

BSPN24020-067-12

미래 우주탐사 및 우주자원 활용 기술 연구센터
Future Space Exploration and In-Situ Resource Utilization
Technology Research Center

2024. 12.

극 지 연 구 소

제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “미래 우주탐사 및 우주자원 활용 기술 연구센터” 과제의 최종보고서로 제출합니다.

2024. 12. 18.

연구책임자 : 이 유 경

참여연구원 : 이 주 한, 정 창 현
" : 윤 동 진, 김 형 권
" : 도 학 원, 이 준 혁
" : 최 용 회, 김 기 태
" : 이 두 형, 김 문 교
" : 양 준 영, 장 승 연

2024년도 우주분야 전문인력양성사업 단계보고서 (평가용, 위탁과제용)

							양식A101-4
① 부처사업명(대)	거대 과학연구개발사업			④ 보안등급(보안, 일반)	일반		
② 사업명(중)	우주기술개발사업			⑤ 과제성격(기초, 응용, 개발)	기초		
③ 세부사업명(소)	우주분야 전문인력양성사업						
⑥ 위탁과제명	국 문	(공동-02) 미래 우주탐사 및 우주자원 활용 기술 연구센터					
	영 문	Future Space Exploration and In-Situ Resource Utilization Technology Research Center					
⑦ 위탁과제연구기관명	한국해양과학기술원 부설 극지연구소			⑧ 사업자 등록번호	134-82-06870		
⑨ 주관연구책임자	성 명	이유경		국가연구자번호	10057287		
	전 공	생명과학		직급(직위)	책임연구원		
	소속부서	KOPRI-NPI협력센터		전자우편	yklee@kopri.re.kr		
	전 화	032-760-5530		휴대전화	010-5800-8623		
⑩ 연구개발비 현황(단위: 천원)							
년 도	정부 출연금 (A)	기업체부담금			정부외출연금 (B)	합계 G=(A+B+E)	상대국 부담금 (F)
		현금 (C)	현물 (D)	소계 E=(C+D)			
1차년도	85,500					85,500	
2차년도	85,500					85,500	
3차년도	475,000					475,000	
4차년도	199,500					199,500	
5차년도	104,500					104,500	
6차년도							
7차년도							
8차년도							
9차년도							
10차년도							
합계	950,000					950,000	
⑪ 총연구기간	2022. 04. 11 - 2026. 12. 31 (57 개월)						
⑫ 다년도연구기간	2022. 04. 11 - 2024. 12. 31 (33 개월)						
⑬ 당해연도연구기간	2024. 01. 01 - 2024. 12. 31 (12 개월)						
⑭ 참여기업 수	중소기업		중견기업		대기업		계
⑮ 국제공동연구	국가명	상대국 연구기관수		상대국 연구개발비		상대국연구책임자수	
⑯ 실무담당자	성 명	김문교	휴대전화	010-3787-0405	전자우편	lunar@kopri.re.kr	
관련 법령 및 규정과 모든 지시 사항을 준수하면서 이 국가연구개발사업을 성실히 수행하고자 아래와 같이 연구개발계획서(연구개발제안서)를 제출합니다. 아울러 이 연구개발계획서(연구개발제안서)에 기재된 내용이 사실임을 확인하며, 만약 사실이 아닌 경우 선정 취소, 협약 해약 등의 불이익도 감수하겠습니다. 주관연구책임자 : (직인생략) 주관연구기관장 : (직인생략) 과 학 기 술 정 보 통 신 부 장 관 귀 하							

○ 공동연구개발기관 등 현황 (해당시 작성)

