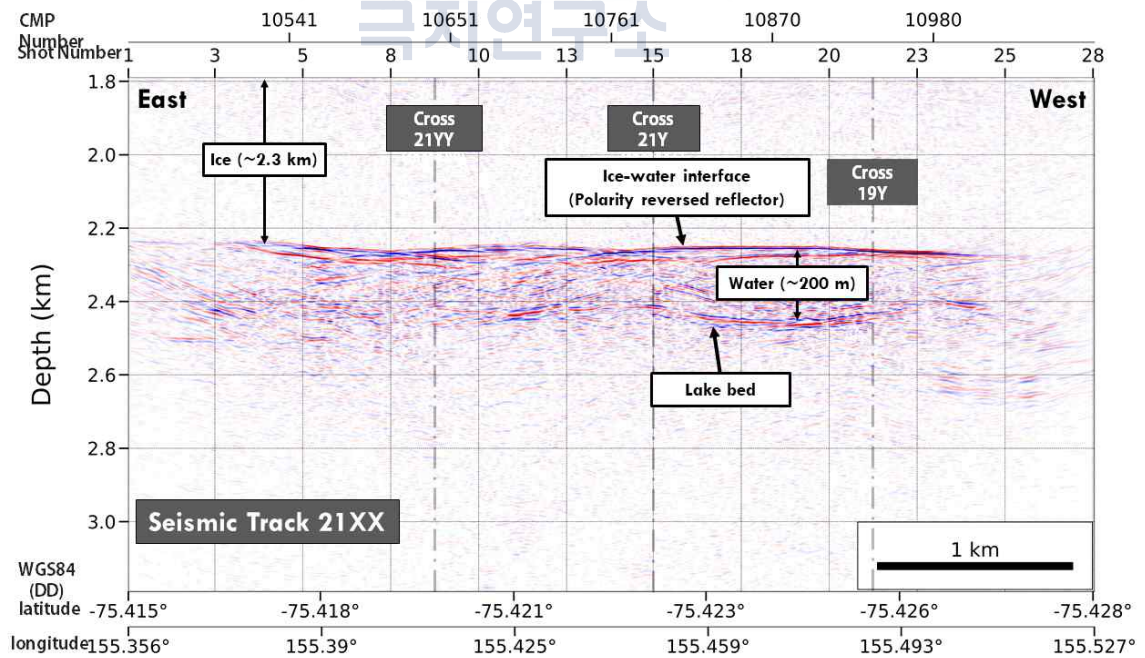


그림 144 탄성파 결과 (측선 21XX)

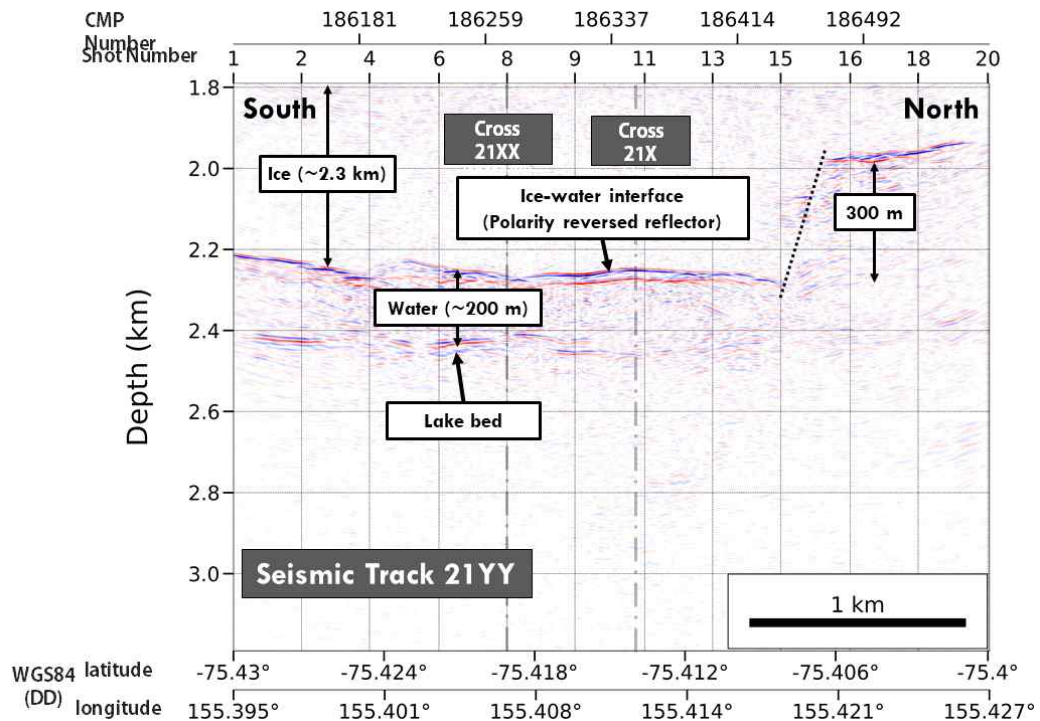


그림 145 탄성과 결과 (측선 21YY)

- D2 빙저호에 대한 지구물리학적 특성 규명
 - 기반암 구조에 따라 빙하 두께 2,200 - 2,350m 확인
 - 속도 분석을 통해 빙하 내부 탄성과 P파 속도 약 3,800m/s 확인
 - 빙저호 호수 수심 최대 80m로 추정
- 탄성과 자료 기반 빙저호 최적 시추 위치 선정
 - 최근 4년간 기록된 기상 자료와 탄성과 탐사 자료를 종합하여 시추 위치 선정
 - 1년 내내 주 풍향이 남서풍으로 기록, 오염 최소화를 위해 베이스 캠프로부터 오염물질이 바람을 통해 전달되지 않았을 것으로 추정되는 베이스 캠프 남쪽을 시추 후보지로 고려
 - 탐사 측선의 경우 인공 에너지원인 PETN 폭약으로 인한 오염이 있을 것으로 판단, 이에 따라 탄성과 측선구역은 시추 후보지에서 제외.
 - 탄성과 단면상에서 빙하-호수의 경계(역전된 위상을 가지는 강한 반사면)가 분명히 나타나며 그 아래 퇴적층으로부터 기인한 반사면이 존재하는 구간을 빙저호 열수시추 후보지로 판단
 - 2019-20시즌 그리고 2021-22시즌에 걸쳐 획득한 총 6개의 탄성과 측선에 대한 종합적 공간 해석을 통해 측선 21X의 shot number 26-36구역과 측선 21Y shot number 4-11구역이 교차되는 지점 인근(노란 실선 박스로 표시)구역을 최적의 빙저호 시추 후보지로 선정

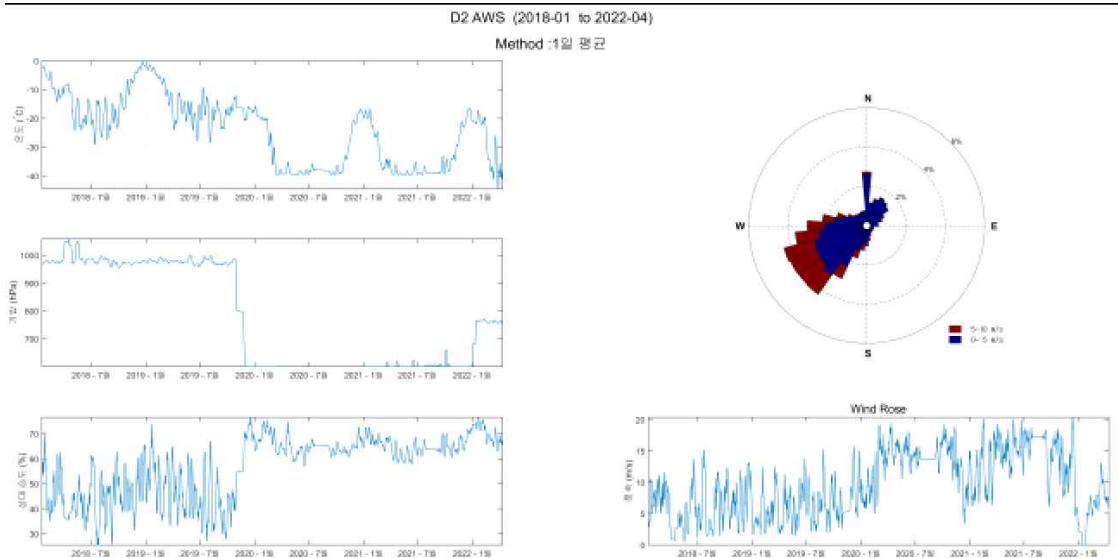


그림 146 D2 빙저호 지역 기상 자료(2018.01 - 2022.04)

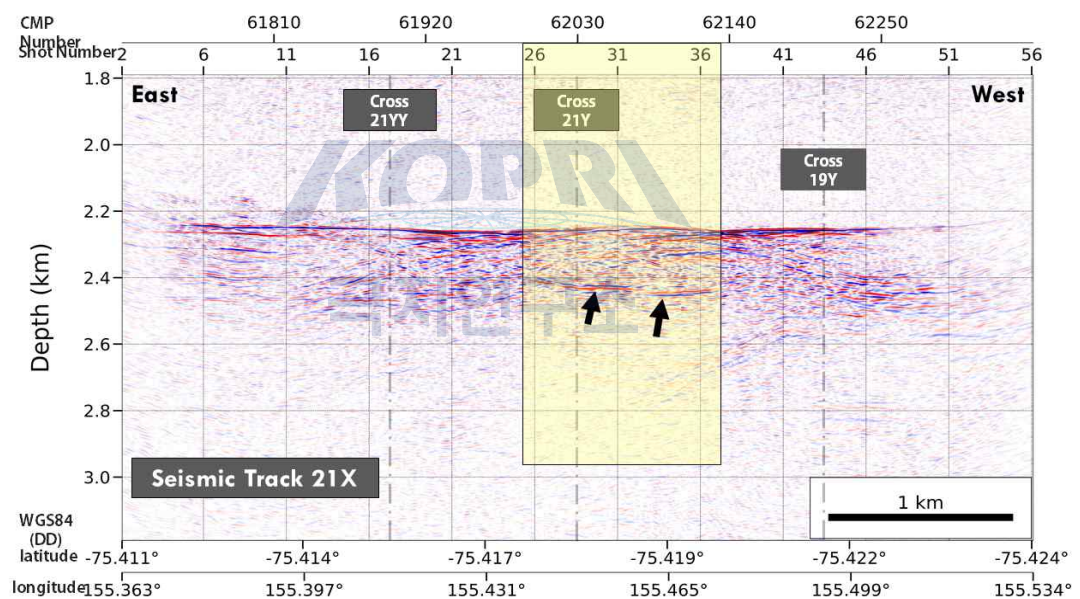


그림 147 측선 21X 단면 내 shot number 26-36 구간에서 호수 아래 퇴적층에 기인한 반사면 확인, 수심 약 80m 예상

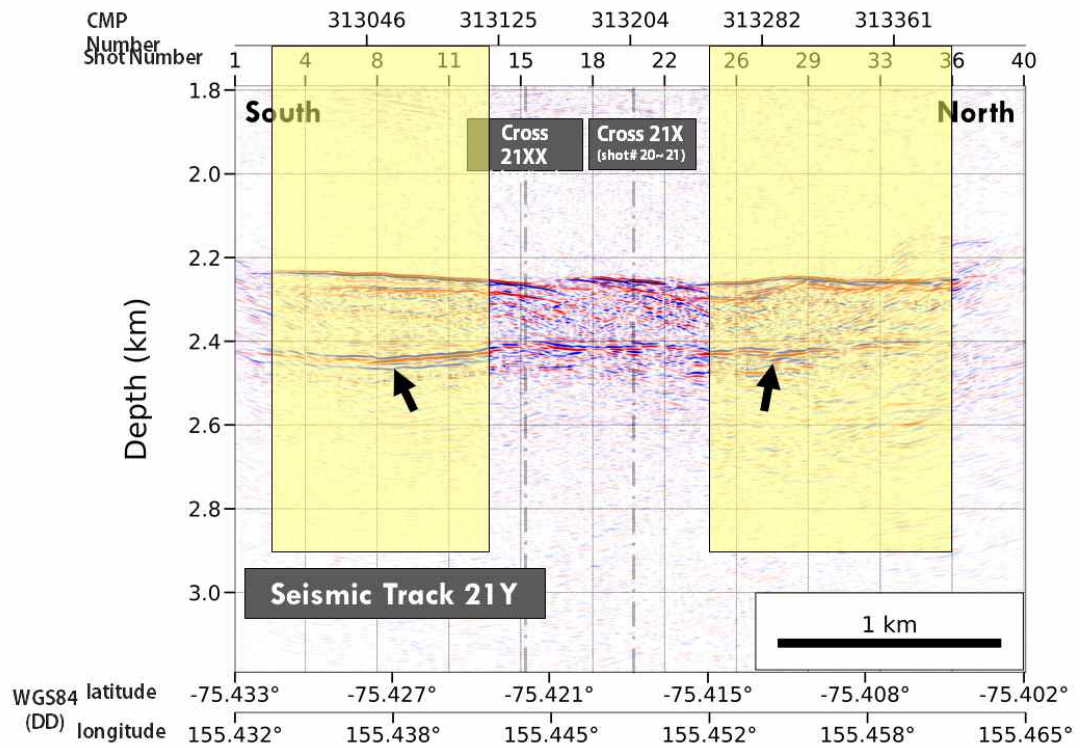


그림 148 측선 21Y 단면 내 shot number 26-36 구간에서 호수 아래 퇴적층에 기인한 반사면 확인, 수심 약 80m 예상

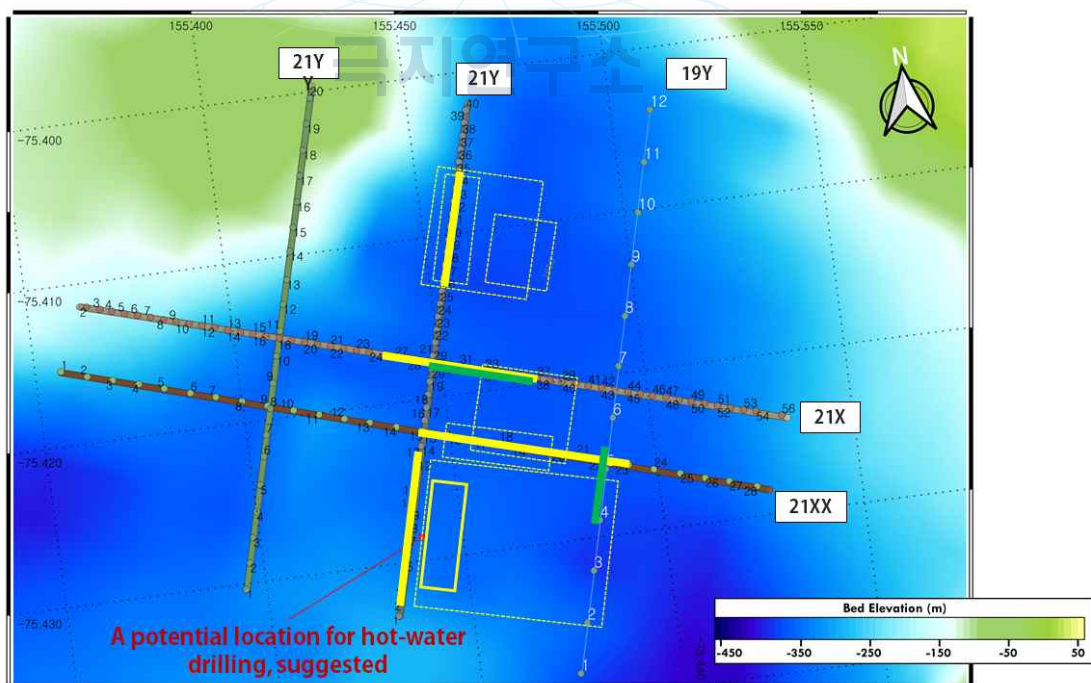


그림 149 D2 빙저호 최적 시추 위치 표시. 노란 실선 박스

2. 심부 빙저호 시추기술 개발

2-1. 열수시추 멸균시스템 개발

○ 열수시추 멸균시스템 시험 운영

- 멸균시스템 시험 운영을 위한 전원공급장치 및 호스 제작
- 전원공급장치는 내부장비의 소비전력을 고려하여 안전하게 제작함
- 호스는 열수가 유입되는 inlet, 유출되는 outlet, 내부시스템에 남아있는 열수를 제거하는 drain에 맞게 제작되었고 내구성을 위해 스프링 호스로 제작함
- 호스의 안전한 체결을 위해 호스 끝단에는 캄록 방식을 채택하여 제작함



그림 150 전원공급장치 및 호스 제작

- 멸균시스템의 열수 펌프 및 UV장치 정상 작동 확인을 진행함
- 열수의 유입과 유출에 관여하는 2쌍의 펌프 모두 정상 작동 확인함



그림 151 멸균시스템 열수 펌프 정상 작동여부 확인

- 4단계 필터과정을 거친 후 최종적인 멸균에 관여하는 UV램프를 설치하여 정상 작동 여부를 확인함



그림 152 멸균시스템 내부의 UV 램프 설치 및 정상 작동여부 확인

- 내부 열수 순환 시스템은 펌프, 필터 카트리지, UV 등 다양한 기능들이 하나의 시스템으로 연결되어 있으므로 장비 유지관리가 필수임
- 이와 관련하여 내부의 청정도 유지를 위한 화학적인 멸균 방법 정립

Steam Sterilization.

ELLIX pleated cartridge filters to be in-situation low pressure steam sterilised (134°C, 30 minute cycles) for a recommended maximum accumulated exposure of 10 hours must have a stainless steel insert included in the open end cap adapter. Stainless steel inserts are not necessary on double open ended (DOE) cartridges, i.e. The ones with 'AA' in the suffix code.

Stainless steel insert are only standard for pharmaceutical grade cartridges (EUFE-S and EPES-S). For other filters, they have to be ordered as an option for F open end adapters (226).

Hot Water Sanitization.

Open inlet, outlet and drain valves from the housing. Allow pre-filtered hot water to re-circulate for 30minutes in the system. Hot water temperature should not exceed 82°C, and differential pressure should not exceed 5psid. Open all system outlet valves to sanitize the system.

Chemical Sanitization.

Allow the sanitization agent to re-circulate in the system, choose the appropriate agent among the following guidelines.

Recommended for Sanitization		EPSP EAPP	EGFPZ	EUFE-H	EUFE	EAPS EPES	ENYP66
Bleach (up to 3% free Cl ₂)	0.5% for 15-30min	OK	OK	OK	OK	OK	OK
Hydrogen Peroxide (H ₂ O ₂)	3% for 15-30min	OK	NOT REC.	OK	OK	OK	NOT REC.
Isopropyl Alcohol	70% IPA for 15-30min	OK	OK	OK	OK	OK	OK
Formaldehyde	0.5-1% for 15-30min	OK	OK	OK	OK	OK	OK
Renalin (Peracetic acid and H ₂ O ₂)	1% for 15-30min	OK	OK	OK	OK	OK	NOT REC.
Ozone		Up to 2.2ppm/hrs	Up to 3ppm/hrs	9000ppm/hrs	At Least 50ppm/hrs	Up to 2.8ppm/hrs	NOT REC.

Ellig Filtration Technologies Limited, Unit 4, Gilchrist Thomas Industrial Estate, Blaenavon, Torfaen. NP4 9RL.
Tel: +44 (0) 1495 215 909 Fax: +44 (0) 845 838 7862
Web: ellig-filtration.com

< 멸균시스템 내부 장비 유지보수 방법 >

- 4단계 필터 시스템의 필터 카트리지가 이상 유무 확인 및 가동 테스트 진행함
- 필터 카트리는 포어 사이즈가 다른 4 종류가 필요하며 이 필터들의 품질보증을 확인하고 각 단계의 필터 하우징에 장착하여 정상 작동 유무 확인함



Ellig Filtration Technologies, Unit 4 Gilchrist Thomas Industrial Estate, Blaenavon, Torfaen, NP4 9RL, United Kingdom
Tel - 01495 215 909, Fax - 0845 636 7862, sales@ellig-filtration.com, www.ellig-filtration.com

Name: Ellig Cartridge Filter
Pore size: 0.1 Micron
Catalogue number: EPES-010-10-FHE
Lot number: ABCD1234
Materials of construction
Shell: Polypropylene
Filter media: Polyethersulfone hydrophilic membrane
Support material: Polypropylene
Inside core & end cap: Polypropylene
Sealing technology: Thermal bonding

Quality Assurance Certificate

ISO 9001 Quality Standard

This product was manufactured in a facility whose Quality Management System is approved by an accredited registering body to the appropriate ISO 9001-2000 Quality Systems Standard. Each membrane filter element was manufactured in a class 10000 clean room which environment is controlled.

Test before packaging

We hereby certify the quality of each filter cartridge:-

Item	Specification	Result
Compression resistance test	No leakage at 0.70Mpa within 2 min (100% test)	Passed
Appearance (Shape, crack, scratch, etc.)	Within the limits of our standards (100% inspection)	Passed
Dimensions	Within the limits of our standards (sampling inspection)	Passed
Integrity test (with alcohol)	The bubble point measured ≥0.08Mpa in alcohol	Passed

Bacterial endotoxins

When challenged the cartridge aqueous extraction contained less than 0.25EU/ml, this met with adequate safety margin under the current USP requirements as determined using the limulus amoebocyte lysate (LAL) test.

Component materials toxicity

Components material were tested and meet the criteria for USP class VI biological for plastics.

USP oxidizable substances

Effluent was negative after a water flush of 2000 ml per autoclaved 20" cartridge.

Gravimetric extractable's

The extractable level was equal to or less than 20 mg per 10" cartridge after 24 hours in ASTM type 1 reagent-grade water at controlled room temperature.

Thermal and hydraulic stress

Samples were steamed in place at 121°C and maintained integrity after forward stress to 50psig and reverse stress to 30psig.

In addition to the above tests, this product also met all other manufacturing standards required.

Dated: 01/01/2022

< 필터 카트리지 품질보증 >



그림 153 4단계 필터 카트리지 장착 및 정상여부 확인

- 전체 멸균시스템의 각 파트별 장비의 이상유무 확인 후, 전체 시스템의 정상 작동유무를 확인함
- 가상의 열수를 물탱크에 받아 두고 펌프가 정상적으로 열수를 흡입하는지, 4단계의 필터링 단계에서 하우징은 이상없는지, UV 램프 시스템은 물의 유입에도 정상적으로 작동하는지, 최종적으로 outlet을 통해 예상된 수압으로 물이 유출되는지 확인함

○ 생물학적 활성 테스트를 통한 멸균 유효성 검증

- 전체 멸균시스템의 각 파트별 장비의 이상 유무 확인 후, 전체 시스템의 정상 작동 유무를 확인함



그림 154 멸균시스템 실제 운영 점검

- 멸균 시스템 유효성 검증을 위해 일반 상수와 담수를 혼합하여 3000L 수조에 준비하고 수조의 물과 각 필터 단계별 (외부수조 시료, 유입된 시료, 1차 필터링, 2차 필터링, 3차 필터링, 4차 필터링, UV) 시료를 채취하여 수질검사 및 유세포 분석을 실시함



그림 155 멸균시스템 유효성 검사를 위한 시료채취

- 멸균 시스템 유효성 검증을 위해 채취된 물 샘플은 국립환경과학원이 지정한 (재)한국환경수도연구원에 분석 의뢰함
- 수질분석은 탁도, 부유물질, 총질소, 용존총질소, 클로로필a, 총대장균군, 총유기탄소, 용존유기탄소 항목으로 나누어 실시함

- 분석 결과를 보면, 탁도, 부유물질, 총대장균군의 수치가 멸균단계를 거칠수록 감소하였으며, 특히 미생물인 대장균은 최종단계에서 검출되지 않음에 따라 해당 멸균시스템의 유효성이 검증되었다고 사료됨
- 그 외 분석항목의 수치는 멸균에 따른 변화를 보이지 않는바, 해당 멸균시스템은 미생물 오염원의 물리적 멸균을 위해 만들어진 장비로서 실제 남극에서 열수가 만들어지는데 사용될 빙설 시료에서는 매우 낮거나 검출되지 않는 항목으로 청정 열수 시추에 있어서 문제가 없을 것이라 사료됨

시험 성적서

(재)한국환경수도연구원 우)07201 서울특별시 영등포구 양평로28사길 29 Tel : 02-2637-1234 Fax : 02-2631-8767		성적서 번호 : WQ-220781 A 페이지 (1) / (총 1) 끝.				
1. 의뢰자 기관명 : 한국해양과학기술원 부설 극지연구소 주 소 : 인천광역시 연수구 송도미래로 26 2. 시험대상 품목/물질/시료 설명 : 수질 3. 성적서 용도 : 참고용 4. 시 료 구 분 : 지참시료 5. 시 험 기 간 : 2022. 9. 2. ~ 2022. 9. 16. 6. 시 험 장 소 : ☒ 고정시험실 (서울특별시 영등포구 양평로28사길 29) ☐ 현장시험 7. 시 험 방 법 : 수질오염공정시험기준 (국립환경과학원고시 제2022-12호, 2022.02.21.) 8. 시 험 환 경 : 온도 : (최저 23 °C, 최고 27 °C), 습도 : (최저 45 % R.H., 최고 68 % R.H.) 9. 시 험 결 과						
항목	단위	결과				비고
		외부수조	수조	1차 필터링	2차 필터링	
탁도	NTU	0.41	2.12	1.07	0.50	-
부유물질	mg/L	불검출	3	불검출	불검출	-
총질소	mg/L	2.20	2.27	2.21	2.24	-
용존총질소	mg/L	2.15	2.20	2.20	2.21	-
클로로필a	mg/m³	불검출	불검출	불검출	불검출	-
총대장균군	총대장균군/mL	440	1 000	500	180	-
총유기탄소	mg/L	2.1	2.6	2.3	2.2	-
용존유기탄소	mg/L	2.1	1.8	2.2	2.2	-

※ 시료채취일 : 2022. 8. 31.

학 인	시험자	정 다 애	기술책임자	송 민 형
-----	-----	-------	-------	-------

1. 이 성적서는 의뢰자가 제시한 시료 및 시료명으로 시험한 결과로서 전체 제품에 대한 품질을 보증 하지는 않습니다.
 2. 이 성적서는 KS Q ISO/IEC 17025 와 KOLAS 인정과 관련 없으며, 용도 이외의 홍보, 선전, 광고 및 소송용 등으로 사용될 수 없고, 서면승인 없이 재발행하지 못합니다.

2022. 9. 16.

(재) 한국 환경 수도 연구 원 장 (인)

* 시험결과 및 시험성적서 진위여부는 성적서 상단의 대표전화로 문의하십시오. (전화 02-2637-1234)

KEWI-QP-15-F03C(1)

Korea Environment & Water Works Institute

< 멸균 시스템 수질분석 결과서-1 >

시험 성적서

(재)한국환경수도연구원

우)07201 서울특별시 영등포구 양평로28사길 29
Tel : 02-2637-1234 Fax : 02-2631-8767

성적서 번호 : WQ-220781 B

페이지 (1) / (총 1) 끝.



1. 의뢰자 기관명 : 한국해양과학기술원 부설 극지연구소
주 소 : 인천광역시 연수구 송도미래로 26
2. 시험대상 품목/물질/시료 설명 : 수질
3. 성적서 용도 : 참고용
4. 시 료 구 분 : 지참시료
5. 시 험 기 간 : 2022. 9. 2. ~ 2022. 9. 16.
6. 시 험 장 소 : ☒ 고정시험실 (서울특별시 영등포구 양평로28사길 29) ☐ 현장시험
7. 시 험 방 법 : 수질오염공정시험기준 (국립환경과학원고시 제2022-12호, 2022.02.21.)
8. 시 험 환 경 : 온도 : (최저 23 °C, 최고 27 °C), 습도 : (최저 45 % R.H., 최고 68 % R.H.)
9. 시 험 결 과

항목	단위	결과			비고
		3차 필터링	4차 필터링	UV	
탁도	NTU	0.44	0.42	0.41	-
부유물질	mg/L	불검출	불검출	불검출	-
총질소	mg/L	2.23	2.21	2.20	-
용존총질소	mg/L	2.21	2.19	2.11	-
클로로필a	mg/m ³	불검출	불검출	불검출	-
총대장균군	총대장균수/mL	66	1	0	-
총유기탄소	mg/L	2.1	2.1	2.3	-
용존유기탄소	mg/L	2.1	2.0	2.2	-

* 시료채취일 : 2022. 8. 31.

확 인	시험자	정 다 애	기술책임자	송 민 형
-----	-----	-------	-------	-------

1. 이 성적서는 의뢰자가 제시한 시료 및 시료명으로 시험한 결과로서 전체 제품에 대한 품질을 보증하지는 않습니다.
2. 이 성적서는 KS Q ISO/IEC 17025 와 KOLAS 인정과 관련 없으며, 용도 이외의 홍보, 선전, 광고 및 소송용 등으로 사용될 수 없고, 서면승인 없이 재발행하지 못합니다.

2022. 9. 16.

(재)한국환경수도연구원장 (인)

* 시험결과 및 시험성적서 진위여부는 성적서 상단의 대표전화로 문의하시기 바랍니다. (02-2637-1234)



KEWI-QP-15-F03C(1)

Korea Environment & Water Works Institute

< 멸균 시스템 수질분석 결과서-2 >

- 채취된 물 샘플은 유세포분석을 진행하여 시료내 파티클 수를 측정함
- 분석결과, 필터를 통한 멸균 단계를 거칠수록 파티클 수가 확인하게 줄어드는 것을 확인함
- 최종단계의 시료에서도 적은 수의 파티클이 확인되었는데, 파티클 사이즈에 따르면 미생 물이 아닌 것으로 사료되나 형광염색을 통해서 추가적인 분석을 수행할 예정임

분석 결과서

시료명	외부수조_수도 1차, 2차, 3차, 4차 UV	의뢰처	국지연구소
시험일자	2022년 9월 1일	의뢰자	최용환
의뢰항목	Quantification of bacteria by flow cytometry	시험종류	Quantification of bacteria

NO.	시료명	시험항목	시험결과
1	외부수조	Quantification of bacteria	결과 및 첨부항목
2	수도	Quantification of bacteria	결과 및 첨부항목
3	1차	Quantification of bacteria	결과 및 첨부항목
4	2차	Quantification of bacteria	결과 및 첨부항목
5	3차	Quantification of bacteria	결과 및 첨부항목
6	4차	Quantification of bacteria	결과 및 첨부항목
7	UV	Quantification of bacteria	결과 및 첨부항목

시험일자	2022년 9월 1일	시험자	이민기
발급일자	2022년 9월 5일	연락처	031-888-6952 mag@gsa.or.kr

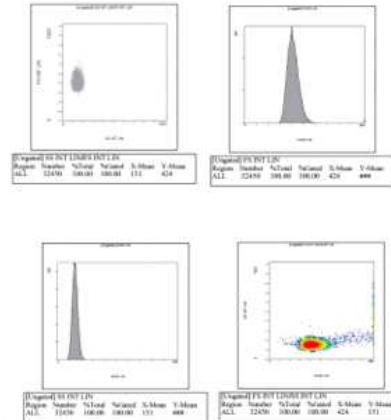
*본 분석결과서는 연구개발을 위한 기술현황으로 발행되는 것입니다.

페이지 1 / 29

16229 경기도 수원시 영통구 광교로 147 Tel. 031-888-6952 Fax. 031-888-6938
www.gbsa.or.kr

1. Results

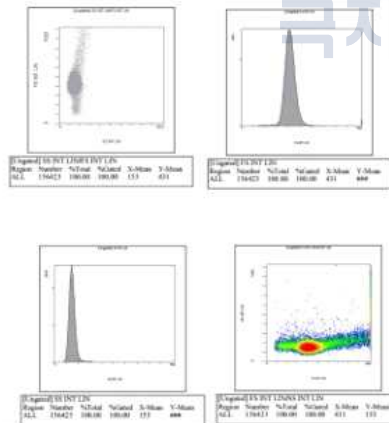
1) 외부수조_20μl



페이지 2 / 29

16229 경기도 수원시 영통구 광교로 147 Tel. 031-888-6952 Fax. 031-888-6938
www.gbsa.or.kr

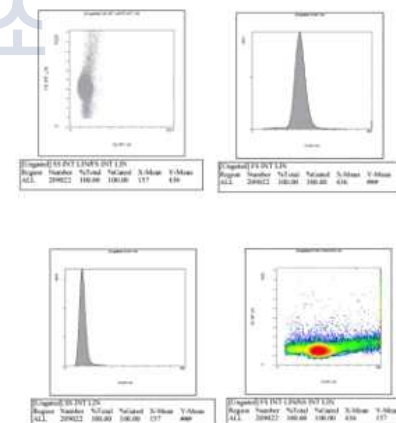
2) 외부수조_100μl



페이지 3 / 29

16229 경기도 수원시 영통구 광교로 147 Tel. 031-888-6952 Fax. 031-888-6938
www.gbsa.or.kr

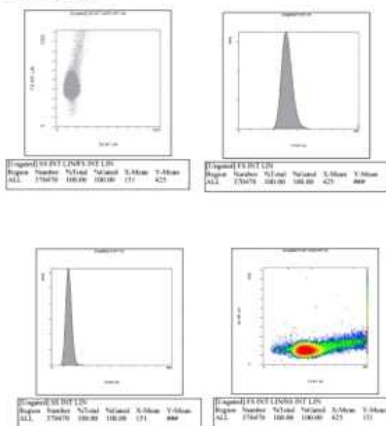
3) 외부수조_200μl



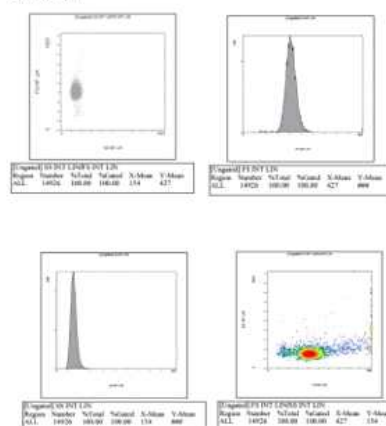
페이지 4 / 29

16229 경기도 수원시 영통구 광교로 147 Tel. 031-888-6952 Fax. 031-888-6938
www.gbsa.or.kr

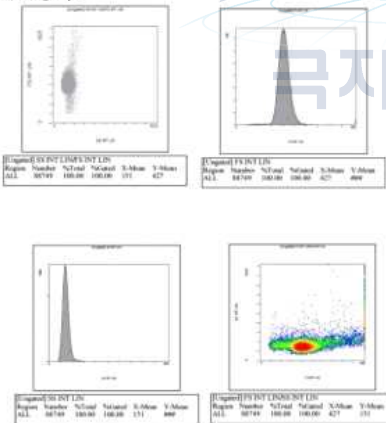
< 멸균시스템 유세포 분석 결과서-1 >

4) 외부수조, 300 μ l

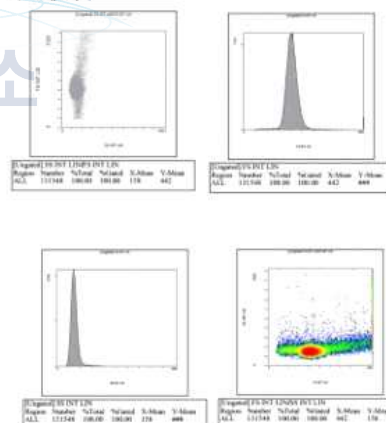
페이지 5 / 29

16229 경기도 수원시 영통구 광교로 147 Tel. 031-888-6952 Fax. 031-888-6936
www.gbta.or.kr5) 수조, 20 μ l

페이지 6 / 29

16229 경기도 수원시 영통구 광교로 147 Tel. 031-888-6952 Fax. 031-888-6936
www.gbta.or.kr6) 수조, 100 μ l

페이지 7 / 29

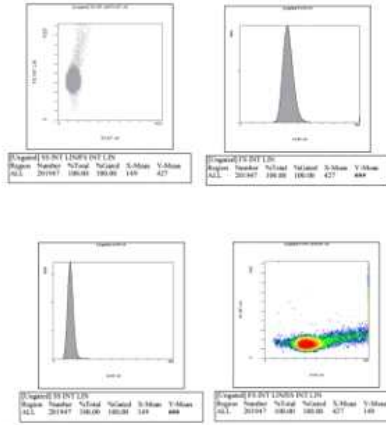
16229 경기도 수원시 영통구 광교로 147 Tel. 031-888-6952 Fax. 031-888-6936
www.gbta.or.kr7) 수조, 200 μ l

페이지 8 / 29

16229 경기도 수원시 영통구 광교로 147 Tel. 031-888-6952 Fax. 031-888-6936
www.gbta.or.kr

< 멸균시스템 유세포 분석 결과서-2 >

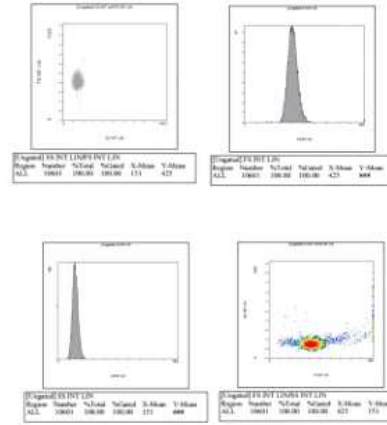
8) 수조_300 μ l



페이지 9 / 29

16229 경기도 수원시 영통구 광교로 147 Tel. 031-888-6952 Fax. 031-888-6938
www.gbna.or.kr

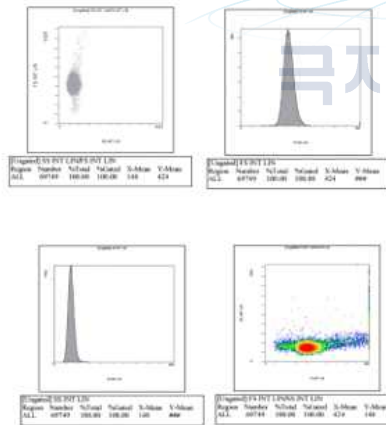
9) 1 자_20 μ l



페이지 10 / 29

16229 경기도 수원시 영통구 광교로 147 Tel. 031-888-6952 Fax. 031-888-6938
www.gbna.or.kr

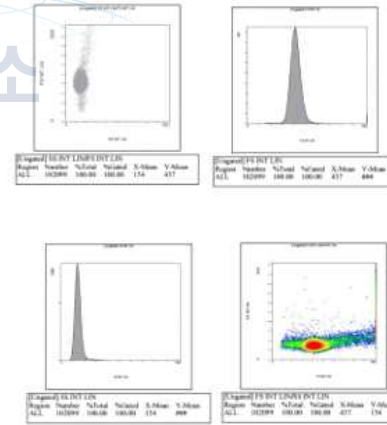
10) 1 자_100 μ l



페이지 11 / 29

16229 경기도 수원시 영통구 광교로 147 Tel. 031-888-6952 Fax. 031-888-6938
www.gbna.or.kr

11) 1 자_200 μ l

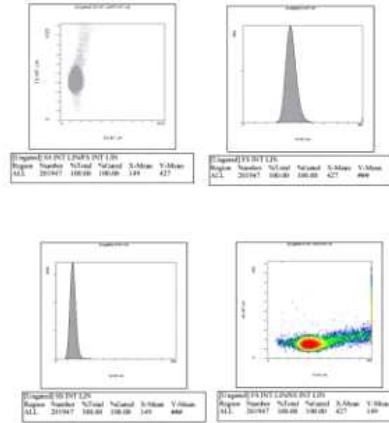


페이지 12 / 29

16229 경기도 수원시 영통구 광교로 147 Tel. 031-888-6952 Fax. 031-888-6938
www.gbna.or.kr

< 멸균시스템 유세포 분석 결과서-3 >

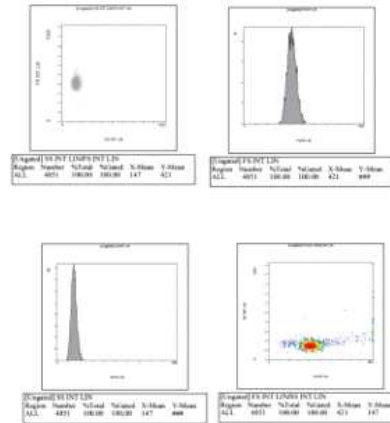
12) 1 자_300pl



페이지 13 / 29

16229 경기도 수원시 영통구 광교로 147 Tel. 031-888-6952 Fax. 031-888-6938
www.gbta.or.kr

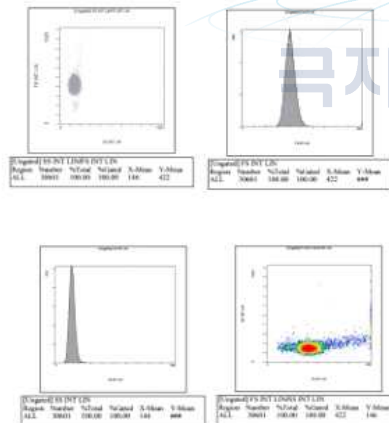
13) 2 자_20pl



페이지 14 / 29

16229 경기도 수원시 영통구 광교로 147 Tel. 031-888-6952 Fax. 031-888-6938
www.gbta.or.kr

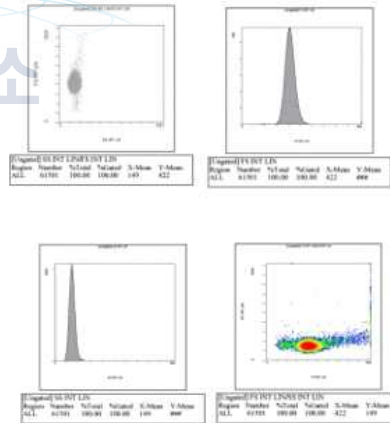
14) 2 자_100pl



페이지 15 / 29

16229 경기도 수원시 영통구 광교로 147 Tel. 031-888-6952 Fax. 031-888-6938
www.gbta.or.kr

15) 2 자_200pl

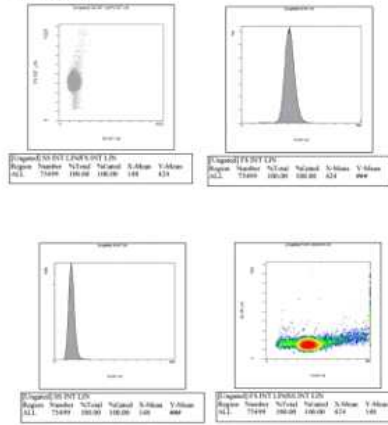


페이지 16 / 29

16229 경기도 수원시 영통구 광교로 147 Tel. 031-888-6952 Fax. 031-888-6938
www.gbta.or.kr

< 멸균시스템 유세포 분석 결과서-4 >

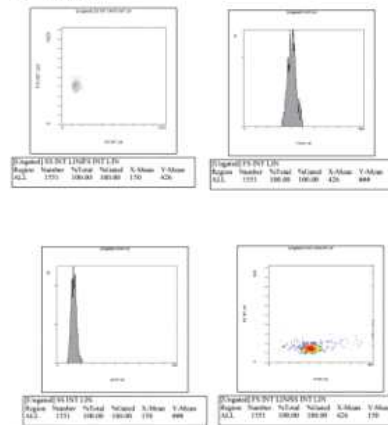
16) 2 자_300pl



페이지 17 / 29

16229 경기도 수원시 영통구 광교로 147 Tel. 031-888-6952 Fax. 031-888-6938
www.gbta.or.kr

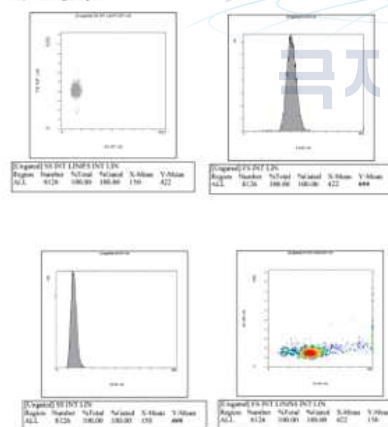
17) 3 자_20pl



페이지 18 / 29

16229 경기도 수원시 영통구 광교로 147 Tel. 031-888-6952 Fax. 031-888-6938
www.gbta.or.kr

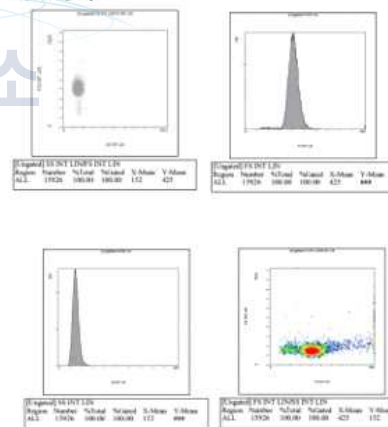
18) 3 자_100pl



페이지 19 / 29

16229 경기도 수원시 영통구 광교로 147 Tel. 031-888-6952 Fax. 031-888-6938
www.gbta.or.kr

19) 3 자_200pl



페이지 20 / 29

16229 경기도 수원시 영통구 광교로 147 Tel. 031-888-6952 Fax. 031-888-6938
www.gbta.or.kr

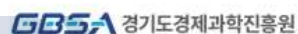
< 멸균시스템 유세포 분석 결과서-5 >



16229 경기도 수원시 영통구 경교로 147 Tel. 031-888-6952 Fax. 031-888-6938
www.gita.or.kr



16229 경기도 수원시 영통구 경교로 147 Tel. 031-888-6952 Fax. 031-888-6930
www.ghta.or.kr



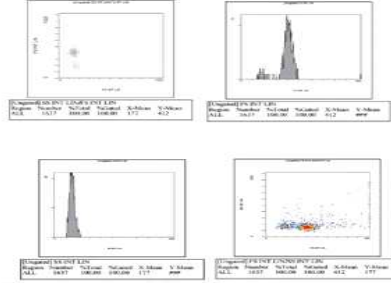
16229 경기도 수원시 영통구 경교로 147 Tel. 031-888-6952 Fax. 031-888-6938
www.gfwa.or.kr



16229 경기도 수원시 영통구 경교로 147 Tel. 031-888-6952 Fax. 031-888-6938
www.obsa.or.kr

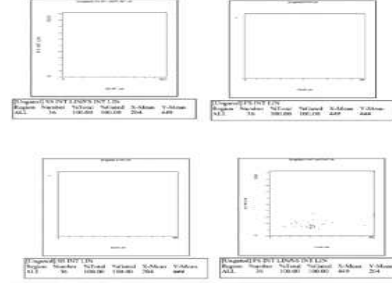
〈 멸균시스템 유세포 분석 결과서-6 〉

24) 4차 300μl



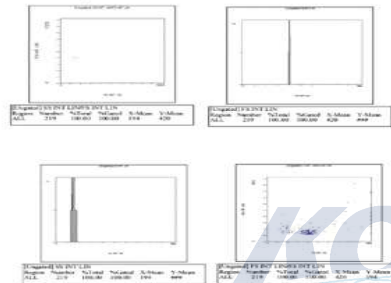
16229 경기도 수원시 영통구 종곡로 147 Tel. 031-888-6952 Fax. 031-888-6936
www.gbsa.or.kr

25) UV 20μl



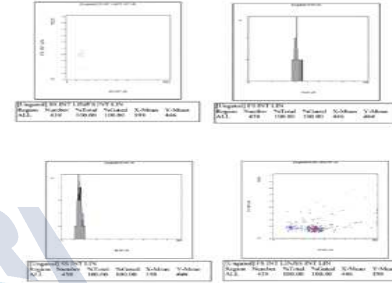
16229 경기도 수원시 영통구 종곡로 147 Tel. 031-888-6952 Fax. 031-888-6936
www.gbsa.or.kr

26) UV 100μl



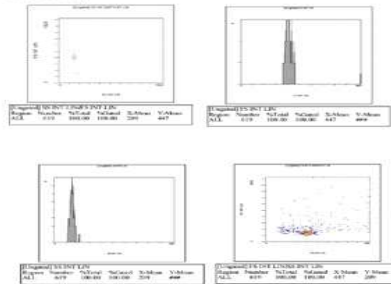
16229 경기도 수원시 영통구 종곡로 147 Tel. 031-888-6952 Fax. 031-888-6936
www.gbsa.or.kr

27) UV 200μl



16229 경기도 수원시 영통구 종곡로 147 Tel. 031-888-6952 Fax. 031-888-6936
www.gbsa.or.kr

28) UV 300μl



16229 경기도 수원시 영통구 종곡로 147 Tel. 031-888-6952 Fax. 031-888-6936
www.gbsa.or.kr

< 멸균시스템 유세포 분석 결과서-7 >

2-2. 빙저호 퇴적물 시추 시스템 개발

○ 빙저호 퇴적물 시추용 청정원치, 피스톤 시추기, 다중 시추기 제작

- 1~2차년도 사업수행을 통해 빙저호 청정 퇴적물 시료 채집용 청정원치, 피스톤 시추기, 다중 시추기 활용 사례 분석 및 설계 완료
- 당해연도 원치와 시추기를 일괄 제작 예정이었으나, 원치시스템의 남극 현장 운영 효율 제고를 위한 유압식→전자식 설계 변경으로 제작 단가가 상승(2억→3.3억)하여 원치시스템 단일 제작
- 빙저호 청정 퇴적물 시추기는 CECs 시추시스템 퇴적물 시추기를 공동 활용하기로 BAS와 협의 완료

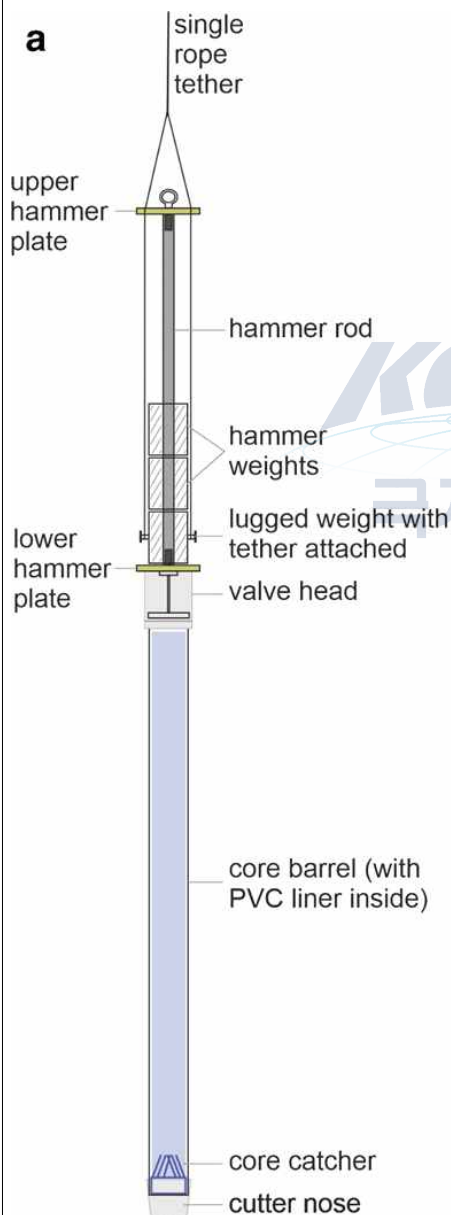


그림 156 BEAMISH 시추프로그램에 사용된 타격식 퇴적물 시추기

○ 빙저호 시추용 윈치시스템 제작

- 심부 청정열수시추시스템의 구성요소로써 데이비드 빙원 빙저호 시추후보지(D2)에서 2,000m급 청정시추라인을 시추공으로 안정적으로 전개 및 회수시키기 위한 장치
- 시추 라인을 고정하고 장력을 유지하기 위한 릴과 라인의 정확한 전개와 속도 유지를 위한 캡스턴 드릴타워, 윈치시스템을 모니터링 및 제어할 수 있는 컨트롤패널로 구성
- 영국 BAS의 BEAMISH 시추프로그램을 통해 2,000m급 시추작업 시의 내구성과 성능이 입증된 윈치시스템을 도입
- 현재 영국 현지에서 제작 중이며, 차년도 제작 예정인 2,300m급 시추호스와 조립 테스트 후 장보고기지 일괄 보급 예정

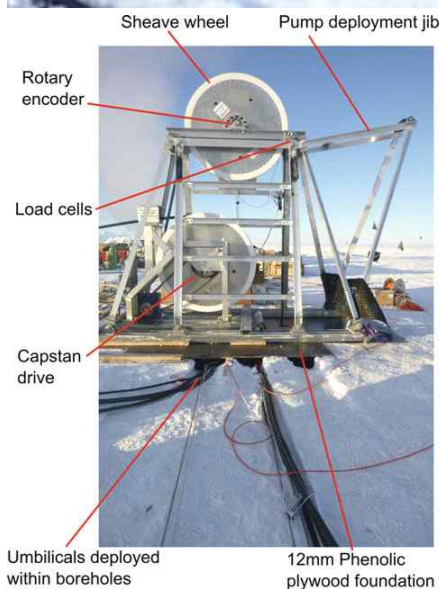
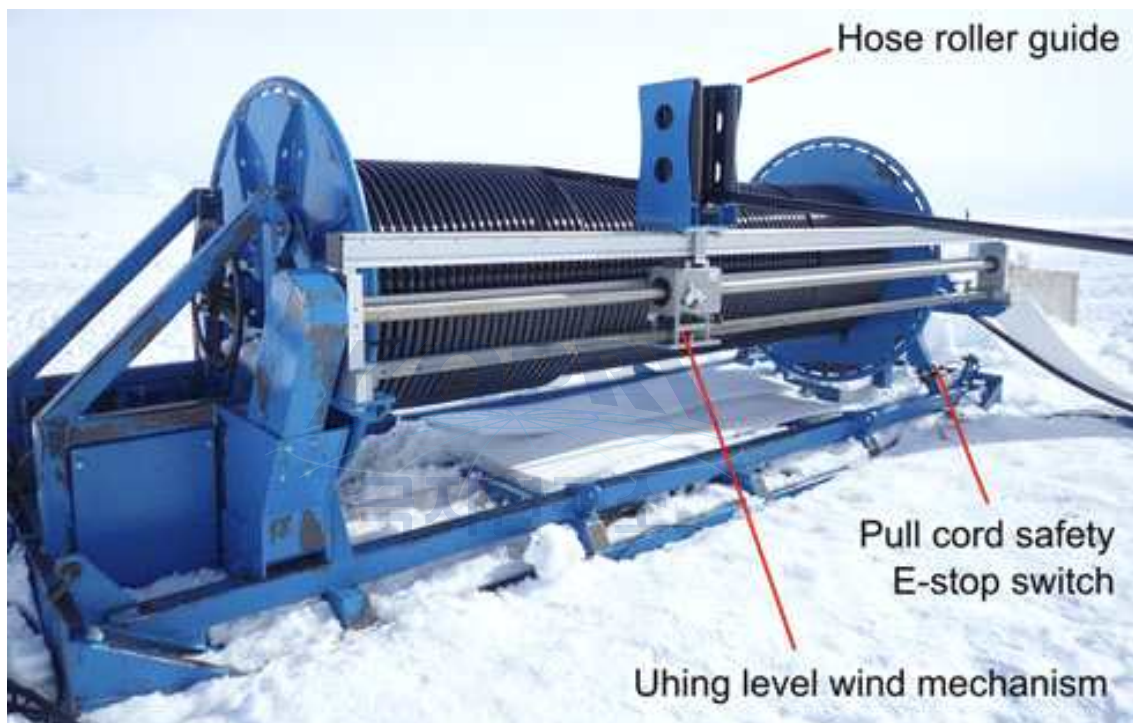


그림 157 영국 BEAMISH 시추시스템의 윈치, 캡스턴타워, 컨트롤보드

○ **ניתן**

- 1.5kW 3상 모터 구동
- 기어비 156 기어박스과 피니언&링기어를 통한 최대 전개속도 10.7m/분
- 정전 시 라인을 고정하기 위한 브레이크 탑재 및 비상정지 장치 설치
- 샤프트 인코더, 가변주파수드라이브(VFD)를 통해 속도 및 토크 제어, 라인의 장력 유지 (캠스톤 드라이브에서 라인 미끄러짐 방지)
- 로터리 커플링을 통해 라인 연결부의 꼬임 없이 휠의 회전이 자유로움
- 레벨와인더 가이드를 통해 전개 및 회수 시 라인 자동 정렬
- 원치 자체 무게 약 3.5톤, 2,300m급 호스 장착 시 약 5톤

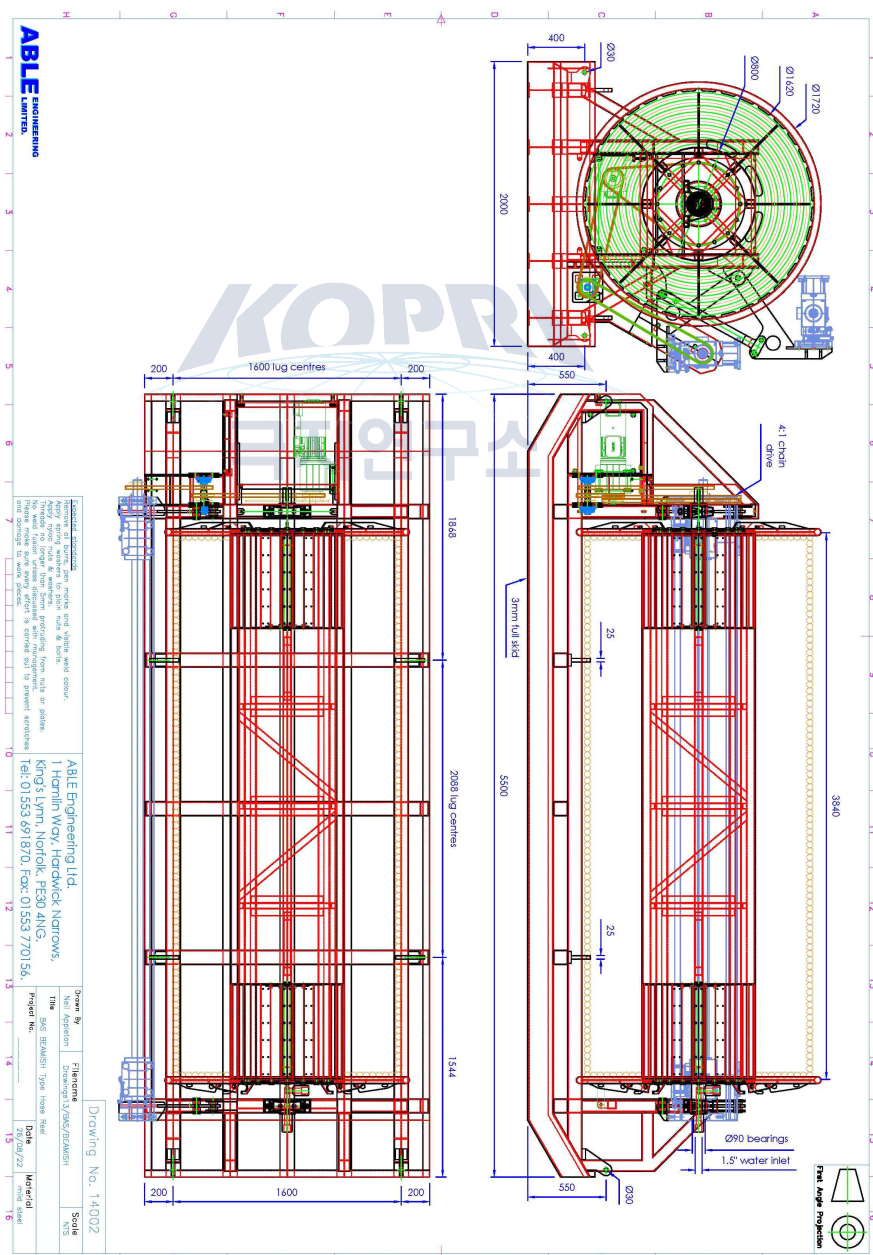


그림 158 릴 도면

- 캡스텐 타워

- 2.2kW 3상 모터 구동. 2단 기어 박스를 통한 기어감속비 1500
- 가변주파수드라이브(VFD)를 통한 정밀 속도제어능력 0.1m/분, 최대속도 9.1m/분
- 축높이 3m의 시브휠 유닛에 장착된 샤프트인코더와 이중로드셀을 통해 시추라인의 전개 길이(시추 깊이), 하강속도, 다운홀 하중 및 장력 모니터링
- 알루미늄 스키발을 장착해 평행선상으로 이동시키며 연속 전개 가능
- 타워 상부에 설계된 지브 및 롤러를 통해 평행선상의 시추공(umbilical hole, main hole)에 수중펌프, 제대호스 설치&회수 보조

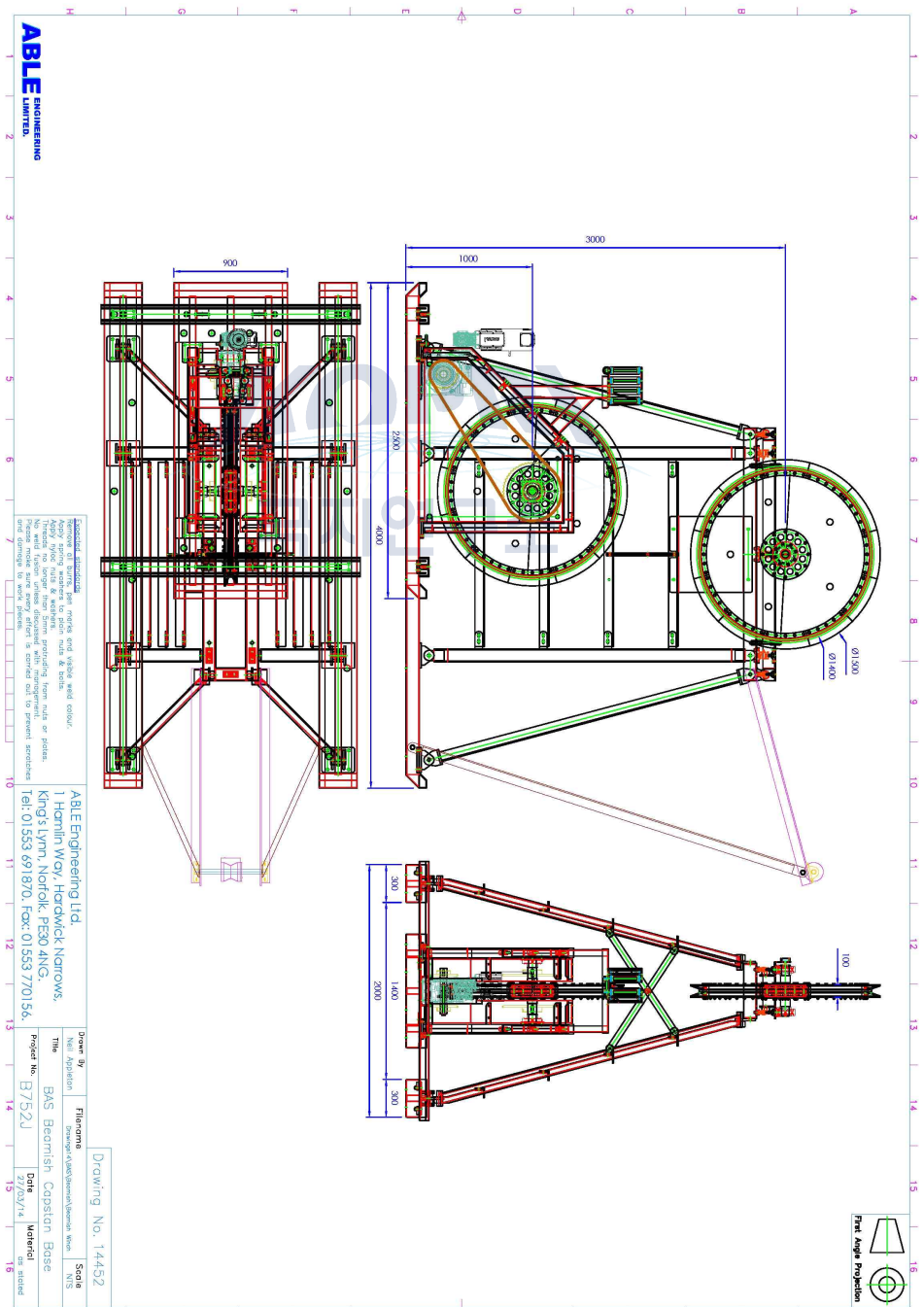


그림 159 캡스텐 타워 도면

- 윈치 컨트롤 패널
 - 윈치시스템의 모터 조절을 통해 시스템 속도 및 토크 조절
 - 릴에 감긴 호스레이어가 감소함에 따라 릴 모터를 제어해 호스의 장력을 일정하게 유지
 - 캡스틴 드라이브 제어를 통해 전개속도를 일정하게 유지
 - 릴과 캡스틴 드라이브에 설치된 센서를 통해 전개 속도, 깊이, 하중 모니터링
 - 경보 알람, 비상 정지 기능 등 안전 시스템을 통해 시스템을 안정적으로 유지

2-3. 빙저호 열수시추기 국제 공동 개발

○ 열수시추기 시추 probe 개발

- 열수시추시스템 구축 소요기간 단축과 효율적인 예산 활용을 위하여 BAS 열수시추시스템 probe 공동 활용에 대한 협의 수행 완료
- 시추 단계에서 시추공의 직진성 및 수직성 평가와 시추공의 물성 및 영상 자료 수집을 위한 시추 probe 개발 현황 분석
- Ellsworth 시추프로그램에서 길이 약 4.5 m, 직경 20 cm 크기의 계측장치와 샘플러를 통합한 프로브를 설계, 현장 배치하였으나 메인 시추공과 cavity (재순환 공동) 연결 불가로 인한 시추 및 프로브 전개 실패

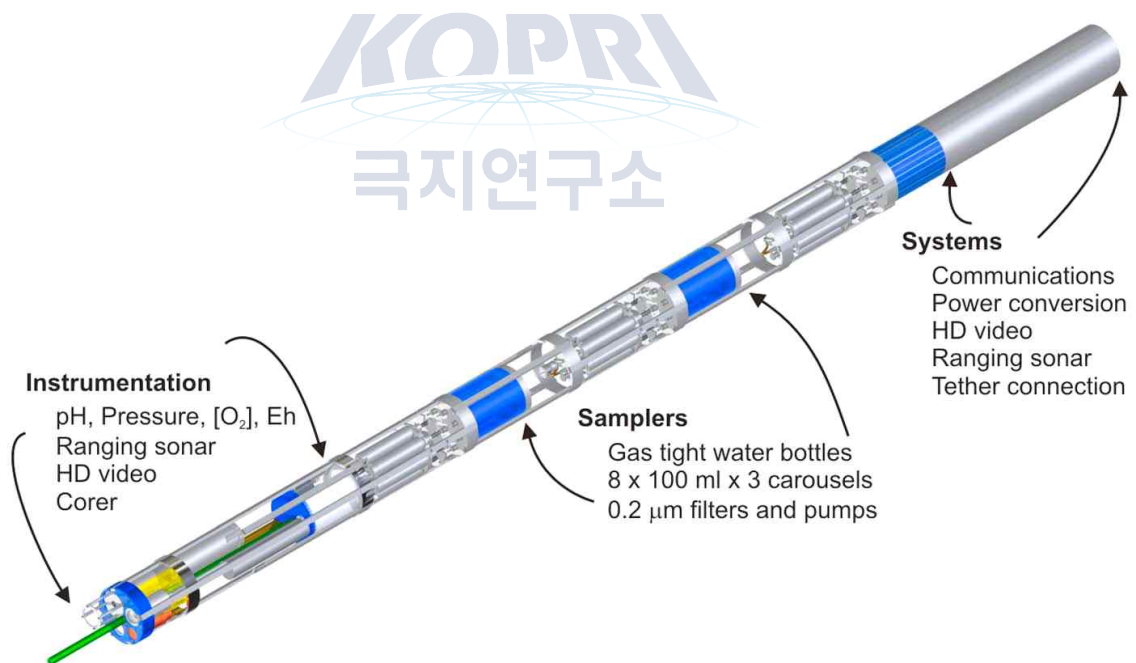


그림 160 Ellsworth 시추프로그램용 프로브 설계도



그림 161 Ellsworth 시추프로그램용 프로브의 현장 배치테스트 사진

- BEAMISH 시추프로그램에서는 시추공의 직진성 보장을 위해 시추 초기 시추공 형성 단계에서의 시추공의 타공 상황을 실시간으로 관찰할 수 있는 카메라 시스템과 시추호스에 결합 또는 독립 운영이 가능한 형태의 프로브로 개선

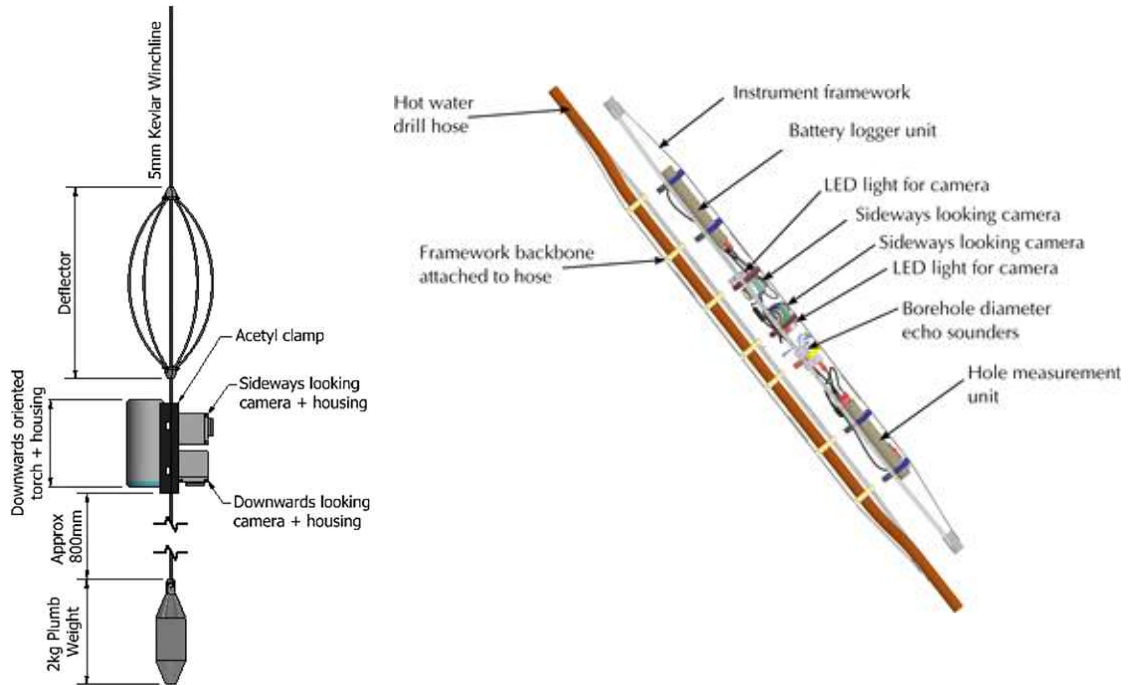


그림 162 BEAMISH 시추프로그램의 카메라(좌) 시스템과 프로브 시스템(우)

- CECs 시추프로그램 취소 후 해당 프로그램을 위해 개발된 BEAMISH 프로브 유닛의 보완 모델의 공동 개선 작업 후 활용 협의
- Ellsworth호 열수시추시스템 활용 협의
- Ellsworth호 시추프로그램 수행 후 영국 BAS에 장기 보관 중인 드릴 호스 및 윈치 컨테이너 모듈의 재활용 방안에 대하여 온라인 매체를 통해 사전 협의 수행



그림 163 영국 BAS Ellsworth호 시추시스템의 드릴 호스 및 윈치 컨테이너 모듈

- '22년 7월, 본 과제의 핵심 참여 인력이 영국 BAS에 방문하여 보관 장비(Ellsworth호의 시추시스템) 상태 상세 점검 후 재활용 협의 수행

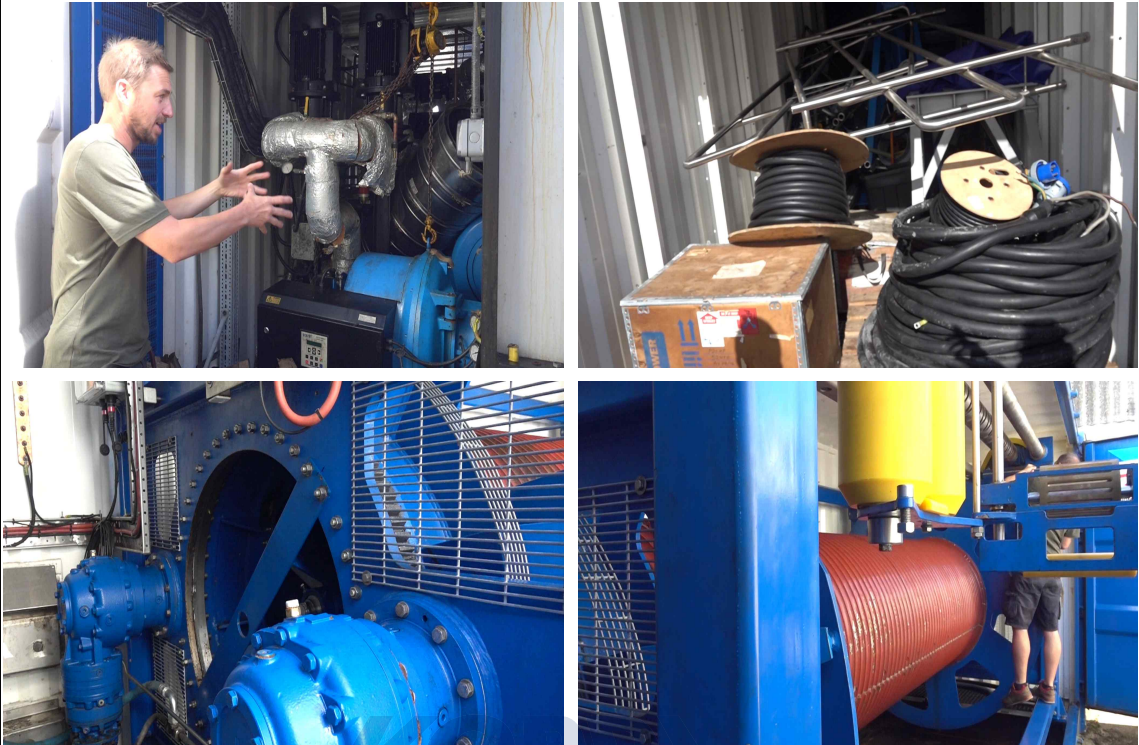


그림 164 영국 보관 중인 Ellsworth호 시추시스템(발전기, umbilical 호스 및 부품, 드릴 호스 및 윈치 컨테이너

- 해당 장비는 현재 작동은 가능한 상태이나 재활용을 위해서는 개보수가 필수적인 상태로, 대형 고중량 부품으로 구성된 유압식 장치의 현장 유지보수 어려움에 따른 전자식 드라이브 시스템으로 개조, 호스 전개&회수 시의 메모리 이펙트 제거, 장력 조절 및 모니터링을 위한 level wind mechanism 수정, 캡스틴 드라이브와 타워 추가, 장기 야적 보관에 따른 시스템 부식 검사 및 청소 등 개보수 및 재활용 여부 현장 논의
- 개보수 후 재활용 시의 예상 소요 비용 및 활용 가치가 신품 제작비 대비 떨어질 것으로 예상되어 해당 장비 비활용 결정 후 전자식 윈치시스템 제작 착수

○ 서남극 SLCECs 프로그램용 청정열수시추 시스템 활용 협의

- COVID-19 지속 상황으로 인한 영-칠레의 서남극 SLCECs 시추프로그램 전면 취소 상황에 ('21년) 따라 해당 프로그램을 위해 개발, 제작된 시추장비 영국에 장기 보관 중
- '22년 7월, BAS 방문 출장을 통해 해당 장비 견학 후 공동 활용 협의 수행
- CECs 시추시스템은 퇴적물 시료 채집용 BEAMISH 열수시추시스템에 청정 프로토콜을 결합한 시스템으로 BEAMISH 장비 개선품과 신규 제작 장비로 구성
- 발전 컨테이너, 청정실 컨테이너, 멸균 컨테이너, 윈치&호스 컨테이너 등 극지연에서 자체적으로 구축하여 보유 중인 이동식 컨테이너 모듈 장비와 영국 CECs 시추시스템의 소형 벌크 모듈의 결합 활용 협의 완료



그림 165 고압순환 모듈



그림 166 보일러 모듈



그림 167 열교환 모듈



그림 168 저압순환 모듈



그림 169 분배(매니폴드) 모듈



그림 170 분전 모듈

3. 빙저호 시추

3-1. 한-영 국제 공동 프로그램 개발

○ 한-영 공동 빙저호 시추 프로그램 개발 재협의, 협약 추진

- COVID-19 팬데믹 상황에 따른 영국-칠레의 서남극 CECs 빙저호 시추 프로그램 전면 취소상황으로 인해 해당 시추 현장연구 참여 불가 결정

- 후속안 도출을 위하여 한-영 공동 빙저호 시추 프로그램 개발을 위한 BAS 방문 재협의

◦ 일자: 2022년 07월 02일 ~ 08 (7일)

◦ 장소: 영국 케임브리지 BAS

◦ 참석인원

• KOPRI : 이종익, 김민철, 강승구, 김홍귀, 박호제, 주현태

• BAS : Anna Jones, Keith Makinson, Paul Anker, Andy Smith, Dominic Hodgson, Julius Rix, David Goodger, Rad Sharma, Alex Brisbourne

◦ 협의내용

• D2 빙저호 탐사 연혁 및 로드맵, 사업 추진 현황 소개

• 2021/22시즌 D2 빙저호 지역 정밀 탄성과 탐사 결과 소개

• D2 빙저호 환경영향평가 예비 결과 소개, 청정열수시추를 위한 클린 프로토콜 수립 전략 토의

• Ellsworth 빙저호 (SLE) 탐사 프로젝트 리뷰: 컨테이너화 시스템의 장단점 및 현장 탐사 실패 교훈

• CECs 빙저호 (SLCECs) 청정열수시추 시스템 소개: SLE, BEAMISH 시스템 대비 개선점, 클린 프로토콜

• 신규 개발 BigRAID 유선 오거(직경 285mm) 테스트 결과 및 시추 프로젝트 적용 계획 (300m 파일럿 홀 시추) 토의

• CECs 빙저호 (SLCECs) 샘플러(호수물 채집기, 퇴적물 코어러 등), 로거(시추공 측정 시스템 등), 모니터링 시스템 개발 현황 소개

• CECs 시추시스템 중 신규 준비 장비(발전기, 보일러, 고압펌프, 저압펌프, 분전반, heat exchange, 멸균시스템) 견학 및 공동 활용 협의

• 열수시추시스템 공동 개발(활용) 협의: KOPRI 시추시스템 개발 우선 순위 및 영국 현지 제작 장비의 검수 및 교육훈련 협조 논의

• 한-영 공동 빙저호 시추 프로그램 개발 협의: CECs 프로그램 취소에 따른 BAS의 향후 빙저호 시추탐사 계획, 한-영 데이비드 빙원 빙저호(D2) 공동 시추(안), 상호 지속 협조(교류) 가능한 빙저호 시추 전문 인력 양성 논의 등



그림 171 빙저호 과제 현황 소개

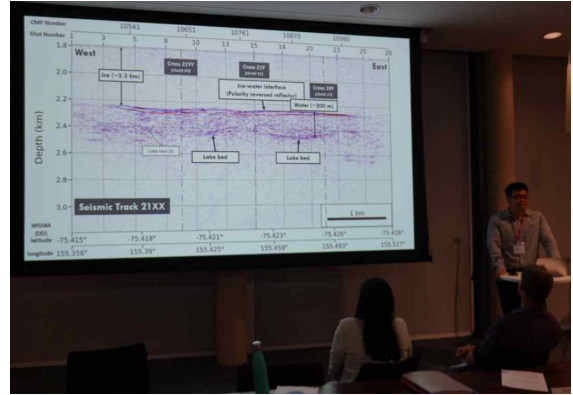


그림 172 D2 빙저호 탄성파탐사 결과 소개



그림 173 BAS 빙저호 프로그램 소개



그림 174 BAS 열수시추시스템 소개



그림 175 BAS 장비 개발 현황 파악



그림 176 SLE 시추장비 점검



그림 177 CECs 시추장비 견학



그림 178 한-영 공동 빙저호 시추 프로그램 개발 협의

◦ 도출 결과

- COVID-19로 인한 남극 활동 제한, 물류 및 펀드 등의 문제로 칠레와의 CECs 프로그램이 전면 취소된 이후, 영국 BAS 대다수의 시추 연구자 및 엔지니어는 신규 도입 선박 RRS ‘Sir David Attenborough’의 운영 준비에 투입돼 있으며 향후 프로그램의 재개 가능성은 희박한 것으로 확인
- 극지연의 SLCECs 빙저호 시추장비를 활용한 데이비드 빙원 빙저호(D2) 공동 시추 프로그램 개발 제안에 대하여 영국의 참여 의사를 확인하였으며, 차년도 양 기관 간 세부사항 협의 후 신규 시추 프로그램 협약 추진 합의

3-2. 데이비드 빙하 빙저호 지역 환경특성 조사 보고

○ 빙저호 시추 후보지역 눈시료 확보

- 초기 환경 특성 조사를 위한 눈시료 샘플링 위치 지정함
- 연구활동이 시작되기전 연구지역의 환경 특성을 파악하기 위하여 빙저호 시추 후보지 탄성과 탐사가 수행되기 전 탐사 측선을 따라 눈시료 채취함
- 연구활동을 위해 연구원이 생활하는 베이스 캠프 주변의 환경특성을 파악하기 위해 연구원의 활동반경 내에서 눈시료 채취함
- 확보된 눈시료는 장보고 과학기지에서 전처리 진행한 뒤 연구소로 분석 진행함

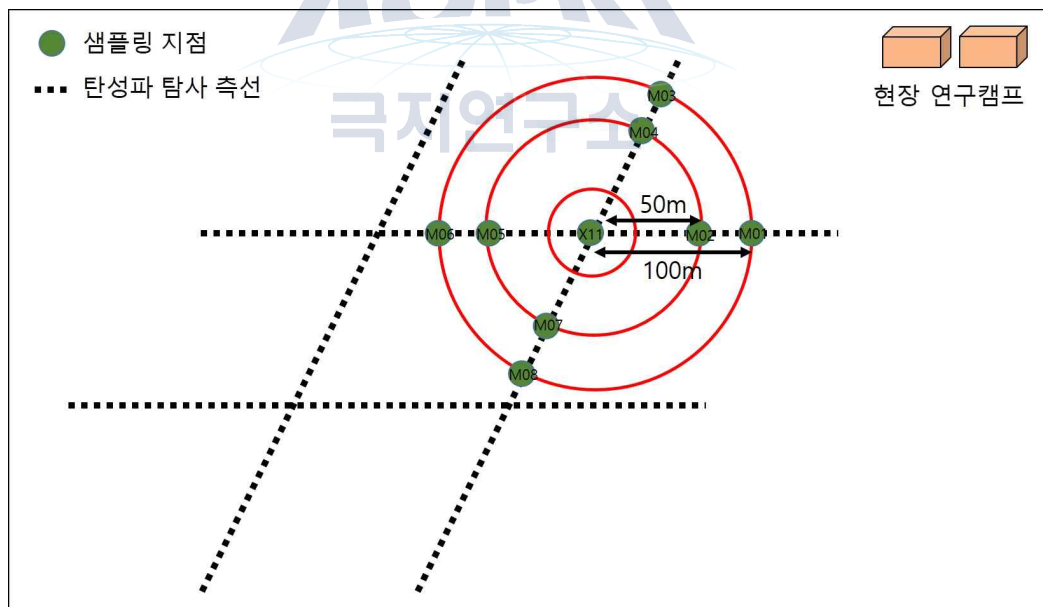


그림 179 빙저호 시추 후보지 샘플링 지점



샘플링 지역		샘플 타입	시료 수	비고
1	D2	snow	8	빙저호 시추 후보지 환경 특성 분석용- M1
2	D2	snow	8	빙저호 시추 후보지 환경 특성 분석용- M2
3	D2	snow	8	빙저호 시추 후보지 환경 특성 분석용- M3
4	D2	snow	8	빙저호 시추 후보지 환경 특성 분석용- M4
5	D2	snow	8	빙저호 시추 후보지 환경 특성 분석용- M5
6	D2	snow	8	빙저호 시추 후보지 환경 특성 분석용- M6
7	D2	snow	8	빙저호 시추 후보지 환경 특성 분석용- M7
8	D2	snow	8	빙저호 시추 후보지 환경 특성 분석용- M8
9	D2	snow	8	빙저호 시추 후보지 환경 특성 분석용- X11
10	D2	snow	4	연구활동 환경영향 분석용-1-1
11	D2	snow	4	연구활동 환경영향 분석용-2-1
12	D2	snow	4	연구활동 환경영향 분석용-3-1
13	D2	snow	4	연구활동 환경영향 분석용-4-1
14	D2	snow	4	연구활동 환경영향 분석용-5-1
15	D2	snow	4	연구활동 환경영향 분석용-1-2
16	D2	snow	4	연구활동 환경영향 분석용-2-2
17	D2	snow	4	연구활동 환경영향 분석용-3-2
18	D2	snow	4	연구활동 환경영향 분석용-4-2
19	D2	snow	4	연구활동 환경영향 분석용-5-2

< 눈시료 샘플링 및 시료 목록 >

○ 연구지역 (D2) 이화학적 특성 분석

- 초기 환경 특성 조사를 위해 IC (Ion Chromatography)를 사용하여 이화학적 특성을 분석함
- 분석결과, 빙저호 시추 후보지역의 pH는 평균 5.77로 타나났으며 전기전도도 (EC)는 평균 4.449로 나타남
- 눈시료 내 음이온은 Chloride, Nitrate, Sulfate가 주로 나타났고 양이온은 Sodium, Ammonium, Potassium, Magnesium이 주로 나타났음
- 연구 베이스 캠프 주변 눈시료 분석결과, pH나 전기전도도는 비슷한 양상을 보였으나 검출된 대부분의 이온 농도가 시추후보지 보다 높게 나타나는 경향을 보임
- 특히 Sulfate, Sodium, Ammonium, Phosphate 등이 높게 나타난 것은 연구자들의 활동에 의한 것으로 사료됨
- 이러한 분석 결과는 빙저호 시추 현장연구 활동시, 베이스 캠프는 반드시 연구지역과 떨어진 곳에 설치해야 하며 인간활동에 의한 오염을 최대한 줄이고 연구자가 연구지역을 탐사하기 전 오염물질을 옮기지 않도록 각별한 주의가 필요하다고 사료됨

No.	sampleID	pH	EC	Fluoride	Chloride	Nitrite	Bromide	Nitrate	Phosphate	Sulfate
1	M01-1	6.04	5.303	n.a.	0.24405559	n.a.	n.a.	0.102743543	n.a.	0.042625519
2	M01-2	5.81	4.062	n.a.	0.233427183	n.a.	n.a.	0.105963891	n.a.	0.044301126
3	M01-3	5.62	5.221	n.a.	0.194175168	n.a.	0.023642924	0.105282259	n.a.	0.042123466
4	M02-1	5.86	4.208	n.a.	0.209749867	n.a.	n.a.	0.062084008	n.a.	0.037469576
5	M02-2	5.85	3.845	n.a.	0.210391966	n.a.	n.a.	0.060762736	n.a.	0.039707086
6	M02-3	5.73	4.012	n.a.	0.210520902	n.a.	n.a.	0.057384446	n.a.	0.038010561
7	M03-1	5.97	3.023	n.a.	0.226532757	n.a.	n.a.	0.052109135	n.a.	0.030393464
8	M03-2	5.61	3.065	n.a.	0.222832449	n.a.	n.a.	0.048755971	n.a.	0.030008774
9	M03-3	5.85	4.213	n.a.	0.226085625	n.a.	n.a.	0.046285741	n.a.	0.030462811
10	M04-1	5.74	5.325	n.a.	0.296271602	n.a.	n.a.	0.073070909	n.a.	0.029486285
11	M04-2	5.49	5.641	n.a.	0.295505033	n.a.	n.a.	0.076133896	n.a.	0.032161646
12	M04-3	5.84	4.652	n.a.	0.280863635	n.a.	n.a.	0.072358694	n.a.	0.035626009
13	M05-1	5.65	3.847	n.a.	0.211756129	n.a.	n.a.	0.176240951	n.a.	0.033592301
14	M05-2	5.81	4.125	n.a.	0.251614914	n.a.	n.a.	0.172815759	n.a.	0.032453729
15	M05-3	5.97	4.687	n.a.	0.251415932	n.a.	n.a.	0.165423909	n.a.	0.038932367
16	M06-1	5.82	5.002	n.a.	0.326855931	n.a.	n.a.	0.041118841	n.a.	0.051976555
17	M06-2	5.77	5.641	n.a.	0.32740947	n.a.	n.a.	0.042305396	n.a.	0.057674342
18	M06-3	5.7	4.845	n.a.	0.319395637	n.a.	n.a.	0.043543016	n.a.	0.059455937
19	M07-1	5.86	5.555	n.a.	0.2453816	n.a.	n.a.	0.073049408	n.a.	0.043567475
20	M07-2	5.22	5.678	0.001288674	0.23866899	n.a.	n.a.	0.075711359	n.a.	0.043076089
21	M07-3	5.61	5.967	0.001199091	0.238974754	n.a.	n.a.	0.068394086	n.a.	0.046066545
22	M08-1	5.89	3.078	n.a.	0.215754446	n.a.	n.a.	0.072701455	n.a.	0.038374635
23	M08-2	5.57	3.659	n.a.	0.177920255	n.a.	0.025169775	0.073058158	n.a.	0.036944442
24	M08-3	5.85	4.068	n.a.	0.218885808	n.a.	n.a.	0.079928539	n.a.	0.033149006
25	X11-1-1	5.99	5.928	n.a.	0.21251926	n.a.	n.a.	0.081189146	n.a.	0.033196343
26	X11-1-2	5.74	6.238	n.a.	0.206792926	n.a.	n.a.	0.076077985	n.a.	0.029210714
27	X11-1-3	5.65	5.684	n.a.	0.210205709	n.a.	n.a.	0.07579539	n.a.	0.027555082
28	X11-2-1	6.05	3.745	n.a.	0.224836862	n.a.	n.a.	0.126081846	n.a.	0.042245955
29	X11-2-2	5.82	3.658	n.a.	0.227885319	n.a.	n.a.	0.125034419	n.a.	0.045924195
30	X11-2-3	5.7	4.254	n.a.	0.225012102	n.a.	n.a.	0.119665642	n.a.	0.039824826
31	X11-3-1	6.13	2.258	n.a.	0.211829766	n.a.	n.a.	0.050235343	n.a.	0.030035345
32	X11-3-2	5.62	2.685	n.a.	0.206549347	n.a.	n.a.	0.048355957	n.a.	0.030412836
33	X11-3-3	5.62	3.658	n.a.	0.163863234	n.a.	0.030650275	0.051496233	n.a.	0.030004892
34	리빙 카라반 주변1-1	5.83	6.841	n.a.	0.466987961	n.a.	0.027911403	0.139742145	n.a.	0.451217927
35	리빙 카라반 주변1-2	5.87	10.89	n.a.	0.496031033	n.a.	n.a.	0.147248108	n.a.	0.448850617
36	리빙 카라반 주변1-3	5.62	9.38	n.a.	0.413194696	0.03560064	n.a.	0.133750641	n.a.	0.448982113
37	리빙 카라반 주변2-1	6.05	7.952	n.a.	0.481536061	n.a.	n.a.	0.164626339	0.13016268	0.263966451
38	리빙 카라반 주변2-2	5.88	12.1	n.a.	0.480608968	n.a.	n.a.	0.160888902	0.121449283	0.260111187
39	리빙 카라반 주변2-3	5.39	12.51	n.a.	0.479265463	n.a.	0.026815704	0.162922944	0.139464251	0.253379286
40	발전 카라반 주변1-1	5.41	15.92	n.a.	1.320306618	n.a.	n.a.	0.759381321	n.a.	1.424740385
41	발전 카라반 주변1-2	5.66	18.89	n.a.	1.320984474	n.a.	n.a.	0.75878152	n.a.	1.428750889
42	발전 카라반 주변1-3	5.14	23.21	n.a.	1.317102003	n.a.	0.024801577	0.750420389	0.078815469	1.423137894
43	발전 카라반 주변2-1	5.99	17.46	n.a.	1.171049555	0.036876595	0.024490381	1.12736956	0.157658962	1.200196356
44	발전 카라반 주변2-2	6.25	21.13	n.a.	1.211200672	n.a.	0.026172391	1.124328713	0.157277211	1.193209341
45	발전 카라반 주변2-3	6.01	10.52	n.a.	1.172154965	0.036431758	n.a.	1.116221874	0.159679808	1.194761705
46	주유구 주변1-1	5.62	18.98	n.a.	1.355142661	n.a.	n.a.	0.174296317	0.139093284	1.692053222
47	주유구 주변1-2	5.97	18.3	n.a.	1.356655852	n.a.	n.a.	0.150531024	0.141656529	1.572181034
48	주유구 주변1-3	5.81	17.21	n.a.	1.35238526	n.a.	0.020004308	0.106653853	0.16195132	1.478358268
49	주유구 주변2-1	5.61	10.89	n.a.	1.726269151	n.a.	n.a.	0.22655905	n.a.	1.367991738
50	주유구 주변2-2	6.05	15.65	n.a.	1.767436488	n.a.	n.a.	0.115838123	n.a.	1.048285648
51	주유구 주변2-3	5.62	10.06	n.a.	1.767378653	0.033352452	n.a.	0.114960042	n.a.	1.133434771
52	샤워룸 배수구 주변1-1	5.62	39.21	n.a.	1.206986972	n.a.	n.a.	1.745526622	n.a.	2.359389836
53	샤워룸 배수구 주변1-2	5.57	22.12	n.a.	1.27814782	n.a.	0.031249872	1.695270377	n.a.	2.39484232
54	샤워룸 배수구 주변1-3	5.5	30.21	n.a.	1.33406322	n.a.	n.a.	1.741075423	0.159304087	2.966131994
55	샤워룸 배수구 주변2-1	5.73	28.32	n.a.	1.558812128	0.03762213	n.a.	1.230065503	0.176192403	2.898329898
56	샤워룸 배수구 주변2-2	5.61	18.85	n.a.	1.658520599	n.a.	n.a.	1.072965332	0.170925368	2.873282624
57	샤워룸 배수구 주변2-3	5.84	22.35	n.a.	1.668387343	n.a.	n.a.	1.117956898	0.169611338	2.097066379
58	소변구역 도보 주변1-1	5.81	17.84	n.a.	1.736066491	0.203901499	n.a.	1.81867527	n.a.	1.726269151
59	소변구역 도보 주변1-2	5.82	18.89	n.a.	1.825364565	n.a.	0.039505855	1.803732616	n.a.	1.767436488
60	소변구역 도보 주변1-3	5.45	19.12	n.a.	1.755325726	n.a.	n.a.	1.767726356	n.a.	1.767378653
61	소변구역 도보 주변2-1	5.63	21.13	n.a.	1.378110767	n.a.	n.a.	1.789472298	0.181582974	1.558812128
62	소변구역 도보 주변2-2	5.61	18.98	n.a.	1.455945837	0.053446926	0.037794656	1.711430141	0.164651331	1.658520599
63	소변구역 도보 주변2-3	5.74	28.98	n.a.	1.454985767	n.a.	n.a.	1.708816003	0.16195132	1.668387343

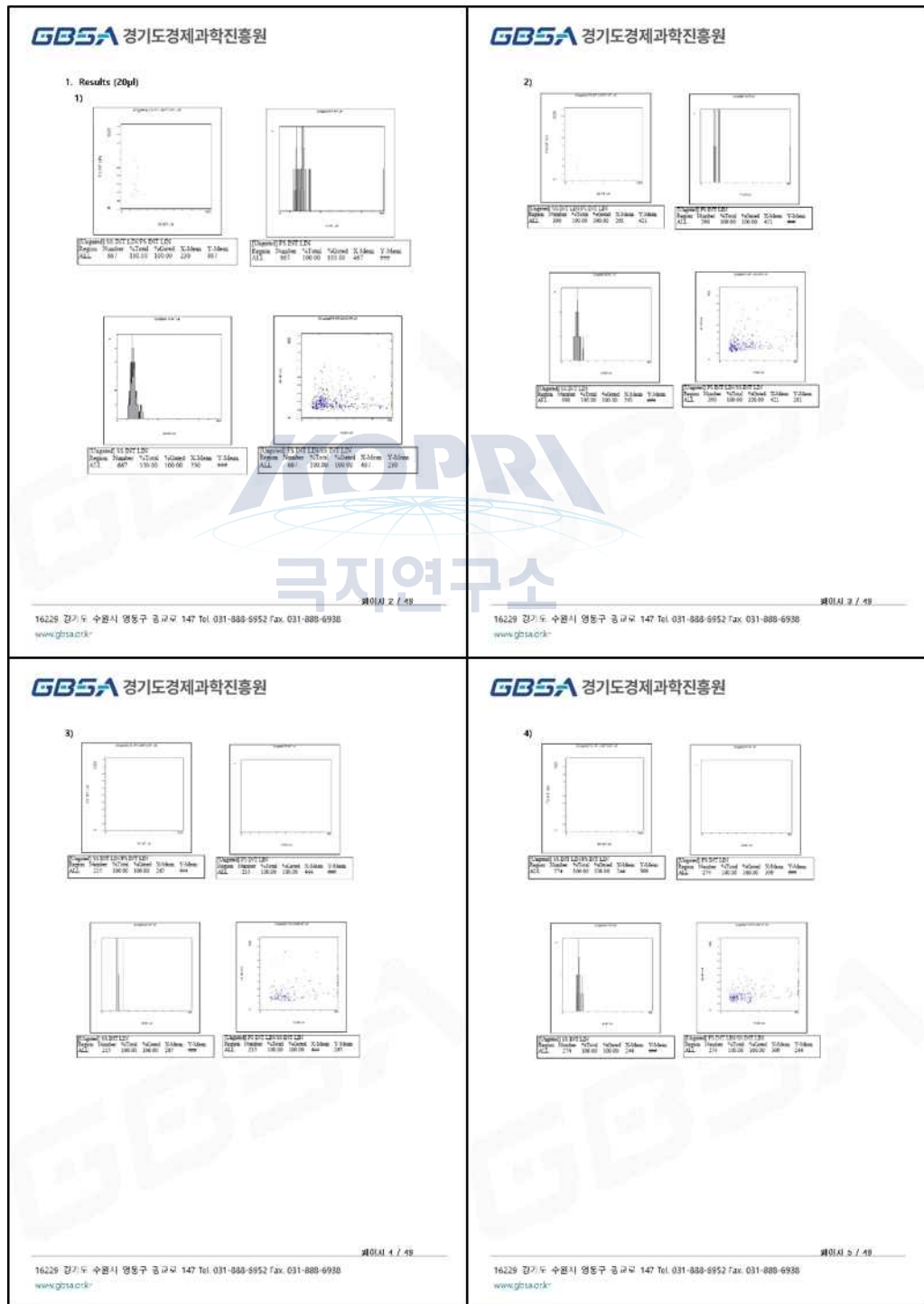
< 눈시료 이화학적 특성 분석 결과-1 >

No.	sampleID	Lithium	Sodium	Ammonium	Potassium	Magnesium	Calcium
1	M01-1	n.a.	0.184951583	0.018360328	0.069957751	0.003004395	n.a.
2	M01-2	n.a.	0.186055614	0.018691308	0.070488606	0.003175531	n.a.
3	M01-3	n.a.	0.181582974	0.018998672	0.069713049	0.003070696	n.a.
4	M02-1	n.a.	0.102544424	0.02173405	0.068322419	0.003113697	n.a.
5	M02-2	n.a.	0.102193767	0.020985845	0.068591558	0.003021591	n.a.
6	M02-3	n.a.	0.100401345	0.021057539	0.069478726	0.003085514	n.a.
7	M03-1	n.a.	0.164542592	0.021994461	0.067912852	0.001523405	n.a.
8	M03-2	n.a.	0.164651331	0.021923441	0.068460656	0.001442293	n.a.
9	M03-3	n.a.	0.167279868	0.02217692	0.06821602	0.000874265	0.013716
10	M04-1	n.a.	0.120022579	0.023152999	0.070488606	0.003647452	n.a.
11	M04-2	n.a.	0.117449177	0.023265258	0.069713049	0.003716033	n.a.
12	M04-3	n.a.	0.118413965	0.023287412	0.069478726	0.003856486	n.a.
13	M05-1	n.a.	0.118508073	0.023067363	0.068460656	0.001836932	n.a.
14	M05-2	n.a.	0.123863865	0.023233914	0.077037599	0.001834487	n.a.
15	M05-3	n.a.	0.124421623	0.023314238	0.078231525	0.001825959	n.a.
16	M06-1	n.a.	0.139093284	0.018262278	0.071859901	0.00527513	n.a.
17	M06-2	n.a.	0.144825956	0.018280522	0.072877599	0.005260554	n.a.
18	M06-3	n.a.	0.141656529	0.019160674	0.071294557	0.005341612	n.a.
19	M07-1	n.a.	0.162696038	0.024446973	0.084970279	0.00530003	n.a.
20	M07-2	n.a.	0.16195132	0.024661123	0.08544926	0.005243212	n.a.
21	M07-3	n.a.	0.159304087	0.024465285	0.084764095	0.005066918	n.a.
22	M08-1	n.a.	0.126957304	0.024074382	0.077037599	0.001708426	n.a.
23	M08-2	n.a.	0.126185409	0.023717383	0.077623526	0.001499156	n.a.
24	M08-3	n.a.	0.126447645	0.023738232	0.078231525	0.001287419	n.a.
25	X11-1-1	n.a.	0.181040203	0.026507442	0.072790491	0.002115312	n.a.
26	X11-1-2	n.a.	0.176192403	0.026532407	0.071859901	0.002029518	n.a.
27	X11-1-3	n.a.	0.186826889	0.025977037	0.071294557	0.001850453	n.a.
28	X11-2-1	n.a.	0.172642753	0.017789803	0.072110756	0.002469291	0.026441
29	X11-2-2	n.a.	0.170925368	0.017860028	0.073395206	0.002303793	n.a.
30	X11-2-3	n.a.	0.169611338	0.018055731	0.072877599	0.002275402	n.a.
31	X11-3-1	n.a.	0.23887349	0.012009203	0.061459748	0.003457171	n.a.
32	X11-3-2	n.a.	0.237298751	0.012954677	0.061303445	0.003162158	n.a.
33	X11-3-3	n.a.	0.242251233	0.012047633	0.061841373	0.003227364	n.a.
34	리빙 카라반 주변1-1	n.a.	0.405361183	0.007081074	0.124777155	0.031263884	0.112244
35	리빙 카라반 주변1-2	n.a.	0.404280669	0.006655551	0.127899553	0.031622368	0.119052
36	리빙 카라반 주변1-3	n.a.	0.401050266	0.007489758	0.125615667	0.031339572	0.091285
37	리빙 카라반 주변2-1	0.000377956	0.278051417	0.028701895	0.417193852	0.091288323	0.409156
38	리빙 카라반 주변2-2	0.000380012	0.279761355	0.030210476	0.417073023	0.091600295	0.434366
39	리빙 카라반 주변2-3	0.000374492	0.279056526	0.029357965	0.417287178	0.091019783	0.395434
40	발전 카라반 주변1-1	n.a.	1.200409162	0.032754895	0.304819044	0.088487724	0.162748
41	발전 카라반 주변1-2	n.a.	1.202765629	0.032808689	0.305075133	0.087976314	0.12175
42	발전 카라반 주변1-3	n.a.	1.19656846	0.032939691	0.304525292	0.088083846	0.145896
43	발전 카라반 주변2-1	0.000150717	1.27532883	0.115223856	0.704703939	0.116905473	0.661753
44	발전 카라반 주변2-2	0.00014694	1.273278356	0.115812767	0.703387344	0.116831111	0.627073
45	발전 카라반 주변2-3	0.000153547	1.271502322	0.115823886	0.704168244	0.116651557	0.622371
46	주유구 주변1-1	n.a.	0.780061798	0.052155336	0.538223055	0.080455893	0.361906
47	주유구 주변1-2	n.a.	0.539858577	0.023152999	0.522723131	0.081764782	0.411957
48	주유구 주변1-3	n.a.	0.454705547	0.023265258	0.521948134	0.081262223	0.366324
49	주유구 주변2-1	0.001024902	0.621458165	0.023287412	0.643321799	0.07521631	0.345619
50	주유구 주변2-2	n.a.	0.444879517	0.03572548	0.664119459	0.075877581	0.332953
51	주유구 주변2-3	0.000176054	0.430723993	0.035927394	0.653766897	0.072782664	0.340738
52	샤워룸 배수구 주변1-1	n.a.	1.558812128	0.198959425	1.558812128	0.542358543	1.745527
53	샤워룸 배수구 주변1-2	0.000185243	1.658520599	0.197508217	1.658520599	0.521751789	1.69527
54	샤워룸 배수구 주변1-3	n.a.	1.668387343	0.199347661	1.668387343	0.504252761	1.741075
55	샤워룸 배수구 주변2-1	0.000252435	2.600673113	0.176240951	1.736066491	0.250090673	1.230066
56	샤워룸 배수구 주변2-2	0.00042592	2.749345152	0.172815759	1.825364565	0.247538527	1.072965
57	샤워룸 배수구 주변2-3	0.000410761	2.665587723	0.165423909	1.755325726	0.245778387	1.117957
58	소변구역 도보 주변1-1	n.a.	0.080011185	0.037220846	0.7611629	0.081674199	0.574671
59	소변구역 도보 주변1-2	n.a.	0.079539611	0.023067363	0.76253173	0.07971568	0.594092
60	소변구역 도보 주변1-3	n.a.	0.079848932	0.023233914	0.768853656	0.079148989	0.574463
61	소변구역 도보 주변2-1	0.001031478	0.05165549	0.023314238	0.877925183	0.07872478	0.538223
62	소변구역 도보 주변2-2	n.a.	0.051396004	0.03425807	0.70014648	0.078096018	0.522723
63	소변구역 도보 주변2-3	0.000150656	0.053779663	0.0344173	0.606589444	0.082416313	0.521948

< 눈시료 이화학적 특성 분석 결과-2 >

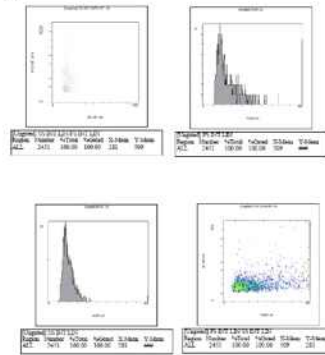
○ 연구지역 눈시료 유세포 분석

- 유세포 분석을 통해 눈시료 내 파티클 수 측정함
- 유세포 분석 결과, 빙저호 시추 후보지에서는 약 20개/ul 의 파티클이 발견되는 반면, 연구 베이스캠프 주변의 눈시료에서는 약 130개/ul 의 파티클이 존재하는 것으로 나타났음
- 이러한 분석 결과는 베이스 캠프의 연구활동이 빙저호 시추 후보지에 영향을 줄수 있음을 보여주며 이에 따라 베이스캠프는 바람의 방향을 고려하여 시추 후보지에서 떨어진 곳에 구축되어야 함



< 유세포 분석 결과-1 >

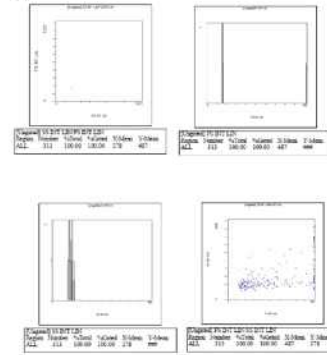
9)



페이지 10 / 49

16229 경기도 수원시 영통구 공과국 147 Tel. 031-888-6952 Fax. 031-888-6938
www.gbsa.or.kr

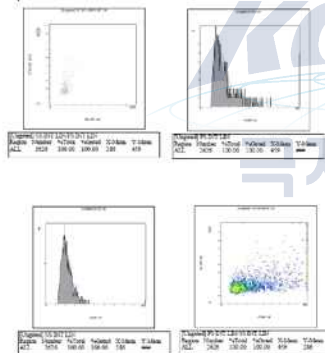
10)



페이지 11 / 49

16229 경기도 수원시 영통구 공과국 147 Tel. 031-888-6952 Fax. 031-888-6938
www.gbsa.or.kr

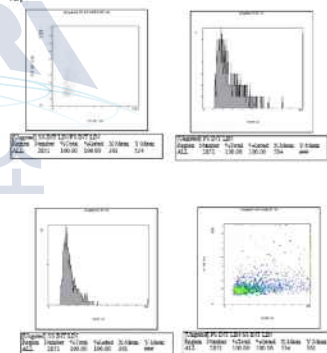
11)



페이지 12 / 49

16229 경기도 수원시 영통구 공과국 147 Tel. 031-888-6952 Fax. 031-888-6938
www.gbsa.or.kr

12)



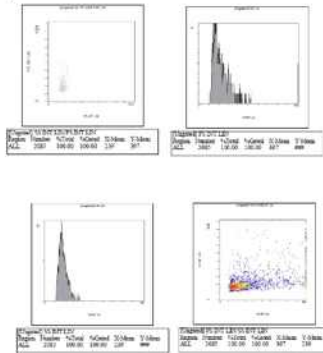
페이지 13 / 49

16229 경기도 수원시 영통구 공과국 147 Tel. 031-888-6952 Fax. 031-888-6938
www.gbsa.or.kr

< 유세포 분석 결과-3 >

2. Results (100µl)

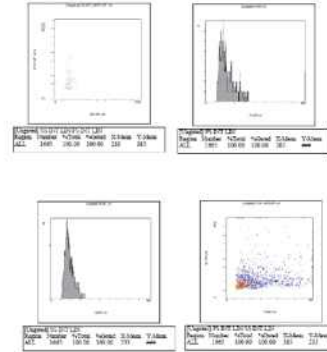
1)



페이지 14 / 48

16229 경기도 수원시 영통구 교과로 147 Tel. 031-888-6952 Fax. 031-888-6938
www.gbsa.or.kr

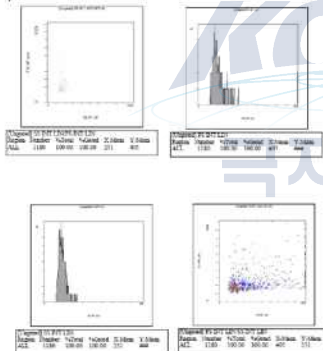
2)



페이지 15 / 48

16229 경기도 수원시 영통구 교과로 147 Tel. 031-888-6952 Fax. 031-888-6938
www.gbsa.or.kr

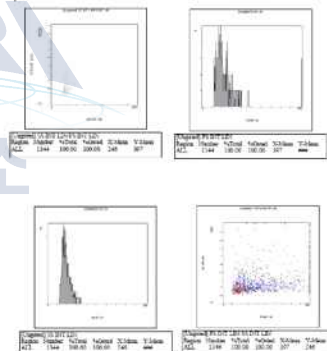
3)



페이지 16 / 48

16229 경기도 수원시 영통구 교과로 147 Tel. 031-888-6952 Fax. 031-888-6938
www.gbsa.or.kr

4)

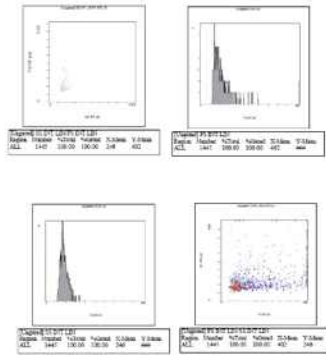


페이지 17 / 48

16229 경기도 수원시 영통구 교과로 147 Tel. 031-888-6952 Fax. 031-888-6938
www.gbsa.or.kr

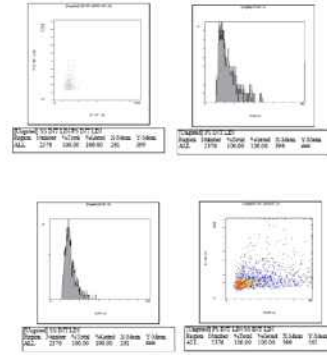
< 유세포 분석 결과-4 >

5)



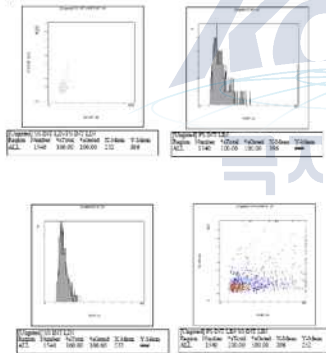
페이지 18 / 49

6)



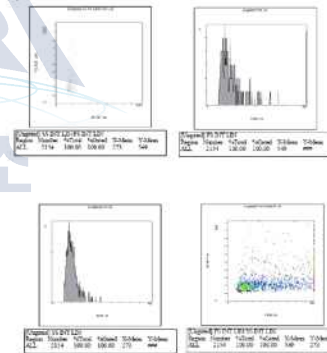
페이지 19 / 49

7)



페이지 20 / 49

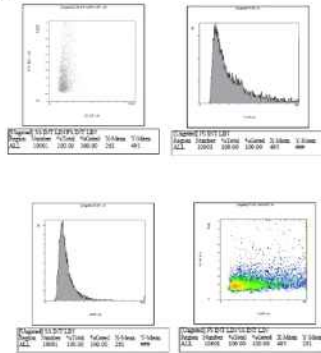
8)



페이지 21 / 49

< 유세포 분석 결과-5 >

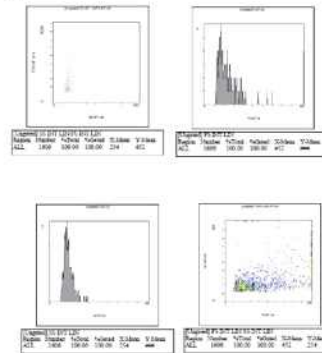
9)



페이지 22 / 49

16229 경기도 수원시 영통구 교과목 147 Tel: 031-888-6952 Fax: 031-888-6938
www.gbsa.or.kr

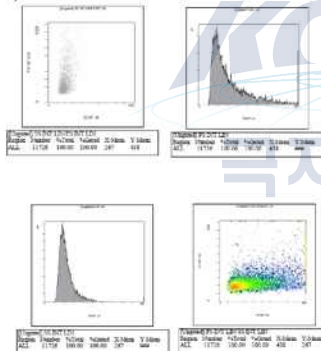
10)



페이지 23 / 49

16229 경기도 수원시 영통구 교과목 147 Tel: 031-888-6952 Fax: 031-888-6938
www.gbsa.or.kr

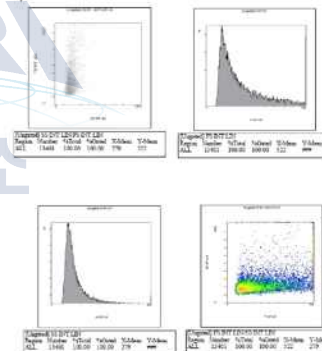
11)



페이지 24 / 49

16229 경기도 수원시 영통구 교과목 147 Tel: 031-888-6952 Fax: 031-888-6938
www.gbsa.or.kr

12)



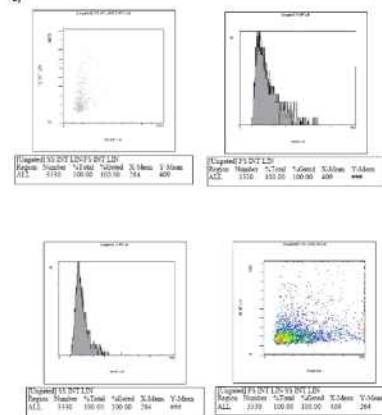
페이지 25 / 49

16229 경기도 수원시 영통구 교과목 147 Tel: 031-888-6952 Fax: 031-888-6938
www.gbsa.or.kr

< 유세포 분석 결과-6 >

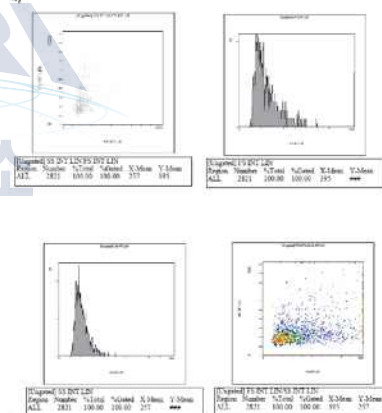
2)

200

[illegible]

16229 경기도 수원시 영통구 공곡로 147 Tel. 031-888-6952 Fax. 031-888-6938
www.gnsa.or.kr

41

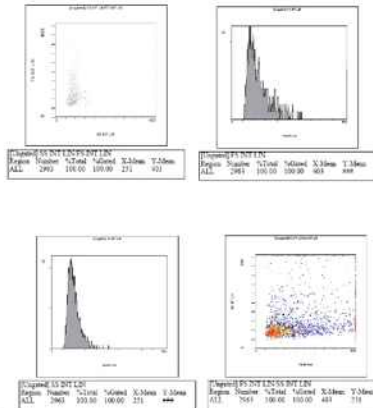


페이지 25 / 43

16229 경기도 수원시 영통구 공곡로 147 Tel. 031-880-6952 Fax. 031-880-6938
www.gdsad.or.kr

〈 유세포 분석 결과-7 〉

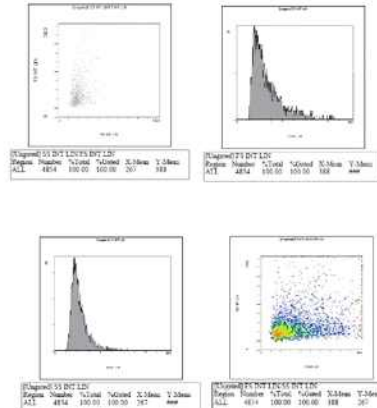
5)



페이지 30 / 49

16229 경기도 수원시 영통구 공과국 147 Tel: 031-888-8952 Fax: 031-888-6938
www.gbsa.or.kr

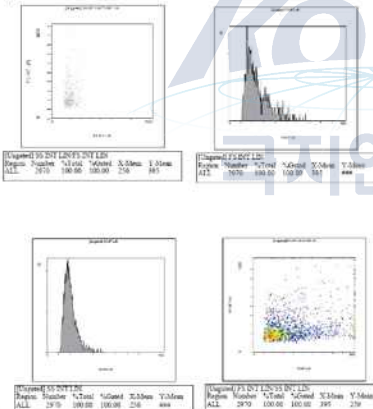
5)



페이지 31 / 49

16229 경기도 수원시 영통구 공과국 147 Tel: 031-888-8952 Fax: 031-888-6938
www.gbsa.or.kr

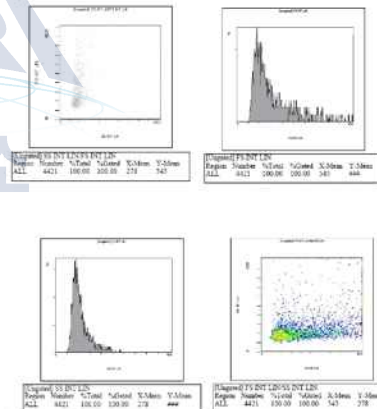
7)



페이지 32 / 49

16229 경기도 수원시 영통구 공과국 147 Tel: 031-888-8952 Fax: 031-888-6938
www.gbsa.or.kr

8)

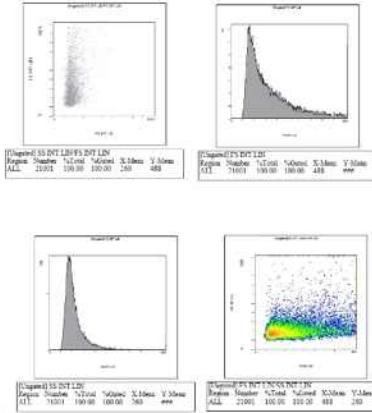


페이지 33 / 49

16229 경기도 수원시 영통구 공과국 147 Tel: 031-888-8952 Fax: 031-888-6938
www.gbsa.or.kr

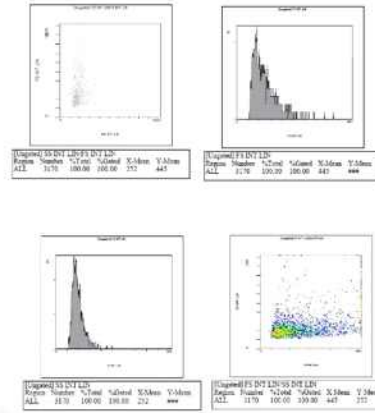
< 유세포 분석 결과-8 >

9)



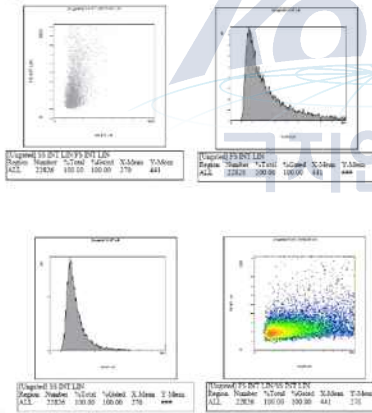
16229 경기도 수원시 영통구 공과국 147 Tel. 031-888-6952 Fax. 031-888-6938
www.gbsa.or.kr

10)



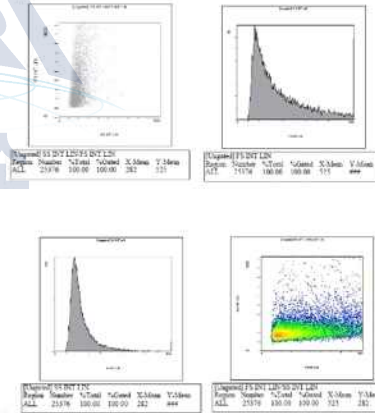
16229 경기도 수원시 영통구 공과국 147 Tel. 031-888-6952 Fax. 031-888-6938
www.gbsa.or.kr

11)



16229 경기도 수원시 영통구 공과국 147 Tel. 031-888-6952 Fax. 031-888-6938
www.gbsa.or.kr

12)

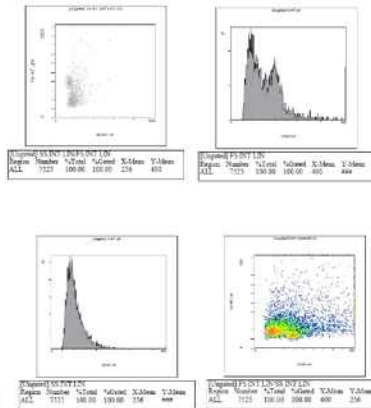


16229 경기도 수원시 영통구 공과국 147 Tel. 031-888-6952 Fax. 031-888-6938
www.gbsa.or.kr

< 유세포 분석 결과-9 >

4. Results(300p/l)

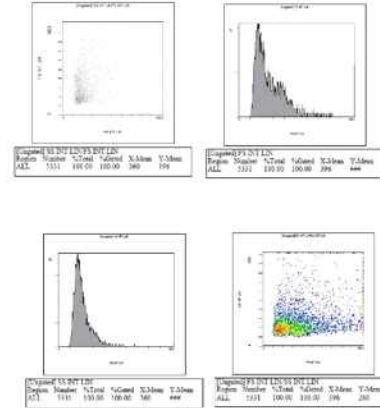
1)



페이지 39 / 49

16229 경기도 수원시 영통구 공곡로 147 Tel. 031-880-6952 Fax. 031-880-6938
www.gbsa.or.kr

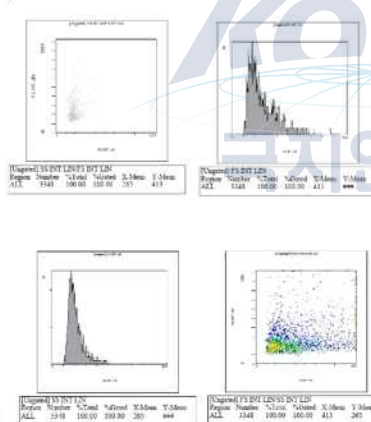
2)



페이지 39 / 49

16229 경기도 수원시 영통구 공곡로 147 Tel. 031-880-6952 Fax. 031-880-6938
www.gbsa.or.kr

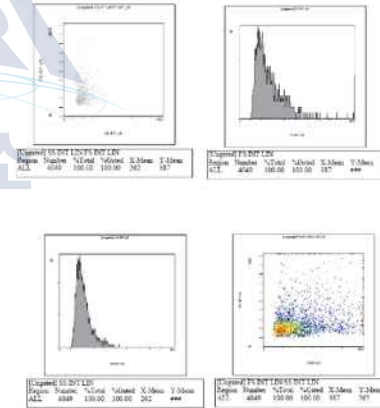
3)



페이지 40 / 49

16229 경기도 수원시 영통구 공곡로 147 Tel. 031-880-6952 Fax. 031-880-6938
www.gbsa.or.kr

4)

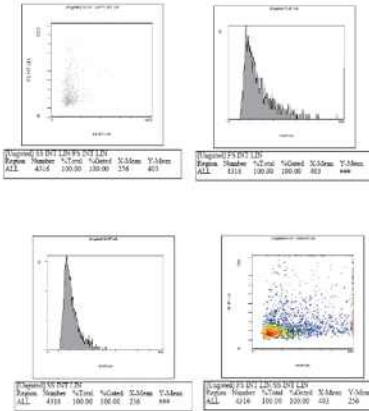


페이지 41 / 49

16229 경기도 수원시 영통구 공곡로 147 Tel. 031-880-6952 Fax. 031-880-6938
www.gbsa.or.kr

< 유세포 분석 결과-10 >

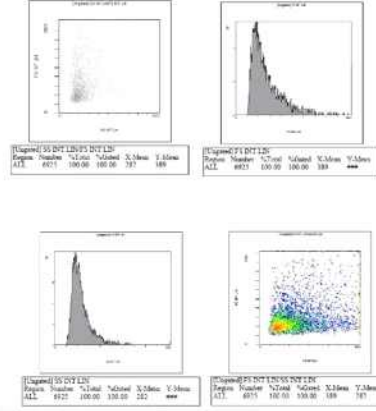
5)



페이지 42 / 49

16229 경기도 수원시 영통구 공곡로 147 Tel. 031-888-6952 Fax. 031-888-6938
www.gbsa.or.kr

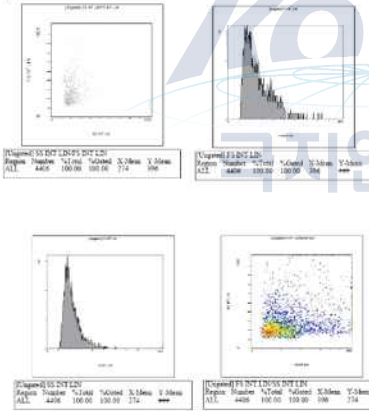
6)



페이지 42 / 49

16229 경기도 수원시 영통구 공곡로 147 Tel. 031-888-6952 Fax. 031-888-6938
www.gbsa.or.kr

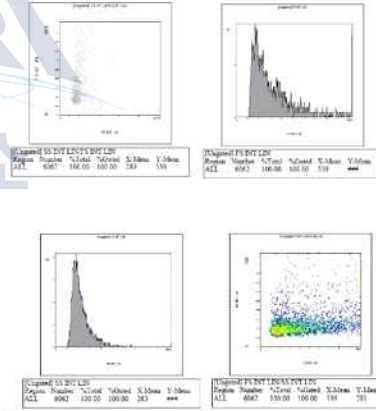
7)



페이지 43 / 49

16229 경기도 수원시 영통구 공곡로 147 Tel. 031-888-6952 Fax. 031-888-6938
www.gbsa.or.kr

8)

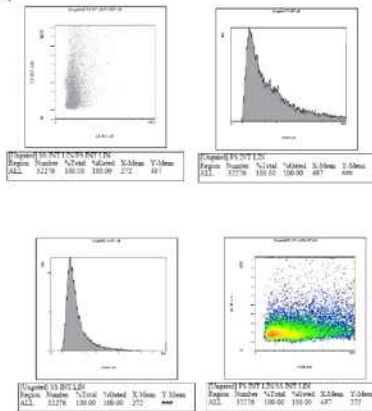


페이지 43 / 49

16229 경기도 수원시 영통구 공곡로 147 Tel. 031-888-6952 Fax. 031-888-6938
www.gbsa.or.kr

< 유세포 분석 결과-11 >

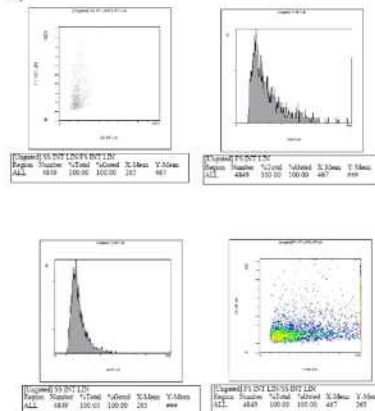
9)



페이지 48 / 49

16229 경기도 수원시 영통구 공곡로 147 Tel. 031-888-6952 Fax. 031-888-6938
www.gbsa.or.kr

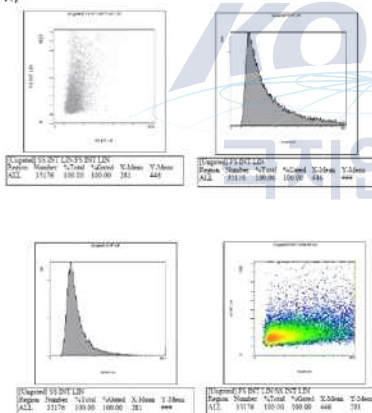
10)



페이지 49 / 49

16229 경기도 수원시 영통구 공곡로 147 Tel. 031-888-6952 Fax. 031-888-6938
www.gbsa.or.kr

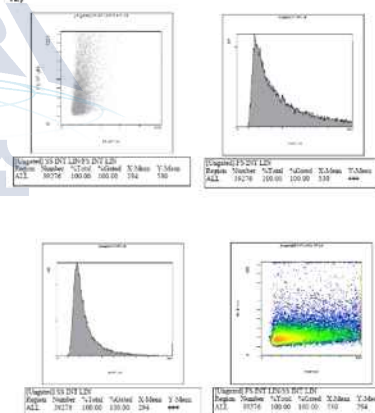
11)



페이지 48 / 49

16229 경기도 수원시 영통구 공곡로 147 Tel. 031-888-6952 Fax. 031-888-6938
www.gbsa.or.kr

12)



페이지 49 / 49

16229 경기도 수원시 영통구 공곡로 147 Tel. 031-888-6952 Fax. 031-888-6938
www.gbsa.or.kr

< 유세포 분석 결과-12 >

1. 심부 빙저호 물리탐사

1-1. 탄성과 자료 분석 기술 고도화

- 수치해석 기반 파동전파 모델링을 통한 빙하-수층-퇴적층 구조에 대한 탄성과 거동 관측
- 탄성과 해석 소프트웨어를 활용한 pseudo 3D 구조해석 수행
- 항공 레이더 자료 기반 추가적인 지구물리학적 수치 결과 도출

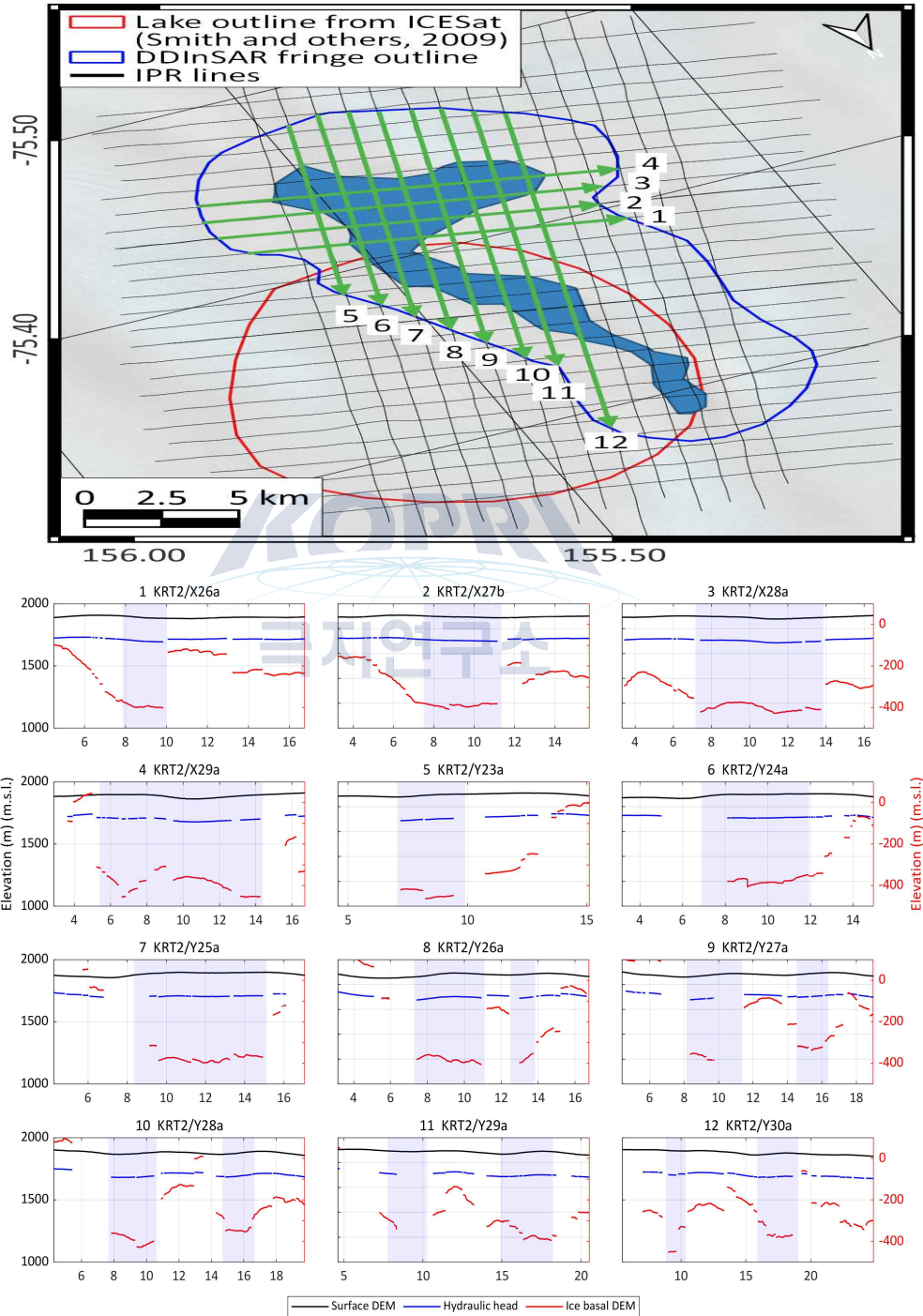


그림 180 그림 180 항공 레이더 기반 지구물리학적 수치 결과

2단계
1차년도
(2023년)

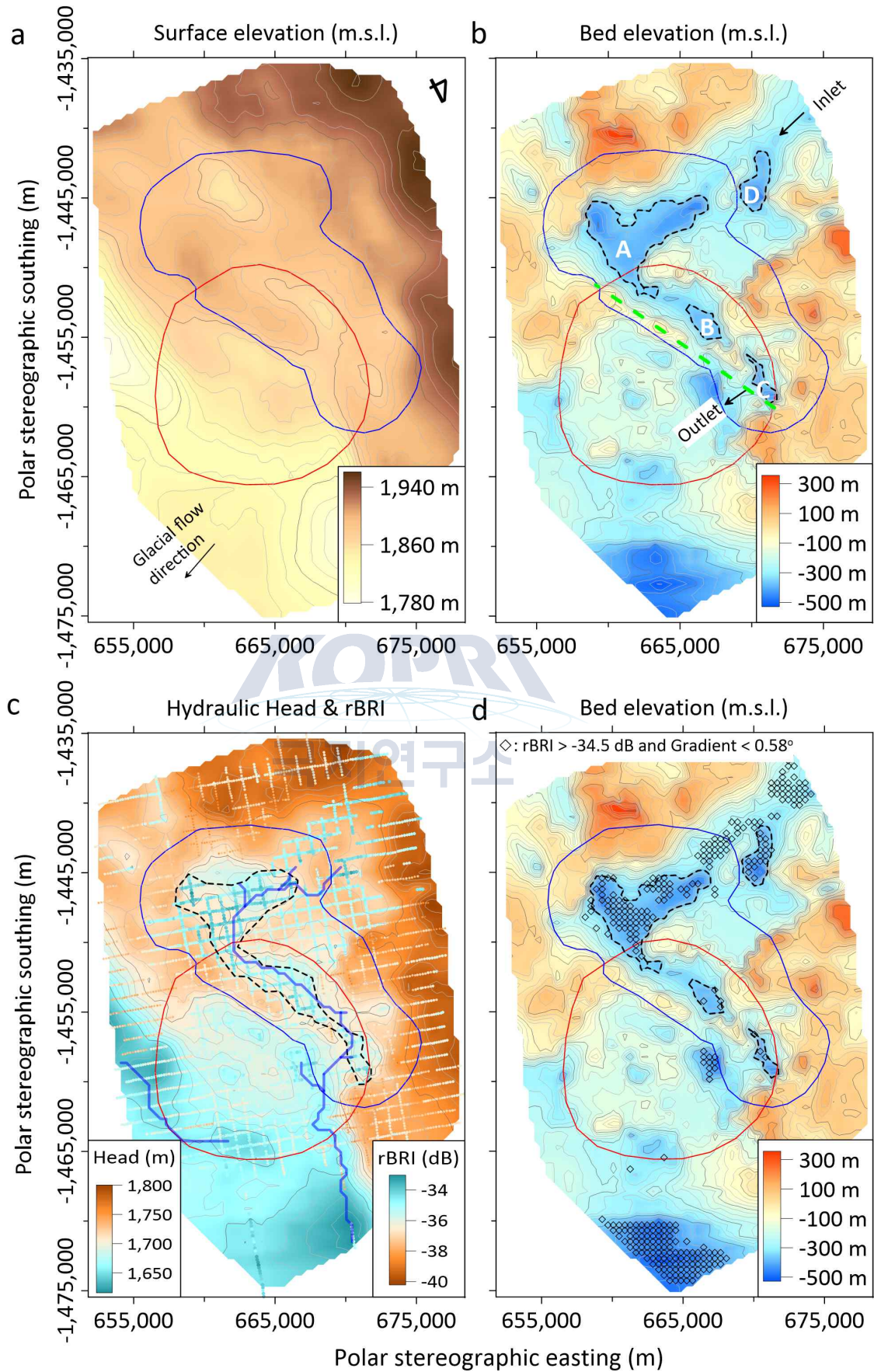


그림 181 항공 레이더 자료 기반 지구물리학적 수치 결과. Surface/Bed/Hydraulic Head/Hydraulic Slope DEM

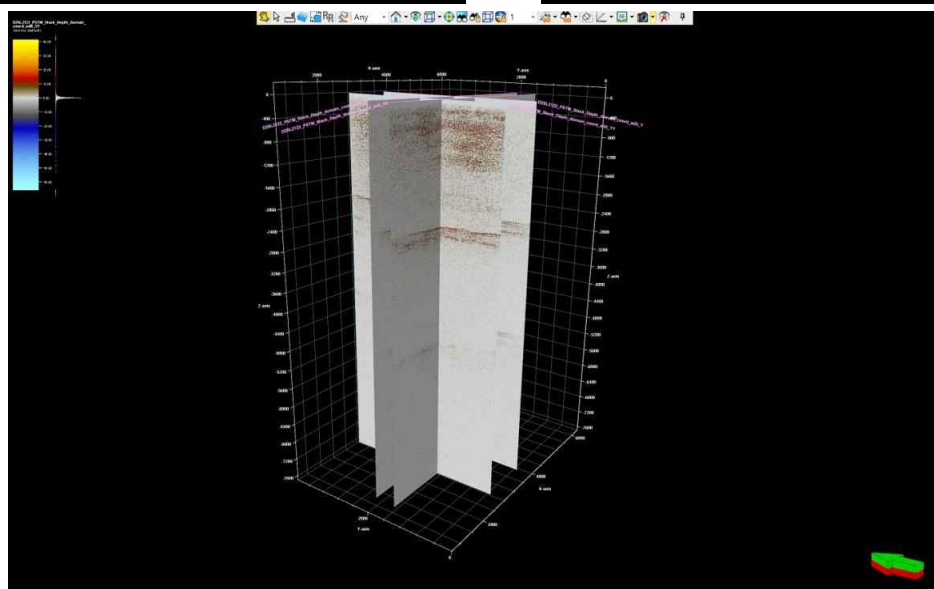
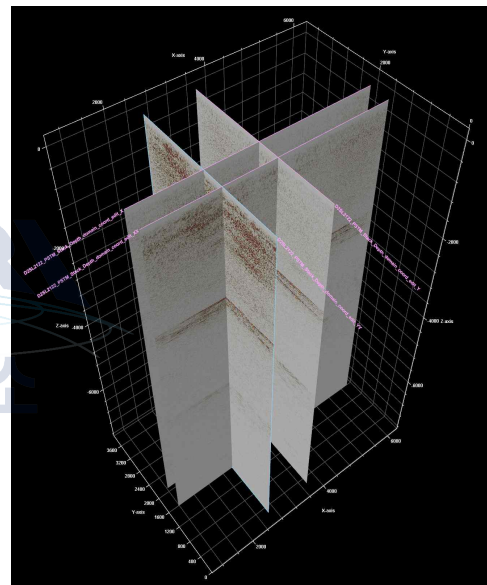
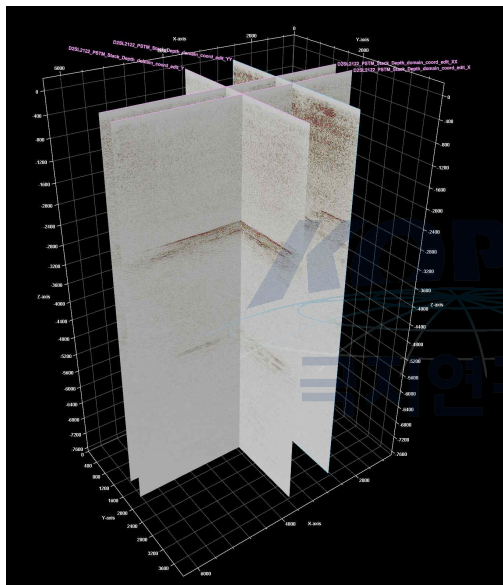
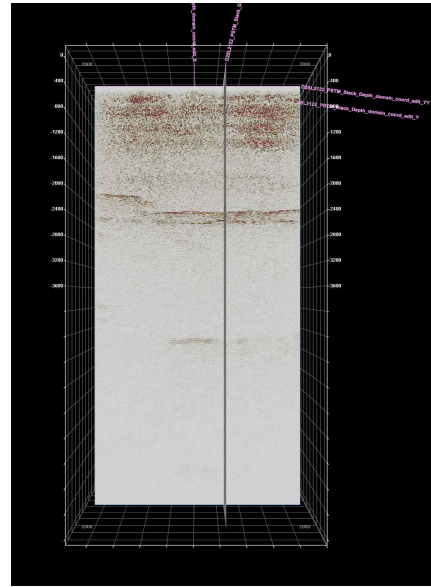
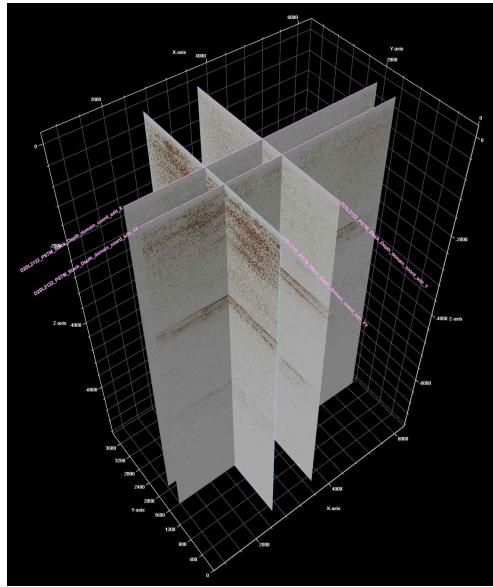


그림 182 Pseudo 3D 탄성과 구조 해석

- 1-2. 위성 자료 기반 신규 열수시추 후보지 광역 관측
 - DDInSAR 자료 기반 신규 시추 후보지 탐색

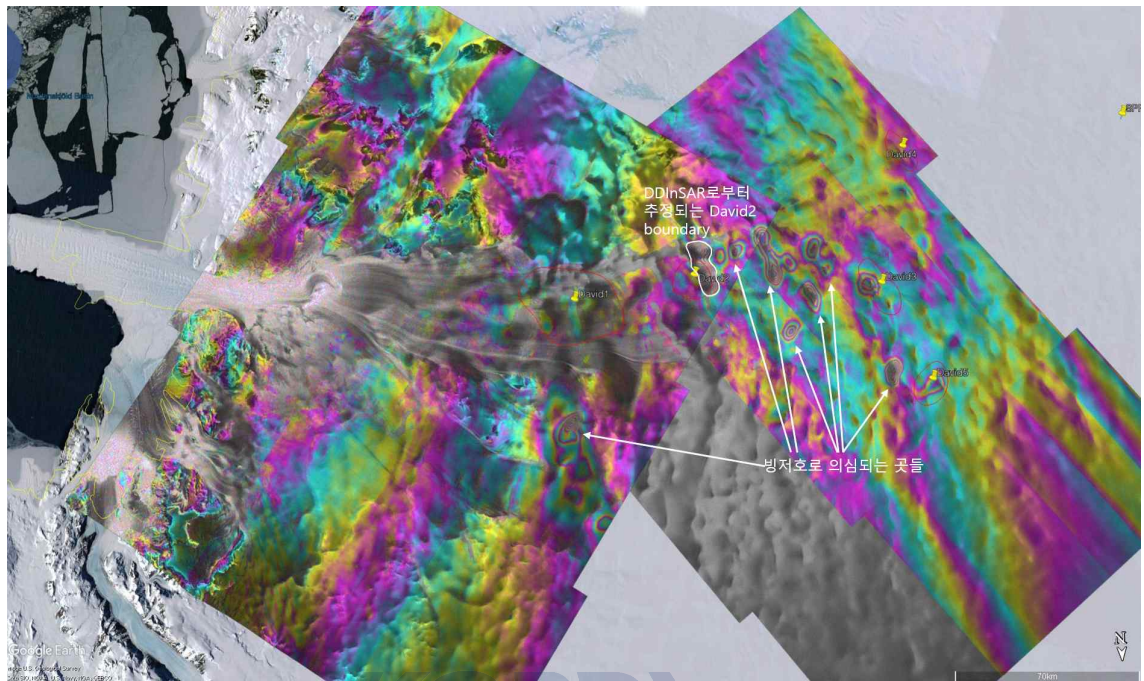


그림 183 DDInSAR 자료 - 신규 빙저호 탐색

- 신규 시추 후보지 해상도 1.5m 초고해상도 SAR 위성 영상 DB 확보

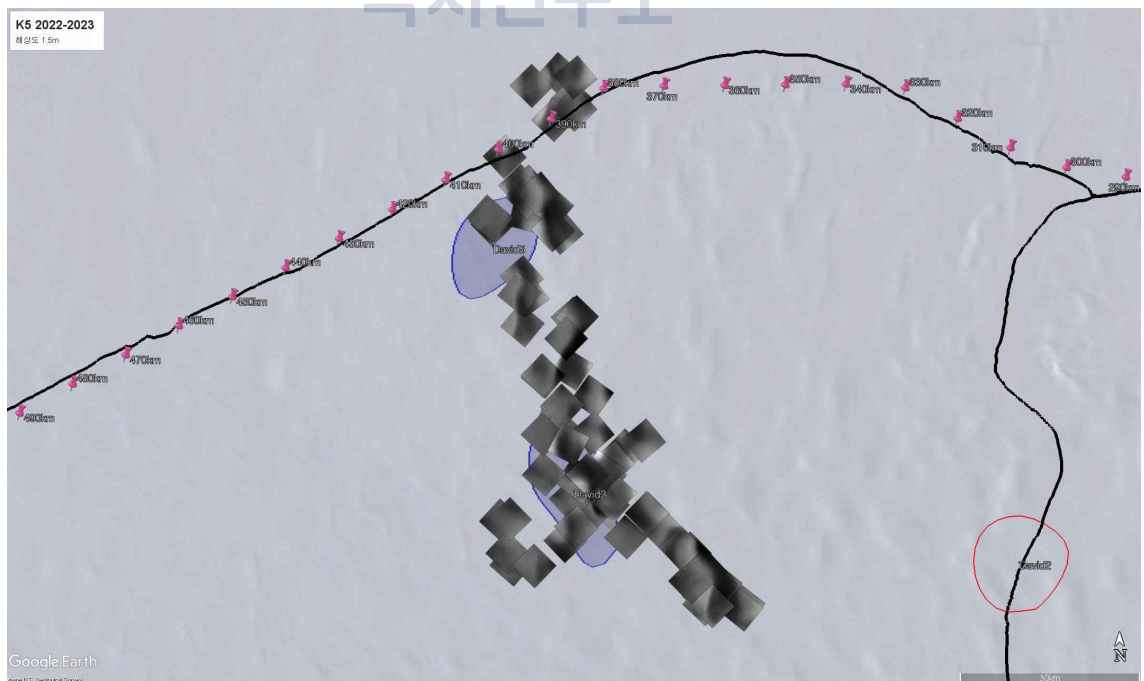


그림 184 신규 시추 후보지(D3 주변) 해상도 1.5m 초고해상도 SAR 위성 자료

- SAR 위성 영상 분석을 통한 신규 시추 후보지의 육상 접근로 파악

2. 심부 빙저호 청정열수시추 기술 개발

2-1. 심부 빙저호 청정열수시추 시스템 개발

○ 2,000m급 시추호스 제작

- 상부 빙하두께 약 2,200~2,350m, 수심 최대 80m 수준으로 예상되는 남극 D2 빙저호의 청정열수시추를 위한 시추호스로 심부 전개 시의 신축성을 고려하여 향후 3,000m급 빙저호에도 적용이 가능하도록 총 길이는 2,700m로 제작



그림 185 심부빙저호 열수시추기의 시추호스 현장 활용 예

- 호스의 구조 및 소재

Product	Content	Remark
Hose	1 1/4" ID 2,000 psi WP hose	
Liner material	Nylon 11	
Sheath material	Hytrel	
Outside diameter	42.0 mm nominal	

- 코어층: 과산화수소, 에탄올 등의 화학적 멸균 플러싱 작업에 대한 내성 확보를 위한 내경 1.25"의 나일론11 소재 적용
- 보강층: 고압열수와 하중에 대한 강도 확보를 위한 내열성과 강인성이 뛰어나지만 경량 소재인 아라미드 합사(Kevlar) 브레이드층 적용
- 외피층: 호스 클리닝에 사용되는 고압 워터 제트와 Wellhead UV unit의 고용량 UV에 대한 내성 확보를 위하여 Hytrel®6356 소재로 피복하였으며, 이 소재의 유연성은 고무와 엔지니어링 플라스틱의 중간 수준이며, 저온에서의 유연성이 우수하고 화학제 및 외부 충격에 의한 내구성이 강함

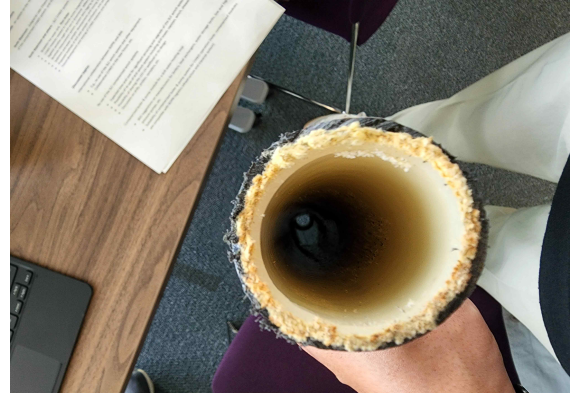


그림 186 시추호스의 외형 및 단면 사진

- 호스의 사양

Product	Content	Remark
Nominal Bore	32 mm	
Working Pressure	138 bar	
Burst Pressure	552 bar	
Outside Diameter	42 mm	
Bend radius	400 mm	
Volumetric Expansion @ Working Pressure	12 %	Estimated data
Weight in Air Empty	73 Kg/100m	

- 최대 작동 압력은 138 bar이고, 100 kg의 하중당 약 0.9%의 신축성을 지님
- 호스의 말단부는 기 제작한 호스릴&원칭 시스템에 직결이 가능하도록 1.25" BSP 316 스테인리스강 female 회전식 피팅으로 마감
- 총 60분간의 1.5*WP 내압테스트 후 컨테이너 운송을 위하여 나무릴에 감아 패킹하였으며, 추후 호스릴에 시추호스를 스푼링하기 위한 전용 롤 거치대도 함께 패킹하여 운송 준비 완료



그림 187 제작 완료된 2,700급 시추호스

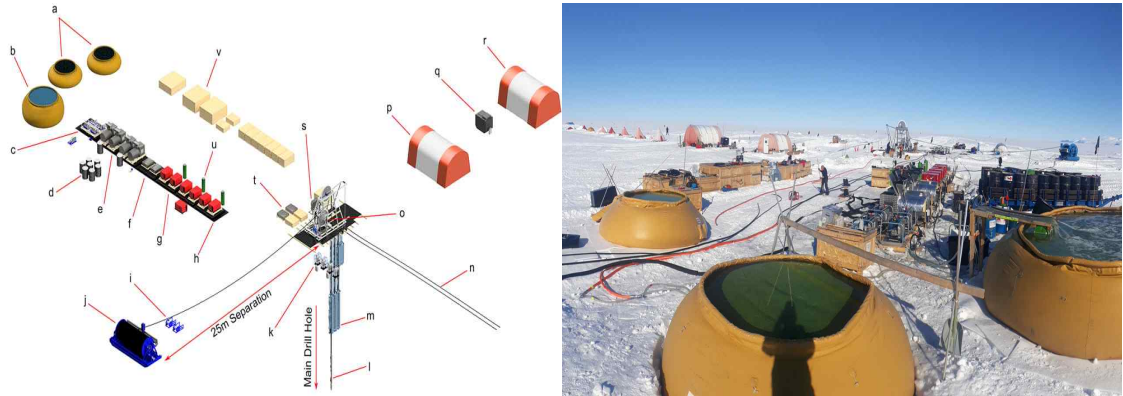


그림 190 모듈화 시스템 - 영국 BEAMISH 프로젝트 시추캠프

- 2017년도부터 LOU를 체결하여 열수시추기술 개발 및 빙저호 공동연구 협력 중인 영국 BAS의 경우 Ellsworth 호 시추탐사 시에는 컨테이너화 장비 위주의 캠프를, BEAMISH 시추프로그램에서는 모듈화 및 노출형 캠프를 구축하여 현장 연구를 수행하는 등 약 20여 회의 남극 열수시추 경험이 있음
- 컨테이너화 대형 장비의 로지스틱스 및 고비용 문제, 현장 유지보수의 어려움, 모듈화 및 노출형 캠프의 저온 및 악기상에 의한 문제 등 다양한 현장 경험을 바탕으로 최근의 CECs 시추프로그램에서는 모듈화 및 텐트형 시추캠프를 계획함

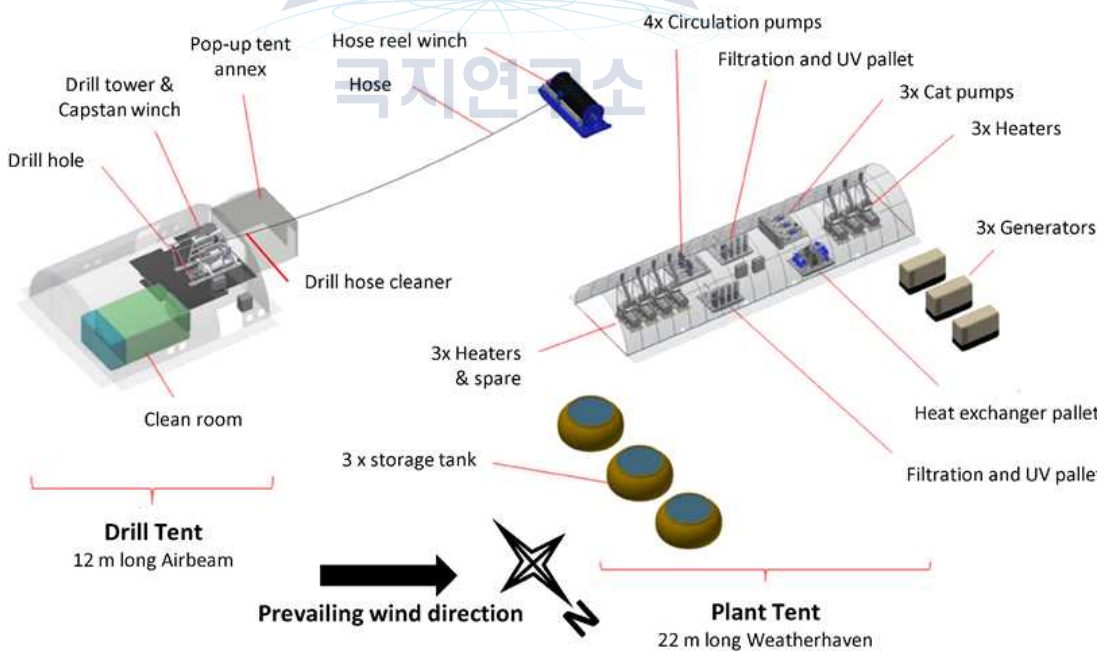


그림 191 SLCECs 시추프로그램의 캠프 레이아웃

- D2 지역의 경우, 2019년도에 설치한 자동기상관측시스템(AWS)을 통해 분석한 기상환경은 연평균 기온(최저기온) 약 영하 20℃(~영하 30℃), 연평균 풍속(최대풍속) 9 m/s (~27 m/s) 수준이며, 해발고도는 약 2,000m 임

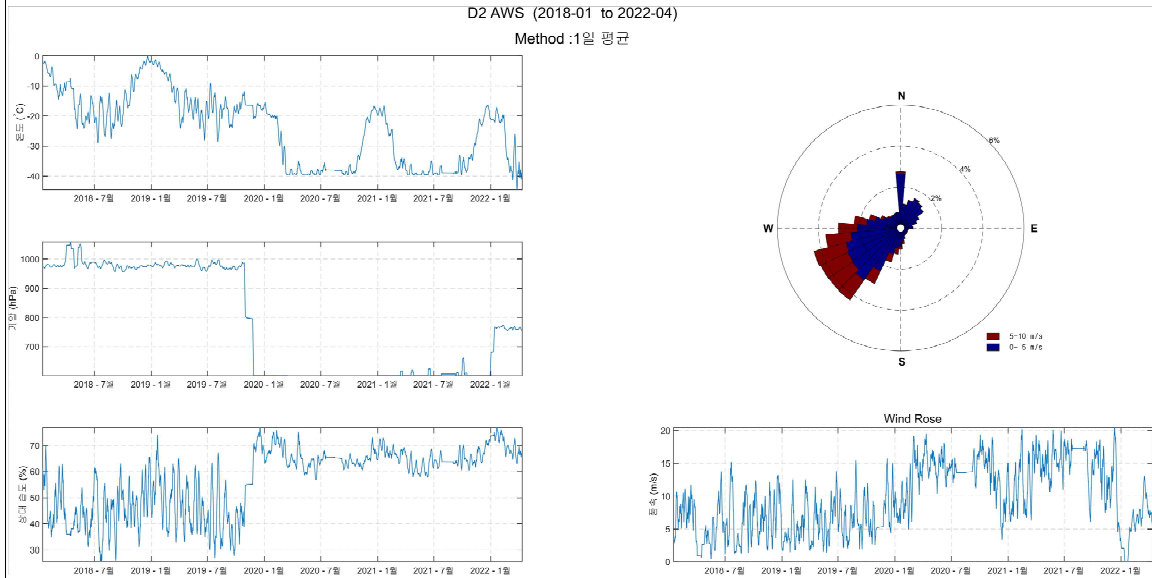


그림 192 D2 빙저호 지역 기상 자료(2020.01.~2022.04.)

- 탄성과 탐사, 환경영향평가 연구 등의 D2 빙저호 지역에서의 현장 활동 경험을 바탕으로 연구 지역은 여름철 평균기온은 영하 20℃ 이상으로 잘 오르지 않고, 불규칙적으로 많은 적설과 돌풍이 있는 지역임을 확인함
- 우리 연구소에서 확보하고 있는 남극 장보고기지 기반의 로지스틱 인프라, 장보고기지-D2 시추캠프까지의 항공 접근성, 공동연구 중인 영국 BAS의 CECs 프로그램용 시추기와 의 호환성, D2 연구지역의 기상환경 등 다양한 요소를 고려하여 D2 시추캠프는 컨테이너화 장비와 모듈화 장비를 합친 텐트형 시추캠프로 설계함

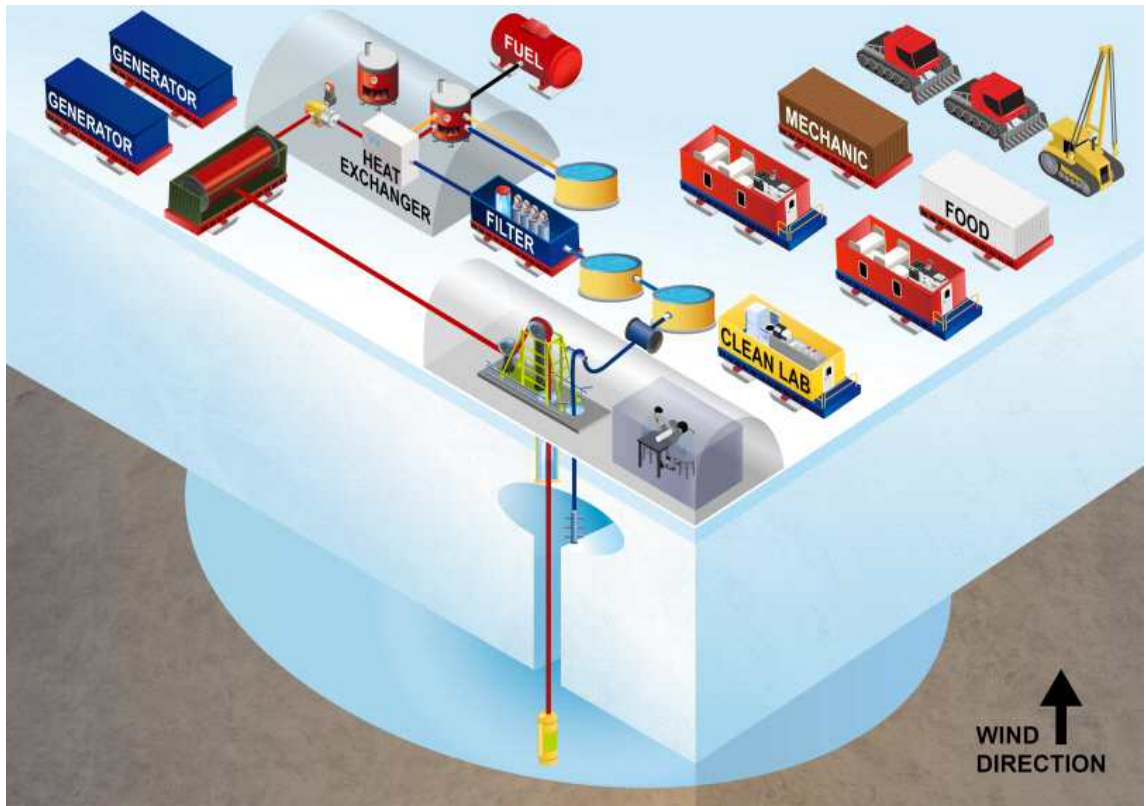


그림 193 열수시추 3D 삽화

- D2 빙저호 지역의 저온 및 악기상에 의한 위험성을 최소화하기 위해 운영상 유지보수 (정비)가 필수적인 고압 및 저압펌프, 보일러, 열교환기 등 시추수에 열에너지를 전달하고 순환을 권장하는 보일러&순환 모듈은 플랜트 그룹으로 대형 플랜트 텐트에 배치
- 드릴 캡스ตัน타워, 컨트롤러, umbilical 호스 및 수중펌프, Wellhead UV unit, 드릴호스 클리너, 샘플링 툴 등의 철저한 오염제어가 필요한 시추&샘플링 그룹은 시추 텐트에 배치
- 캠프의 배치 방향은 청정도를 유지해야하는 시추 텐트 및 그 주변 지역, 열수시추용 중 자수를 만드는 데 사용되는 표면 눈의 청정도를 확보하는데 매우 중요한 요소임
- D2 빙저호 지역의 AWS 자료 분석 결과 연중 주풍향이 남서풍이기 때문에 시추텐트는 보일러, 발전기, 중장비 배기 및 기타 연구자 캠프 활동 등의 오염물질 발생원으로부터 멀리 떨어진 남서쪽에 배치
- 발전기모듈, 멸균모듈, 청정실험모듈 등 기 개발한 완료한 독립형 컨테이너화 장비는 화물셀매에 상차하여 시추 및 플랜트 텐트 외부에 가변적으로 배치

2-3. 심부 빙저호 청정열수시추 시스템 한-영 국제 공동 개발

○ 빙저호 샘플링 윈치 개발

- 빙저호 호숫물과 퇴적물 청정시료 확보, 빙저호와 시추공 내부 환경 특성 모니터링 등을 수행하기 위한 샘플링 릴 제작
- 영국 BAS 주도하에 서남극 Rutford Ice Stream 아래 > 2,000m 깊이의 퇴적물 샘플링을 통해 영하 30도의 남극 저온 환경에서도 안정적인 운용이 검증된 전동식 샘플링 릴을 설계 제작함

- 호숫물과 퇴적물 채취를 위해 6.9mm 코팅두께, 반경 10cm, 총 3,000m 길이의 케이블 운용이 가능하며 분당 80m이상의 동작 속도를 커버하는 스펙으로 제작
- 안정적인 열수 공급원을 만들기 위해 필요한 firm drill에도 이용하기 위해 350m 길이의 6.53mm coaxial cable도 연결 가능한 slip ring type 추가 반영
- 샘플링 윈치의 요구 사양
 - 영하 30℃ 환경에서 작동
 - 6.9mm 코팅테더 3,500m 수용 가능(최소 곡률 반경 10cm)
 - 약 350m의 6.53mm 동축 케이블 수용 가능(최소 곡률 반경 13cm)
 - 동축 케이블을 통한 전원 공급이 가능하도록 최소 IP66 등급의 커넥터가 있는 2개의 도체 슬립링(최소 800V 및 6A 지원, Focal 180/29 Electric/Optical)
 - 시브 휠 포함
 - 최대 심도에서의 인장력 > 6 kN
 - 전개 및 회수 속도 > 80 m/min
 - 최소 제어 속도 0.25 m/min
 - 레벨 와인더와 속도 제어 기능을 갖춘 전기 드라이브
 - 최대 80 kW의 3상 전력 사용
 - 시추텐트 인근에서 릴을 작동 및 제어하기 위한 원격 제어 기능(~10m)
 - 릴 상태 모니터링 기능 [하중(해상도 1kg), 속도(해상도 0.1m/min), 깊이(해상도 0.01m)]
 - 컨트롤러와의 RS232 통신을 통한 테더 부하, 속도 및 길이 기록
 - 남극에서의 원활한 운송 및 배치를 위한 총중량 < 1,000kg
 - 멸균 과정(UV 열수 세척, 과산화수소 증기세척 등)에 대한 내구성 확보를 위한 AISI 316 재질
 - 녹 발생 방지를 위한 해양용 릴과 동급 재료 사용
 - 전체 시스템 최소 IP56 등급의 방수 방진 설계
 - 전기 모터 기능: Standby heating, Temperature protection, forced cooling, Encoder feedback
 - 모터 컨트롤: Frequency converter 11/12.6kW, 50/60Hz, Emergency stop & reset, Auto/Manual level wind swift, Left/Right level wind swift, 3-position switch, Frequency converter fault indicator, potentionmeter for speed
- 샘플링 윈치의 규격
 - 크기(WxDxH) : 약 1,057 x 1,466 x 1,380 mm
 - 드럼 직경 : 약 Ø 480/ Ø 850(Core/Flange), mm
 - 드럼 길이 : 약 610mm
 - 드럼 케이블 용량 : 약 2,100 ~ 2,860 m
 - 무게 : < 1,000 kg
 - 전기 모터 출력 : 최대 9 kW
 - 전기 모터 전원 : 3상 x 440 VAC, 60 Hz

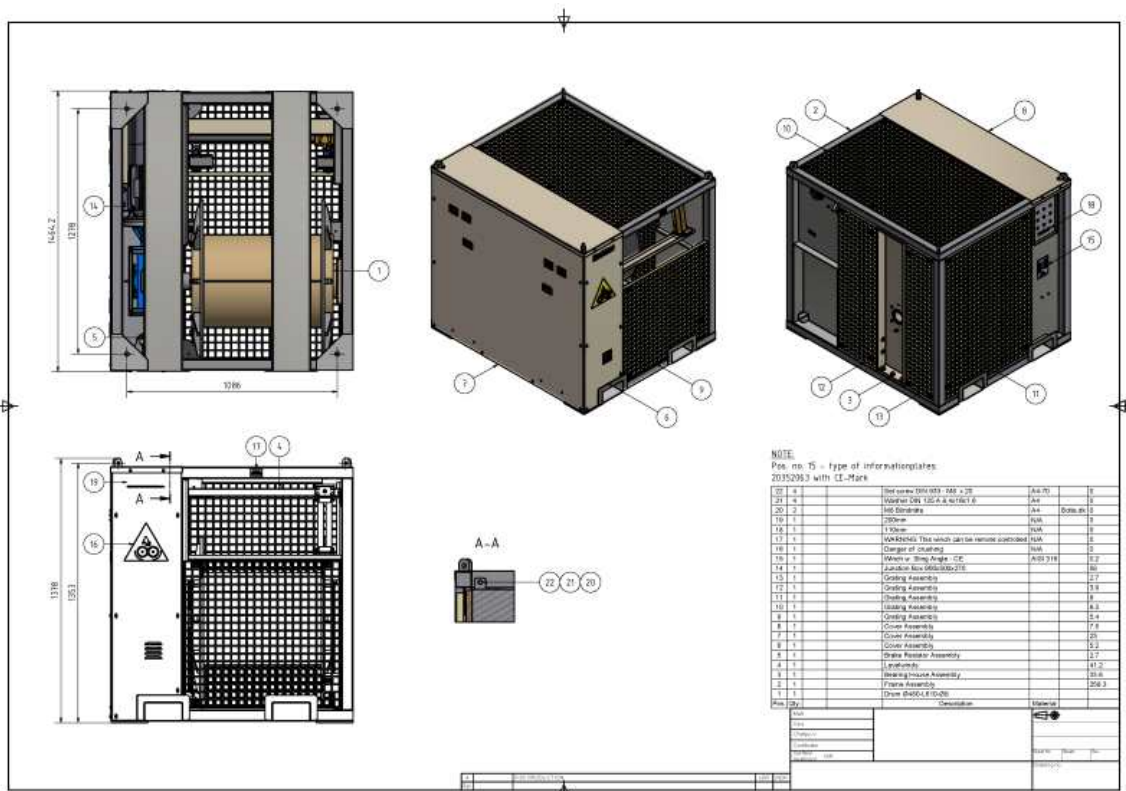


그림 194 D2 빙저호용 샘플링 윈치 도면-1

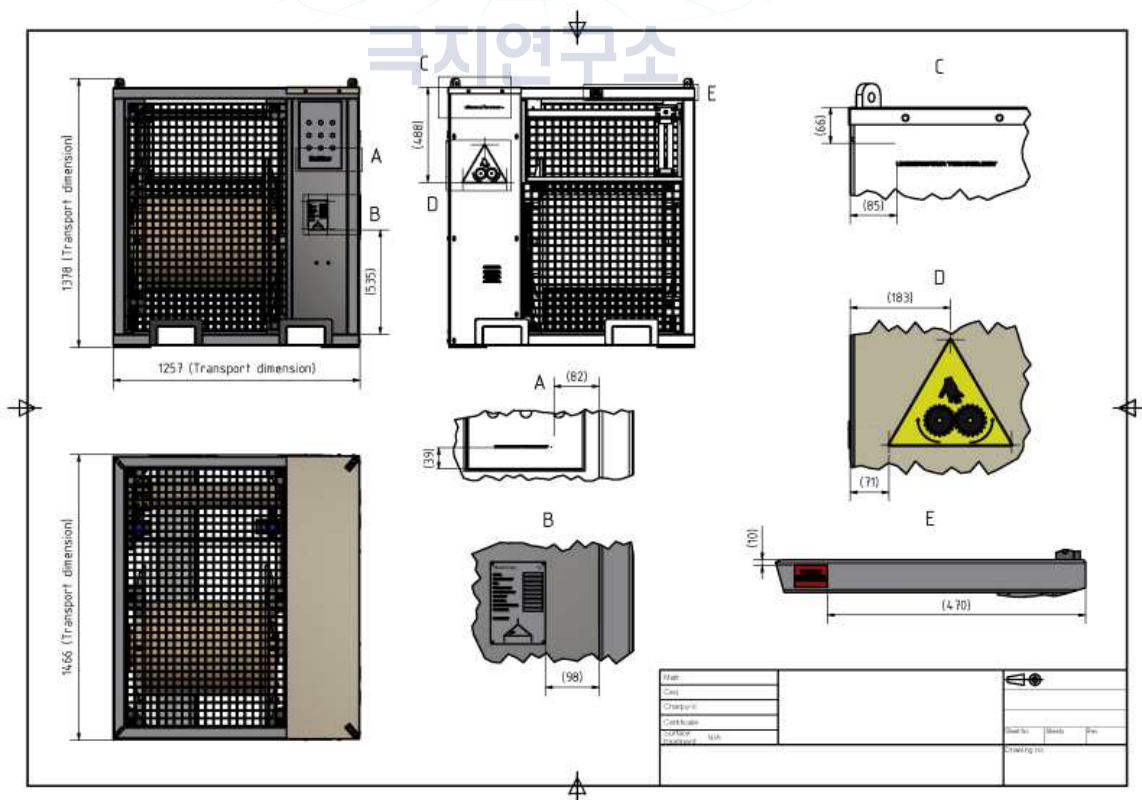


그림 195 D2 빙저호용 샘플링 윈치 도면-2

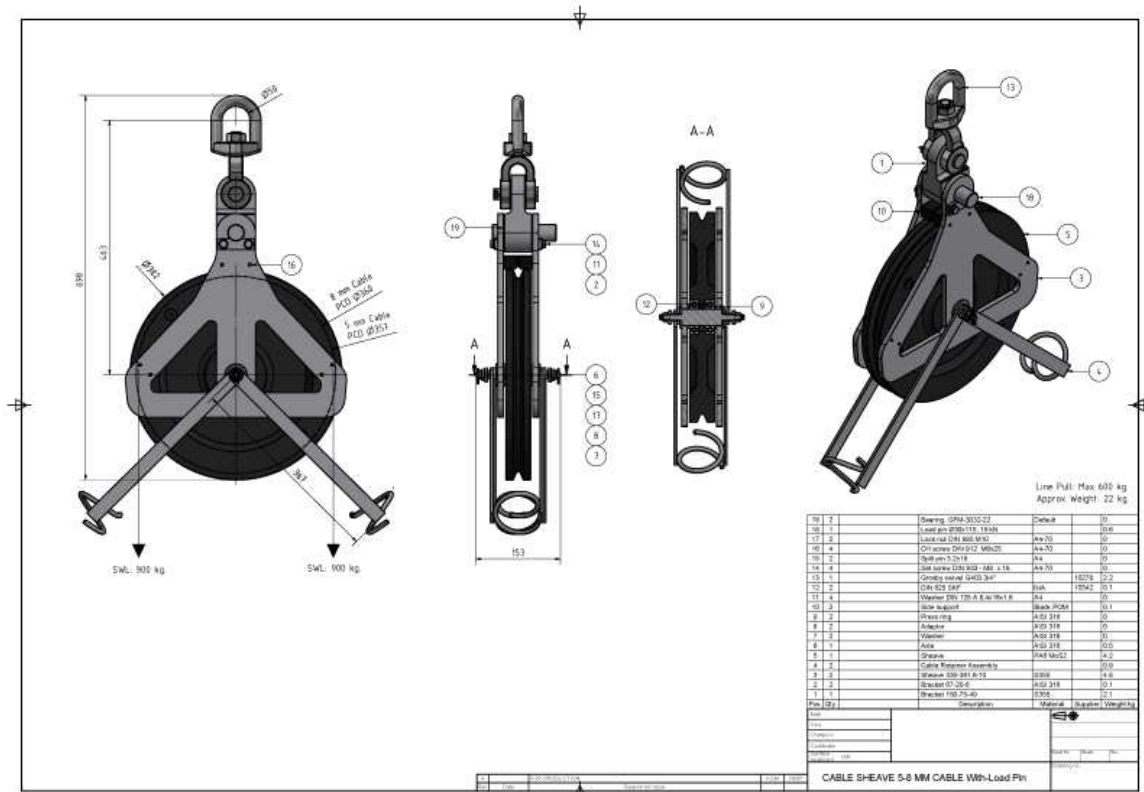


그림 196 D2 빙저호용 샘플링 윈치용 시브휠 도면

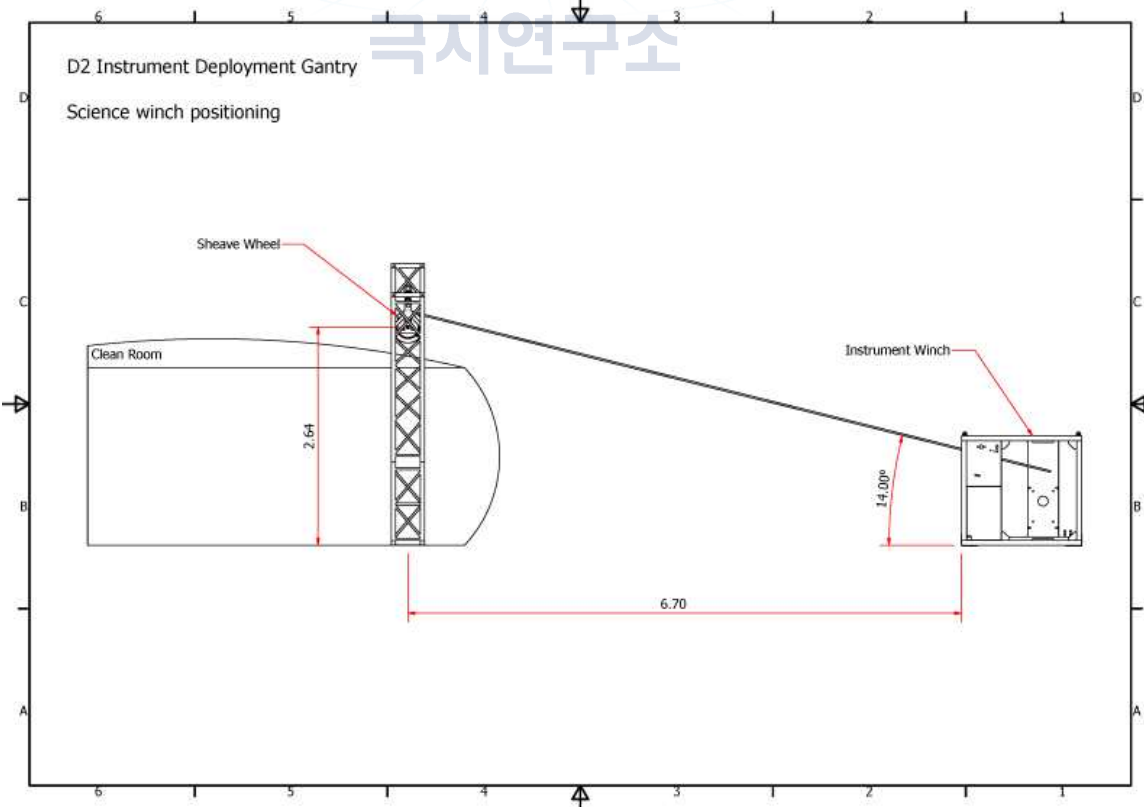


그림 197 D2 빙저호용 샘플링 윈치 현장배치 계획

3. 빙저호 시추

3-1. 국제 공동 심부 빙저호 시추연구 프로그램 개발

○ 한-영 공동 D2 빙저호 시추 프로그램 협약

- 극지연구소와 영국 남극조사소(British Antarctic Survey, BAS) 간 국제 공동 데이비드 빙하 빙저호(D2) 시추 프로그램 협의를 위해 8월 중순 BAS를 방문하여 협의를 진행
- 극지연구소의 빙저호 탐사 연구 사업의 현황 소개와 BAS 측에서 진행 중인 청정열수시추(CHWD) 시스템 개발 현황, 향후 시추 일정, 국제 파트너십을 통한 한-영 공동 과제 신청 절차에 대해 공유함
- 영국 BAS는 COVID-19로 인한 남극 활동 제한, 물류 및 펀드 등의 문제로 '21년 칠레와의 CECs 프로그램 취소 후에도 최근까지 프로젝트 재개 가능성을 염두에 두고 있었으나, 이번 방문협의를 통해 재개 가능성은 없음을 확인함
- CECs 프로그램용 청정열수시추시스템은 파트별로 개발 완료 또는 개발 중단 상태로 영국에 보관 중이며, 해당 시스템의 일부 구성요소인 BEAMISH 열수시추시스템은 남극에 보관 중인 상태로 RRS 'Sir David Attenborough'를 활용해 영국으로 반출 예정임
- BAS에서는 상당한 인력과 예산이 투입되었던 상기 열수시추시스템의 개발을 완료하고 시추현장에서 활용하고자 하는 의지가 있으나, 해당 인프라를 당초 계획(CECs 프로그램) 이외의 목적으로 활용 또는 개발을 지속하기 위해서는 상급기관인 자연환경연구위원회(NERC) 승인이 필요하여 이를 논의함
- NERC의 승인을 얻는 전략으로 청정열수시추 시스템 공동 활용을 위한 엔지니어링 프로그램과 빙저호 과학프로그램 두 가지 내용을 모두 담은 공동연구 제안서를 준비하기로 협의하였으며, 준비 작업의 일환으로 빙저호 시추연구 협력에 대한 KOPRI-BAS 간 1단계 LOU('17-'22) 만료에 따른 협약 갱신에 대해 구두 합의 완료 후 해당 문건의 상호간 보완 작성 중



Letter of Understanding
between
Korea Polar Research Institute (KOPRI)
and the
British Antarctic Survey (BAS)

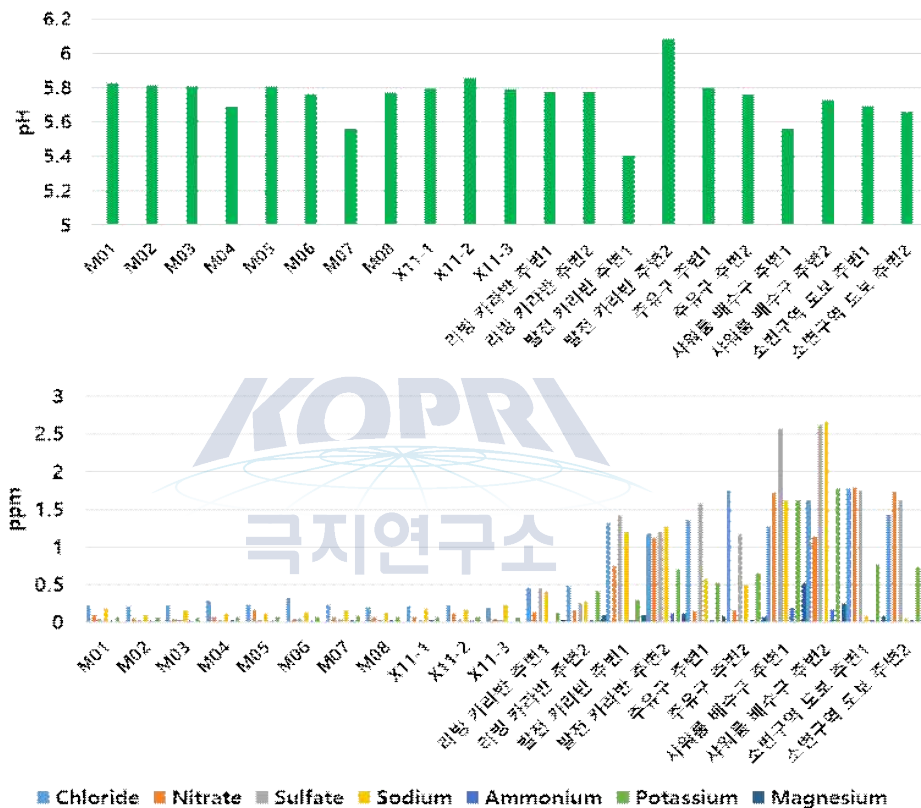
Cooperative Research on subglacial drilling in Antarctica

그림 198 2023년 8월 중순 한-영 방문 연구협의(좌) 및 갱신 예정 LOU 문건 표지(우)

3-2. 빙저호 시추 지역 환경특성 조사

○ 환경 시료의 생지화학적 특성 분석

- 빙저호 시추 지역의 청정 빙설 시료들(M01~M08, X11-1~X11-3)과 카라반 운영으로 인한 오염 지역을 대상으로 이화학적 특성 분석 수행
- 청정시료와 오염된 빙설 시료 간에 산도에서는 차이가 거의 없었으나 각종 이온들의 농도에서는 큰 차이를 보임
- 카라반 운영으로 인한 사람의 분비물 배출구 주변에서 고농도의 암모늄, 질산염 농도 등이 검출됨



< David 빙저호 주변 빙설시료의 산도 및 이온 농도 분석 결과 >

2단계
2차년도
(2024년)

1. 심부 빙저호 물리탐사

1-1. 레이더 자료 분석 기술 고도화

- BRP (bed reflection power) 자료처리 및 mapping 기술 고도화
 - 데이비드 빙하 내부 레이더 감쇠율 추정 ($N_a = -15.1 \text{ dB/km}$)
 - 항공 레이더 자료 처리 및 분석 워크플로우 최신화
 - 빙저호 추정 주요 인자 R_{23} (bed reflection power), 수력 구배(hydraulic gradient) 자료처리 및 mapping 기술 고도화
 - R_{23} (bed reflection power)의 편향 문제 해결 위해 상대 반사 계수 rR_{23} (relative bed reflection power) 적용
 - Sentinel-1 & ICESat-2 위성 자료로부터 2019년부터 2022년까지 지속적인 호수 수위 증가 확인
 - 빙하 두께 $2.2\text{-}2.3 \pm 0.1\text{km}$, 호수 수심 $48\text{-}77 \pm 3 \text{ m}$ 확인
 - SLC의 표면적(약 31.2 km^2) 및 저수량($1.5\text{-}2.4 \pm 0.09 \text{ km}^3$) 제시

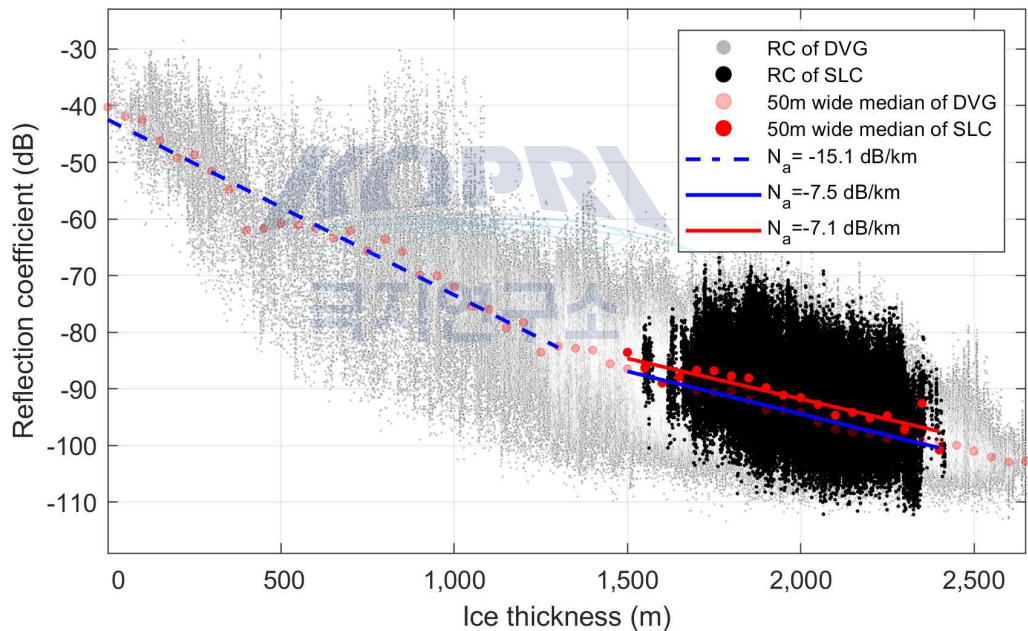


그림 199 데이비드 빙하 내부 레이더 감쇠율 추정

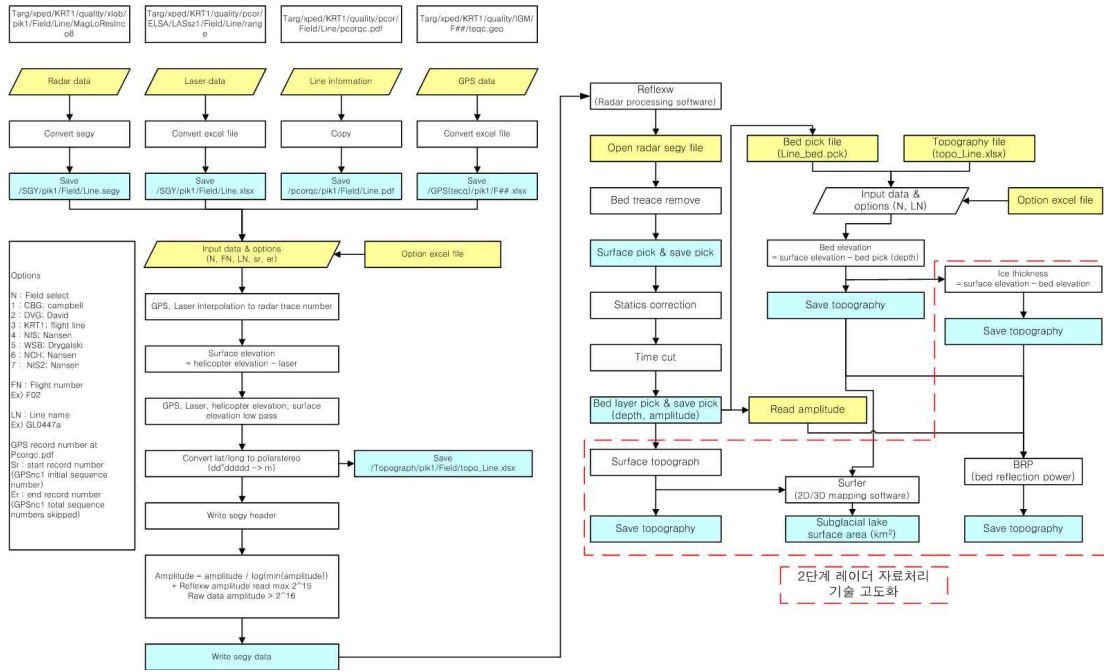
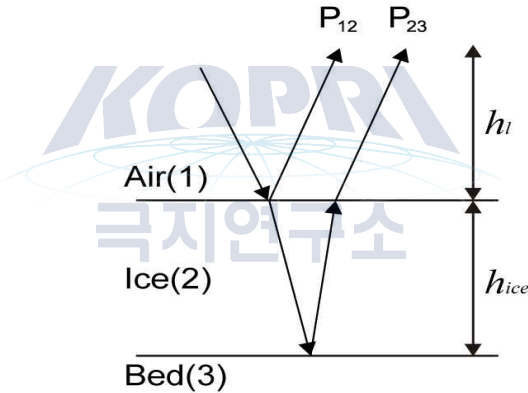


그림 200 레이더 자료 처리 워크플로우 최신화



< 반사 계수 R23 추정 계산 방법 >

$$P_r = P_t \left(\frac{\lambda_1}{4\pi} \right)^2 \frac{G_t G_r R_{23} T_{12}^2 L_{ice}^2}{[2(h_l + h_{ice}/\sqrt{\epsilon_{ice}})]^2}$$

$$L_{ice} = h_{ice} N_a$$

$$P_{12} = P_t \left(\frac{\lambda_1}{4\pi} \right)^2 \frac{G_t G_r R_{12}}{[2h_l]^2}$$

$$P_{23} = P_t \left(\frac{\lambda_1}{4\pi} \right)^2 \frac{G_t G_r R_{23} T_{12}^2 L_{ice}^2}{[2(h_l + h_{ice}/\sqrt{\epsilon_{ice}})]^2}$$

$$P_{23} = \frac{P_{12} (2h_l)^2}{R_{12}} \frac{R_{23} T_{12}^2 L_{ice}^2}{[2(h_l + h_{ice}/\sqrt{\epsilon_{ice}})]^2}$$

$$\therefore R_{23} = \frac{P_{23}}{P_{12}} \frac{R_{12}}{T_{12}^2 L_{ice}^2} \left(1 + \frac{h_{ice}}{h_l \sqrt{\epsilon_{ice}}} \right)^2$$

P_t : 송신 신호 전력
 P_r : 수신 신호 전력
 G_t : 송신기 진폭 보정
 G_r : 수신기 진폭 보정
 T_{12} : 공기-빙하 투과 계수

N_a : 단방향 빙하 내부 레이더 감쇠율
 R_{23} : 빙하-기반암 반사 계수
 h_l : 항공 운항 높이
 h_{ice} : 빙하 두께
 ϵ_{ice} : 빙하 유전상수

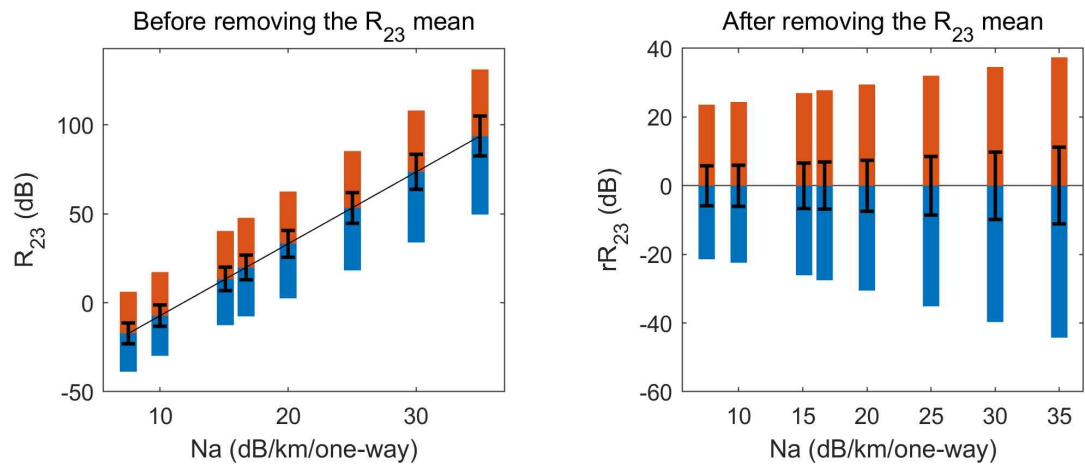


그림 201 상대적인 반사계수 (rR_{23}) 제안으로 반사계수 R_{23} 의 편향 문제 해결

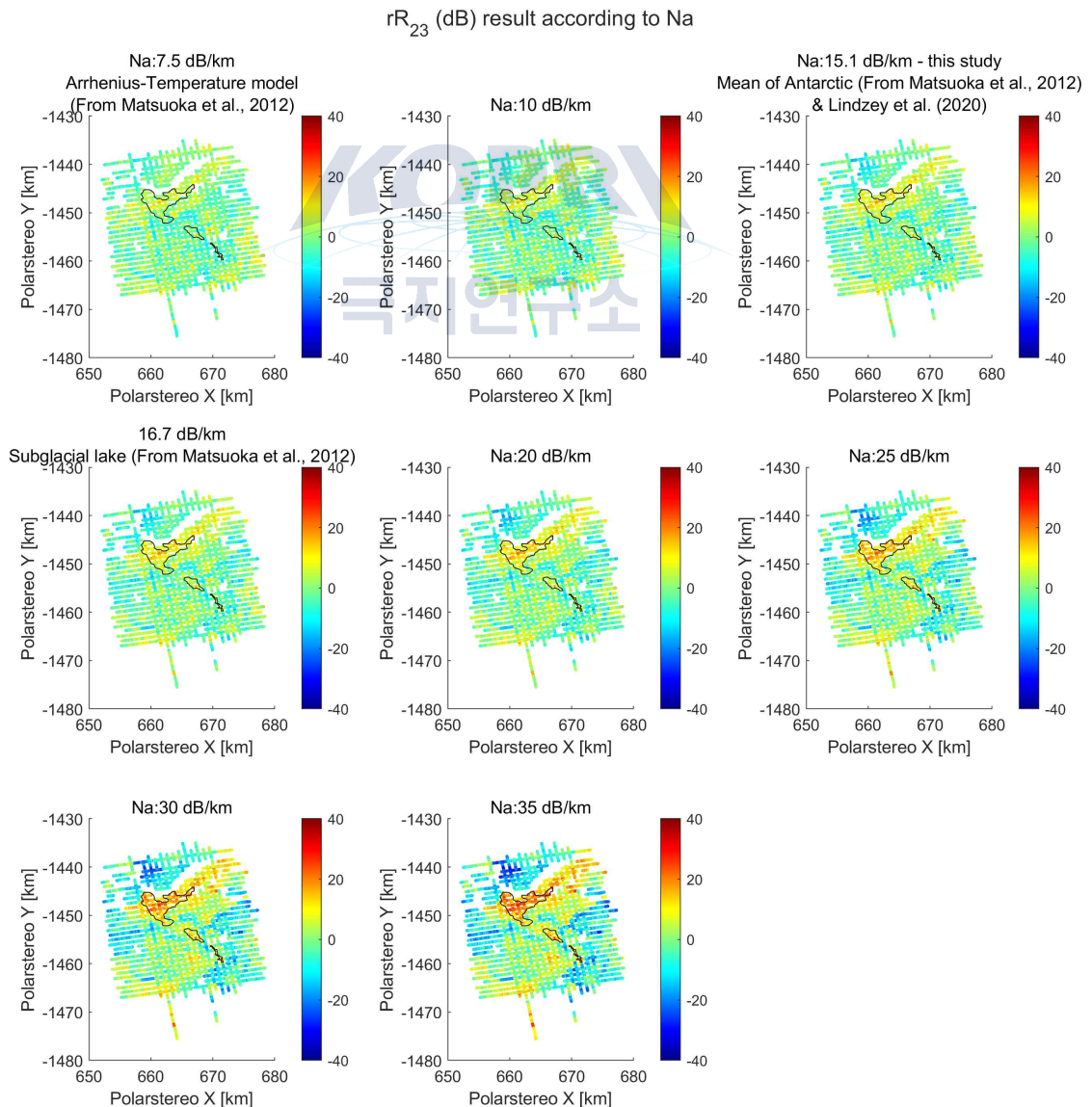


그림 202 감쇠율 Na에 따른 빙하 하부 반사 계수 비교

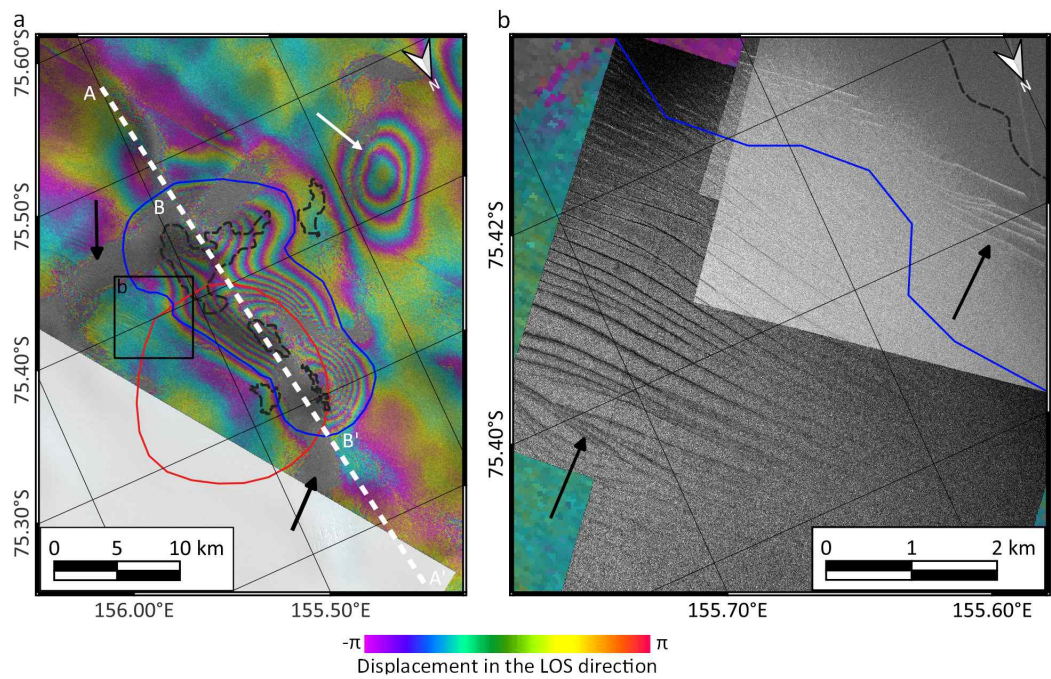


그림 203 Sentinel-1 위성 자료로부터 SLC 활동성 확인

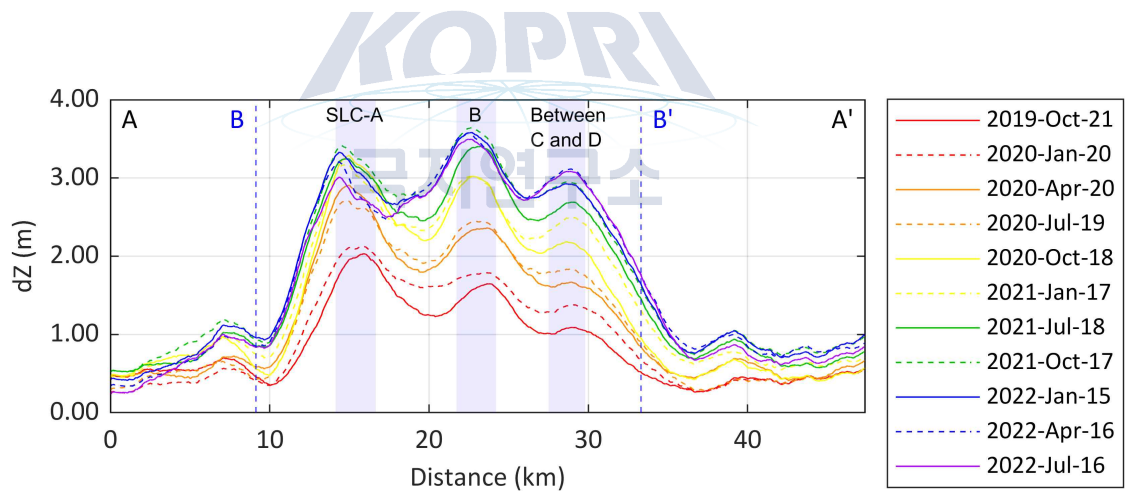


그림 204 ICESat-2 위성 자료로부터 2019-2022년 동안 SLC 수위 증가 확인

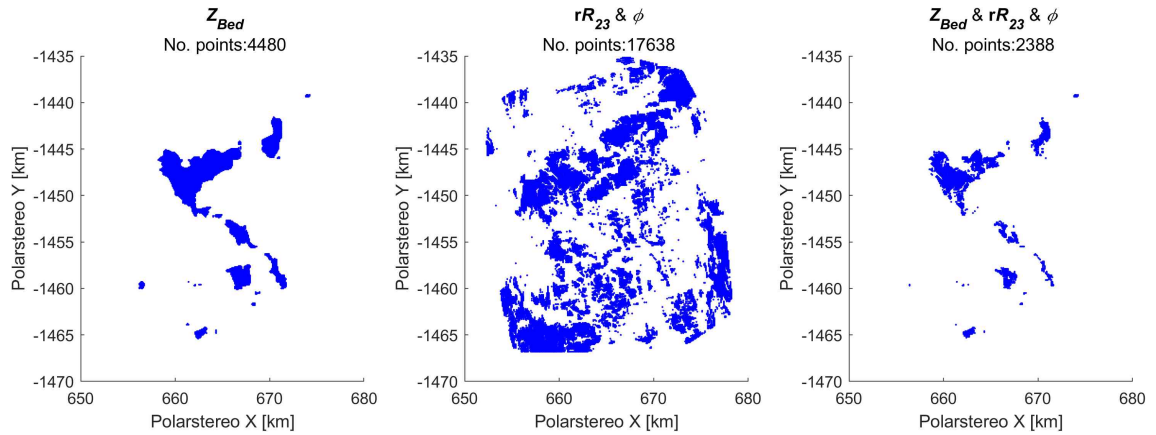


그림 205 SLC 영역 추정

$$Z_{bed} < -350 \text{ m} \text{ \& } rR_{23} > 0 \text{ dB} \text{ \& } \phi < 0.78^\circ$$

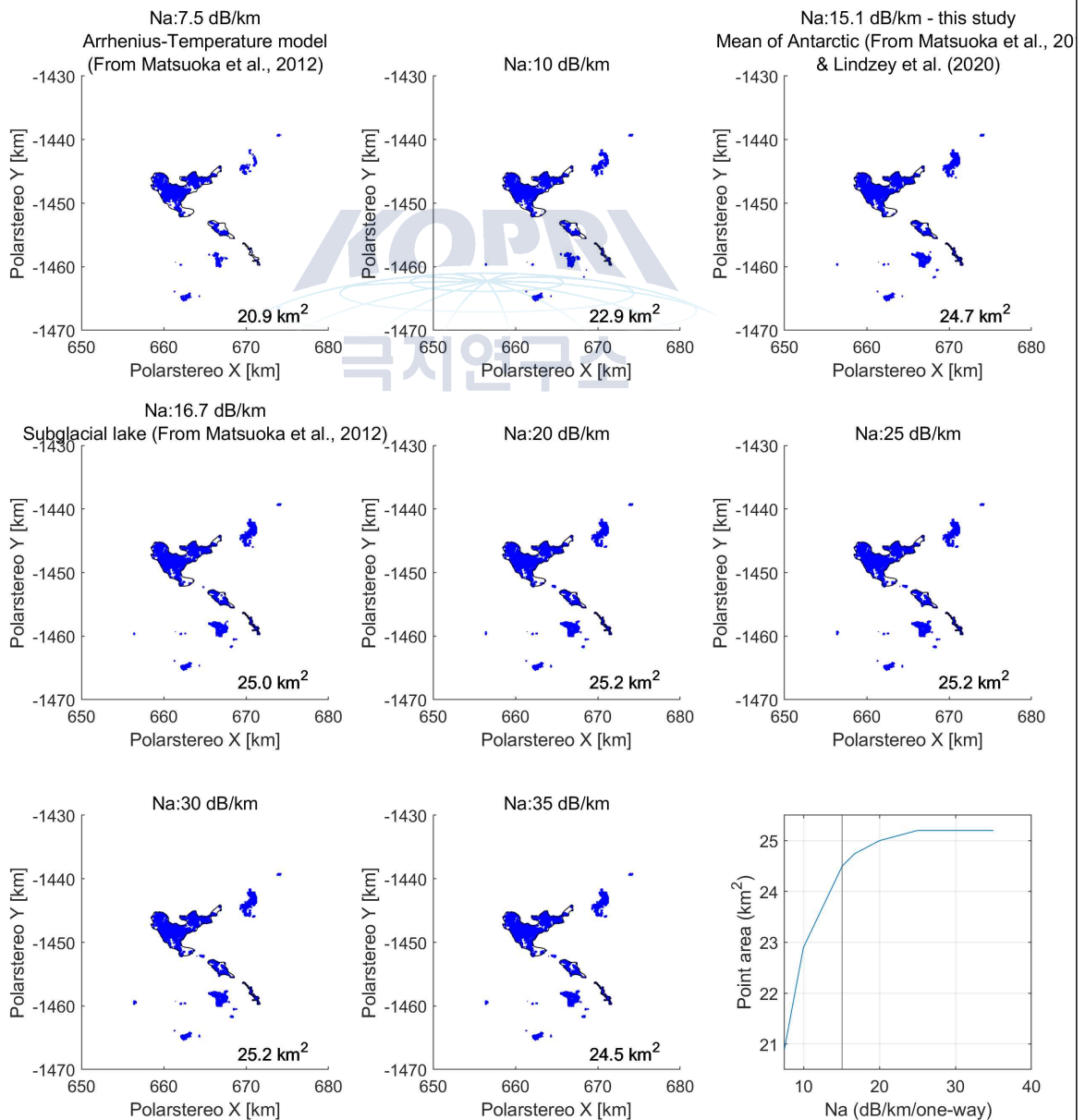


그림 206 빙하 내부 레이더 감쇠율에 따른 SLC 표면적 비교

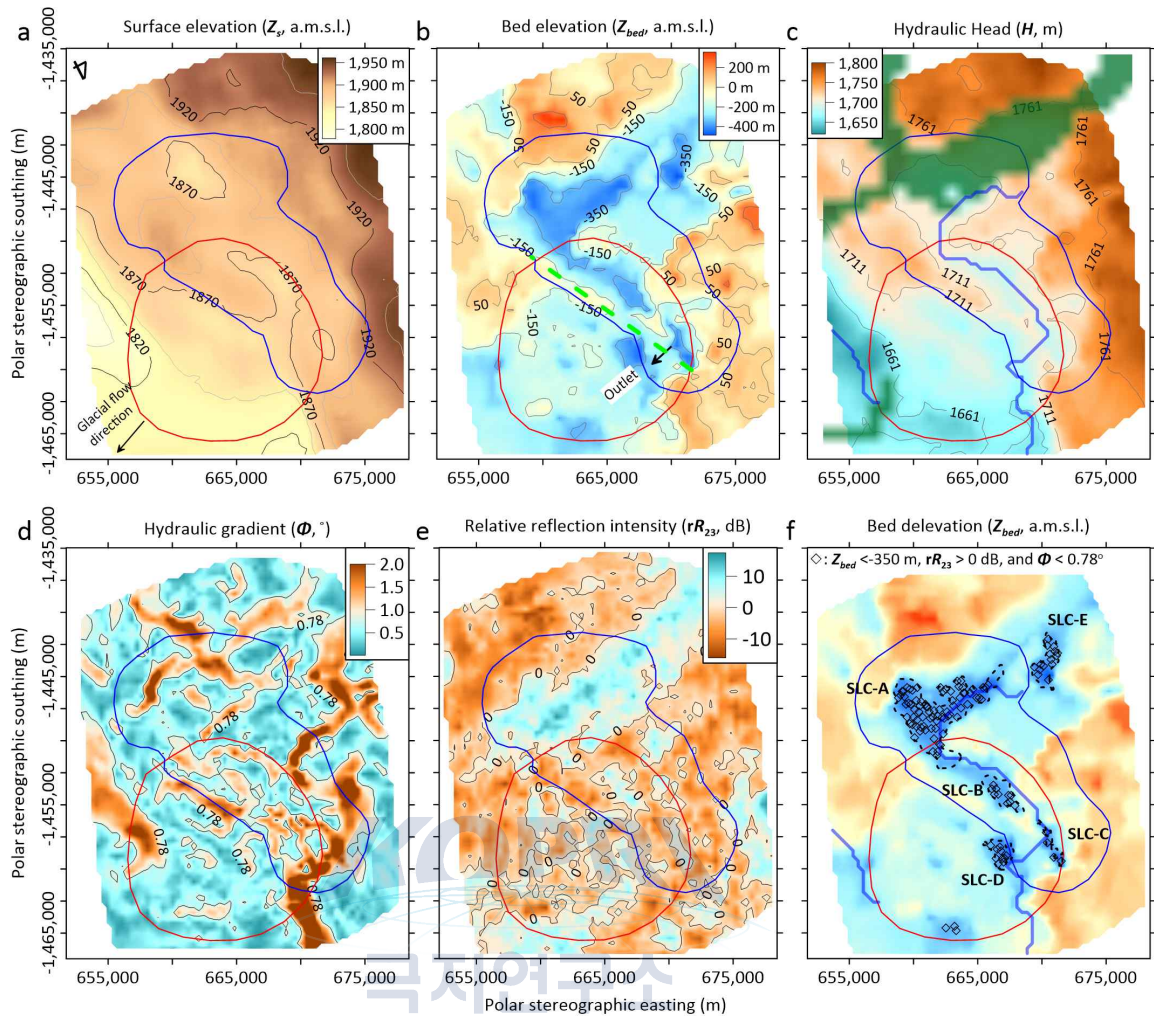


그림 207 SLC 정밀 분석 및 구조해석. (a) 빙하 표면 DEM, (b) 빙하 하부 기반암 DEM, (c) 수두 DEM, (d) 수력 구배 map, (e) 빙하 하부 기반암 상대 반사 강도, (f) 빙저호 추정 영역(◇) 표시

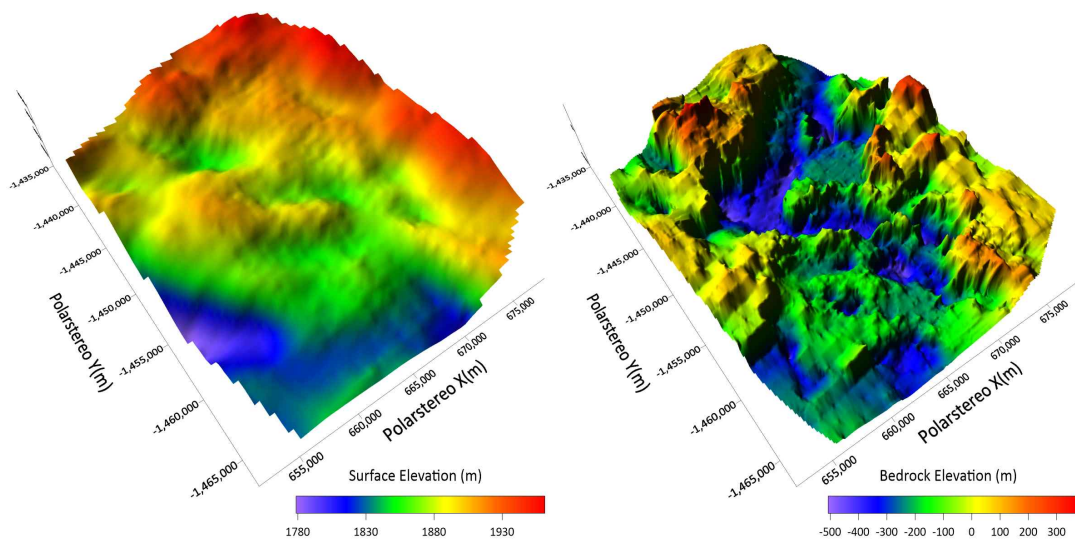


그림 208 레이더 자료를 바탕으로 SLC 지역 3D mapping.
(좌) 빙하 표면 고도 DEM, (우) 기반암 고도 DEM

1-2. 신규 빙저호 열수시추 후보지 위성자료 확보

○ 해상도 1.5m급 위성 자료 확보

- 신규(D3) 빙저호 열수시추 후보지의 KOMPSat-5 (해상도 1.5 m) 위성 자료 확보 예정 (11-12월 중)
- 활성 빙저호 주변은 크레바스가 존재하거나 생성될 수 있으므로 지속적인 위성 자료 확보를 통해 크레바스 관찰 및 생성 여부 확인
- 위성자료를 이용하여 연구진의 신규 빙저호 접근 루트 및 안전지대 확보

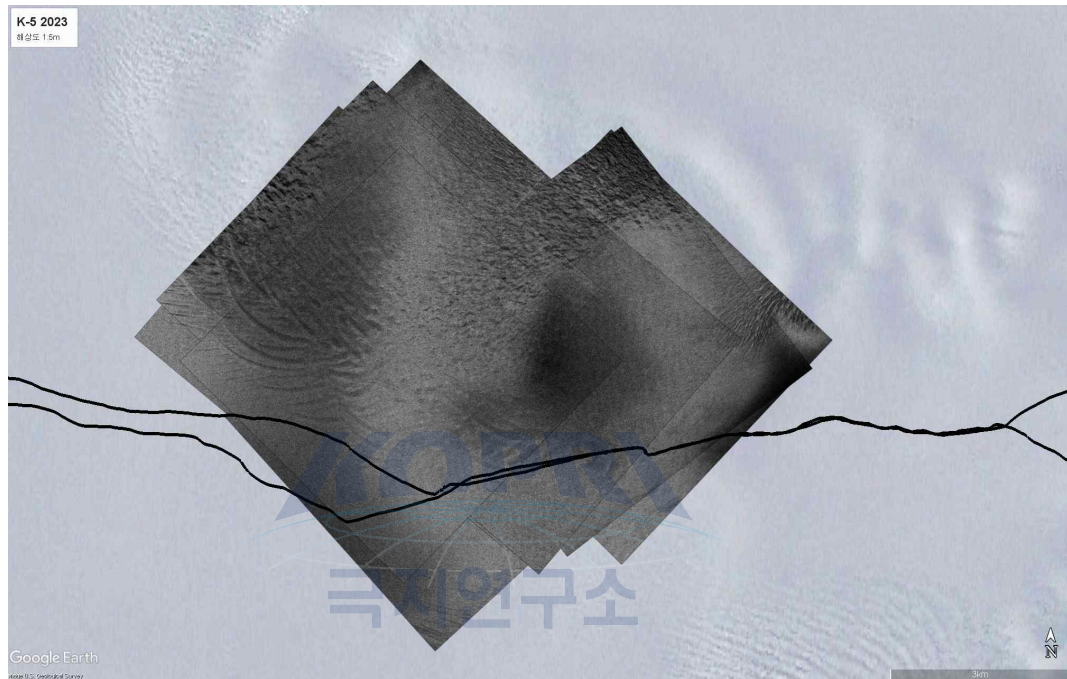


그림 209 신규 (D3) 빙저호 열수시추 후보지 해상도 1m급 위성 자료 확보 예정

- 신규 (D1A) 빙저호 후보지 ICESat-2 고도 자료 분석으로 활성 빙저호 확인 및 지속적인 모니터링

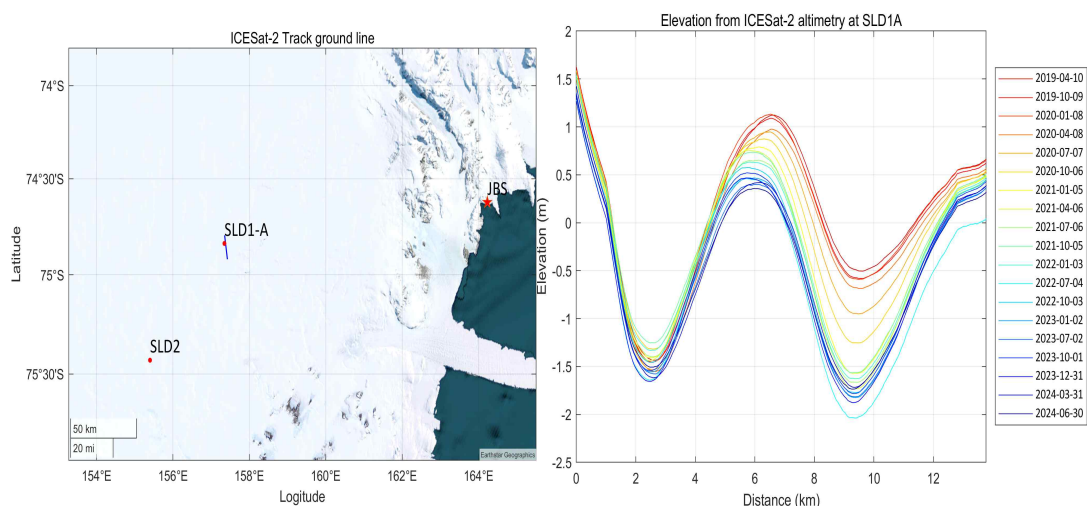


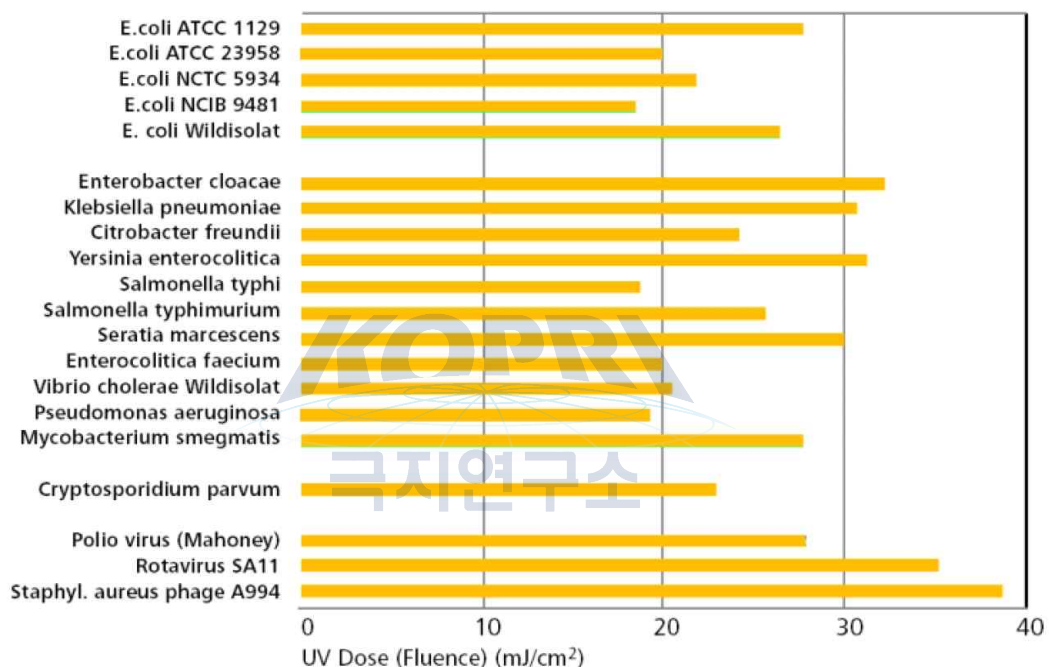
그림 210 신규 빙저호 후보지 위성 자료 DEM 분석

2. 심부 빙저호 청정열수시추 기술 개발

2-1. 심부 빙저호 청정열수시추 시스템 개발

○ Wellhead UV 유닛 제작

- 본 유닛은 시추공을 통과하는 드릴호스 및 각종 케이블/계측기의 표면을 멸균하는 용도로서 Log 3 reduction (99.9% 사멸) 달성을 위해 최소 40mJ/cm²의 UV 선량 조사를 목표로 하여 제작됨
- UV unit은 다음 두 가지 조건에서 Log 3 reduction 멸균을 만족하게 설계 및 제작됨. 첫째, 44mm 지름의 드릴 호스가 1m/min 속도로 유입. 둘째, 7mm 지름의 케이블과 로프가 80m/min 속도로 하강



UV dose requirements include effects of photoreactivation

Source: University of Bonn

그림 211 멸균에 필요한 미생물 종류별 UV 조사량

- UV 유닛은 UV reactor 구동부와 전기 컨트롤 패널 두 파트로 구성. 한 열당 20개의 UV LED로 구성되고 총 10개의 열로 배치됨. 230V 50Hz로 동작하며 최대 1kW 전력 소모, 이상 작동 시 알람 기능 탑재, 10/100 이더넷 RJ45 소켓 포함. UV 조사량을 high/low 두 레벨로 설정하고 ‘High’ UV power는 로프가 80m/min 속도로 하강 시 Log 3 reduction 수준 사멸조건으로 세팅, ‘Low’ UV power는 로프 하강 속도 20m/min의 경우 동일한 사멸능력을 담보하게 설정

OUTLINE GA DRAWING

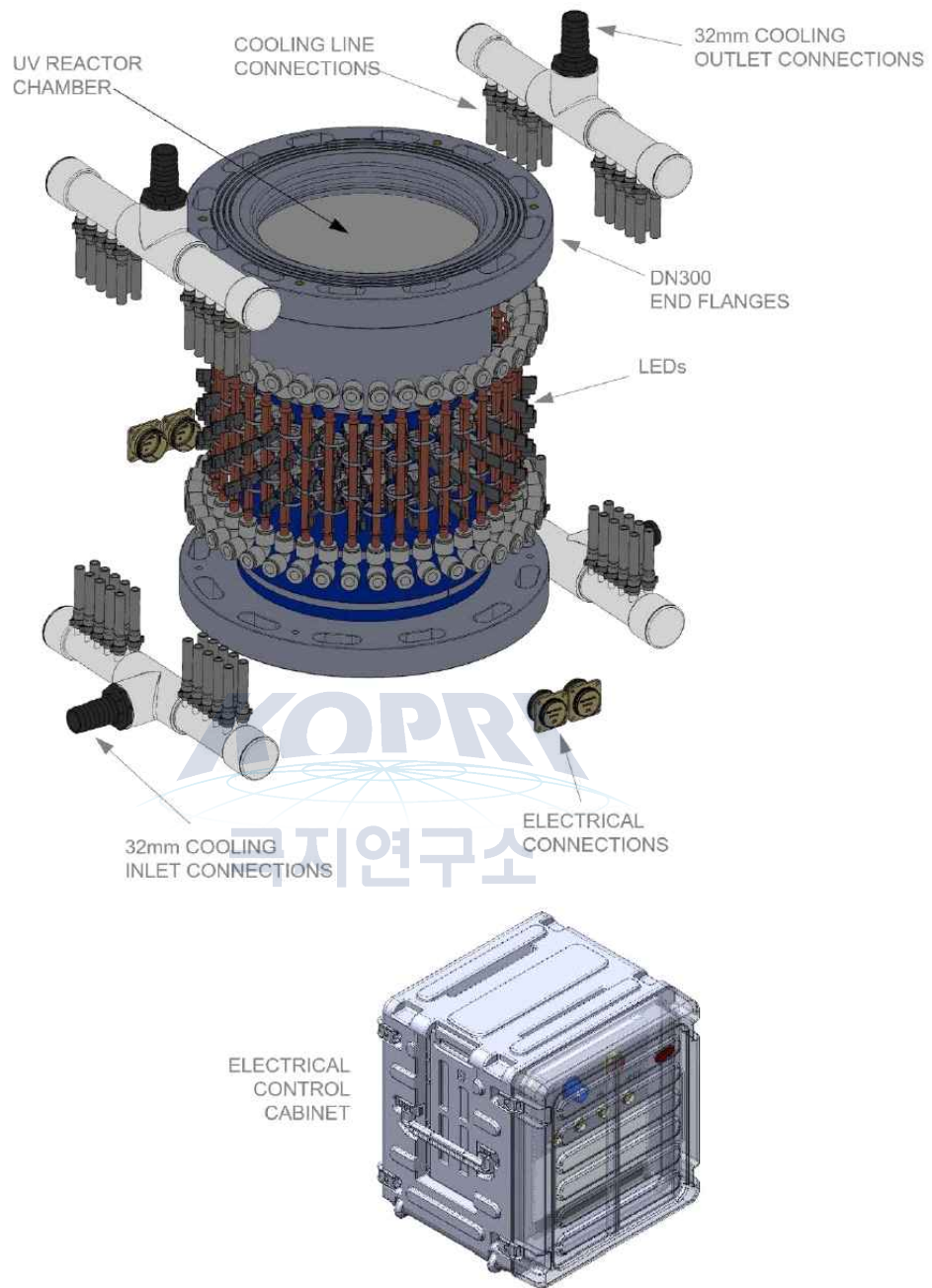


그림 212 Wellhead UV 유닛 구성도



그림 213 제작된 Wellhead UV 유닛과 컨트롤 패널(좌), UV reactor 내부 사진(우)

○ Wellhead UV 유닛 업그레이드



그림 214 BAS Wellhead UV unit 용 하우징 및 냉각장치 프로토타입

- Wellhead UV 유닛 하우징 제작

- 유닛에서 방출되는 자외선으로부터 연구자의 눈을 보호하고, UV 유닛을 통과하는 연구 장비(프로브, 계측장비, 호스 등) 대부분 원통형 구조이기에 통과 물체의 직경에 따라 커버의 유효직경을 조절할 수 있도록 조리개 방식의 수동 개폐식 조리개 장착
- 외부 충격, 저온 손상, 수분 침투 등 사용 환경으로부터 UV reactor를 보호하기 위하여 내충격, 단열, 방수, 다른 벌크 장비와의 적층이 가능하도록 하우징 보강
- 핸들링이 가능한 이동손잡이 장착

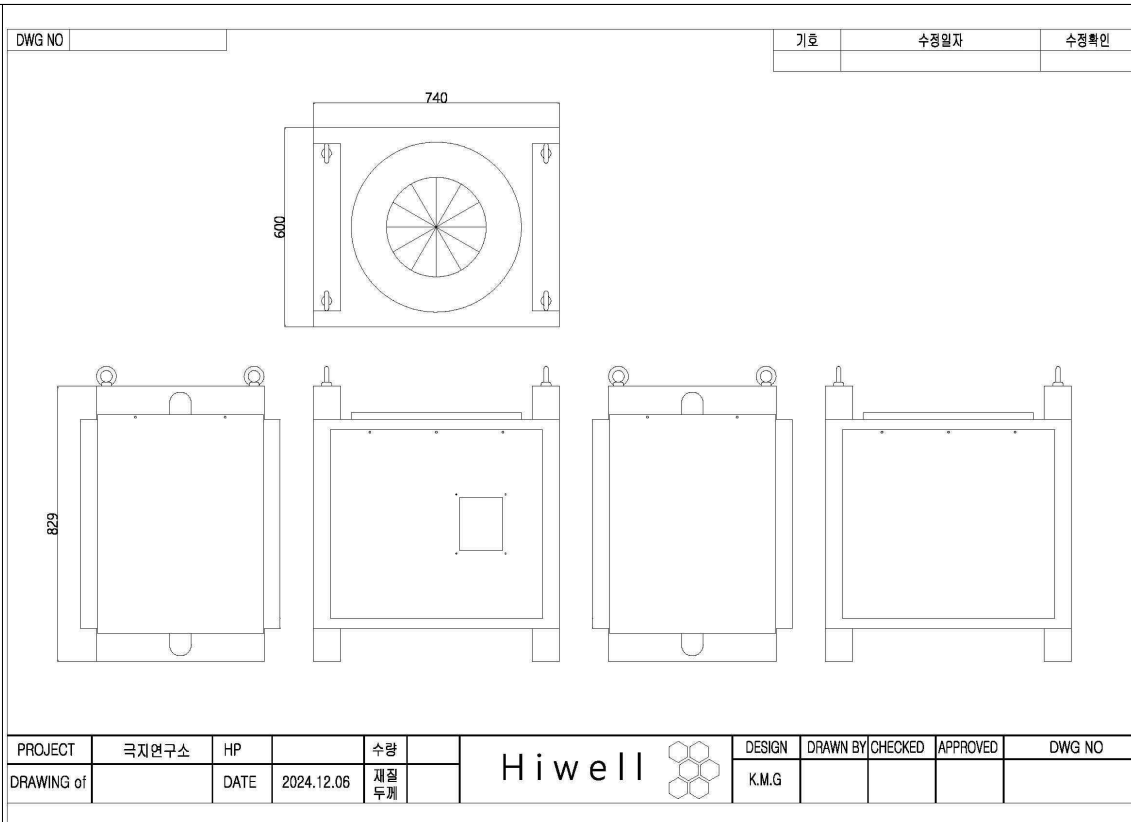


그림 215 Wellhead UV 유닛 하우징 설계도면

- Wellhead UV 유닛용 냉각장치 제작
 - 1-30도의 온도범위, 상대습도 0-40% 조건에서 UV reactor 동작 가능. 30도 이하의 온도에서 시스템이 안정적으로 유지되기에, 이를 위해 냉각수를 사용한 지속적인 냉각 필요. 외기 공기를 빨아들여 방열판 사이로 공기를 불어넣어 LED에서 발생하는 열을 식혀주는 방식의 공랭식 쿨러로 세팅
 - 규격: (W x D x H; mm): 700 x 700 x 818 mm

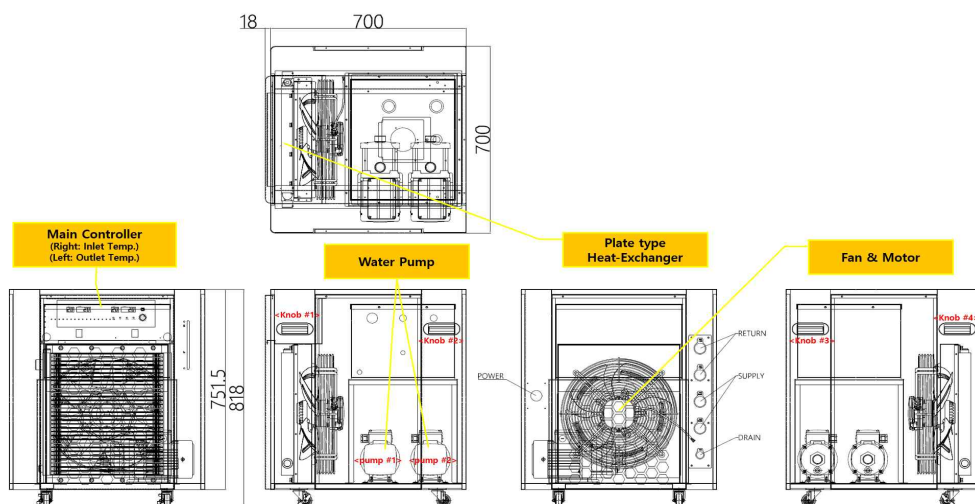


그림 216 Wellhead UV 유닛용 냉각장치 설계도면

- 펌프와 배관을 병렬로 2세트 설치하고, 개별 라인의 온오프 스위치를 장착하여 순환펌프 단일 문제 발생 시 즉각 백업 가능하도록 설계
- 워터펌프: WALUS (Type: TPH2T2KS), Stainless steel, 최대양정거리 26 m, 평균양정거리 15 m, 순환능력 2.7 m/h, 최대압력 10 kg/cm², 흡입 압력 최대 6 kg/cm², 모터 정격회전 수 2900/3500rpm (보호등급 IP54, F)
- 컨트롤과 동시에 실시간 온도 파악을 위해 장비 메인 컨트롤러 오른쪽과 왼쪽에 IN/OUT 온도 디스플레이 장착
- 컨트롤러: Hiwell tech (HCH-10 V0.1), 조절방식 JOG Dial, 알람 기능(고압, 고/저온, 유량, 수위), 정밀도 ± 0.1 °C
- 열교환기: WUXI YUDA, 재질 Ferro Alloy, 냉각용량 11.75 kW, 유체압력 1.0 MPa, 리크압력 0.8 MPa

2-2. 심부 빙저호 시추캠프 구축

○ D2 빙저호 시추캠프 텐트유닛 제작

- 장보고기지로 기 보급한 시추 장비의 남극 실증 테스트와 시추캠프 운송 준비에 필요한 연료를 남극내륙연구사업단으로부터 일부 지원받아 활용해 왔으나, 해당 연구팀의 비축 유 상황 악화로 자체 조달 요청 발생. 연료 부족으로 인해 야기될 수 있는 연구계획의 차질을 방지하고 연구 활동의 지속성을 우선 확보하기 위해 빙저호 시추캠프 구축용 ISO 20ft 연료탱크 컨테이너 제작 후 항공유(JET A-1) 20,000L를 당해 우선 보급함에 따라 텐트유닛 제작 계획은 차년도로 순연
- 당해에는 D2 빙저호 시추캠프 구축에 필요한 극지용 고성능 텐트 2종과 클린룸 텐트 1종의 선정과 해당 텐트 제작사를 통한 상세 설계 및 견적 확보 완료
- D2 빙저호 시추캠프 설치 예정지는 고도 약 2,000m, 남반구의 여름시즌 기준 평균 기온은 영하 20° C 수준으로 그 이상 거의 오르지 않고 불규칙적으로 많은 적설과 돌풍이 있는 지역임

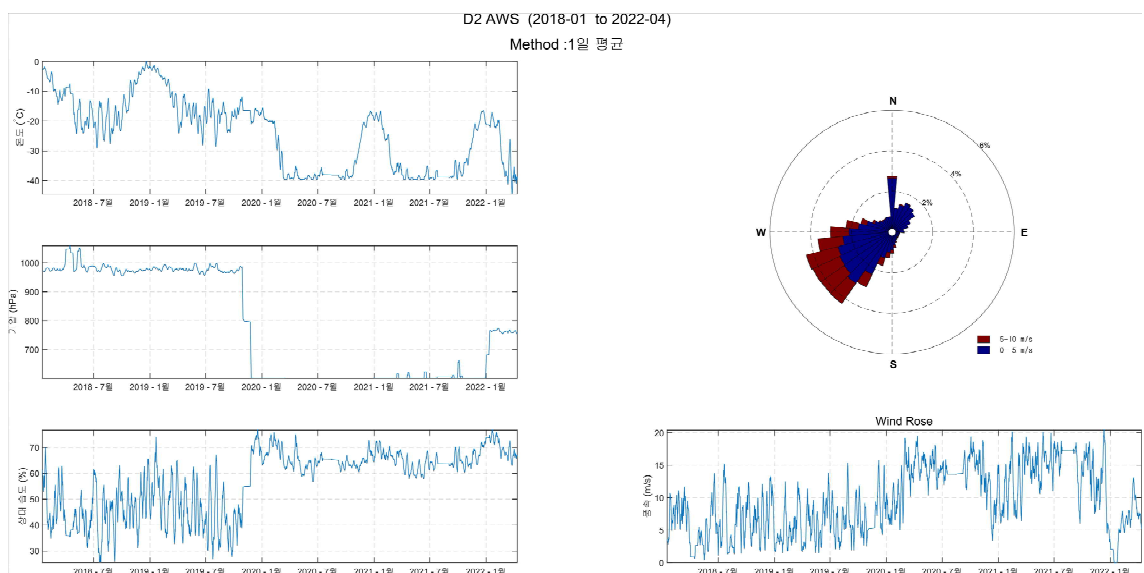


그림 217 D2 빙저호 지역 기상 자료(2020.01.~2022.04.)

- 열수시추 매체로 물을 사용하는 시추 장비의 극저온 환경에 대한 노출 취약성과 수습 시간 이상 연속(교대)작업이 필수적인 시추작업 시 불규칙적인 악천후로 인한 위험을 완화하기 위하여 컨테이너화 모듈 외 벌크 장비와 인력을 수용할 수 있는 대형텐트를 현장에 배치할 예정
- 청정열수시추 프로토콜에서 필수적인 현장 오염제어를 위해 가동 과정에서 입자, 가스 등의 오염물질을 배출할 수 있는 열생산 플랜트 설비와 깨끗하게 유지되어야 하는 메인 시추공 입출용 호수 계측 및 샘플링 장비 운용 영역의 공간적 분리 필요
- 메인홀을 중심으로 이루어지는 작업(청정열수시추, 계측, 샘플링)과 해당 작업에 필요한 인력, 장비를 수용하기 위한 드릴 텐트와 열수시추의 에너지원인 열을 생산하는 플랜트 설비와 운영 인력을 수용하기 위한 플랜트 텐트 선정을 위한 시판품 기술자료 분석 및 텐트유닛 2종 선정

가. 드릴 텐트

- 캡스톤 타워, 드릴 제어 장치 등의 메인 시추장비와 UV Wellhead 유닛, 시추수 순환 라인(수중펌프 및 umbilical), 계측 및 샘플링 장비 등 청정시료 확보를 위해 청정도 유지가 필수적인 장비 배치용
- 시추공 위치 조정 필요 시 텐트의 신속한 철거 및 재배치를 가능토록 하는 설치 용이성과 물류 편의성, 물의 편의성을 확보를 위해 경량화한 텐트를 눈 위에 견고히 고정할 수 있는 고정 장치등의 사양을 중점적으로 검토한 결과 Weatherhaven 사의 Airbeam 텐트 청석호 시추캠프용 드릴 텐트로 선정 후 맞춤 제작
- 주요 요구 사양
 - 텐트 골격이 에어빔(직경 15cm의 아치빔 + 7.6cm의 세로빔)으로 이루어져 있어 높은 곳에서의 작업이 필요 없이 지상의 에어컴프레서를 사용하여 4인 기준 3시간, 6인 기준 2시간 이내 신속한 설치 가능
 - 물류 편의성 보장을 위해 폭 10m × 깊이 6m × 높이 4.65m 크기의 2개동을 방수, 방풍, 밀봉 지퍼로 연결하여 폭 10m × 길이 12m × 높이 4.65m 크기의 최종 내부 공간 확보

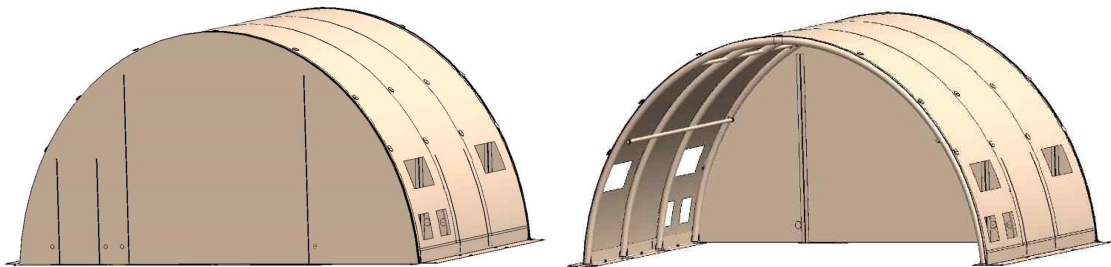


그림 218 2개동 연결형 시추텐트의 단일 섹션 모식도 (각 폭10m × 깊이6m × 높이4.65m)

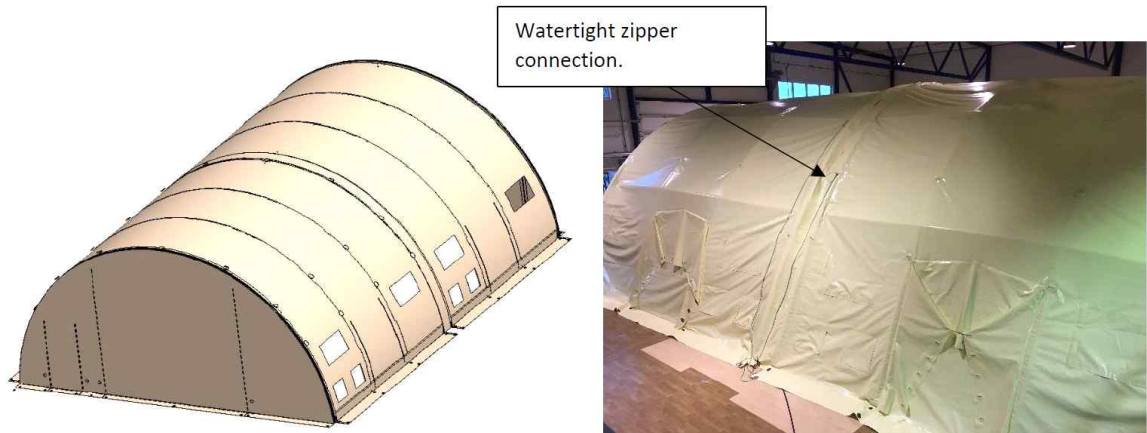


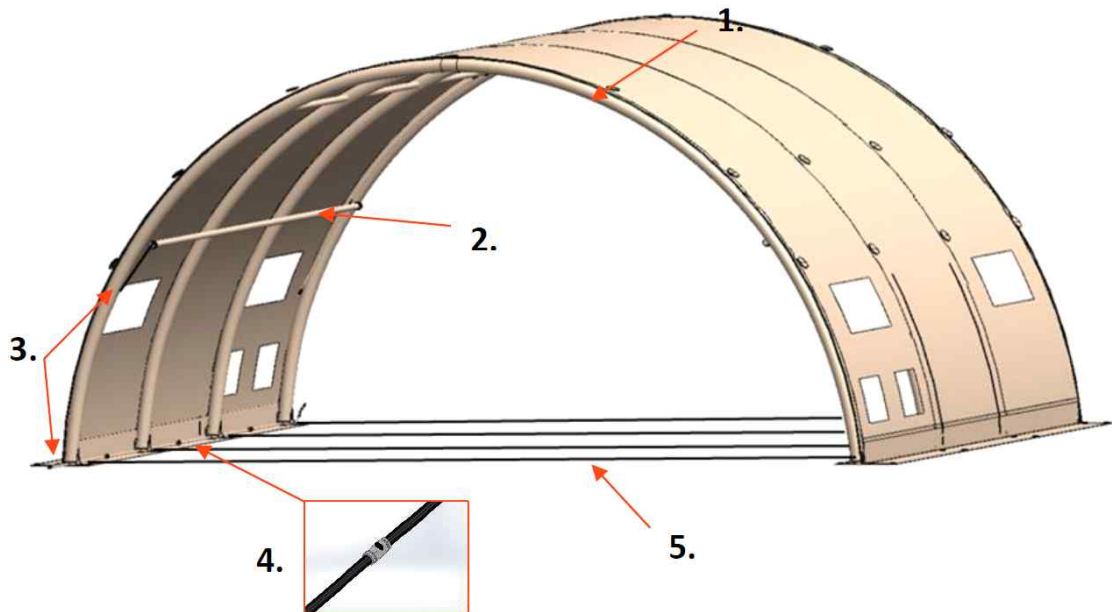
그림 219 방수지퍼로 2개동을 연결한 시추텐트 모식도 (폭10m × 깊이12m × 높이4.65m)

- 텐트의 신속한 설치, 철거를 위해 각 모듈별 에어컴프레서 연결용 퀵 커플링 설치
- 에어빔 최초 팽창 후 지속적인 공기의 공급이 필요 없으며, 에어 튜브 시스템 끝에 부착된 압력표시기를 통해 6~8bar의 작동 압력 표시
- 케이블 및 호스류 입출을 위한 양측 총 8개의 포트 설치, 각 포트는 0.45m x 0.45m 크기의 벨크로 플랩으로 바깥쪽 개폐, 벨크로 플랩/ 토글로 내부 개폐
- 인원 및 소형 장비 입출을 위한 양측 총 4개의 패브릭 지퍼형 출입문 설치. 각 출입구의 크기는 폭 1.7m x 높이 2m 이며, 눈 반이용 탈부착형 도어 밸런스 설치
- 내풍속성 22 m/s, 적설 내하중 25 kg/m², 사용 온도 범위: -45° C ~ +70° C
- 중장비 및 대형 연구장비 입출을 위한 길이 방향 양 끝단에 폭 4.5m × 높이 3.8m 크기의 지퍼 및 벨크로형 메인도어와 폭 1.2m x 높이 2.1m 크기의 패브릭 지퍼형 인원 출입용 도어 설치
- 텐트의 하부 가장자리에 1m 길이의 눈 매립용 밸런스(커튼) 설치
- 텐트 패브릭은 PVC 코팅이 된 방수 및 난연성 폴리에스터
- 얼음나사, 가이로프, 텐트 끝단 밸런스를 활용하여 눈 위에 고정 가능
- 1개동 단위로 개별 포장 가능하도록 전용 PVC백 제공, 1개동의 포장 부피는 1.65m³, 무게는 300kg으로 단일 패키지 경량화

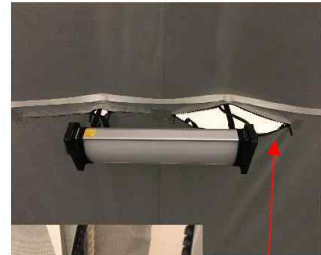
- 드릴 텐트 기술 사양

GRANDE (ONE SECTION)			
Measurements			
Dimensions	Length:	Width:	Height:
	6.0 meter	10.0 meter	4.65 meter
Weight	Approx. 280 kg		
Packing volume	1,26 m³		
Structure			
High Pressure Inflatable Air Beams	Dimensions in diameter of air beams:		
	Main structure:	Ø 150 mm	
	Longitude:	Ø 76 mm	
	Working pressure:	6-8 bar	
Material			
Tent Fabric	Waterproof and flame retardant polyester fabric with double-sided PVC coating.		
Weight	700 - 780 g/m²		
Tear strength	300 N		
Tensile strength	3000 N/5 cm		
Flame retardancy	B-s2/3, d0		
	Cl2		
	GOST Approved		
Water Resistance	>10 000 mm		
Light fastness	≥ 7		
Temperature resistance	-45° C to +70° C		
Performance			
Wind load	Up to 120 km/h (Anchored)		
Snow load	50 kg/m²		

- 드릴 텐트 구조



1.	Main structure	-150 mm/ diameter self-standing high pressure inflatable air beams. The arches are interconnected and have a single inflation point with no need for constant air supply, air source is disconnected when the system is inflated.
2.	Longitude structure	-78 mm/ diameter high pressure tubes. Integrated in the main structure and the tubes are interconnected.
3.	Single filling points for main structure and longitude tubes	-The GRANDE tents is equipped with single inflation points for the main structure and the longitude tubes on the outside of each gable wall, bottom/corner, for easy access regardless of which way the tent is deployed.
4.	Air valves	-Opening/closing valves between each air arc in the main structure, possibility to separate the air to create individual chambers. The entire system is not affected in the event of a damage.
5.	Floor straps	-Flexible straps in the floor section for extra stability.



Opening/closing system
for lighting and cable
distribution

Technical:	
Quality:	TECHMAFLEX FR (T047)
Weight:	170 GR/M²
Composition:	45% PE - 55 % PU
Waterproofness:	> 3000 mm
Fire Standard:	EN 14116
Cleaning:	

그림 220 방수, 단열, 난연 소재의 내부 라이닝과 내부 개폐부(환기구)

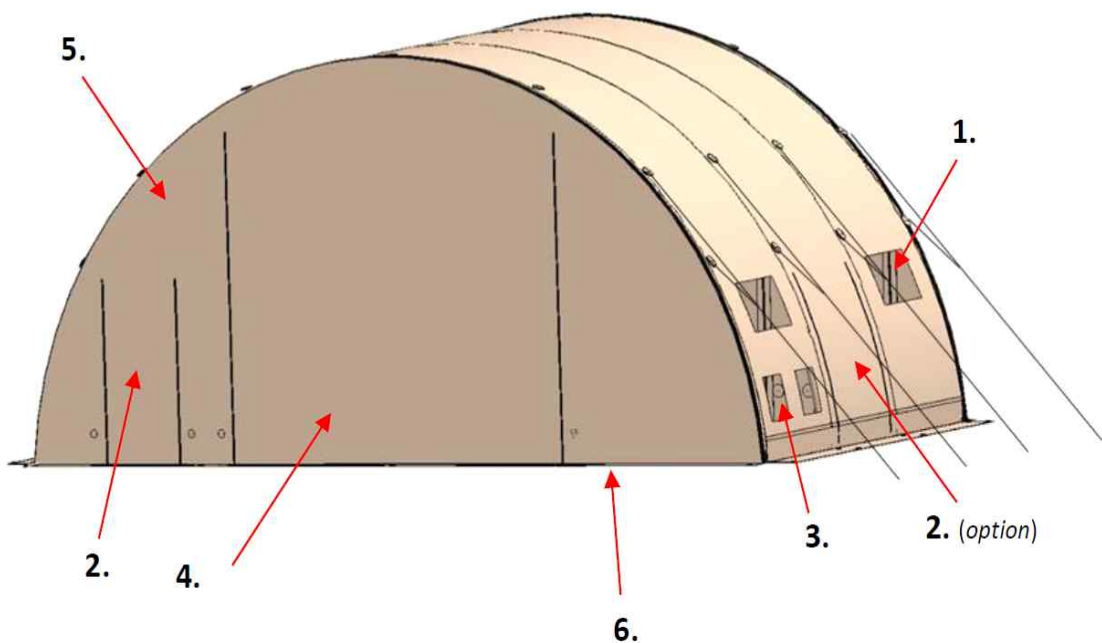


그림 221 드릴 텐트 구성

1.	AC/Heating openings	AC/Heating openings to allow connection of air condition/ heater units and cable openings – two of each side of the section. Size/ opening: Ø 450 mm
2.	Door/opening	Door on removable end-wall with bidirectional zippers, can be rolled up. <i>Option-Door on the side with connection for interconnection to smaller tent units.</i>
3.	Windows	4 windows – Two on each side. Three layer windows: Mosquito net, transparent PVC & PVC-Curtain Size/ window: 118 x 64 cm
4.	Gate	Gate on removable end-wall, equipped with zippers for opening and closing. Size/ gate: 450 x 380 cm (Length x Height)
5.	Removable End-Wall	Removable End-Wall quipped with watertight zipper connection, mounted manually.
6.	Integrated soft floor (option)	The GRANDE Tent can be equipped with integrated PVC Non-Slip floor as an option.

- 드릴 텐트 패키지



그림 222 드릴텐트 전용 PVC 캐링백

나. 플랜트 텐트

- 보일러, 열교환기, 저압&고압 펌프를 포함한 대부분의 열생산 플랜트를 배치할 예정인 플랜트 텐트는 견고한 구조와 다수의 유틸리티 설비 수용을 위한 내부 공간, 중량물 운반&배치를 위한 중장비 접근성, 케이블&호스류 배치 편의성, 직화식 보일러용 배기 포트 등의 사양을 중점 검토

- 상기 사양을 중점적으로 검토한 결과 Weatherhaven 사의 S4 프레임 아치 텐트를 청석호 시추캠프용 플랜트 텐트로 선정 후 맞춤 제작
- 주요 요구 사양
 - 반복적인 설치, 철수, 재배치 작업에 대한 내구성 확보를 위해 견고한 소재의 프레임 적용
 - 프레임과 커버로 구성된 단순 시스템으로 신속한 현장 설치 용이성 확보
 - 환경영향을 최소화하기 위해 설치, 철수 시 발생 가능한 부산물 최소화
 - 열생산 플랜트를 수용하는 텐트로 내화성 확보
 - 내풍속성 22 m/s, 적설 내하중 25 kg/m², 사용 온도 범위: -55° C ~ +55° C
 - 플랜트 텐트 내 장비와 드릴 텐트 내 장비 사이의 케이블 및 호스류의 연결성 확보를 위한 다수의 포트, 직화식 보일러의 발생열 및 배기가스 배출을 위한 지붕 배기(통풍)구 설치
 - 중량물 운반&배치를 위해 현장에서 주로 활용하는 중장비(설상차)의 접근이 가능하도록 최소 3.66m 너비의 액세스 도어 설치
- 플랜트 텐트 구조

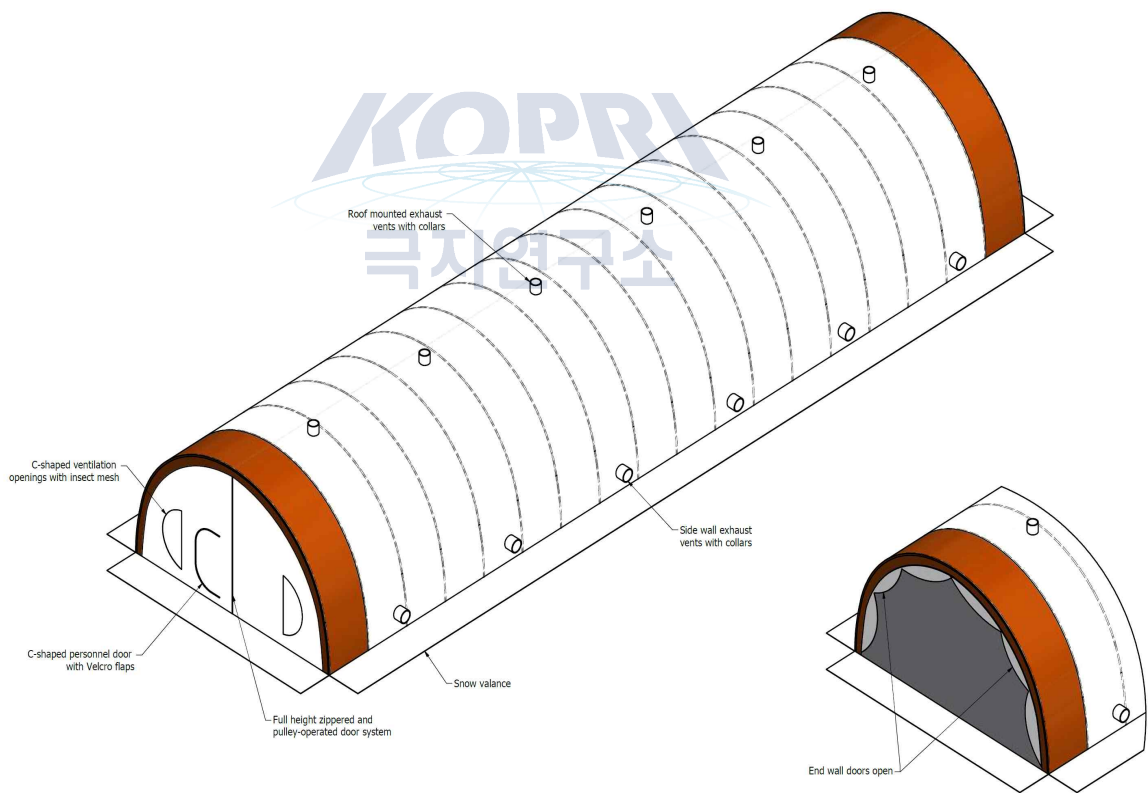


그림 223 플랜트 텐트 모식도

다. 클린 텐트

- 빙저호 접근 메인 시추공의 시추 완료 후 빙저호와 직접 접촉하는 계측 및 샘플링 장비와 회수된 호수 샘플의 전처리에 필요한 청정 환경 확보를 위해 필요 시 드릴 텐트 내부에 휴대용 클린룸 텐트를 설치하여 운영할 예정



그림 225 Monmuth Scientific 사 CleanTent Model 1700

- 클린 텐트는 휴대가 간편하고 현장 설치가 용이한 공기 주입식 모델인 Monmuth Scientific 사의 CleanTent Model 1700으로 선정하였고, 아치형 드릴 텐트 내에서는 클린 텐트 팽창 후 형태 유지용 천장 클립의 고정이 불가능하기 때문에 클린룸 외부지지용 프레임 설치하여 급기팬 전원 차단 시 내부의 장비와 인력을 보호
- 주요 요구 사양
 - 정전기 방지 소재의 그라운드 시트
 - 탈의실과 클린룸으로 내부 공간 구분
 - 자체 조명 설치가 어려운 점을 고려하여 주변 조명을 간접적으로 활용할 수 있는 구조
 - 청정도 유지를 위한 급기-배기 조화를 통한 양압과 수직 또는 수평 방향의 단일방향류 확보
 - 팬필터유닛을 통한 급기량 제어
- 클린 텐트 기술 사양

External Dimensions	6100mm (w) x 3650mm (d) x 2150mm (h)
Gowning Area Dimensions	1200mm (w) x 3650mm (d) x 2150mm (h)
Working Area Dimensions	4900mm (w) x 3650mm (d) x 2150mm (h)
Air Cleanliness	ISO Class 5 Environment
Fan Filter Unit (FFU)	2 x Air Box - 600mm x 1200mm Centrifugal Fan - 230vac 50hz Open Aluminium FFU Mounting Frame
Main Filter	2 x U15 ULPA Filter
Pre-Filter	2 x G4 Filter
Control System	Variable Speed Controller
Construction	Ceiling Fixing Clips and Bungee Cord

○ 빙저호 시추캠프 구축용 연료 확보

- 장보고기지 기 보급 장비의 남극 실증 테스트 및 빙저호 시추캠프 구축·운영 대비 연료 비축을 위해 ISO 20ft 탱크 컨테이너 제작 및 항공유(JET A-1) 20,000L 보급
- ISO 20ft 탱크 컨테이너는 내부에 3중 격벽을 설계하여 남극내륙진출루트를 통한 연료 육상 운송 시 유체의 흐름과 출렁임을 최소화하여 안정성 확보

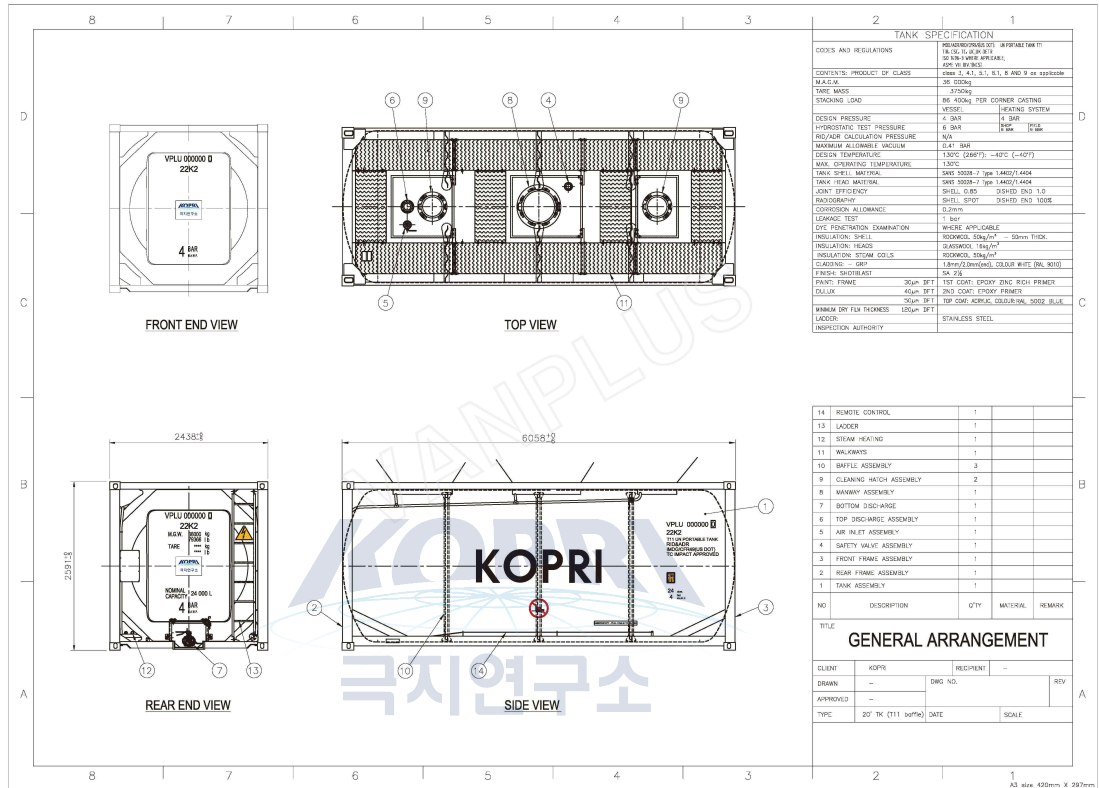


그림 226 내부 3중 격벽이 적용된 ISO 20ft 탱크컨테이너 설계도면

◦ 빙저호 시추캠프 구축용 ISO 20ft 탱크 컨테이너 기술사양

GENERAL SPECIFICATION UN T11 PORTABLE TANK CONTAINER

April, 2024

Recipient	KOPRI	Serial No.	TBD
-----------	-------	------------	-----

1. General Parameters

- 1.1 Type of product : 20ft ISO tank (1 CC) – T11 IMDG (Full frame type)
- 1.2 Nominal capacity : 24,000 Liters (±1%)
- 1.3 Tare weight : 3,750 kgs (±3%)
- 1.4 Max. gross weight : 36,000 kgs
- 1.5 Pressure & Temperature range
 - MAWP : 4 bar
 - Hydrostatic test pressure : 6 bar
 - Design temperature range : -40°C to +130°C
- 1.6 Dimensions : 6,058mm x 2,438mm x 2,591 mm (L x W x H)
- 1.7 Design code : ISO 1496, IMDG, ADR, RID, ASME VIII DIV.1, UN T11
- 1.8 Approvals : CSC, UIC, TIR

2. Tank Detail

- 2.1 Shell
 - Material : SANS 50028-7 : 1.4402/1.4404, equiv. to 316L
 - Surface treatments : Cold rolled 2B
- 2.2 Ends
 - Material : SANS 50028-7 : 1.4402/1.4404, equiv. to 316L
 - Surface treatments : Hot or Cold rolled and polished
- 2.3 Stiffening ring : Not fitted.
- 2.4 Baffle : Three V-shape bended baffles, 3.0mm thick stainless steel(Grade 316L) are welded inside the tank.
- 2.5 Radiography : As per code requirements.
- 2.6 Steam heating : 8 longitudinal runs steam heating system on barrel.
1" BSP inlet, 1" BSP outlet both with captive caps and cable.
- 2.7 Insulation
 - Shell : Rockwool (50kg/m³) 50mm thick on aluminium foil.
 - Ends : Glasswool (16kg/m³) thickness to suit aluminium foil.
- 2.8 Cladding
 - Shell : 1.8mm GRP White (RAL 9010) with lapped joints.

1 / 3

< ISO 20ft 탱크 컨테이너 기술사양-1 >

Ends : 2.0mm thick GRP one piece end (RAL 9010).

3. Frame Detail

- 3.1 Type : Full frame beam design ISO 1496/3 (1CC).
- 3.2 Material : SPA-H or equivalent.
- 3.3 Corner casting : ISO 1161 8-off in total.
- 3.4 Top rails : Integral in frame design.
- 3.5 Protection
 - Top : 4-off per tank, 1 per corner on top rail and header
 - Bottom : Raised bottom rail, lowered front and rear sill.
- 3.6 Ladder : 300mm wide stainless steel 304 ladder fitted to the rear end right hand side.
- 3.7 Walkway : 2-off full length longitudinal and 4-off transverse 475mm wide aluminum type (Double "B" type).
- 3.8 Earthing connection : 1-off Stainless steel lug fitted to rear end bottom of frame.
- 3.9 Painting : Carbon steel shotblasted to SA 2½ profile.

First layer	Epoxy zinc rich primer	30 microns
Second layer	Epoxy primer	40 microns
Final layer	Acrylic	50 microns
Total		120 microns
Color	: Blue (RAL 5002)	

4. Components

- 4.1 Manhole : 1-off dia. 500mm, 8 point brass alloy wing nuts and TIR-locking. Composite seal with PTFE outer encapsulating EPDM inner.
- 4.2 Cleaning hatch : 2-off dia. 300mm, 4point brass alloy wing nuts and TIR-locking. Composite seal with PTFE outer encapsulating EPDM inner.
- 4.3 Safety relief valve : 1-off 3" flanged pressure relief valve with flameproof gauze.
- 4.4 Air inlet ass'y : 1-off 1.5" ball valve terminating with 1.5" BSP connection and cap.
- 4.5 Top discharge : 1-off 3" stainless steel tank pad fitted with a blind flange.
- 4.6 Bottom discharge : 1-off 3" 45° Footvalve and 3" clamped butterfly valve terminating with a 3" BSP spigot with cap and chain.
- 4.7 Remote control : A plastic coated stainless steel cable is fitted to the

-
- entire length of the right hand side of the tank.
- 4.8 Fusible Link : Not fitted.
- 4.9 Spillbox : 3-off 2.0mm stainless steel 304 boxes fitted.
Stainless steel lids fitted.
- 4.10 Bottom valve cabinet : One stainless steel 304 1.5 mm thick cabinet is fitted.
Stainless lid and bottom plate fitted.
- 4.11 Thermometer : Not fitted.
- 4.12 Document holder : 1-off clear plastic document holder is fitted to the rear
right hand side beam.

5. Marking

- 5.1 Decals : One set per tank as per code requirements.
- 5.2 Data plate : One set of stainless steel data plates are provided
stating the requirements as per the code.
- 5.3 Calibration plate : Calibration plate marked in cm/litres is fitted on the front
spillbox side wall adjacent to the manhole.

*Attachment : General Arrangement dwg.



Date : _____

Approved by : _____

< ISO 20ft 탱크 컨테이너 기술사양-3 >

- 장보고기지로부터 D2 빙저호 시추캠프까지의 인원 및 장비 운송에 필수적인 설상차 운행과 빙저호 시추탐사 장비 가동을 위한 공통 연료(항공유, JET A-1) 20,000L 구매 후 ISO 20ft 탱크 컨테이너에 충전하여 쇄빙연구선 아라온을 활용해 장보고기지 보급 완료

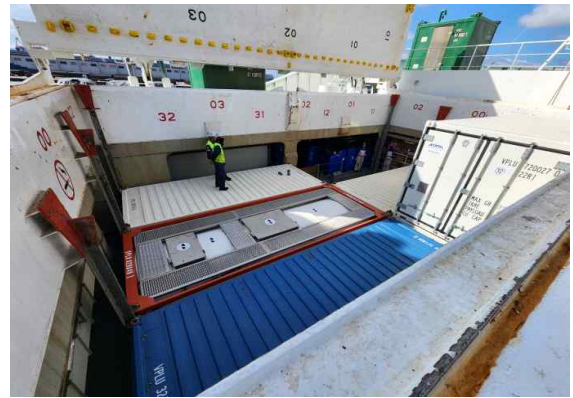


그림 227 항공유(JET A-1) 20,000L 충전 후 아라온 선적 완료한 ISO 20ft 탱크 컨테이너

○ 시추캠프 현장 배치(안)

- 캠프의 배치 방향은 청정도를 철저히 관리해야 하는 드릴 텐트와 그 주변 지역, 그리고 열수시추용 용수 생산에 사용되는 주변 눈의 청정도를 확보하는데 매우 중요한 요소임
- 청석호(D2 빙저호) 지역에서 수집한 자동기상관측시스템(AWS) 자료 분석 결과 이 지역의 연중 주풍향은 남서풍이기 때문에 드릴 텐트는 보일러, 발전기, 중장비 배기 및 기타 연구자 캠프 활동 등의 잠재적인 오염물질 발생장치로부터 떨어진 남서쪽에 배치
- 발전컨테이너 모듈, 청정실험실 모듈, 멸균시스템 모듈, 호스릴 모듈 등 기 제작 완료한 독립형 컨테이너화 장비는 화물선클레에 상차하여 시추캠프로 운송하여, 드릴 텐트와 플랜트 텐트에 배치되는 장비와의 연결성을 고려하여 배치

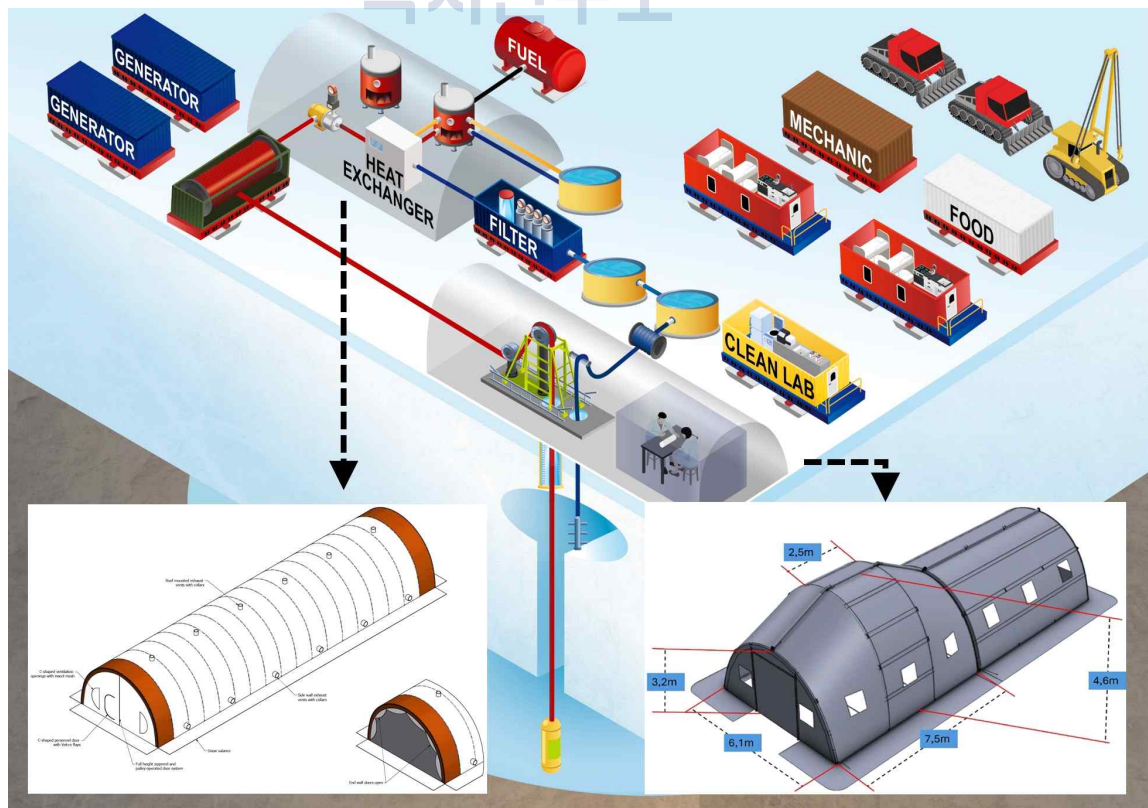


그림 228 청석호(D2 빙저호) 시추캠프 레이아웃

2-3. 심부 빙저호 열수시추기 국제 공동 개발

○ 보일러&순환시스템 개발

- 보일러&순환시스템 개발에 필요한 구성 요소 분석을 통한 시스템 설계 완료
- 1차 가열라인, 보일러 배기 폐열 회수라인, 청정도 유지 시추라인용 순환장치(저압&고압 펌프) 3종 10대 도입을 완료하였으며, 사급 예정 장비(워터히터, 수중펌프, 엄빌리컬) 외 보일러&순환시스템 통합 및 모니터링 시스템 구축 비용 산정 완료

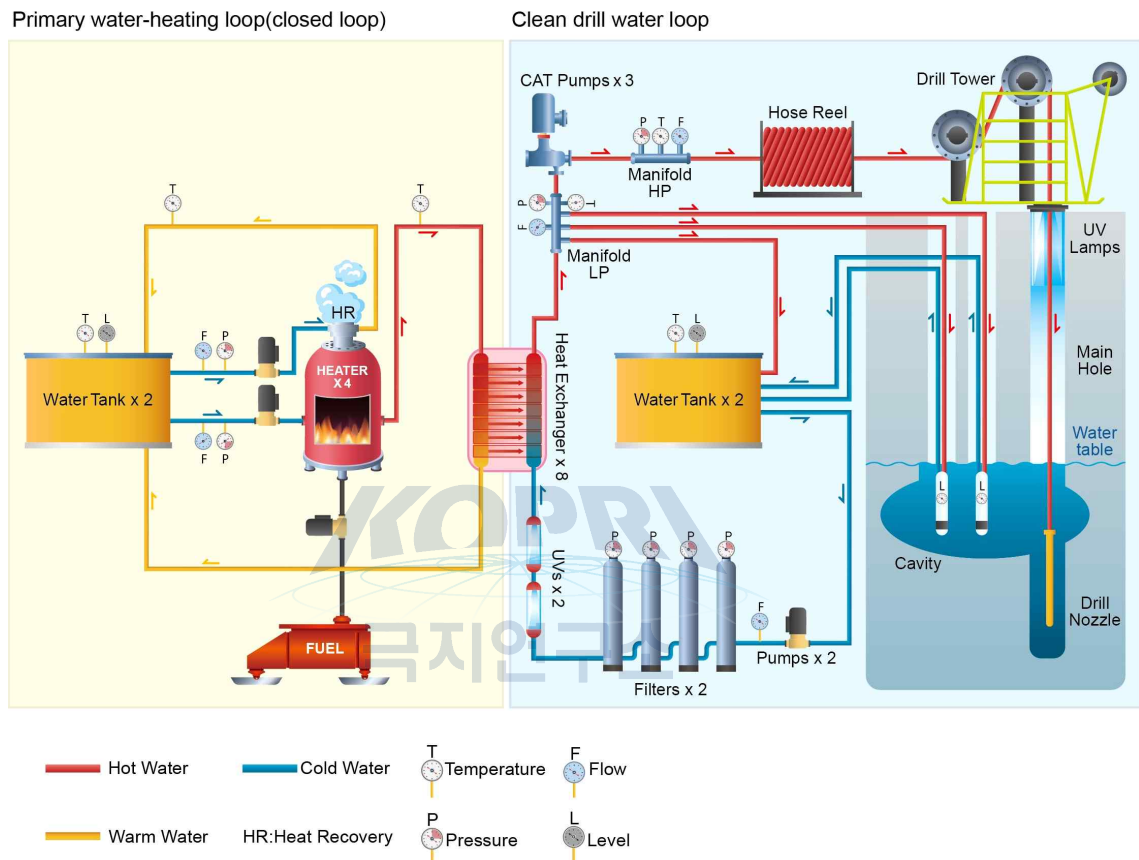


그림 229 D2 빙저호 청정열수시추 시스템의 물순환 개략도

- D2 빙저호 청정열수시추 시스템은 깨끗한 시추수가 순환하는 시추 루프와 잠재적 오염 가능성이 있는 열생산 플랜트로 구성된 가열 루프 두 파트로 구성
- 시추수의 오염 위험을 줄이기 위해 열생산 플랜트에서 발생된 열은 물의 직접 혼합 없이 스테인리스스틸 판형 열교환기를 통해 간접적으로 루프 간에 전달되도록 설계
- 가열 루프는 독립적으로 순환하는 폐쇄 시스템으로 순환 펌프를 통해 물저장 탱크에서 15~20℃의 온수를 두 대의 보일러로 공급, 직화식 히터에서 열에너지를 얻어 90~95℃로 가열 루프의 물은 판형 열교환기에서 시추 루프의 청정수에 열에너지를 전달하고 15~20℃ 수준으로 냉각되어 물저장 탱크로 돌아가는 순환을 계속 수행
- 가열 루프를 구성하는 순환펌프, 히터, 열교환기는 모두 듀얼 시스템으로 설계하여 시추 작업 중 한 세트에 문제가 발생하더라도 시추 성능에 영향을 미치지 않으며, 시추 작업의 중단 없이 유지보수를 수행할 수 있음

- 직화식 히터에서 발생하는 배기열을 활용하기 위해 물저장 탱크-순환펌프-배기열 회수 장치-물저장 탱크의 경로를 지속적으로 순환하는 배기열 회수 루프 설계
- 시추 루프는 두 개의 물저장 탱크에 저장된 물을 사용하는 순환으로 순환 펌프를 통해 4단계 입자필터와 2단계 UV 살균 램프로 구성된 멸균시스템에 물을 공급, 여과/ 살균된 물은 스테인리스 스틸 판형 열교환기를 통과하며 가열 루프의 순환수로부터 열을 전달 받아 90℃로 가열된 후 저압 매니폴드에서 일부 분배되어 물저장 탱크/ 엄빌리컬/ 캐비티/ 수중펌프를 얼지 않게 유지하는데 사용. 그 외 대부분의 청정 열수는 고압 펌프를 거쳐 2,700m 길이의 드릴 호스를 통과해 드릴 노즐에서 고압 분사되어 빙저호로 접근하기 위한 구멍을 뚫는데 사용
- 드릴 노즐에서 분사된 메인홀의 시추수 중 일부는 해빙수와 함께 캐비티로 역류하고, 캐비티 수중에 배치된 수중 펌프를 통해 설상의 물저장 탱크로 펌핑되는 순환을 계속 수행
- 시추 루프의 구성 요소 대부분 스테인리스스틸 소재로 설계하였으며, 순환 펌프와 멸균 시스템은 가열 루프와 마찬가지로 듀얼 시스템으로 설계하여 시추 작업 중 한 세트에 문제가 발생하더라도 시추 성능에 영향을 미치지 않으며, 시추 작업의 중단 없이 유지보수를 수행할 수 있음
- 보일러&순환시스템 구성 요소
 - 물저장 탱크
 - 30,000L 용량의 식품 등급 PVC 코팅 폴리에스터 패브릭 탱크
 - 약 10℃ 이상으로 유지되는 물탱크 저장수의 온도로 인해 눈 표면이 녹아 물탱크가 가라앉는 것을 방지하기 위하여 최소 50mm 두께의 에타폼 단열재(그라운드 시트) 위에 물탱크 배치
 - 가열 루프 순환수 저장용 1개, 시추 루프 순환수 저장용 2개, 총 3개의 물저장 탱크 설계



그림 230 영국 Structure-flex 사의 30,000L Open top tank

◦ 저압 펌프

- 가열 루프의 물 순환을 위한 저압펌프는 습식 파트가 스테인리스스틸 소재로 구성되어 있는 Grundfos 사의 입형 다단펌프(CR 15-5 AFAE-HQQE)를 채택. 6대 도입 완료
- 열교환기와 히터가 효율적으로 작동할 수 있도록 충분한 압력과 유량을 제공(각 펌프의 일반적인 설정점은 670kPa 압력에서 유량 110L/m)
- 가열 루프 내 히터 배기열 재활용을 위한 배기열 회수용 저압펌프는 Ebara 사의 횡형 펌프(MATRIX 5-3T6) 채택. 2대 도입 완료
- 가열 루프 순환용 입형 다단펌프 2대, 배기열 회수용 횡형펌프 1대를 1세트 구성으로, 듀얼시스템(2세트)을 알루미늄 팔레트 썰매 1대에 설치하여 저압펌프를 모듈화



CR 15-5 A-F-A-E-HQQE

제품 번호	96501896	임펠러	스테인레스강
연결 코드	F	MEI 3%V	0.70
펌프 하우징	주철	모델	A
상	3	모터 보호	PTC
P2	4kW	모터 타입	112MC
효율등급	IE3 88.1%	n	2920-2940rpm
IE 효율 등급	IE3	펌프 토출	DN 50
압력 등급	PN 25	p 최대	16bar
샤프트 실	HQQE	외함보호	55
U	380-415DV	등급	Dust/Jetting
최대 주위 온도(t max amb)	60°C	펌프 입입	DN 50
재질 코드	A	절연	F
펌프 버전	A	플랜지 표준	DIN
효율 1/1	88.1%	핀란드어 (VI) 번	4925435
정격 유량	17m³/h	덴마크 VVS	385904351
정격 양정	55.4m	번호	
	7.9A	스웨덴 RSK No.	5823476
최고 유체 온도	120°C		



그림 231 가열 루프 순환펌프 - Grundfos 사의 CR 15-5 AFAE-HQQE 모델사양



기술자료

- 유체온도 : -15°C 부터 +85°C 까지 (스탠다드)
-15°C 부터 +110°C 까지 (TE버전)
- 최대사용압력 : 10bar
- 최대염소함유량 : 500ppm
- 자체환기 2극 비동기식모터
- 절연등급 F
- 보호등급 IP55
- 220-230V ±6%, 60Hz 단상,
220/380-460V -6%+10%, 60Hz 삼상
- 흡입구 : MATRIX 3 G1, MATRIX 5 G1½, MATRIX 10 G 1½, MATRIX 18 G2
- 토출구 : MATRIX 3-5 G1, MATRIX 10 G1½, MATRIX 18 G1½
- G1 : 25mm G1½ : 32mm
- G1½ : 40mm G2 : 50mm

재질

- Pump body, impeller, intermediate stages, casing cover and shaft(part in contact with the liquid) in AISI 304
- Mechanical seal in Carbon/Ceramic/EPDM
- Bracket in EN AB-AISI11Cu2(Fe) (Die cast Aluminium)

그림 232 가열 루프 순환펌프 - Grundfos 사의 CR 15-5 AFAE-HQQE 모델사양

◦ 워터 히터

- 청석호 시추캠프는 해발고도 약 2,000m 수준으로 이 높이에서 예상되는 워터 히터의 출력 감소(약 20%)를 감안하여 총 난방용량은 최소 1.0MW 로 설계
- 대당 최대 350kW 정격 출력을 제공하는 워터히터 5대를 설계하여 1.4MW의 난방용량을 확보
- 스틸 프레임, 스테인리스스틸 이중 코일, 버너, 연료탱크 구조의 단순한 입형기름보일러 타입
- 저온 환경에서 안정적인 활용 및 유종 단일화를 위해 인해 연료는 디젤(항공유, JET A-1)

- 동급 워터 히트의 평균 연료소모량은 약 0.5~0.6 L/min
- 온도 컨트롤러 및 저유량 차단 스위치/ 알람 장착
- 배기열 회수를 위해 워터히터의 배기구에 배기열 회수 장치 설계(핀형 열교환기를 통해 배기 온도를 400℃에서 200℃ 이하로 절반 수준으로 낮춰 약 10~15kW의 열에너지 회수 가능)
- 가열 루프의 히터 2대, 형 다단펌프 2대, 배기열 회수용 횡형펌프 1대를 열생산 플랜트 1세트 구성하여, 듀얼시스템(2세트)으로 설계
- 워터히터 모델로는 Alkota 사의 1060 모델 도입 검토 중
- Alkota 사의 1060 모델 기술 사양

Parameter	Specification	Note
Type	Oil fired vertical water heater	
BTU' S	> 1,200,000 BTU' s	
Pressure	Minimum 100 PSI inlet pressure required for 10 GPM Flow Rate	
Fuel Consumption	10 Gallons per Hour of Fuel Oil (Kerosene, Diesel #1)	
Controls	On/Off Switch with Flow Switch and Adjustable Temperature Control	
Dimensions	36" L x 30" W x 64" H	
Weight	≤ 1,100 Lbs	
Wheels	Stationary	
Optional	Hour Meter	
	220V 50 Hertz Voltage	
	27 Gallon Fuel Tank	



그림 233 Alkota Model 1060 외관(좌), 열교환기 타입의 배기열 회수장치(중, 우)

◦ 판형 열교환기

- 여러 겹의 구리 브레이징 316 스테인리스스틸 강판과 가스켓 집합 구조

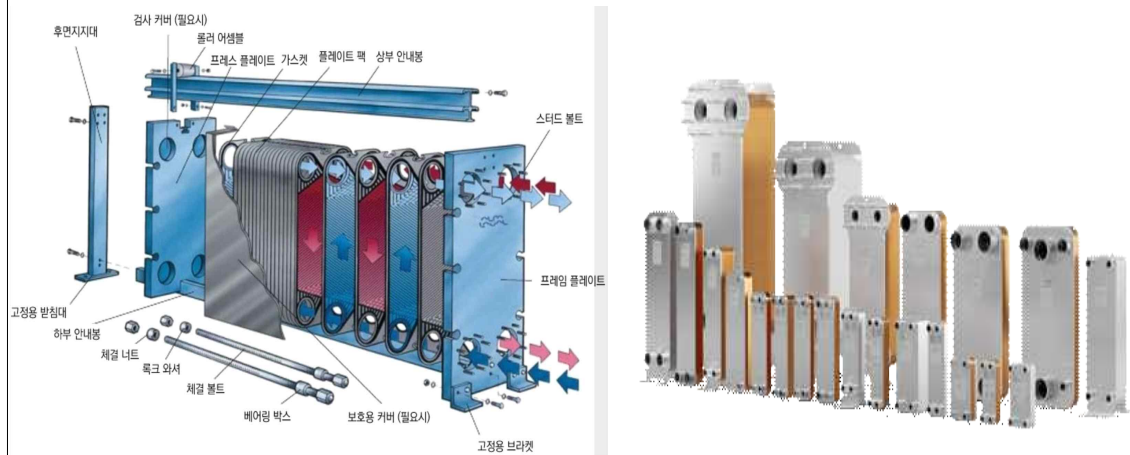


그림 234 판형 열교환기 구조 및 시판 형태

- 열교환기의 열전달 용량은 가열루프의 워터히터에서 나온 90-95℃의 열수가 열교환기를 통과하며 >20℃로 냉각(유량 12L/min)되고, 드릴루프에서는 멸균유닛을 통과한 약 10℃의 온수가 열교환기를 통해 90℃ 수준으로 가열(유량 109/min)될 수 있도록 약 613kW로 설계
- 효율적인 유지보수와 운영 안정성 향상을 위해 열교환기는 대용량 단일 구조가 아닌 소용량 다중 구조(4개 1세트*2세트) 및 듀얼 시스템으로 설계
- 시추수가 통과하는 열교환기 라인의 배관, 밸브 및 연결부는 최대 작동 압력 1MPa 급의 1.5인치 스테인리스스틸 위생 클램프와 1.5인치 식품 등급의 저압 호스로 설계
- 압력 제어를 위한 릴리프 밸브 설계
- 알루미늄 팔레트 썰매 위에 설치하여 모듈화

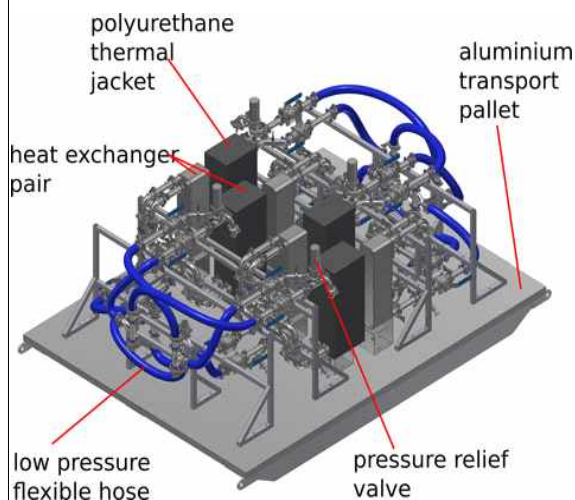


그림 235 판형 열교환기 팔레트 모듈

- 고압 펌프
 - 시추수 공급 압력 및 유량 7,000~9,000kPa, 최대 160L/min 용량 설계
 - 스테인리스스틸 소재, 고압설 구조로 90℃ 이상 고온수 사용 가능
 - VFD 제어, 맥동댐퍼, 릴리프밸브, 압력조절밸브, 압력게이지 탑재
 - 생물학적 오염을 방지를 위한 예방 장치로 Biocide dosing pump 설계
 - 공동현상(cavitation) 및 과부하로 인한 펌프의 손상 방지를 위해 흡입 유량은 350kPa (3.5bar) 이하로 셋팅하여 운영
 - 효율적인 유지보수와 운영 안정성 향상을 위해 2대만으로 목표 유량(160L/min) 유지가 가능하도록 유량 80L/min 급 고압펌프를 채택하고 예비펌프 1대를 추가하여 총 3대 설계
 - 필요한 경우 2대의 펌프로 시추에 필요한 유량을 유지하면서 시추 작업에 영향을 미치지 않고 펌프 유지보수 가능
 - 고압펌프는 영국의 Ellsworth 시추프로그램에서 성능과 내구성이 입증된 CAT pump 사의 CAT3521C 의 개량 모델인 3521CHS 모델 중 FPM 엘라스토머 씬을 적용하여 최대 149℃ 까지 사용가능한 3521CHS.0770 채택 후 2대 도입 완료
 - 3대 도입 완료 후 알루미늄 팔레트 쉘매 위에 설치하여 모듈화 예정

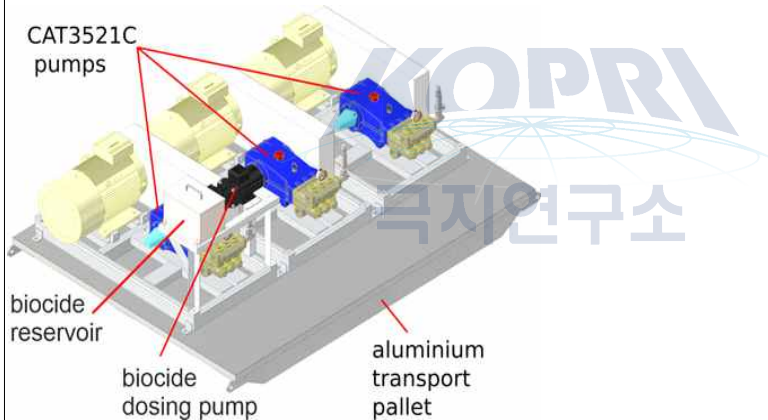


그림 236 판형 열교환기 팔레트 모듈

SPECIFICATIONS	U.S. Measure	Metric Measure
Flow	25 gpm	94.6 lpm
Pump Pressure Range	100–2000 psi	6.9–138 bar
Pump RPM*	870 rpm	870 rpm
Inlet Pressure Range	Flooded to 70 psi	Flooded to 4.8 bar
Max. Liquid Temp. (NBR)	160° F	71° C
Alternative seals available for higher temperatures up to 200° F		
Bore	1.260"	32 mm
Stroke	1.890"	48 mm
Crankcase Capacity	4.2 qts	4 l
Inlet Ports (2)	1½" NPT (F)	1½" NPT (F)
Flush Ports (2) "C"	¼" NPT (F)	¼" NPT (F)
Discharge Ports (2)	1" NPT (F)	1" NPT (F)
Shaft Diameter	1.378"	35 mm
Pulley Mounting	Either Side	Either Side
Weight	139 lbs	63 kg
Dimensions	24.33 x 18.11 x 9.72"	618 x 460 x 247 mm

*Pump minimum is 100 RPM.

< Flushed Stainless Steel 3521CHS 기술 사양 >

◦ 수중 펌프 및 엄빌리컬

- 드릴 노즐을 통해 분사되는 시추수와 시추 과정에서 발생하는 해빙수의 재활용을 위해 Cavity 안(수중)에 배치가 가능한 수중 펌프 설계
- Cavity와 설상의 순환부(저압 매니폴드, 시추 루프용 물저장 탱크) 사이의 연결을 담당하는 엄빌리컬은 수중펌프에 전력을 공급하기 위한 H07RN-F 3상 전력 케이블, cavity 저장수를 회수하기 위한 내경 1.25인치의 열가소성 리턴 호스, 그리고 cavity 및 관련부의 동결방지를 위해 저압 매니폴드로부터 cavity로 열수를 공급, 측면 분사하기 위한 내경 0.75인치의 열가소성 호스+스프레이 블록 매니폴드 결합체로 설계

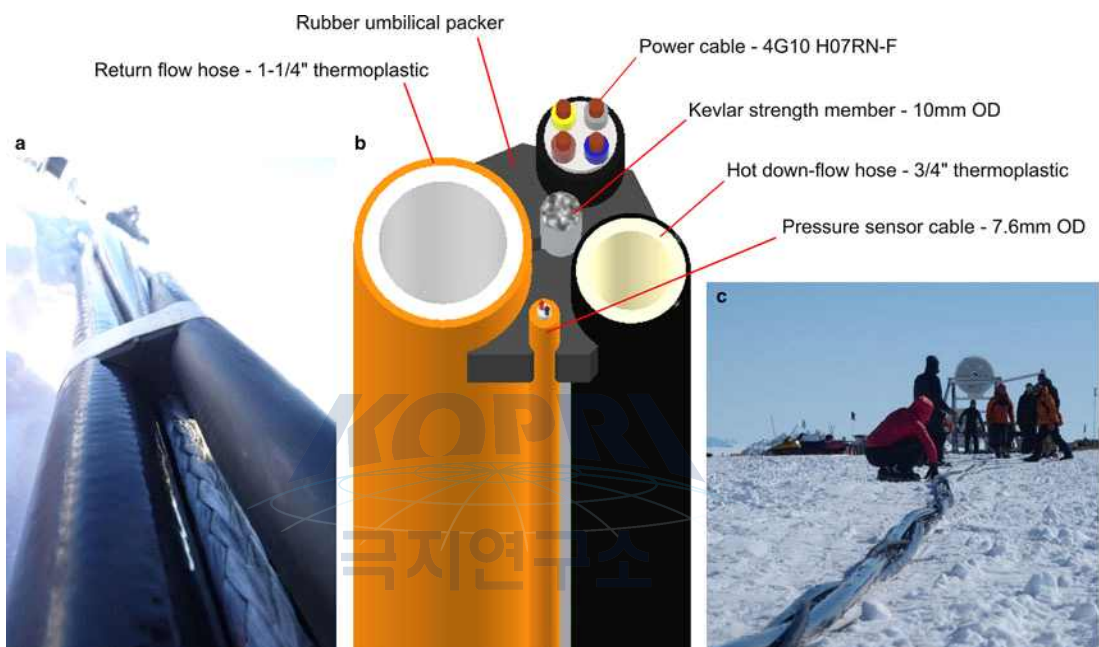


그림 237 BEAMISH 시추프로그램용 umbilical 구조 및 운용방법

- 수중 펌프는 영국의 BEAMISH 프로그램을 통해 성능과 내구성이 입증된 Caprari 사의 E6XDB25/40 다단계 원심 펌프를 채택



TECHNICAL DATA SHEET



Customer:	Ahreuk			Ref.:	New Contact for Artic Project		
Item	1	Quantity	1	Required flow	-	Required head	-
Type	SUBMERSIBLE ELECTRIC PUMP			Model	E6XDB25/40+MAC612A-8V		

OPERATING LIMITS			CONSTRUCTION CHARACTERISTICS		
Pumped liquid	Water		Delivery diameter	G2 1/2	-
Max temp. of pumped liquid (*)	30	°C	Maximum overall diameter	145	mm
Maximum density	1	kg/dm³	Type of Impeller	Radial	
Maximum viscosity	1	mm²/s	Number of stages	40	
Maximum solid content	300	g/m3	Motor seal	Mechanical	
Maximum submersion	150	m	Type of installation	Vertical	
Maximum number of starts/hr	20		Moment of inertia	0.00772 Kgm²	
Maximum operating time with port closed and pump submersed	3	min	WEIGHTS		
			Pump weight	14	Kg
Minimum immersion depth	362.5	mm	Weight of submersible motor	47.7	Kg
			Weight of electric pump	61.7	Kg

OPERATING CHARACTERISTICS					ELECTRIC MOTOR CHARACTERISTICS			
Service flow rate		-		-	Brand		Caprari	
Service head		-		-	Model		MAC612/3A-8	
Qmin	Qmax	3.6	9.4	m³/h	Nominal power		9.2	kW
H (Q=0)		434.9	407.7	m	Rated frequency		50	Hz
Power consumption at duty point		-		-	Rated voltage		400	V
Maximum power consumption		9		kW	Nominal speed		2900	1/min
Pump efficiency		-	-	-	Rated current		20.7	A
Max. pump efficiency (B.E.P.)		68		-	No. Poles		2	
NPSH required		-		-	Type of motor		3 ~	
Rotation speed		~ 2900		1/min	Efficiency 4/4 - 3/4		81 - 78.3 %	
Sense of rotation (**)		Anticlockwise		-	Power factor 4/4 - 3/4		0.79 - 0.724	
Tolerance according to standard		ISO 9906:2012 3B		-	Insulation class		n.d.	
MEI		M.E.I. ≥ 0.40		-	Is/In – Ts/Tn		4.2 - 0.9	
Impeller diameter		-		-	Type of starting		D	
Number of pumps installed		Operating		Stand-by	Protection class		IP68	
		1		0	Number of motor output cables		3	
					Service Factor		1	
Certified motor for use with drinking water								

PUMP MATERIALS		MOTOR MATERIALS	
Impeller	Technopolymer	Shaft	Stainless steel
Intermediate bearing	Stainless steel	Sand guard	Rubber
Shaft bearing bush	Rubber	Rotor	Electrical steel
Diffuser	Technopolymer	Stator	Electrical steel
Valve casing	Stainless steel	Stator shell	Stainless steel
Conical valve	Stainless steel	Winding	PVC insulated copper
Strainer	Stainless steel	Lower bracket	Cast iron
Shaft	Stainless steel	Mechanical seal	Silicon carbide/silicon carbide
Coupling	Stainless steel	Bearing	Graphite
Defender®	-	Thrust-bearing	Brass/Synthetic compound
Cooling jacket	Stainless steel	Thrust-bearing foot slip	Cast iron
Suction support	Stainless steel	Diaphragm	Rubber
Shaft sleeve	Allumina	Diaphragm cover	Technopolymer
Cable guard	Stainless steel	Upper bracket	Cast iron
Screw	Stainless steel	Bolts	Stainless steel
Bolts	5a6703d7-6565-4f8e-9b6f-		

Notes:	(*) Speed of the water outside the jacket of the motor v=0.5 m/s		
	(**) View from delivery port		
	In case of VSD operation, refer to Use and Maintenance Instructions of the electric pump.		
OFFER No. 24-I11BD-2078		Pos. 1.1	Date 12/08/2024

CAPRARI S.p.A. reserves the right to make changes to improve its products at any time and without any notice. Indicative performances and dimensions. - Copyright © 2016-2023 Caprari S.p.A. - All Rights Reserved.

< Caprari 사의 E6XDB25/40 수중펌프 기술 사양 >

- 드릴이 빙저호에 도달했을 때 cavity 수위 변화를 감지하기 위해 cavity 내 엄빌리컬 끝단에는 수위 센서 설계
- 수중펌프 1대, 엄빌리컬 1라인을 1세트로, 이 1세트 만으로 충분한 물을 설상의 물저장탱크로 회수할 수 있도록 설계
- 한 세트에서 고장이 발생하더라도 시간 작업이 중단되지 않도록 듀얼시스템으로 설계
- 길이 약 300m, 무게 약 1톤인 엄빌리컬 라인을 cavity로 전개, 회수하는 작업 시에는 기계작한 드릴 캡스턴 타워에 장착된 지브&롤러와 설상차 크레인, 반달형 롤러 시브 사용

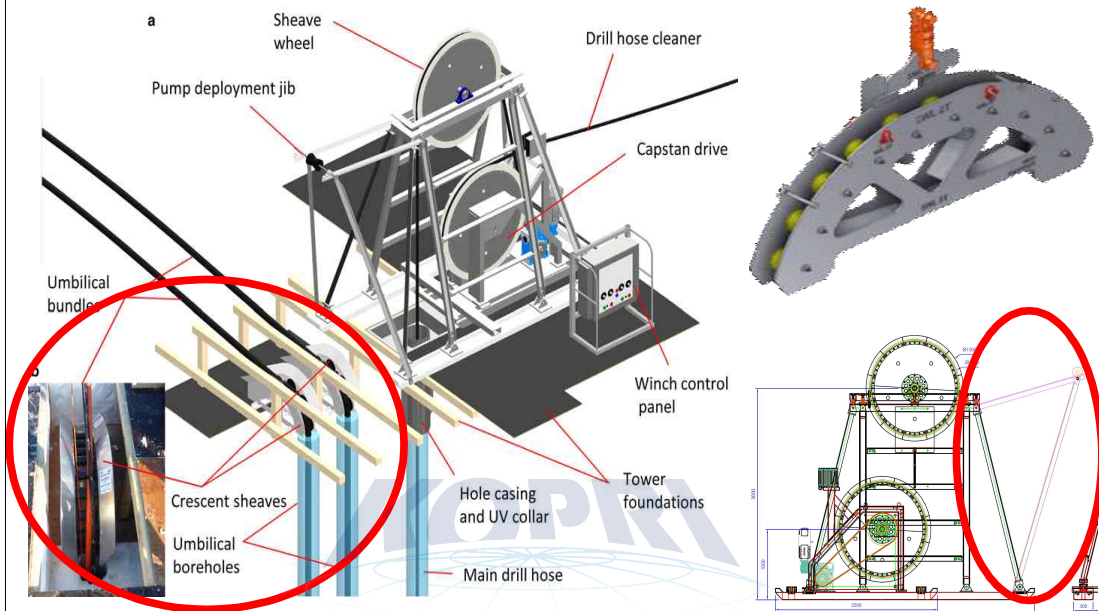


그림 238 엄빌리컬 설치, 회수를 위한 지브&롤러, 반달형 롤러 시브

- 보일러&순환시스템 통합 및 모니터링 시스템 구축 비용

견 적 서

제출처 : 극지연구소 귀하

2024년 08월 13일

공 사 명	남극과학기지 열수발생장치 제작
열수발생장치 제작	₩169,529,344
전기콘트롤장치	₩84,516,598
계	₩254,045,942
VAT	₩25,404,594
합 계	₩279,450,536

상기와 같이 견적서를 제출합니다.

회 사 명 : 공익 E N G
주 소 : 경기도 안산시 단원구 별망로555 209호

대 표 : 김 태 인
전 화 번 호 : 031-409-0135
F A X 번 호 : 031-417-8977



첨부서류 : 견적내역서 / 작업내용

* 배관보온제외

< 보일러&순환시스템 통합 및 모니터링 시스템 구축 견적-1 >

품 명	규 격	단위	수량	재 료 비		노 무 비		합 계		비고
				단가	금액	단가	금액	단가	금액	
1. 보일러및 열교환기장치제작/보온작업										
열교환기	DHW03H	UNIT	8	8,450,000	67,600,000	0	0	8,450,000	67,600,000	
스텐판 2B판	2440*1220*3T	장	12	680,000	8,160,000	0	0	680,000	8,160,000	
스텐각파이프	50*50*3T	본	12	132,400	1,588,800	0	0	132,400	1,588,800	
스텐각파이프	30*30*2T	본	8	78,200	625,600	0	0	78,200	625,600	
스텐 c 형강	100*50*6T	본	12	432,000	5,184,000	0	0	432,000	5,184,000	
스텐앵글	50*50*6T	본	4	138,400	553,600	0	0	138,400	553,600	
알곤용접봉	308*2.4파이	통	6	142,000	852,000	0	0	142,000	852,000	
3M연마석	4"	개	30	4,500	135,000	0	0	4,500	135,000	
3M절단석	5"	개	20	6,500	130,000	0	0	6,500	130,000	
필레이퍼	4"-#220	개	20	5,400	108,000	0	0	5,400	108,000	
필레이퍼	4"-#120	개	20	5,400	108,000	0	0	5,400	108,000	
필레이퍼	4"-#80	개	20	5,400	108,000	0	0	5,400	108,000	
베벨브라운	4"	개	30	5,000	150,000	0	0	5,000	150,000	
압력스위치	15A	개	8	42,100	336,800	0	0	42,100	336,800	
압력계	10K-100MM	개	10	14,800	148,000	0	0	14,800	148,000	
스텐장면니플	32A	개	12	2,840	34,080	0	0	2,840	34,080	
스텐장면니플	15A	개	14	1,350	18,900	0	0	1,350	18,900	
스텐소켓	15A	개	16	2,410	38,560	0	0	2,410	38,560	
사이폰밸브	15A	개	10	8,900	89,000	0	0	8,900	89,000	
세니타리 파이프(316)	1.5S	본	8	254,200	2,033,600	0	0	254,200	2,033,600	
세니타리 파이프(316)	4S	본	1	584,000	584,000	0	0	584,000	584,000	
세니타리 수동 볼밸브	1.5S	개	28	116,400	3,259,200	0	0	116,400	3,259,200	
세니타리 플랜지(페룰식)	1.5S	개	24	37,800	907,200	0	0	37,800	907,200	
세니타리 TEE(용접식)	1.5S	개	8	9,840	78,720	0	0	9,840	78,720	
세니타리 TEE(페룰식)	1.5S	개	28	19,200	537,600	0	0	19,200	537,600	
세니타리 Y-TEE(페룰식)	1.5S	개	12	24,200	290,400	0	0	24,200	290,400	
세니타리호스(EFDM)	1.5S*3,000L	개	14	1,150,000	16,100,000	0	0	1,150,000	16,100,000	
세니타리페룰식레듀샤	2S*1.5S	개	16	17,500	280,000	0	0	17,500	280,000	
세니타리레듀샤(용접식)	4S*1.5S	개	4	36,400	145,600	0	0	36,400	145,600	
세니타리페룰소켓	1.5S*15A	개	16	24,500	392,000	0	0	24,500	392,000	
클램프	2S	개	80	4,360	348,800	0	0	4,360	348,800	
가스켓(테프론)	2S	개	80	920	73,600	0	0	920	73,600	
스텐볼트너트(스프링와사포함)	M16*65	SET	86	3,540	304,440	0	0	3,540	304,440	
스테인리스관 이음쇠	용접식레듀샤 50x	개	16	10,870	173,920	0	0	10,870	173,920	
스테인리스플랜지	20kg/cm ² S/O, 50A	개	16	43,050	688,800	0	0	43,050	688,800	
바소폼보온재+스텐커버	1.5S	식	8	480,000	3,840,000	0	0	480,000	3,840,000	
보일러공		인	22	0	0	210,465	4,630,230	210,465	4,630,230	
보온공		인	18	0	0	194,048	3,492,864	194,048	3,492,864	
플랜트용접공		인	48	0	0	273,303	13,118,544	273,303	13,118,544	
플랜트배관공		인	48	0	0	296,392	14,226,816	296,392	14,226,816	
플랜트전공		인	12	0	0	251,195	3,014,340	251,195	3,014,340	
특별인부		인	34	0	0	197,450	6,713,300	197,450	6,713,300	
보통인부		인	34	0	0	157,068	5,340,312	157,068	5,340,312	
기계설비공		인	14	0	0	213,337	2,986,718	213,337	2,986,718	
< 계 >					116,006,220		53,523,124		169,529,344	

< 보일러&순환시스템 통합 및 모니터링 시스템 구축 견적-2 >

1.DRILL SYSTEM PANEL

NO	DESCRIPTION	TYPE	UNIT	QTY	UNIT PRICE	AMOUNT
1	MAIN PANEL		면	1	3,500,000	3,500,000
2	LOCAL PANEL		면	1	1,680,000	1,680,000
3	V-METER	MX4W-V-FN	EA	1	53,352	53,352
4	A-METER	MX4W-A-FN	EA	6	53,352	320,112
5	RPM METER	MP5Y-44	EA	6	96,408	578,448
6	TOUCH SCREEN	TOP-PCVIEW1510	EA	1	3,666,000	3,666,000
7	디스플레이부	TOPRD1510X	EA	1	742,500	742,500
8	프로세서부(DC)	TOPR10D	EA	1	1,215,000	1,215,000
9	SD CARD	16GB	EA	3	19,500	58,500
10	INVERTER	FR-D740-5.5K	EA	8	568,100	4,544,800
11	INVERTER	FR-D740-2.2K	EA	4	365,300	1,461,200
12	PBL	KGX-CMV21(녹)	EA	2	4,784	9,568
13	PB	KGX-CM1(흑)	EA	2	3,003	6,006
14	BUZZER	KG8-CV2B	EA	2	8,489	16,978
15	비상정지	KGX-C4R1R(25mm)	EA	3	3,705	11,115
16	비상정지 보호카바	EMS-25(25mm)	EA	3	4,550	13,650
17	USB PORT	DAHU-USB-0D5M-001	조	2	34,450	68,900
18	산업용허브		EA	2	493,805	987,610
19	인버터통신분배기	RS-485보드	EA	2	41,600	83,200
20	COOLING FAN	150mm(110V)	조	4	32,786	131,144
21	MAIN NFB	ABS203c/	EA	1	167,446	167,446
22	보일러 NFB	ABS103c/	EA	3	70,369	211,107
23	펌프 NFB	ABS33	EA	8	35,230	281,840
24	모터 NFB	ABS33	EA	4	35,230	140,920
25	예비 NFB	ABS33	EA	3	35,230	105,690
26	COVER	ABS203c/보호카바	EA	1	1,560	1,560
27	COVER	ABS103c/보호카바	EA	3	936	2,808
28	COVER	ABS33c/보호카바	EA	15	936	14,040
29	220V CONTROL NFB	ABS32c	EA	1	21,528	21,528
30	220V CONTROL NFB	BK63H-2P/10A	EA	1	8,177	8,177
31	220V CONTROL NFB	BK63H-1P/10A	EA	1	4,641	4,641
32	220V CONTROL NFB	BK63H-1P/6A	EA	8	3,978	31,824
33	220V CONTROL NFB	BK63H-1P/4A	EA	2	5,863	11,726
34	220V CONTROL NFB	BK63H-1P/2A	EA	3	5,863	17,589
35	MAIN MC	MC-130/110V	EA	1	134,043	134,043
36	펌프 MC	MC-32/220V	EA	8	30,940	247,520
37	모터 MC	MC-18/220V	EA	3	15,808	47,424
38	POWER SUPPLY(DC24V)	SDR480-24	EA	1	199,550	199,550
39	TOUCH NFB	GCP-32AN/5A	EA	2	27,365	54,730
40	CONTROL MC	MC-9/110V	EA	1	11,167	11,167
41	AUX RY	UA-4	EA	1	5,135	5,135
42	TR(복권)	2KVA	EA	1	279,500	279,500
43	단자대	15/35A/60A/100A/200A	식	1	77,740	77,740
44	DUCT/CHANNEL	30/40/60/80X60/80	식	1	102,900	102,900
45	부스바		식	1	150,136	150,136
46	부스바,아크릴 지지대		식	1	24,700	24,700
47	아크릴	5T	식	1	43,550	43,550
48	TERMINAL/튜브	동력/조작	식	1	103,994	103,994
49	통신선	랜케이블	식	1	17,680	17,680
50	라벨/튜브	6mm/9mm	식	1	54,805	54,805
51	NOISE FILTER	10A	EA	1	10,400	10,400
52	RELAY BOARD(OMRON)	G6D-F4B	EA	16	40,560	648,960
53	PLC CPU	FX5U 64MR/ES-A	EA	1	667,800	667,800
54	PLC CPU	FX5U 32MR/ES-A	EA	2	483,000	966,000
55	특수	FX5-4AD-PT-ADP	EA	4	254,800	1,019,200
56	A/I	FX5-4AD-ADP	EA	6	214,500	1,287,000
57	A/O	FX5-4DA-ADP	EA	2	231,000	462,000
58	통신카드	FX5U-485-BD	EA	1	32,340	32,340
59	통신카드	FX5U-ENET/IP	EA	1	382,200	382,200
60	증설카드	FX5-16EYR/ES	EA	1	130,200	130,200
61	CONVERTER	POT/4~20mA	조	6	65,000	390,000
62	압력 TD	-760mmHg~+2kg	EA	6	299,000	1,794,000
63	SIGN LIGHT		EA	1	156,000	156,000
64	DOOR SAW	KH9016HR	EA	2	5,447	10,894
65	LED 직부등		EA	2	45,500	91,000
66	NAME PLATE		식	1	114,400	114,400
67	잡자재		식	1	2,250,297	2,250,297
68	제작공임		M/D	15	300,000	4,500,000
69	국내 시운전		M/D	4	500,000	2,000,000
70	공과잡비및이윤		식	1	3,863,624	3,863,624
	합 계					42,499,868

< 보일러&순환시스템 통합 및 모니터링 시스템 구축 견적-3 >

2.전기프로그램및 전기제어장치

NO	DESCRIPTION	TYPE	UNIT	Q'TY	UNIT PRICE	AMOUNT
1	DRILL SYSTEM PANEL (415V 50Hz) 1)보일러전원 2)펌프전원 3)모터전원 *보일러 연동 미적용	5.5KW3EA 5.5KW8EA(예비 4EA포함) 2.2KW4EA(예비 2EA포함)	식	1	42,499,868	42,499,868
2	프로그램비 *PLC/HMI		식	1	24,500,000	24,500,000
3	전기공사자재		식	1	17,516,730	17,516,730
4	MONITORING SYSTEM *시스템 구성에 대한 프로세스 자료 및 장비 스펙에 회신후 견적 가능		식	1	0	0
합 계						*VAT 별도* 84,516,598

< 보일러&순환시스템 통합 및 모니터링 시스템 구축 견적-4 >

3.전기공사자재

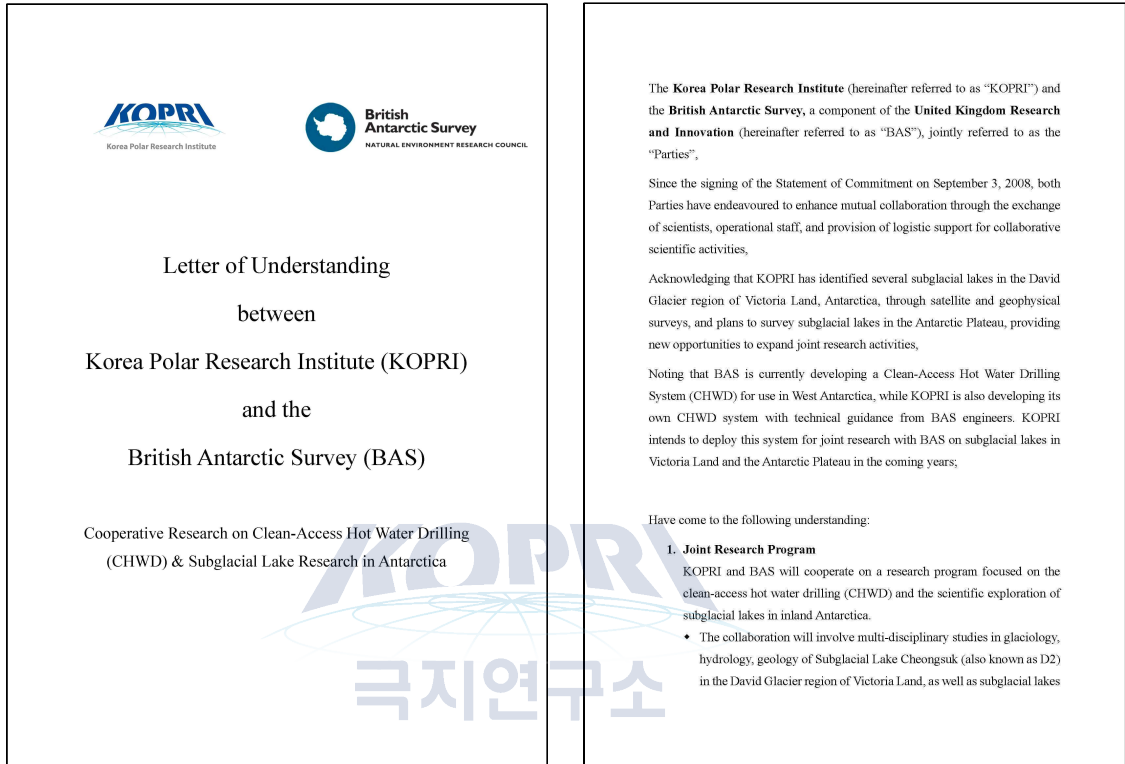
NO	DESCRIPTION	TYPE	UNIT	Q'TY	UNIT PRICE	AMOUNT
1	PLUGS	IP67 63A 4P 400V	EA	2	140,250	280,500
2	PLUGS	IP54 32A 4P 400V	EA	2	26,400	52,800
3	PLUGS	IP54 32A 4P 400V	EA	1	18,150	18,150
4	PANEL SOCKETS	IP67 63A 4P 400V	EA	2	99,000	198,000
5	PANEL SOCKETS	IP54 32A 4P 400V	EA	2	33,000	66,000
6	PANEL SOCKETS	IP54 32A 4P 400V	EA	1	21,450	21,450
7	CONNECTORS	IP67 63A 4P 400V	EA	8	148,500	1,188,000
8	CONNECTORS	IP54 32A 4P 400V	EA	4	30,750	123,000
9	PLUGS	IP67 63A 4P 400V	EA	8	140,250	1,122,000
10	PLUGS	IP54 32A 4P 400V	EA	4	26,400	105,600
11	PLUGS	IP44 16A 4P 230V	EA	10	28,050	280,500
12	CONNECTORS	IP44 16A 4P 230V	EA	10	33,000	330,000
13	펌프케이블		식	1	3,375,000	3,375,000
14	모터케이블		식	1	2,925,000	2,925,000
15	조작케이블		식	1	1,080,000	1,080,000
16	잡자재		식	1	558,300	558,300
17	전기공사 인건비		M/D	14	300,000	4,200,000
18	공과잡비및이윤		식	1	1,592,430	1,592,430
합 계						17,516,730

< 보일러&순환시스템 통합 및 모니터링 시스템 구축 견적-5 >

3. 빙저호 시추

3-1. 국제 공동 심부 빙저호 시추연구 프로그램 개발

- 빙저호 연구 관련 한-영 연구 협력 부속서(LoU) 갱신
 - 극지연구소(KOPRI)-영국 남극조사원(BAS) 간 빙저호 연구 프로그램 관련 LoU 체결(갱신). 해당 문건에는 청석호 청정열수시추, 신규 빙저호 후보지 탐사, 빙저호 과학 연구 내용을 포함



< 빙저호 연구 관련 한-영 연구협력 부속서(LoU) >

3-2. 빙저호 시추를 위한 포괄적 환경영향평가서 초안 작성

- 초기환경영향평가 초안(Draft IEE) 작성
 - 최근 46차 ATCM 회의에서 중국의 Qilin 빙저호 열수시추가 포괄적환경영향평가(CEE)가 아닌 초기환경영향평가(IEE) 만으로 국제 승인을 받은만큼 청석호 열수시추의 경우도 IEE로 포맷을 변경하여 작성
 - IEE 초안에는 빙저호 시추후보지에 대한 레이더/탄성과 탐사 및 기상자료, 표층 눈시료의 생지화학적 특성 분석, 유류 사용량, 시추과정에서 예상되는 환경오염 요인, 오염원 모니터링 및 오염 저감 계획 등을 포함. IEE는 현재 극지연구소에 제출된 상태이며 향후 후속 과제가 시행되는 2026년 환경부에 제출하여 남극 활동을 위한 국내 승인을 받을 예정임[부록 참조]

2단계
3차년도
(2025년)

1. 심부 빙저호 물리탐사

1-1. 빙저호 지구물리 탐사 자료 분석 기술 고도화

○ 탄성과 자료 분석 기술 고도화

- 수치모델을 활용한 빙저호 구조해석 수행
- 탄성과 자료, 레이더 자료 및 수치모델링 결과를 바탕으로 D2빙저호에 대한 3차원적 정밀 구조해석 수행
- 정밀 탄성과 수치해석을 위한 기존 Cell-based 파동전파 모델링 최적화 진행
- 0.5 m 격자 크기를 가지는 파형전파 수치 모델을 활용한 SLC 구조해석 수행
- 정밀 수치 모델링 결과와 현장 자료와의 비교를 통한 자료 분석 수행

○ 빙저호 표면적, 저수량 계산법 제시

- (2019-2022) Sentinel-1 & ICESat-2 위성 자료로부터 일부를 제외한 지속적인 호수 수위 증가 확인
- (2021-2024) SLC-A에서 SLC-B를 거쳐 SLC-C로 물의 이동으로 인한 SLC-A, SLC-B 수위 감소, SLC-C 수위 증가 확인
- (2011-2025) CryoSat-2 & ICESat-2 위성 관측으로 D2 빙저호에 매년 빙저수의 유입으로 인한 빙하 표면 고도 관측. 표면 변위로 예측한 부피 변화 확인
- 위성 관측 시점인 2011년부터 2021년까지 D2 빙저호의 표면 변위는 지속적으로 증가하였으며, 2021년 이후 일부 감소를 하지만, 현재 부피를 유지 중
- D2 빙저호 표면적(SLD2-A, B, C 전체) 23.5 km² 도출
- 탄성과 해석 기반 퇴적층 해석에 따른 수심 약 10 m 예상. 예상 저수량 0.235 km³
- D2 빙저호의 표면 변위 증가량은 최대 15 m이며, 탄성과 단면도에서 확인된 SLD2의 수심은 약 10 m이므로, 만약 D2 빙저호의 물이 유출 시작하면 대부분의 호수물이 유출될 것으로 판단됨
- D2 빙저호에 대한 시추 성공을 위해서는 빙저호가 유출되기 전, 이른 시일 내에 시추해야 할 것으로 판단됨

○ 레이더 결과 3D 단면도 작성

- 탄성과 자료, 레이더 자료 및 수치모델링 결과를 바탕으로 SLC에 대한 3D mapping
- 레이더 결과 최신 결과 반영 3D DEM 작성 완료
- 탄성과 자료를 바탕으로 pseudo 3D 단면도 작성 완료

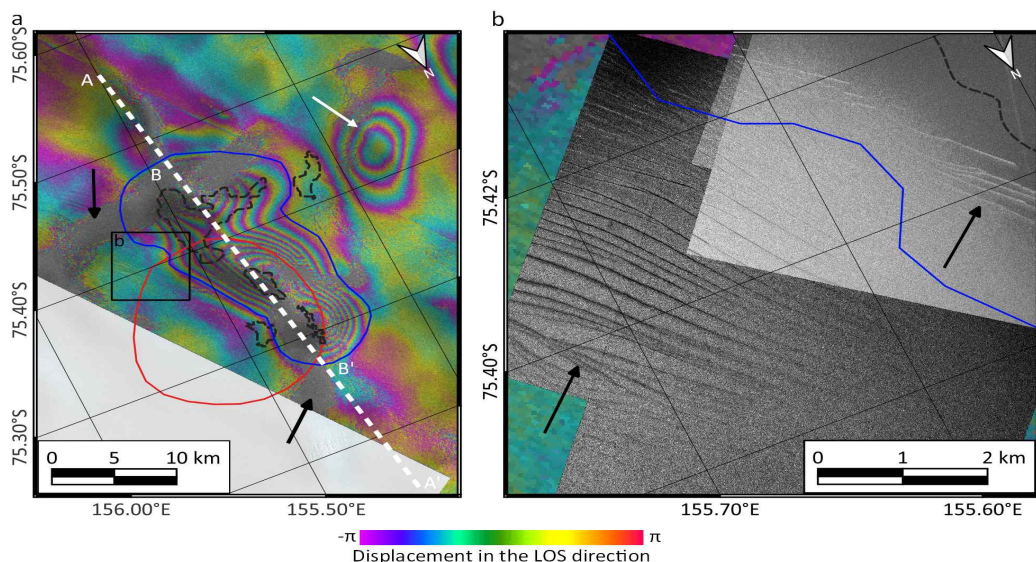


그림 239 Sentinel-1 위성 자료로부터 SLC 활동성 확인

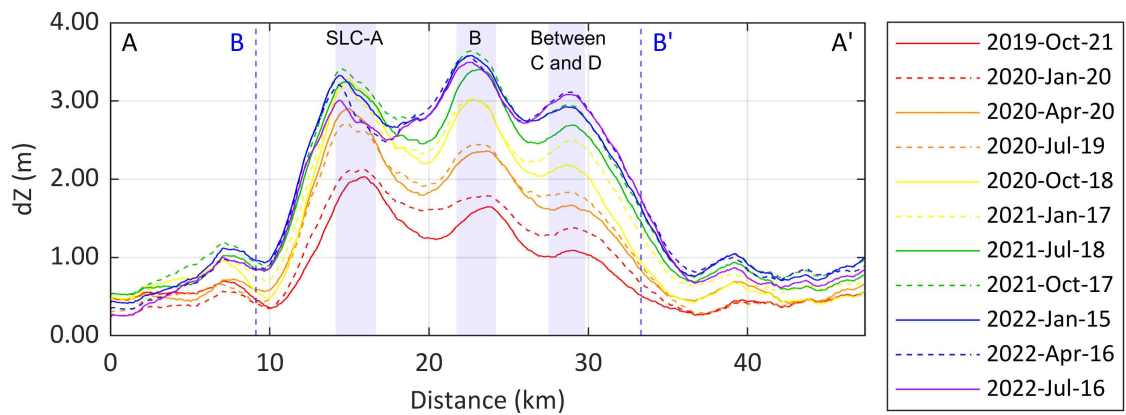


그림 240 ICESat-2 위성 자료로부터 2019-2022년 동안 SLC 수위 증가 확인

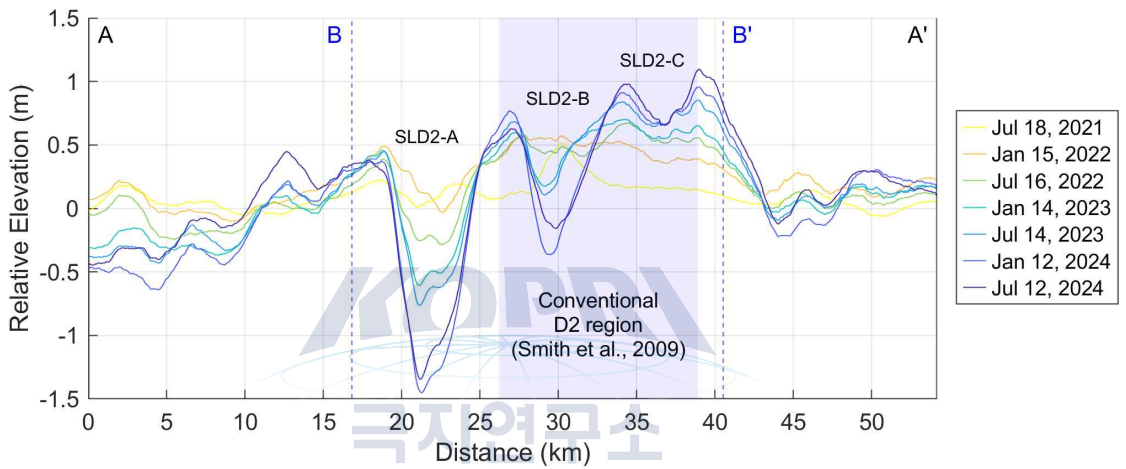


그림 241 2021-2024년 동안 SLD2 (SLC)의 수위 감소 확인

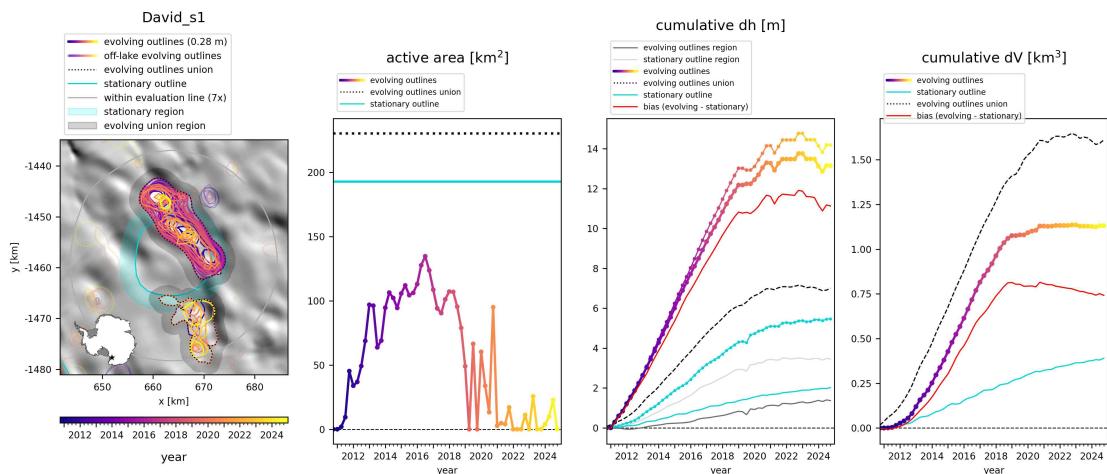


그림 242 D2 빙하 표면 변위 및 빙저호 예상 부피 변화 (Southoff et al. 2025 in Review)

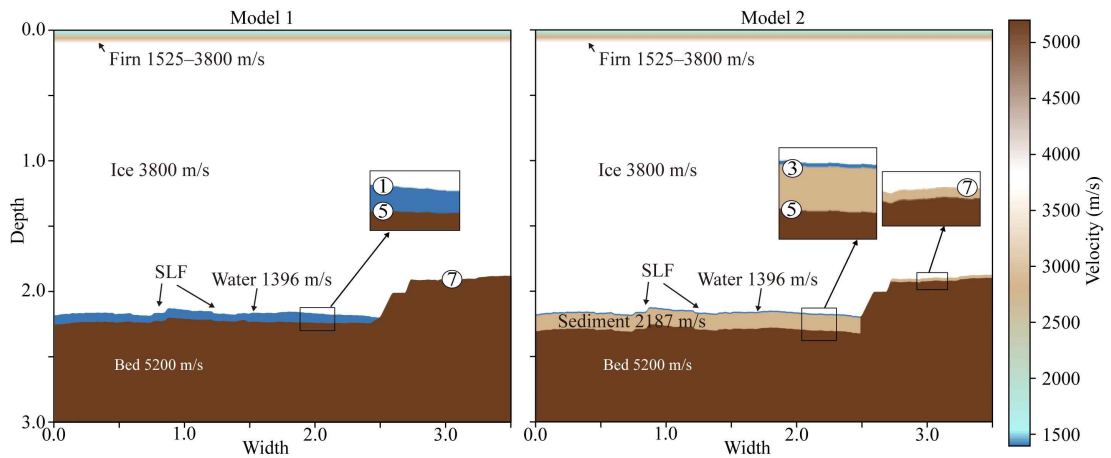


그림 243 탄성파 해석 기반 D2 빙저호 속도 예측 모델

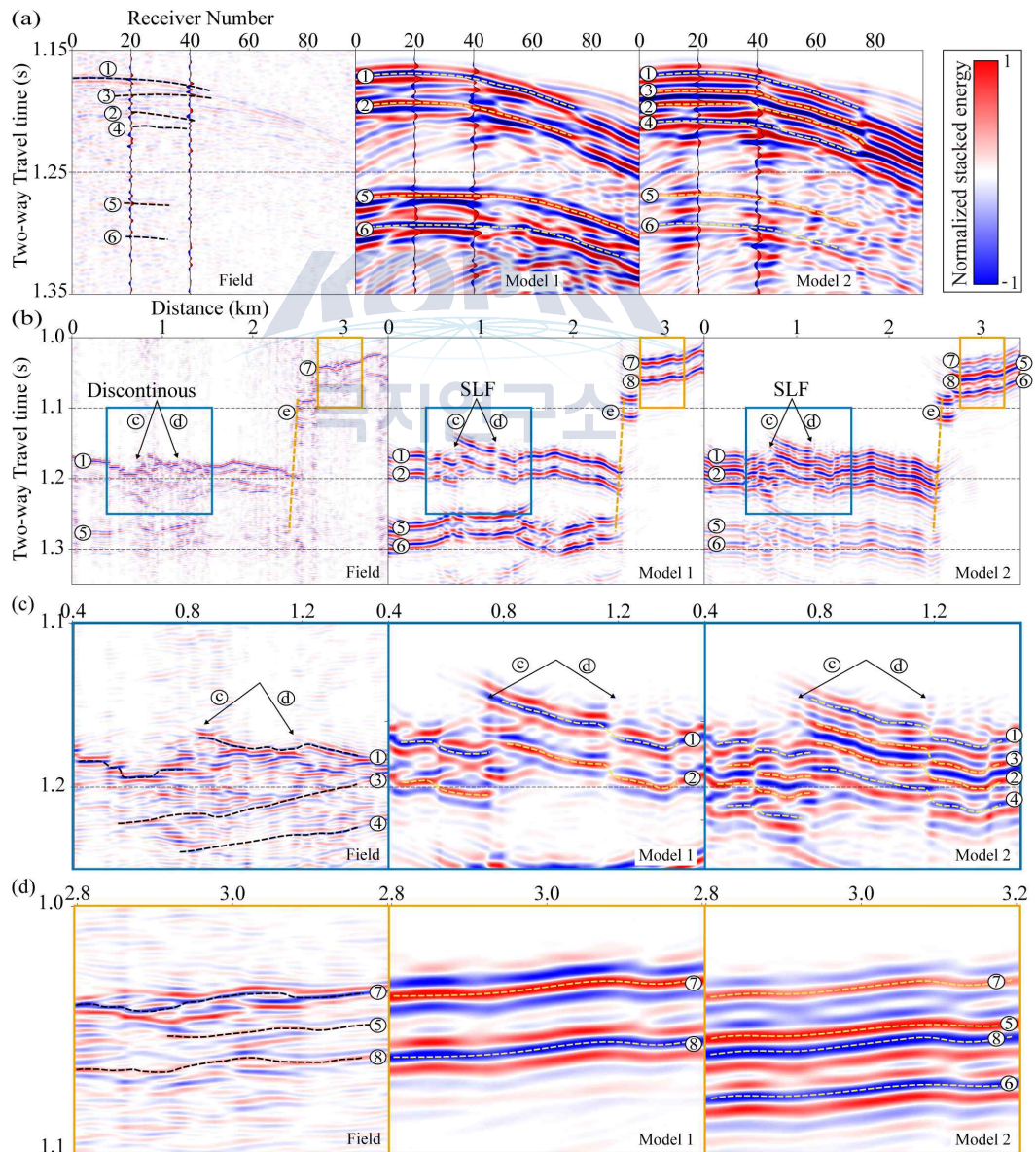


그림 244 현장자료(좌), 정밀수치 모델링 Model 1(중앙), Model 2(우)

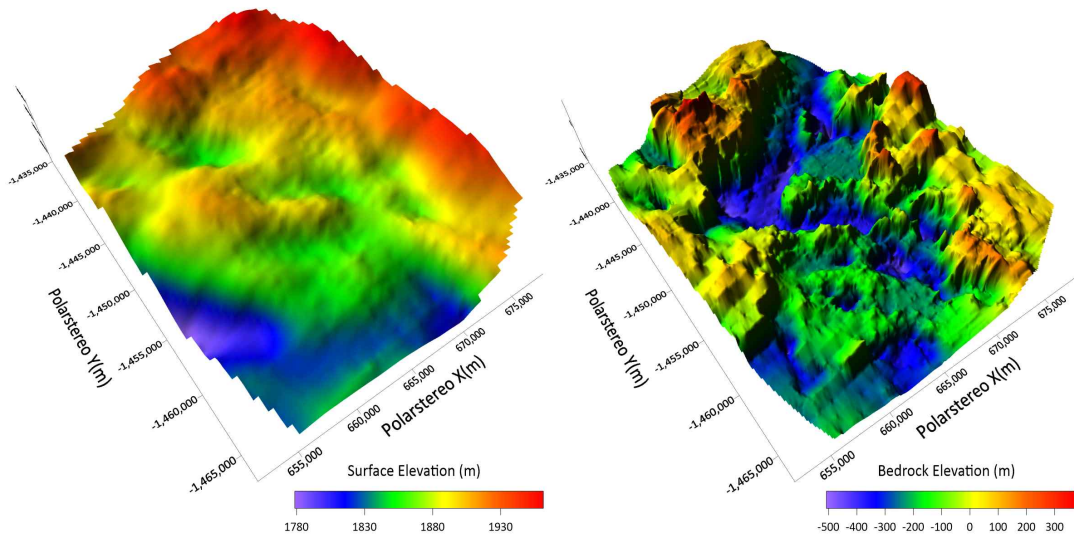


그림 245 레이더 자료를 바탕으로 업데이트 된 SLC 지역 3D mapping.
(좌) 빙하 표면 고도 DEM, (우) 기반암 고도 DEM

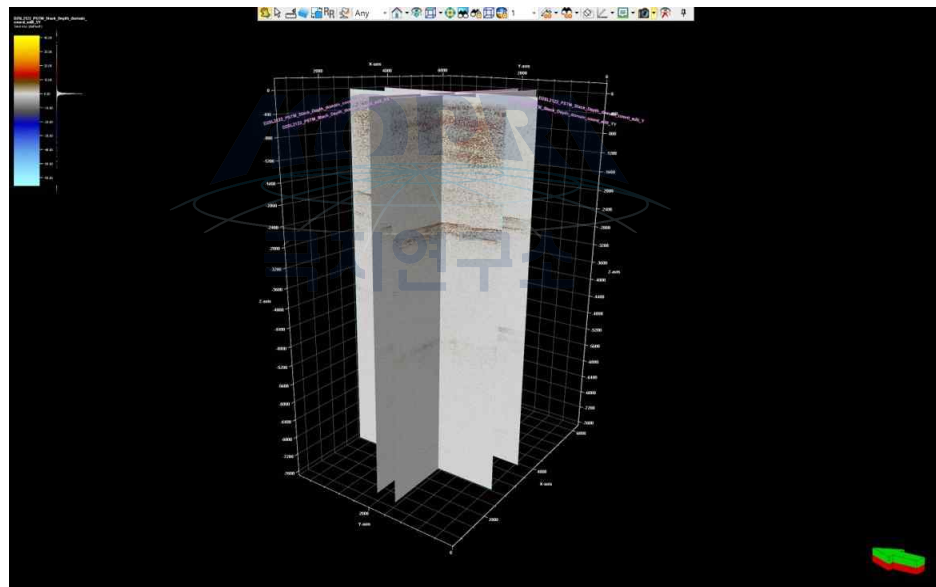


그림 246 탄성과 자료를 바탕으로의 SLC pseudo 3D mapping

1-2. 신규 빙저호 열수시추 후보지 위성자료 확보

○ 신규 열수시추 후보지 선정

- 신규 시추 후보지 기상 자료 획득을 위한 자동기상관측장비(AWS) 설치 및 모니터링
- 클린 환경을 위해 해당 연구지역 기상 자료를 고려하여 시추 후보지 선정
- 원격 자료를 바탕으로 신규 열수 시추 후보지 선정
- SLC 상부 지역에 존재하는 소규모 신규 빙저호 확인
- SLC 및 신규 (D3) 빙저호 열수시추 후보지의 지속적인 모니터링을 위한 ICESat-2 자료 최신화

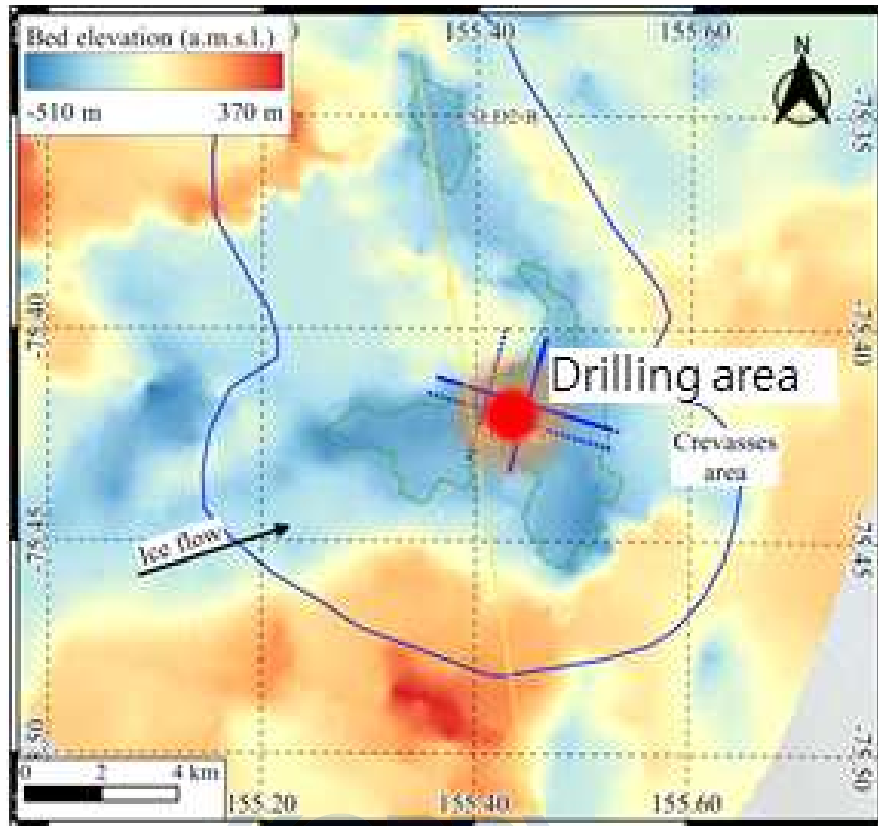


그림 247 빙저호 구조, 클린 환경, 기상을 고려한 시추 후보 지역 선정

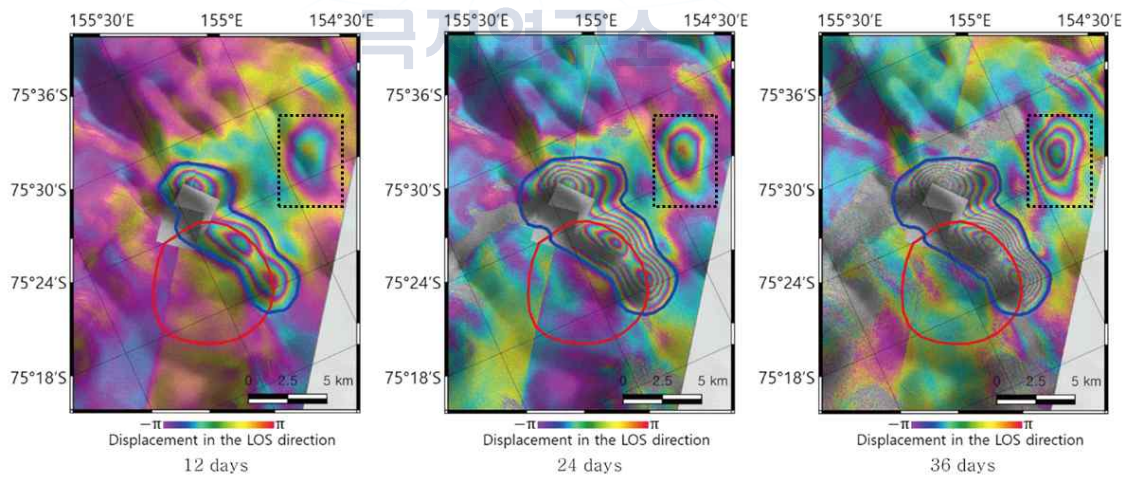


그림 248 SLC 상부 지역에 존재하는 소규모 신규 빙저호 확인

2. 심부 빙저호 청정열수시추 기술개발

2-1. 심부 빙저호 청정열수시추 시스템 개발

○ 시스템 멸균 유효성 검증

- Wellhead UV 시스템의 멸균 유효성 검증

- 국제 공인 검사기관인 ALS Global사에서 멸균 유효성 검증(dosimetry test) 수행
- 실제 빙저호 시추 및 장비 통과 조건(44mm 지름의 드릴 호스 1m/min 속도로 하강, 7mm 지름의 케이블 및 로프가 80m/min으로 하강)을 모사하여, 해당 조건에서 3-log reduction (99.9% 사멸) 이상의 멸균력을 보이는 지 여부를 테스트함
- 그람 음성 세균(*Escherichia coli*), 그람 양성 세균(*Staphylococcus aureus*)과 진균 한 종(*Aspergillus brasiliensis*)을 대상으로 UV unit의 정중앙과 하부 두 지점에서 미생물 배양체들을 디스크 표면에 접종 후 UV 275nm 2초간 노출 후, 미생물용 배지에 도말하여 초기 조건 대비 감소된 CFU로 멸균력 측정
- 테스트 결과, 미생물 감소 수준은 평균 3.03 log CFU/cm²(*E. coli*, 99.91% 사멸), 3.37 log CFU/cm²(*S. aureus*, 99.96% 사멸), 1.13 log CFU/cm²(*A. brasiliensis*, 92.59% 사멸)로 나타남. 세균의 경우 두 종 모두 99.9% 사멸 기준에 해당하는 3-log 수준을 충족함. 반면, 진균은 1-log 수준에 그침. 하지만, 해당 테스트에서는 일반적인 멸균 기준인 40 mJ/cm²을 넘어 최소 113 mJ/cm²의 UV 선량이 조사되었으며, 진균 포자가 일반적으로 높은 UV 저항성을 보이는 점을 고려해야함. 또한, 실제 남극 내륙 빙원 환경에서는 극히 낮은 수준의 미생물 농도만 존재하므로, 이러한 결과는 빙저호 시추 과정에서 시추공을 통과하는 모든 장비 및 호스 표면의 멸균에 충분한 효과를 제공하리라 판단됨

Escherichia coli								
	cfu/surface	cfu/cm ²	Mean cfu/cm ²	LOG cfu/cm ²	Mean LOG cfu/cm ²	Standard Deviation of LOG ₁₀ cfu/cm ²	Δ in mean log ₁₀ cfu/cm ² between baseline and test samples	Δ in % mean log ₁₀ cfu/cm ² between baseline and test samples
Positive Control	7.10E+03	2.77E+03	2.54E+03	3.44	3.38	0.17		
	4.00E+03	1.56E+03		3.19				
	8.40E+03	3.28E+03		3.52				
P1	3.00E+01	1.17E+01	3.91E+00	1.07	0.36	0.62	3.03	99.91%
	0.00E+00	0.00E+00		0.00				
	0.00E+00	0.00E+00		0.00				
P2	4.00E+01	1.56E+01	6.51E+00	1.19	0.60	0.60	2.79	99.84%
	1.00E+01	3.91E+00		0.59				
	0.00E+00	0.00E+00		0.00				

Staphylococcus aureus								
	cfu/surface	cfu/cm ²	Mean cfu/cm ²	LOG cfu/cm ²	Mean LOG cfu/cm ²	Standard Deviation of LOG ₁₀ cfu/cm ²	Δ in mean log ₁₀ cfu/cm ² between baseline and test samples	Δ in % mean log ₁₀ cfu/cm ² between baseline and test samples
Positive Control	1.68E+06	6.56E+05	7.40E+05	5.82	5.86	0.07		
	1.72E+06	6.72E+05		5.83				
	2.28E+06	8.91E+05		5.95				
P1	6.60E+02	2.58E+02	3.36E+02	2.41	2.50	0.20	3.37	99.96%
	5.80E+02	2.27E+02		2.36				
	1.34E+03	5.23E+02		2.72				
P2	1.14E+03	4.45E+02	4.97E+02	2.65	2.54	0.49	3.32	99.95%
	2.42E+03	9.45E+02		2.98				
	2.60E+02	1.02E+02		2.01				

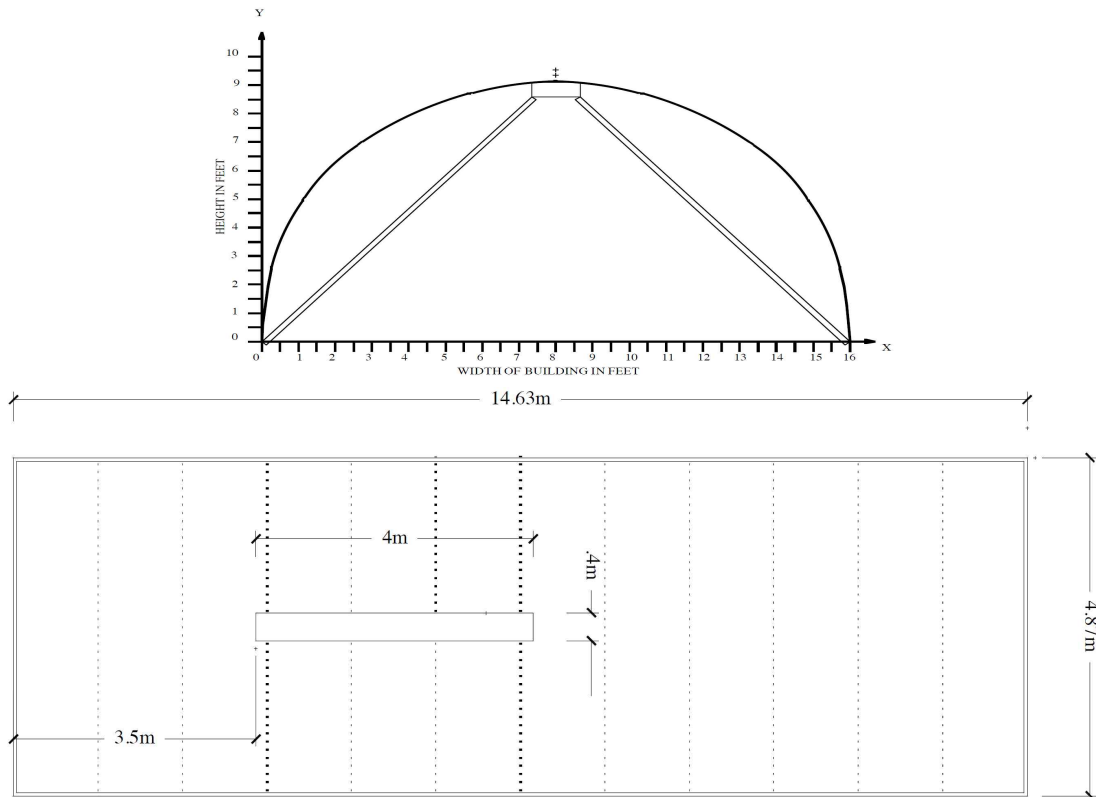
Aspergillus Brasiliensis								
	cfu/surface	cfu/cm ²	Mean cfu/cm ²	LOG cfu/cm ²	Mean LOG cfu/cm ²	Standard Deviation of LOG ₁₀ cfu/cm ²	Δ in mean log ₁₀ cfu/cm ² between baseline and test samples	Δ in % mean log ₁₀ cfu/cm ² between blank and baseline samples
Positive Control	9.40E+04	3.67E+04	3.36E+04	4.56	4.53	0.04		
	8.40E+04	3.28E+04		4.52				
	8.00E+04	3.13E+04		4.49				
P1	7.60E+03	2.97E+03	2.86E+03	3.47	3.40	0.30	1.13	92.59%
	3.00E+03	1.17E+03		3.07				
	1.14E+04	4.45E+03		3.65				
P2	6.80E+03	2.66E+03	2.97E+03	3.42	3.47	0.04	1.05	91.09%
	7.80E+03	3.05E+03		3.48				
	8.20E+03	3.20E+03		3.51				

< Wellhead UV unit의 평균 유효성 검증 결과(테스트 위치, P1: 정중앙, P2: 하부) >

2-2. 심부 빙저호 시추캠프 구축

○ 빙저호 시추캠프 설치 운영

- 빙저호 시추캠프 운영은 본 사업과 연계된 “남극내륙 연구거점 구축과 기지 후보지 선정을 위한 빙원탐사” 연구사업의 주요 장비(설상차, 카라반 등)와 핵심참여인력(중장비/안전 대원)의 공동활용을 통해 수행 가능하기 때문에 내륙 탐사가 수행중인 '25년도 내에는 시추캠프 운영은 수행 불가능함(23/24시즌 기준, 내륙탐사팀 '24.1.23. 장보고기지 복귀)
- D2 빙저호 시추캠프는 모듈형 텐트 유닛을 조합하여 플랜트 텐트, 시추 텐트, 클린 텐트 등 3개동을 독립적으로 구성할 예정으로, '25년도 연내에는 플랜트 텐트로 선정한 weatherhaven 사의 S4 프레임 아치 텐트를 장보고기지 주변에서 테스트 설치 수행
- 플랜트 텐트는 내부에 보일러, 열교환기, 저압&고압 펌프 등 대부분의 열생산&순환 플랜트가 배치될 폭 4.88m x 길이 14.63m x 높이 2.82m 크기의 반원통형 텐트로 방풍, 방한, 방습, 자외선 차단, 방염처리 기능이 있으며, 극지방의 혹한 환경(풍속 ~ 40m/s, 온도 ~ - 30℃)에 대한 내구성과 안전성이 입증된 제품
- 고중량 텐트로 현장 배치 전 중장비를 활용한 사전 설치 테스트 필수



< Weatherhaven S4 프레임 아치 텐트 수치도 >



그림 249 Weatherhaven S4 프레임 아치 텐트 내부 및 중장비 활용 설치

- 고정식 텐트 설치 방법: 구성 부품(프레임, 커버, 고정 앵커 등) 확인 → 바람 방향과 출입문 위치를 고려하여 설치 방향 설정 → 설치면 평탄화 → 베이스 프레임 설치(시계 방향) 및 설면 고정 → 아치 및 스페이스 구성 요소 조립 → 앤드커버 설치

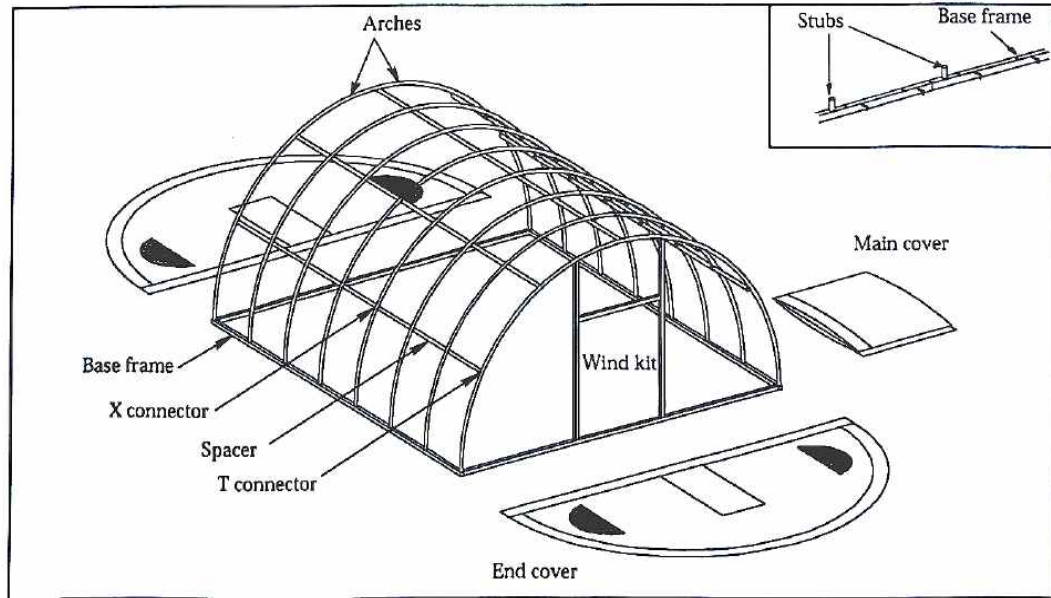
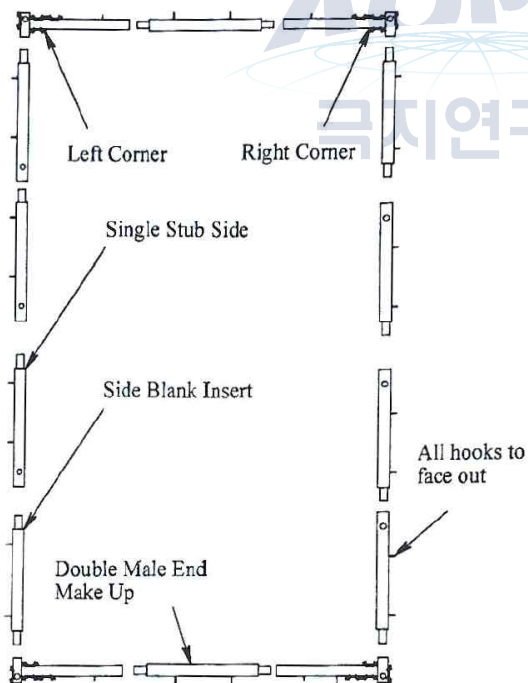


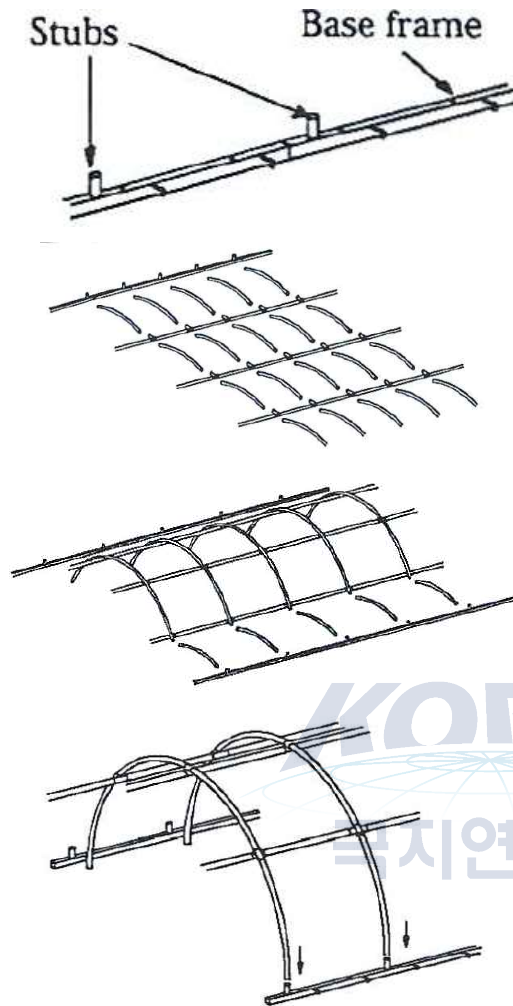
그림 250 Weatherhaven S4 프레임 아치 텐트 설치 구성품 리스트

◦ 베이스 프레임 설치



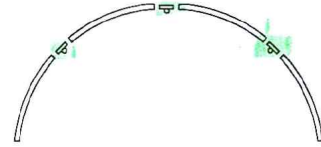
- 구성품 수량 확인
 - Single Stub Side Pieces : 12개
 - Side Blank Inserts : 2개
 - Left Corner : 2개
 - Right Corner : 2개
 - Dbl. Male End Make Up (48") : 2개
 - Sgt. Male End Make Up (48") : 2개
- 코너 프레임 하나부터 시작하여 시계 방향으로 모든 구성품 조립
- 모든 후크는 바깥쪽 향하도록 설치
- 느슨하게 1차 조립한 후 모든 부품이 도면에 맞게 조립되었는지 확인(대각선 방향으로 서로 일치하는지 확인)
- 조립 완료된 베이스프레임을 정확하게 정사각형(모서리 대각선 길이 측정) 모양으로 정렬시킨 후 설면에 고정

◦ 아치 및 스페이서 설치



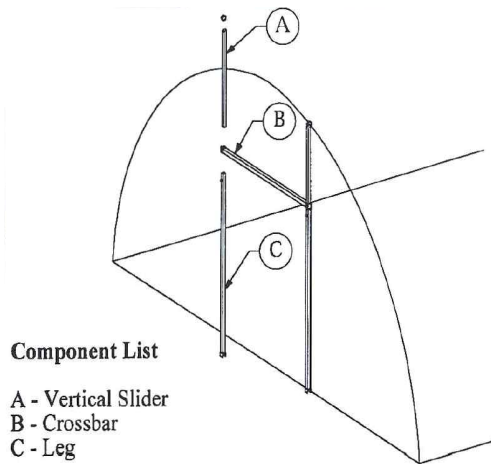
- 구성품 수량 확인(아치당)

- 6'-8" 길이 아치 : 4개
- 커넥터 : 3개



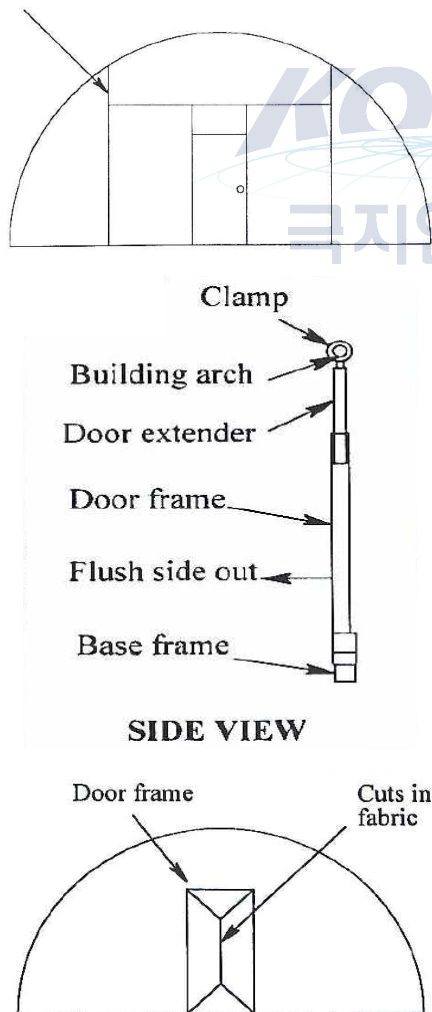
- 모든 구성품을 바닥재 위에 순서대로 나열
- 커넥터에 스페이서 삽입. "+" 또는 "T" 커넥터의 수직 멤버는 내부 방향으로 위치하도록 조립
- 모든 커넥터를 아치 프레임에 단단히 조립하여 각 아치 완성
- 아치 프레임의 양 끝단은 베이스 프레임에 삽입하지 않고 자리만 잡아둔 상태로, 각 아치 프레임의 상단부만 커넥터와 조립 진행. 스페이서가 텐트 내부 방향으로 정렬되어 있는지 확인
- 모든 아치 프레임과 스페이서 조립
- 스프링베이스 아치를 세워 끝을 베이스 프레임 stubs 에 삽입
- 전체 최종 연결 확인. 엔드 커버 조립 시 까지 엔드 아치에 미연결 상태 유지
- ※ 첫 번째와 마지막 아치의 커넥터는 "T" 커넥터, 모든 중앙 아치 커넥터는 "+" 커넥터

◦ Windkit 설치



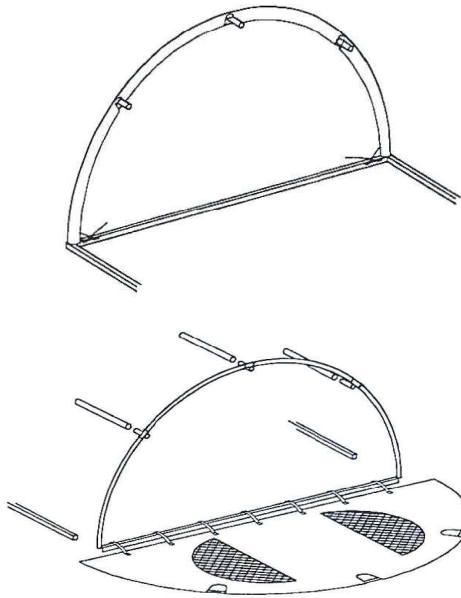
- 48" 슬라이더를 크로스바 슬리브에 끼운 후 다리 끝부분에 삽입
- 모든 엄지 나사는 텐트 내부를 향하도록 조립하고, 슬라이더 클램프가 아치에 고정될 수 있도록 정렬되어 있는지 확인
- Windkit 를 엔드월의 베이스 프레임 중앙에 위치시킨 뒤, 슬라이더에서 클램프를 제거
- 다리 바닥의 탭을 베이스 프레임에 맞추고 슬라이더를 아치까지 올림
- 아치 위에 클램프를 다시 장착하고 슬라이더에 고정
- 크로스바가 다리 위에 놓여 있는지 확인한 다음 모든 엄지 나사를 단단히 조임

◦ 알루미늄 도어 설치



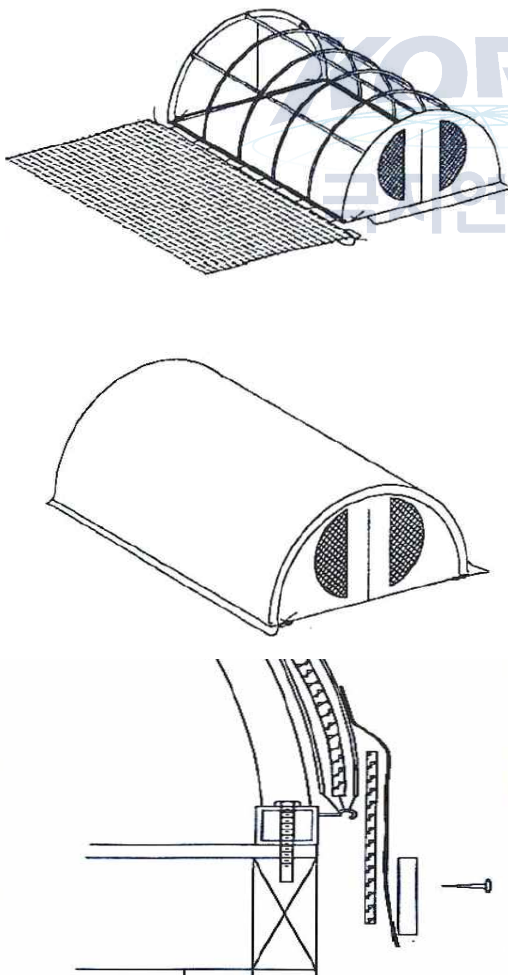
- 패브릭 엔드월 설치 전 도어의 내부 프레임 우선 연결
- 도어 어셈블리에서 도어 프레임 분리
- 도어 프레임의 하단의 탭을 베이스 프레임에 맞추고, 상단은 "I-I"형 windkit 의 크로스바에 기어 클램프 연결. 프레임의 평평한 면이 바깥쪽을 향하도록 설치
- 커버 설치 후, 나이프를 이용해 프레임의 모서리까지 패브릭(단열재 포함) 재단 (diagram C)
- 바깥쪽에서 도어를 삽입하여 커버와 단열재를 끼워 고정
- 패브릭을 통과해 프레임에 나사 체결. 연장부가 있는 상단 모서리의 수직 부분은 나사 미체결
- 도어 설치 후, 텐트 내부에서 남은 패브릭 재단
- 해체 시에는 엔드 커버와 단열재로 도어 주변을 감싸 포장한 뒤, 엔드 패널에 도어가 조립된 상태로 보관, 운송

◦ 엔드월 설치



- 엔드월의 라이너(내부 안감) 면이 텐트 내부를 향하도록 우선 조립
- 엔드월 하단에 위치한 로프 루프를 베이스 프레임 외부의 흙 아래에 놓고, 텐트 모서리의 클리트에 로프를 단단히 고정
- 엔드월을 아치 위로 당겨 덮고, 둘레 로프를 엔드 프레임 위로 넘긴 후 커넥터 피팅 위에 끼움 (피팅이 연결되어 있다면 분리한 후 다음 단계까지 그대로 둠)
- 로프를 클리트 아래에 감고 발로 측면 압력을 가해 로프를 최대한 팽팽하게 조임
- 엔드 스페이서 조립 후 프레임 완성

◦ 단열커버 설치



- 단열 커버는 라이너, 단열 블랭킷, 덮개, 세 부분으로 구성(폴리에틸렌 단열재는 라이너와 단열재 결합형)
- 텐트 한쪽 측면의 바닥에 커버 전개(커버가 프레임에 걸리지 않도록 바람이 불어 나가는 방향으로 전개)
- 커버 가장자리에 채봉된 로프를 베이스 프레임의 흙 아래에 끼우고, 텐트 모서리에 있는 클리트에 로프를 단단히 고정
- 커버의 반대쪽 가장자리를 텐트 위로 당겨 넘김(필요시 커버 반대쪽에 로프를 묶은 뒤 로프를 반대로 넘겨 커버 견인)
- 반대로 넘긴 커버 가장자리의 베이스 로프를 베이스 프레임에 고정하고 클리트에 단단히 결박
- 외곽 단열재는 스톱 플랩(덮개)과 바닥 플랫폼의 바깥 가장자리 사이에 배치

- 빙저호 시추캠프 구축용 장비 시험

◦ 100kW 발전 컨테이너 가동 시험

- 사전 점검: 연료량 및 품질 확인, 냉각수/윤활유 상태 및 저온 적합성 점검, 시동 배터리 전압 및 충전 상태 확인, 재킷 워터 히터 가동(예열 시간 1시간 이상)
- 저온 시동 시험: 실온 -10°C 이하의 환경에서 예열 후 시동 시도. 재킷 워터 히터 가동(1시간 이상 예열), 시동, 크랭킹 시도 횟수 확인, 성공적 시동 여부, 엔진 회전수(RPM), 오일 압력, 냉각수 온도 모니터링
- 부하 테스트: 이동식 청정실험실 등 주변 장치 전원 공급시 전압 및 주파수 안정성($400\text{V} \pm 5\%$, $50\text{Hz} \pm 1\%$ 허용 오차 확인), 전류, 유효전력(kW), 무효전력(kVAR), 역률(PF) 등 전력 지표, 연료 소모량 및 냉각수 온도, 배기 온도(464.7°C 이하) 및 백프레셔(6kPa 이하) 점검
- 보호장치 시험: 컨트롤패널 보호기능 점검(과온도, 저전압, 과속 감지 및 정지, 원격 비상정지 버튼 시험 등)
- 데이터 기록: 컨트롤패널의 디지털 표시 항목(시동 횟수, 누적 운전 시간, 전압/ 주파수 / 전류/ 전력 등 전기적 수치, 엔진 온도/ 오일 압력/ 배기 온도 등 기계적 수치) 확인 기록



그림 251 100kW 발전 컨테이너 가동 시험

◦ 이동식 청정실험실 가동 및 청정도 검증 시험

- 사전 점검: 컨테이너 고정 보관 상태, 전기 연결(3상 380V / 50Hz), 접지 저항 10Ω 이하 확인, 급배기 덕트, 히터, 필터 유닛 연결 확인, 내부 장비(Air Shower, Clean Bench, Clean Hood, Fan Filter Unit, 온도 조절기) 설치 상태 점검
- 전원 및 자동제어 시스템 시험: 메인 배전반 및 터치스크린 조작패널 부팅 확인, 각

장비별 누전차단기 및 서킷브레이커 테스트, 전력 부하분배 체크(LED, 히터, 송풍기 등 개별 확인)

- 항온 시스템 시험: 항온기 전원 인가 후 점진적 온도 상승 확인, 내부 온도 $20^{\circ}\text{C} \pm 1.0^{\circ}\text{C}$ 범위 도달까지 시간 기록, 각 STEP별 히터 출력 확인, 송풍기 및 급배기 덕트 순환 상태 확인
- 공조 및 정화 시스템 시험: FAN FILTER UNIT 및 FILTER BOX 작동 확인, HEPA 필터 전/후단 차압 측정 (교체 여부 판단 기준 확보), 풍속, 풍량, 조도, 소음 측정 (T.A.B 기준치 확보), 내부 청정도 측정: $0.5\mu\text{m}$ 입자 기준 Class 1,000 확인
- Air Shower 기능 시험: 입실 시 자동 작동 확인 (20m/s 풍속 유지 측정), 설정 샤워 시간 이후 자동 정지 확인, 내부 Interlock 작동 여부 확인
- 배기 및 흡후드 시스템 시험: 흡후드 흡입력 확인 및 카본 필터 정합 여부 확인, 배기 팬 및 덕트 흐름 상태, 누기 여부 점검
- 기타 항목: 청정실 내 소음(65dB 이하), 조도(500 lux 이상), 내부 집기류 고정 상태 등
- 종합 기능 테스트: 전체 시스템 연동 가동 4시간 이상 유지, 외기 대비 내부 온도 $20^{\circ}\text{C} \pm 1.0^{\circ}\text{C}$ 유지 안정 작동 여부 점검
- 결과 기록: T.A.B 성적서 작성(온습도, 청정도, 차압, 풍속, 조도 등)



그림 252 이동식 청정실험실 가동 시험

- 호스릴 컨테이너 가동 시험 및 2,700m 시추호스 스풀링
- 사전 점검: 컨테이너 수평 고정 및 스킴 안정성 확인, 3상 380V 전원 연결 및 접지 확인, 전기제어 캐비닛, 호스릴 간 케이블 연결 상태 확인, 호스 적재를 위한 축거치대

(axle stands) 및 초기 50m 시험호스 설치 확인

- 호스 상태 확인: 호스 사양 1A20, 1 1/4인치, 2000 psi WP, 외경 42mm 총 길이 2700m (1.25" SS BSP 피팅 양단 연결 상태), 시험 전 외관, 패킹 상태, 이물 부착 여부 점검
- 시스템 부팅 및 제어반 확인: 전원 인가 후 메인 제어반 디스플레이 정상 작동 확인, E-STOP, START, LOAD, TORQUE, REEL SPEED 등 디스플레이 작동 점검, 원격 조작이 가능하도록 셋업
- 호스릴 구동 테스트: 무부하 상태에서 릴 회전방향, 속도조절, 비상정지 확인, 호스레벨 와인더(guide roller) 구동 및 정렬 상태 확인, 토크 변화 및 비틀림 여부 모니터링
- 안전장치 시험: 전기 인클로저에 설치된 전기식 풀 스위치(safety pull switch) 작동 여부 확인, 비상 정지 회로 작동 여부 테스트(풀 스위치 작동 시 릴 회전 즉시 정지 확인), 릴 고정 스트랩 및 장착 브래킷의 기계적 고정 상태 점검
- 2,700m 시추호스 스풀링: 축 거치대에 우드릴 패킹 되어있는 호스 수직 정렬 후 고정, 릴 회전 방향 설정 후 수동 저속으로 릴 이송 시작, 호스 레벨 와인더 정렬 유지하면서 일정 속도로 감거나 풀기, 호스 마찰 또는 뒤틀림 발생 시 즉시 정지 후 조정, 전체 호스 스풀링 후 토크값 및 수동 풀림 여부 확인, 릴 내측, 양단 연결부 보호 패킹 삽입 및 끝단 고정
- 기타 항목: 릴 구동 시험 최소 30분 이상 지속, 호스 경화 여부, 굴곡 반응성, 탄성 유지력 관찰, 전기제어반 및 모터 기동성 평가(저온 윤활 확인)
- 결과 기록: 스풀링 시 장력/ 속도/ 시간 기록, 인력 투입량, 이상 유무 기록, 테스트 사진 및 영상 확보

극지연구소



그림 253 호스릴 컨테이너 가동 시험 및 2,700m 시추호스 스풀링

- 캡스틴&시추타워 및 컨트롤패널 설치 및 가동 시험
 - 캡스틴&시추타워 조립: 시추타워부(타워 프레임, 횡방향 크로스 멤버, 로드셀 장착 휠) 조립, 캡스틴부(인피드 롤러, 모터 기어박스 유닛, 스프로킷 체인 연결), 각 장치 고정 부 체결 상태 확인(볼트 체결 토크 확인), 제어패널과 연결되는 케이블 라우팅 및 방수 커넥터 체결, 제어패널 연결(3상 400V(50Hz) 전원 인입 확인, 캡스틴/릴/시추타워 각 모터, 브레이크, 엔코더, 로드셀 결선 확인, RS485/온도/깊이/하중 신호선 확인 및 인터페이스 테스트)
 - 제어패널 부팅 및 디스플레이 점검: 부팅 후 각 디지털 디스플레이 상태 확인(토크(DIS1), 속도(DIS2), 깊이(DIS4), 하중(TC3) 등), 비상정지, 리셋, 풀 코드 상태 확인
 - 캡스틴 모듈 독립 구동: 방향전환(FWD/REV) 스위치 정상 작동 확인, 속도조절 포텐서 미터로 RPM 제어, 디스플레이 반응 확인, 브레이크 작동 확인(CAPSTAN MOTOR BRAKE 신호 확인), 캡스틴 인피드 롤러 회전 정렬 및 체결 확인
 - 시추타워 로드셀 및 휠 시스템 시험: 로드셀 하중 모의 부하 적용 후 센서 출력 확인, 디지털 하중계(TC3) 반응 확인, 엔코더 회전 시 깊이 디스플레이 변화 확인, 휠 베어링 및 슈브 작동 상태 점검
 - 호스릴, 캡스틴&시추타워 통합 연동 시험: 릴과 캡스틴을 함께 구동하며 스풀링 시뮬레이션 수행, 하중 변화에 따른 토크, 하중, 깊이 반응 확인, 장력 컨트롤 조정으로 릴과 캡스틴 간 장력 조절 확인
 - 안전장치 및 인터록 기능 시험: 제어패널 E-STOP 작동 후 릴레이 차단 상태 확인, 풀

코드 스위치 작동 시 모터 정지 확인(Allen-Bradley Rope Pull Switch), 브레이크 회로 정상 작동 여부(시동/정지 시 동기화 확인)

- 기타 항목: 구동 시험 최소 30분 이상 지속, 패널 내 결로 및 센서 신호 불안정 여부 점검, 케이블 피복 상태 및 커넥터 고정 상태 확인
- 결과 기록: 부품별 설치 기록(체결 위치, 토크값 등), 디지털 디스플레이별 시험값, 이상 발생 시 조치사항 등



그림 254 캡스ตัน&시추타워 및 컨트롤패널 설치 및 가동 시험

- 빙저호 시추캠프 구축을 위한 물류 준비
 - '25년도 아라온 보급 장비 하역 및 기 보급 장비 정비: 열수순환시스템, 보일러, 다운 홀측정기, 윈치&자일론케이블, 펌프류, 물탱크, 20ft ISO 탱크컨테이너 등 당해 보급장비 하역 및 장보고기지 기 보급 후 보관중인 장비의 제설, 화물썰매 적재 작업 등
 - 운송 대상 장비 분류 및 구조 점검: 컨테이너 적입 보급한 대형 구조물(드릴타워, 캡스ตัน 등), 소형 장비 및 정밀기기, 소모성 부자재 등 벌크 화물의 조립/ 분리 포장 단위, 운송 방식(화물썰매 직접운송, 헬기 수송), 크레인 슬링 및 견인 포인트 점검
 - 남극 시험 완료 장비 운송 전 준비: 혹한 및 장거리 이동에 대비한 기계적 충격 흡수 포장(충격흡수재, 단열재, 랩핑), 센서류 및 전자기기 밀봉 포장 등 패키징 작업. 케이블 단자 분리 및 절연/ 밀봉 처리, 제어패널 디스플레이 커버 및 내부 실리카겔 삽입, 엔코더, 로드셀 등 민감부품은 별도 운송 박스에 분리 적재 등 전기·유압 계통 정리
 - 연료 및 폐기물 대비: 전년도 20ft ISO 탱크 컨테이너에 충전하여 장보고기지 보급 완료한 빙저호 시추캠프 운영용 항공유(JET A-1) 20,000L를 연료탱크썰매에 소분. 폐유/윤

활유 수거통, Spill Kit (흡수포, 수리패치, 예비 드럼 등) 준비

- K-루트 기반 트래버스 운송 준비: 장보고기지 - D2 빙저호 연구캠프 경로 및 이동 소요기간, 장비별 운송편성 계획 검토

2-3. 심부 빙저호 청정열수시추 시스템 국제 공동 개발

○ 통합시스템 호환성 테스트

- 영국 BAS와의 국제 협력을 통해 개발한 보일러&순환시스템과 모니터링 시스템 사이의 통합 제어/ 모니터링 테스트와 빙저호 계측 및 샘플링용 원치시스템과 케이블 2중(자일론/ 동축) 사이의 호환성 테스트 수행

○ 보일러&순환설비 통합 및 제어/ 모니터링 시스템 제작 및 테스트

- 작년도 설계를 바탕으로 빙저호 접근을 위한 시추 장비의 핵심 구성요소인 '보일러 및 순환설비'의 실질적인 제작 및 현장 적용 성능을 검증하기 위한 목적으로 수행
- 시추작업에서 열수는 단순한 천공을 위한 유체가 아니라, 시추홀의 청정도 유지, 시추장비의 결빙 방지, 시료의 오염 방지 등 복합적인 기능을 담당하기 때문에 순환과 가열, 공급의 전 과정에서 정밀하고 안정적인 관리가 필수
- 작년도 보일러, 열교환기, 순환펌프, 고압펌프 등 주요 기기의 배치 및 유체흐름 최적화에 대한 정적 설계를 완료하였고, 이에 기반하여 당해에는 기기의 제작과 각 기기의 제어 및 모니터링을 위한 시스템의 설계 및 이를 구현한 시제품을 제작, 시험하여 시스템 운전 안정성을 실증적으로 검증
- 시스템 구성요소 및 주요 기능
 - 물탱크: 식품 등급 PVC 코팅 폴리에스터 재질, 플랜트 용수용 30,000L급 1기 설치, 순환수 저장 및 예열, 하부 단열재(에타폼) 설치로 열손실 및 열발생으로 인한 표층 눈 아래로의 침하 방지
 - 순환펌프: Grundfos CR 15-5, 4kW급 멀티스테이지 펌프, VFD 제어 적용, 유량 110 L/min, 토출압력 670kPa
 - 보일러: 유닛당 350kW급 5기 구성, 연료는 Jet-A1 사용, 온도 컨트롤러 및 저유량 차단 스위치/ 알람 기능
 - 열교환기: SS316 소재 판형, 고온 가열루프와 시추수 간 열전달, 총 4쌍 설치로 병렬 운영 및 안정성 확보, SS316L 스테인리스 스틸 또는 PTFE 라이닝 식품 등급 배관
 - 고압펌프: CAT 3521C 스테인리스스틸 소재 고압셀 구조의 고온 고압 펌프, 90℃ 이상 고온수를 9MPa까지 가압 가능
 - 배관 및 매니폴드: 저압 및 고압 유량 분기/조절을 위한 분배 매니폴드는 내부 청소가 용이한 구조로 설계, 유량·압력·온도 센서 통합 설치, 고압 매니폴드는 10MPa 내압 기준으로 설계되어 드릴라인 분기 공급 가능

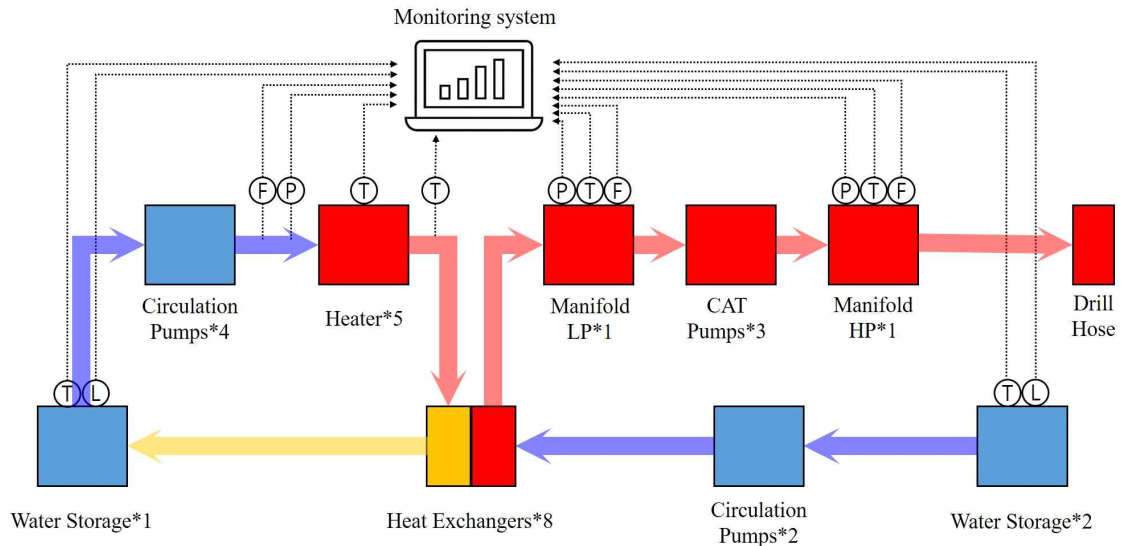


그림 255 열수&순환시스템 호환성 테스트 흐름도

- 통합 제어 및 모니터링 시스템

- 모니터링 시스템 설계: 모니터링 시스템은 청정열수시추 작업 중 시추용수의 온도, 압력, 유량, 수위 등을 실시간 측정 및 시각화하여 운용 효율과 안정성 확보 역할, PT100 온도계, 고정밀 유량·압력계, 수위센서 등 고신뢰성 장비를 도입하여 극지 환경에서도 안정적으로 작동하도록 설계, 모든 센서 데이터는 통합 제어 패넌을 통해 수집·표시·기록되며, 실시간 감시가 가능하도록 시스템 구축
 - 데이터 수집 및 처리 시스템 설계: 수집된 센서 데이터는 TCP/IP 기반 네트워크를 통해 중앙 컴퓨터로 전송되며, CSV 형식 저장 및 주기적 백업 기능 포함, 시계열 자료 저장, 대시보드에 시각적 표현 구현하여 현장 상태를 직관적으로 파악할 수 있도록 시스템 설계, GPS 기반 시간 동기화, 네트워크 상태 모니터링 기능이 포함되어 안정적인 데이터 흐름 유지 가능하도록 시스템 설계
 - 활용 및 통합 운용: 영국 BAS의 청정열수시추 시스템(BEAMISH, Ellsworth 등)과의 통합 및 호환성 확보를 고려하여 설계, 하위 모듈 간의 신호 일관성과 데이터 포맷 통일성 설계, 시스템 고도화를 위한 센서 성능 검증 및 향후 운용 소프트웨어 개선
- 라. 모니터링 시스템 구축용 센서류

센서류	조건	제품
온도계	-센서 : PT100 계열 -최소 5초 단위 기록 가능한 제품 일 것 -참고 제품 : T300EX, FD-H 등 -수량 : 10개	
유량계	-유압 : 최대 90bar (9 MPa) -유량 : 최대 160L/min (9.6 ton/hr = 2.6 L/s = 2.2 m/s) -보일러 호스 내경 1.5 인치 (3.81 cm) -참고 제품 : KTR-550-F 또는 VML/VMC -수량 : 7개	
압력계	-유압 : 최대 90bar (9 MPa) -참고 제품 : DPS 8381 -수량 : 10개	
레벨센서	-수심 2 m까지 측정 가능 할 것 -참고 제품 : DLF 8980 또는 Dinel-35 -수량 : 4개	
기타 전선	-우레탄 재질 또는 영하 40도에서 경화되지 않는 제품 일 것 -참고 제품 : OLFLEX HEAT 180 제품 -수량 : 200m 이상	 OLFLEX® HEAT 180 MS Certified silicone cables for North America (AWM recognized)

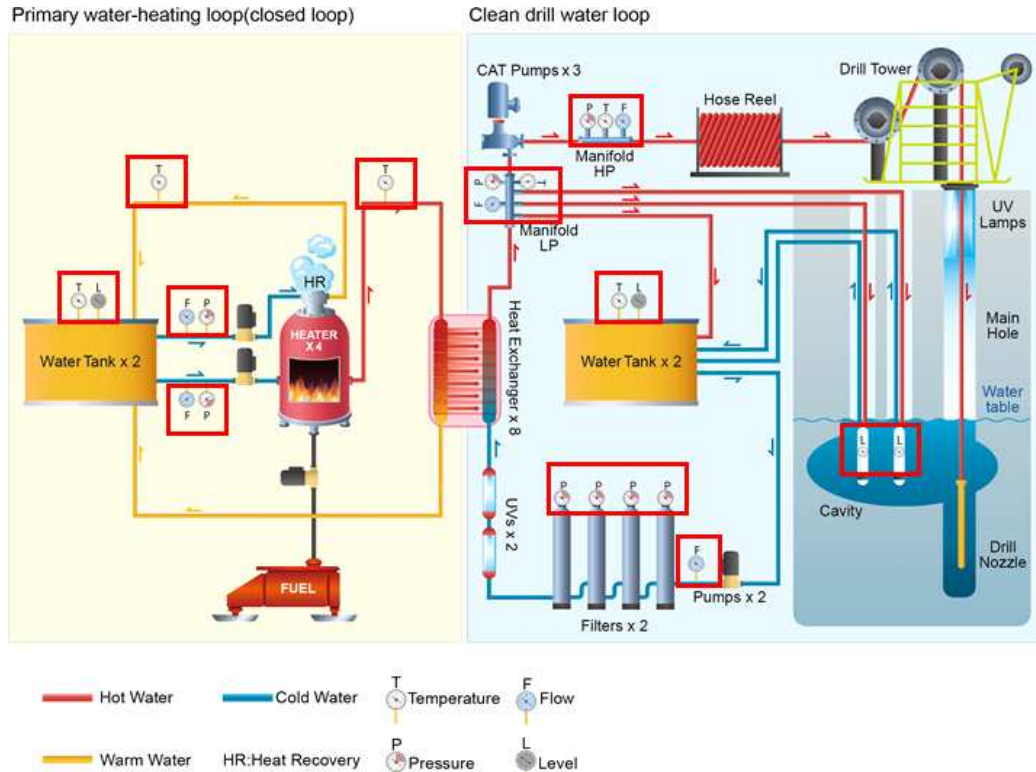


그림 256 청정 열수시추 시스템 모니터링 개념도

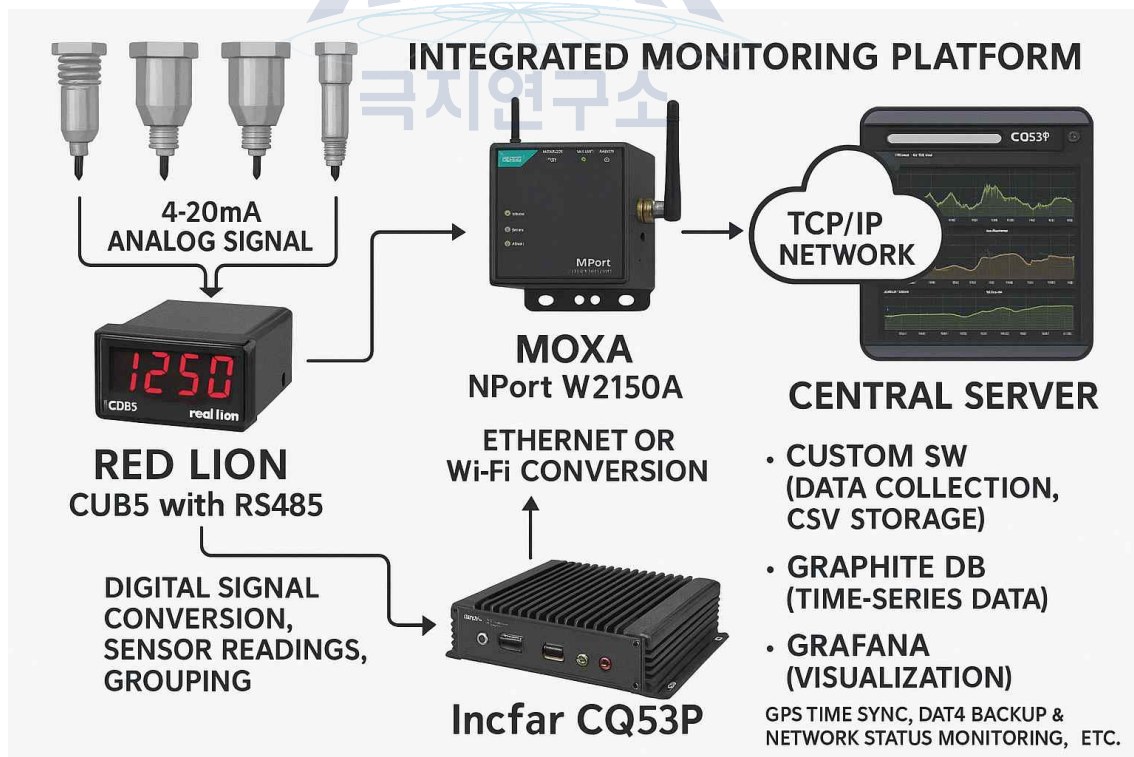
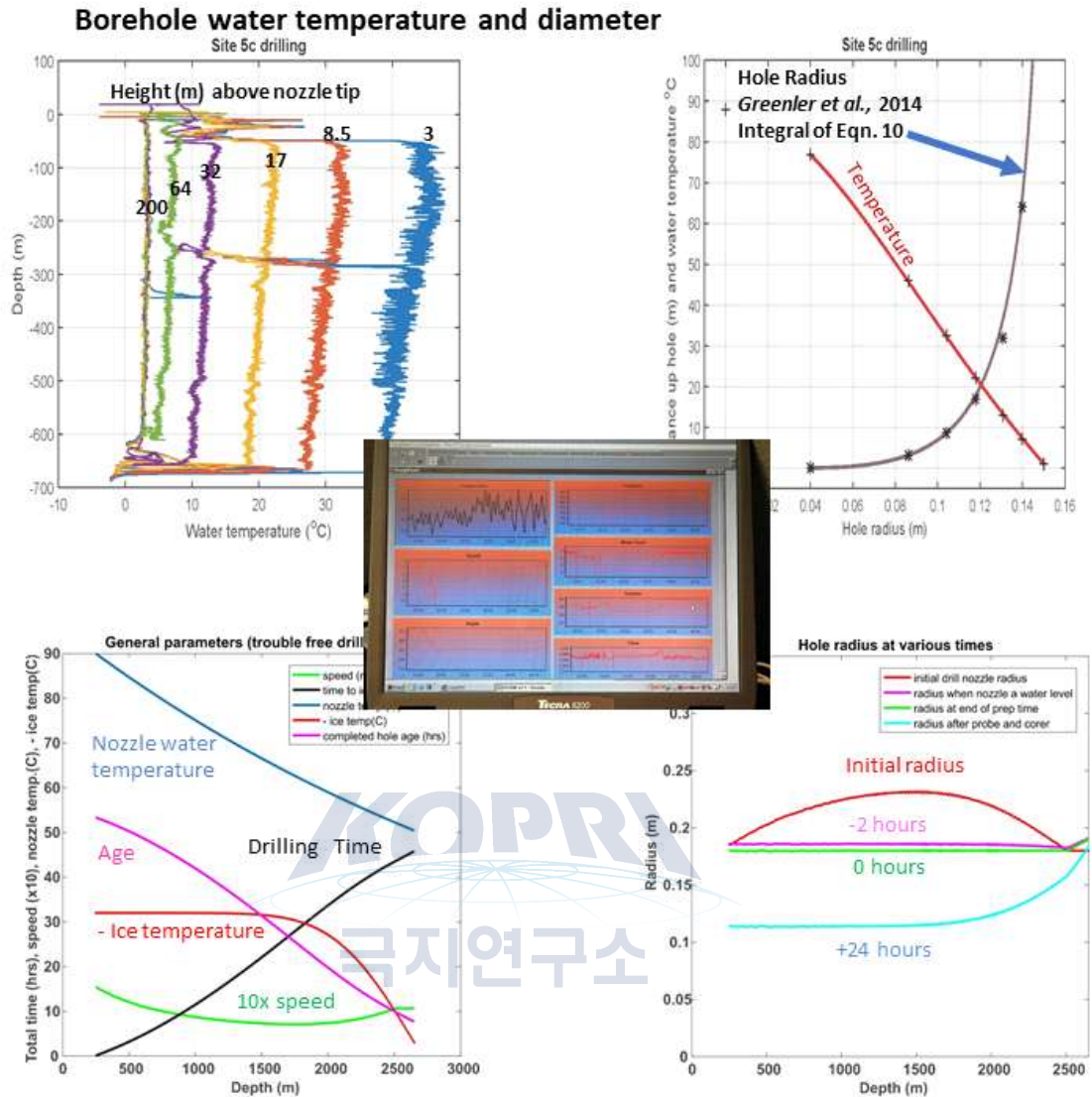


그림 257 청정열수시스템 모니터링 설치 및 종류 개념도



< 모니터링 시스템 구축 예정. 영국 남극 조사의 모니터링 시스템과 결과 >

- 제작 및 시험: 전체 구성요소 간의 연동 작동 안정성 확인, 계측값(온도, 유량, 압력, 수위 등)의 정확도 및 반응속도 검증, 이상조건 발생 시 제어시스템의 자동정지 및 경보 기능 평가, 시계열 데이터 수집 및 실시간 모니터링 시스템 정상작동 여부 확인
 - 시험 환경 및 조건: 시험 장소는 극지연구소 옥외 부지, 환경조건은 국내 일반 외기 조건, 초기 공급수 수온은 상온, 운전 시간은 연속 1시간 이상
 - 시험 절차

단계	내용	점검 항목
1단계	시스템 전체 조립 및 연결, 연료계통 확인	-배관, 펌프, 보일러, 열교환기, 매니폴드, 센서 등 전체 구성요소 물리적 연결 완료 여부 확인 -보일러 Jet-A1 연료 잔량, 유입밸브, 연료필터, 연소기 라인 누유 여부 및 점화대기 상태 확인
2단계	전기 연결 및 제어반 전원 점검	-전체 장비(순환펌프, 보일러, 고압펌프 등)의 전원 공급 상태, 배선 이상 유무 확인
3단계	상온수 저압 순환 시험	-0.3-0.5MPa 저압 상온수 순환 상태에서 플랜지, 호스 커넥터, 클램프 등 전체 연결부 육안 및 접촉 점검
4단계	고온수 고압 순환 시험	-보일러 가동으로 순환수 70-90℃ 도달 후, 고온 팽창에 의한 누수 발생 여부 재점검
5단계	순환펌프 성능 확인	-시추작업 수행 시의 설정치(670kPa) 운전 시 110 L/min 유량 달성 여부, 토출압력 확인 및 응답 속도 확인
6단계	보일러 가열 성능 확인	-상온수로부터 목표 온도 90℃ 도달 시간, 보일러 출력 유지 여부, 온도센서 응답 확인
7단계	열교환기 열전달 효율 확인	-입출수 온도, 시추수 측 온도 상승 추이, 열손실 여부 확인
8단계	저압 매니폴드 분배 확인	-각 분기별 유량 균일성(편차 $\pm 5\%$ 이내), 유량센서 정확도 및 응답 확인
9단계	고압펌프 토출 성능 시험	-9MPa 토출압력 도달 여부, 고온 고압 조건에서 유량 안정성($\pm 3\%$) 평가
10단계	고압 매니폴드 분배 확인	-고압 분기 유량 및 압력 유지 확인
11단계	모니터링 시스템 및 알람 작동 시험	-센서 신호 탈락, 유량 저하, 고온 초과 등 이상 신호 유도 후 경보 및 자동 정지 작동 확인

◦ 결과 기록: 제어 응답시간, 유량 유지 편차, 고압 토출압력, 센서 알람 반응 및 장비 비상 정지 정상 확인, 대시보드 UI 실시간 반응 등

- 국내 시험 운영을 통해 보일러&순환시스템 운영 중 실시간 제어 및 모니터링 기능 검증하여 시스템 안정성 확보, 정량 기반 데이터 기록을 통한 향후 시추 최적조건 도출 기반 마련, 고온/고압 계통의 설비 상태 자동 모니터링 기능 확보로 운영자 안전성 제고

○ 빙저호 계측 및 시료 채집용 샘플링 윈치 - 자일론 케이블 스풀링 테스트

- D2 빙저호는 최대 2,300m 깊이의 빙하 아래에 위치한 청정 환경으로, 이곳에서의 시료 채집 과정은 생물학적, 화학적 오염을 철저히 배제한 상태에서 수행되어야 함
- 케이블의 활용 목적에 따라 빙하 상부 시추를 위한 전기기계식 드릴(BigRAID) 연결 및 전력 공급 시에는 직경 6.53mm 길이 350m 동축 케이블을, 빙저호 계측 및 시료 채집 시에는 직경 6.9mm 길이 3,500m 자일론 코팅 로프를 하나의 윈치에 번갈아 가며 사용 예정임에 따라, 정확한 언스풀링 및 리스풀링 기술 확보는 계측 신뢰도 및 시료 오염 방지를 위한 핵심 조건

- 스풀링머신을 활용한 언스폴링/ 리스폴링 테스트는 윈치 운용의 정밀성과 신뢰성을 확보하기 위한 필수 절차이며, 이 과정을 통해 윈치 시스템 핵심 운용기술 확보
- 테스트 장비

구분	장비/ 재료	비고
샘플링 윈치	CORMAC Q5 HSC Polar	3500m 자일론, 350m 동축 수용 가능
자일론케이블	Zylon-coated rope Ø 6.9mm	멸균 후 계측용
동축케이블	Coaxial cable Ø 6.53mm	전기기계 드릴 전력공급용
스폴링머신	전자동 텐션 제어 가능 장비	텐션 가변/계측 기능
시브휠	통합 하중 측정 기능	구분해상도 1kg 이하

- 자이론 케이블 언스폴링 & 리스폴링 테스트
 - 초기 준비: 자일론 케이블을 스풀링머신에 장착, 케이블 외부 상태 및 텐션 응력 히스토리 기록, CORMAC Q5 드럼에 텐션 제어 하에 스풀링(목표 텐션: 100~300N)
 - 언스폴링 테스트: 다양한 속도(0.25 m/min, 10 m/min, 80 m/min)로 반복 운용, Level-wind 와 fleet angle($\pm 8^\circ$, $10^\circ \sim 11^\circ$) 일치 여부 검증, 각 층별 텐션 및 정렬 상태 확인
 - 리스폴링 테스트: 동일한 케이블 재감기 작업 수행, 위치 감감 성능 및 외피 손상 여부 확인, 비균형 스풀링 유무 체크 및 진동/드럼 편심 분석
 - 계측 데이터 수집: 하중, 속도, 케이블 길이 데이터 로깅, 피로 변형 및 단선 유발 여부 확인 등
- 동축케이블 언스폴링 & 리스폴링 테스트
 - 초기 준비: Focal 180/291 슬립링에 동축 커넥션 체결, 슬립링 내 전도성 및 절연 상태 테스트
 - 언스폴링 및 리스폴링 수행: 케이블 최소 곡률 반경(13cm) 이하로 감감 유지 확인, 드럼 과 슬립링 간 strain-relief 조립 안정성 확인, 케이블 내 전도성 유지 및 손상 유무 확인
 - 동작 통합 테스트: 전기기계 드릴 모사 저항 부하 연결하여 시뮬레이션, 전압 강하, 전류 누설, 간헐적 신호 단절 여부 측정



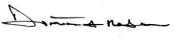
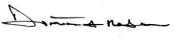
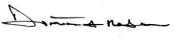
그림 258 빙저호 계측 및 시료 채집용 샘플링 윈치 - 케이블 스풀링 테스트

- 샘플링 윈치 케이블 스풀링, 언스폴링, 리스폴링 테스트를 통해 추후 빙저호 계측 및 샘플 채집 작업 반복 수행 시 윈치 운용의 안정성, 정밀성 및 청정성 확보
- 빙저호 시추 방안 대비
 - D2 빙저호는 피압상태이므로 시추공으로 호수와 연결될 때 200bar 이상의 물 분출이 발생 될 것으로 예측됨. 시추공을 지하수위까지 청정 열수로 채워 200bar 압력 상태를 유지하여 호수의 물 분출을 억제하도록 반영

3. 빙저호 시추

3-1. 국제 공동 심부 빙저호 시추연구 프로그램 개발

- 한-영 공동 D2 빙저호 시추 프로그램 실행계획 수립
- BAS 빙저호 시추팀과 공동으로 '25년도 남극 스웨이트즈 빙하 빙봉 열수 시추 현장 연구 참여 협의 추진
- 청정열수시추기 개발 및 청석호 협동 연구에 대한 KOPRI-BAS 간 연구 협력 부속서(LoU)의 갱신 완료(2025년 1월 20일부터 향후 5년간 유효)

  British Antarctic Survey NATURAL ENVIRONMENT RESEARCH COUNCIL Letter of Understanding between Korea Polar Research Institute (KOPRI) and the British Antarctic Survey (BAS) Cooperative Research on Clean-Access Hot Water Drilling (CHWD) & Subglacial Lake Research in Antarctica	Signed, <table border="0"> <tr> <td>For Korea Polar Research Institute</td> <td>For British Antarctic Survey</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Dr. Seong-Joong Kim Vice President Korea Polar Research Institute</td> <td>Prof. Dominic Hodgson Director of Science British Antarctic Survey</td> </tr> <tr> <td>Date: 10 January 2025</td> <td>Date: 20/01/2025</td> </tr> </table>	For Korea Polar Research Institute	For British Antarctic Survey			Dr. Seong-Joong Kim Vice President Korea Polar Research Institute	Prof. Dominic Hodgson Director of Science British Antarctic Survey	Date: 10 January 2025	Date: 20/01/2025
For Korea Polar Research Institute	For British Antarctic Survey								
									
Dr. Seong-Joong Kim Vice President Korea Polar Research Institute	Prof. Dominic Hodgson Director of Science British Antarctic Survey								
Date: 10 January 2025	Date: 20/01/2025								

< 갱신된 청석호 시추 관련 KOPRI-BAS 간 연구 협력 부속서(LoU) 문건 >

- 2027/28 하계 시즌 청석호 본 시추를 목표로 한 구체적인 한-영 국제 공동 청석호 시추 프로그램 실행계획 수립(시추 타임 프레임 설정, 장비 구축/테스트 및 인력 투입 일정, 주요 연구 주제 도출 및 과학 컨소시엄 구성 등), 매칭펀드 확보를 위한 BAS 측의 NERC 제출용 과제 제안서 내용 협의. 서신 교환/온라인 미팅 및 BAS 시추팀의 KOPRI 방문 협의('25년 5월 예정)를 통해 구체적인 실무 논의 진행 예정

김민철 생명과학연구본부
04-03 (목) , 오후 7:53
kmak@bas.ac.uk

Hi Keith,

How are you nowadays? Things have been quite turbulent here in Korea, as we await our Constitutional Court's decision on the presidential impeachment tomorrow. Here is an update on our CHWD project and tentative timetable for the field campaign at the D2 site.

At KOPRI, our current project phase concludes at the end of this year, and we are now undergoing an evaluation process to determine research projects for the next six years (2026-2031). We have submitted a preliminary proposal for the next phase of the CHWD project to KOPRI's internal decision-making committee, with the final budget decision expected around June-July. Below is a summary of the CHWD system progress and the proposed field schedule.

CHWD system development progress

Completed:

- Metal-free portable clean laboratory with fume hood, clean bench, microscope, autoclave, water purification system, etc. (containerized)
- 100kw generators x2 (containerized)
- Dual-mode drill water filtration & UV system (containerized)
- Hose reel (containerized)
- Capstan tower (containerized)

To be completed by end of 2025:

- CAT high-pressure pumps x3
- Aikota water heaters (351kw each) x5, heat recovery, circulation system with low-pressure pumps, heat exchangers, manifolds, control panels, pipework, etc.
- MacArney sampling winch (CORMAC Q5), spooler, and 3,500m zylon tether
- Wellhead UV unit with cooler, housing, iris, etc.
- Water tanks x3 (30,000L each)
- Submersible pumps x2
- Data logging, display, alarm for the CHWD system (except for drilling part)
- Borehole measurement system with diameter, xyz positioning, temperature, salinity, camera, etc.

Planned for 2026:

- Drill hose cleaning unit and air jet system
- Drill nozzles x2
- Airbeam drill tent, Weatherhaven plant tent, clean room tent
- Umbilicals x3
- Water and sediment samplers
- BigRAID wireline auger (optional, by BAS)

Proposed field schedule:

- 2026/27 season: Assembly and field testing of CHWD units at Browning Pass (~10km northeast of Jangbogo Station)

Note: This testing phase is to ensure system integration and performance when all units are combined. So it may not make any water cavity as the ice thickness at Browning Pass is less than 100m)

-27/28 season: Seismic survey and CHWD at the D2 site

Given the timeline and development status above, I would greatly appreciate your feedback on a potential collaborative drilling effort between BAS and KOPRI at the D2 site during the 2027/28 season. As you might expect, honestly our CHWD system almost followed the design and approach of your SLCEC CHWD system, so your input and feedback is strongly needed. I'd also be happy to discuss this in more detail during your visit to KOPRI in May. If a joint online meeting would be necessary for discussing the drilling plan or scientific collaboration (i.e., science consortium between UK and Korea), I would be glad to arrange it.

Kind regards,
Mincheol

Keith Makinson - BAS <kmak@bas.ac.uk>
04-12 (목) , 오전 12:58

Hi Mincheol,

Apologies for the delay. We have been heavily focused on Greenland logistics planning, costing up and optimising every litre of fuel and kilo of equipment to see if our Petermann Glacier 2026 fieldwork is feasible within our relatively tiny budget. Our plan-A logistics were much higher than we were led to believe in the haste of the rapid proposal call. By moving money around, the work looks possible but with very scaled back ambitions. We must order our fuel in the next two weeks!

Your list of achievements and plans look good, and you are clearly making great progress with the CHWD project. It will be very interesting to discuss the details and exchange ideas.

From our earlier discussions about BAS-KOPRI collaboration, including with our science director, there remains genuine interest at BAS. The key thing will be to determine the collaborative research areas and identifying the research questions that can be addressed, which will be needed for funding proposals to NERC. From your drilling timeline and NERC funding timelines, now is the time to start more formally building our scientific collaboration.

Have you developed a detailed science programme or is this part of the evaluation process to determine research projects for the next six years (2026-2031)? Can or would you want BAS scientists to contribute to this process?

Also, are the geophysical results from the lake region and their interpretation available? Previously, you mentioned these were being worked on ready for publication.

The next stage would be to establish a BAS-KOPRI group (or UK and Korea consortium depending on funding rules) to further develop a collaborative framework that will enable funding proposals.

I'm happy to discuss this further when I'm at KOPRI (May 14th - 21st) or before, to get things started.

Best regards
Keith

< KOPRI-BAS 간 청석호 시추 실행계획 수립을 위한 사전 논의 >

3-2. 빙저호 시추를 위한 초기환경영향평가 최종보고서(Final IEE) 작성

○ 빙저호 시추 지역 환경조사 자료를 기반으로 초기환경영향평가서 최종안 작성

- 기존의 남극 빙저호 시추 프로젝트들은 대부분 포괄적 환경영향평가서(CEE)가 아닌 초기 환경영향평가서(IEE)로 ATCM에 제출된 바 있으며, 최근 중국의 동남극 3,000m급 Qilin 빙저호 탐사 또한 46차 ATCM에서 IEE의 Information Paper 형태로 보고된 바 있음
- '24년 기 작성된 Draft IEE를 보완하여 초기환경영향 평가 최종보고서(Final IEE) 작성 [부록 참조]
- 최종 IEE보고서는 '26/27시즌을 시작으로 본 시추가 예정된 '27/28시즌까지 매해 남극 활동 50일 전 외교부 및 환경부에 제출하여 승인 절차 진행 예정임. 또한, 최종본은 제48차 남극조약 협약 당사국 회의(ATCM 48)에 Information Paper 형태로 보고 예정임

2) 연구진도 걱정 수행여부

표 6 연구진도 적정 수행여부

[illegible]

구분	세부연구목표	추진실적 및 계획												연구비 (천원)
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
2단계 1차년도 (‘23년)	1. 심부 빙저호 물리탐사 - D2 빙저호 지구물리학적 수치모델 작성 - 위성 자료 기반 신규 열수시추 후보지 광역 관측													43,000
	2. 심부 빙저호 청정열수시추기술 개발 - 2,000m급 시추호스 제작 - 시추 캠프 설계 - 빙저호 샘플러 개발													500,000
	3. 빙저호 시추 - 한-영 공동 D2 빙저호 시추 프로그램 협약 - 빙저호 시추 지역 화학/생물학적 환경특성 조사 및 분석 자료 종합													280,000
2차년도 (‘24년)	1. 심부 빙저호 물리탐사 - BRP(bed reflection power) 자료 처리 및 mapping 기술 고도화 - 신규 빙저호 열수시추 후보지 위성 자료 확보													28,000
	2. 심부 빙저호 청정열수시추기술 개발 - Wellhead UV 유닛 제작 - 빙저호 시추캠프 텐트유닛 제작 - 보일러&순환시스템 개발													336,000
	3. 빙저호 시추 - 한-영 국제공동 빙저호 시추프로그램 계획 수립 - 빙저호 시추를 위한 초기 환경영향평가서 초안 제출 및 평가													196,000
3차년도 (‘25년)	1. 심부 빙저호 물리탐사 - 레이더 자료 분석 기술 고도화 - 신규 빙저호 시추 후보지 선정													28,000
	2. 심부 빙저호 청정열수시추기술 개발 - 시스템 멸균 유효성 검증 - 빙저호 시추캠프 설치 운영 - 통합시스템 호환성 테스트													336,000
	3. 빙저호 시추 - 한-영 공동 D2 빙저호 시추 프로그램 현장연구 수행 - 빙저호 시추를 위한 포괄적 환경영향평가(CEE) 최종안 제출													196,000

※ 파란색 : 계획 / 주황색 : 실적

□ 당해연도 연구진도 적정 수행여부

○ 자체점검 결과, 연구계획서상의 연구계획 대비 당해연도 연구진도는 적정하게 진행 중임

○ 심부 빙저호 물리탐사

- 빙저호 지구물리 자료 분석 기술 고도화
 - 정밀 탄성과 수치해석을 위한 기존 Cell-based 파동전파 모델링 최적화 완료
 - 0.5 m 격자크기를 가지는 파동전파 수치 모델링 완료
 - 정밀 수치 모델링 결과와 현장자료와의 비교를 통한 자료분석 완료
 - 탄성과 자료, 레이더 자료 및 수치모델링 결과를 바탕으로 SLC에 대한 3D mapping
 - Sentinel-1 & ICESat-2 위성 자료로부터 2019년부터 2022년까지 지속적인 호수 수위 증가 확인
- 신규 열수시추 후보지 선정
 - 클린 환경을 위해 해당 연구지역 기상 자료를 고려하여 시추 후보지 선정
 - 위성 자료를 바탕으로 신규 열수 시추 후보지 선정
 - SLC 상부 지역에 존재하는 소규모 신규 빙저호 확인
 - SLC 및 신규 (D3) 빙저호 열수시추 후보지의 지속적인 모니터링을 위한 ICESat-2 자료 최신화

○ 심부 빙저호 청정열수시추 기술 개발

- 시스템 멸균 유효성 검증: 국제 공인 검증기관을 통한 Wellhead UV 시스템의 멸균 유효성 검증을 완료하였으며, 현재 추가 업그레이드를 위해 Wellhead UV 유닛과 전용 냉각장치 호환성 시험 중에 있음
- 빙저호 시추캠프 설치 운영: 하반기 남극 장보고과학기지 출장을 통해 빙저호 시추캠프 구축용 weatherhaven 사의 S4 프레임 아치 텐트 장보고기지 주변 설치 테스트/ 빙저호 시추캠프 설치용 장비 시험(100kW 발전 컨테이너, 이동식 클린랩, 캡스턴&시추타워)/ 호스릴 컨테이너 - 2,700m 시추호스 스펀링 및 해당 장비의 빙저호 시추캠프 운송을 위한 물류 준비 연내 완료 예정. 빙저호 시추캠프 운영은 본 사업과 연계된 “남극내륙 연구거점 구축과 기지 후보지 선정을 위한 빙원탐사” 연구사업의 주요 장비(설상차, 카라반 등)와 핵심참여인력(중장비/ 안전 대원)의 공동활용을 통해 수행 가능하기 때문에 내륙 탐사가 수행중인 '25년도 내에는 수행이 불가능하며(23/24시즌 기준, 내륙탐사팀 '24.1.23. 장보고기지 복귀), 내륙탐사팀 복귀 후 차년도 수행 예정
- 통합시스템 호환성 테스트: 현재 보일러&순환시스템과 모니터링 시스템의 설계 보완과 샘플링용 3,500m 자일론 케이블 제작 중으로, 제작 완료 후 보일러&순환시스템 및 모니터링 시스템 사이의 통합 제어/ 모니터링 테스트와 샘플링 윈치 - 2중 케이블(자일론/ 동축) 사이의 호환성 테스트 연내 완료 예정

○ 빙저호 시추

- 한-영 공동 D2 빙저호 시추 프로그램 현장연구 수행: BAS 빙저호 시추팀의 과학/ 기술 인력 감소와 시추 프로그램 자금 지원 중단으로 인해 한-영 공동 빙저호 시추프로그램 현장 연구 순연. 당해 5월 14-21일 1,300m 급 빙봉 열수시추시스템 테스트를 위해 BAS 빙저호 시추팀의 극지연구소 방소가 예정되어 있으며, 해당 미팅을 통해 '25년도 남극 열수시추 현장연구 참여 협의와 청석호(D2) 본시추 시기 조율 예정
- 빙저호 시추를 위한 포괄적 환경영향평가(CEE) 최종안 제출: 빙저호 시추 프로젝트의 대부분 초기환경영향평가서(IEE)로 ATCM 제출된 바 있으며, 최근 중국의 동남극 3,000m급 Qilin 빙저호 탐사 또한 46차 ATCM에 IEE의 Information Paper 형태로 제출. 기존 사례 종합 결과, 본 과제의 타겟 2,000m급 active lake 청석호(D2)도 CEE 보다 환경 요구사항이 낮은 IEE로 변경하여 추진함이 절차상 유리할 것으로 판단. 현재 기 작성된 Draft IEE 보완중이며, 연내 환경부 제출용 초기환경영향 평가서 최종본(Final IEE)) 작성 완료 후 최종보고서와 함께 별첨 제출 예정

3) 위탁과제 목표달성 및 본과제 활용

가) 위탁연구과제 목록

위탁과제명		연구참여자		연구기간		당해연도 연구비(백만원)	비고
		연구책임자	참여연구원(명)	총기간	당해연도		
1	영상레이더를 이용한 빙저호 모니터링 기술개발 연구	한향선	14	'20.06.01.~ '24.12.31.	-	230	

나) 위탁과제 목표달성도 및 본과제에 대한 기여 내용

위탁과제명		연구 목표	목표달성도 (%)	본과제 목표달성에 대한 기여 및 활용 내용
1	영상레이더를 이용한 빙저호 모니터링 기술개발 연구 (‘20.06.01.~’24.12.31.)	○ 인공위성 영상레이더를 이용한 빙저호 모니터링 기술 개발 - 인공위성 InSAR 기반 David 빙하 주변 및 남극 내륙 고위도 지역 빙저호 탐지 - 빙저호 활동에 의한 빙상 표면 변위 산출 및 시계열 변화 분석 - 빙저호 수위 변화 추정을 위한 InSAR 활용 기술개발 및 검증 - InSAR 관측 기반 빙상 표면변위 해석을 통한 빙저호의 충전-배수 활동 분석	100%	○ D2 빙저호의 지구물리특성 규명과 신규 빙저호 후보지 선정을 위해서는 영상레이더를 이용한 빙저호 모니터링 기술 활용 필수적임. 본 위탁과제는 시계열 영상레이더 간섭도를 활용하여 빙저호의 수위 변화를 시공간적 고해상도로 추정할 수 있는 기술을 최종 확립함으로써 본 과제의 D2 빙저호 지구물리학적 특성 규명과 신규 빙저호 후보지 탐지 목표달성에 100% 기여함 - 영상레이더 간섭기법의 응용을 통한 빙저호 상부 빙상 표면변위 산출기술 확립 - David 빙하 주변 및 남극 내륙 빙저호 공간정보 구축 - 레이더 간섭기법으로 산출된 빙상 표면 변위로부터 빙저호의 활동 특성 해석 - 빙저호 활동 특성 변화가 빙상 표면 유속 변화에 미치는 영향 추정 - 빙저호 충전 및 배수 활동의 고해상도/고정밀 모니터링이 가능한 영상레이더 간섭기법 기반의 새로운 방법론 개발 - David 빙하 상류 활성 빙저호들의 충전 및 배수 활동 파악 ○ D2 빙저호 및 신규 빙저호의 빙저 수문 네트워크 규명 연구를 위한 기반 기술 및 남극 내륙 빙저호 공간정보 갱신과 활동성 모니터링 연구에 활용

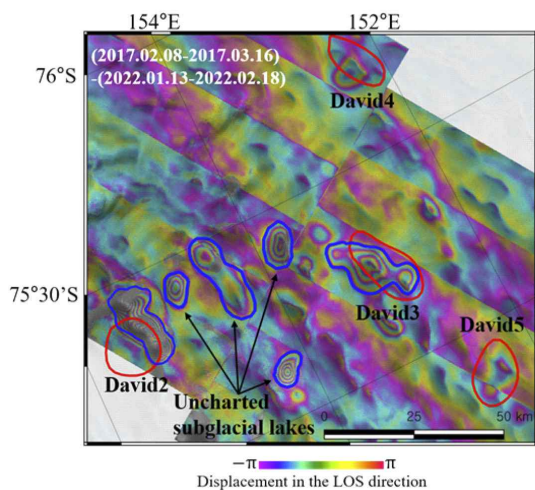


그림 259 David 빙하 주변 빙저호 지역 Sentinel-1 DDInSAR 기법을 통한 지표 변위 산출. 빙저호 상부 변화 및 물리적 특성 해석

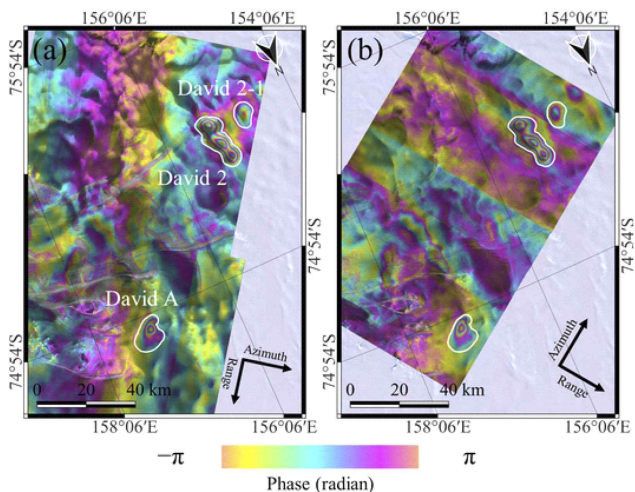


그림 260 David 빙하 주변 빙저호 지역 Sentinel-1 DDInSAR 기법을 통한 신규 빙저호 확인. 신규 빙저호 상부 변화 및 물리적 특성 해석

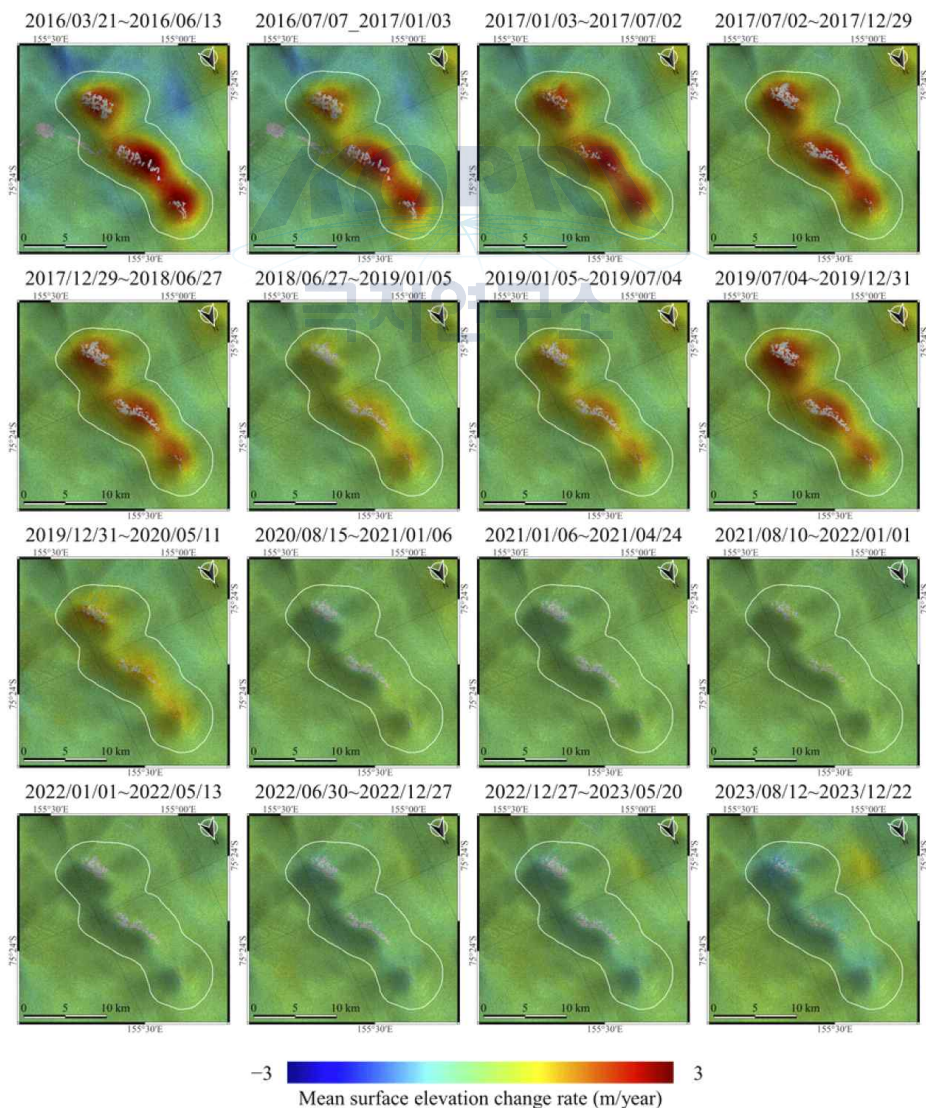


그림 261 David D2 빙저호 상부 빙상 표면 고도의 시계열 변화율

4) 국제공동연구개발과제 목표달성 및 본과제 활용

가) 국제공동연구개발과제 목록

위탁과제명	연구참여자		연구기간		당해연도 연구비(백만원)	비고
	연구책임자	참여연구원(명)	총기간	당해연도		
1			'00.00.00.~ '00.00.00.	'00.00.00.~ '00.00.00.		
2						
3						

나) 국제공동연구개발과제 목표달성도 및 본과제에 대한 기여 내용

위탁과제명		당해연도 목표	목표달성도 (%)	본과제 목표달성에 대한 기여 및 활용 내용
1				○ ex)본과제의 목표달성에 a,b,c,d,e의 연구결과 활용이 필수. 본 국제공동연구개발과제의 경우 e의 역할 100%수행
2				○ ex)극지연구소에 없는 ---분석 장비를 본 국제공동연구개발기관 에서 보유. 본과제수행에 있어 필수적인 ---분석을 대행하는 역할 100%수행
3				○

나. 예산집행의 적절성

1) 1단계 1차년도(2020년) 집행 내역

(단위 : 천원)

표 7 1단계 1차년도(2020년) 집행 내역

비목	세목	당해연도 예산		집행실적	집행율(%)
		당초예산	실행예산		
	내부인건비	153,243	153,243	153,243	100
직접비	외부인건비	52,890	49,910	49,910	100
	학생인건비	5,000	2,262	2,262	100
	연구시설·장비비(장비구입)	639,100	582,600	580,899	99.7
	연구시설·장비비(기타)	0	29,400	29,325	99.7
	연구활동비	47,310	37,910	37,867	99.8
	연구재료비	182,833	234,447	234,250	99.9
	연구수당	21,500	20,530	20,530	100
	회의비	10,000	1,574	1,574	100
	지적재산권처리비				
	위탁연구개발비	30,000	30,000	30,000	100
	과학문화활동비	5,000	5,000	5,000	100
	연구실안전관리비	2,367	2,367	2,367	100
	연구사업관리비	4,000	4,000	4,000	100
	직접비 소계	1,000,000	1,000,000	997,984	99.8
	간접비	603,545	603,545	603,545	100
	연구비 총액	1,756,788	1,756,788	1,754,772	99.9

2) 1단계 2차년도(2021년) 집행 내역

(단위 : 천원)

표 8 1단계 2차년도(2021년) 집행 내역

비목	세목	당해연도 예산		집행실적	집행율(%)
		당초예산	실행예산		
	내부인건비	246,155	246,155	246,155	100
직접비	외부인건비	134,700	128,506	128,506	100
	학생인건비	6,000	3,523	3,523	100
	연구시설·장비비(장비구입)	73,800	73,800	73,190	99.2
	연구시설·장비비(기타)	283,000	299,818	277,529	92.6
	연구활동비	253,660	232,516	231,505	99.6
	연구재료비	119,261	121,098	106,070	87.6
	연구수당	50,000	49,160	49,160	100
	회의비	10,000	2,000	1,689	84.5
	지적재산권처리비	0	0	0	
	위탁연구개발비	50,000	50,000	50,000	100
	과학문화활동비	5,491	25,491	25,491	100
	연구실안전관리비	4,112	4,112	4,112	100
	연구사업관리비	3,976	3,976	3,976	100
	직접비 소계	994,000	994,000	954,751	96.1
	간접비	706,256	706,256	706,256	100
	연구비 총액	1,946,411	1,946,411	1,907,162	98

3) 1단계 3차년도(2022년) 집행 내역

(단위 : 천원)

표 9 1단계 3차년도(2022년) 집행 내역

비목	세목	당해연도 예산		집행실적	집행율(%)
		당초예산	실행예산		
	내부인건비	309,262	327,642	327,642	100
직접비	외부인건비	165,300	154,313	154,289	99.9
	학생인건비	0	0	0	
	연구시설·장비비(기타)	445,867	436,595	323,854	74.2
	연구활동비	151,000	181,000	180,738	99.8
	연구재료비	50,000	50,000	47,861	95.7
	연구수당	50,000	60,000	60,000	100
	회의비	10,000	10,000	9,965	99.6
	지적재산권처리비				
	위탁연구개발비	50,000	50,000	50,000	100
	국제공동연구개발비				
	과학문화활동비	5,500	5,500	5,500	100
	연구실안전관리비	4,487	4,746	4,746	100
	연구사업관리비	3,846	3,846	3,846	100
	직접비 소계	936,000	956,000	840,799	88
	간접비	736,456	718,076	714,222	99.4
	연구비 총액	1,981,718	2,001,718	1,882,663	94.1

4) 2단계 1차년도(2023년) 집행 내역

(단위 : 천원)

표 10 2단계 1차년도(2023년) 집행 내역

비목	세목	당해연도 예산		집행실적	집행율(%)
		당초예산	실행예산		
	내부인건비	350,164	350,164	350,164	100
직접비	외부인건비	98,000	75,592	75,592	100
	학생인건비	2,000	1,930	1,930	100
	연구시설·장비비(기타)	180,000	295,477	249,014	84.3
	연구활동비	50,000	81,000	79,655	98.3
	연구재료비	323,205	300,704	299,236	99.5
	연구수당	52,000	55,000	55,000	100
	회의비	10,000	10,000	9,502	95
	지적재산권처리비	0	0	0	
	위탁연구개발비	50,000	50,000	50,000	100
	국제공동연구개발비	50,000	0	0	
	과학문화활동비	1,300	1,300	1,300	100
	연구실안전관리비	4,000	4,502	4,502	100
	연구사업관리비	3,295	3,295	3,295	100
	직접비 소계	823,800	878,800	829,026	94.3
	간접비	572,308	572,308	568,915	99.4
	연구비 총액	1,746,272	1,801,272	1,748,105	97

5) 2단계 2차년도(2024년) 집행 내역

(단위 : 천원)

표 11 2단계 2차년도(2024년) 집행 내역

비목	세목		당해연도 예산		집행실적	집행율(%)
			당초예산	실행예산		
	내부인건비		404,365	404,365	404,209	99.9
직접비	외부인건비		70,200	56,584	56,584	100
	학생인건비		9,000	15,764	15,764	100
	연구시설·장비비(기타)		75,000	121,670	71,668	59
	연구활동비		80,000	107,876	107,794	99.9
	연구재료비		211,260	173,382	173,363	99.9
	연구수당		48,000	61,953	61,953	100
	회의비		8,500	8,500	8,495	99.9
	지적재산권처리비		-	-	-	-
	위탁연구개발비		50,000	50,000	50,000	100
	국제공동연구개발비		-	-	-	-
	과학문화활동비		1,300	1,300	1,300	100
	연구실안전관리비		4,500	4,835	4,835	100
	연구활동 지원금	연구사업관리비	2,240	2,240	2,240	100
		학술전자정보구입비	0	896	896	100
	직접비 소계		560,000	605,000	554,891	91.7
	간접비		599,228	599,228	597,867	99.7
	연구비 총액		1,563,593	1,608,593	1,511,126	96.8

6) 2단계 3차년도(2025년) 추정 집행 내역

(단위 : 천원)

표 12 2단계 3차년도(2025년) 추정 집행 내역

비목	세목	당해연도 예산		(추정)집행실적*	(추정)집행율(%)
		당초예산	실행예산		
	내부인건비	387,499	387,499	387,499	100
직접비	외부인건비	105,600	105,600	105,600	100
	학생인건비	22,800	22,800	22,800	100
	근접지원인력인건비				
	연구시설·장비비(기타)	100,000	150,000	150,000	100
	연구활동비	188,500	148,841	148,841	100
	연구재료비	65,664	97,664	97,664	100
	연구수당	60,000	67,000	67,000	100
	회의비	8,500	9,228	9,228	100
	지적재산권처리비				
	위탁연구개발비				
	국제공동연구개발비	1,300	1,300	1,300	100
	과학문화활동비	2,240	1,120	1,120	100
	연구실안전관리비	4,500	5,158	5,158	100
	연구활동지원금				
	학술전자정보구입비	896	1,064	1,064	100
	직접비 소계	560,000	560,000	560,000	100
간접비	간접비	167,702	167,702	167,702	100
	인력지원비	473,495	473,495	473,495	100
	연구비 총액	1,588,696	1,638,696	1,638,696	100

주) 연구비 집행실적은 연말기준 추정 실적을 기재

2) 연구비 예산대비 집행실적 평가도(해당 실적에 Check)

연구비 집행실적	정상	✓	부진		초과	
집행실적 부진 (또는 초과) 사유	-					
당해연도 종결시까지 연구비 예상집행률	100%					

2. 연구개발 성과의 달성도 및 우수성

가. 연구목표의 정상 추진 및 성과 우수성

1) 목표 대비 달성도

표 13 목표 대비 달성도

구분	연구목표 달성내용				계획대비 연구실적 달성율(B) (%)
	세부연구목표	연구내용	가중치 (A)	달성실적	
1단계 1년차 (2020)	1. 심부 빙저호 물리탐사	1-1. 빙저호 지구물리탐사 장비 및 활용기술 확보 - 탄성과 탐사장비 및 활용기술 확보 - 빙저호 탐사 후보지역에 대한 GIS기반 레이더 자료 DB구축 및 활용 - 레이더 탐사자료 기반 탄성과 탐사측선 설계 - 빙저호 정밀분석을 위한 파동전파 모델링 기반 탄성과 자료 분석기술 개발	0.40	- 빙상전용 탄성과 탐사장비 및 운용기술 확보 - 지구물리 탐사자료 DB 구축 - 탐사자료 분석기술 고도화 (자료처리 워크플로우, 파동전파 모델링 개발)	100
	2. 심부 빙저호 시추기술 개발	2-1. 이동식 청정 실험실 개발 - 고단열 컨테이너를 활용한 이동식 청정 실험실 독자적 개발 - 이동식 청정실험실 운송용 눈 썰매 제작 - 시료 처리용 내부 장비 구입 및 배치	0.35	- 이동식 청정실험실 제작 - 이동식 청정실험실 운송용 눈썰매 제작 - 내부 실험 기기 구매(3차 증류기, 진공펌프, 매니폴드, 냉장/ 냉동고, 실험용 파이펫)	100
		2-2. 빙저호 퇴적물 시추 시스템 개발 - 국외 빙저호 퇴적물 시추 시스템 자료 수집 및 자문		- 자료 수집 및 자문 보고서 작성	
		2-3. 빙저호 열수 시추기 개발 - 모듈형 시추동력 발전기 제작		- 모듈형 시추동력 발전기 제작	
	3. 빙저호 시추	3-1. 한-영 공동 빙저호 시추 프로그램 개발 - 서남극 빙저호 공동시추 프로그램 협약	0.25	- 영국 서남극 빙저호 시추 프로그램 최신 동향 자료 확보	100
		3-2. 빙저호 지역 환경특성 예비조사 - 미생물 생물량, 중 조성 등 빙저호 지역 생태환경시료 특성 분석 및 DB 구축		- 빙저호 빙설시료 생태환경 특성 분석 - KPDC 자료 등록	
	계		1.0		100

구분	연구목표 달성내용				계획대비 연구실적 달성율(B) (%)
	세부연구목표	연구내용	가중치 (A)	달성실적	
1단계 2년차 (2021)	1. 심부 빙저호 물리탐사	1-1. 빙저호 지역 광역 탄성과 탐사 및 자료 해석 - 8 fold 수를 가지는 96채널 정밀 탄성과 탐사자료 (심자형 측선) 8km 확보 - 속도분석 및 구조보정이 포함된 정밀 자료처리 워크플로우 작성 - 정밀 속도분석/구조보정 과정을 통한 탄성과 단면 제시	0.3	- 탄성과탐사 현장연구 수행 - 심자형 측선 8km 탐사자료 확보 및 해석 - 빙저호 단면도 작성	100
	2. 심부 빙저호 시추기술 개발	2-1. 이동식 청정 실험실 개발 - 이동식 청정실험실 극지 현장 테스트 수행	0.5	- '20/21시즌 남극출장 취소로 인한 국내 테스트 수행	100
		2-2. 열수시추 열균시스템 개발 - 열수시추 열균시스템 제작(다중 필터 및 자외선 기반 시스템)		- 열수 열균시스템 제작	
		2-3. 빙저호 퇴적물 시추 시스템 개발 - 퇴적물 시추용 청정원치, 피스톤/다중 시추기 설계 - 빙저호 퇴적물 시추 운영 시스템개발		- 빙저호 퇴적물 시추 시스템 설계	
		2-4. 빙저호 열수시추기 국제 공동 개발 - 수조, 보일러, 펌프 등 열수 순환 시스템 제작		- COVID-19 관련 비용 발생 및 단가 상승으로 인한 제작 보류 - 영국 BAS 열수시추장비 공동 활용 협의	
	3. 빙저호 시추	3-1. 한-영 공동 빙저호 시추 프로그램 개발 - 영국 SLCECs 시추프로그램 최신 동향 파악 및 공동 프로그램 관련 추가 협의	0.2	- 최신 동향 파악 및 추가 협의	100
		3-2. 빙저호 지역 환경특성 예비조사 - 빙설시료, 미세먼지 등 빙저호 지역 지화학적 특성 분석 및 DB 구축		- 빙저호 후보지 빙설시료의 생지화학적 분석 및 KPDC 등록	
	계		1.0		100

구분	연구목표 달성내용				계획대비 연구실적 달성율(B) (%)
	세부연구목표	연구내용	가중치 (A)	달성실적	
1단계 3년차 (2022)	1. 심부 빙저호 물리탐사	1-1. 정밀 탄성과 탐사 자료 분석 및 최적 빙저호 시추위치 선정 - 정밀 탄성과 자료 분석을 통한 2D, 3D 해석도 작성 - D2 빙저호에 대한 지구물리학적 특성 규명 - 탄성과 자료 기반 빙저호 시추 위치 선정	0.4	- 2D/3D 탄성과 해석도 작성 - 빙저호 지구물리학적 특성 파악 - 탄성과 해석기반 최적 시추 위치 제시	100
	2. 심부 빙저호 시추기술 개발	2-1. 열수시추 멸균시스템 개발 - 열수시추 멸균시스템 시험 운영 - 생물학적 활성 테스트를 통한 멸균 유효성 검증	0.5	- '21/22시즌 남극활동 축소로 인한 국내 시험운영/ 멸균 유효성 검증	100
		2-2. 빙저호 퇴적물 시추 시스템 개발 - 빙저호 시추용 청정원치, 피스톤/ 다중 시추기 제작		- 원치 제작 - BAS 열수시추시스템 퇴적물 시추기 활용 협의	
		2-3. 빙저호 열수시추기 국제 공동 개발 - 열수시추기 시추 probe 개발		- BAS 열수시추시스템 probe 활용 협의	
	3. 빙저호 시추	3-1. 한-영 국제 공동 프로그램 개발 - 한-영 공동 빙저호 시추 프로그램 개발 재협의, 협약 추진	0.1	- BAS 방문 출장 수행 - D2 빙저호 공동시추 프로그램 개발 합의, 협약 추진	100
		3-2. 심부 빙저호 시추를 위한 초기환경특성 조사 및 보고 - 빙저호 지역 환경특성 조사를 통한 초기환경영향평가(IEE) 보고서 제출		- 빙저호 시추후보지 초기환경 분석 자료 작성	
	계		1.0		100

구분	연구목표 달성내용				계획대비 연구실적 달성율(B) (%)
	세부연구목표	연구내용	가중치 (A)	달성실적	
2단계 1년차 (2023)	1. 심부 빙저호 물리탐사	1-1. 탄성과 자료 분석 기술 고도화 - D2 빙저호 지구물리학적 수치모델 작성	0.05	- 지구물리학적 수치 모델 작성 - 표면/ 기반암/ 수두 DEM, 수두 기울기, 빙저호 표면 면적 도출	100
		1-2. 위성 자료 기반 신규 열수시추 후보지 광역 관측 - David 빙저호 후보지 1.5m급 초고해상 도 SAR 위성 영상 자료 확보		- 신규 후보지 초고해상도 SAR 위성 영상 자료 확보 - 위성영상자료 DB 구축	
	2. 심부 빙저호 시추기술 개발	2-1. 심부 빙저호 청정열수시추 시스템 개발 - 2,000m급 시추호스 제작	0.60	- 2,700m급 시추호스 제작	100
		2-2. 심부 빙저호 시추캠프 구축 - 빙저호 시추캠프 설계		- 이동식 컨테이너화 장비 및 극지용 고성능 텐트 유닛 조합 D2 빙저호 캠프 설계	
		2-3. 심부 빙저호 청정열수시추 시스템 국제 한-영 공동 개발 - 빙저호 샘플러 개발		- 빙저호 계측 및 샘플링용 3,000m급 원치 제작	
	3. 빙저호 시추	3-1. 국제 공동 심부 빙저호 시추연구 프로 그램 개발 - 한-영 공동 D2 빙저호 시추 프로그램 협약	0.35	- KOPRI-BAS 간 남극 빙저 호 열수시추 공동연구 제안 서 작성 및 2단계 연구협약 (LoU) 체결 합의	100
		3-2. 빙저호 시추 지역 환경특성 조사 - 환경 시료의 생지화학적 특성 분석		- 빙저호 지역 빙설시료 대상 이온농도 자료 1건 확보	
	계		1.0		100

구분	연구목표 달성내용				계획대비 연구실적 달성율(B) (%)
	세부연구목표	연구내용	가중치 (A)	달성실적	
2단계 2년차 (2024)	1. 심부 빙저호 물리탐사	1-1. 레이더 자료 분석 기술 고도화 - BRP (bed reflection power) 자료처리 및 mapping 기술 고도화	0.05	- 레이더 자료 처리 및 분석 워크플로우 고도화 - 빙저호 표면적 및 수량 계산	100
		1-2. 신규 빙저호 열수시추 후보지 위성 자료 확보 - 해상도 1m급 위성 자료 확보		- 신규 빙저호 열수시추 후보지 KOMPSat-5 위성 자료 확보	
	2. 심부 빙저호 시추기술 개발	2-1. 심부 빙저호 청정열수시추 시스템 개발 - Wellhead UV 유닛 제작	0.60	- Wellhead UV 유닛 제작	93
		2-2. 심부 빙저호 시추캠프 구축 - 빙저호 시추캠프 텐트유닛 제작		- 빙저호 시추캠프 텐트유닛 설계 - 빙저호 시추캠프 구축 운영용 연료 확보(연료탱크 및 항공유 20,000L)	
		2-3. 심부 빙저호 열수시추기 국제 공동 개발 - 보일러&순환시스템 개발		- 보일러&순환시스템 시스템 설계 - 순환장치 3종 10대 도입	
	3. 빙저호 시추	3-1. 국제 공동 심부 빙저호 시추연구 프로 그램 개발 - 한-영 국제공동 빙저호 시추프로그램 계획 수립	0.35	- 빙저호 시추 관련 극지연구소 -영국 BAS 간 연구협력 부 속서(LoU) 갱신	100
		3-2. 빙저호 시추를 위한 포괄적 환경영 향평가서 초안 작성 - 빙저호 시추 지역 환경조사 자료를 기 반으로 포괄적 환경영향평가 초안 작성		- 초기환경영향평가서 초안 (Draft IEE) 작성	
	계		1.0		95.8

구분	연구목표 달성내용				계획대비 연구실적 달성율(B) (%)
	세부연구목표	연구내용	가중치 (A)	달성실적	
2단계 3년차 (2025)	1. 심부 빙저호 물리탐사	○ 빙저호 지구물리 탐사 자료 분석 기술 고도화 - 레이더 자료 분석 기술 고도화 - 빙저호 표면적, 저수량 계산법 제시 - 레이더 결과 3D 단면도 작성	0.05	- 빙저호 표면적 및 수량 계산 - 레이더 3D 단면도 작성	100
		○ 신규 빙저호 열수시추 후보지 위성자료 확보 - AWS 설치 및 기상 모니터링 - 신규 시추 후보지 선정		- 신규 열수시추 후보지 선정	
	2. 심부 빙저호 시추기술 개발	○ 심부 빙저호 청정열수시추 시스템 개발 - 시스템 멸균 유효성 검증	0.60	- Wellhead UV 시스템 멸균 유효성 검증 완료	100
		○ 심부 빙저호 시추캠프 구축 - 빙저호 시추캠프 설치 운영		- 시추캠프 설치 테스트 - 시추캠프 설치용 장비 시험 - 시추캠프 운송 물류 준비	
		○ 심부 빙저호 열수시추기 국제 공동 개발 - 통합시스템 호환성 테스트		- 보일러&순환시스템-모니터링 시스템 호환성 테스트 - 샘플링 원치시스템-케이블 2종 호환성 테스트	
	3. 빙저호 시추	○ 국제 공동 심부 빙저호 시추연구 프로그램 개발 - 한-영 공동 D2 빙저호 시추 프로그램 현장연구 수행	0.35	- ‘25/26시즌 스웨이츠 빙하 열수 시추 현장연구 참여 예정 - ‘27/28시즌 본 시추 대비 실행계획 수립 완료 예정	100
		○ 빙저호 시추를 위한 포괄적 환경영향평가(CEE) 최종안 제출 - 포괄적 환경영향평가 초안 (Draft CEE) 제출에 따른 평가를 기반으로 최종안 (Final CEE) 작성		- 연내 초기환경영향평가 최종 보고서(Final IEE) 작성 예정	
	계		1.0		100

2) 연구내용 및 달성실적

가) 세부연구목표1. 심부 빙저호 물리탐사

☐ 연구내용 1-1. 빙저호 지구물리 탐사 자료 분석 기술 고도화

○ 빙저호 지구물리 자료 분석 기술 고도화

- 정밀 탄성과 수치해석을 위한 기존 Cell-based 파동전파 모델링 최적화 완료
- 0.5 m 격자크기를 가지는 파동전파 수치 모델링 완료
- 정밀 수치 모델링 결과와 현장자료와의 비교를 통한 자료분석 완료
- 탄성과 자료, 레이더 자료 및 수치모델링 결과를 바탕으로 SLC에 대한 3D mapping
- Sentinel-1 & ICESat-2 위성 자료로부터 2019년부터 2022년까지 지속적인 호수 수위 증가 확인

☐ 연구내용 1-2. 신규 열수시추 후보지 선정

○ 신규 열수시추 후보지 선정

- 클린 환경을 위해 해당 연구지역 기상 자료를 고려하여 시추 후보지 선정
- 위성 자료를 바탕으로 신규 열수 시추 후보지 선정
- SLC 상부 지역에 존재하는 소규모 신규 빙저호 확인
- SLC 및 신규 (D3) 빙저호 열수시추 후보지의 지속적인 모니터링을 위한 ICESat-2 자료 최신화

○ 신규 빙저호 열수시추 후보지 위성자료 확보

- 신규 빙저호 후보지(David A, David 2-1) 위성 자료 확보 및 2025.12월 추가 확보 예정

나) 세부연구목표2. 심부 빙저호 시추기술 개발

☐ 연구내용 2-1. 심부 빙저호 청정열수시추 시스템 개발

○ 시스템 평균 유효성 검증

- 국제 공인 검증기관을 통한 Wellhead UV 시스템의 평균 유효성 검증 완료

☐ 연구내용 2-2. 심부 빙저호 시추캠프 구축

○ 빙저호 시추캠프 설치 운영

- 빙저호 시추캠프 구축용 플랜트 텐트(Weatherhaven 사 S4 프레임 아치 텐트) 장보고 기지 주변 테스트 설치 수행
- 100kW 발전 컨테이너 가동 시험, 이동식 청정실험실 가동 및 청정도 검증 시험, 캡스턴 & 시추타워 및 컨트롤패널 설치 및 가동 시험, 호스릴 컨테이너 - 2,700m 시추호스 스펀링 등 빙저호 시추캠프 설치용 장비 극지 시험 수행
- '25년도 아라온 보급 장비 하역 및 정비, 운송 대상 장비 분류 및 점검, 시험 완료 장비 패키징, K-루트 기반 트래버스 운송 경로 및 계획 검토 등 빙저호 시추캠프 물류 준비 수행

□ 연구내용 2-3. 심부 빙저호 청정열수시추 시스템 국제 공동 개발

○ 통합시스템 호환성 테스트

- 물탱크, 순환펌프, 보일러, 열교환기, 저압매니폴드, 고압펌프, 고압매니폴드 구성의 보일러&순환시스템과 모니터링 시스템 사이의 통합 호환성 확인
- 빙저호 계측 및 시료 채집용 샘플링 원치와 샘플링용 자일론 케이블, 열수시추 초기 전기기계식 드릴 운영용 동축 케이블 등 케이블과의 통합 호환성 확인

다) 세부연구목표3. 빙저호 시추

□ 연구내용 3-1. 국제 공동 심부 빙저호 시추연구 프로그램 개발

○ 한-영 공동 D2 빙저호 시추 프로그램 실행계획 수립

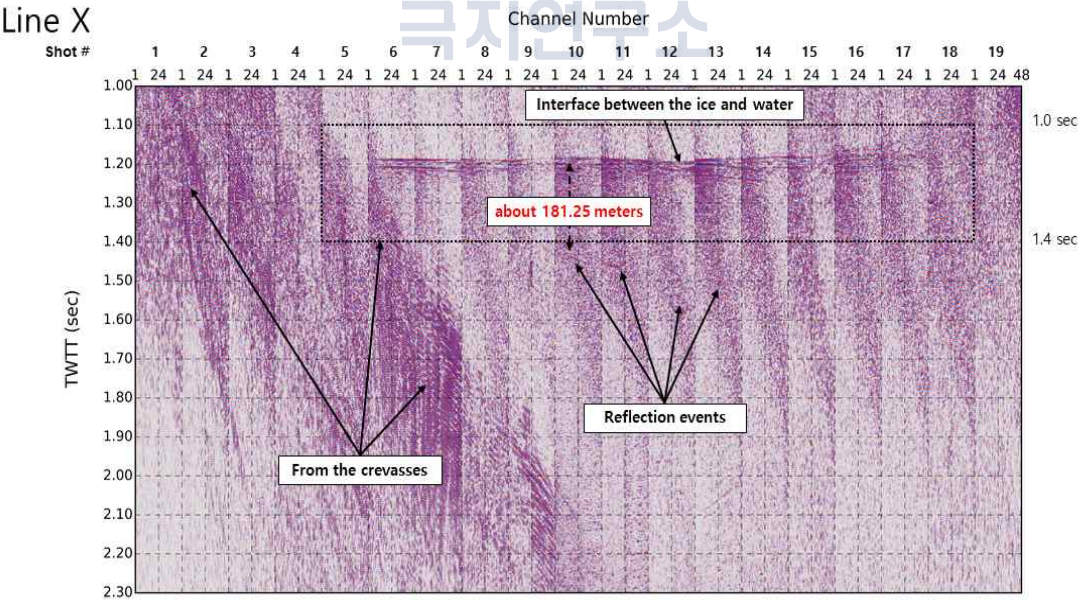
- 영국 BAS 팀과 '27/28시즌 본 시추 대비 한-영 국제 공동 청석호(D2) 시추프로그램 실행계획 논의 중. 연내 세부 계획 수립 완료 예정
- '25/26시즌 스웨이트 빙하 1,300m급 열수 시추 현장연구 참가 예정

□ 연구내용 3-2. 빙저호 시추를 위한 포괄적 환경영향평가서 초안 작성

○ 빙저호 시추 지역 환경조사 자료를 기반으로 초기환경영향평가서 최종본 작성

- '24년 기 작성된 초기환경영향평가서 초안(Draft IEE) 업데이트 중. 당해연도 상반기 내 최종본 작성 완료 예정

3) 대표적 우수성과 : 대표적 사례 18건(사업연도별 3건) 이내, 건당 1장 이내 작성
표 14 대표적 우수성과

우수성과 - 1. (2020년)	빙저호 지구물리탐사 장비 구축 및 탄성과 탐사 결과분석
성과 내용	○ 2019/20 시즌 획득된 탄성과 자료분석을 통한 D2빙저호 규모 확인 - 세계 최초 D2 빙저호 최대깊이 약 80m, 면적 약 2.5 km² 추정 - 세계 최초 D2 빙저호지역 1:100,000 bathymetry 수치지형도 작성 ○ 빙하 레이더 자료 및 탄성과 자료 DB 구축 - 레이더 자료(821 km²)의 효율적 관리 및 위치기반 광역적 지질정보 확보 - 빙하 레이더 자료와 탄성과 자료 비교를 통한 빙저호 규모검증 - DB를 이용하여 향후 탄성과 탐사 측선설계에 활용 ○ 빙저호 정밀분석을 위한 파동전파 모델링 기반 탄성과 자료 분석기술 개발 - 격자크기 2m 이하 파동전파 모델링 기술 개발 - 모델링 구현을 통해 다양한 빙저호 환경에 대한 인공합성자료 데이터 확보(빙저호의 수심과 규모, 크레바스에 의한 잡음 등) - 실제 현장자료와 직접적인 비교가 가능한 수준의 인공합성자료 구축이 가능한 빙저호 탐사 전용 모델링 알고리즘 개발 및 활용연구 수행 - 실제 빙저호의 지구물리학적 변수 (P파 속도 등) 규명
성과의 우수성	○ 탄성과 자료를 기초하여 세계 최초 D2 빙저호 깊이 추정 ○ 빙권 탄성과 탐사 시스템 활용 기술 확보 ○ 빙저호 탐사 전용 자료처리 워크플로우 개발 ○ 파동전파 모델링 기술개발 및 이를 활용한 빙저호 정밀분석연구 수행
	Line X  그림 262 Line X processed shot gathers
증빙자료	○ 학술발표 - 2020.9.23.~25. - 한국지구물리탐사학회 2020년 가을 학술대회 - 효율적인 빙권 탄성과 탐사 적용 방법 (사례 : 데이비드 빙하지역 빙저호의 관찰) 효율적인 빙권 탄성과 탐사 적용 방법 - 사례 : 데이비드 빙하지역 빙저호의 관찰 조원태¹⁾, 강승구²⁾, 김관수³⁾, 김배동³⁾, 이주환³⁾ ¹⁾ 극지연구소, hyeontae@krci.re.kr Effective Glacier Seismic Survey Method Applied on Glacier Case : Configuration of the Subglacial Lake under the David Glacier, Antarctica Hyeontae Ju¹⁾, Seung-Goo Kang²⁾, Kwansoo Kim³⁾, Yeondong Kim³⁾ and Joohan Lee³⁾

우수성과 - 2 (2020년)	이동식 청정실험실 개발
성과 내용	○ 고단열 컨테이너 기반 이동식 청정실험실 개발 완료 - 고도의 단열성능 및 내구성을 확보한 고단열 컨테이너 합체 제작 - 청정도 및 단열성 유지를 위한 내부 공간 분리, 천정 덕트 배치, 전기 설비, 사용 자재 특성 등 종합설계를 바탕으로 이동식 청정실험실 제작 완료 - 남극 내륙에서 획득 가능한 환경시료의 전처리 및 분석을 위한 내부 실험 장비 구축 완료 ○ 이동식 청정실험실 운송 전용 화물셀매 구축 완료 - 슬라이드식 계단, 전용 발판, 핸드레일 등을 추가한 실험실용 화물셀매 제작 완료
성과의 우수성	○ 청정 열수시추 시료 오염 최소화를 위한 이동식 현장 시료 분석시스템 개발 ○ 극저온의 환경에서 안정적인 실험환경 구축이 가능한 고단열 컨테이너 개발 ○ 국내 최초 다목적 이동식 청정실험 모듈 설계 자료 확보

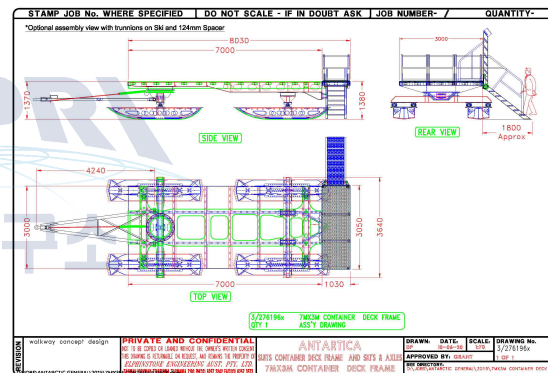
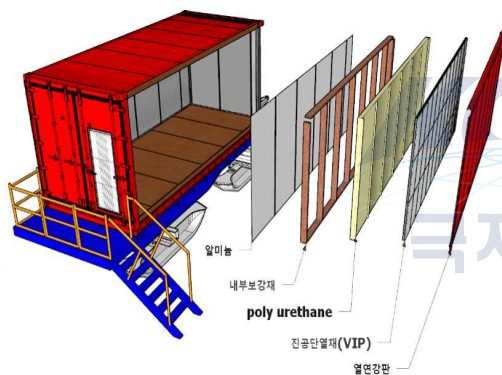


그림 263 고단열 컨테이너용 개발 패널 구조 및 이동식 청정실험실 전용 셀매 도면

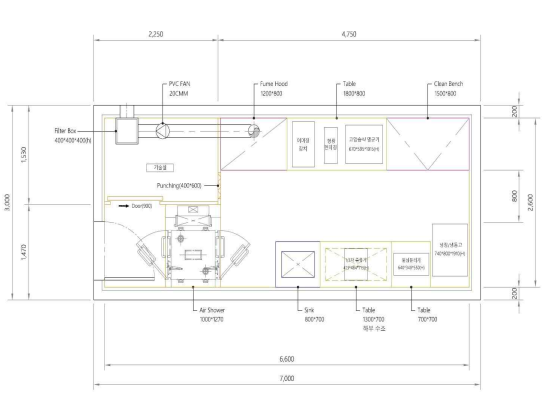


그림 264 이동식 청정실 내부 배치도 및 개발 완료된 이동식 청정실험실과 화물셀매 세트

증빙자료	
------	--

우수성과 - 3. (2020년)	모듈형 시추동력 발전기 개발
성과 내용	○ 모듈형 시추동력 발전기 개발 완료 - 100 kW급 발전기가 설치된 모듈형 동력 컨테이너 2대 제작 완료 - 보온제로 보강된 컨테이너를 사용하여 남극내륙에서 활용 후 외부 야적 가능
성과의 우수성	○ 100 kW급 발전기가 장착된 컨테이너 제작을 통해 이동식 동력원 확보 - 심부 열수시추기 및 시추캠프 운영에 필요한 대규모 전력 공급원 확보 - 모듈형 시추동력 발전기 설계 자료 확보 ○ 남극 내륙연구 역량 강화 - 이동식 인프라 확보로 새로운 남극 내륙연구 수요에 유연한 기술적 전개와 확장성 확보로 연구비용 절감

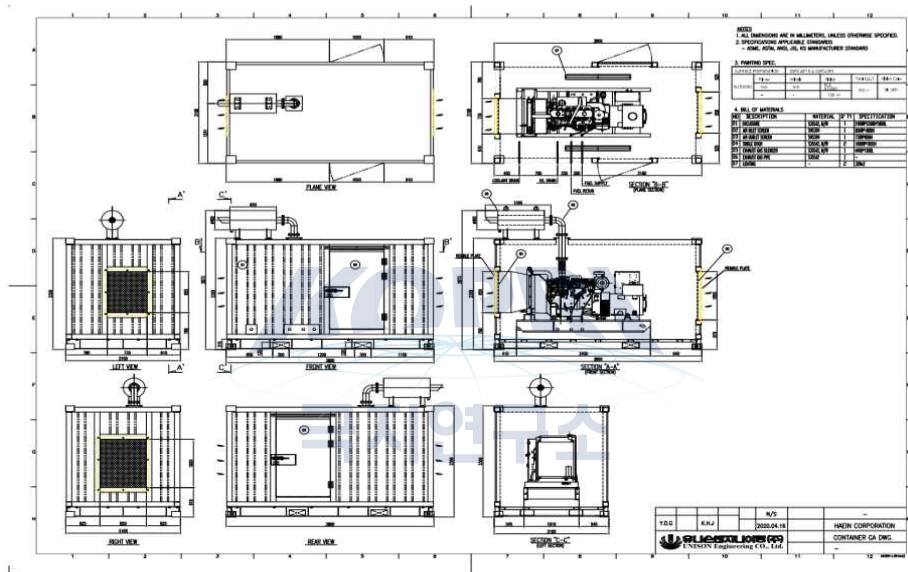


그림 265 발전기 및 전용 컨테이너 설계 도면



그림 266 개발 완료된 100kw급 모듈형 시추동력 발전기 2기

증빙자료	
------	--

우수성과 - 4. (2021년)	빙저호 지역 광역 탄성과 탐사 및 자료해석
성과 내용	- David 빙하 D2 지역 빙저호에 대한 정밀 탄성과 탐사 수행 - 속도분석, 중합 및 구조보정 적용이 가능한 8 fold 수의 96채널 탐사자료 확보 - 국내 최초 빙상 탐사용 탄성과 시스템 운용 및 자료처리 기술 확보
성과의 우수성	- 빙저호에 대한 정밀 탄성과 자료 및 이에 대한 자료처리 기술 확보 - David 빙하 D2 지역 빙저호 정밀구조 (수심, 규모 등) 파악 및 지구물리학적 특성 규명 - 빙권 탄성과 탐사 시스템 운용 및 자료처리에 대한 Know-how 확보
빙저호 지역 정밀 탄성과 탐사(96채널, 8 fold 수) 수행 예정, 십자형 8km 측선 확보	
그림 267 빙저호 지역 정밀 탄성과 탐사 수행('21.11.28.~12.20.) David 빙하 D2 지역 빙저호 정밀구조 (수심, 규모 등) 파악이 가능한 정밀 탄성과 단면 작성 그림 268 탄성과 단면으로부터 빙저호 정밀구조 파악 및 지구물리학적 특성 규명 연구	
증빙자료	- 논문 실적 - 2021.07.08. - Remote sensing (IF 5, mrnIF 85) - 동남극 빙하의 속도 이상 현상, DDInSAR 및 항공 레이더 관측 Technical Note Velocity Anomaly of Campbell Glacier, East Antarctica, Observed by Double-Differential Interferometric SAR and Ice Penetrating Radar Hoonpil Lee ^{1,*}, Heejung Seo ^{1,2}, Hyangwon Han ^{1,*}, Hyeontae Ju ³ and Jodan Lee ⁴ ¹ Department of Geography, Kangwon National University, Chuncheon 24304, Korea; leehoonpil@knu.ac.kr (H.P.L.); seohj@knu.ac.kr (H.S.) ² Earthquake and Volcano Research Division, Korea Meteorological Administration, Seoul 07962, Korea ³ Department of Future Technology Convergence, Korea Polar Research Institute, Incheon 21990, Korea; juhyeon@kpori.ac.kr (H.J.) ⁴ Department of Geography, Seoul National University, Seoul 151-747, Korea; jodanlee@snu.ac.kr * Correspondence: hyangwonhan@knu.ac.kr; Tel.: +82-33-550-4008

우수성과 - 5. (2021년)	열수 멸균시스템 개발
성과 내용	○ 열수 멸균시스템 설계 및 제작 - 청정열수시추 시스템의 핵심인 다중 입자 필터 시스템과 자외선 램프 기반의 멸균시스템 제작 완료 - 듀얼 시스템으로 설계하여 필터가 막히거나 UV 장치가 고장 나는 경우에도 시스템 중단 없이 보수가 가능해 지속적인 시추 작업이 가능
성과의 우수성	○ 국내 최초 열수시추 멸균시스템 개발 - 빙저호 시추가 과학적, 국제적으로 인정받을 수 있는 청정 시스템 확보 - 빙저호 시추에 필요한 멸균 시스템 제작과 관련된 세부 설계자료 확보

그림 269 열수시추 멸균시스템 설계도면

그림 270 개발 완료된 열수시추 멸균시스템

증빙자료

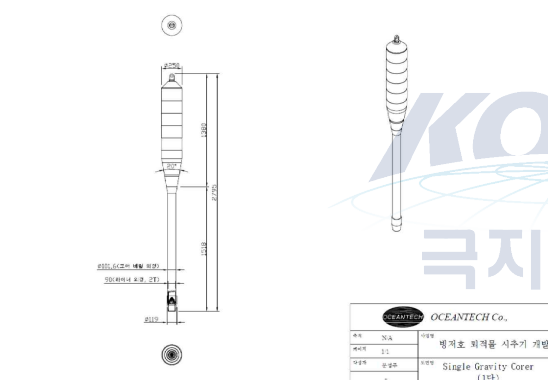
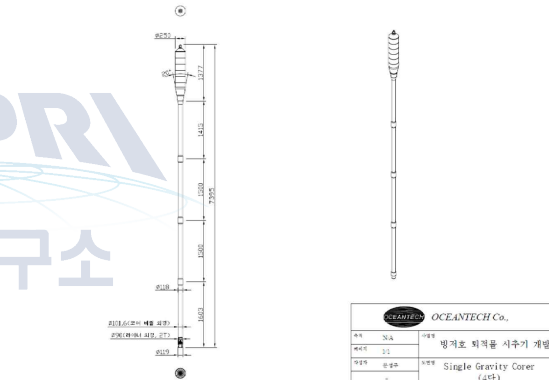
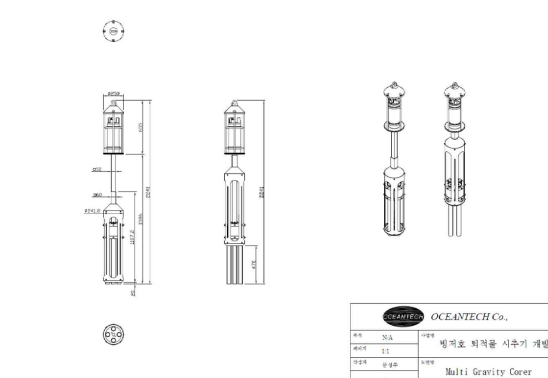
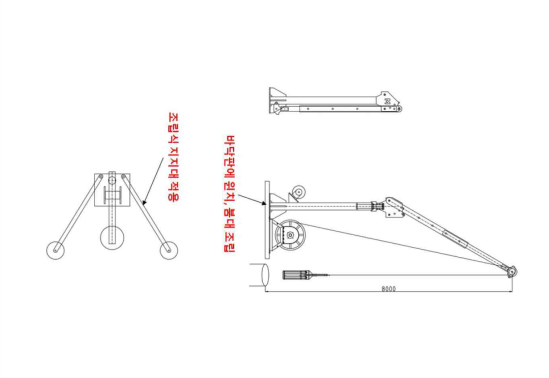
우수성과 - 6. (2021년)	빙저호 퇴적물 채취용 시추기 설계																																				
성과 내용	○ 빙저호 퇴적물 채취용 시추기 설계 - 극지방 빙하 위에서 시추공을 따라 내려 사용할 수 있는 퇴적물 시추기 설계 - 빙저호 퇴적물 시추에 적합한 유압 또는 타격 방식의 특수 기능 포함																																				
성과의 우수성	○ 국내 최초 빙저호 퇴적물 채취용 시추기 개발 - 빙저호 퇴적물 시추 및 채취에 적합한 시추기 설계자료 확보 - 국내 자체 설계를 통해 국내 연구자 독자적 운영이 가능한 빙저호 퇴적물 채집용 시추기 설계																																				
 <table border="1"> <tr><td colspan="2">OCEANTECH Co.</td></tr> <tr><td>주요</td><td>NA</td></tr> <tr><td>제자</td><td>SS</td></tr> <tr><td>영역</td><td>해양</td></tr> <tr><td>주요</td><td>빙저호 퇴적물 시추기 개발</td></tr> <tr><td>제품명</td><td>Single Gravity Corer (1단)</td></tr> </table>  <table border="1"> <tr><td colspan="2">OCEANTECH Co.</td></tr> <tr><td>주요</td><td>NA</td></tr> <tr><td>제자</td><td>SS</td></tr> <tr><td>영역</td><td>해양</td></tr> <tr><td>주요</td><td>빙저호 퇴적물 시추기 개발</td></tr> <tr><td>제품명</td><td>Single Gravity Corer (4단)</td></tr> </table>  <table border="1"> <tr><td colspan="2">OCEANTECH Co.</td></tr> <tr><td>주요</td><td>NA</td></tr> <tr><td>제자</td><td>SS</td></tr> <tr><td>영역</td><td>해양</td></tr> <tr><td>주요</td><td>빙저호 퇴적물 시추기 개발</td></tr> <tr><td>제품명</td><td>Multi Gravity Corer</td></tr> </table> 		OCEANTECH Co.		주요	NA	제자	SS	영역	해양	주요	빙저호 퇴적물 시추기 개발	제품명	Single Gravity Corer (1단)	OCEANTECH Co.		주요	NA	제자	SS	영역	해양	주요	빙저호 퇴적물 시추기 개발	제품명	Single Gravity Corer (4단)	OCEANTECH Co.		주요	NA	제자	SS	영역	해양	주요	빙저호 퇴적물 시추기 개발	제품명	Multi Gravity Corer
OCEANTECH Co.																																					
주요	NA																																				
제자	SS																																				
영역	해양																																				
주요	빙저호 퇴적물 시추기 개발																																				
제품명	Single Gravity Corer (1단)																																				
OCEANTECH Co.																																					
주요	NA																																				
제자	SS																																				
영역	해양																																				
주요	빙저호 퇴적물 시추기 개발																																				
제품명	Single Gravity Corer (4단)																																				
OCEANTECH Co.																																					
주요	NA																																				
제자	SS																																				
영역	해양																																				
주요	빙저호 퇴적물 시추기 개발																																				
제품명	Multi Gravity Corer																																				
증빙자료																																					

그림 271 빙저호 퇴적물 시추기 2종 설계도면

우수성과 - 7. (2022년)	정밀 탄성과탐사 자료 분석을 통한 해석도 작성 및 시추위치 선정
성과 내용	○ 96채널 빙권 탄성과 자료 획득, 4개 축선 총 17 km ○ 정밀 자료처리를 통한 탄성과 단면(구조보정)구축 및 2차원 해석도 제시 - 빙권전용 탄성과 자료처리 워크 플로우 개발 (잡음제거, 속도분석, 구조보정 등) ○ D2 빙저호 지구물리학적 특성 규명 - 빙하 탄성과 속도, 빙하-호수 경계면 확인, 빙저호 수심 최대 80m로 추정 ○ 위성, 레이더, 기상, 탄성과 탐사 자료 분석을 통한 최적의 빙저호 열수시추 위치 선정
성과의 우수성	○ 빙권용 탄성과 자료 자료처리 기술 확보 ○ D2 빙저호에 대한 지구물리학적 특성 규명 ○ 최적의 빙저호 시추위치 선정

○ 탄성과 자료 2D 해석도

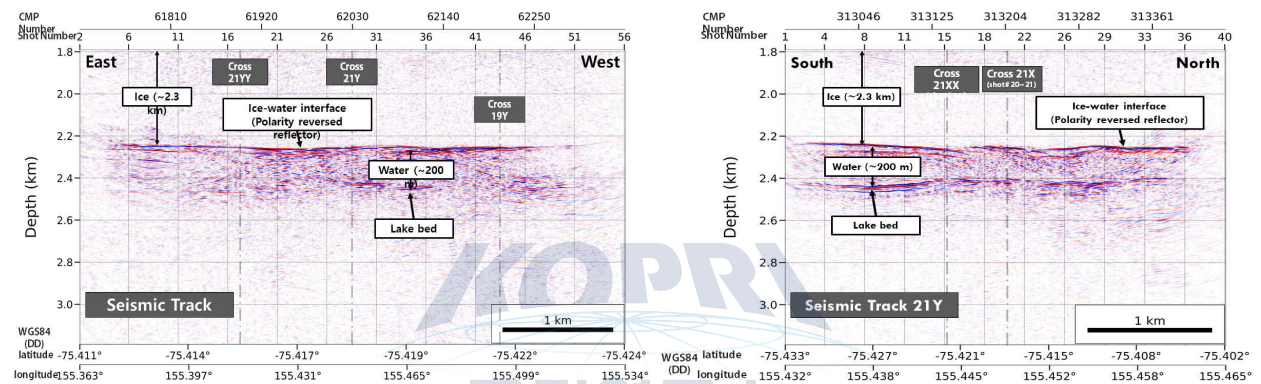


그림 272 탄성과 자료 2차원 해석도(축선 21X)

그림 273 탄성과 자료 2차원 해석도(축선 21Y)

○ D2 빙저호 시추 위치 선정

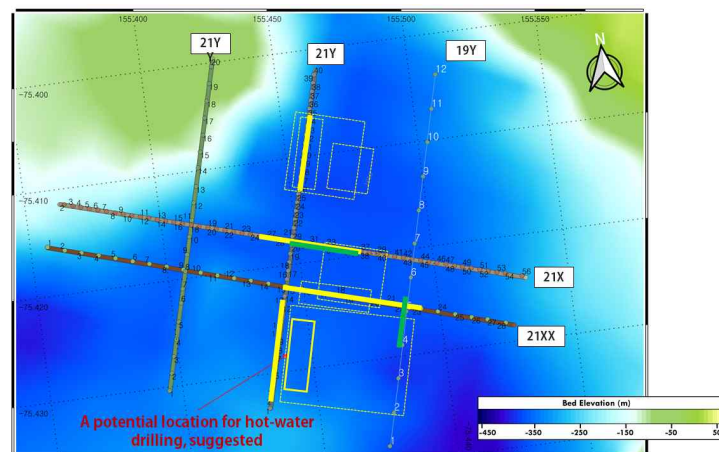


그림 274 D2 빙저호 최적 시추 위치 표시. 노란 실선 박스

증빙자료	○ 학술발표 - 2022.10.25. ~ 28. - 대한지질학회 2022년 추계학술대회 - 빙권에서의 탄성과 탐사: 남극 내륙 데이비드 빙하 지역 D2 빙저호의 사례
------	---

구분 5-4
빙권에서의 탄성과 탐사 :
남극 내륙 데이비드 빙하지역 D2 빙저호 사례
Seismic Survey Applied on Glacier : A Case Study for the D2 Subglacial Lake under the David Glacier, Antarctica
강승규*, 주현태, 권호재, 이종익, 이주환, 양재형*
Seung-Goo Kang*, Hyun-tae Ju*, Ho-jae Kwon*, Jong-ik Lee*, Ju-hwan Lee*, Yeong-hyung Yang*
*남극연구개발위원회(SCAR)

우수성과 - 8. (2022년)	빙저호 시추용 원치시스템 제작
성과 내용	○ 2,000m급 원치시스템 제작 완료 - D2 빙저호 시추탐사 시 2,000m급 청정시추라인을 시추공으로 안정적으로 전개·회수할 수 있는 원치시스템을 제작 - 1.5kW 모터와 기어비 156 기어박스를 통해 최대 전개속도 10.7m/분을 달성하며, 속도 및 토크 제어와 장력 유지를 위한 제어 기능 탑재
성과의 우수성	○ 원치시스템 운용 안정성과 구조적 신뢰성 확보 - 영국 BAS의 BEAMISH 시추프로그램을 통해 2,000m급 시추작업 시 내구성과 성능이 입증된 원치시스템을 도입하여 안정적 운용성 보장 ○ 남극내륙 빙저호 시추작업을 위한 고정밀 제어기술 확보 - 원치 및 캡스턴 시스템에 탑재된 센서와 제어장치를 통해 시추 깊이, 속도, 하중 등을 실시간으로 모니터링하고 제어할 수 있는 고정밀 제어기술 확보
그림 275 빙저호 시추용 원치시스템 설계도면 그림 276 제작 완료된 빙저호 시추용 원치시스템	
증빙자료	

우수성과 - 9. (2022년)	열수 멸균시스템 멸균 유효성 검증
성과 내용	○ 열수 멸균시스템 시험 운영 완료 - 펌프, 필터, UV 램프 등 필수적인 시스템의 정상 작동여부 확인 ○ 열수 멸균시스템의 멸균 유효성 검증 완료 - 멸균 과정을 거친 물의 수질분석 및 유세포 분석을 통하여 시스템의 멸균 유효성 검증 완료
성과의 우수성	○ 멸균 유효성 검증을 통한 D2 빙저호 시추의 과학적, 국제적 신뢰성 확보 ○ 열수 멸균시스템 개발 및 운영 기술 확보 ○ 멸균 시스템 유효성 검증 및 유지보수 기술 확보



그림 277 열수 멸균시스템 시험 운영 완료

시험 성적서

(재)한국환경수도연구원

우)07201 서울특별시 영등포구 양평로28가길 29

Tel : 02-2637-1234 Fax : 02-2631-8767

성적서 번호 : WQ-220781 A

페이지 (1) / (총 1) 장.

1. 의뢰자 기관명 : 한국해양과학기술원 부설 극지연구소

주 소 : 인천광역시 연수구 송도대로 28

2. 시험대상 항목/방법/시험명 : 수질

3. 성적서 용도 : 참고용

4. 시 료 구 분 : 저장시료

5. 시 행 기 간 : 2022. 9. 2. ~ 2022. 9. 16.

6. 시 행 장 소 : KOWI 고령시험실 (서울특별시 영등포구 양평로28가길 29) □ 현장시험

7. 시 행 방 법 : 수질오염공정시험기준 (국립환경과학원표준 제2022-12호, 2022.02.21.)

8. 시 행 한 경 : 온도 : (최저 23 ℃, 최고 27 ℃), 습도 : (최저 45 % RH, 최고 68 % RH)

9. 시 행 결 과

항목	단위	결과				비고
		외부수조	수조	1차 필터링	2차 필터링	
탁도	NTU	0.41	2.12	1.07	0.50	-
부유물질	mg/L	불검출	3	불검출	불검출	-
총인소	mg/L	2.20	2.27	2.21	2.24	-
용존총인소	mg/L	2.15	2.20	2.20	2.21	-
암모르피우스	mg/m ³	불검출	불검출	불검출	불검출	-
총대장균군	총대장균군수/L	440	1000	500	180	-
총유기탄소	mg/L	2.1	2.6	2.3	2.2	-
용존유기탄소	mg/L	2.1	1.8	2.2	2.2	-

* 시료제출일 : 2022. 8. 31.

확 인

시험자

정 다 예

기술책임자

손 민 형

1. 이 성적서는 의뢰자가 제시한 시료 및 시료명으로서 시험한 결과로서 전체 재검에 대한 효력을 보증하지는 않습니다.

2. 이 성적서는 KS Q ISO/IEC 17025 및 KOLAS 인정에 관한 것으로, 용도 이외의 정보, 성능, 광고 및 소송용 등으로 사용될 수 없고, 서명없이 있어 재발행하지 못합니다.

(재)한국환경수도연구원장(인)

• 시험결과 및 시험방법에서 인용여부는 성적서 상단에 대표전화로 문의하십시오. (02-2637-1234)

분석 결과서

시 료 명	외부수조,수조,1차2차3차4차UV	의뢰처	극지연구소
의뢰일자	2022년 9월 1일	의뢰자	최용희
의뢰항목	Quantification of bacteria by flow cytometry	시험용도	Quantification of bacteria

NO.	시료명	시험항목	시험결과
1	외부수조	Quantification of bacteria	결과 및 첨부항초
2	수조	Quantification of bacteria	결과 및 첨부항초
3	1차	Quantification of bacteria	결과 및 첨부항초
4	2차	Quantification of bacteria	결과 및 첨부항초
5	3차	Quantification of bacteria	결과 및 첨부항초
6	4차	Quantification of bacteria	결과 및 첨부항초
7	UV	Quantification of bacteria	결과 및 첨부항초

시험일자	2022년 9월 1일	시험자	이미기
발급일자	2022년 9월 5일	연락처	031-888-6952 migi@gsa.or.kr

*본 분석결과는 연구개발을 위한 기술협조로 발행되는 것입니다.

페이지 1 / 29

16229 경기도 수원시 영통구 광교로 147 Tel. 031-888-6952 Fax. 031-888-6938
www.gsa.or.kr

그림 278 열수 멸균시스템의 멸균 유효성 검증서

증빙자료	○ 국립환경과학원 지정 수질분석 연구기관의 시험성적서
------	-------------------------------

우수성과 - 10. (2023년)	탄성과 자료 분석 기술 고도화 및 신규 열수시추 후보지 관측
성과 내용	○ IPR 자료 기반 추가적인 지구물리학적 수치모델 결과 도출 - 표면 DEM, 기반암 DEM, 수두 DEM, 수두 기울기, 빙저호 표면 면적 도출 ○ David 빙저호 후보지 1m급 초고해상도 SAR 위성 영상 자료 확보 - 차기 빙저호 진출입 루트 안전 확보를 위한 1m급 초고해상도 SAR 위성 DB 확보
성과의 우수성	○ D2 빙저호 지역 지구물리학적 결과 도출 ○ 차기 후보지 1m 급 초고해상도 SAR 위성 영상 확보
그림 279 항공 레이더 기반 지구물리학적 수치 모델 결과	그림 280 규 시추 후보지(D3 주변) 해상도 1.5m 초고해상도 SAR 위성 자료
증빙자료	○ 논문실적 - 2023.12.12. - Remote sensing (IF 5, mrnIF 85) - 동남극 빙하의 속도 이상 현상, InSAR 추적 모니터링 ○ 학술발표 - 2023.04.23. ~ 28. - EGU (Austria, Vienna) - 다중 채널 탄성파로부터 D2 빙저호 구조 이미징 ○ 학술발표 - 2023.05.24. ~ 26. - 한국지구물리·물리탐사학회 2023년 봄학술대회 - 남극 데이비드 2 활성 빙저호 탐사: 효율적인 빙권 탄성파 탐사를 이용한 빙저호 탐색

우수성과 - 11. (2023년)	심부 빙저호 시추용 2,700m 시추호스 및 샘플링 윈치 제작
성과 내용	○ 2,700m 시추호스 제작 - 윈치 작업과 멸균 과정에 대한 유연성과 내구성을 확보한 청정열수시추용 2,700m급 고압 시추호스 제작 ○ 샘플링 윈치 제작 - 빙저호 청정시료 확보용 샘플러, 시추공 내부 환경 특성 모니터링용 계측장비를 시추공으로 전개, 회수하기 위한 샘플링 윈치 제작
성과의 우수성	○ 고온·고압 및 멸균 공정의 화학적 처리 조건에서도 안정성과 재질 신뢰성을 유지할 수 있도록 내열성과 내화학성이 극대화된 소재를 적용하여, 극한 환경에서의 청정 열수시추 안정성 확보 및 국제적 멸균 기준 충족 ○ 남극 내륙의 저온 환경에서 운용 안정성이 검증된 전동식 샘플링 윈치 확보로 핵심장비 운용 안정성 확보 및 다중 케이블 호환 가능하여 장비 활용도 제고



그림 281 고성능 소재 적용 2,700m 시추호스

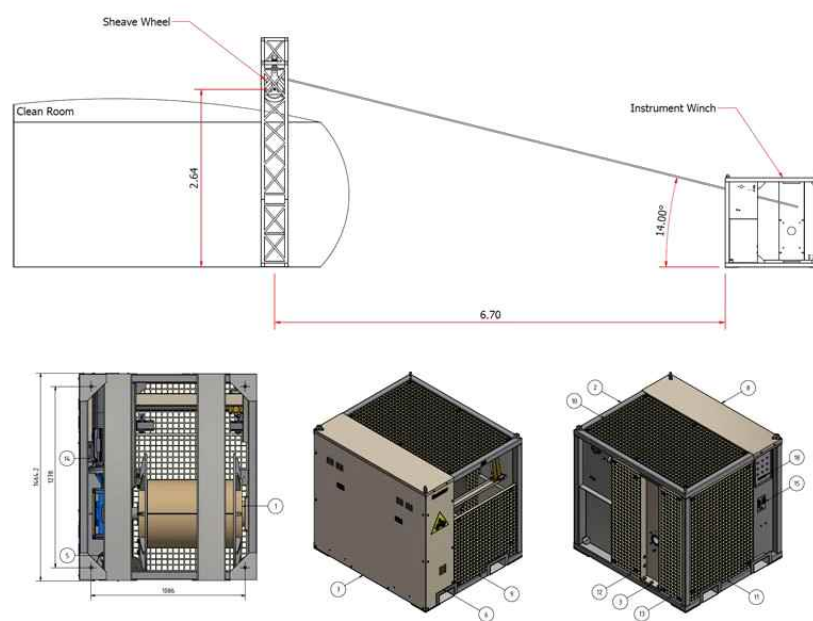


그림 282 빙저호 계측 및 청정시료 채집용 샘플링 윈치

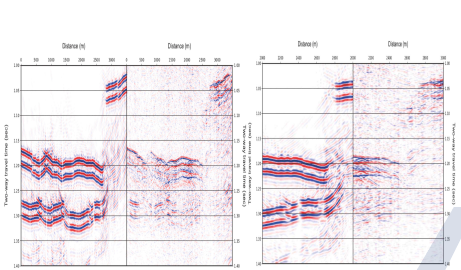
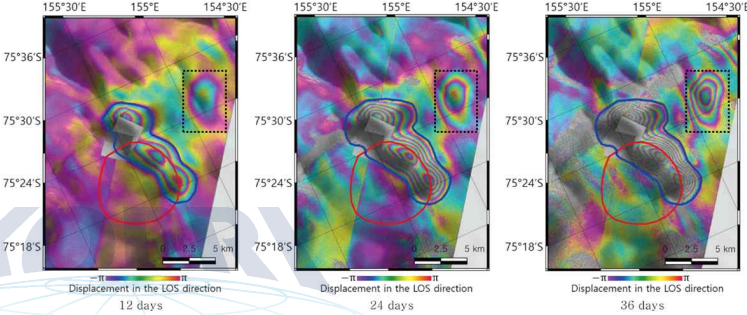
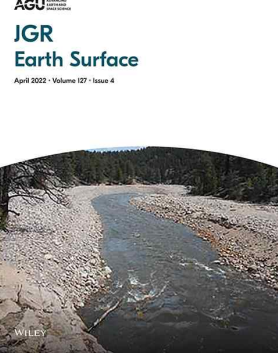
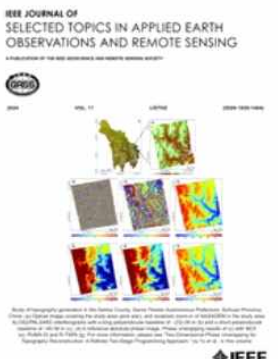
증빙자료	
------	--

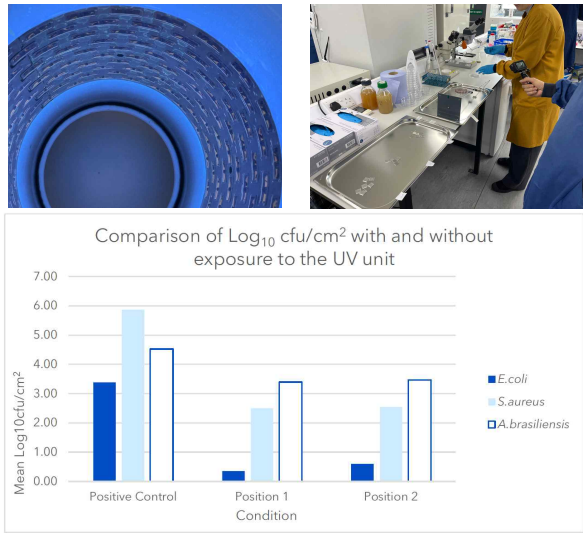
우수성과 - 12. (2023년)	KOPRI-BAS 간 빙저호 공동연구 2단계 협약 갱신
성과 내용	○ KOPRI-BAS 간 남극 빙저호 연구협력 (LoU) 갱신 - 1단계 시추시스템 개발 협력 LoU('17-'22) 만료에 따른 2단계 D2 빙저호 공동연구 협약 LoU 갱신
성과의 우수성	○ KOPRI-BAS 간 1단계 LOU('17 - '22) 만료에 따라 2단계 협약을 갱신함으로써, 향후 지속적인 공동 빙저호 공동연구 수행에 대한 양 기관의 전략적 협력 의지 재확인 ○ BAS 보유 청정열수시스템 장비의 공동 활용 및 한-영 공동 빙저호 과학 프로그램 제안서 공동 작성 합의를 통해 국제 공동연구 파트너십 강화 측면에서 실질적 진전을 도모함
	 Letter of Understanding between Korea Polar Research Institute (KOPRI) and the British Antarctic Survey (BAS) Cooperative Research on subglacial drilling in Antarctica 그림 283 KOPRI-BAS 간 LOU 문건 표지(좌) 및 준비 중인 한-영 빙저호 과제 공동제안서(우) Proposed Drilling Subglacial Lake CECs, Antarctica Summary: In 2017, UK and Chilean scientists discussed a collaborative programme to explore a newly discovered subglacial lake in Antarctica. This lake, now officially named, Lago Subglacial CECs, is covered by 2.6 km of ice and provides a near-ideal opportunity for access to an ancient isolated deep-water system. Sampling lake-water and lake-bottom sediments would allow us to answer fundamental questions about the adaptation and persistence of life in extreme environments and would inform the future contribution of West Antarctica to sea-level rise. A collaboration involving UK and Chilean teams, building on UK experience in hot-water drilling, and harnessing funding and logistics expertise from Chilean and UK sources would deliver a clean access hole into the lake, and samples of lake water and lake-bed sediments, allowing these important questions to be answered. Background: Over the last few decades more than four hundred lakes have been discovered under the Antarctic ice sheet. Many are hidden beneath several kilometres of ice and have been isolated for as much as tens of Millions of years. They represent one of the most inaccessible and intriguing environments on the planet, they undoubtedly hold unique records of change on Planet Earth but may also be the home to unique and extraordinary forms of life. Several attempts to drill into subglacial lakes have been undertaken. Russian drillers have obtained samples of re-frozen water from Lake Vostok, but their methodology means that their samples are contaminated, and their results have been debated. Subglacial Lake Whillans was drilled by a US consortium but this lake is special in that it is very shallow (5 feet) and linked directly to the open ocean and so it cannot be used to answer the key questions of glacial history and biology. In recent years, Chilean scientists from Centro de Estudios Científicos (CECs) have identified a new sub-glacial lake named Lago Subglacial CECs. This lake has been investigated by CECs and BAS teams and has been shown to provide a comparatively accessible opportunity for exploration, with comparatively thin ice cover (2.6 km), proximity to logistics input location (Union Glacier), and confirmed lake-bed sediments. Science Case: A science workshop, held in Valdivia, Chile in 2017 considered the science questions that could be addressed using samples obtained from Subglacial Lake CECs. The workshop concluded that the lake is ideally suited to provide answers to two strategically important questions:- • Water samples - Can a subglacial lake isolated from the atmosphere or ocean for hundreds of thousands of years support life, or indeed, an ecosystem? • Sediment samples - Did the West Antarctic Ice Sheet collapse, or persist, during a recent interglacial period, when Antarctic conditions resembled future conditions under CO₂ warming. :- • In addition, the opportunity to access and instrument Lake CECs would also provide answers to specific questions about sub-glacial lakes themselves. How such lakes are sustained, the degree to which they may be interconnected, and potential for rapid drainage events. Feasibility: Building on a long, successful track-record and incorporating lessons learned from other campaigns (including Subglacial Lake Ellsworth), BAS designed a new drill for the BEAMSH project, and in the 18/19 season it will be used to reach the bed of Rutford Ice Stream (2.2 km). This will effectively validate the design as a tool to make even deeper holes. Anticipating success within months at
증빙자료	

우수성과 - 13. (2024년)	빙저호 지구물리 탐사 자료 분석 기술 고도화
성과 내용	- 레이더 자료 분석 기술 고도화 - 레이더 자료 처리 및 분석 워크플로우 최신화 - 빙저호 추정 인자 R23 (bed reflection power), 수력 구배(hydraulic gradient) 자료처리 및 mapping 기술 고도화 - 빙하 두께 $2.2\text{-}2.3 \pm 0.1\text{km}$, 호수 수심 $48\text{-}77 \pm 3 \text{ m}$ 추정 - SLC의 표면적(약 31.2 km^2) 및 저수량($1.5\text{-}2.4 \pm 0.09 \text{ km}^3$) 추정 - 신규 빙저호 후보지 위성 자료 분석
성과의 우수성	- 레이더 자료 처리 및 분석 워크플로우 고도화 - 빙저호 표면적 및 저수량 계산
그림 284 SLC 정밀 분석 및 구조해석. (a) 빙하 표면 DEM, (b) 기반암 DEM, (c) 수두 DEM, (d) 수력 구배 map, (e) 기반암 상대 반사 강도, (f) 빙저호 (◇)	
그림 285 레이더 자료를 바탕으로 SLC 3D mapping	
그림 286 신규 빙저호 위성 모니터링	
증빙자료	- 논문 실적 2024.11.26. - 지구물리와 물리탐사 (KCI) - 남극 빙저호 탄성과 탐사

우수성과 - 14. (2024년)	빙저호 접근 시추공 투입 장비 멸균용 UV wellhead 유닛 개발
성과 내용	- Wellhead UV unit 제작 - 별도의 물리/화학약품 사용 없이 UV LED만을 사용하여 시추공을 통과하는 모든 기기/호스/케이블의 표면을 Log3 reduction (99.9% 사멸) 수준으로 멸균 'High' UV power는 로프가 80m/min 속도, 'Low' UV power는 20m/min 속도로 하강시 Log3 reduction 수준의 미생물 사멸을 담보하게 제작하여 시추 속도와 상관없이 동일한 수준의 멸균력 보장
성과의 우수성	- 화학약품이 아닌 광학기술(UV LED)을 사용한 Log3 reduction (99.9% 사멸) 살균력 달성 - 시추공 내로 투입되는 기기들의 하강 속도를 고려한 UV 조사량 조절 기능 탑재
OUTLINE GA DRAWING 그림 287 Wellhead UV unit 모식도(좌) 및 제작된 유닛의 UV reactor 내부/컨트롤 패널(우)	
증빙자료	

우수성과 - 15. (2024년)	청석호 시추 현장탐사 대비 초기환경영향평가서 초안 작성																																																																																								
성과 내용	○ 초기환경영향평가서 초안(Draft IEE) 작성 - 남극 환경에 미칠 영향을 사전에 고려하여 청석호 시추탐사에서 예상되는 오염 문제를 발견하고 이에 따른 오염 저감 계획을 수립하여 잠재적 오염 및 환경 피해 최소화 방안 강구 - 향후 빙저호 연구 및 다양한 국제 협력 프로젝트의 기초 자료로 활용 가능																																																																																								
성과의 우수성	○ 잠재적 오염문제 발견 및 오염 저감 계획 수립을 통해 남극 환경에 미치는 영향 최소화 ○ 향후 빙저호 시추활동 및 국제 협력 프로젝트의 참고자료로 활용 가능																																																																																								
	Draft Initial Environmental Evaluation for the Clean Access to Subglacial lake Cheongsuk in Antarctica (CASCA) Contents <table> <tr><td>1. INTRODUCTION.....</td><td>4</td></tr> <tr><td>1.1. STATUTORY REQUIREMENTS.....</td><td>4</td></tr> <tr><td>1.1.1 International Laws and Guidelines.....</td><td>4</td></tr> <tr><td>1.1.2 South Korean Laws and Guidelines.....</td><td>4</td></tr> <tr><td>2. DESCRIPTION OF PROPOSED ACTIVITY.....</td><td>6</td></tr> <tr><td>2.1. DRILLING TECHNOLOGY.....</td><td>6</td></tr> <tr><td>2.2. LOGISTICAL SUPPORT ACTIVITIES.....</td><td>12</td></tr> <tr><td>3. EXISTING ENVIRONMENTAL REFERENCE STATE.....</td><td>13</td></tr> <tr><td>3.1. GEOPHYSICS AND GEOMORPHOLOGY.....</td><td>13</td></tr> <tr><td>3.1.1. David Glacier and SLG.....</td><td>16</td></tr> <tr><td>3.1.2. Airborne IPR survey.....</td><td>17</td></tr> <tr><td>3.1.3. Seismic survey.....</td><td>20</td></tr> <tr><td>3.1.4. ICESat-2 and DOISAR.....</td><td>23</td></tr> <tr><td>3.2. L. IRE DESCRIPTION (LAKE EXTENT, WATER VOLUME & DEPTH, SEDIMENT, ETC).....</td><td>26</td></tr> <tr><td>3.3. CLIMATE.....</td><td>26</td></tr> <tr><td>3.3.1. Automatic Weather Station (AWS).....</td><td>26</td></tr> <tr><td>3.3.2. Air temperature and Relative humidity.....</td><td>27</td></tr> <tr><td>3.3.3. Air pressure.....</td><td>27</td></tr> <tr><td>3.3.4. Wind speed and direction.....</td><td>27</td></tr> <tr><td>3.3.5. Snow accumulation.....</td><td>28</td></tr> <tr><td>3.4. SNOW AND ICE (SURFACE SNOW ACCUMULATION RATE, SNOW, AND ICE CORE CHEMICAL PROFILES, ETC).....</td><td>30</td></tr> <tr><td>3.5. SURFACE SNOW BIOTA.....</td><td>34</td></tr> <tr><td>3.6. HUMAN ACTIVITY.....</td><td>34</td></tr> <tr><td>4. ALTERNATIVES.....</td><td>34</td></tr> <tr><td>4.1. Do NOTHING.....</td><td>34</td></tr> <tr><td>4.2. ALTERNATIVE LOCATIONS.....</td><td>35</td></tr> <tr><td>4.3. ALTERNATIVE TECHNIQUES.....</td><td>35</td></tr> <tr><td>4.4. ALTERNATIVE LOGISTICS.....</td><td>36</td></tr> <tr><td>5. ASSESSMENT OF ENVIRONMENTAL IMPACTS AND MITIGATING MEASURES.....</td><td>36</td></tr> <tr><td>5.1. IMPACTS ON THE AIR, AND MITIGATION.....</td><td>36</td></tr> <tr><td>5.2. IMPACTS ON THE SNOW AND ICE, AND MITIGATION.....</td><td>37</td></tr> <tr><td>5.3. IMPACTS ON THE LAKE WATER, AND MITIGATION.....</td><td>37</td></tr> <tr><td>5.4. OIL SPILL, EQUIPMENT LOSS, WASTE DISPOSAL, ETC.....</td><td>38</td></tr> <tr><td>5.5. CUMULATIVE IMPACTS.....</td><td>38</td></tr> <tr><td>6. ENVIRONMENTAL MONITORING PLAN.....</td><td>39</td></tr> <tr><td>6.1. MONITORING PLAN.....</td><td>39</td></tr> <tr><td>7. GAPS IN KNOWLEDGE AND UNCERTAINTIES.....</td><td>40</td></tr> <tr><td>7.1. LAKE CONNECTIVITY.....</td><td>40</td></tr> <tr><td>7.2. EQUIPMENT CLEANING AND STERILIZATION.....</td><td>40</td></tr> <tr><td>7.3. WEATHER CONDITIONS.....</td><td>40</td></tr> <tr><td>7.4. CHEMICAL AND BIOLOGICAL CHARACTERISTICS.....</td><td>41</td></tr> <tr><td>7.5. FUEL CONSUMPTION.....</td><td>41</td></tr> <tr><td>8. ABBREVIATION.....</td><td>42</td></tr> <tr><td>9. REFERENCES.....</td><td>43</td></tr> </table> 1 그림 288 초기환경영향평가서 초안(Draft IEE)	1. INTRODUCTION.....	4	1.1. STATUTORY REQUIREMENTS.....	4	1.1.1 International Laws and Guidelines.....	4	1.1.2 South Korean Laws and Guidelines.....	4	2. DESCRIPTION OF PROPOSED ACTIVITY.....	6	2.1. DRILLING TECHNOLOGY.....	6	2.2. LOGISTICAL SUPPORT ACTIVITIES.....	12	3. EXISTING ENVIRONMENTAL REFERENCE STATE.....	13	3.1. GEOPHYSICS AND GEOMORPHOLOGY.....	13	3.1.1. David Glacier and SLG.....	16	3.1.2. Airborne IPR survey.....	17	3.1.3. Seismic survey.....	20	3.1.4. ICESat-2 and DOISAR.....	23	3.2. L. IRE DESCRIPTION (LAKE EXTENT, WATER VOLUME & DEPTH, SEDIMENT, ETC).....	26	3.3. CLIMATE.....	26	3.3.1. Automatic Weather Station (AWS).....	26	3.3.2. Air temperature and Relative humidity.....	27	3.3.3. Air pressure.....	27	3.3.4. Wind speed and direction.....	27	3.3.5. Snow accumulation.....	28	3.4. SNOW AND ICE (SURFACE SNOW ACCUMULATION RATE, SNOW, AND ICE CORE CHEMICAL PROFILES, ETC).....	30	3.5. SURFACE SNOW BIOTA.....	34	3.6. HUMAN ACTIVITY.....	34	4. ALTERNATIVES.....	34	4.1. Do NOTHING.....	34	4.2. ALTERNATIVE LOCATIONS.....	35	4.3. ALTERNATIVE TECHNIQUES.....	35	4.4. ALTERNATIVE LOGISTICS.....	36	5. ASSESSMENT OF ENVIRONMENTAL IMPACTS AND MITIGATING MEASURES.....	36	5.1. IMPACTS ON THE AIR, AND MITIGATION.....	36	5.2. IMPACTS ON THE SNOW AND ICE, AND MITIGATION.....	37	5.3. IMPACTS ON THE LAKE WATER, AND MITIGATION.....	37	5.4. OIL SPILL, EQUIPMENT LOSS, WASTE DISPOSAL, ETC.....	38	5.5. CUMULATIVE IMPACTS.....	38	6. ENVIRONMENTAL MONITORING PLAN.....	39	6.1. MONITORING PLAN.....	39	7. GAPS IN KNOWLEDGE AND UNCERTAINTIES.....	40	7.1. LAKE CONNECTIVITY.....	40	7.2. EQUIPMENT CLEANING AND STERILIZATION.....	40	7.3. WEATHER CONDITIONS.....	40	7.4. CHEMICAL AND BIOLOGICAL CHARACTERISTICS.....	41	7.5. FUEL CONSUMPTION.....	41	8. ABBREVIATION.....	42	9. REFERENCES.....	43
1. INTRODUCTION.....	4																																																																																								
1.1. STATUTORY REQUIREMENTS.....	4																																																																																								
1.1.1 International Laws and Guidelines.....	4																																																																																								
1.1.2 South Korean Laws and Guidelines.....	4																																																																																								
2. DESCRIPTION OF PROPOSED ACTIVITY.....	6																																																																																								
2.1. DRILLING TECHNOLOGY.....	6																																																																																								
2.2. LOGISTICAL SUPPORT ACTIVITIES.....	12																																																																																								
3. EXISTING ENVIRONMENTAL REFERENCE STATE.....	13																																																																																								
3.1. GEOPHYSICS AND GEOMORPHOLOGY.....	13																																																																																								
3.1.1. David Glacier and SLG.....	16																																																																																								
3.1.2. Airborne IPR survey.....	17																																																																																								
3.1.3. Seismic survey.....	20																																																																																								
3.1.4. ICESat-2 and DOISAR.....	23																																																																																								
3.2. L. IRE DESCRIPTION (LAKE EXTENT, WATER VOLUME & DEPTH, SEDIMENT, ETC).....	26																																																																																								
3.3. CLIMATE.....	26																																																																																								
3.3.1. Automatic Weather Station (AWS).....	26																																																																																								
3.3.2. Air temperature and Relative humidity.....	27																																																																																								
3.3.3. Air pressure.....	27																																																																																								
3.3.4. Wind speed and direction.....	27																																																																																								
3.3.5. Snow accumulation.....	28																																																																																								
3.4. SNOW AND ICE (SURFACE SNOW ACCUMULATION RATE, SNOW, AND ICE CORE CHEMICAL PROFILES, ETC).....	30																																																																																								
3.5. SURFACE SNOW BIOTA.....	34																																																																																								
3.6. HUMAN ACTIVITY.....	34																																																																																								
4. ALTERNATIVES.....	34																																																																																								
4.1. Do NOTHING.....	34																																																																																								
4.2. ALTERNATIVE LOCATIONS.....	35																																																																																								
4.3. ALTERNATIVE TECHNIQUES.....	35																																																																																								
4.4. ALTERNATIVE LOGISTICS.....	36																																																																																								
5. ASSESSMENT OF ENVIRONMENTAL IMPACTS AND MITIGATING MEASURES.....	36																																																																																								
5.1. IMPACTS ON THE AIR, AND MITIGATION.....	36																																																																																								
5.2. IMPACTS ON THE SNOW AND ICE, AND MITIGATION.....	37																																																																																								
5.3. IMPACTS ON THE LAKE WATER, AND MITIGATION.....	37																																																																																								
5.4. OIL SPILL, EQUIPMENT LOSS, WASTE DISPOSAL, ETC.....	38																																																																																								
5.5. CUMULATIVE IMPACTS.....	38																																																																																								
6. ENVIRONMENTAL MONITORING PLAN.....	39																																																																																								
6.1. MONITORING PLAN.....	39																																																																																								
7. GAPS IN KNOWLEDGE AND UNCERTAINTIES.....	40																																																																																								
7.1. LAKE CONNECTIVITY.....	40																																																																																								
7.2. EQUIPMENT CLEANING AND STERILIZATION.....	40																																																																																								
7.3. WEATHER CONDITIONS.....	40																																																																																								
7.4. CHEMICAL AND BIOLOGICAL CHARACTERISTICS.....	41																																																																																								
7.5. FUEL CONSUMPTION.....	41																																																																																								
8. ABBREVIATION.....	42																																																																																								
9. REFERENCES.....	43																																																																																								
증빙자료	○ 논문 실적 - 2024.09.19 - Scientific Data (SCI) - 남극 지열 환경 시료 분석 scientific data OPEN DATA DESCRIPTOR Genomic profiling of Antarctic geothermal microbiomes using long-read, Hi-C, and single-cell techniques Seo, H. H. (Seo, H. H.), Yang, H. H. (Yang, H. H.), Seong, C. H. (Seong, C. H.), Jang, S. H. (Jang, S. H.), Woo, S. G. (Woo, S. G.) Geothermal features in Antarctica provide favorable conditions for diverse microorganisms, providing potential energy and resources for future exploration. However, the extreme cold and high salinity of the geothermal fluids make it difficult to study the microbial communities. Here, we present the first genomic profiling of Antarctic geothermal microbiomes using long-read, Hi-C, and single-cell techniques. The long-read sequencing, coupled with Hi-C, enhances the understanding of microbial diversity and functionality. This study provides the first genomic information of geothermal microbiomes in Antarctica, which is essential for understanding the microbial communities and their role in the geothermal ecosystem. The data are available for future research on understanding of microbial communities and energy in a geothermal environment, and facilitate cross-comparison with other geothermal and extreme habitats.																																																																																								

우수성과 - 16. (2025년)	빙저호 지구물리 탐사 자료 분석 기술 고도화
성과 내용	○ 빙저호 지구물리 탐사 자료 분석 기술 고도화 - 0.5 m 격자 크기를 가지는 파형전파 수치 모델을 활용한 빙저호 지하 구조 해석 수행 - 정밀 수치 모델링 결과와 현장 자료와의 비교를 통한 자료 분석 수행 ○ 신규 빙저호 후보지 선정 - 위성 자료 분석을 통한 신규 빙저호 후보지 확인 - D2 빙저호 상부 지역에 존재하는 소규모 신규 빙저호 확인 - D2 빙저호 및 신규 (D-A) 빙저호 후보지의 지속적인 모니터링을 위한 ICESat-2 자료 최신화
성과의 우수성	○ 레이더 자료 처리 및 분석 워크플로우 고도화 ○ 파동전파 수치 모델 비교를 통한 빙저호 분석 ○ 신규 빙저호 후보지 선정
 그림 289 정밀 수치 모델링 결과(좌)와 현장 자료(우)와의 비교  그림 290 D2 빙저호 상부 지역에 존재하는 소규모 신규 빙저호 확인	
증빙자료	  빙저호 레이더 탐사 및 빙저호 분석 기술 논문 실적 ○ 2025. 05 -논문명: Airborne and Spaceborne Mapping and Analysis of the Subglacial Lake D2 in David Glacier, Terra Nova Bay, Antarctica -저널: Journal of Geophysical Research: Earth Surface (IF 3.9, mmIF 74) 신규 빙저호 발견 논문 실적 ○ 2025. 08 -논문명: Monitoring Subglacial Lake Activity in the David Glacier Region, East Antarctica, Using a DInSAR Displacement Integration Approach -저널: IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing (IF 5.5, mmIF 90)

우수성과 - 17. (2025년)	보일러&순환시스템 제작 및 시스템 멸균유효성 검증	
성과 내용	○ 보일러&순환시스템 제작 완료 - 물탱크, 순환펌프, 보일러, 열교환기, 저압매니폴드, 고압펌프, 고압매니폴드 구성의 보일러&순환시스템 제작 완료 - 열에너지의 생산, 전달 및 순환을 수행하는 보일러&순환시스템 구축을 통해 전체 시추시스템과 열수(시추수)의 온도 유지 안정성 확보 ○ 빙저호 청정열수시추시스템 멸균유효성 검증 완료 - 디스크 집중 방법을 통한 UV reactor 멸균력 테스트 수행 및 CFU 기반 최종 멸균 효율 계산 - 공인 검증 기관을 통한 Wellhead UV 시스템의 멸균 유효성 검증 완료	
성과의 우수성	○ 빙저호 청정열수시추 인프라 80% 구축 완료 - 본 사업을 통해 확보한 청정열수시추 시스템의 하위 모듈은 보일러, 열교환기, 순환펌프 & LP매니폴드, 고압펌프 & HP매니폴드, 드릴호스 & 호스릴, 캡스톤 & 시추타워, UV wellhead, 필터 & 멸균, 클린랩, 계장 & 모니터링, 물탱크 등 약 14개 모듈이며, 이 중 5개 모듈을 국산화하여 영국 BAS 대비 독자기술율은 약 35% 수준임. 특히 열수순환시스템은 순수 국내 기술로 구축하였으며, 이는 해외 의존도가 높았던 열수시추 분야의 기술 자립화에 실질적 진전을 의미함 - 2,000급 빙저호 청정열수시스템의 구축 진도를 약 80%까지 완료하여, 향후 D2 빙저호 본 시추에 요구되는 청정시추조건을 충족하는 시스템 확보 - 시스템의 안정적 운용을 위한 기반을 마련하였으며, 남은 구축 작업을 통해 완전한 시스템 확보 준비완료 ○ 청정열수시추시스템 멸균요소의 유효성 검증 완료 - 시추수 멸균용 이동식 멸균시스템과 시추공 투입장비 멸균용 UV wellhead 유닛의 멸균 유효성 검증을 완료하여 D2 빙저호 시추시스템의 과학적, 국제적 신뢰성 확보	
 		
그림 291 제작 완료된 보일러&순환시스템 구성요소 그림 292 Wellhead UV 시스템 멸균 유효성 검증		
증빙자료		

우수성과 - 18. (2025년)	청석호 시추탐사 대비 환경부 승인용 초기환경영향평가서 작성
성과 내용	○ 초기환경영향평가서 최종본 작성 - 청석호 열수 시추 프로그램(CASCA project)의 연구개요, 법적 요건, 목적 및 범위 제시 - 구축 중인 청정열수시스템 개괄, 시추 프로젝트 일정, 내륙 물자수송체계 작성 - 청석호 지구물리탐사 및 시추후보지 주변 환경/기후 특성 분석 결과 제시 - 검토된 대안, 오염 저감조치, 환경 모니터링 계획, 불확실성 제시
성과의 우수성	○ 초기환경영향평가서 작성을 통한 빙저호 시추에 따른 환경영향 최소화 방안 수립 - 시추 과정에서 발생 가능한 오염원 예측, 저감조치 및 환경 모니터링 계획 수립하여 오염을 최소화하는 방안을 제시함으로써, 현재까지 가장 진일보한 빙저호 청정열수시추시스템(CHWD) 모델을 제안 - 초기환경영향평가서 작성과 남극조약협의당사국회의(ATCM) 안전 보고를 통해 청석호 열수 시추의 국제적 신뢰성과 정당성 확보
남극 청석호 빙저호 청정 탐사에 대한 초기 환경영향평가서 그림 5 2018/17, 2018/19 두 시즌 동안 수행한 열수 시추 탐사 지역 지도 3.1.2. 열수 시추 탐사 2018/19 남극 여름 시즌 동안 30.0°S, 동경 155.40°E, 빙면 200m에 대한 집중적인 탐사 활동이 수행되었다. 이 탐사는 총 1,113m의 깊이로 수직 거리를 포함하여, 그라드 선에는 1st와 2nd를 설정하였다(그림 2). 열수 탐사의 위험 고도는 지면으로부터 430~700m, 평균 600m로 설정되었다. 우리는 30.0°S 지역을 중점적으로 탐사하기 위해 Summit-1 (55°S, 166°E)와 Summit-2 (55°S, 166°E)를 2019-2020, 2020-2021, 2021-2022, 2022-2023, 2023-2024, 2024-2025, 2025-2026, 2026-2027, 2027-2028, 2028-2029, 2029-2030, 2030-2031, 2031-2032, 2032-2033, 2033-2034, 2034-2035, 2035-2036, 2036-2037, 2037-2038, 2038-2039, 2039-2040, 2040-2041, 2041-2042, 2042-2043, 2043-2044, 2044-2045, 2045-2046, 2046-2047, 2047-2048, 2048-2049, 2049-2050, 2050-2051, 2051-2052, 2052-2053, 2053-2054, 2054-2055, 2055-2056, 2056-2057, 2057-2058, 2058-2059, 2059-2060, 2060-2061, 2061-2062, 2062-2063, 2063-2064, 2064-2065, 2065-2066, 2066-2067, 2067-2068, 2068-2069, 2069-2070, 2070-2071, 2071-2072, 2072-2073, 2073-2074, 2074-2075, 2075-2076, 2076-2077, 2077-2078, 2078-2079, 2079-2080, 2080-2081, 2081-2082, 2082-2083, 2083-2084, 2084-2085, 2085-2086, 2086-2087, 2087-2088, 2088-2089, 2089-2090, 2090-2091, 2091-2092, 2092-2093, 2093-2094, 2094-2095, 2095-2096, 2096-2097, 2097-2098, 2098-2099, 2099-2100, 2100-2101, 2101-2102, 2102-2103, 2103-2104, 2104-2105, 2105-2106, 2106-2107, 2107-2108, 2108-2109, 2109-2110, 2110-2111, 2111-2112, 2112-2113, 2113-2114, 2114-2115, 2115-2116, 2116-2117, 2117-2118, 2118-2119, 2119-2120, 2120-2121, 2121-2122, 2122-2123, 2123-2124, 2124-2125, 2125-2126, 2126-2127, 2127-2128, 2128-2129, 2129-2130, 2130-2131, 2131-2132, 2132-2133, 2133-2134, 2134-2135, 2135-2136, 2136-2137, 2137-2138, 2138-2139, 2139-2140, 2140-2141, 2141-2142, 2142-2143, 2143-2144, 2144-2145, 2145-2146, 2146-2147, 2147-2148, 2148-2149, 2149-2150, 2150-2151, 2151-2152, 2152-2153, 2153-2154, 2154-2155, 2155-2156, 2156-2157, 2157-2158, 2158-2159, 2159-2160, 2160-2161, 2161-2162, 2162-2163, 2163-2164, 2164-2165, 2165-2166, 2166-2167, 2167-2168, 2168-2169, 2169-2170, 2170-2171, 2171-2172, 2172-2173, 2173-2174, 2174-2175, 2175-2176, 2176-2177, 2177-2178, 2178-2179, 2179-2180, 2180-2181, 2181-2182, 2182-2183, 2183-2184, 2184-2185, 2185-2186, 2186-2187, 2187-2188, 2188-2189, 2189-2190, 2190-2191, 2191-2192, 2192-2193, 2193-2194, 2194-2195, 2195-2196, 2196-2197, 2197-2198, 2198-2199, 2199-2200, 2200-2201, 2201-2202, 2202-2203, 2203-2204, 2204-2205, 2205-2206, 2206-2207, 2207-2208, 2208-2209, 2209-2210, 2210-2211, 2211-2212, 2212-2213, 2213-2214, 2214-2215, 2215-2216, 2216-2217, 2217-2218, 2218-2219, 2219-2220, 2220-2221, 2221-2222, 2222-2223, 2223-2224, 2224-2225, 2225-2226, 2226-2227, 2227-2228, 2228-2229, 2229-2230, 2230-2231, 2231-2232, 2232-2233, 2233-2234, 2234-2235, 2235-2236, 2236-2237, 2237-2238, 2238-2239, 2239-2240, 2240-2241, 2241-2242, 2242-2243, 2243-2244, 2244-2245, 2245-2246, 2246-2247, 2247-2248, 2248-2249, 2249-2250, 2250-2251, 2251-2252, 2252-2253, 2253-2254, 2254-2255, 2255-2256, 2256-2257, 2257-2258, 2258-2259, 2259-2260, 2260-2261, 2261-2262, 2262-2263, 2263-2264, 2264-2265, 2265-2266, 2266-2267, 2267-2268, 2268-2269, 2269-2270, 2270-2271, 2271-2272, 2272-2273, 2273-2274, 2274-2275, 2275-2276, 2276-2277, 2277-2278, 2278-2279, 2279-2280, 2280-2281, 2281-2282, 2282-2283, 2283-2284, 2284-2285, 2285-2286, 2286-2287, 2287-2288, 2288-2289, 2289-2290, 2290-2291, 2291-2292, 2292-2293, 2293-2294, 2294-2295, 2295-2296, 2296-2297, 2297-2298, 2298-2299, 2299-2300, 2300-2301, 2301-2302, 2302-2303, 2303-2304, 2304-2305, 2305-2306, 2306-2307, 2307-2308, 2308-2309, 2309-2310, 2310-2311, 2311-2312, 2312-2313, 2313-2314, 2314-2315, 2315-2316, 2316-2317, 2317-2318, 2318-2319, 2319-2320, 2320-2321, 2321-2322, 2322-2323, 2323-2324, 2324-2325, 2325-2326, 2326-2327, 2327-2328, 2328-2329, 2329-2330, 2330-2331, 2331-2332, 2332-2333, 2333-2334, 2334-2335, 2335-2336, 2336-2337, 2337-2338, 2338-2339, 2339-2340, 2340-2341, 2341-2342, 2342-2343, 2343-2344, 2344-2345, 2345-2346, 2346-2347, 2347-2348, 2348-2349, 2349-2350, 2350-2351, 2351-2352, 2352-2353, 2353-2354, 2354-2355, 2355-2356, 2356-2357, 2357-2358, 2358-2359, 2359-2360, 2360-2361, 2361-2362, 2362-2363, 2363-2364, 2364-2365, 2365-2366, 2366-2367, 2367-2368, 2368-2369, 2369-2370, 2370-2371, 2371-2372, 2372-2373, 2373-2374, 2374-2375, 2375-2376, 2376-2377, 2377-2378, 2378-2379, 2379-2380, 2380-2381, 2381-2382, 2382-2383, 2383-2384, 2384-2385, 2385-2386, 2386-2387, 2387-2388, 2388-2389, 2389-2390, 2390-2391, 2391-2392, 2392-2393, 2393-2394, 2394-2395, 2395-2396, 2396-2397, 2397-2398, 2398-2399, 2399-2400, 2400-2401, 2401-2402, 2402-2403, 2403-2404, 2404-2405, 2405-2406, 2406-2407, 2407-2408, 2408-2409, 2409-2410, 2410-2411, 2411-2412, 2412-2413, 2413-2414, 2414-2415, 2415-2416, 2416-2417, 2417-2418, 2418-2419, 2419-2420, 2420-2421, 2421-2422, 2422-2423, 2423-2424, 2424-2425, 2425-2426, 2426-2427, 2427-2428, 2428-2429, 2429-2430, 2430-2431, 2431-2432, 2432-2433, 2433-2434, 2434-2435, 2435-2436, 2436-2437, 2437-2438, 2438-2439, 2439-2440, 2440-2441, 2441-2442, 2442-2443, 2443-2444, 2444-2445, 2445-2446, 2446-2447, 2447-2448, 2448-2449, 2449-2450, 2450-2451, 2451-2452, 2452-2453, 2453-2454, 2454-2455, 2455-2456, 2456-2457, 2457-2458, 2458-2459, 2459-2460, 2460-2461, 2461-2462, 2462-2463, 2463-2464, 2464-2465, 2465-2466, 2466-2467, 2467-2468, 2468-2469, 2469-2470, 2470-2471, 2471-2472, 2472-2473, 2473-2474, 2474-2475, 2475-2476, 2476-2477, 2477-2478, 2478-2479, 2479-2480, 2480-2481, 2481-2482, 2482-2483, 2483-2484, 2484-2485, 2485-2486, 2486-2487, 2487-2488, 2488-2489, 2489-2490, 2490-2491, 2491-2492, 2492-2493, 2493-2494, 2494-2495, 2495-2496, 2496-2497, 2497-2498, 2498-2499, 2499-2500, 2500-2501, 2501-2502, 2502-2503, 2503-2504, 2504-2505, 2505-2506, 2506-2507, 2507-2508, 2508-2509, 2509-2510, 2510-2511, 2511-2512, 2512-2513, 2513-2514, 2514-2515, 2515-2516, 2516-2517, 2517-2518, 2518-2519, 2519-2520, 2520-2521, 2521-2522, 2522-2523, 2523-2524, 2524-2525, 2525-2526, 2526-2527, 2527-2528, 2528-2529, 2529-2530, 2530-2531, 2531-2532, 2532-2533, 2533-2534, 2534-2535, 2535-2536, 2536-2537, 2537-2538, 2538-2539, 2539-2540, 2540-2541, 2541-2542, 2542-2543, 2543-2544, 2544-2545, 2545-2546, 2546-2547, 2547-2548, 2548-2549, 2549-2550, 2550-2551, 2551-2552, 2552-2553, 2553-2554, 2554-2555, 2555-2556, 2556-2557, 2557-2558, 2558-2559, 2559-2560, 2560-2561, 2561-2562, 2562-2563, 2563-2564, 2564-2565, 2565-2566, 2566-2567, 2567-2568, 2568-2569, 2569-2570, 2570-2571, 2571-2572, 2572-2573, 2573-2574, 2574-2575, 2575-2576, 2576-2577, 2577-2578, 2578-2579, 2579-2580, 2580-2581, 2581-2582, 2582-2583, 2583-2584, 2584-2585, 2585-2586, 2586-2587, 2587-2588, 2588-2589, 2589-2590, 2590-2591, 2591-2592, 2592-2593, 2593-2594, 2594-2595, 2595-2596, 2596-2597, 2597-2598, 2598-2599, 2599-2600, 2600-2601, 2601-2602, 2602-2603, 2603-2604, 2604-2605, 2605-2606, 2606-2607, 2607-2608, 2608-2609, 2609-2610, 2610-2611, 2611-2612, 2612-2613, 2613-2614, 2614-2615, 2615-2616, 2616-2617, 2617-2618, 2618-2619, 2619-2620, 2620-2621, 2621-2622, 2622-2623, 2623-2624, 2624-2625, 2625-2626, 2626-2627, 2627-2628, 2628-2629, 2629-2630, 2630-2631, 2631-2632, 2632-2633, 2633-2634, 2634-2635, 2635-2636, 2636-2637, 2637-2638, 2638-2639, 2639-2640, 2640-2641, 2641-2642, 2642-2643, 2643-2644, 2644-2645, 2645-2646, 2646-2647, 2647-2648, 2648-2649, 2649-2650, 2650-2651, 2651-2652, 2652-2653, 2653-2654, 2654-2655, 2655-2656, 2656-2657, 2657-2658, 2658-2659, 2659-2660, 2660-2661, 2661-2662, 2662-2663, 2663-2664, 2664-2665, 2665-2666, 2666-2667, 2667-2668, 2668-2669, 2669-2670, 2670-2671, 2671-2672, 2672-2673, 2673-2674, 2674-2675, 2675-2676, 2676-2677, 2677-2678, 2678-2679, 2679-2680, 2680-2681, 2681-2682, 2682-2683, 2683-2684, 2684-2685, 2685-2686, 2686-2687, 2687-2688, 2688-2689, 2689-2690, 2690-2691, 2691-2692, 2692-2693, 2693-2694, 2694-2695, 2695-2696, 2696-2697, 2697-2698, 2698-2699, 2699-2700, 2700-2701, 2701-2702, 2702-2703, 2703-2704, 2704-2705, 2705-2706, 2706-2707, 2707-2708, 2708-2709, 2709-2710, 2710-2711, 2711-2712, 2712-2713, 2713-2714, 2714-2715, 2715-2716, 2716-2717, 2717-2718, 2718-2719, 2719-2720, 2720-2721, 2721-2722, 2722-2723, 2723-2724, 2724-2725, 2725-2726, 2726-2727, 2727-2728, 2728-2729, 2729-2730, 2730-2731, 2731-2732, 2732-2733, 2733-2734, 2734-2735, 2735-2736, 2736-2737, 2737-2738, 2738-2739, 2739-2740, 2740-2741, 2741-2742, 2742-2743, 2743-2744, 2744-2745, 2745-2746, 2746-2747, 2747-2748, 2748-2749, 2749-2750, 2750-2751, 2751-2752, 2752-2753, 2753-2754, 2754-2755, 2755-2756, 2756-2757, 2757-2758, 2758-2759, 2759-2760, 2760-2761, 2761-2762, 2762-2763, 2763-2764, 2764-2765, 2765-2766, 2766-2767, 2767-2768, 2768-2769, 2769-2770, 2770-2771, 2771-2772, 2772-2773, 2773-2774, 2774-2775, 2775-2776, 2776-2777, 2777-2778, 2778-2779, 2779-2780, 2780-2781, 2781-2782, 2782-2783, 2783-2784, 2784-2785, 2785-2786, 2786-2787, 2787-2788, 2788-2789, 2789-2790, 2790-2791, 2791-2792, 2792-2793, 2793-2794, 2794-2795, 2795-2796, 2796-2797, 2797-2798, 2798-2799, 2799-2800, 2800-2801, 2801-2802, 2802-2803, 2803-2804, 2804-2805, 2805-2806, 2806-2807, 2807-2808, 2808-2809, 2809-2810, 2810-2811, 2811-2812, 2812-2813, 2813-2814, 2814-2815, 2815-2816, 2816-2817, 2817-2818, 2818-2819, 2819-2820, 2820-2821, 2821-2822, 2822-2823, 2823-2824, 2824-2825, 2825-2826, 2826-2827, 2827-2828, 2828-2829, 2829-2830, 2830-2831, 2831-2832, 2832-2833, 2833-2834, 2834-2835, 2835-2836, 2836-2837, 2837-2838, 2838-2839, 2839-2840, 2840-2841, 2841-2842, 2842-2843, 2843-2844, 2844-2845, 2845-2846, 2846-2847, 2847-2848, 2848-2849, 2849-2850, 2850-2851, 2851-2852, 2852-2853, 2853-2854, 2854-2855, 2855-2856, 2856-2857, 2857-2858, 2858-2859, 2859-2860, 2860-2861, 2861-2862, 2862-2863, 2863-2864, 2864-2865, 2865-2866, 2866-2867, 2867-2868, 2868-2869, 2869-2870, 2870-2871, 2871-2872, 2872-2873, 2873-2874, 2874-2875, 2875-2876, 2876-2877, 2877-2878, 2878-2879, 2879-2880, 2880-2881, 2881-2882, 2882-2883, 2883-2884, 2884-2885, 2885-2886, 2886-2887, 2887-2888, 2888-2889, 2889-2890, 2890-2891, 2891-2892, 2892-2893, 2893-2894, 2894-2895, 2895-2896, 2896-2897, 2897-2898, 2898-2899, 2899-2900, 2900-2901, 2901-2902, 2902-2903, 2903-2904, 2904-2905, 2905-2906, 2906-2907, 2907-2908, 2908-2909, 2909-2910, 2910-2911, 2911-2912, 2912-2913, 2913-2914, 2914-2915, 2915-2916, 2916-2917, 2917-2918, 2918-2919, 2919-2920, 2920-2921, 2921-2922, 2922-2923, 2923-2924, 2924-2925, 2925-2926, 2926-2927, 2927-2928, 2928-2929, 2929-2930, 2930-2931, 2931-2932, 2932-2933, 2933-2934, 2934-2935, 2935-2936, 2936-2937, 2937-2938, 2938-2939, 2939-2940, 2940-2941, 2941-2942, 2942-2943, 2943-2944, 2944-2945, 2945-2946, 2946-2947, 2947-2948, 2948-2949, 2949-2950, 2950-2951, 2951-2952, 2952-2953, 2953-2954, 2954-2955, 2955-2956, 2956-2957, 2957-2958, 2958-2959, 2959-2960, 2960-2961, 2961-2962, 2962-2963, 2963-2964, 2964-2965, 2965-2966, 2966-2967, 2967-2968, 2968-2969, 2969-2970, 2970-2971, 2971-2972, 2972-2973, 2973-2974, 2974-2975, 2975-2976, 2976-2977, 2977-2978, 2978-2979, 2979-2980, 2980-2981, 2981-2982, 2982-2983, 2983-2984, 2984-2985, 2985-2986, 2986-2987, 2987-2988, 2988-2989, 2989-2990, 2990-2991, 2991-2992, 2992-2993, 2993-2994, 2994-2995, 2995-2996, 2996-2997, 2997-2998, 2998-2999, 2999-3000, 3000-3001, 3001-3002, 3002-3003, 3003-3004, 3004-3005, 3005-3006, 3006-3007, 3007-3008, 3008-3009, 3009-3010, 3010-3011, 3011-3012, 3012-3013, 3013-3014, 3014-3015, 3015-3016, 3016-3017, 3017-3018, 3018-3019, 3019-3020, 3020-3021, 3021-3022, 3022-3023, 3023-3024, 3024-3025, 3025-3026, 3026-3027, 3027-3028, 3028-3029, 3029-3030, 3030-3031, 3031-3032, 3032-3033, 3033-3034, 3034-3035, 3035-3036, 3036-3037, 3037-3038, 3038-3039, 3039-3040, 3040-3041, 3041-3042, 3042-3043, 3043-3044, 3044-3045, 3045-3046, 3046-3047, 3047-3048, 3048-3049, 3049-3050, 3050-3051, 3051-3052, 3052-3053, 3053-3054, 3054-3055, 3055-3056, 3056-3057, 3057-305	

나. 정량적 연구성과

1) 정량적 연구성과

표 15 정량적 연구성과

년도 (과제연차)	성과목표	지표	목표치(A)	달성(B)	가중치% (C)	평가기준	달성도(%)	
							(D=B/A)	(D*C)
2020 (1단계 1차년도)	심부 빙저호 물리탐사	탄성과 탐사를 통한 빙저호 지구물리학적 특성 분석	1건	1건	10	[R&R 연계목표] ○ 탄성과탐사 시스템 구축 및 운용기술 확보 1건	100	10
		정밀 지구물리자료 분석기술 개발	2건	2건	15	[R&R 연계목표] ○ GIS기반 레이더 자료 DB 구축 1건 ○ 파동 모델링 기반 탄 성과 자료 분석기술 개발 1건	100	15
	심부 빙저호 시추기술 개발	열수시추 멸균시스템 개발	1건	1건	15	[R&R 연계목표] ○ 이동식 청정실험실 제작 1건	100	15
		빙저호 퇴적물 시추 시스템 개발	1건	1건	15	[R&R 연계목표] ○ 빙저호 퇴적물 시추 시스템 자료 수집· 자문 보고서 제출 1 건	100	15
		빙저호 열수시추기 국제 공동 개발	1건	1건	15	[R&R 연계목표] ○ 열수시추기 동력발전 모듈 개발 1건	100	15
	빙저호 시추	국제 공동 프로그램 개발	1건	핵심 자료 확보 1건	5	[R&R 연계목표] ○ 빙저호 국제 공동 열 수시추 프로그램 협 약 체결 1건	100	5
		빙저호 지역 환경특성 조사를 통한 초기환경영향평 가(IEE)	1건	1건	5	[R&R 연계목표] ○ David 빙하 빙저호 지역 생물학적 환경 특성 분석 자료 KPDC 등록 1건	100	5
	논문	mrnIF 40이상 80미만	1건	-	20	○ mrnIF 40이상 80미만 논문 게재 1건	0	0
	계				100			80

년도 (과제연차)	성과목표	지표	목표치(A)	달성(B)	가중치% (C)	평가기준	달성도(%)	
							(D=B/A)	(D*C)
2021 (1단계 2차년도)	심부 빙저호 물리탐사	탄성과 탐사를 통한 빙저호 지구물리학적 특성 분석	1건	1건	10	[R&R 연계목표] ○ 정밀 십자형 측선 자 료 (8 fold 수를 가지 는 96채널 탄성과 자 료 8km 이상)에 대 한 KPDC 등록 1건	100	10
		탄성과 자료 분석 및 해석단면 작성	1건	1건	10	[R&R 연계목표] ○ 정밀 탄성과 자료에 대한 탄성과 단면 제시 1건	100	10
	심부 빙저호 시추기술 개발	열수시추 멸균시스템 개발	1건	1건	10	[R&R 연계목표] ○ 열수 멸균시스템 제 작 1건	100	10
		빙저호 퇴적물 시추 시스템 개발	3건	3건	10	[R&R 연계목표] ○ 퇴적물 시추용 청정 원치/ 피스톤 시추기 / 다중 시추기 설계 3건	100	10
		빙저호 열수시추기 국제 공동 개발	1건	BAS 장비 공동 활용 협의 1건	20	[R&R 연계목표] ○ 열수시추기 열수순환 시스템 개발 1건	100	20
	빙저호 시추	국제 공동 프로그램 개발	1건	SLCECs 최신동향파 악 1건/ 추가 협의 건	5	[R&R 연계목표] ○ 서남극 빙저호 시추 프로그램(SLCECs) 최신 동향 파악 및 공동 프로그램 관련 협의 여부	100	5
		빙저호 지역 환경특성 조사를 통한 초기환경영향평 가(IEE)	1건	1건	5	[R&R 연계목표] ○ David 빙하 빙저호 지역 생지화학적 환 경 특성 분석 자료 KPDC 등록 1건	100	5
	논문	mrnIF 80이상	2건	0.5건	30	○ mrnIF 80이상 논문 게재 2건	25	7.5
	계				100			77.5

년도 (과제연차)	성과목표	지표	목표치(A)	달성(B)	가중치% (C)	평가기준	달성도(%)	
							(D=B/A)	(D*C)
2022 (1단계 3차년도)	심부 빙저호 물리탐사	탄성과 탐사를 통한 빙저호 지구물리학적 특성 분석	1건	1건	10	[R&R 연계목표] ○ 2차원/3차원 탄성과 해석도 제시 1건	100	10
		탄성과 자료 분석 및 해석단면 작성	1건	1건	10	[R&R 연계목표] ○ 빙저호 지구물리학적 특성 제시 1건	100	10
		탄성과 자료기반 빙저호 최적 시추위치 선정	1건	1건	10	[R&R 연계목표] ○ 탄성과 해석기반 최 적 빙저호 시추위치 제시 1건	100	10
	심부 빙저호 시추기술 개발	열수시추 멸균시스템 개발	1건	국내시험운영 1건/ 유효성 검증 1건	10	[R&R 연계목표] ○ 열수시추 멸균 시스 템 현장 운영 자료 KPDC 등록 1건	100	10
		빙저호 퇴적물 시추 시스템 개발	3건	원치제작 1건/ BAS 시추기 공동활용협의 1건	10	[R&R 연계목표] ○ 빙저호 퇴적물 시추 용 청정원치/ 피스톤 시추기/ 다중 시추기 제작 3건	100	10
		빙저호 열수시추기 국제 공동 개발	1건	BAS 장비 공동 활용 협의 1건	10	[R&R 연계목표] ○ 열수시추기 시추 probe 개발 1건	100	10
	빙저호 시추	국제 공동 프로그램 개발	1건	재협의 및 협약 추진 1건	5	[R&R 연계목표] ○ 한-영 공동 빙저호 시추 프로그램 개발 재협의, 협약 추진 여부	100	5
		빙저호 지역 환경특성 조사를 통한 초기환경영향평 가(IEE)	1건	1건	5	[R&R 연계목표] ○ 빙저호 시추후보지 초기환경 예비조사 종합 분석 결과 보 고	100	5
	논문	mrnIF 80이상	2건	0건	30	○ mrnIF 80이상 논문 게재 2건	0	0
	계				100			70

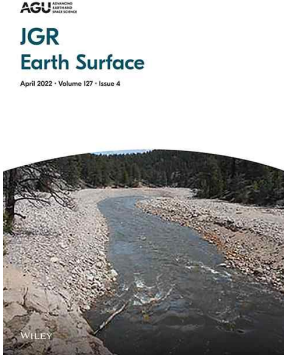
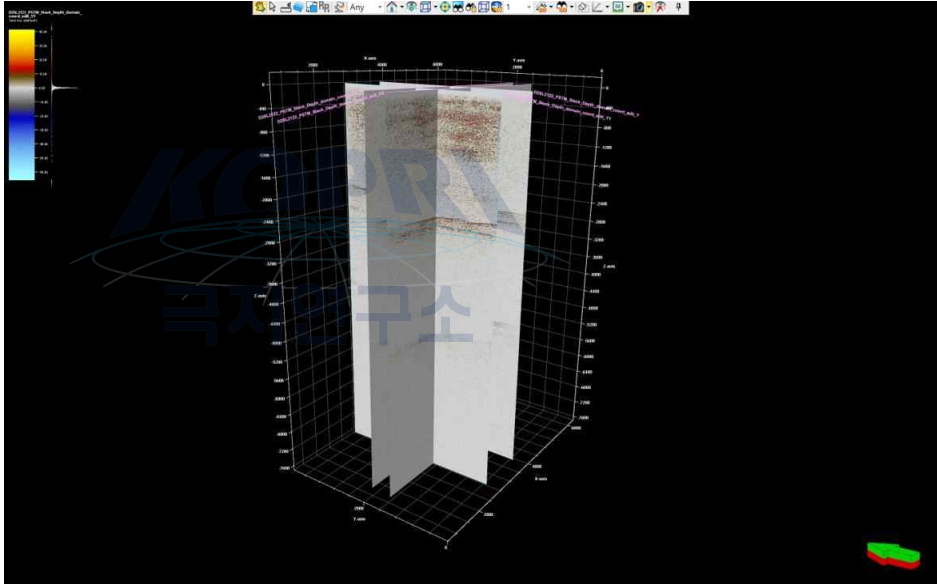
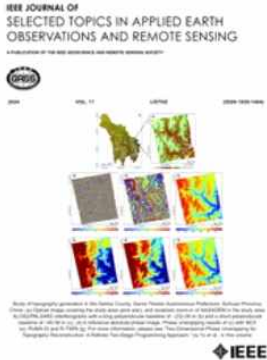
년도 (과제연차)	성과목표	지표	목표치(A)	달성(B)	가중치% (C)	평가기준	달성도(%)	
							(D=B/A)	(D*C)
2023 (2단계 1차년도)	심부 빙저호 물리탐사	탄성과 자료 분석 기술 고도화	1건	1건	10	[R&R 연계목표] ○ D2 빙저호 지구물리 학적 수치 모델 작 성	100	10
		위성 자료 기반 신규 열수시추 후보지 광역 관측	1건	1건	10	[R&R 연계목표] ○ 신규 시추 후보지 1m급 초고해상도 SAR 위성 영상 자 료 확보	100	10
	심부 빙저호 시추기술 개발	심부 빙저호 청정열수시추 시스템 개발	1건	1건	15	[R&R 연계목표] ○ 2,000m급 시추호스 제작 1건	100	15
		심부 빙저호 시추캠프 구축	1건	1건	15	[R&R 연계목표] ○ 빙저호 시추캠프 설 계 1건	100	15
		빙저호 청정열수시추기 국제 공동 개발	1건	1건	15	[R&R 연계목표] ○ 빙저호 샘플러 개발 1건	100	15
	빙저호 시추	국제 공동 심부 빙저호 시추연구 프로그램 개발	1건	1건	10	[R&R 연계목표] ○ 한-영 공동 D2 빙저 호 시추 프로그램 협 약 체결 1건	100	10
		빙저호 지역 환경특성 조사를 통한 종합환경영향평 가(CEE)	1건	1건	5	[R&R 연계목표] ○ David 빙하 빙저호 지역 환경 특성 조 사 및 분석 자료 확 보 ○ David 빙하 빙저호 지역 환경 특성 분 석 자료 KPDC 등록 1건	100	5
	논문	mrnIF 40이상 80미만	1건	0건	5	○ mrnIF 40이상 80미만 논문 게재 1건	0	0
		mrnIF 80이상	1건	0.5건	15	○ mrnIF 80이상 논문 게재 1건	50	7.5
	계					100	87.5	

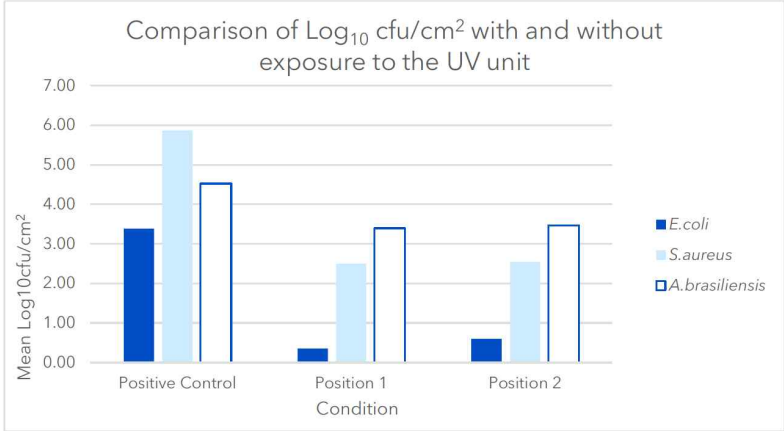
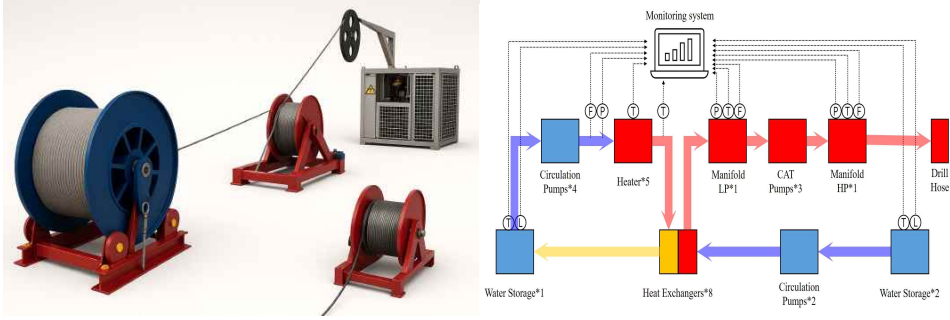
년도 (과제연차)	성과목표	지표	목표치(A)	달성(B)	가중치% (C)	평가기준	달성도(%)	
							(D=B/A)	(D*C)
2024 (2단계 2차년도)	심부 빙저호 물리탐사	레이더 자료 분석 기술 고도화	1건	1건	10	[R&R 연계목표] ○ 레이더 자료 분석 기 술 고도화	100	10
		신규 빙저호 열수시추 후보지 위성자료 확보	1건	1건	10	[R&R 연계목표] ○ 신규 빙저호 열수시 추 후보지 위성 자 료 확보	100	10
	심부 빙저호 시추기술 개발	심부 빙저호 청정열수시추 시스템 개발	1건	1건	15	[R&R 연계목표] ○ Wellhead UV 유닛 제작 1건	100	15
		심부 빙저호 시추캠프 구축	1건	1건	15	[R&R 연계목표] ○ 빙저호 시추캠프 텐 트유닛 제작 1건	80	12
		빙저호 청정열수시추기 국제 공동 개발	1건	1건	15	[R&R 연계목표] ○ 보일러&순환시스템 개발 1건	100	15
	빙저호 시추	국제 공동 심부 빙저호 시추연구 프로그램 개발	1건	1건	10	[R&R 연계목표] ○ 한-영 국제공동 빙저 호 시추프로그램 계 획 수립 1건	100	10
		빙저호 지역 환경특성 조사를 통한 포괄적 환경영향평가 (CEE)	1건	1건	5	[R&R 연계목표] ○ 환경특성 자료 기반 초기 환경영향평가 서 초안 (Draft IEE) 작성	100	5
	논문	mrnIF 40이상 80미만	1건	-	5	○ mrnIF 40이상 80미만 논문 게재 1건	0	0
		mrnIF 80이상	1건	1건	15	○ mrnIF 80이상 논문 게재 1건	100	15
	계				100			92

년도 (과제연차)	성과목표	지표	목표치(A)	달성(B)	가중치% (C)	평가기준	달성도(%)	
							(D=B/A)	(D*C)
2025 (2단계 3차년도)	심부 빙저호 물리탐사	빙저호 지구물리 탐사 자료 분석 기술 고도화	1건	1건	10	[R&R 연계목표] ○ 탄성과 자료 분석 기 술 고도화 ○ 빙저호 표면적, 저수 량 계산법 제시 ○ 레이더 결과 3D 단 면도 작성	100	10
		신규 시추 후보지 선정	1건	1건	10	[R&R 연계목표] ○ 신규 열수시추 후보 지 선정 1건	100	10
	심부 빙저호 시추기술 개발	심부 빙저호 청정열수시추 시스템 개발	1건	1건	15	[R&R 연계목표] ○ 시스템 별균 유효성 검증 1건	100	15
		심부 빙저호 시추캠프 구축	1건	1건	15	[R&R 연계목표] ○ 빙저호 시추캠프 설 치 운영 1건	100	15
		빙저호 열수시추기 국제 공동 개발	1건	1건	15	[R&R 연계목표] ○ 통합시스템 호환성 테스트 1건	100	15
	빙저호 시추	국제 공동 심부 빙저호 시추연구 프로그램 개발	1건	1건	15	[R&R 연계목표] ○ 한-영 공동 D2 빙저 호 시추 프로그램 현 장연구 수행 1건	100	15
		빙저호 지역 환경특성 조사를 통한 초기 환경영향평가 (IEE)	1건	1건	5	[R&R 연계목표] ○ 빙저호 시추를 위한 최종 초기 환경영향 평가(Final IEE) 보고 서 제출	100	5
	논문	mrnIF 80이상	1건	1건	15	○ mrnIF 80이상 논문 게재 1건	100	15
	계				100			100

주) 달성도는 100%를 초과할 수 없음

2) 증빙자료

성과목표	성과지표	
심부 빙저호 물리탐사 (2025)	빙저호 지구 물리 탐사 분석 기술 고도화	○ 레이더 자료 분석 기술 고도화  빙저호 레이더 탐사 및 빙저호 분석 기술 논문 게재 완료 (2025. 05) - 논문명: Airborne and Spaceborne Mapping and Analysis of the Subglacial Lake D2 in David Glacier, Terra Nova Bay, Antarctica - 저널: Journal of Geophysical Research: Earth Surface (IF 3.9) ○ 빙저호 표면적, 저수량 계산법 제시 ○ 레이더 결과 3D 단면도 작성  그림 294 탄성과 자료를 바탕으로 SLC pseudo 3D mapping
	신규 시추 후보지 선정	○ 신규 열수시추 후보지 선정 1건  신규 빙저호 발견 논문 게재완료 (2025. 08) - 논문명: Monitoring Subglacial Lake Activity in the David Glacier Region, East Antarctica, Using a DInSAR Displacement Integration Approach - 저널: IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing (IF 5.5)
심부 빙저호 청정열수	심부 빙저호 청정열수시	○ 달성도: 100 % (목표치 1건/ 달성치 1건) - 국제 공인 검증기관을 통한 Wellhead UV unit의 멸균 유효성 검증 완료

	추 시스템 개발	 그림 295 Wellhead UV 시스템의 평균 유효성 테스트 결과
시추 기술개발 (2025)	심부 빙저호 시추캠프 구축	○ 빙저호 시추캠프 설치 운영 1건  그림 296 Weatherhaven S4 프레임 아치 텐트 중장비 활용 설치 및 내부
	빙저호 청정열수시추기 국제 공동 개발	○ 통합시스템 호환성 테스트 1건  그림 297 보일러&순환시스템 호환성 테스트 모식도 (좌), 샘플링 윈치-케이블 호환성 테스트(우)
빙저호 시추 (2025)	국제 공동 심부 빙저호 시추연구 프로그램 개발	○ 달성도: 100 % (목표치 1건/ 달성치 1건) - 영국 BAS와 온/오프라인 청석호 시추 실행계획 논의 중. 연말까지 세부 계획 수립 완료 예정

		 Keith Makinson - BAS <kmak@bas.ac.uk> 04-12 (화), 오전 12:58 Hi Mincheol, Apologies for the delay. We have been heavily focused on Greenland logistics planning, costing up and optimising every litre of fuel and kilo of equipment to see if our Petermann Glacier 2026 fieldwork is feasible within our relatively tiny budget. Our plan-A logistics were much higher than we were led to believe in the haste of the rapid proposal call. By moving money around, the work looks possible but with very scaled back ambitions. We must order our fuel in the next two weeks! Your list of achievements and plans look good, and you are clearly making great progress with the CHWD project. It will be very interesting to discuss the details and exchange ideas. From our earlier discussions about BAS-KOPRI collaboration, including with our science director, there remains genuine interest at BAS. The key thing will be to determine the collaborative research areas and identifying the research questions that can be addressed, which will be needed for funding proposals to NERC. From your drilling timeline and NERC funding timelines, now is the time to start more formally building our scientific collaboration. Have you developed a detailed science programme or is this part of the evaluation process to determine research projects for the next six years (2026-2031)? Can or would you want BAS scientists to contribute to this process? Also, are the geophysical results from the lake region and their interpretation available? Previously, you mentioned these were being worked on ready for publication. The next stage would be to establish a BAS-KOPRI group (or UK and Korea consortium depending on funding rules) to further develop a collaborative framework that will enable funding proposals. I'm happy to discuss this further when I'm at KOPRI (May 14th - 21st) or before, to get things started. Best regards Keith < 영국 BAS 시추팀과의 청석호 열수 시추 실행계획 관련 email 협의내용 >
	빙저호 지역 환경특성 조사를 통한 초기환경영향평가 (IEE)	○ 빙저호 시추를 위한 최종 초기 환경영향평가(Final IEE) 보고서 작성 그림 298 최종 초기 환경영향평가(Final IEE) 보고서
논문 (2025)	mrnIF 80이상	○ mrnIF 80이상 논문 게재 1건

다. KPDC 등록 이행실적

데이터 이름1)	메타데이터 ID2)	메타데이터 제목3)	원시데이터 등록여부4)
David 빙하 빙저호 지역 생물학적 환경 특성 분석 자료	KOPRI-KPDC-0000 1537	Biogeochemical data from David glacier	등록
David 빙하 빙저호 지역 생물학적 환경 특성 분석 자료	KOPRI-KPDC-0000 1843	Biogeochemical data from David glacier_2021	등록
19년도 광역적 십자형 측선 자료	KOPRI-KPDC-0000 1822	and Seismic Data at David Glacier (D2 subglacier lake) in 2019	등록
21년도 8fold 정밀 탄성파 자료	KOPRI-KPDC-0000 1978	Land Seismic Data at David Glacier (D2 subglacier lake) in 2022	등록
데이터-2	KOPRI-KPDC- 00002316	Ion concentration of snow samples from David glacier, a candidate site for drilling of the sub-glacial lakes	등록
18년도 데이터 자료 빙저호 심층 분석 결과	KOPRI-KPDC- 00001177	Airborne Ice Penetrating Radar (IPR) survey data and Spaceborne satellite data of Korean route from David glacier, Antarctica in 2018	등록
원시데이터 등록률 ⁵⁾			100 %

- 주) 1. 과제계획서 제출시 첨부되는 데이터관리계획서에 기재된 데이터 이름
2, 3. KPDC에 등록된 메타데이터 ID 및 제목
4. KPDC에 등록된 메타데이터의 원시데이터 등록여부
5. 메타데이터 등록 건수 대비 원시데이터 등록비율

3. 기타 성과 (참고자료)

가. 인력활용/양성 성과

1) 인력지원 성과

지원 총인원	지원 대상 (학위별, 취득자)				성별		지역별		
	박사	석사	학사	기타	남	여	수도권	대전	기타지역
1	(1,0)				1		1		

○ 달성실적 상세내용(의의, 기대효과 등)

- 남극내륙 빙상 탄성파탐사 연구 전문인력 양성

2) 장·단기 연수지원 성과

장기 (2월 이상)		단기 (2월 미만)	
국내	국외	국내	국외

○ 달성실적 상세내용(의의, 기대효과 등)

-

3) 산업기술인력 양성 성과

프로그램명	프로그램 내용	교육기관	교육 개최회수	총 교육시간	총 교육인원

○ 달성실적 상세내용(의의, 기대효과 등)

-

나. 국제화/협력 성과

1) 국내·외 공동 연구협력 실적(위탁연구 제외)

연구협력 파트너	수행형태	연구협력 내용(목표)	수행 결과 및 우수성
영국 BAS	공동	○ 심부 빙저호 열수시추기 국제 공동 개발 ○ 한-영 공동 D2 빙저호 시추 프로그램 개발	○ 빙저호 열수시추기 국제 공동 개발 및 BAS 열수시추장비 (BEAMISH/SLCECs 열수시추시스템) 공동 활용 합의 ○ 한-영 D2 빙저호 공동 시추프로그램 개발 합의 ○ 한-영 빙저호 공동연구 2단계 협약(LoU) 갱신('25-'30)

2) 인력교류 성과

외국 연구자 유치				해외 파견			
유치기간(월)	국적	학위	전공	파견기간(월)	파견국	학위	전공

○ 달성실적 상세내용(의의, 기대효과 등)

-

3) 학술회의 개최 성과

명칭	기술분야	규 모			개최장소	지원금액 (백만원)
		참가국	인원	기간(일)		

○ 달성실적 상세내용(의의, 기대효과 등)

-

4) 국제협력 성과

MOU 체결			수요조사			공동연구	
대상국	대상기관	수집자료(건)	대상국	과제접수(건)	과제도출(건)	대상국	협약연구비 (백만원)
영국	남극조사소 (BAS)	LoU 체결 1건					

○ 달성실적 상세내용(의의, 기대효과 등)

- 남극 D2 빙저호 청정열수시추와 빙저호 공동연구를 주제로 향후 5년간 유지될 한-영 연구협력 부속서(LoU) 체결
- KOPRI-BAS 간 1단계 LOU('17 - '22) 만료에 따라 2단계 협약을 갱신함으로써 향후 지속적인 빙저호 공동연구 수행에 대한 양 기관의 전략적 협력 의지 재확인
- BAS 보유 청정열수시스템 장비의 공동 활용 및 한-영 공동 빙저호 과학 프로그램 제안서 공동 작성 합의를 통해 국제 공동연구 파트너십 강화 측면에서 실질적 진전을 도모함

5) 기타 성과 (자율적 작성)

○ 진행중인 학술성과(논문)

- 빙저호 레이더 탐사 및 빙저호 분석 기술 논문 게재 완료 (2025.05)
 - 논문명: Airborne and Spaceborne Mapping and Analysis of the Subglacial Lake D2 in David Glacier, Terra Nova Bay, Antarctica
 - 저널: Journal of Geophysical Research: Earth Surface (IF 3.8, mrnlf 78)

- 신규 빙저호 발견 논문 게재 완료 (2025.08)
 - 논문명: Monitoring Subglacial Lake Activity in the David Glacier Region, East Antarctica, Using a DInSAR Displacement Integration Approach
 - 저널: IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing (IF 4.7, mrnIf 90)
- 남극 D2 빙저호 탄성과 탐사 자료 분석 연구 논문 게재 완료 (2026.01)
 - 논문명: A seismic analysis of subglacial 1 lake D2 (Subglacial Lake Cheongsuk) 2 beneath David Glacier, Antarctica
 - 저널: The Cryosphere (IF 5.2, mrnIf 90)
- 남극 D2 빙저호 위성 자료 분석 연구 논문 게재 완료 (2025.10)
 - 논문명: Identification and Monitoring of Subglacial Lakes Upstream of David Glacier, East Antarctica, Using ALOS-2 Differential Interferometry and ICESat-2 Altimetry
 - 저널: New Zealand Journal of Geology and Geophysics (IF 2.2, mrnIf 80)
- 남극 내륙 눈 미생물의 다양성 및 분포 특성에 관한 연구 논문 게재 완료 (2025.09)
 - 논문명: Plant species and soil moisture shape rhizosphere microbiota in an unusually productive tundra ecosystem of North Greenland
 - 저널: Environmental Microbiome (IF 7.9, mrnIf 90)

○ 홍보 성과

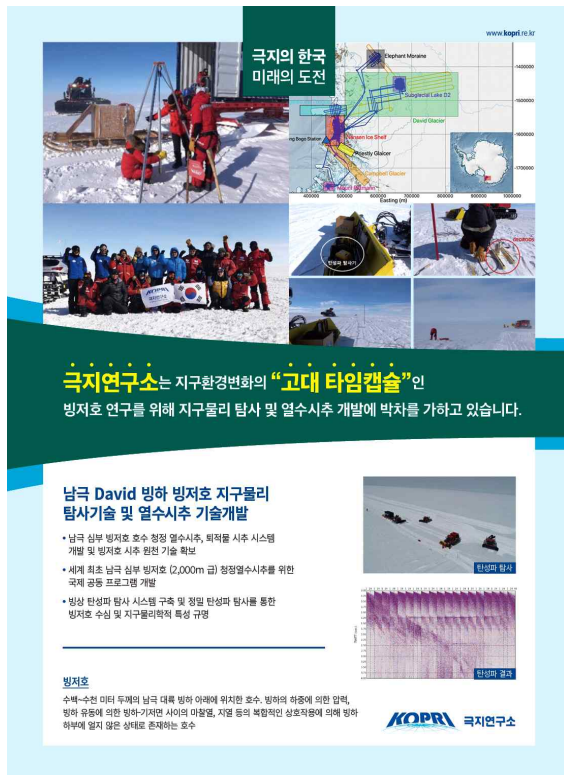


그림 299 '20년 지질학회(추계) 지면광고 게재



그림 300 '22년 지질학회(추계) 지면광고 게재

제 3 장 향후 연구방향 및 성과활용 계획

1. 연구결과의 활용방안(기대효과)

○ 심부 빙저호 물리탐사

- 국내 최초 96채널 빙상 탄성파탐사 시스템, 빙상 지구물리(탄성파)탐사 기술, 탄성파자료 정밀 분석기술 등 본 과제를 통해 자체적으로 확보한 빙상 탐사 인프라를 신규 빙저호 시추 후보지, 심부빙하시추 후보지 등 남극 내륙 미개척 지역 핵심 연구거점의 탐지와 검증에 활용 가능
- 레이더 기반의 탐사 기법과 고해상도 위성영상 분석기술은 융합을 통해 남극 내륙 환경 모니터링, 남극 빙저 수계 변화 탐지 연구 등 원격 탐사 연구에 활용
- 남극 빙원 지구물리탐사 데이터를 남극 내륙 연구거점 지역 분석의 기초자료로 제공하여 타 연구와의 연계 활용 기대

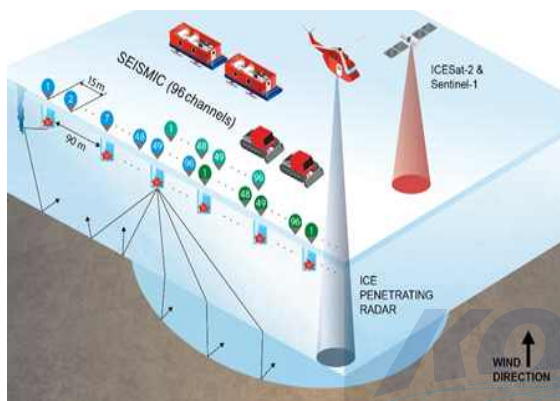


그림 301 빙권 탄성파 탐사, 레이더 탐사 및 위성 영상 분석 기술 확보

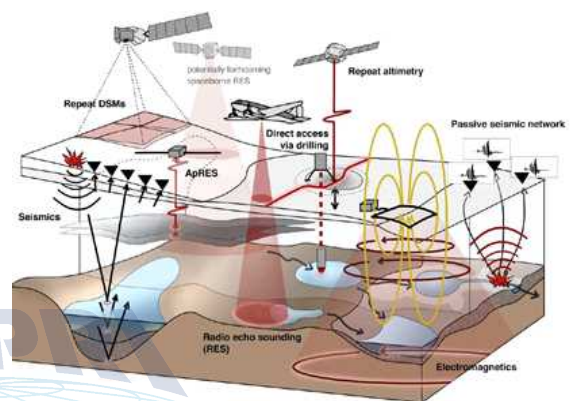


그림 302 지구물리 탐사를 타 연구와의 연계 활용 가능

○ 심부 빙저호 시추기술 개발

- 본 과제를 통해 개발한 청정열수시추 시스템은 독립적 기능을 갖춘 모듈화 시스템(발전기, 열교환기, 열수순환, 멸균, 샘플러 등)으로 구성되어 있어 향후 다양한 극지 환경에 맞춘 유연한 기술적 전개와 확장이 가능함. 해당 모듈화 장비는 심부빙하시추, 남극 제3기지 건설지 탐사 등 대형 남극내륙 연구에 활용될 수 있으며, 이를 통해 운송 효율 증대, 탐사 비용 절감 효과를 기대할 수 있음



그림 303 독립적 기능을 갖춘 이동식 컨테이너 모듈의 남극 연구 활용 예

- 청정열수시추 기술은 외부 오염 없이 수십만 년 이상의 극지 보존 생태계인 빙저호의 시료(호숫물, 퇴적물) 확보를 가능케 하며, 인위적인 극지 환경 영향을 최소화하는 동시에 신뢰도 높은 생태·지질자료 확보를 보장함. 이는 극지 환경연구의 신뢰도를 획기적으로 향상시키는 기반기술이 됨
- D2 빙저호 청정열수시추 시스템의 멸균 유효성 검증을 통해 D2 빙저호 시추의 과학적, 국제적 신뢰성을 확보하였고, 한-영 국제 공동 개발을 통해 시스템을 국제 표준규격에 맞게 제작하였음. 이러한 시추시스템은 향후 극지(연) 주도의 국제공동(빙저호)연구를 유치함에 있어 전략적 협상력을 갖춘 핵심 인프라로서 활용할 수 있음
- 본 연구에서 축적된 탐사·시추 기술은 향후 SCAR(Scientific Committee on Antarctic Research) 전략 중 Subglacial Antarctic Lakes Exploration 분야의 핵심 기여를 수행할 수 있음
- 2,000m급 심부 빙저호 시추기술 및 탐사기술은 우주 환경과 유사한 조건(극저온, 고립 환경 등)에 적용 가능한 기술로, 향후 유로파(목성의 얼음위성), 엔셀라두스(토성의 얼음위성) 등의 얼음 천체 탐사 기술로의 전환, 응용에 기여할 수 있음
- 심부 빙저호 탐사기술은 원격 탐사, 심부 얼음 시추, 멸균 시료 채취, 오염방지 등의 기술요소를 갖추고 있어, 향후 극지 환경을 활용한 우주 탐사 기술 개발 등의 융복합 연구에 기술적으로 접목 가능
- 실제 사례로 독일우주청(DLR)에서는 '20년부터 TRIPLE 프로젝트를 시작하여 유로파와 엔셀라두스의 얼음을 뚫고 내부 수생태계를 탐사하기 위한 시추 기술을 개발 중이며, 프로젝트에는 IceCraft 시추기, nanoAUV (소형 자율 수중 로봇), AstroBioLab (현장 생물학 실험실) 개발 등 빙저호 시추탐사와 유사한 탐사 기술 개발이 포함돼 있음. TRIPLE 연구팀은 '23년 남극 독일 Neumayer III 기지에서 IceCraft-1 시추기 테스트를 성공적으로 수행하였으며, '26년에는 완전한 시스템을 Ekstrom Ice Shelf에서 실증할 예정임

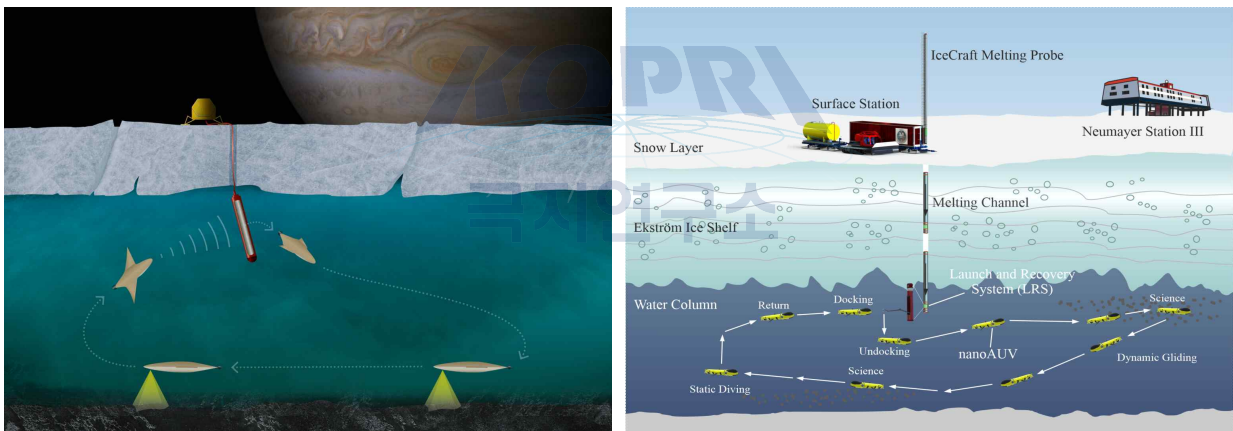


그림 304 독일우주청(DLR) TRIPLE 시스템 모식도(좌) 및 IceCraft 시추기 남극 실증 테스트 모식도(우)

- 미항공우주국(NASA) 또한 '24년 발사 후 '30년 유로파 착륙 예정인 클리퍼(Clipper) 탐사선 프로젝트의 후속 연구로 얼음위성 탐사기술 개발을 위한 ORCAA (Ocean Worlds Reconnaissance and Characterization of Astrobiological Analogs) 프로젝트 수행 중. ORCAA 연구팀은 '23년 7월 알래스카의 주노 빙하 지대에서 열수시추기를 사용하여 3일간 272m 깊이의 빙하에 구멍을 뚫고 자율 수중 로봇을 테스트 하였으며, '25년 300m 시추를 포함한 장비 추가 테스트를 계획 중임.



그림 305 미항공우주국(NASA)의 유로파 시추탐사 모식도(위) 및 ORCAA 팀의 ‘23년 알래스카 현장연구 사진(아래)

○ 빙저호 시추

- 과제 수행 중 확보한 한-영 국제 공동 시추시스템 개발 협력, 한-미-이태리 지구물리탐사 기술 협력 등 다국간 국제 협력 기반은 한-영 국제 공동 빙저호 시추 프로그램의 확대 추진과 신규 국제 공동 빙저호 연구 프로그램 개발과 대한민국 주도의 국제 공동연구 수행의 핵심 인프라로 활용할 수 있음
- 신규 후속 과제와 연계하여 청정열수시추 시스템 완성도를 제고하고 현장 시추프로그램을 수행할 예정이며, 확보한 빙저호 시료는 국내외 연구기관 및 대학과 공유하여 연구 시너지를 극대화하고, 향후 후속 국제 공동연구 참여 기반 확대 및 국제 공동 활용 인력 양성에 기여
- 빙저호 시추를 통해 확보될 청정 호숫물 및 퇴적물 시료는 고립 생태계(생물)의 진화 과정, 극한 미생물의 생리·생태적 특성 규명, 고기후/환경 변화 기록 복원 등 최첨단 융합과학 연구에 활용될 수 있음. 특히, 빙저호 생물 관련 연구 결과는 향후 태양계 내 지구 유사 환경을 지닌 행성 및 위성에서의 생명체 존재 가능성 탐색 등 우주생물학 연구에도 응용 가능함
- 오염방지 중심의 시추기술과 환경영향평가 수행 체계는 극지 생태계 변화 모니터링 뿐 아니라 우주 천체(예: 유로파, 엔셀라두스 등) 탐사 미션의 기술 검증 기반으로 확장 가능
- KPDC를 통해 등록·공유되는 자료는 등은 정책수립, 산업연계 및 학술확산에 기여하고, 지속적인 극지 R&D 예산 투입의 파급효과를 증명할 수 있는 성과로 연결

2. 성과 활용계획

○ 심부 빙저호 물리탐사

- 고도화된 정밀 탄성파 자료 분석기술을 D2 빙저호 본 시추 전 빙저호의 상태 파악과 최종 시추지점 검증을 위한 탄성파 탐사 수행 예정
- 기 확보한 96채널 탄성파탐사 시스템은 채널 확장성이 용이하도록 구성하여 신규 후속 과제를 통해 144채널로 업그레이드할 예정이며, 이를 통해 빙저호의 정밀 구조 해석뿐 아니라 퇴적물 물성치까지도 파악이 가능한 고정밀 탄성파탐사 시스템 및 운영 기술 확보 예정
- 국내 최초 96채널 빙상 탄성파 탐사 장비를 활용한 지구물리 탐사 및 분석 기술 모델의 산학연 기술이전 검토
- 96채널 탄성파탐사 시스템과 정밀 탄성파 자료 분석기술은 한-이태리 국제 공동 탄성파 탐사(협약 완료)를 통해 남극 데이비드 빙원 미개척 지역으로 확장하여 신규 빙저호 탐색 연구에 지속 활용 예정
- 레이더 자료, 19년도 광역형 십자형 측선 탄성파탐사 자료, 21년도 8-fold 정밀 탄성파 자료, David 빙하 빙저호 지역 위성자료, 환경 특성 분석 자료 등 KPDC 등록 자료는 극지 자료공유 플랫폼 확대와 산학연(강원대, 충북대, 기업연구소 등)에 자료 공유를 통해 극지 연구 협력 기반으로 활용 예정.

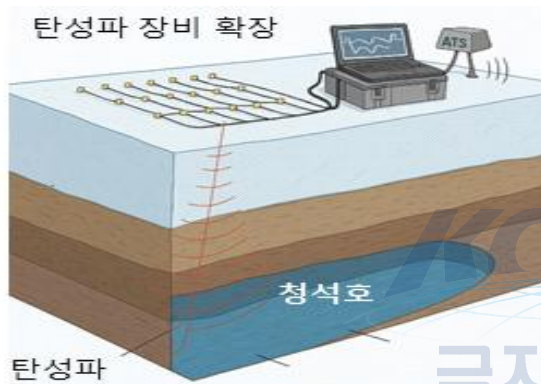


그림 306 고정밀 탄성파 탐사

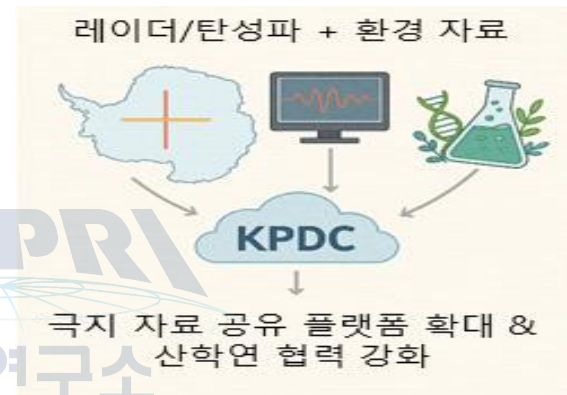


그림 307 극지 자료 공유 & 협력강화



그림 308 한-이태리 국제 공동 탄성파 탐사 협의

○ 심부 빙저호 시추기술 개발

- 본 과제를 통해 2,000m급 청정열수시추 시스템 구축률 80%를 달성하였으며, 신규 후속과제(남극 내륙 청석호 청정열수시추 및 빙저호 기반 다학제 첨단 과학 연구)를 통해 시스템의 통합 안정성을 확보(구축율 100% 달성)한 뒤 남극 D2 빙저호 본시추를 성공적으로 수행할 예정
- 1단계 LoU를 바탕으로 한-영 공동으로 개발한 시추시스템은 영국이 보유한 청정열수시추 시스템과 전적으로 호환이 가능하며, 2단계 빙저호 연구협력 LoU를 기반으로 양 국의 장비를 공동 활용한 한-영 국제 공동 D2 빙저호 청정열수시추 프로그램 착수 예정

- 본 과제를 통해 개발한 2,000m급 청정열수시추 시스템과 남극 내륙 빙저호 시추캠프 운영기술은 빙저수 유동 특성 연구를 위해 후속과제에서 신규 탐지할 데이비드 빙원의 제2빙저호 시추 연구에 재할용 계획으로, 대형 탐사 인프라 구축 사업 성과물의 지속 활용성 확보
- 제2 빙저호 시추는 D2 빙저호와 수문 네트워크가 연결된 빙저호에서 수행하여 두 빙저호 간의 수문 네트워크 연결성 연구와 개별 빙저호의 배수/충전 주기 확인 및 상호 작용 연구로 확장 가능
- 2,000m급 청정열수시추 시스템은 호스 연장, 보일러, 열교환기, 펌프 등 듀얼시스템으로 구축한 하위 모듈의 싱글모드 전환 등 초기 구축비용 대비 저비용의 단순 개조를 통해 3,000m급으로 전략적인 고도화가 가능함. 향후 초심부 빙저호, 남극내륙 고원 고립 환경의 3,000m급 심부 빙저호 등 신규 빙저호 후보지 탐사 결과에 따라 업그레이드하여 활용 예정
- 청정열수시추시스템 운영 및 남극 내륙 연구캠프 운영 기술은 매뉴얼을 정립하여 소내외 협력연구 기반 및 표준자료로 활용
- 열순환시스템, 다운홀 계측기, 이동식 클린랩, 계장&제어&모니터링 시스템 등의 국내 개발 기술의 기술적 독창성을 검토 및 특허 출원 추진

○ 빙저호 시추

- 빙저호 시추기술 개발 및 탐사 성과는 국내외 학술대회 및 국제 저널에 발표 및 게재 예정. 전통적인 학술대회 외에도 천체물리 및 우주생물학 분야 등의 이종 분야 학회 및 융합과학 커뮤니티에 연구성과 발표를 추진 함으로써 후속 다학제 연구 확대 도모
- 빙저호 지구물리탐사 기술과 청정열수시추 기술은 신규 후속과제를 통한 D2 빙저호 시추와 신규 빙저호 탐지 및 제2빙저호 청정시료 확보에 직접 적용되어 실제 시추 및 시료 확보를 실현하고, 확보된 시료를 기반으로 국제공동 생태·고기후·지질 융합연구를 본격 추진
- 신규 후속과제를 통해 확보한 시료는 한·미·영 국제 공동 연구 컨소시엄을 통해 빙저호 생태계의 고유한 진화 과정 규명, 남극 고기후 및 환경 변화 기록 복원, 외계 생명 가능성 검토 등 다학제 융합 연구로 확장하여 차세대 극지 융합과학의 견인 및 학술성과 창출

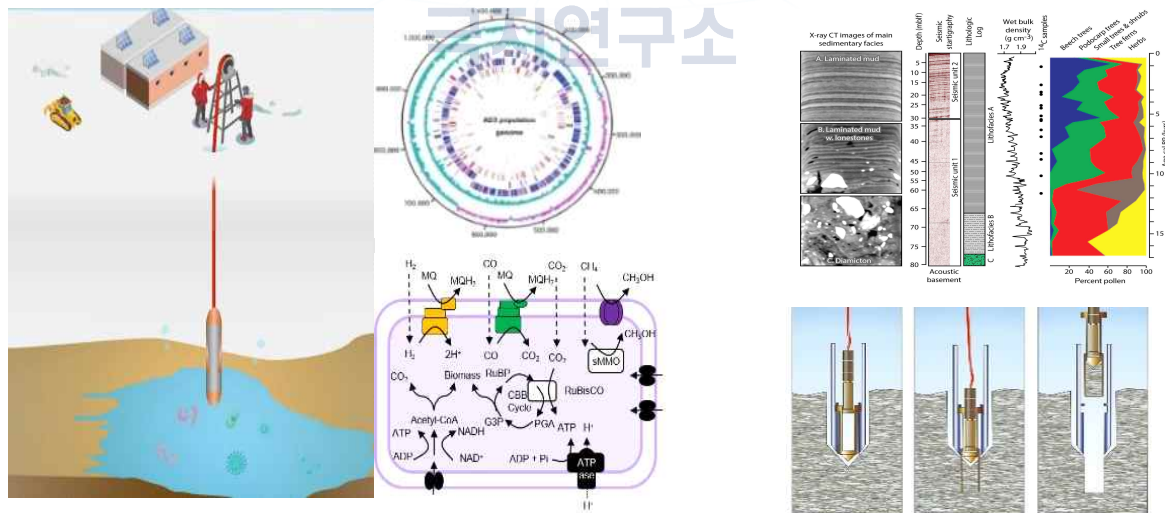


그림 309 빙저호 청정시료 확보를 통한 생물 진화과정 연구(원) 및 동남극 빙상의 과거 거동 변화 연구(오)

- 본 과제에서 작성된 초기환경영향평가서(IEE)는 연구 과제를 대상으로 남극 내륙에서 수행된 국내 최초 사례로, 그 과정에서 확보하고 축적된 자료는 향후 남극 내륙 기반 연구, 극지 환경정책 수립, 국제 연구 협력에 필요한 핵심 선행자료로 활용될 수 있음. 또한, 시추 후보지 주변 빙설 시료는 향후 빙저호 호수물/퇴적물 시료 분석 시 비교 연구를 위한 레퍼런스 자료로 활용될 수 있음
- KPDC 등록 완료한 정밀 탄성과 자료, 환경영향평가 자료 등은 향후 후속 연구 및 국제 협력 연구의 표준자료와 정책 기반자료로 활용

- 본 연구성과는 과학기술정보통신부, 환경부, 외교부, 해수부 등의 국가 전략기술 육성을 위한 국가 간 협력 강화, 미래자원(기술, 인재, 영토) 확보를 위한 극지 탐사기술 고도화 및 인프라 확충 등 극지(해양) 정책과 직접적으로 연계되는 실적자료로 활용
- 연구성과물은 「극지연구소 R&R」의 상위역할 '극지 미답지(과학영토) 개척 및 탐사기술 개발' 주요 역할, 「제1차 극지활동진흥기본계획」의 5대 추진전략(전략1. 남·북극 미지의 영역 탐사 확대), 「제4차 남극연구 활동진흥기본계획」의 '전략 1 추진과제 1-1. 남극 내륙 연구 3대 거점 확보', 「제5차 과학기술 기본계획」의 '전략 3 추진과제 3-7. 우주·해양·극지 개척을 통한 과학영토 확대' 및 「제2차 해양수산과학기술 육성 기본계획」의 '전략 2 추진과제 3. 해양·극지 개척으로 해양과학영토 확대' 정책과 직접 연계되며, 향후 극지 미개척지(D3 지역 등)의 추가 연구 거점화 등 정책 목표 달성의 전략적 확장 기반으로 활용

3. 기타사항

○ 해당 없음.



초안

CASCA PROJECT: CLEAN ACCESS TO SUBGLACIAL LAKE CHEONGSUK IN ANTARCTICA

남극 청석 빙저호 청정 탐사에 대한

초기 환경영향평가서



목차

1. 서론.....	4
2. 연구활동 개요.....	9
3. 현존 환경 기준 상태	17
4. 검토 사항.....	46
5. 환경영향평가 및 저감조치.....	49
6. 환경 모니터링 계획	54
7. 미지의 요소 및 불확실성.....	57
8. 결론.....	59
9. 약어 및 기호 정의.....	60
10. 참조.....	61

그림 목록

그림 1 K-루트 선단 대표 사진	4
그림 2 JBS-D2 캠프간 육상루트(2021/22 시즌)	4
그림 4 청석호 엠블럼(영문)	9
그림 5 청석호 엠블럼(국문)	9
그림 6 LCS 청정 열수 시추 시스템의 개략도	11
그림 7 청정열수시추(CHWD) 현장 배치 개략도	15
그림 8 설상차(CAT MT865)	17
그림 9 설상차(PB300)	17
그림 10 DDINSAR 이상신호가 관측된 데이비드 빙하 지역 내 6 개 빙저호 분포 지도(2015-2017) ...	19
그림 11 2016/17, 2018/19 두 시즌 동안 수행된 항공 IPR 탐사 비행 경로 범위	21
그림 12 SLC 지역 지도	23
그림 13 SLC 지역에서 촬영된 탄성파 탐사 수행 모습(2021 년 12 월)	25
그림 14 빙하 하부 호수 탄성파 탐사의 탐사 경로 및 발사 지점 위치(2021)	25
그림 15 21X 라인 원시 탄성파 데이터(31-40 번 샷 집합)	26
그림 16 21X(원) 21XY(오)에 대한 탄성파 단면	26
그림 17 DDINSAR 데이터 이미지	29
그림 18 청석호(SLC)에 설치된 AWS	31
그림 19 SLC 지역의 공기 온도, 기압, 상대 습도, 풍속 및 풍향(2019-2022)	33
그림 20 지표면 눈 채취의 간단한 개략도	34
그림 21 SLC 지역의 지표면 눈 샘플을 채취한 모습(2021 년 12 월)	35
그림 22 지표면 눈 샘플의 이온 농도	35
그림 23 K-루트의 남극내륙진출루트(2019/20 시즌) 및 천부빙하시추지점	36
그림 24 환경영향평가를 위한 천부빙하코어 시추 모습(핸드오거)	37
그림 25 현장에서 획득한 빙하코어 시료	37
그림 26 청석호(SLC) 천부 빙하코어 시료의 밀도 변화	39
그림 27 SLC 천부 빙하코어 깊이에 따른 물 안정동위원소와 이온성분의 변화	40
그림 28 SLC 천부 빙하코어 깊이에 따른 음이온 분석결과	42
그림 29 SLC 천부 빙하코어의 깊이에 따른 양이온 분석결과	43
그림 30 생활용 캐러밴 모식도	48
그림 31 남극 내륙 횡단을 위한 주요 장비 구성	49

표 목록

표 1. 항공 IPR(HERA 시스템)의 매개변수(LINDZEY ET AL., 2020; PETERS ET AL., 2007).....	22
표 2. 자동기상관측소(AWS) 관측 변수와 높이, 사용된 기기 및 정확도.....	30
표 3. 빙저호 SLC 캠프에서 시추한 천부빙하코어 시료 정보.....	37
표 4. 천부 빙하코어시료 오염제거를 위한 전처리 과정.....	38
표 5. SLC 천부 빙하코어의 이온성분별 농도값(평균값, 중간값, 최소값, 최대값).....	41
표 6. 미지의 요소 및 불확실성.....	58



1. 서론

1.1 배경

2014년 한국은 남극에 두 번째 연구기지인 장보고기지(JBS)를 설립하였으며, 이후 로스해 및 빅토리아랜드 지역을 중심으로 과학 연구 활동을 지속적으로 확대해왔다. 나아가 남극 내륙에서의 연구를 본격화하기 위해 ‘K-루트(K-Route)’라 불리는 내륙 진출 경로를 개척하였다.

이와 동시에 남극의 빙하 두께 및 지형정보를 갱신하기 위한 국제 공동 연구인 Bedmap 프로젝트의 일환으로 KOPRI는 2016/17시즌 동안 데이비드 빙하(David Glacier) 지역에서 헬리콥터를 이용한 빙하 탐사 레이더(IPR, Ice-Penetrating Radar) 조사를 수행하였다. 데이비드 빙하는 장보고기지 남동쪽 내륙에 위치한 남극 최대 규모의 유출 빙하(outlet glacier)로 IPR 탐사 결과와 위성 기반 DDInSAR 자료(표면 고도 변화를 감지하는 기법)를 종합적으로 분석한 결과 약 2km 두께의 얼음 아래에 여러 개의 활성 빙저호가 존재하는 것으로 밝혀졌다.



그림 1 K-루트 선단 대표 사진

그림 2 JBS-D2 캠프간 육상루트(2021/22 시즌)

이 가운데 장보고기지에서 내륙으로 약 267km 떨어진 D2호수(청석호, Lake Cheongsuk)가 시추 대상으로 선정되었다. 이는 안전성, 접근성, 그리고 물자 수송의 용이성 등을 종합적으로 고려하여 결정된 것이다. 이를 뒷받침하기 위해 두 차례의 지상 탄성파 탐사(seismic survey)가 연속적으로 수행되었으며 각각 2019/20 시즌과 2021/22 시즌에 진행되었다. 그 결과, 약 2.3km 두께의 얼음 아래에 수심 50~60m, 면적 10km² 미만의 빙저호가 존재하는 것이 확인되었다.

지구물리 탐사와 병행하여 KOPRI는 트랙터 횡단 물류 체계와 더불어 빙저호 시추를 위한 특수 장비도 개발해왔다. 현재까지 동남극에서는 러시아의 보스토크호(Lake Vostok)를 제외하면 직접적으로 빙저호 시추가 채취된 사례가 없다. 다만 보스토크호에서도 실제 호숫물이 아닌 호수 상부에서 형성된 응결 얼음(accretion ice)만이 회수되었으며, 당시 사용된 등유 기반 시추 유체로 인한 오염 문제는 여전히 해결되지 않은 상태이다.

이에 반해 서남극의 윌란스호(Lake Whillans)와 머서호(Lake Mercer)에서는 청정 열수시추(clean hot water drilling) 기술을 활용한 시추가 성공적으로 수행된 바 있다. 또한, 중국은 프린세스 엘리자베스 랜드(Princess Elisabeth Land)에 위치한 남극 최대 규모의 빙저호 중 하나인 치린호(Lake Qilin)에 대한 시추 계획을 발표한 상태이다.

그러나 동남극 빙상의 서쪽 경계부에 해당하는 빅토리아랜드(Victoria Land) 지역에서는 아직까지 빙저호에 대한 직접적인 시추나 현장탐사가 이루어진 바 없다. 이러한 점에서 본 연구는 해당 지역에서 수행되는 최초의 시추활동으로써 학문적 독창성과 선도적 의의를 지닌다.

1.2. 법적 요건

CASCA 프로젝트는 탐사 활동의 모든 단계에서 환경에 미칠 수 있는 부정적 영향을 최소화하여 남극의 민감한 환경을 보호하기 위해 국제적·국가적 법적 요건을 엄격히 준수한다.

1.2.1 국외 법률·기준·지침

본 연구는 남극 조약 체제(Antarctic Treaty System, ATS, 1959 년 발효)의 원칙을 준수한다. ATS 는 남극 대륙의 평화적 이용과 과학적 연구의 자유를 보장하며, 모든 당사국이 남극 환경을 보호할 의무가 있음을 명시하고 있다. 더불어, 환경 보호를 위한 의정서(Protocol on Environmental Protection to the Antarctic Treaty, 마드리드 의정서, 1991 년 채택, 1998 년 발효)는 남극에서의 모든 활동이 환경에 미치는 영향을 최소화하도록 요구하며, 부속서 I 에 따라 환경영향평가(EIA)를 의무화하고 있다. CASCA 프로젝트는 탐사에 앞서 해당 의정서에 따라 초기 환경영향평가(IEE)를 수행하고, 철저한 환경영향평가를 진행한다.

빙저호와 같은 민감한 환경에서의 연구 활동을 위한 구체적인 지침인 SCAR 의 빙하 아래 수중 환경 탐사 및 연구에 대한 행동 규범(Code of Conduct for the Exploration and Research of Subglacial Aquatic Environments, 2017 년)에 따라 오염 방지, 생태적 영향 최소화, 지속적인 모니터링을 진행할 것이며 또한, 남극 조약 협의회 결의안(ATCM Resolution, ATCM XXXIX, 2016 년)을 준수하여 과학적 탐사가 남극 환경에 미치는 영향을 최소화하고, 환경 보호를 위한 최선의 방안을 도입한다.

1.2.2 국내 법률·기준·지침

대한민국은 남극 조약의 당사국으로서, 남극활동 및 환경보호에 관한 법률(일명 남극활동법, 2004 년 개정·시행)을 통해 남극에서의 모든 활동을 규제하고 있다. 또한, 남극활동법 시행령 폐기물 처리 및 극지활동 계획서, 환경영향평가서를 지침에 따라 준비하고 남극활동 허가를 받아야 한다. 이는 모든 연구 활동이 환경에 미치는 영향을 사전에 평가하고, 환경 보호를 위한

조치를 마련하도록 규정하고 있으며, 빙저호 탐사는 이 법에 따른 환경영향평가 절차를 엄격히 따른다. 또한, 극지활동진흥법(2021 년 제정) 제 14 조 극지환경의 보호 및 안전관리에 따라 남극 탐사 중 발생가능한 오염방지 및 사고예방을 위한 체계를 마련해야할 의무가 있으며, 다음과 같은 남극연구활동과 관련된 환경 법률과 기준 및 지침을 철저히 따른다.

1) 환경 법률

- 남극활동 및 환경보호에 관한 법률 2004 년 3 월 22 일
- 환경영향평가법 1993 년 6 월 11 일
- 환경정책기본법 1990 년 8 월 11 일
- 생물다양성 보전 및 이용에 관한 법률 2012 년 2 월 1 일
- 해양환경 보전 및 활용에 관한 법률 2017 년 3 월 21 일
- 해양환경관리법 2007 년 1 월 19 일
- 토양환경보전법 1995 년 1 월 5 일
- 물환경보전법 1990 년 8 월 1 일 (구 수질환경보전법)
- 대기환경보전법 1990 년 8 월 1 일
- 소음진동 관리법 1990 년 8 월 1 일 (구 소음진동규제법)
- 위험물안전관리법 2003 년 5 월 29 일
- 자원의 절약과 재활용촉진에 관한 법률 1992 년 12 월 8 일
- 환경오염피해 배상책임 및 구제에 관한 법률 2014 년 12 월 31 일
- 화학물질관리법 1990 년 8 월 1 일
- 재난 및 안전관리 기본법 2004 년 3 월 11 일

2) 기준

- 수질오염공정시험 기준(국립환경과학원고시 제 2023-72 호)
- 토양오염공정시험 기준(국립환경과학원고시 제 2022-38 호)
- 대기오염공정시험 기준(국립환경과학원고시 제 2024-34 호)
- 소음·진동공정시험기준(국립환경과학원고시 제 2022-79 호)

- 유해화학물질공정시험기준(국립환경과학원고시 제 2019-30 호)
- 잔류성유기오염물질(국립환경과학원고시 제 2022-37 호)
- 폐기물공정시험기준(국립환경과학원고시 제 2024-42 호)

3) 지침

- 환경영향평가서등 작성 등에 관한 규정(환경부고시 제 2023-72 호)
- 환경영향평가서등에 관한 협의업무 처리규정(환경부예규 제 748 호)
- 환경영향평가 정보지원시스템 운영지침(환경부예규 제 721 호)

본 IEE 는 CASCA 프로젝트 수행 시 남극 환경에 영향을 미칠 수 있는 모든 요소를 종합적으로 고려하였으며, SLC 탐사를 위한 초기 환경영향평가로서 적절하다고 판단된다. 또한, 대한민국 환경부와 해양수산부의 남극 연구 활동 계획의 타당성 검토 및 외교부의 최종 승인을 거쳐 모든 국내외 규제 요건을 충족하고 있음을 공식적으로 보장한다.

1.3. 목적 및 범위

CASCA 프로젝트는 다음의 두 가지 핵심 과학 질문을 중심으로 연구를 수행한다.

1) SLC 의 미생물 생태 및 생지화학적 순환:

- 빙저호의 물과 퇴적물에는 어떤 종류의 미생물이 존재하며, 극한의 환경에서 어떻게 생존하는가?
- 이러한 미생물들은 약 2km 두께의 얼음 아래에서, 에너지와 영양분을 어떻게 확보하여 생태계를 유지하는가?
- 이처럼 외부와 단절된 환경에서는 어떤 생지화학적 순환이 생명체를 지탱하며, 오랜 시간 동안 미생물 군집이 어떻게 적응하고 진화해왔는가?

빙저호 생태계에서의 발견은 지구 생명의 경계를 확장하는 데에 기여할 뿐만 아니라, 유사한 극한 환경이 존재하는 외계 천체에서의 생명 가능성을 탐색하는 데에도 중요한 단서를 제공할 것으로 기대된다. 또한, 미생물 다양성과 진화 과정을 이해하는 데에도 의미있는 학술적 기여를 할 수 있을 것으로 판단된다.

2) (전문가 검토 필요) 동남극빙상(EAIS)의 빙하 역사 및 고환경 변화:

- 동남극의 고기후 퇴적 기록 분석을 통한 과거 환경 변화 재구성
- 데이비드 빙하 지역의 기저 열역학 환경과 빙류 동역학을 조사하여 미래 빙상 변화 양상 예측



2. 연구활동 개요

2.1. 연구 개요 및 목표

CASCA(Clean Access to Subglacial Lake Cheongsuk) 프로젝트는 남극 데이비드 빙하(David Glacier) 아래 위치한 빙저호인 청석호(Subglacial Lake Cheongsuk, SLC)의 환경 및 물리적 특성을 규명하는 것을 목표로 한다. 이를 위해 빙저호의 호숫물 및 퇴적물 시료를 확보하고, 지구물리 탐사를 통해 빙저 환경의 동역학적 특성을 분석하며, 미생물 생태계 및 생지화학적 구성 요소를 연구할 예정이다. 본 연구는 남극 빙상의 안정성 및 장기적인 환경 변화를 이해하는 데 기여하며, 빙저 환경에서의 생명체 존재 가능성과 진화 과정을 밝히는 데 중요한 기초 자료를 제공할 것으로 기대된다.

청석호는 남극 동부에 위치한 데이비드 빙하 하부에 존재하는 반경 20km 크기의 빙저호로, 위도 및 경도 좌표는 남위 75.38873°, 동경 155.40672°이다. 이 지역은 빙하의 빠른 흐름과 호숫물의 존재로 인해 동적 변화가 활발한 지역으로 알려져 있으며, 다양한 지구물리 탐사가 수행된 바 있다. 청석호는 수십만 년 동안 외부 환경과 단절된 채 유지되어 온 특수한 환경으로, 고기후 연구 및 빙저 생태계 연구에 있어 중요한 연구 대상으로 평가된다.

청석호의 '청석(靑石)'은 한국 극지 연구를 선도해 온 김예동 박사의 '호(號)'에서 유래한 것으로, 한국 최초로 SCAR(Scientific Committee on Antarctic Research) 의장을 역임한 그의 공헌을 기리기 위한 의미를 담고 있다.

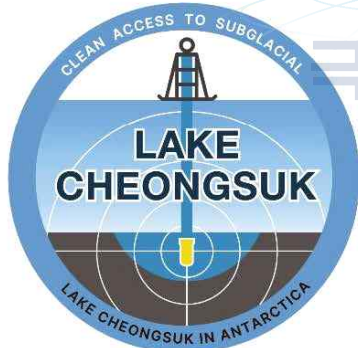


그림 3 청석호 엠블럼(영문)

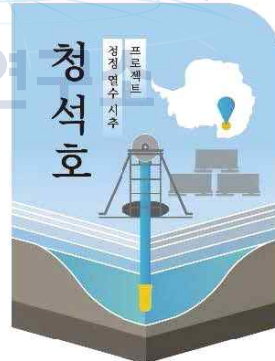


그림 4 청석호 엠블럼(국문)

위 그림은 CASCA 프로젝트의 연구 목표와 시추 과정을 상징적으로 형상화한 공식 엠블럼으로 정정열수시추 방식을 통해 환경오염을 최소화하면서 빙저호의 호숫물 및 퇴적물 시료를 확보하고자 하는 취지를 담아 제작되었으며, 향후 연구 현장과 관련 실무에 활용될 예정이다.

2.2. 청정열수시추 시스템

열수시추는 빙저호에 접근하기 위해 두꺼운 빙하를 뚫기 위한 가장 효과적인 방법 중 하나로 알려져 있다(Talalay, 2020). 열수시추 시스템은 열수를 시추 매체로 사용하므로 유기화합물을 사용했을 때 발생할 수 있는 빙하와 빙저호의 잠재적인 오염을 예방할 수 있으며, 멸균 공정을 통해 더 높은 수준의 청결도를 보장할 수 있다. 남극 빙저호 탐사를 위한 열수시추의 이점은 여러 사례들을 통해 검증되었다.

1975 년 러시아팀은 유기화합물을 사용한 기계적 시추장비를 활용하여 약 3,700m 깊이의 남극내륙 Vostok 빙저호에 도달 후 표층수 채집에 성공하였으나 시료의 오염문제가 지속적으로 제기되고 있다(Alekhina et al., 2017). 2012 년 영국팀은 열수시추 방법을 활용하여 약 3,400m 깊이의 서남극 Ellsworth 빙저호 접근을 시도했지만 실패했다(Siebert et al., 2014). 2018 년 영국팀은 동일한 시추방법으로 약 2,000m 깊이의 서남극 러트포드 빙하 지대(Rutford Ice Stream) 기저면의 퇴적물 시료 채취에 성공했다(Anker et al., 2020). 2013 년 미국팀은 청정열수시추 방법을 활용하여 약 800m 깊이의 Willans 빙저호에 도달하여 호수물과 퇴적물 시료 채집에 성공했다(Tulaczyk et al., 2014). 2019 년 미국팀은 Willans 빙저호 시추방법과 동일한 청정열수시추 방법으로 약 1,086m 깊이의 Mercer 빙저호에 도달하여 호수물과 퇴적물 시료 채집에 성공했다(Priscu et al., 2021).

본 연구 프로그램에서는 David 빙상으로부터 약 2,250m 깊이의 Cheongsuk 빙저호(LCS)까지의 접근을 위한 방법으로 멸균한 열수로 빙하를 녹여 구멍을 뚫는 청정열수시추 방법을 사용한다. 이번 단락에서는 본 프로그램의 과학목표를 달성하기 위한 장비와 방법론에 관한 정보를 상세히 기술한다. 여기에는 시추현장에 투입될 주요 과학 장비의 기술 사양과 도면, 장비의 운영 방법, 샘플 채집 방법, 그리고 실험실 분석 방법이 포함된다. 특히 LCS 의 잠재적인 오염을 가능한 최소화하여 과학탐사를 성공적으로 수행하고 연구지역 환경을 보호하기 위한 청정도 수준을 만족시키기 위해 어떤 살균 방법을 쓰는지 강조한다.

한국팀은 확보가 용이한 산업장비를 활용하여 2,300m 급 시추용량을 가진 열수시추 시스템을 고안하였다. 장비의 주요 활용목적은 LCS 호 위에 있는 두께 약 2,250m 의 빙하를 열수를 사용해 빠르게 관통하는 것이다. 실제 시추 깊이는 최종 시추지점에 따라 달라질 수 있지만 시추 오차는 최대 수 미터 수준으로 예상된다. 이 시스템은 실제 연구현장에 배치된 적은 없지만 제작 완료 후 남극 장보고과학기지 인근에서 필드테스트를 통해 신뢰성을 검증한 뒤 현장에 배치될 예정이다.

이 시추시스템은 남극과 북극 연구를 위한 열수시추시스템을 개발하고 배치하는데 수십년의 경험을 보유하고 있는(Anker et al., 2020, Makinson and Anker, 2014) BAS 와 KOPRI 간 2017 년 체결한 “남극 빙저 시추 협력연구” LOU 를 바탕으로 LCS 전용으로 고안되었다. 전반적인 시스템 디자인은 약 2,650m 깊이의 서남극 CECs 빙저호 시추를 위해 영국남극조사소(BAS)에서 고안한 시스템과

유사하다(Makinson K et al., 2021). 이 시스템은 Ellsworth 호 프로젝트를 위해 고안된 펌핑/수처리 시스템과 BEAMISH 프로젝트의 열수시추 시스템을 통합하고 개선 사항을 반영한 시스템이다. 시추시스템의 전체 구조는 아래 그림과 같다.

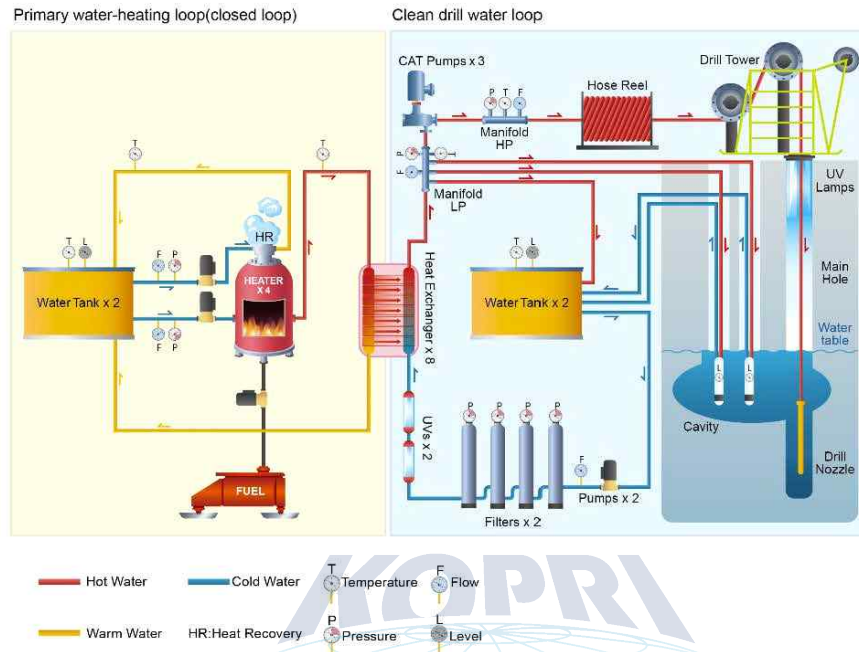


그림 5 LCS 청정 열수 시추 시스템의 개략도

열수시추시스템은 내경 32mm 의 드릴호스를 통해 공급되고 드릴 노즐에서 고압 분사되는 시추수를 기반으로 시추를 수행한다. 항공유(JET A-1)를 연료로 구동하는 보일러를 통해 시추수를 최대 90℃ 수준으로 가열하고, 호스릴&윈치 시스템을 통해 호스와 드릴헤드를 천천히 하강시켜 약 30cm 직경의 수직 시추공을 만들 수 있다. 시추는 중력을 제어 메커니즘으로 활용하므로 시추공의 수직성을 보장하기 위해 호스와 노즐을 천천히 내려야 한다.

1 개의 메인 시추작업 수행을 위한 열수시추공의 구조는 1 개의 메인홀과 2 개의 cavity 홀로 구성된 3 중 구멍 구조를 적용한다. 메인홀은 빙저호까지 접근하기 위한 깊은 시추공을 만드는데 사용되며, cavity 홀은 수중펌프를 설치해 연결 공동(interlinking cavity)으로부터 물을 재활용하는데 사용된다. Cavity 는 공극률이 높은 초기 눈/편충에서 발생할 수 있는 시추수의 손실 방지, 시추작업동안 발생하는 해빙수의 재활용, 시추공 내부 수압-빙저호 정수압 사이의 압력 밸런스 유지를 위해 중요한 요소이다.

Cavity 의 깊이는 빙하 하부의 유압적 특성에 따라 결정되며, 빙저호의 수문학적 수위보다 더 아래쪽에 설계한다. 이를 통해 메인홀 내부의 수압을 빙저호의 정수압보다 낮게 유지하여 빙하가 관통했을 때 시추수가 빙저호로 유입되는 것을 방지한다. LCS 위에 (시추공 용적만큼의) 직경 30 cm, 길이 2,250m 의 얼음 기둥이 떠 있다고 가정하면, 밀도 프로파일을 바탕으로 계산된 호수의 수문학적 수위(hydrological level)는 약 ~m 로 (CECs: 250m, LQL: 340m)로 예상되기 때문에(CECs: Riveria et al., 2015) Cavity 는 이보다 더 아래쪽인 약 ~m 깊이에 형성한다.

시추공정은 초기 3 개의 구멍을 뚫고 연결공동을 만들어 물순환 시스템을 구축하는 것으로 시작한다. Cavity 깊이가 편층(Ellsworth 50m, LQL 60 m)보다 훨씬 깊기 때문에 이 공정에는 (편층 아래) 50-60 m 깊이의 1 차 3 중홀과 pilot cavity 를 만드는 작업이 포함된다. 이 작업을 통해 더 깊은 위치의 cavity 를 만드는 동안 발생할 수 있는 마중물의 손실을 방지하고 시추에 필요한 추가 해빙수를 얻을 수 있다. 이 공정에는 약 15-30 m³ 마중물이 사용될 것으로 예상되며, 이 물은 시추캠프 인근의 깨끗한 설표면의 눈을 모아 녹여 제작된다. 생성된 물은 설상 물탱크(drilling water tanks)에서 빙점보다 몇 도 높은 온도로 유지된다. 1 차 연결 공동을 형성한 후 동일한 작업과정을 통해 최종 목표 깊이에 메인 cavity 를 만든다.

시추공을 통한 계측과 빙저호 호수 청정샘플링 작업을 위해서는 시추 경로의 청정도를 확보하고 시추가 지속되는 동안 이 청정도를 유지해야 한다. 이를 위해 시추에 사용되는 모든 물은 지속적으로 여과 - 멸균 과정을 거친다. 메인홀에서 드릴 노즐을 통해 지속적으로 분사되는 시추수와 빙하가 녹은 물이 섞여 Cavity 에 고인 물은 Cavity 에 배치된 2 개의 수중펌프를 통해 지속적으로 펌핑되어 설상의 물탱크로 회수된다.

회수된 물은 절대 미크론 등급이 각각 20 μ m, 5 μ m, 1 μ m, 0.1 μ m 인 4 단계의 멤브레인 필터 카트리지와 각각 185nm 와 254nm 파장의 UV 를 조사하는 2 개의 UV 램프로 구성되어 있는 멸균컨테이너 모듈을 통과하며 입자상 물질이 99.99% 제거된다. 각 여과 단계에는 독립적인 압력 게이지와 샘플링 포트가 장착되어 있어 시추수 표본을 실시간 또는 주기적으로 수집하고 분석할 수 있으며, 이를 통해 시추수의 청정도를 모니터링 할 수 있다.

멸균컨테이너 모듈 내에는 총 2 세트의 필터 및 UV 장치가 설치되어 있으며, 각 세트에는 독립적인 펌프와 밸브가 장착되어 있어 물의 흐름을 중단하지 않고, 한 세트의 유지보수 작업을 수행할 수 있다. 여과된 물은 열교환기를 통과하며 85-90°C 사이로 가열된 후, 2,700m 길이의 시추호스를 통해 드릴 노즐로 전달되어 메인 시추공으로 재공급되고 메인 시추 작업에 재사용된다. 모든 시추수를 지속적으로 여과하고 UV 처리를 수행하기 위한 물 순환 시스템을 완전히 구축하는데 약 1 일이 소요될 것으로 예상된다.

물순환 시스템은 대부분 스테인리스스틸로 구성되어 있지만, 화염에 직접 노출되는 보일러에서는 내식성이 뛰어난 스테인리스스틸 재료도 부식될 가능성이 있다. 이러한 열생산

플랜트에서 발생할 수 있는 잠재적 오염문제를 극복하기 위해, 물순환 시스템을 가열루프와 시추루프 두 부분으로 나누어 설계하였다. 이를 통해 시추수 순환 경로에서 플랜트 요소를 제거하여 시스템을 단순화하였으며, 두 루프간의 열교환은 열교환기를 통해 간접적으로만 이루어지도록 구성하였다. 이러한 방식은 시추수의 청결 상태를 유지하는데 기여할 뿐 아니라, 고압을 유지해야 하는 전형적인 통합 시스템에 비해 가열 루프의 시스템 압력을 낮출 수 있어 작업 안정성을 향상시킨다.

그림 1의 좌측에 위치한 가열루프는 보일러 2대, 보일러용 순환펌프 2대, 배기열 회수루프용 순환펌프 1대로 구성된 한 세트를 기준으로, 총 2세트로 설계된 폐쇄 시스템이다. 한 쌍의 보일러용 순환펌프를 통해 가열루프용 물탱크에서 펌핑된 15-20°C의 온수는 보일러에서 90-95°C로 가열된 후 열교환기를 통해 시추수로 열을 전달한다. 이후 온도가 다시 15-20°C로 낮아진 온수는 물탱크로 되돌아가 순환을 반복한다. 가열루프의 한 세트가 고장나더라도 여분의 한 세트가 준비되어 있어 시추작업을 중단하지 않고 장치 유지보수가 가능하며, 이를 통해 드릴 성능을 안정적으로 유지할 수 있다.

그림 1의 우측에 위치한 시추루프에서는 2개의 시추수 전용 물탱크에 저장된 깨끗한 물만이 순환한다. 멸균컨테이너 모듈에 설치된 2개의 순환펌프를 통해 물탱크에서 펌핑된 물은 4개의 필터와 2개의 UV램프를 거쳐 소독된 후, 열교환기를 지나 약 90°C로 가열된다. 가열된 시추수 중 일부는 저압 매니폴드를 통해 시추수용 물탱크와 재순환 공동(recirculating Cavity)의 동결 방지를 위해 분배된다. 나머지 대부분의 시추수는 고압펌프를 거쳐 2,700m 길이의 시추호스를 통해 메인홀로 공급되어 얼음을 녹이며 시추작업에 사용된다. 메인홀에서 사용된 시추수는 해빙수와 함께 역류하여 재순환 공동으로 흘러 들어가며, 여기서 수중펌프를 통해 다시 설상의 시추수용 물탱크로 펌핑되어 순환을 지속한다.

시추장비의 세척작업은 국내와 남극에서 모두 진행되며, 멸균 작업의 내구성 확보를 위하여 시추장비 대부분은 스테인리스스틸로 제작된다. 남극으로 운송되기 전, 장비는 무균청정작업장 내에서 기본 세척을 통해 표면의 이물질을 제거하고, 과산화수소 훈증 소독을 통해 표면에 존재할 수 있는 생물체를 제거한 후, 멸균 비닐로 진공 밀봉 포장된다.

남극으로 운반된 장비는 사용 전에 70% 의료용 알코올로 표면을 2차 세척하여 청결도를 유지하며, 이후 메인홀 입구에 설치된 UV wellhead Unit 을 통해 최종 살균된다. UV wellhead Unit 의 UV 조사 강도는 최소 40mJ/cm² 로 설정되며, 이 선량은 대부분의 포자 형성 박테리아를 최소 2-log(99%) 불활성화 하고, 가장 흔히 발견되는 미생물(박테리아, 바이러스, 원생동물)을 4-log(99.99%) 불활성화 할 수 있다. 시추 호스는 장시간 UV 에 노출될 시 손상될 가능성이 있으므로, 시추 호스의 이동 속도에 맞추어 UV 조사 강도를 조절하여 이를 방지한다.

시추호스는 고압열수세척과 에어제트세척 과정을 통해 표면을 깨끗하게 세척한 후 메인홀로 투입된다. 시추작업 중 시추공은 노즐에서 배출된 물을 되돌려 보내는 도관 역할을 하며, 시추공 내부에는 지속적인 상향 흐름을 생성하여 시추장비에 잔여되거나 시추 과정 중에 발생할 수 있는 오염 물질을 cavity 로 운반한다. 이러한 오염물질은 수중펌프에 의해 시추용 물탱크로 펌핑되며, 멸균시스템을 통해 제거된다.

시추수 오염 방지 및 관리를 위해, 시추수의 오염 기준값을 설정하고 이를 지속적으로 모니터링한다. 시추작업이 진행되는 동안, 3-4 시간 간격으로 수중펌프의 출수구와 멸균컨테이너 모듈 필터의 샘플링 포트에서 샘플을 수집하고 미생물 분석을 수행한다. 빙저호에 접근함에 따라 샘플링 및 분석 간격을 1 시간으로 줄이며, 만일 기준값을 초과하는 값이 감지될 경우, 원인을 확인할 때까지 시추 작업을 중단한다.

시추공의 직경을 최소 30cm 크기로 확보하기 위해, 시추공정 동안 열수의 온도, 유량 및 압력을 일정하게 유지해야 한다(90°C, 120L/min, 1200psi). 또한 시추속도를 0.5~1m/min 사이에서 제어되어야 한다. 메인홀이 빙하를 관통하여 빙저호와 연결되면, 드릴을 표면으로 회수하는 과정에서 측정 장비 및 샘플러 투입을 위한 시추공의 직경 유지를 위해 회수과정 동안에도 시추작업은 지속적으로 진행된다.

LCS를 덮고 있는 2,250m의 빙하를 뚫는데 약 75시간이 소요될 것으로 예상되며, 시추 완료 후 드릴 회수 속도를 100m/h 수준으로 조정하여 시추공 직경을 약 45cm 로 확장한다. 이때 시추 드릴을 회수하면서 시추공의 첫 확장을 진행하는 데 약 23 시간이 소요된다. 시추공 직경이 감소하는 속도를 최대 1cm/h (LQL 1cm/h, Ellsworth 0.5cm/h)로 가정하면, 시추공 직경이 30cm 로 좁혀지기까지 약 15 시간의 샘플링 및 계측 시간을 확보될 수 있다. 샘플링을 위해 시추 작업을 중단한 시간 동안, 표면으로 회수된 시추기는 물순환 시스템의 동결 방지를 위해 낮은 압력에서 지속적으로 흐름을 유지한다.

샘플링을 위한 시추 중단시간 동안, 표면으로 회수된 시추기는 물순환 시스템의 동결 방지를 위해 낮은 압력에서 지속적으로 흐름을 유지한다. 시추공 재확장을 위한 시추기 하강 및 상승 작업은 약 300m/h 속도로 수행되며, 이 작업은 약 15 시간이 소요된다. 따라서 시추공 확장 작업은 약 30 시간 간격으로 수행하며(확장 시작 기준 간격), 샘플링 및 계측이 완료될 때까지 이 작업은 정기적으로 계속 진행된다.

시추시스템 가동에 필요한 전력은 100kW 급 디젤 발전기와 분전함이 내장된 발전 컨테이너 모듈 2 기에서 공급된다. 보일러는 항공유(Jet A-1)를 연료로 사용하며, 연료 소비 효율은 약 38L/h 이다. 보일러에는 폐열 회수 시스템을 장착하여 배기온도를 400°C 수준에서 200°C 이하로 낮추고, 유닛당 10-15kW의 에너지를 회수하여 현장 에너지 효율을 향상시킨다.

시추시스템의 제작이 완료되면 남극 장보고기지 인근에서의 장비 통합 및 시험 가동을 통해 시스템의 모든 구성요소가 평균기온 -30℃, 고도 2,000m 수준의 LCS 의 환경에서 안정적으로 작동할 수 있음을 검증한다. 남극내륙의 혹독한 기상조건이 시추공정에 미치는 영향을 완화하고, 현장에서 발생할 수 있는 오염물질의 확산을 최소화하기 위해 컨테이너화 장비 외의 모든 장비는 단열 텐트 내부에 설치된다. 시추캠프 레이아웃은 그림 2 와 같으며, 시추활동으로 인해 발생할 수 있는 환경요소는 다음과 같다.

시추활동으로 인해 발생할 수 있는 환경요소는 다음과 같다.

1. 보일러, 발전기, 펌프, 윈치 등 플랜트 시설 작동으로 인한 소음, 진동, 열
2. 화석연료 연소로 인한 온실 가스 및 입자의 대기 방출
3. 액상 오염물질(작동유, 윤활유, 부동액, 연료 등)의 누출
4. 설표면의 시추장비 가동 및 메인홀 시추에 의한 빙하의 물리적 교란 등

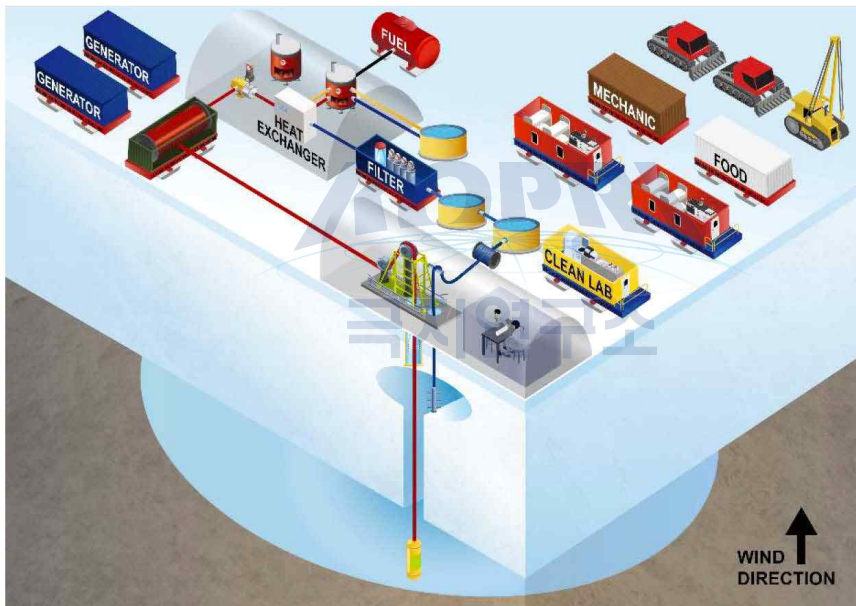


그림 6 청정열수시추(CHWD) 현장 배치 개략도

2.3. 프로젝트 일정 및 내륙 수송 체계

CASCA 프로젝트는 세 단계로 진행된다. 1 단계는 2026 년에 시작되며, 이후 2 단계가 2027-2028 년에 진행된다. 3 단계는 예비 계획으로, 2027/28 시즌 동안 시추가 성공하지 못할 경우 2 단계 절차를 반복 시행한다.

< CASCA 프로젝트 일정 >

- 1 단계 (2026 년 11 월 –2027 년 2 월, 약 30 일 소요 예상)
 - 장보고기지 인근에서 통합 시추 시스템 야외 성능 시험
- 2 단계 (2027 년 11 월 –2028 년 2 월, 약 60 일 소요 예상)
 - D2 지역으로 트랙터 횡단 이동, 청정열수시추, 탄성파 탐사, 야영지 구축
 - 호숫물 및 퇴적물 시료 채취, 시추공 및 호수 환경 측정
 - 시추 시스템 및 캠프 해체, 모든 폐기물 수거 후 장보고기지로 복귀
- 3 단계 (2028 년 11 월 –2029 년 2 월, 필요 시 진행, 약 60 일 소요 예상)
 - 2027/28 시즌의 결과를 바탕으로 시추 시스템 개선
 - (시추가 성공하지 못한 경우) 2 단계 절차 반복

남극 내륙 횡단 및 물자 수송

남극내륙 육상수송에는 두 타입의 설상차를 활용한다. 하나는 호주 William Adams 사에서 생산 개조된 American Caterpillar Challenger MT865(CAT MT865) 트랙터이며, 다른 하나는 독일 Kaessbohrer Gelaendefahrzeug AG 에서 생산한 PistenBully300 (PB300) 설상차이다. 설상차량은 눈썰, 크레인, 캐빈 등의 보조 장비를 탑재하고 있어 인원 및 물자의 수송뿐 아니라 시추 현장에서 캠프의 구축과 정비, 장비의 조립과 배치에도 활용한다. 모든 설상차는 대한민국 극지연구소의 「미답지안전관리지침」과 차량 제조업체에서 제공한 장비운영지침에 따라 대한민국의 「건설기계관리법」에 따라 중장비 건설기계조종사를 취득한 자가 운영 관리한다.



그림 7 설상차(CAT MT865)



그림 8 설상차(PB300)

3. 현존 환경 기준 상태

3.1. 지구물리학적 지형 분석

남극의 대부분의 빙하는 시간이 지남에 따라 점진적으로 해안이나 저지대로 이동한다. 빙하 흐름은 얼음과 암반의 경계면에서 마찰열을 발생시키며, 이는 지열, 압력, 지형 구조, 표면 거칠기의 영향을 받는다. 빙하는 뛰어난 단열 특성을 지니며, 빙하 하부에서 생성된 열은 주로 기저 얼음(basal ice)을 데우는 데 사용된다. 주요 열원으로는 수직 전단에 의한 점성 열 소산, 빙하 바닥의 마찰열, 그리고 지구 내부로부터 방출되는 지열이 있다(van der Veen et al., 2007). 이러한 녹은 물은 빙하-암반 경계면에서 윤활제 역할을 하며 마찰력을 감소시키고, 그 결과 빙하 흐름 속도를 증가시킨다(Bell et al., 2007; Stearns et al., 2008; Winsborrow et al., 2010). 특히, 이러한 빙하 흐름 속도의 증가는 빙하가 바다로 빠르게 이동하게 하여, 빙하 질량 손실과 급격한 해수면 상승을 초래할 수 있다(Golledge et al., 2017; Joughin et al., 2014; Rignot et al., 2014).

빙하 하부의 물은 지형적으로 낮은 수압 구역(지형적 저지대)에 축적되어 암반 지형을 따라 호수가 형성된다(Bell et al., 2011; Wright & Siegert, 2012). 빙하 하부의 물이 이러한 호수로 유입될 경우, 외부 빙하 하부 물의 양은 감소하여 빙하와 암반 사이의 마찰이 증가하고, 결과적으로 빙하 흐름 속도가 감소한다(Diez et al., 2019). 따라서 빙저호의 존재는 빙하 흐름 속도와 질량 손실을 제어하는 중요한 요인으로 작용한다(Golledge et al., 2017; Joughin et al., 2014; Rignot et al., 2014). 또한, 빙저호의 존재를 탐지하고 그 위치와 크기를 추정하는 것은 지열 유속 모델의 정확성을 향상시키고, 기후 변화 모델링의 신뢰도를 높이는 데 중요한 역할을 한다(Gustafson et al., 2022).

빙저호는 안정형 호수(stable lakes)와 활성형 호수(active lakes)로 구분된다. 안정형 호수를 식별하는 주요 방법은 항공 기반의 얼음 관통 레이더(IPR) 조사를 수행하는 것이다. 대표적인 예로는 ICECAP I & II(항공 프로파일링을 통한 국제 극지 탐사 협력; Blankenship et al., 2018; 2023; Young et al., 2011)와 Operation IceBridge의 ATM 장비를 활용한 반복적인 고도계 관측(Fricker et al., 2014; Kurtz et al., 2016)이 있다. 이러한 조사를 통해 빙하-암반 경계면의 고도, 반사 강도, 평탄도를 측정하고 분석할 수 있다(Christianson et al., 2012; Diez et al., 2019; Rivera et al., 2015; Ross & Siegert, 2020; Siegert et al., 2004; Siegert & Kwok, 2000; Siegert & Ridley, 1998).

반면, 활성형 호수는 위성 관측을 통해 빙하 표면 고도의 변화를 모니터링함으로써 그 존재와 활동성을 파악한다. 빙저호의 수위가 상승할 경우, 물의 압력이 증가하면서 빙하 표면 고도가 상승할 가능성이 있다. 반대로 수위가 감소하면 빙하 표면 고도 역시 하강한다. 이러한 변화를 관찰하기 위해 ICESat 1 & 2 및 CryoSat-1 & 2와 같은 위성 데이터가 활용되었다(Fricker et al., 2007; Fricker & Scambos, 2009; Smith et al., 2009).

데이비드 빙하(David Glacier)는 동남극 빙상(East Antarctic Ice Sheet)의 약 4%를 배출하는 유출 빙하(outlet glacier)로 알려져 있다(Rignot, 2002). 빙하의 최하류 지역으로부터 약 210km 떨어진 곳에는 마리오 주첼리 기지(Mario Zucchelli Station; 이탈리아, 반기지)와 장보고 기지(Jang Bogo Station; 한국, 상주 기지)가 위치해 있다(그림 1 참조).

데이비드 빙하 지역에서는 여섯 개의 활성 빙저호(subglacial lakes)가 확인되었으나(Smith et al., 2009), 최근 연구(Lindzey et al., 2020)에서는 상대적인 기저 반사 계수(basal reflection coefficient)를 기반으로 하여 D1(SLD1)과 D2(Subglacial Lake Cheongsuk, 이하 SLC)를 "확정된" 호수로 분류하지 않았다. 이 두 지점은 낮은 수압(head)과 높은 기저 반사 계수를 나타내지만, 빙하 하부 호수의 존재를 결정적으로 입증하지는 않는다. SLC 지역에서는 광범위한 빙하 하부 호수에서 일반적으로 나타나는 등방성 거울 반사(isotropically specular reflection) 대신, 비등방성 거울 반사(anisotropically specular reflection)가 관찰되었으며, 반사 강도(specularity)는 흐름 방향을 따라 높게 나타났다.

ICESat 레이저 고도계 데이터(2003–2009; Smith et al., 2009; Wright & Siegert, 2012)에 따르면, SLC 지역에서 호수의 물이 배출되고 있는 것으로 관측되었으나, CryoSat-2 데이터(2010–2016; Siegfried & Fricker, 2018)는 표면 고도의 변화가 미미하고 호수 전체에서 위상 차이가 없음을 보여주며, 해당 지형이 실제 호수 지형이 아닐 가능성을 시사한다(그림 1). 그러나 Lindzey et al. (2020)의 데이터에 따르면, SLD1, SLC, 그리고 빙하 하부 수로(subglacial water channels) 아래 습윤 암반(wet bedrock)의 반사 계수는 건조 암반(dry bedrock)보다 15dB 더 높으며, 반사 강도는 0.2를 초과한다. 또한, ICESat-2 데이터(2019–2022)에서 SLC 지역에서 표면 고도의 유의미한 증가가 관찰되었고, DDInSAR(double-differential interferometric synthetic aperture radar) 데이터(2017–2022)를 통해 뚜렷한 위상 차이가 확인되었다.

그럼에도 불구하고, 비행 경로 간격이 넓기 때문에 레이더 및 ICESat 데이터를 포함한 일부 1 차원(선형) 데이터만으로 SLC 와 같은 작은 호수를 해석하는 데는 한계가 있다. 따라서 좁은 비행 경로 조사를 활용한 포괄적인 분석과 DDInSAR 기술을 통한 2 차원(면적) 데이터가 필요하다.

이에 본 연구에서는 ICESat 레이저 고도계(2003–2009; Smith et al., 2009; Wright & Siegert, 2012)와 2016/17 남극 여름 시즌에 수행된 IPR 탐사(Lindzey et al., 2020)에서 이전에 식별된 활성 SLC 의 지구물리학적 특성을 더 자세히 이해하고자 하였다. 한국 극지연구소(KOPRI)와 텍사스 대학 지구물리 연구소(UTIG)는 2018/19 남극 여름 시즌 동안 항공 IPR 탐사를 통해 SLC 의 정확한 윤곽, 크기 및 얼음 두께를 조사하였다. 또한, KOPRI 지구물리 팀은 2019/20 및 2021/22 남극 여름 시즌 동안 탄성파 탐사를 수행하여 SLC 지역의 얼음 두께, 빙저하의 수심, 그리고 지반 및 퇴적물 특성과 같은 상세한 빙하 하부 구조에 관한 지구물리 정보를 획득하였다.

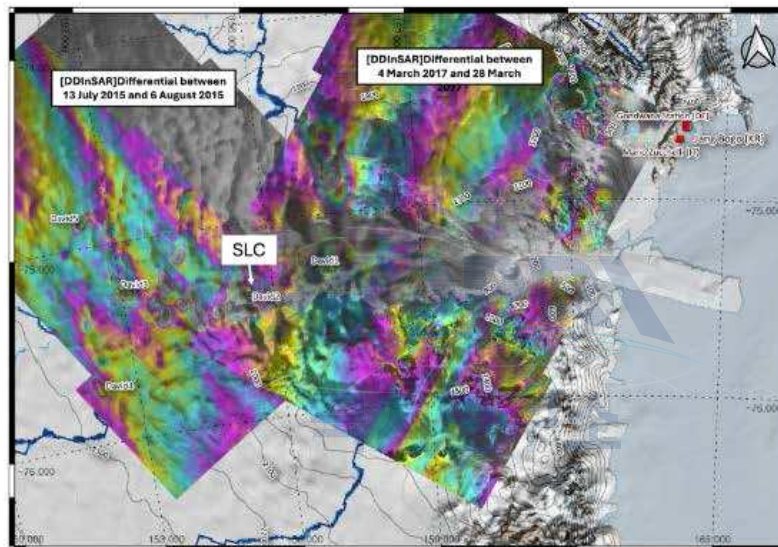


그림 9 DDInSAR 이상신호가 관측된 데이비드 빙하 지역 내 6 개 빙저하 분포 지도(2015-2017)

3.1.1. 데이비드 빙하와 청석호(SLC)

데이비드 빙하(David Glacier)는 남극 빅토리아랜드에서 가장 빠르게 흐르는 빙하 중 하나로, 그 면적은 213,500km²에 달한다. Dome C와 Talos Dome에서 발원하여 로스해(Ross Sea)로 흘러가며, 큰 Drygalski 빙설 혀(Drygalski Glacier Tongue)를 형성한다(Rignot et al., 2019). 이 빙하는 가파른 출구와 grounding zone을 지나면서 급격히 가속되며, Drygalski 시작점에서 끝점까지 흐름 속도가 연간 263m에서 714m로 증가한다(Frezzotti et al., 1998, 2000)(그림 2a). 1979년부터 2008년까지 데이비드 빙하의 평균 표면 질량 균형은 연간 7.5 ± 0.4 Gt로 나타났으며, 평균 빙하 방출량은 1979-1989년에는 연간 9.5 Gt, 1989-2000년에는 연간 10.2 Gt, 1999-2010년에는 연간 9.7 Gt, 2009-2017년에는 연간 9.2 ± 0.4 Gt로 추정되었다(Rignot et al., 2019). 이는 데이비드 빙하가 평균적으로 10년마다 표면 질량을 잃고 있으며, 이로 인해 해수면 상승이 발생하고 있음을 시사한다.

위성 관측을 통해 데이비드 빙하 지역에서 여섯 개의 활성 빙하 하부 호수(D1-D6)가 발견되었다(Smith et al., 2009; Wright & Siegert, 2012). 빙하 하부 호수 D1은 가장 하류에 위치하고 있으며, SLC와 D3-D5는 흐름의 중앙에, D6는 상류에 위치한다. SLC와 D3-D5는 채널 네트워크를 통해 D1을 거쳐 로스해로 물을 방출한다(Brocq et al., 2013)(그림 2b).

BEDMAP2 프로젝트(Fretwell et al., 2013)에 포함된 지구물리 데이터는 데이비드 빙하 지역 전반에서 IPR 데이터 커버리지에 상당한 공백이 있음을 보여준다. 따라서 이 지역의 빙하 하부 수문 환경이 빙하 흐름에 미치는 영향을 더 잘 이해하기 위해 추가적인 탐사가 필요하다(그림 2).

2016-2017년 남극 여름 시즌 동안, 항공 IPR 탐사가 데이비드 빙하(DVG) 지역의 21,562km²에 걸쳐 수행되었으며, 여기에는 SLD1과 SLC(D2; Lindzey et al., 2020)가 포함되었다. 항공 IPR 데이터와 DDIInSAR 데이터는 빙하-암반 경계에서 높은 반사 강도, 낮은 지반 고도, 명확한 표면 고도 변화를 보이는 잠재적 빙하 하부 호수 후보지를 식별하기 위해 분석되었다.

SLD1과 SLC 중에서 SLD1(남위 75.27028°, 동경 157.25722°)은 가장 크고 장보고 기지(JBS)에서 가장 가까운 위치에 있다(그림 1). 그러나 SLD1 인근 빙하 표면에는 여러 크레바스(빙하 틈)가 있어 육로 접근이 어렵다. 장보고 기지에서 두 번째로 가까운 빙하 하부 호수는 SLC(남위 75.38873°, 동경 155.40672°)로, 남서쪽으로 267km 더 떨어져 있다. 이에 따라 한국 극지연구소(KOPRI)는 2017년부터 2021년까지 장보고 기지에서 SLC로 이어지는 육상 물류 경로를 확보하였다. 이 경로는 향후 장기적인 탐사를 지원할 수 있는 모바일 네트워크 시설과 연구 자재 및 장비의 운송을 가능하게 했다. 따라서 SLC는 차량 접근이 가능하여 지구물리 조사, 샘플 채취, 청정 얼음 시추 등 다양한 연구를 수행하기에 가장 적합하다.

SLC는 직경이 10km 이하인 비교적 작은 호수로, IPR 탐사를 짧은 시간 내에 수행할 수 있다. SLC의 평균 표면 고도는 약 1,875m이며, 얼음 두께는 약 2km이다(Fretwell et al., 2013; Morlighem

et al., 2020). 또한, SLC 의 범위를 확인하기 위해 위성 관측을 통한 빙하 표면 고도 변화를 참조하였다(Smith et al., 2009; 2021; Wright & Siegert, 2012)(그림 2 의 빨간색 다각형 참조).

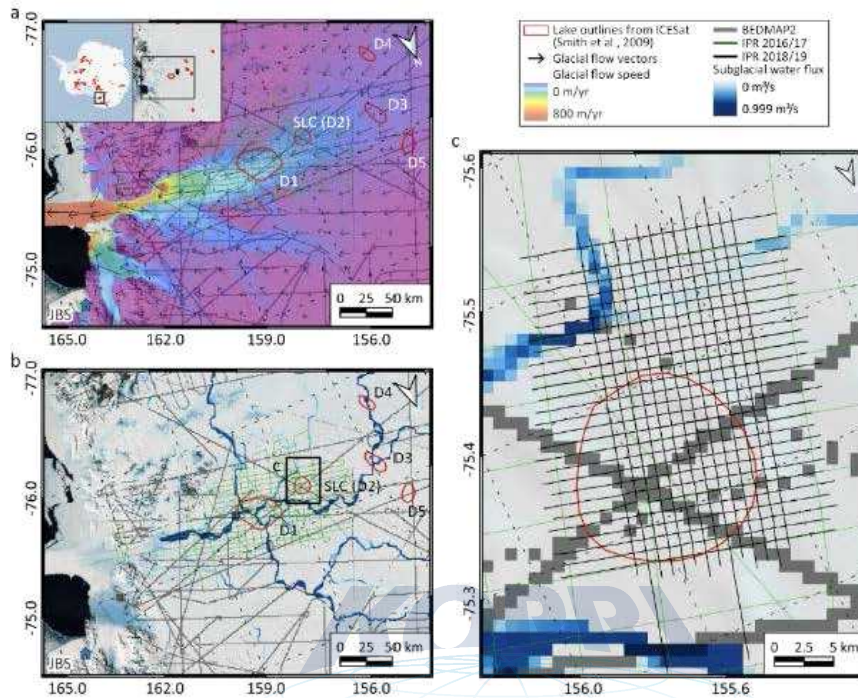


그림 10 2016/17, 2018/19 두 시즌 동안 수행된 항공 IPR 탐사 비행 경로 범위

3.1.2. 항공 IPR 탐사

2018/19 남극 여름 시즌 동안 SLC(남위 75.38873°, 동경 155.40672°, 반경: 20km)에 대한 집중적인 항공 탐사가 수행되었다. 이 탐사는 총 1,111km 의 데이터 수집 거리를 포함하며, 그리드 간격은 1x1km 로 설정되었다(그림 2c). 헬리콥터의 비행 고도는 지면으로부터 430–780m 였으며, 평균 600m 로 유지되었다. 우리는 SLC 지역을 종합적으로 분석하기 위해 Sentinel-1 DInSAR(2017–2022), ICESat-2(2019–2022), KOMPSAT-5 SAR(2021, 2023) 데이터를 통합하였다.

이 조사는 헬리콥터에 두 개의 안테나 붐이 장착된 UTIG Helicopter Radar(HERA)(Lindzey et al., 2020; Peters et al., 2007) 시스템을 사용하였다(표 1 참조). 헬리콥터를 이용한 IPR 탐사는 육로로 접근하기 어려운 지역을 신속히 조사할 수 있으며, 넓은 공간적 범위를 제공한다. 안테나는

60MHz 의 중심 주파수를 사용하였다. 항공기의 지면 상공 높이는 Renishaw ILM-1200-HR 레이저 거리 측정기를 통해 1kHz 로 측정되었다. 기존 문헌에서는 데이터 수집 시스템에 대한 상세한 설명을 제공하고 있다(Cui et al., 2018; Lindzey et al., 2020; Peters et al., 2007).

그림 3 에 나타난 것처럼, 표면 고도(Z_s)는 1,820m 에서 1,940m 사이의 완만한 경사를 형성하며, 고도는 해안 방향으로 점차 낮아진다. 반면, 지반 고도(Z_{bed})(그림 3b)는 -510m 에서 350m 에 이르는 큰 변화를 나타내며, 이는 호수 형성을 촉진하는 여러 골짜기 지형을 포함하고 있다.

표 1. 항공 IPR(HERA 시스템)의 매개변수(Lindzey et al., 2020; Peters et al., 2007).

IPR	설정 조건	
제어 시스템	최대 출력	8 kW
	송수신기	
송수신기	펄스 반복 주파수(PRF)	6,250 Hz
	샘플링 시간창(윈도우)	64 μ s
	샘플링 속도	50 MHz
	트레이스 길이	3,200 samples
	신호 변환기 해상도	14 bits
	내장 신호 적층	32 times
안테나	중심주파수	60 MHz
	대역폭	15 MHz
	처프 신호 대역폭	52.5 to 67.5 MHz
	구성	2x End-Fed Dipole
	이득 - 나디르	5.8 dBi, one-way

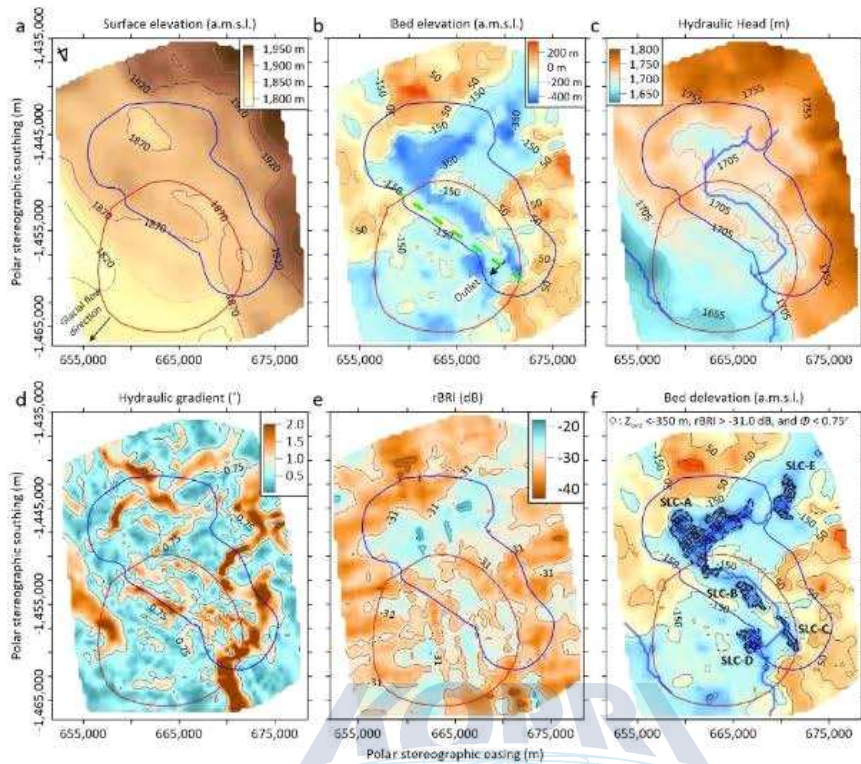


그림 11 SLC 지역 지도

이 지도는 2018 년 11 월에 수집된 항공 IPR 데이터를 바탕으로 계산되었다.

좌표는 EPSG 3031, WGS84/남극 극지 스테레오그래픽 좌표계를 사용하였고, 파란색 다각형은 DDIrSAR 변위 패턴을 나타내며, 빨간색 다각형은 ICESat에서 관측된 SLC 영역을 나타낸다(Smith et al., 2009). (a) 표면고도지도: 표면고도는 25m 간격의 등고선으로 구성되어 있다. (b) 지반고도지도: 지반고도는 200m 간격의 등고선으로 구성되어 있다. (c) 수압(head, H)지도: 두꺼운 파란색 선은 낮은 수압구역을 연결하는 모델링된 유역 네트워크 라인을 나타낸다. 배경은 H 에 대한 50m 간격의 등고선으로 구성되어 있으며, 간격은 8dB 이다. (d) 수압구배(Φ): 배경은 Φ 의 0.73°등고선으로 구성되어 있으며, 간격은 8dB 이다. (e) 상대적인 지반반사강도(rBRI): 등고선 간격은 8dB 이다. (f) 지반 고도지도: <는 고도가 -350m 이하이고, rBRI 가 -31.0dB 이상이며, Φ 가 0.73° 이하인 지역을 나타낸다. 배경은 지반 고도의 25m 간격 등고선으로 구성되어 있다.

3.1.3. 탄성파 탐사

고해상도 탄성파 반사 데이터는 빙하 하부 구조를 규명하는 데 있어 높은 가치를 가지며, 이는 여러 연구를 통해 입증되었다(Brisbourne et al., 2023; Horgan et al., 2012, 2013; Woodward et al., 2010). 탄성파 데이터는 수십 미터에서 수 킬로미터에 이르는 범위에서 빙하와 암반의 구조를 영상화 할 수 있으며, 물이 포화된 퇴적층이나 암반이 존재하는 지역을 식별할 수 있다(Peters et al., 2007). 또한, 암반의 물리적 특성과 빙하 하부의 지구물리적 특성을 파악할 수 있다. 특히, 탄성파 탐사는 빙저호의 깊이와 호수 바닥 퇴적물의 특성을 정량적으로 평가할 수 있다(Woodward et al., 2010).

우리는 최적의 시추 지점을 선정하기 위해 2019/20 및 2021/22 남극 여름 시즌 동안 두 차례의 탄성파 탐사를 수행하였다. 첫 번째 탐사는 2019 년 11 월에 단일 중첩(single-fold) 탄성파 탐사로 진행되었다. 그러나 주변 크레바스에서 반사된 잡음과 데이터 중첩 부족으로 인해 호수 바닥의 반사면을 확인하지 못했다. 2021 년 12 월에는 세부적인 8 배 중첩(eight-fold) 탄성파 탐사가 수행되었다. 인공 탄성파 소스로 PETN 이 사용되었으며, 에너지 전달 효율을 극대화하기 위해 수압 드릴링(hydrothermal drilling)을 통해 약 25-30m 깊이에 1,600g 의 PETN(400g 카트리지 4 개)을 설치하여 총 144 개의 소스 포인트(보어홀)를 생성하였다. 호수 지역은 암반 고도(-350m 이하), 수압 구배(0.75°), 그리고 반사 강도(-31dB)를 기준으로 정의되었다. 이러한 결과를 통해 호수 깊이를 규명하기 위해 추가적인 탄성파 탐사가 필요한 지역이 도출되었다(그림 4).

이 경우 탄성파 탐사가 환경에 미칠 수 있는 잠재적 영향은 아래와 같으며, 참고로 반경 150km 이내에서 생물의 서식이 관찰되지 않았고, 장비에 사용된 배터리는 누출 방지형으로 설계되어 있어 배터리 산의 유출 가능성은 없는 것으로 판단된다.

- 얼음 표면 근처에서 폭발이 발생할 경우, 가청 소음의 형태로 에너지 방출 가능
- 폭발로 인한 열 에너지의 방출 가능
- 보어홀 벽의 구조적 균열 발생 가능
- 얼음 내 약 25m 깊이에 위치한 폭발 현장에서 잔여 물질이 발생 가능

그림 5 에서는 2021 년 여름 시즌 동안 빙하 하부 호수에 대해 수행된 탄성파 탐사의 위치를 보여준다. 모든 발사 지점이 지도에 표시되어 있으며, 탄성파 탐사 라인의 실제 탐사 경로를 확인할 수 있다. 그림 6 은 21X 탐사 라인에서 30 번째부터 40 번째 발사까지의 원시 데이터 이미지로 데이터 셋 집합에서, 각 발사에서 왕복 시간 1.2 초 근처에 극성 반전 반사가 관찰되었는데, 이는 얼음-물 경계면을 의미한다. 왕복 시간 1.3 초 근처에서는 또 다른 주요 반사가 관찰되었으며, 이는 물 기저(water basement)로 인해 발생한 반사로 해석할 수 있다.

그림 7에서는 21X와 21YY 탐사 라인의 탄성파 단면을 제시하며, 이를 통해 얼음-물 경계면과 호수 바닥을 보다 자세히 조사할 수 있다. 탄성파 데이터 분석 결과, 약 2.3km 두께의 빙하 아래에 깊이가 약 50~70미터이고 퇴적물이 포함된 빙하 하부 호수가 존재함을 확인하였다.



그림 12 SLC 지역에서 촬영된 탄성파 탐사 수행 모습(2021년 12월)

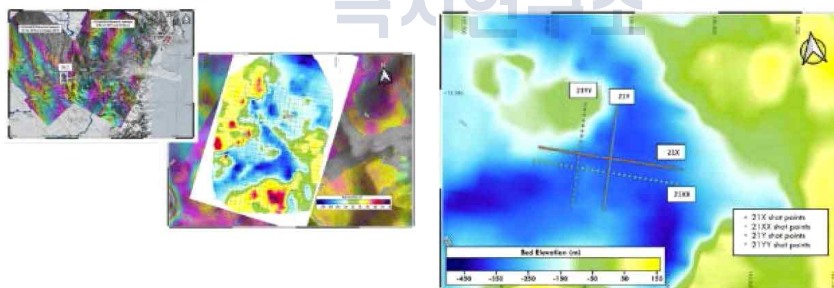


그림 13 빙하 하부 호수 탄성파 탐사의 탐사 경로 및 발사 지점 위치(2021)

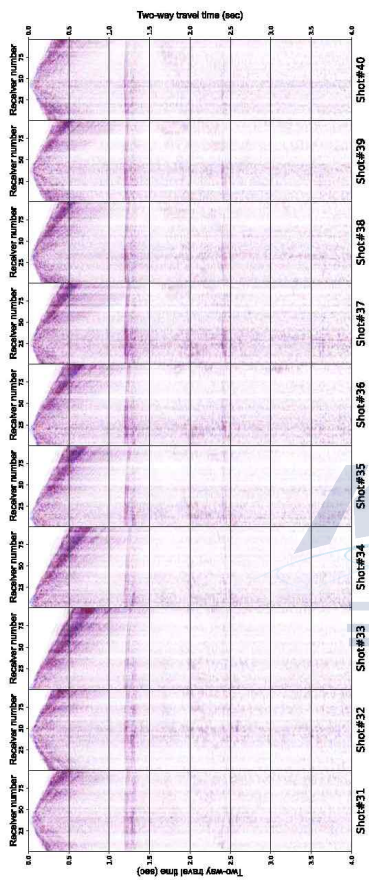


그림 14 21X 라인 원시 탄성과 데이터(31~40 번 샷 집합)

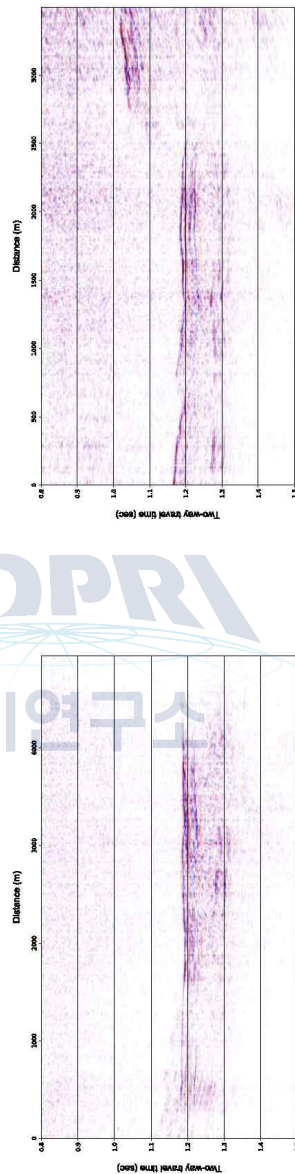


그림 15 21X(원) 21XY(오)에 대한 탄성과 단면

3.1.4. ICESat-2 와 DDInSAR

간섭 합성 개구 레이더(InSAR)는 동일 지역에서 다른 시간에 획득한 두 개 이상의 SAR 이미지를 이용해 간섭 위상을 계산함으로써 표면 높이와 변위를 측정하는 기술이다. InSAR 신호에는 지형 위상, 표면 변위, 대기 및 궤도 위상 왜곡이 포함된다. 대기와 궤도 위상 잡음이 무시할 수 있을 만큼 작다고 가정할 경우, 차분 기법을 이용해 InSAR 신호에서 지형 위상을 제거하고 표면 변위를 밀리미터 수준의 정밀도로 계산할 수 있다. 또한, 빙상의 흐름 속도가 일정하다고 가정하면, 이중 차분 기법을 통해 이에 따른 변위를 설명할 수 있다(Han & Lee, 2014; E. Rignot et al., 2014; Seo et al., 2019). 그러나 빙하 흐름 속도가 일정하지 않을 경우, 비일관성(incoherence)이 나타날 수 있다. 이는 주로 표면 고도 변화보다는 흐름 속도 변화로 인한 무작위나 매우 빠른 변화를 의미한다.

본 IEE에서는 유럽우주국(ESA)이 운영하는 Sentinel-1 C-밴드 SAR(중심 주파수 5.405GHz)을 사용하여 SLC를 관측한 두 쌍의 InSAR 데이터를 구성하고, DDInSAR 분석을 수행하였다. 첫 번째 데이터 쌍은 2017년 2월 8일과 3월 16일에 획득되었으며, 두 번째 데이터 쌍은 2022년 1월 13일과 2월 18일에 획득되었다. 두 데이터 모두 Sentinel-1의 하강 궤도에서 획득되었으며, 36일의 시간 간격으로 DInSAR 이미지를 생성하였다. 모든 SAR 이미지는 Interferometric Wide(I.W.) swath 모드로 촬영되었으며, 250km의 폭과 V.V., V.H. 편광 및 명목상 20m의 공간 해상도를 제공한다.

대부분의 경우 DDInSAR 위상은 SLC 지역과 일부 특정 지역을 제외하고 거의 일정하게 유지되었다. 그러나 비일관성(그림 8a, 검은색 화살표)은 빙하의 속도가 비정상적으로 증가하거나 빙하의 수직 변위가 급격히 발생할 때 나타났다. SLC 지역에서는 DDInSAR 간섭 패턴이 닫힌 형태로 나타났으며, 이는 두 DInSAR 관측 기간 동안 빙하 하부 호수의 활동성 차이에 의해 표면 고도 변화가 발생했을 가능성을 시사한다. DDInSAR 이미지에서 관찰된 간섭 패턴이 빙하 하부 호수의 수위 변화를 차이에 의해 발생했는지 조사하기 위해, 2019년 4월부터 2022년 7월까지 ICESat-2 레이저 고도계로 기록된 SLC 횡단 궤적의 시계열 표면 고도를 분석하였다. 분석 결과, 표면 고도는 2019년 4월부터 2021년 10월까지 지속적으로 상승하였으며, 그 이후로는 일정하게 유지되거나 일부 지역에서는 감소하는 경향을 보였다.

2017년과 2022년의 차이를 나타내는 DDInSAR 이미지는 두 DInSAR 관측 기간 동안의 수직 변위 변화를 보여준다. 대부분의 경우 DDInSAR 위상은 일정했으나, SLC 지역(그림 8a, 파란색 다각형)과 일부 지역에서는 비일관성이 나타났다. SLC를 통과하는 빙하 표면에는 여러 크레바스가 존재하며(그림 8b, 검은색 화살표), 2017년부터 2022년까지 빙상의 흐름 속도가 거의 일정했음을 확인하였다. 또한, DDInSAR 분석 결과 빙하 흐름으로 인한 변위가 효과적으로 제거되었음을 알 수 있다. 빙하 흐름 속도가 일정할 경우, 다른 변위 요소가 없는 한 DDInSAR 이미지에서는 모든 패턴이 사라지게 된다(Han & Lee, 2014; Rignot et al., 2011; Seo et al., 2019).

그러나, 간섭 패턴을 포함한 비일정한 DDInSAR 위상은 2017 년에서 2022 년 사이 SLC 의 수위 변화율이 변동했음을 나타낸다(일정한 위상은 일정한 표면 고도 변화를 의미한다). SLC 상부 지역에서는 하나 이상의 원형 닫힌 간섭 패턴이 관찰되었으나(그림 8a, 흰색 화살표), 2018/19 IPR 탐사 범위를 초과한 호수 지역은 데이터 부족으로 포함되지 않았다. SLC 지역에서 DDInSAR 간섭 패턴이 닫힌 형태로 나타났으며, 이는 두 DInSAR 관측 기간 동안 빙하 하부 호수의 활동성 차이에 의해 표면 고도 변화가 발생했을 가능성을 나타낸다(그림 8c).

DDInSAR 이미지에서 관찰된 간섭 패턴이 빙하 하부 호수의 수위 변화를 차이에 의해 발생했는지 확인하기 위해, 2019 년 4 월부터 2022 년 7 월까지 ICESat-2 레이저 고도계로 기록된 SLC 횡단 궤적의 시계열 표면 고도를 분석하였다(그림 8c). ICESat-2 데이터 중 2019 년 7 월 데이터는 큰 오차로 인해 제외되었다. 그림 8a 의 A-A' 프로파일을 따라 측정된 표면 고도는 변형 영역에서 시간이 지남에 따라 상승하였으며(최대 3.69m), 이는 DDInSAR 이미지에서 관찰된 변형 영역에 포함된다(그림 8c). 우리 연구에서 추정된 SLC-A, B 지역으로 추정된 영역이 ICESat-2 조사선과 겹치는 구간에서 큰 고도 증가가 관찰되었다(그림 8c, 파란색 상자).



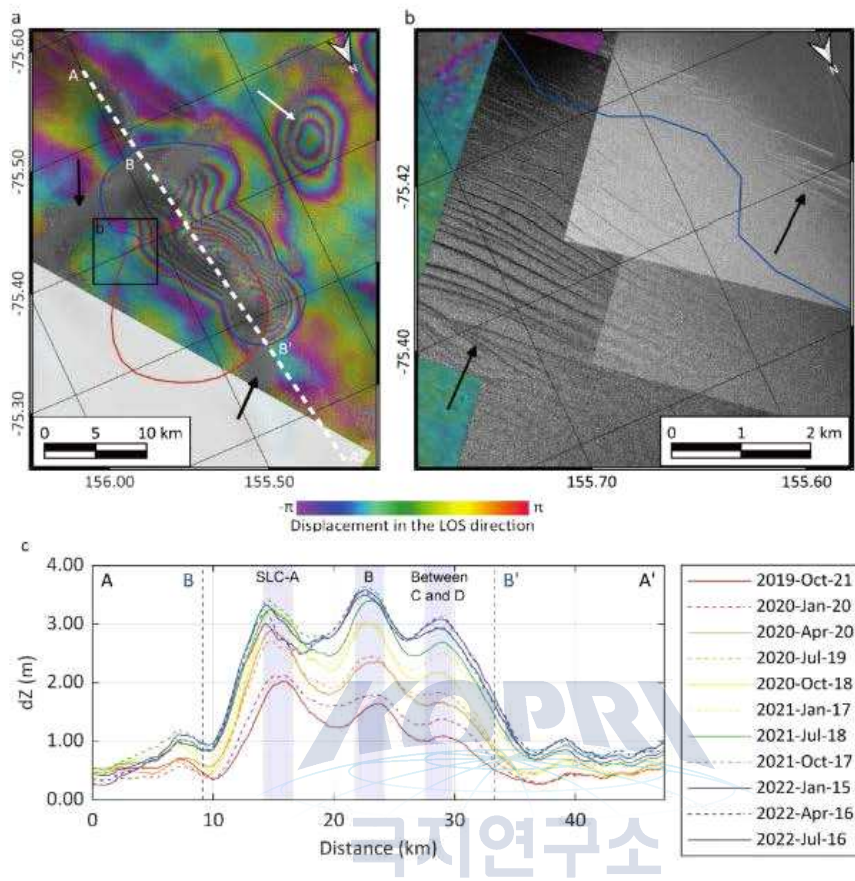


그림 16 DDInSAR 데이터 이미지

(a) 2017 년 2 월-3 월 및 2022 년 1 월-2 월에 획득된 Sentinel-1 SAR 간의 이차 편차를 고려하여 생성된 DDInSAR 간섭도. 파란색 다각형은 정석 빙저호(SLC)의 고도 변화 간섭 패턴을 나타내며, 빨간색 다각형은 ICESat 고도계 관측(Smith et al., 2009)을 기반으로 한 SLC 지역을 나타낸다. 검은색 점선 화살표는 비밀관성을 나타낸다. A-A'는 ICESat-2 위성 관측선(흰색 점선)이고, B-B'는 DDInSAR 파란색 다각형이다.

(b) 2021 년 1 월-2 월 및 2023 년 8 월-9 월에 KOMPSAT-5 위성에서 획득한 SAR 이미지. 크레바스는 이미지 하단으로 이어지는 불규칙한 선형 현상으로 표시되며(검은색 화살표는 크레바스에 의해 발생한 선형 현상을 나타냄), 좌표는 EPSG 4306, WGS84(dd,d) 형식으로 표시된다.

(c) 2019 년 4 월부터 2022 년 7 월까지 ICESat-2 위성을 통해 관측된 빙하 표면 고도 데이터(Smith et al., 2021). X 축은 2019 년 4 월 데이터를 기준으로 하며, 파란색 상자는 호수 경계와 겹치는 지역을 나타낸다.

3.2. 호수의 물리적 및 환경적 특성

IPR, 탄성파 탐사, 위성 데이터를 종합적으로 분석한 결과, SLC 의 평균 빙하 표면 고도는 약 1,875m 로 나타났다. SLC 는 면적 31km², 직경 10km 미만, 깊이 50~80m, 얼음 두께는 약 2,250m 로 추정된다. 또한, 곡선 형태의 호수 구조로 인해 퇴적물이 존재할 가능성이 높은 것으로 보인다. 호수 수심은 2022 년 10 월 최고 수위에 도달한 이후 현재까지 그 수준을 유지하고 있다.

3.3. 기후

3.3.1. 자동 기상 관측소(AWS)

2019 년 11 월 24 일 02:00(UTC), SLC 중심부에 자동 기상 관측소(AWS)가 설치되었다. 2019 년 11 월부터 2022 년 4 월까지 AWS 에서 수집된 데이터는 시추 후보 지역의 전반적인 기상 조건을 파악하는 데 참고자료로 활용된다. AWS 의 시간별 데이터는 1 시간 간격으로 원격 수집되며, 이리돔 위성을 통해 실시간으로 전송된다. 전송된 데이터는 한국 극지 데이터 센터(KPDC)에 실시간으로 저장된다. 센서는 지면에서 약 4m 높이에서 온도(T), 상대 습도(R.H.), 기압(P), 풍속(W.S.), 풍향(W.D.)을 측정한다.

온도 및 상대 습도는 Vaisala HMP155 저항 프로브를 사용하여 측정되며, 기압은 Vaisala PTB110 센서를 통해 측정된다. 풍속과 풍향은 R.M.YOUNG 05108-45 센서를 사용하여 측정된다. 센서 구성에 대한 자세한 정보는 테이블 2 에서 확인할 수 있다. 모든 센서는 AWS 설치 전 한국기상청에서 보정 및 인증을 받았으나, -40°C 이하의 극한 기상 조건에서는 측정 오류가 발생할 가능성이 있다.

표 2. 자동기상관측소(AWS) 관측 변수와 높이, 사용된 기기 및 정확도

관측변수	사용된 기기	정확도	높이
T	Vaisala HMP155	$\pm(0.226 - 0.0028 \times \text{reading})^{\circ}\text{C}$ (at -80° to +20°C)	4 m
R.H.		$\pm(1.2 + 0.012 \times \text{reading}) \% \text{RH}$ (at -40° to -20°C)	

P	Vaisala PTB110	0.3 hPa	4 m
W.S.	R.M. YOUNG 05108-45	0.3m/s	4 m
W.D.		$\pm 3^{\circ}$	
Transmission	Iridium 9602	18 byte/hr (Trans.)	4 m



그림 17 청석호(SLC)에 설치된 AWS

3.3.2. 공기 온도 및 상대 습도

SLC 지역의 기온은 -11°C 에서 -56°C 사이이며, 평균 기온은 -31°C 이다. 최고 기온은 일반적으로 현지 태양시간 기준 13:00 에서 16:00(UTC 00:00-03:00) 사이에 발생하며, 최저 기온은 02:00 에서 05:00(UTC 14:00-17:00) 사이에 발생하였다. 관측 기간을 고려한 2019 년부터 2022 년까지의 연평균 기온 추이는 아래 그림에 제시되었다. 상대 습도는 46%에서 90% 사이로, 장기적인 계절 변화와 단기적인 기상 변동을 보인다. 남극 여름(12 월-2 월)동안 상대 습도는 남극 겨울과 봄(4 월-10 월)에 비해 더 높은 경향을 보인다.

3.3.3. 기압

기압계 고장으로 인해 2022 년 1 월 9 일까지는 데이터가 기록되지 않았다. 기압계를 교체한 후, 2022 년 1 월 10 일부터 4 월 12 일까지 측정된 기압 범위는 751.0hPa 에서 787.0hPa 사이였으며, 평균 기압은 763.6hPa 로 기록되었다.

3.3.4. 풍속 및 풍향

풍속은 최대 30.3m/s 에 이르렀으며, 평균 풍속은 12.3m/s 로 나타났다. 최고 풍속은 현지 태양시간 기준 19:00(UTC 04:00-06:00)에 발생하였다. 풍속은 계절에 따라 변화를 보이며, 남극 겨울(4 월-9 월)에 남극 여름(10 월-3 월)보다 더 높은 경향을 나타낸다. 풍향은 연중 일관되게 남남서(SWW)방향으로 유지되었다. 연구 캠프의 시추 후보지는 풍향을 고려하여 캠프에서 발생할 수 있는 오염원의 영향을 받지 않는 위치로 선정되었다.

3.3.5. 적설량

SLC 지역에서 적설량은 한 차례만 측정되었다. AWS 타워의 눈금 표시를 기준으로, 2019 년 12 월부터 2021 년 12 월까지 2 년 동안 0.5 미터의 눈이 쌓인 것으로 측정되었다. 따라서 연간 적설량은 약 0.25m 로 추정된다.



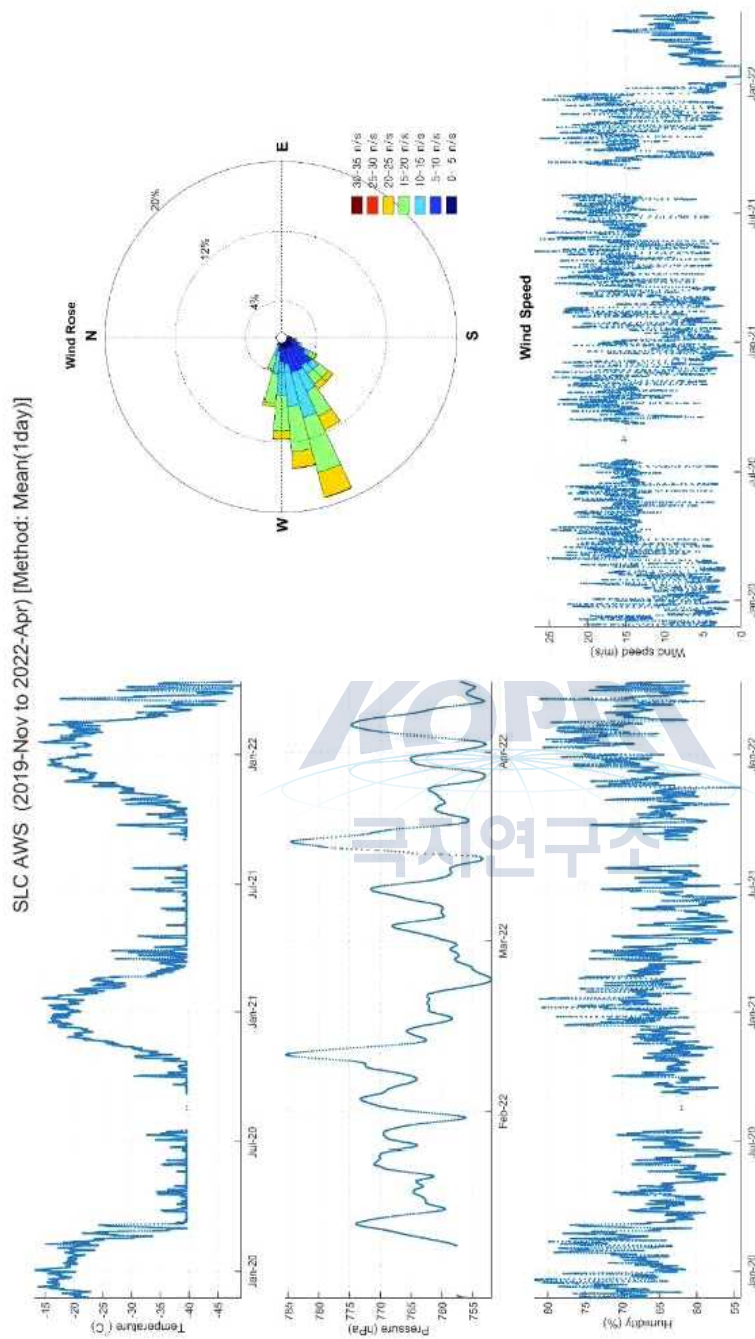


그림 18 SLC 지역의 공기 온도, 기압, 상대 습도, 풍속 및 풍향(2019-2022)

3.4. 눈과 얼음(표면 적설물, 눈 및 빙하 코어의 화학적 특성 등)

2021년 12월, 청석 빙저호(SLC) 인근 캠프 지역에서 약 1km 떨어진 지점에서 지표면 눈 샘플이 채취되었다. 오염 가능성을 최소화하기 위해 각 샘플링 지점은 바람의 상류 방향으로 접근하였으며, 교차 탄성과 탐사 라인(Figure 1)으로부터 50m 및 100m 간격으로 배치되었다. 표면 눈 샘플은 멸균된 플라스틱 삽을 사용하여 동일한 지점에서 세 차례 채취되었으며, Whirl-Pak 플라스틱 백(WPB01532WA, NASCO, USA)에 담아 보관하였다(Figure 2). 채취된 눈 샘플은 화학 분석을 위해 아라온 채빙선으로 운송될 때까지 -20°C에서 냉동 상태로 보관되었다.

음이온(Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-}) 및 양이온(Na^+ , K^+ , NH_4^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+})의 농도는 이온 크로마토그래피(IC) 시스템(Dionex Aquion, Thermo Scientific, America)을 사용하여 분석되었으며, 자동 샘플러(Dionex AS-DV)가 장착된 상태에서 측정되었다. 음이온은 IonPac AS14(4 mm × 250 mm) 분석 칼럼을 사용하여 3.5 mM Na_2CO_3 와 1 mM NaHCO_3 의 이동상으로 1.2 mL/min의 유속에서 16분 동안 분석하였으며, 주입량은 25 μL 였다. 양이온은 CS12A(4 mm × 250 mm) 분석 칼럼을 사용하여 20 mM 메탄설폰산(MSA)을 이동상으로 1 mL/min의 유속에서 16분 동안 분석하였으며, 주입량은 25 μL 였다.

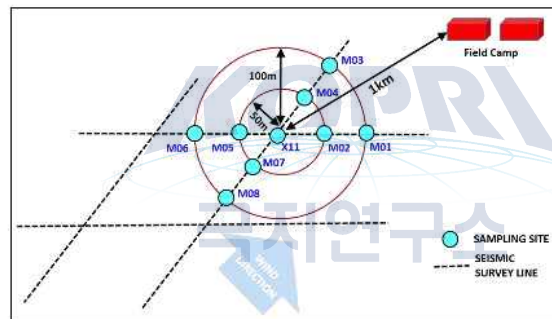


그림 19 지표면 눈 채취의 간단한 개략도



그림 20 SLC 지역의 지표면 눈 샘플을 채취한 모습(2021 년 12 월)

지표면 눈 샘플에서 측정된 Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , Na^+ , NH_4^+ , K^+ , Mg^{2+} 농도는 각각 $163.86\text{--}327.41\text{ ng g}^{-1}$ (평균 = 235.3 ng g^{-1}), $41.12\text{--}176.24\text{ ng g}^{-1}$ (평균 = 81.85 ng g^{-1}), $27.56\text{--}59.46\text{ ng g}^{-1}$ (평균 = 38.0 ng g^{-1}), $100.40\text{--}242.25\text{ ng g}^{-1}$ (평균 = 155.81 ng g^{-1}), $12.01\text{--}26.53\text{ ng g}^{-1}$ (평균 = 21.08 ng g^{-1}), $61.30\text{--}85.45\text{ ng g}^{-1}$ (평균 = 72.05 ng g^{-1}), $0.87\text{--}5.34\text{ ng g}^{-1}$ (평균 = 2.97 ng g^{-1}), $13.72\text{--}26.44\text{ ng g}^{-1}$ (평균 = 20.08 ng g^{-1})로 나타났다(Figure 3).

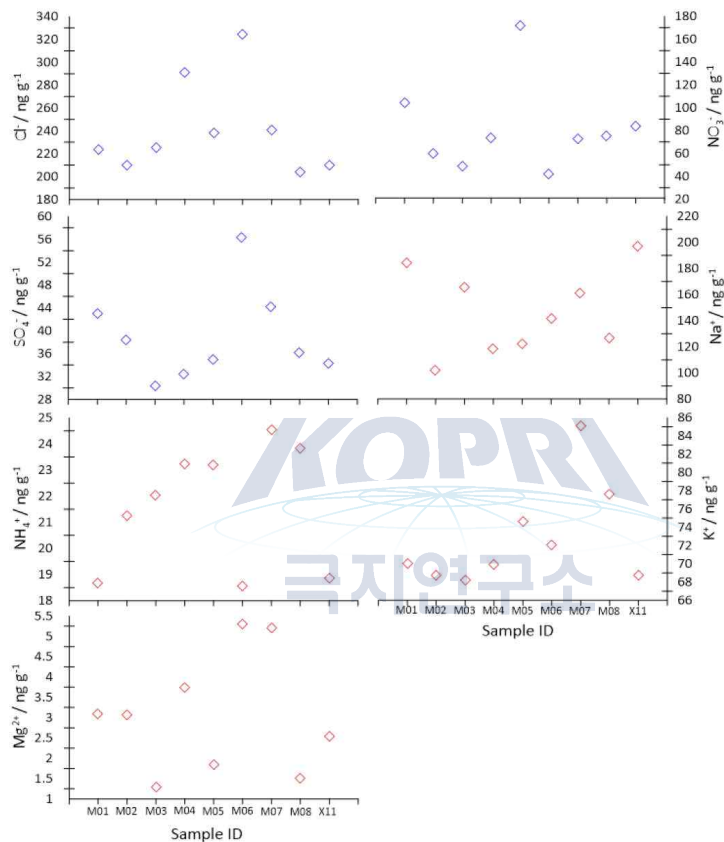


그림 21 지표면 눈 샘플의 이온 농도

2019 년 10 월부터 12 월까지 19/20 남극 하계 시즌 기간동안 K-루트 탐사대는 남극 빅토리아랜드 데이비드 빙원의 빙저호(D2) 탄성파 탐사 지역에 위치한 SLC(75° 25.5' E, 155° 28.8' S)에 설치한 하계 연구 캠프 근처에서 1 개의 약 8m 길이의 천부 빙하코어 샘플을 획득하였다(그림 18). 빙하코어 샘플은 직경 약 9.5cm 핸드오거를 이용하여 시추되었으며, 시료 정보는 표 1.과 같다. 구체적인 빙하코어 시추 작업과 시료는 그림 19, 그림 20 과 같다.



그림 22 K-루트의 남극내륙진출루트(2019/20 시즌) 및 천부빙하시추지점



그림 23 환경영향평가를 위한 천부빙하코어 시추 모습(핸드오거)



그림 24 현장에서 획득한 빙하코어 시료

표 3. 빙저호 SLC 캠프에서 시추한 천부빙하코어 시료 정보

Date	Site	Run or Bag	Top	Bottom	Length (cm)	Diameter (cm)	Weight (g)	Density (g/cm ³)	notes
19/11/23	D2	Bag 1	0	55	55	52	9.14	1388	0.407 B5, B28-28.5
		Bag 2	55	110	55	51	9.27	1304	0.379 B16, B37-37.5
		Bag 3	110	158	48	49	9.03	1272	0.406 B9-10.2, B34.5
		Bag 4	158	213	55	55	9.21	1664	0.454 B22-23.5
		Bag 5	213	263	50	50	9.2	1350	0.406 B13-13~15.5
		Bag 6	263	318	55	55	9.21	1508	0.412 B26.7-27
		Bag 7	318	373	55	55	9.29	1674	0.449 B42-42.3
		Bag 8	373	428	55	55	9.33	1708	0.454 B41-42
		Bag 9	428	483	55	55	9.31	1796	0.48 B25.8-26
		Bag 10	483	538	55	54	9.31	1814	0.494 B6-7
		Bag 11	538	593	55	55	9.41	1814	0.474 B8.5-10, B33.5
		Bag 12	593	648	55	54	9.24	1804	0.498 B13-13.5
		Bag 13	648	702.5	54.5	54	9.37	1868	0.502 B19-20.5
		Bag 14	702.5	757.5	55	55	9.27	1792	0.483 B22.5-24
		Bag 15	757.5	783.5	26	26	9.41	910	0.504 B26

전부 빙하코어 시료는 냉동컨테이너로 수송되어 -20°C 냉동실험실에 보관하였다. 시료와 접촉 가능한 모든 실험도구는 청정실험실(Clean Lab, Class-100)에서 3 차 증류수(Milli-Q water)를 이용하여 세척하였다. 빙하코어 시추 과정에서 발생된 외부오염 물질을 제거하기 위하여 냉동실험실에 설치된 청정부스(Clean Bench, Class-10) 안에서 세라믹 나이프를 이용하여 전처리 과정을 거친 후 5cm 섹션으로 절단한 이후 멸균 플라스틱 백(Wheel Pak)에 임시 보관하였다. 이후 샘플은 청정부스 안에서 용융과정을 거친 후 화학종별 분석을 위해 분취하였다. 물 안정동위원소 분석을 위해 Piccaro 사의 레이저 분광기인 L2148i 분석기기와 이온성분 분석을 위해 청정실험실(Class-100)에 설치된 Thermo Fisher 사의 Aquion RFIC Ion Chromatography System 을 이용하였다.

표 4. 전부 빙하코어시료 오염제거를 위한 전처리 과정

1st Cutting 2nd Cutting 3rd Cutting 4th Resolution cutting R0: Archive (Visual Stratigraphy) R1: Gas & Metal R2: Water Stable Isotopes C1: CFA	
<전부 빙하코어 절삭 계획 수립>	<기초 물리 자료(길이, 무게 등) 측정>
<시료 1 차 절삭>	<1 차 절삭 시료 포장 및 라벨링>
<세척 나이프를 사용한 외부오염제거>	<5cm 단위 샘플 커팅>

아래 표에서 나타났듯 천부 빙하코어 시료의 총 깊이는 783 cm 로, 깊이에 따라 전반적으로 밀도가 증가하는 추세를 나타내며, 밀도의 범위는 0.407 ~ 0.504 cm³ 이고 평균 값은 0.45 cm 이다. 빙하코어의 밀도는 깊이에 따라 비교적 선형적으로 증가하지만, 약 2.6 ~ 3 m 깊이에서 급격히 낮아지다가 다시 선형적으로 증가하는 것을 확인할 수 있다(그림 21).

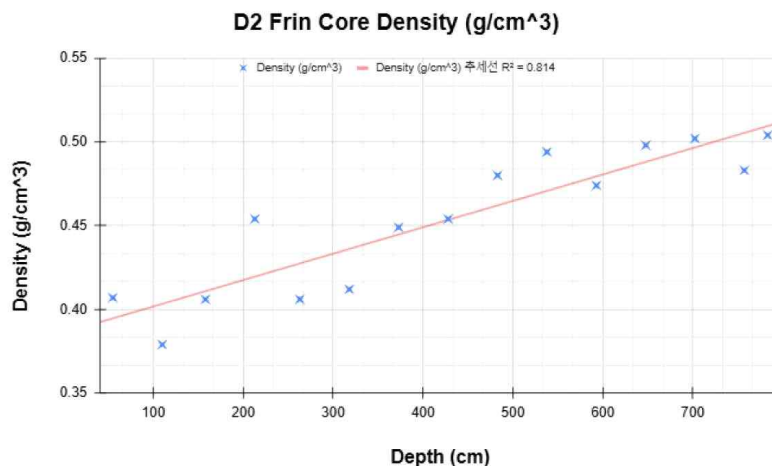


그림 25 청석호(SLC) 천부 빙하코어 시료의 밀도 변화

그림 22. 는 SLC 천부 빙하코어의 깊이에 따른 물 안정동위원소와 이온의 변화를 나타내고 있다. 자료에서는 표층부터 최하부인 783cm 깊이까지 물 안정동위원소 비가 계절 변화가 뚜렷하게 나타난다. 여름철의 상대적으로 높은 값을 갖고 겨울철에 낮은 값을 보이는 빙설시료의 물 안정동위원소비 특성을 고려할 때, SLC 지역에서 시추한 과거 11 년간의 대기환경 변화 기록을 보인다. 물 안정동위원소 비 자료를 통해 이 지역의 연평균 적설량은 약 67.2cm/yr 로 추정할 수 있다. 이온분석 자료에서 Methyl sulfonic acid (MSA)와 Sulfate (SO₄²⁻)의 농도는 주로 여름철에 높은 값을 보이는 반면, Sodium (Na⁺)과 Chloride (Cl⁻)의 농도는 대체로 겨울철에 증가하는 양상을 보인다. 이는 계절에 따라 남극해 해빙의 확장과 축소에 따른 화학종의 발생 메커니즘의 변화에 따른 대기 중 강설로 발생하는 화학종의 유입량의 변화에 원인일 수 있다.

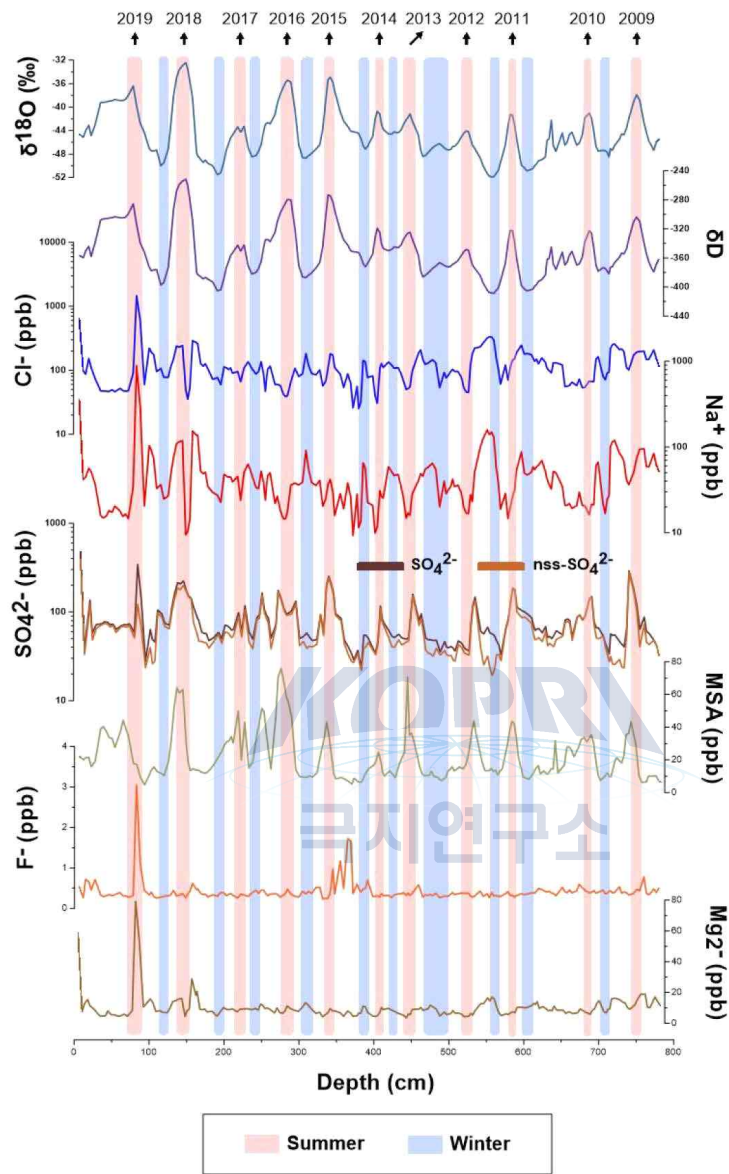


그림 26 SLC 천부 빙하코어 깊이에 따른 물 안정동위원소와 이온성분의 변화

SLC 천부 빙하코어의 이온성분별 농도의 평균값, 중간값, 최소값 그리고 최대값은 아래표와 같으며, 양이온과 음이온 전체 분석결과는 그림 23. 와 24. 과 같다.

표 5. SLC 천부 빙하코어의 이온성분별 농도값(평균값, 중간값, 최소값, 최대값)

(ppb)	F ⁻	MSA	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺
Mean	0.42	22.41	128.72	81.98	109.64	52.11	1.95	10.11	10.51
Median	0.37	16.52	105.67	63.87	100.38	37.48	1.12	8.81	3.68
Max	3.05	76.00	1466.46	342.35	233.59	890.35	29.49	79.24	82.87
Min	0.23	4.66	25.21	25.18	48.85	9.27	0.96	3.52	1.89



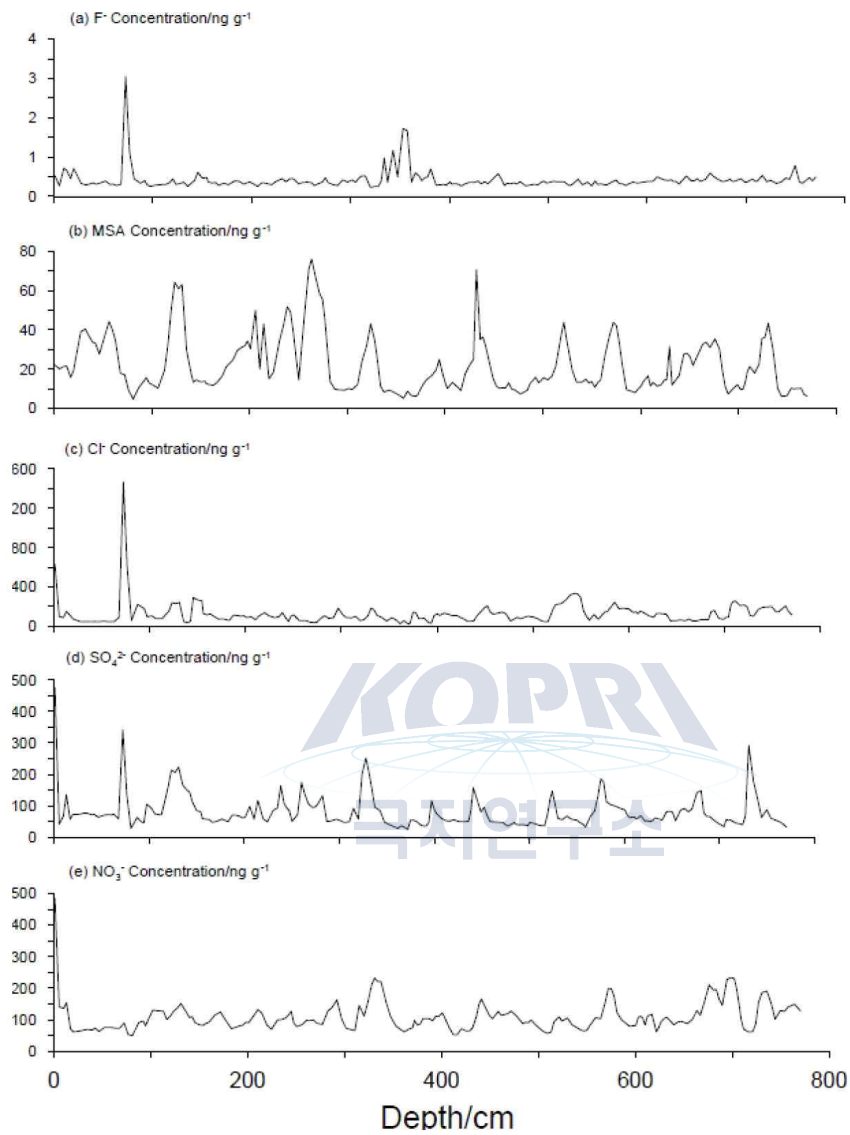


그림 27 SLC 천부 빙하코어 깊이에 따른 음이온 분석결과

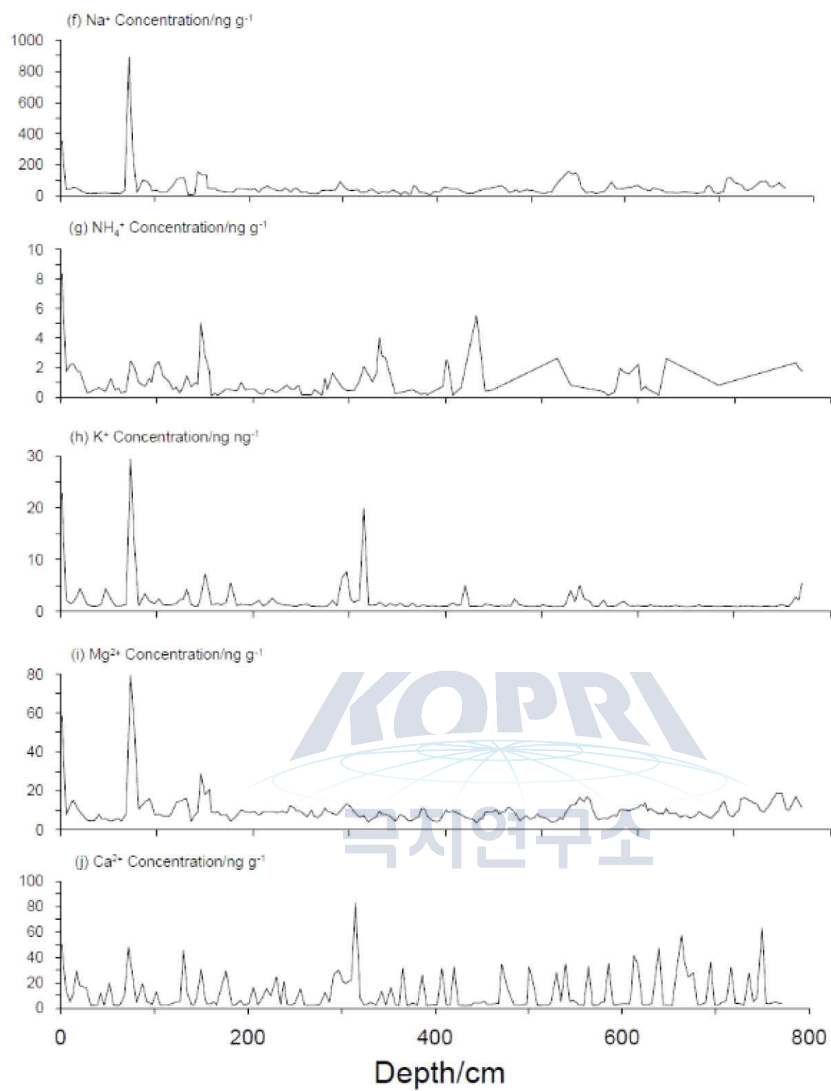


그림 28 SLC 천부 빙하코어의 깊이에 따른 양이온 분석결과

3.5. 지표면 눈 생물군

적설층(snowpack)은 박테리아, 곰팡이, 조류, 바이러스를 포함한 다양한 미생물의 서식지 역할을 한다. 이전 연구들은 남극 내륙의 다양한 지역에서 적설 미생물군(snow microbiomes)을 조사하였으며 (Michaud et al., 2014; Malard et al., 2019; Parro et al., 2025), 심지어 남극점(South Pole)에서도 기능적 미생물 군집이 존재함이 확인된 바 있다(Madigan et al., 2017 Extremophiles). 그러나 이러한 지역에서의 미생물 개체 수는 극히 낮으며, 추정 세포 밀도는 XX cells/ml 이며, 우점 종은 XXX 로 보고되었다.

캠프 및 시추 지역 주변에서는 육안으로 관찰되는 식물이나 동물이 전혀 발견되지 않았다. 20L 용량의 적설 시료(표면에서부터 60cm 깊이까지 채취)를 현미경으로 관찰하고 세포 개수를 분석한 결과, 식별 가능한 미생물이 검출되지 않았다.

적설층 내 미생물 존재를 보다 심층적으로 조사하기 위해 배양 의존적(culture-dependent) 및 배양 비의존적(culture-independent) 방법을 병행하여 연구를 수행하였으며, DNA 기반 분석(DNA-based surveys)도 진행되었다.

적설 시료는 2019/20 시즌과 2021/22 시즌 동안 두 차례에 걸쳐 채취되었다. 보편적 16S rRNA 및 진핵생물 18S rRNA 유전자 증폭 서열 분석(amplicon sequencing)**을 수행한 결과, 37 회 PCR 증폭 후 16S rRNA 에서 양성 신호가 확인되었으나, 18S rRNA 유전자에서는 증폭산물이 검출되지 않았다.

해당 지역은 극히 낮은 생물량(biomass)을 가지므로, 기존의 분자생물학적 방법(conventional molecular methods)으로는 많은 미생물을 검출하기 어려울 수 있다(REF). 또한, 장거리 대기 확산(aeolian transport)을 통해 외부에서 유입된 미생물이 일시적으로 존재할 가능성도 있다.

배양 가능한 세균을 확인하기 위해, 각 지역의 250ml 적설 용융수(snowmelt water)를 R2A(1x, 0.01x) 및 TSA(1x, 0.01x) 배지에 접종하여 15°C 에서 배양하였다.

그 결과, 총 3 종의 세균이 분리되었으며 *Peribacillus frigiditolerans* 2 균주(Ant192, Ant232)는 탄성파 탐사(seismic survey) 지역 인근 횡단 경로(traverse route)에서 채취한 적설층에서 분리되었다. 또한, *Kocuria marina* 1 균주(D2)는 캠프 지역 적설층에서 분리되었다.

음성 대조군(negative controls)과 시료 오염 가능성이 있는 시약 관련 미생물군(kit-associated “kitomes”)을 제거한 후, 남은 박테리아 속(genera)은 대부분 토양 및 해양 기원 에어로졸(soil and marine aerosols)에서 유래한 것으로 나타났으며 적설층 깊이에 따른 미생물 군집 구성의 유의미한 차이(significant variation)는 관찰되지 않았다.

3.6. 인간 활동 및 이동 범위

IPR(Airborne Ice Penetrating Radar) 탐사는 2016/17 시즌 동안 헬리콥터를 이용하여 수행되었으며, 빙저호(D1 및 D2 포함) 지역을 포함한 데이비드 빙하 일대를 조사하였다.

또한, 두 차례의 지상 탄성파 탐사(ground-based seismic survey) 및 표면 적설층 샘플링(surface snowpack sampling) 캠페인이 2019/20 시즌과 2021/22 시즌에 진행되었다.

조사를 위한 야외 캠프(field camp)는 예정된 시추 지점에서 약 10km 상류(upstream)에 위치하였으며, 환경 영향을 최소화하기 위해 바람 상류에 설치되었다.

- 캠프 및 탄성파 탐사 작업 기간

- 2019/20 시즌: XX 일간 운영
- 2021/22 시즌: XX 일간 운영

- 운영 장비 및 인력

- 스노우 차량(PistenBully 300) 3~4 대
- 연료 탱크 2 기
- 20ft 컨테이너 2 개
- 설상형 캐러밴(caravans mounted on sleds) 2 대
- 탐사팀 7~8 명

탐사 기간 동안 헬리콥터는 약 267km 떨어진 장보고과학기지(Jang Bogo Station)에서 캠프까지 운항하며 물자 보급 및 인력 교대를 지원하였다.

3.7. 보호 및 관리 지역

남극의 보호 지역에는 남극 특별보호구역(Antarctic Specially Protected Areas, ASPAs), 남극 특별관리구역(Antarctic Specially Managed Areas, ASMAs), 그리고 문화유산 및 기념물(Heritage Sites and Monuments, HSMs)이 포함된다.

예정된 시추 지점 및 탄성파 탐사 지역, 트랙터 이동 경로(tractor traverse routes) 주변에는 지정된 보호 지역이 존재하지 않는다.

4. 검토 사항

4.1. 연구 수행 여부

데이비드 빙하 지역의 빙저호 생태계, 수문학, 고환경 변화, 빙상의 열 조건 및 역학(thermal conditions and dynamics of the ice sheet)에 대한 연구는 여전히 미진한 상태이다.

CASCA 프로젝트는 이와 관련하여 중요한 과학적 통찰을 제공하는 것을 목표로 하며, 주요 연구 성과는 다음과 같다:

- 2km 이상의 두꺼운 얼음 아래 존재하는 빙저호 생태계에서 미생물 생물군(microbial life)의 발견 및 진화사 규명
- 퇴적학적 고기후 기록(sedimentary paleoclimate records) 분석을 통한 동남극 빙상(EAIS)의 빙하 역사 및 고환경 변화 재구성
- 빙저부의 열 체제(thermal regimes of the subglacial bed)와 빙류 역학(ice flow dynamics) 연구를 통한 데이비드 빙하 지역의 빙상 변화 예측

본 프로젝트의 성공적인 수행을 통해 기대되는 과학적 기여는 매우 크며 오염 방지 대책 또한 철저히 마련되어 있다. 따라서, ‘아무런 조치도 하지 않는(do nothing)’ 대안은 타당한 선택지가 될 수 없으며 고려 대상에서 제외되었다.

4.2. 지역

현재까지 서남극 빙상(WAIS)의 그라운드링 존(grounding zone) 인근에 위치한 Whillans 호와 Mercer 호에서 빙저호 퇴적물 및 호수수 시료 채취가 성공적으로 이루어졌다 (Christner et al., 2014; Priscu et al., 2021). 그러나, 동남극 빙상(EAIS) 아래의 빙저호는 아직 직접적인 과학적 분석을 위한 샘플링이 이루어진 바 없다.

일례로, 보스토크호(Lake Vostok)에서는 호수 상부에 형성된 응결 얼음(accretion ice)을 회수하여 DNA 기반 연구가 수행되었으나(REF), 샘플 오염 가능성에 대한 논란이 여전히 해결되지 않았다(REF). 이에 따라, 동남극 빙하 시스템에서의 직접적인 빙저호 탐사는 여전히 중요한 연구 과제로 남아 있다.

데이비드 빙하(David Glacier)는 빅토리아랜드에서 가장 큰 유출빙하(outlet glacier)로, 기존에 샘플링이 이루어진 서남극 빙저호들과 뚜렷한 대비를 이룬다.

- 서남극의 그라운드링 존 빙저호: 로스해로의 수분 교환 기록이 존재하며, 빙하두께는 약 1km.

- 데이비드 빙하 상류의 빙저호: 두께 2km 이상의 빙하 아래 존재하는 고립된 담수호로, 빙상 하부 장기 격리에 적응한 독특한 생태계를 포함할 가능성이 높음.

현재까지 지구물리 탐사를 통해 데이비드 빙하 유역(catchment) 내 6 개의 활성 빙저호(active subglacial lakes)가 확인되었다(Smith et al., 2009). 이들 중, D1 호(하류 지역)는 장보고 과학기지와의 근접성 및 위성-항공 탐사를 통한 수위 변화 관측 결과를 바탕으로 우선 검토되었으나, 빙하 균열(crevasse)로 인한 안전성 문제로 제외되었다. D3~D5 호(상류 지역)는 향후 탐사 후보지로 고려 가능하지만, 현재 지구물리학적 데이터 부족, 높은 운용 위험성, 장보고 기지에서 400km 이상 떨어진 거리 등의 이유로 단기 탐사 후보지로 적합하지 않다고 판단되었다.

결과적으로, 청석호(Lake Cheongsuk, D2 호)가 과학적 중요성, 물리적 실현 가능성, 안전성을 종합적으로 고려하여 최우선 탐사 후보지로 선정되었다.

청석호 선정 배경

- 1) 광범위한 현장 조사: 기존에 항공 IPR(ice penetrating radar) 및 탄성파 탐사(seismic survey) 수행
- 2) 우수한 물류 접근성: 장보고 기지에서 헬리콥터로 연료 보급 없이 운행 가능한 거리에 위치
- 3) 검증된 운용 안전성: 여러 차례의 지상 탐사 및 캠프 운영을 통해 안전성이 입증됨

따라서, 여러 후보지를 검토한 끝에 청석호(D2 호)가 과학적 가치, 문서화된 현장 조건, 물류적 이점을 바탕으로 데이비드 빙하 지역에서 가장 적합한 빙저호 탐사 대상으로 선정되었다.

4.3. 기술

미국과 영국이 성공적으로 입증한 열수시추(hot water drilling, HWD) 기법은 두께 2km 이상의 빙하를 신속하게 관통하여 빙저호에 접근할 수 있는 가장 효과적이고 신뢰할 수 있는 방법으로 널리 인정받고 있다.

특히, 강력한 소독 시스템과 결합된 ‘청정 열수 시추(clean hot water drill, CHWD)’ 기법은 SCAR 청정성 프로토콜(SCAR cleanliness protocols; Siegert and Kennicutt, 2018)을 준수하며, 빙저호 및 퇴적물 시료 채취 시 호수 생태계를 방해하거나 오염을 유발할 위험을 최소화할 수 있다.

현재까지 이를 능가하는 기술이 개발되지 않은 상황에서 CHWD 는 빙저 환경에서 청정 시료를 확보하기 위한 가장 신뢰받는 방식으로 평가되고 있다.

본 프로젝트의 CHWD 시스템은 빙하에서 채취한 눈 녹인 물(snowmelt water)을 기반으로 1차적으로 4단계 여과 시스템을 통한 이물질을 제거한 뒤, 2차적으로 이중 파장 자외선(UV dual-wavelength) 처리를 통해 살균한다.

또한, 시추 호스 및 천공공을 통과하는 모든 장비 표면은

- 화학적 소독(수산화물 처리 등),
- 물리적 소독(고압 공기 분사 및 200 개의 UVLED 램프 조사)

과정을 거치며, 이를 통해 미생물 99.99%(log-3) 제거율을 달성하도록 설계되었다.

추가적으로, 오염 위험을 더욱 줄이기 위해 온수 순환 시스템의 여러 배출 지점에서 수집한 시료를 실시간으로 미생물 모니터링할 계획이다.

4.4. 물류 운송 및 관리체계

장보고과학기지(Jang Bogo Station) 운영 개시(2014 년) 이후, 극지연구소(KOPRI)는 내륙 남극 탐사에서 트랙터 트래버스(tractor traverse) 운용 및 야외 캠프 구축 경험을 10 년 이상 축적해왔다.

KOPRI 의 트래버스 시스템은 아래와 같이 구성되어 있으며, 장보고 기지에서 시추 예정지까지 안전한 경로를 확립하고, 중장비를 여러 차례 운송한 검증된 물류 시스템이다.

- PistenBully 및 Caterpillar 트랙터
- 컨테이너형 장비 및 설비에 탑재된 생활용 캐러밴

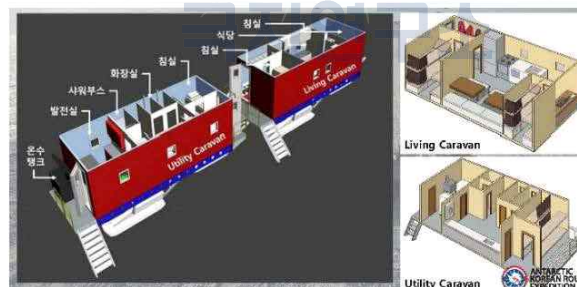


그림 29 생활용 캐러밴 모식도

따라서 CASCA 프로젝트의 시추 지점 접근을 위해 본 시스템은 기존에 두 차례의 탄성파 탐사 및 표층 눈 시료 채취 작업을 성공적으로 수행한 바 있는 기존의 물류 인프라를 활용하는 것이 가장 신뢰할 수 있는 방법으로 판단하였다.

5. 환경영향평가 및 저감조치

5.1. 대기 영향 및 저감 조치

연료 사용은 다음의 네 가지 주요 활동에 의해 발생한다:

- 1) 헬리콥터 운항(항공유) 2) 트래버스(설상차, 발전기) 3) 시추 작업 중 연료 사용(히터, 발전기)
- 4) 탄성과 탐사(설상차, 발전기).

헬리콥터는 항공유를 약 XX L/km 소비하며, 장보고기지에서 캠프지까지의 거리가 약 250 km 이고 시추 기간 동안 XX 회의 왕복 운항이 예정되어 있어, 총 항공유 소비량은 약 XX 톤으로 추정된다.



그림 30 남극 내륙 횡단을 위한 주요 장비 구성

남극 내륙 횡단 과정에서는 설상차, 무한궤도 트랙터, 발전기 등이 연료를 소비하게 된다. 피스텐볼리는 주행 시 항공유를 약 XX L/km 소비하며, 각 무한궤도 트랙터는 약 XX L/km 의 항공유를 소비한다. 카라반용 발전기는 시간당 XX L 의 항공유를 소비한다. 남극 내륙 이동 총 거리 XX km, 편도 14 일 소요를 고려한 왕복 운행을 기준으로, 트래버스 관련 총 연료 소비량은 약 XX 톤으로 예상된다.

시추공 하나를 굴착하는 데에는 약 XX 톤의 연료가 필요하며, 시추 장비 운영을 위한 100kW 급 발전기 2 대는 각각 시간당 XX 톤의 연료를 소비하게 된다.

이러한 연료 사용은 이산화탄소(CO_2), 일산화탄소(CO), 질소산화물(NO_x), 이산화황(SO_2), 입자상 물질(PM_{10}) 또는 블랙카본 등의 대기오염물질을 배출하게 된다.

5.2. 눈과 얼음에 미치는 영향 및 저감 조치

1) 트래버스에 의한 잠재적 영향 및 저감방안

설상차 및 썰매는 장보고기지에서 시추 지점까지의 트래버스 경로를 따라 주행하면서 트랙을 남기고, 눈층을 압축시키는 효과를 초래한다. 해당 경로는 지난 10 년간 극지연구소(KOPRI)의 트래버스 팀에 의해 반복적으로 이용되어 왔으며, 트랙 관련 정보는 지금까지 지속적으로 기록되어 왔다.

트래버스는 일시적인 트랙을 남기고 눈층을 압밀시켜 일시적으로 자연 상태를 변경할 수 있다. 그러나 본 지역의 연평균 적설량이 약 1 m 임을 고려할 때, 압밀된 눈층과 차량 트랙은 이후 새롭게 쌓이는 눈에 의해 점차 덮이게 되어, 장기적으로는 눈층에 미치는 영향이 미미할 것으로 판단된다.

2) 시추 및 캠프 활동에 의한 잠재적 영향 및 저감방안

본 시추 시스템은 컨테이너형 구조로 설계되어 있으며, 대부분의 시추 장비와 캠프 시설(카라반, 연료 탱크 등)은 썰매 위에 탑재된 형태로 운용된다. 시추 작업 중에는 윤활유 등 기계 작동 시 누유, 주입/배출 구 주변의 등유 유출, 배수 구 주변의 오폐수 배출 등으로 인한 국지적인 눈 오염 가능성이 존재한다.

시추 캠프 및 관련 지원 시설은 약 $XX \times XX$ km 이내로 제한된 구역 내에 설치되며, 대부분의 시추 장비는 시추 텐트 및 플랜트 텐트 내부에 배치될 예정이다. 이에 따라 시추 작업이 주변 눈층에 미치는 영향은 국지적으로 제한될 것으로 예상된다.

발전기 및 운수기에서 배출되는 가스 및 블랙카본 입자는 인근 눈 표면에 침적될 수 있으나, 이를 최소화하기 위한 연료 및 오일 누출 예방 절차(REF)와 함께, 현장 인력에 대한 교육이 실시될 예정이다. 또한, 누출 발생 시 대응 및 보고 절차를 마련하여 환경적 영향을 최소화할 계획이다.

따라서, 시추 작업, 트래버스, 캠프 활동이 눈 및 빙설 표면에 미치는 영향은 체계적인 관리와 저감 조치를 통해 최소화될 수 있을 것이다.

5.3. 호수 물에 미치는 영향 및 저감 조치

기존 남극 빙저호 연구(예: Christner et al., 2014; Davis et al., 2023)에 따르면, 청석호(SLC)에도 다양한 미생물이 서식할 가능성이 높다.

이러한 원시 생태계(pristine ecosystem)는 극도로 민감하여, 미미한 교란조차 생태적 변화를 초래할 수 있기 때문에 외래 유기체(non-native organisms), 영양염류(nutrients), 중금속(heavy metals)등이 빙저호로 유입되는 것을 철저히 방지하는 것이 중요하다.

(1) CHWD 시스템의 고강도 소독 및 청정 프로토콜 적용

빙저호 생태계 영향을 최소화하기 위해 청정열수시추(CHWD) 시스템에 강력한 소독 및 청정 프로토콜을 적용한다.

① 시추수(drill water) 소독 과정

- 4 단계 여과(four-stage filtration) 후
- 이중 파장 UV(dual-wavelength UV) 처리 시행

② 천공공 및 시추 장비 소독

- 화학적 소독(수산화물 처리 등)
- 물리적 멸균(고압 공기 분사 및 200 개 UV LED 램프 조사)
- → 이를 통해 미생물 99.99%(log-3) 제거율 달성

③ 수질 및 퇴적물 채취 장비(시료 채취기) 추가 멸균

- 121°C 에서 고압멸균(autoclaving at 121°C)
- 70% 에탄올 소독
- → 내부 표면까지 완전 멸균 후 투입

(2) 실시간 미생물 모니터링 및 신속 대응 체계 구축

- 미생물 농도가 사전 설정한 기준치를 초과할 경우, 신속 대응할 수 있도록 실시간 모니터링 수행
- 온수 순환 시스템 내 주요 지점에서 시추수 시료 채취 및 분석
- 빙저호와 직접 접촉하는 장비 표면에서 스왑(swab) 샘플링 실시

(3) 현장 맞춤형 이동식 청정 실험실 구축

- 신속한 미생물 검출을 위해 이동식 청정 실험실(portable clean laboratory)을 운영(Fig. XX)
- 필터링, 현미경 분석, qPCR 및 DNA 시퀀싱과 같은 분자 분석을 포함한 모든 과정이 청정 환경에서 수행됨

- → 이를 통해 시추 작업 중 실시간으로 미생물 오염 여부를 진단하고 대응할 수 있도록 설계되었다.

5.4. 유류 유출, 장비 손실, 폐기물 처리 등

1. 폐기물 관리

고형 폐기물(식품 쓰레기, 생활 하수, 식품 포장재, 연료 드럼 등)은 분리 후 포장하여 현장에서 임시 보관하며, 이후 장보고과학기지로 이송한다. 액체 폐기물(생활 하수, 오일, 윤활유 등)은 현장에서 전용 용기에 임시 보관한 뒤 장보고과학기지로 이송한다. 모든 고형 및 액체 폐기물은 헬리콥터를 통해 장보고과학기지로 운송된다.

2. 장비 손실 위험 관리

시추 작업 중 시추공 내 장비가 손실될 위험이 존재한다. 시추 장비가 시추공에 고착되는 것을 방지하기 위해 주기적으로 시추공을 확장한다. 호수 내에서 물 샘플러 및 퇴적물 채취기가 유실될 경우를 대비한 명확한 복구 계획은 현재로서는 마련되어 있지 않다. 이에 따라, 해당 장비의 유실가능성을 가능한 한 줄이기 위해 자일론(Zylon) 테더와 장비 간의 다중연결방식을 적용하여 안정성을 확보할 예정이다. 더불어 연결부의 장력 테스트 및 시뮬레이션 실험을 통해 특정 강도에서 분리되는 조건을 검증한다.

5.5. 누적 영향

누적 영향(cumulative impacts)은 단일 활동의 환경적 영향뿐만 아니라, 과거, 현재, 그리고 예측 가능한 미래 활동과 결합될 때 발생하는 총체적 환경 영향을 의미한다.

1. 청석호(D2) 지역에서 수행된 과거 연구 활동

지난 10년간, KOPRI는 D2 지역에서 다음과 같은 연구 활동을 수행하였다.

- 1) 지진 탐사(seismic survey) 및 적설층 샘플링(snowpack sampling)
- 4) 2019/20, 2021/22 시즌 동안 지상 탐사 진행
- 2) 대륙 횡단 트래버스(tractor traverse)
- 5) 총 4 회의 트랙터 트래버스가 D2 지역을 지나감
- 3) 공중 IPR 탐사(airborne IPR survey)
- 6) 2016/17 시즌에 실시됨

모든 이동 경로(GPS 좌표 포함), 조사 일정, 캠프 운영 이력은 KPDC(KOPRI Polar Data Center)에 기록되어 있다.

2. 환경적 영향 분석 및 누적 영향 최소화 전략

1) 연료 소비량 감소

- 항공 기반 작업(예: Twin Otter, Basler 항공기)과 비교 시, 트랙터 트래버스는 연료 소비량이 훨씬 적기에 빙설 환경에서 연료 사용으로 인한 누적 환경 영향을 효과적으로 줄인다.

2) 과거 연구 활동의 지속적 영향 없음

- D2 지역에서 진행된 과학 활동 및 캠프 운영은 최소한의 규모로 단기적으로 이루어져 장기적이고 지속적인 환경 영향은 미비하다.

3) 청정열수시추(CHWD) 완료 후, 추가 연구 활동 계획 없음

- D2 지역에서의 CHWD 시추 작업은 단일 필드 시즌 내에 완료될 예정이며 이후 동일 위치에서 추가적인 연구 활동은 계획에 없으므로, 국소적·단기적 환경 영향이 장기적이거나 누적적인 영향으로 이어질 가능성 낮다고 판단된다.



6. 환경 모니터링 계획

6.1. 실시간 미생물 모니터링의 중요성

시추수와 장비는 시추공 및 빙저호와 직접 접촉하게 되므로, 이들에서 발생할 수 있는 미생물 오염을 실시간으로 모니터링하는 것은 매우 중요하다. 이를 통해 오염이 감지될 경우 즉각적인 대응 조치를 시행하여 빙저 환경의 청정성을 유지할 수 있다.

6.2. 현장 실시간 미생물 모니터링을 위한 이동형 클린랩 구축

이를 지원하기 위해, 우리는 이동형 클린랩(Fig. XX)을 구축하여 시추 시스템에서 발생할 수 있는 미생물 오염을 현장에서 실시간으로 모니터링할 수 있도록 하였다. 이 클린랩은 금속이 포함되지 않은 온·습도 조절 시설로서, ISO 5 (Class 100) 수준의 클린룸 기준을 충족한다. 이는 시추 현장에서 오염을 신속하게 감지하고, 기준치를 초과할 경우 즉각 대응할 수 있도록 설계되었다.

클린랩에는 다음과 같은 장비가 포함된다.

- 1) 형광현미경
- 2) 홀후드 및 UV-증류형 클린벤치
- 3) 고압멸균기 (Autoclave)
- 4) 저온 냉동고
- 5) PCR 기기
- 6) Milipore 정수 시스템
- 7) Nanopore MinION DNA 시퀀싱 장치

위와 같은 장비를 활용하여 시추수 및 장비 표면의 미생물 개체수를 정량적으로 측정하고, 신속한 현장 분석을 수행한다.

6.3. 모니터링 전략

모니터링은 1 차 순환 루프(primary circulation loop)에서 진행되며, 2 차 가열 루프는 1 차 루프와 직접 접촉하지 않으므로 모니터링 대상에서 제외된다.

(1) 시추 단계

5 시간 간격으로 시추수 샘플 채취 (4 개 지점)

- 저수조
- 필터·UV 시스템 입구 및 출구
- 시추 호스의 시추공 입구 측 출구

모든 시추수 샘플은 0.22 μm 기공 크기의 멤브레인 필터(Millipore)를 통해 여과되며 시추 호스 표면 스왑(swab) 샘플링한다. 시추공 입구의 UV 소독 장치 진입 직전에 100m 마다 채취한다.

미생물 검출 방법

- 형광현미경 분석
- qPCR(정량적 중합효소 연쇄반응) 기반 미생물 DNA 정량 분석

DNA 추출 및 분석

- 추출 키트: PowerWater DNA isolation kit (QIAGEN)
- 정량: Qubit4 형광계 및 이중가닥 DNA 정량 키트
- 표적 유전자: 세균, 균류, 미세 진핵생물
- 사전 정의된 미생물 기준치와 비교

(2) 샘플링 단계

- 스왑 샘플링 대상:
- 시추공 계측 시스템
- 수층 및 퇴적물 시료 채취기
- 자일론 테더(Zylon tether) (100m 마다 표면 스왑 샘플링 후 UV 소독 장치 통과)

시추 단계와 동일한 분석 방법을 적용 (현미경 관찰, DNA 추출, qPCR)한다.

미생물 개체수가 기준치(예: $>10^3$ 세포/ml 또는 $>10^4$ 표적 유전자 복사본/ml)를 초과할 경우, Nanopore MinION 시퀀서를 활용한 실시간 DNA 염기서열 분석을 수행하여 오염 미생물 군집을 분석한다.

엄격한 품질 관리(QC) 조치: 극히 낮은 미생물 개체수가 예상되므로, 신뢰할 수 있는 분석을 위해 엄격한 품질 관리 조치를 적용한다.

- 음성 대조군(Negative controls): 미사용 필터·스왑, 모든 시약 및 피펫 팁, 정제수, 실험실 및 야외 공기 샘플 포함
- 샘플 보관:

- 모든 필터 및 스왑 샘플은 -20°C 보관 후
- 장보고 기지 → KOPRI 연구소(한국)로 운송
- 고도화된 분자 생물학 분석 및 대량 DNA 시퀀싱 수행

시추 지점 주변의 잠재적 오염 모니터링: 시추 지점 주변의 대기 오염원으로는 발전기, 설상차, 온수기, 생활용 카라반 등이 있으며, 설면 오염원으로는 연료 탱크 주변, 연료 취급 및 호스 라인, 인적 통행 구역, 생활용 카라반 배수 구역, 장비 적재 구역 등이 있다.

현장 및 시추 작업 전반에 걸쳐 정기적인 시각적 점검과 문서화를 수행하여 캠프 및 시추지의 상태를 모니터링할 예정이다. 또한, 오염 가능성이 높은 구역에서 대기 및 적설 샘플을 채취하여 한국의 극지연구소(KOPRI) 실험실로 운송한 후 정밀 화학 분석을 진행할 계획이다. 분석 대상 항목에는 유기 오염물질, 입자상 물질, 중금속, 블랙카본, 질소산화물(NO_x), 황산화물(SO_x), 미생물 오염원이 포함된다.

공간적·시간적 오염 양상을 평가하기 위해 다양한 시점과 시료 채취 지점을 대상으로 비교 분석을 수행할 예정이다.



7. 미지의 요소 및 불확실성

미지의 요소 및 불확실성을 해결하는 것은 SLC 시추 프로젝트를 안전하고 환경적으로 책임감 있게 수행하기 위해 필수적이다. 본 섹션에서는 계획 단계에서 확인된 주요 불확실성을 개괄하고, 잠재적인 환경 영향을 완화하기 위해 취해진 조치를 강조한다. 상세한 지구물리학적 탐사, 철저한 장비 소독 프로토콜, 견고한 연료 관리 전략 등 포괄적인 준비가 이루어졌음에도 불구하고, 모든 불확실성을 완전히 제거할 수는 없다는 점을 인정한다. 본 연구진은 환경 보호와 과학적 진실성을 최우선으로 유지하기 위해 새로운 정보에 따라 지속적으로 모니터링하고 적응해 나갈 것을 약속한다.

7.1 호수의 연결성

SLC 가 인접한 수체와 연결되어 있는지에 대한 이해는 아직 완전하지 않다. 지구물리학적 데이터와 위성 관측에 따르면 SLC 와 주변의 다른 빙저호 사이에 연결 가능성이 제기되고 있지만, 이러한 연결의 정확한 특성은 여전히 불확실하다. SLC 의 연결성을 이해하는 것은 수문학적 변화와 호수 생태계에 미칠 잠재적 영향을 예측하는 데 필수적이다.

항공 빙하 관통 레이더(IPR) 및 탄성파 탐사를 포함한 광범위한 지구물리학적 조사가 수행되어 호수 구조 특성에 대한 상세한 데이터를 제공했다. 이러한 노력은 수문학적 예측의 정확성을 향상시켰지만, 일부 불확실성은 여전히 남아 있다.

7.2 장비 세척 및 소독

시추 장비로 인한 오염을 방지하는 것은 SLC 의 민감한 환경에서 생태학적 영향을 최소화하기 위해 매우 중요하다. 본 프로젝트는 모든 장비를 사용 전후에 철저히 세척하고 소독하며, 고급 필터링 및 UV 처리 방식을 적용하고 있다. 다단계 소독 프로세스를 통해 높은 청정 기준을 유지하고, 외래 미생물이 호수로 유입될 위험을 줄이는 것을 목표로 한다.

실시간 모니터링 및 비상 대응 조치가 마련되어 있어 잠재적인 오염이 발생할 경우 신속히 대처할 수 있다. 그러나 절대적인 소독이 항상 보장될 수는 없다는 점을 인정하며, 지속적인 경계가 요구된다.

7.3 기상 조건

남극의 예측 불가능한 기상 조건은 작업 안전과 환경적 결과 모두에 큰 영향을 미칠 수 있는 중대한 도전 과제다. 이러한 위험을 완화하기 위해 시추 기간은 기상이 비교적 안정적이고 온도가 높은 남극의 여름철에 맞춰 신중히 계획되었다. 이를 통해 폭설, 강풍, 극심한 한파와 같은 극한 기후로 인해 연료 소비와 작업 위험이 증가하는 위험을 최소화하고자 한다.

프로젝트의 물류 계획에는 비상 연료 보급과 고급 기상 예보가 포함되어 이러한 위험을 관리한다. 연료 관리 전략은 연료 사용을 최소화하고 유출을 방지하는 데 초점을 맞추며, 이차 보관 시설과 정기적인 점검 같은 조치가 포함된다.

이러한 사전 대책에도 불구하고 기상 변동성은 여전히 연료 소비에 영향을 미치고 유출 위험을 증가시킬 가능성이 있다. 이는 지속적인 적응과 대비 태세의 필요성을 강조한다.

7.4 화학적 및 생물학적 특성

SLC의 화학적 및 생물학적 특성에 대한 정보가 제한적이므로 시추 활동의 잠재적 환경 영향에 대한 불확실성이 존재한다. 이러한 특성을 방해할 위험을 최소화하기 위해 포괄적인 샘플링 및 분석 프로토콜이 수립되었다. 시추 중 실시간 데이터 수집과 현장 이동식 청정 실험실의 활용을 통해 호수의 화학적 또는 생물학적 구성에서 발생하는 변화를 즉각 식별하고 대응할 수 있다. 이러한 조치는 불확실성을 줄이는 데 기여하지만, 예상치 못한 반응이 발생할 가능성은 여전히 존재하므로 신중한 접근이 필요하다.

7.5 연료 소비

연료 관리는 시추 프로젝트와 관련된 환경적 위험을 최소화하기 위한 핵심 요소이다. 본 프로젝트는 연료 유출 방지 대책, 이중 저장소 활용, 저배출 장비 사용 등 엄격한 연료 관리 전략을 도입했다.

잠재적인 연료 유출을 효과적으로 관리하기 위해 지속적인 모니터링과 비상 대응 계획도 마련되어 있다. 그럼에도 불구하고 예기치 못한 상황이 발생할 수 있다는 점을 인정하며, 팀은 신속히 대응하여 잠재적인 영향을 완화할 준비가 되어 있다.

표 6. 미지의 요소 및 불확실성

검토사항	불확실성	영향정도	관련조치
호수의 연결성	다른 빙저호 또는 지하수 채널과의 연결성에 대한 불확실성	낮음	광범위한 지구물리탐사를 수행하여 예상치 못한 수문학적 영향의 위험범위 최소화
장비 세척 및 소독	장비의 멸균의 불완전성	낮음	다단계 멸균 프로토콜 및 실시간 모니터링으로 오염 위험 감소

검토사항	불확실성	영향정도	관련조치
기상 조건	예측 불가능한 날씨가 시추 작업 및 연료 소비에 미치는 영향	보통	비상 계획 수립과 강력한 연료 관리 전략을 통해 날씨로 인한 환경적 위험 완화
화학적 및 생물학적 특성	잠재적인 화학적 및 생물학적 반응에 대한 제한된 이해	보통	실시간 모니터링과 현장 분석을 통해 예상치 못한 화학적 또는 생물학적 교란으로 인한 생태계 위험 감소
연료 소비	극한 환경에서의 운송 및 작업으로 인한 연료 사용 증가	낮음	엄격한 연료 관리 및 유출 방지 조치로 환경 오염 위험을 최소화

8. 결론

CASCA 프로젝트는 남극 빅토리아랜드의 데이비드 빙하 아래 위치한 청석호(SLC, Subglacial Lake Cheongsuk)에 청정한 방식으로 접근하는 것을 목표로 한다. 제안된 연구 활동에는 설상차 이동 및 물자 운송, 지상 탄성파 탐사, 청정열수시추(CHWD), 그리고 빙저호의 호숫물과 퇴적물 시료 채취가 포함된다. 본 초기 환경영향평가(IEE)는 제안된 활동과 관련된 잠재적 환경 영향을 평가하고 적절한 저감 조치를 마련하였다. 주요 환경적 우려 사항인 빙저호 오염 위험을 최소화하기 위해 다단계 소독 시스템과 실시간 모니터링 프로토콜이 적용될 예정이다. 본 연구는 높은 과학적 가치를 지니고 있으며, 예상되는 환경영향 또한 경미하거나 일시적일 것으로 예측되는 점을 감안하여 초기 환경영향평가(IEE)는 본 활동에 대해 적절한 환경평가로 판단된다.

9. 약어 및 기호 정의

ME Ministry of Environment

NEIR National Institute of Environmental Research

KOPRI Korea Polar Research Institute

MOFA Ministry of Foreign Affairs

CHWD Clean Hot Water Drilling

EAIS East Antarctic Ice Sheet

CASCA Clean Access to Subglacial lake Cheongsuk in Antarctica

SLC Subglacial Lake Cheongsuk

JBS Jang Bogo Station

IPR Ice Penetrating Radar



10. 참조

- Act on Antarctic Activities and Environmental Protection (2024), *National Law Information Center*.
- ATCM (2016), ATCM XXXIX Resolution, *Antarctic Treaty Consultative Meeting*.
- Environmental Impact Assessment Act (2024), *National Law Information Center*.
- Madrid Protocol (1998), Protocol on Environmental Protection to the Antarctic Treaty, *Antarctic Treaty Secretariat*.
- SCAR (2017), Code of Conduct for the Exploration and Research of Subglacial Aquatic Environments.
- Talalay PG (2020) Thermal Ice Drilling Technology. Singapore: Springer Geophysics.
- Alekhina, Irina; Ekaykin, Alexey; Moskvina, Alexey; Lipenkov, Vladimir (2017). Chemical characteristics of the ice cores obtained after the first unsealing of subglacial Lake Vostok. Geological Society, London, Special Publications. 461: 187–196. doi:10.1144/SP461.3. S2CID 219193990.
- Siegert, M.J., Makinson, K., Blake, D., Mowlem, M., Ross, N., 2014. An assessment of deep hot-water drilling as a means to undertake direct measurement and sampling of Antarctic subglacial lakes: experience and lessons learned from the Lake Ellsworth field season 2012/13. *Annals of Glaciology* 55, 59-73.
- Anker PGD, Makinson K, Nicholls KW, Smith AM (2021). The BEAMISH hot water drill system and its use on the Rutford Ice Stream, Antarctica. *Annals of Glaciology* 1–17. <https://doi.org/10.1017/aog.2020.86>
- Tulaczyk, S., Mikucki, J.A., Siegfried, M.R., Priscu, J.C., Barcheck, C.G., Beem, L.H., Behar, A., Burnett, J., Christner, B.C., Fisher, A.T., 2014. WISSARD at Subglacial Lake Whillans, West Antarctica: scientific operations and initial observations. *Annals of Glaciology* 55, 51-58.
- Priscu, J.C., Kalin, J., Winans, J., Campbell, T., Siegfried, M.R., Skidmore, M., Dore, J.E., Leventer, A., Harwood, D.M., Duling, D., 2021. Scientific access into Mercer Subglacial Lake: scientific objectives, drilling operations and initial observations. *Ann Glaciol* 62, 340-352.
- Makinson K et al. (2021). Development of a clean hot water drill to access Subglacial Lake CECs, West Antarctica. *Annals of Glaciology* 1–13. <https://doi.org/10.1017/aog.2020.88>

- Makinson K and Anker P (2014) The BAS ice-shelf hot-water drill: design, methods and tools. *Annals of Glaciology* 55(68), 44–52.
- Rivera, A., J. Uribe, R. Zamora, and J. Oberreuter (2015), Subglacial Lake CECs: Discovery and in situ survey of a privileged research site in West Antarctica, *Geophys. Res. Lett.*, 42, 3944–3953, doi:10.1002/2015GL063390.
- Brisbourne, A. M., Smith, A. M., Rivera, A., Zamora, R., Napoleoni, F., Uribe, J. A., & Ortega, M. (2023). Bathymetry and bed conditions of Lago Subglacial CECs, West Antarctica. *Journal of Glaciology*, 1–10. <https://doi.org/10.1017/jog.2023.38>
- Brocq, A. M. L., Ross, N., Griggs, J. A., Bingham, R. G., Corr, H. F. J., Ferraccioli, F., et al. (2013). Evidence from ice shelves for channelized meltwater flow beneath the Antarctic Ice Sheet. *Nature Geoscience*, 6(11), 945–948. <https://doi.org/10.1038/ngeo1977>
- Frezzotti, M., Capra, A., & Vittuari, L. (1998). Comparison between glacier ice velocities inferred from GPS and sequential satellite images. *Annals of Glaciology*, 27, 54–60. <https://doi.org/10.3189/1998aog27-1-54-60>
- Frezzotti, M., Tabacco, I. E., & Zirizzotti, A. (2000). Ice discharge of eastern Dome C drainage area, Antarctica, determined from airborne radar survey and satellite image analysis. *Journal of Glaciology*, 46(153), 253–264. <https://doi.org/10.3189/172756500781832855>
- Han, H., & Lee, H. (2014). Tide deflection of Campbell Glacier Tongue, Antarctica, analyzed by double-differential SAR interferometry and finite element method. *Remote Sensing of Environment*, 141, 201–213. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.11.002>
- Horgan, H. J., Anandakrishnan, S., Jacobel, R. W., Christianson, K., Alley, R. B., Heeszel, D. S., et al. (2012). Subglacial Lake Whillans — Seismic observations of a shallow active reservoir beneath a West Antarctic ice stream. *Earth and Planetary Science Letters*, 331, 201–209. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2012.02.023>
- Horgan, H. J., Alley, R. B., Christianson, K., Jacobel, R. W., Anandakrishnan, S., Muto, A., et al. (2013). Estuaries beneath ice sheets. *Geology*, 41(11), 1159–1162. <https://doi.org/10.1130/g34654.1>
- Lindzey, L. E., Beem, L. H., Young, D. A., Quartini, E., Blankenship, D. D., Lee, C.-K., et al. (2020). Aerogeophysical characterization of an active subglacial lake system in the David Glacier catchment, Antarctica. *The Cryosphere*, 14(7), 2217–2233. <https://doi.org/10.5194/tc-14-2217-2020>

- Peters, L. E., Anandakrishnan, S., Alley, R. B., & Smith, A. M. (2007). Extensive storage of basal meltwater in the onset region of a major West Antarctic ice stream. *Geology*, 35(3), 251–254. <https://doi.org/10.1130/g23222a.1>
- Rignot, E., Mouginot, J., Morlighem, M., Seroussi, H., & Scheuchl, B. (2014). Widespread, rapid grounding line retreat of Pine Island, Thwaites, Smith, and Kohler glaciers, West Antarctica, from 1992 to 2011. *Geophysical Research Letters*, 41(10), 3502–3509. <https://doi.org/10.1002/2014gl060140>
- Rignot, Eric, Mouginot, J., Scheuchl, B., Broeke, M. van den, Wessem, M. J. van, & Morlighem, M. (2019). Four decades of Antarctic Ice Sheet mass balance from 1979–2017. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(4), 1095–1103. <https://doi.org/10.1073/pnas.1812883116>
- Seo, H., Han, H., & Lee, H. (2019). Velocity Anomaly of David Glacier, East Antarctica, Observed by Double-Differential INSAR. *IGARSS 2019 - 2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 00, 4149–4152. <https://doi.org/10.1109/igarss.2019.8900509>
- Smith, B. E., Fricker, H. A., Joughin, I. R., & Tulaczyk, S. (2009). An inventory of active subglacial lakes in Antarctica detected by ICESat (2003–2008). *Journal of Glaciology*, 55(192), 573–595. <https://doi.org/10.3189/002214309789470879>
- Smith, B. E., Adusumilli, S., Csathó, B. M., Felikson, D., Fricker, H. A., Gardner, A., et al. (2021). ATLAS/ICESat-2 L3A Land Ice Height, Version 5 [Data Set]. <https://doi.org/10.5067/atlas/atl06.005>
- Woodward, J., Smith, A. M., Ross, N., Thoma, M., Corr, H. F. J., King, E. C., et al. (2010). Location for direct access to subglacial Lake Ellsworth: An assessment of geophysical data and modeling. *Geophysical Research Letters*, 37(11), n/a-n/a. <https://doi.org/10.1029/2010gl042884>
- Wright, A., & Siegert, M. (2012). A fourth inventory of Antarctic subglacial lakes. *Antarctic Science*, 24(6), 659–664. <https://doi.org/10.1017/s095410201200048x>
- Brisbourne, A. M., Smith, A. M., Rivera, A., Zamora, R., Napoleoni, F., Uribe, J. A., & Ortega, M. (2023). Bathymetry and bed conditions of Lago Subglacial CECs, West Antarctica. *Journal of Glaciology*, 1–10. <https://doi.org/10.1017/jog.2023.38>
- Brocq, A. M. L., Ross, N., Griggs, J. A., Bingham, R. G., Corr, H. F. J., Ferraccioli, F., et al. (2013). Evidence from ice shelves for channelized meltwater flow beneath the Antarctic Ice Sheet. *Nature Geoscience*, 6(11), 945–948. <https://doi.org/10.1038/ngeo1977>

- Frezzotti, M., Capra, A., & Vittuari, L. (1998). Comparison between glacier ice velocities inferred from GPS and sequential satellite images. *Annals of Glaciology*, 27, 54–60. <https://doi.org/10.3189/1998aog27-1-54-60>
- Frezzotti, M., Tabacco, I. E., & Zirizzotti, A. (2000). Ice discharge of eastern Dome C drainage area, Antarctica, determined from airborne radar survey and satellite image analysis. *Journal of Glaciology*, 46(153), 253–264. <https://doi.org/10.3189/172756500781832855>
- Han, H., & Lee, H. (2014). Tide deflection of Campbell Glacier Tongue, Antarctica, analyzed by double-differential SAR interferometry and finite element method. *Remote Sensing of Environment*, 141, 201–213. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.11.002>
- Horgan, H. J., Anandakrishnan, S., Jacobel, R. W., Christianson, K., Alley, R. B., Heeszel, D. S., et al. (2012). Subglacial Lake Whillans — Seismic observations of a shallow active reservoir beneath a West Antarctic ice stream. *Earth and Planetary Science Letters*, 331, 201–209. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2012.02.023>
- Horgan, H. J., Alley, R. B., Christianson, K., Jacobel, R. W., Anandakrishnan, S., Muto, A., et al. (2013). Estuaries beneath ice sheets. *Geology*, 41(11), 1159–1162. <https://doi.org/10.1130/g34654.1>
- Lindzey, L. E., Beem, L. H., Young, D. A., Quartini, E., Blankenship, D. D., Lee, C.-K., et al. (2020). Aerogeophysical characterization of an active subglacial lake system in the David Glacier catchment, Antarctica. *The Cryosphere*, 14(7), 2217–2233. <https://doi.org/10.5194/tc-14-2217-2020>
- Peters, L. E., Anandakrishnan, S., Alley, R. B., & Smith, A. M. (2007). Extensive storage of basal meltwater in the onset region of a major West Antarctic ice stream. *Geology*, 35(3), 251–254. <https://doi.org/10.1130/g23222a.1>
- Rignot, E., Mouginot, J., Morlighem, M., Seroussi, H., & Scheuchl, B. (2014). Widespread, rapid grounding line retreat of Pine Island, Thwaites, Smith, and Kohler glaciers, West Antarctica, from 1992 to 2011. *Geophysical Research Letters*, 41(10), 3502–3509. <https://doi.org/10.1002/2014gl060140>
- Rignot, Eric, Mouginot, J., Scheuchl, B., Broeke, M. van den, Wessem, M. J. van, & Morlighem, M. (2019). Four decades of Antarctic Ice Sheet mass balance from 1979–2017. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(4), 1095–1103. <https://doi.org/10.1073/pnas.1812883116>
- Seo, H., Han, H., & Lee, H. (2019). Velocity Anomaly of David Glacier, East Antarctica, Observed by Double-Differential INSAR. *IGARSS 2019 - 2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 00, 4149–4152. <https://doi.org/10.1109/igarss.2019.8900509>
- Smith, B. E., Fricker, H. A., Joughin, I. R., & Tulaczyk, S. (2009). An inventory of active subglacial lakes in Antarctica detected by ICESat (2003–2008). *Journal of Glaciology*, 55(192), 573–595. <https://doi.org/10.3189/002214309789470879>

- Smith, B. E., Adusumilli, S., Csathó, B. M., Felikson, D., Fricker, H. A., Gardner, A., et al. (2021). ATLAS/ICESat-2 L3A Land Ice Height, Version 5 [Data Set]. <https://doi.org/10.5067/atlas/atl06.005>
- Woodward, J., Smith, A. M., Ross, N., Thoma, M., Corr, H. F. J., King, E. C., et al. (2010). Location for direct access to subglacial Lake Ellsworth: An assessment of geophysical data and modeling. *Geophysical Research Letters*, 37(11), n/a-n/a. <https://doi.org/10.1029/2010gl042884>
- Wright, A., & Siegert, M. (2012). A fourth inventory of Antarctic subglacial lakes. *Antarctic Science*, 24(6), 659–664. <https://doi.org/10.1017/s095410201200048x>
- Siegert, MJ and Kennicutt, MC (2018) Governance of the exploration of Subglacial Antarctica. *Frontiers in Environmental Science*. 6(103), 1–6.
- Siegert, MJ and Kennicutt, MC (2018) Governance of the exploration of Subglacial Antarctica. *Frontiers in Environmental Science*. 6(103), 1–6.
- Smith, B. E., Fricker, H. A., Joughin, I. R., and Tulaczyk, S.(2009) An inventory of active subglacial lakes in Antarctica detected by ICESat (2003–2008), *J. Glaciol.* 55, 573–595.



제 4 장 참고문헌

- Atre, S. R. and Bentley, C. R.: Laterally varying basal conditions beneath ice Streams B and C, West Antarctica, *J. Glaciol.*, 39, 507–514, <https://doi.org/10.3189/s0022143000016403>, 1993.
- Bell, R. E., Studinger, M., Shuman, C. A., Fahnestock, M. A., and Joughin, I.: Large subglacial lakes in East Antarctica at the onset of fast-flowing ice streams, *Nature*, 445, 904–907, <https://doi.org/10.1038/nature05554>, 2007.
- Bell, R. E., Ferraccioli, F., Creyts, T. T., Braaten, D., Corr, H., Das, I., Damaske, D., Frearson, N., Jordan, T., Rose, K., Studinger, M., and Wolovick, M.: Widespread persistent thickening of the east antarctic ice sheet by freezing from the base, *Science*, 331, 1592–1595, <https://doi.org/10.1126/science.1200109>, 2011.
- Bentley, M. J., Hodgson, D. A., Smith, J. A., Cofaigh, C. Ó., Domack, E. W., Larter, R. D., Roberts, S. J., Brachfeld, S., Leventer, A., Hjort, C., Hillenbrand, C. D., and Evans, J.: Mechanisms of Holocene paleoenvironmental change in the Antarctic Peninsula region, *Holocene*, 19, 51–69, <https://doi.org/10.1177/0959683608096603>, 2009.
- Booth, A. D., Clark, R. A., Kulesa, B., Murray, T., Carter, J., Doyle, S., and Hubbard, A.: Thin-layer effects in glaciological seismic amplitude-versus-angle (AVA) analysis: implications for characterising a subglacial till unit, Russell Glacier, West Greenland, *Cryosphere*, 6, 909–922, <https://doi.org/10.5194/tc-6-909-2012>, 2012.
- Brisbourne, A. M., Smith, A. M., Rivera, A., Zamora, R., Napoleoni, F., Uribe, J. A., and Ortega, M.: Bathymetry and bed conditions of Lago Subglacial CECs, West Antarctica, *J. Glaciol.*, 69, 1–10, <https://doi.org/10.1017/jog.2023.38>, 2023.
- Carcione, J. M., and Gei, D.: Seismic modelling study of a subglacial lake. *Geophysical Prospecting*, 51(6), 501–515. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2478.2003.00388.x>, 2003.
- Christianson, K., Jacobel, R. W., Horgan, H. J., Anandkrishnan, S., and Alley, R. B.: Subglacial Lake Whillans — Ice-penetrating radar and GPS observations of a shallow active reservoir beneath a West Antarctic ice stream, *Earth Planet. Sc. Lett.*, 331–332, 237–245, <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2012.03.013>, 2012.
- Christner, B. C., Priscu, J. C., Achberger, A. M., Barbante, C., Carter, S. P., Christianson, K., Michaud, A. B., Mikucki, J. A., Mitchell, A. C., Skidmore, M. L., Vick-Majors, T. J., Adkins, W. P., Anandkrishnan, S., Barcheck, G., Beem, L., Behar, A., Beitch, M., Bolsey, R., Branecky, C., Edwards, R., Fisher, A., Fricker, H. A., Foley, N., Guthrie, B., Hodson, T., Horgan, H., Jacobel, R., Kelley, S., Mankoff, K. D., McBryan, E., Powell, R., Purcell, A., Sampson, D., Scherer, R., Sherve, J., Siegfried, M., and Tulaczyk, S.: A microbial ecosystem beneath the West Antarctic ice sheet, *Nature*, 512, 310–313, <https://doi.org/10.1038/nature13667>, 2014.
- Dow, C. F., Hubbard, A., Booth, A. D., Doyle, S. H., Gusmeroli, A., and Kulesa, B.: Seismic evidence of mechanically weak sediments underlying Russell Glacier, West Greenland, *Ann. Glaciol.*, 54, 135–141, <https://doi.org/10.3189/2013aog64a032>, 2013.
- Engelhardt, H., Humphrey, N., Kamb, B., and Fahnestock, M.: Physical conditions at the base of a fast moving Antarctic ice stream, *Science*, 248, 57–59, <https://doi.org/10.1126/science.248.4951.57>, 1990.
- Filina, I. Y., Blankenship, D. D., Thoma, M., Lukin, V. V., Masolov, V. N., and Sen, M. K.: New 3D bathymetry and sediment distribution in Lake Vostok: implication for pre-glacial origin and numerical modeling of the internal processes within the lake, *Earth Planet. Sc. Lett.*, 276, 106–114, <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2008.09.012>, 2008.

- Frezzotti, M., Tabacco, I. E., and Zirizzotti, A.: Ice discharge of eastern Dome C drainage area, Antarctica, determined from airborne radar survey and satellite image analysis, *J. Glaciol.*, 46, 253–264, <https://doi.org/10.3189/172756500781832855>, 2000.
- Graves, R. W.: Simulating seismic wave propagation in 3D elastic media using staggered-grid finite differences, *Bulletin of the seismological society of America*, 86, 1091–1106, <https://doi.org/10.1785/BSSA0860041091>, 1996.
- Herron, D. A.: Pitfalls in seismic interpretation: depth migration artifacts, *The Leading Edge*, 19, 1016–1017, <https://doi.org/10.1190/1.1438756>, 2000.
- Horgan, H. J., Anandakrishnan, S., Jacobel, R. W., Christianson, K., Alley, R. B., Heeszel, D. S., Picotti, S., and Walter, J. I.: Subglacial Lake Whillans — Seismic observations of a shallow active reservoir beneath a West Antarctic ice stream, *Earth Planet. Sc. Lett.*, 331–332, 201–209, <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2012.02.023>, 2012.
- Isaaks, E. H. and Srivastava, R. M.: *An Introduction to Applied Geostatistics*, Oxford University Press, Oxford, 1989.
- Johansen, T. A., Ruud, B. E., Bakke, N. E., Riste, P., Johannessen, E. P., and Henningsen, T.: Seismic profiling on Arctic glaciers, *First Break*, 29, 65–71, <https://doi.org/10.3997/1365-2397.20112st1>, 2011.
- Ju, H., Choi, Y., and Kang, S.-G.: Seismic Survey for the Subglacial Lake in Antarctica. *Geophysics and Geophysical Exploration*, 27, 244–257. <https://doi.org/10.7582/gge.2024.27.4.244>, 2024.
- Ju, H., Kang, S., Han, H., Beem, L. H., Ng, G., Chan, K., Kim, T., Lee, J., Lee, J., Kim, Y., and Pyun, S.: Airborne and Spaceborne Mapping and Analysis of the Subglacial Lake D2 in David Glacier, Terra Nova Bay, Antarctica, *J. Geophys. Res.: Earth Surf.*, 130, <https://doi.org/10.1029/2024jf008142>, 2025.
- Kim, T., Han, H., Lee, H., and Ju, H.: Monitoring Subglacial Lake Activity in the David Glacier Region, East Antarctica, Using a DInSAR Displacement Integration Approach, *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens.*, 18, 22175–22192, <https://doi.org/10.1109/jstars.2025.3601588>, 2025.
- King, E. C., Woodward, J., and Smith, A. M.: Seismic evidence for a water-filled canal in deforming till beneath Rutford Ice Stream, West Antarctica, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L20401, <https://doi.org/10.1029/2004gl020379>, 2004.
- Kirchner, J. F. and Bentley, C. R.: Seismic short-refraction studies on the Ross Ice Shelf, Antarctica, *J. Glaciol.*, 24, 313–319, <https://doi.org/10.3189/s0022143000014830>, 1979.
- Kohnen, H.: The temperature dependence of seismic waves in ice, *J. Glaciol.*, 13, 144–147, <https://doi.org/10.3189/s0022143000023467>, 1974.
- Krail, P. M. and Shin, Y.: Deconvolution of a directional marine source, *Geophysics*, 55, 1542–1548, <https://doi.org/10.1190/1.1442805>, 1990.
- Lindzey, L. E., Beem, L. H., Young, D. A., Quartini, E., Blankenship, D. D., Lee, C.-K., Lee, W. S., Lee, J. I., and Lee, J.: Aerogeophysical characterization of an active subglacial lake system in the David Glacier catchment, Antarctica, *Cryosphere*, 14, 2217–2233, <https://doi.org/10.5194/tc-14-2217-2020>, 2020.

- Livingstone, S. J., Li, Y., Rutishauser, A., Sanderson, R. J., Winter, K., Mikucki, J. A., Björnsson, H., Bowling, J. S., Chu, W., Dow, C. F., Fricker, H. A., McMillan, M., Ng, F. S. L., Ross, N., Siegert, M. J., Siegfried, M., and Sole, A. J.: Subglacial lakes and their changing role in a warming climate, *Nature Reviews Earth & Environment*, 3, 106–124, <https://doi.org/10.1038/s43017-021-00246-9>, 2022.
- Matsuoka, K., Skoglund, A., Roth, G., de Pomereu, J., Griffiths, H., Headland, R., Herried, B., Katsumata, K., Le Brocq, A., Licht, K., Morgan, F., Neff, P., Ritz, C., Scheinert, M., Tamura, T., Van de Putte, A., van den Broeke, M., von Deschwanden, A., Deschamps-Berger, C., ... Melvær, Y.: Quantarctica [Dataset]. Norwegian Polar Institute. <https://doi.org/10.21334/NPOLAR.2018.8516E961>, 2018.
- Oliveira, M. S., Henriques, M. V. C., Leite, F. E. A., Corso, G., and Lucena, L. S.: Seismic denoising using curvelet analysis, *Physica A*, 391, 2106–2110, <https://doi.org/10.1016/j.physa.2011.04.009>, 2012.
- Peters, L. E., Anandakrishnan, S., Alley, R. B., and Smith, A. M.: Extensive storage of basal meltwater in the onset region of a major West Antarctic ice stream, *Geology*, 35, 251–254, <https://doi.org/10.1130/g23222a.1>, 2007.
- Picotti, S., Vuan, A., Carcione, J. M., Horgan, H. J., and Anandakrishnan, S.: Anisotropy and crystalline fabric of Whillans Ice Stream (West Antarctica) inferred from multicomponent seismic data, *J. Geophys. Res. Sol. Ea.*, 120, 4237–4262, <https://doi.org/10.1002/2014jb011591>, 2015.
- Priscu, J. C. and Christner, B. C.: Earth's icy biosphere, in: *Microbial Diversity and Bioprospecting*, edited by: Bull, A. T., ASM Press, Washington, D.C., 130–145, <https://doi.org/10.1128/9781555817770.ch13>, 2003.
- Qin, L., Qiu, H., Nakata, N., Booth, A., Zhang, Z., Karplus, M., McKeague, J., Clark, R., and Kaip, G.: High-resolution characterization of the firn layer near the West Antarctic ice sheet divide camp with active and passive seismic data, *Geophys. Res. Lett.*, 51, e2024GL108933, <https://doi.org/10.1029/2024gl108933>, 2024.
- Rignot, E., Mouginot, J., Scheuchl, B., van den Broeke, M., van Wessem, M. J., and Morlighem, M.: Four decades of Antarctic Ice Sheet mass balance from 1979–2017, *P. Natl. Acad. Sci. USA*, 116, 1095–1103, <https://doi.org/10.1073/pnas.1812883116>, 2019.
- Robinson, E. A. and Treitel, S.: *Digital Imaging and Deconvolution*, Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, Okla, 2008.
- Rose, K. E.: Characteristics of ice flow in Marie Byrd Land, Antarctica, *J. Glaciol.*, 24, 63–75, <https://doi.org/10.3189/s0022143000014659>, 1979.
- Schlegel, R., Brisbourne, A. M., Smith, A. M., Booth, A. D., Murray, T., King, E. C., and Clark, R. A.: Subglacial bedform and moat initiation beneath Rutford Ice Stream, West Antarctica, *Geomorphology*, 458, 109207, <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2024.109207>, 2024.
- Siegfried, M. R. and Fricker, H. A.: Thirteen years of subglacial lake activity in Antarctica from multi-mission satellite altimetry, *Ann. Glaciol.*, 59, 42–55, <https://doi.org/10.1017/aog.2017.36>, 2018.
- Siegfried, M. R., Venturelli, R. A., Patterson, M. O., Arnuk, W., Campbell, T. D., Gustafson, C. D., et al. (2023). The life and death of a subglacial lake in West Antarctica. *Geology*, 51(5), 434–438. <https://doi.org/10.1130/g50995.1>

- Smith, A. M., Woodward, J., Ross, N., Bentley, M. J., Hodgson, D. A., Siegert, M. J., and King, E. C.: Evidence for the long-term sedimentary environment in an Antarctic subglacial lake, *Earth Planet. Sc. Lett.*, 504, 139–151, <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2018.10.011>, 2018.
- Smith, B. E., Fricker, H. A., Joughin, I. R., and Tulaczyk, S.: An inventory of active subglacial lakes in Antarctica detected by ICESat (2003–2008), *J. Glaciol.*, 55, 573–595, <https://doi.org/10.3189/002214309789470879>, 2009.
- Smith, B. E., Fricker, H. A., Gardner, A. S., Medley, B., Nilsson, J., Paolo, F. S., Holschuh, N., Adusumilli, S., Brunt, K., Csatho, B., Harbeck, K., Markus, T., Neumann, T., Siegfried, M. R., and Zwally, H. J.: Pervasive ice sheet mass loss reflects competing ocean and atmosphere processes, *Science*, 368, 1239–1242, <https://doi.org/10.1126/science.aaz5845>, 2020.
- Stearns, L. A., Smith, B. E., and Hamilton, G. S.: Increased flow speed on a large East Antarctic outlet glacier caused by subglacial floods, *Nat. Geosci.*, 1, 827–831, <https://doi.org/10.1038/ngeo356>, 2008.
- Thoma, M., Grosfeld, K., Smith, A. M., and Mayer, C.: A comment on the Equation of State and the freezing point equation with respect to subglacial lake modelling, *Earth Planet. Sc. Lett.*, 294, 80–84, <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2010.03.005>, 2010.
- Tulaczyk, S., Mikucki, J. A., Siegfried, M. R., Priscu, J. C., Barcheck, C. G., Beem, L. H., Behar, A., Burnett, J., Christner, B. C., Fisher, A. T., Fricker, H. A., Mankoff, K. D., Powell, R. D., Rack, F., Sampson, D., Scherer, R. P., and Schwartz, S. Y.: WISSARD at Subglacial Lake Whillans, West Antarctica: scientific operations and initial observations, *Ann. Glaciol.*, 55, 51–58, <https://doi.org/10.3189/2014aog65a009>, 2014.
- Voigt, D. E., Peters, L. E., and Anandakrishnan, S.: ‘Georods’: the development of a four-element geophone for improved seismic imaging of glaciers and ice sheets, *Ann. Glaciol.*, 54, 142–148, <https://doi.org/10.3189/2013aog64a432>, 2013.
- Wingham, D. J., Siegert, M. J., Shepherd, A., and Muir, A. S.: Rapid discharge connects Antarctic subglacial lakes, *Nature*, 440, 1033–1036, <https://doi.org/10.1038/nature04660>, 2006.
- Winsborrow, M. C. M., Clark, C. D., and Stokes, C. R.: What controls the location of ice streams?, *Earth-Sci. Rev.*, 103, 45–59, <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2010.07.003>, 2010.
- Woodward, J., Smith, A. M., Ross, N., Thoma, M., Corr, H. F. J., King, E. C., King, M. A., Grosfeld, K., Tranter, M., and Siegert, M. J.: Location for direct access to subglacial Lake Ellsworth: an assessment of geophysical data and modeling, *Geophys. Res. Lett.*, 37, L11501, <https://doi.org/10.1029/2010gl042884>, 2010.
- Wright, A. and Siegert, M.: A fourth inventory of Antarctic subglacial lakes, *Antarct. Sci.*, 24, 659–664, <https://doi.org/10.1017/s095410201200048x>, 2012.
- Yan, S., Blankenship, D. D., Greenbaum, J. S., Young, D. A., Li, L., Rutishauser, A., Guo, J., Roberts, J. L., van Ommen, T. D., Siegert, M. J., and Sun, B.: A newly discovered subglacial lake in East Antarctica likely hosts a valuable sedimentary record of ice and climate change, *Geology*, 50, 949–953, <https://doi.org/10.1130/g50009.1>, 2022.
- Yilmaz, Ö.: *Seismic Data Analysis: Processing, Inversion, and Interpretation of Seismic Data*, Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, Okla, 2001.
- Zechmann, J. M., Booth, A. D., Truffer, M., Gusmeroli, A., Amundson, J. M., and Larsen, C. F.: Active seismic studies in valley glacier settings: strategies and limitations, *J. Glaciol.*, 64, 796–810, <https://doi.org/10.1017/jog.2018.69>, 2018.



주 의

1. 이 보고서는 극지연구소에서 수행한 기본연구사업의 연구결과보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 극지연구소에서 수행한 기본연구사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.