공동연구개발기관 등 (해당시 작성)	기관명	책임자	직위	휴대전화	전자우편	비고	
						역할	기관유형
공동연구개발기관	인천대학교	김형근	조교수	010-9669-3613	hgkim@inu.ac.kr	항법 제어	대학교
	전북대학교	신의섭	교수	010-2865-2168	esshin@jbnu.ac.kr	재진입 캡슐	대학교
	한국뉴욕주립대	최종성	조교수	010-2354-5536	jongseong.choi@stonybrook.edu	정밀 항법	대학교
	항공우주산학융합원	고찬영	전임	010-5106-5134	cyko0908@iiaici.or.kr	메탈 3D 프린터	산업체
	한국해양과학기술원 부설 극지연구소	이유경	책임급	010-5800-8623	ykleee@kopri.re.kr	달환경 장비 테스트	출연연
	한국원자력연구원	류동석	책임급	010-9633-1218	sayryu@kaeri.re.kr	탐사 로버	출연연
	한국지질자원연구원	김경자	책임급	010-5849-1002	kjkim@kigam.re.kr	극지환경 시험	출연연
	한국우주기술훈협회	김영민	부회장	010-5618-3446	jhsong@jasp.or.kr	기술 사업화	산업체
	용비에이티	김현형	이사	010-6217-1704	hhkim@yongbeeat.com	정밀 항법 기술 지원	산업체
	루다시스	김지환	연구소장	010-5014-6080	remind@rudasys.co.kr	기술 지원	산업체
	다윈프릭션	주영찬	선임급	010-9122-7794	treeman77@dawinf.co.kr	로버기술지원	산업체
	네오스펙	강대희	책임급	010-2600-2396	dhkang@neospec.kr	기술 지원	산업체
위탁연구개발기관	-	-	-	-	-	-	-
연구개발기관 외 기관	인천시	안광호	책임급	010-8075-4509	andawo@korea.kr	사업 지원	정부
	한국항공우주연구원	원수희	책임급	010-3242-6108	shwon@kari.re.kr	기술 지원	출연연
	(주)비츠로넥스텍	현성윤	책임급	010-4046-4787	syhyun@vitzrotech.com	기술 지원	산업체
	한양이엔지	지상연	책임급	010-2277-2751	sangyeon@hanyangeng.co.kr	기술 지원	산업체
	휴니드테크놀로지스	정병승	책임급	010-7500-6903	byoungseungjung@huneed.com	기술 지원	산업체
	LIG넥스원	조용주	책임급	010-8285-9375	choyoungju@lignex1.com	기술 지원	산업체

참고사항 (공동연구개발기관 정의)

- 공동연구개발기관 : 주관연구개발기관과의 연구개발과제협약에 따라 연구개발과제를 분담하여 공동으로 수행하는 연구개발기관 (예시 : 수요기업, 국외 연구개발기관 등)
 - ※ 혁신법 시행 전, ‘국가연구개발사업의 관리 등에 관한 규정’ 에서 정의한 ‘협동연구기관(세부과제)은 공동연구개발기관에 포함되지 않음
- 위탁연구개발기관 : 주관연구개발기관으로부터 연구개발과제의 일부(특수한 전문지식 또는 기술이 필요한 부분으로 한정한다)의 위탁을 그 소관 중앙행정기관의 장의 승인을 받아 수행하는 연구개발기관
- 연구개발기관 외 기관 : 상기에서 언급한 기관 외의 기관 (예시 : 지방자치단체, 연구개발성과를 활용하는 기관 등)

〈 요약 문 〉

양식A201

연구개발 목표 (500자 내외)	본 과제는 달/화성 탐사 및 자원 활용을 위하여 개발된 우주탐사 장비의 성공적인 활용을 위하여 저온 모사 환경과 극지 현장에서 우주탐사 장비의 테스트를 시행할 우수 인력양성을 목표로 한다. 국내 우주개발 로드맵에 따라 우주탐사 및 자원 활용기술의 필요성이 증대되고 있으며, 우주탐사는 고비용 기술집약이 요구되므로 성공적인 시행을 위하여 사전 테스트가 매우 중요하다. 본 과제에서는 우주탐사 장비의 사전 테스트 전문 인력 양성을 목표로 하며 이를 위해 우주 환경 중 저온 환경을 모사한 시설을 구축하고 극지 현장 시연을 수행하고자 한다. 이 과정에서 우주탐사의 특수성을 이해하고 탐사 장비의 개발 과정 이해에 기반한 전문적인 사전 테스트를 시행하는 인재 양성을 위한 교육을 시행한다. 이를 통해 최종적으로 국가 우주개발 로드맵 실현에 즉시 투입 가능한 인력을 확보하고자 한다.			
연구개발 내용 (1000자 내외)	우주탐사 및 자원 활용을 위하여 달/화성 현장에서 토양을 채취하는 드릴링은 필수 기술이다. 우주에서 지속 가능한 자원탐사를 위해서는 물이 공급되어야 하며, 따라서 달/화성의 극지가 탐사 후보지로 유력하다. 그러나 극지는 토양이 얼어있는 동토이며 저온 환경이라 일반 드릴링 기술을 적용할 수 없다. 따라서 본 과제에서는 달/화성 표면 드릴링을 위한 테스트베드 개념설계, 상세설계, 시험 절차 설계를 수립하고 달환경 모사 초저온실 구축하여 장비의 사전 테스트 및 드릴링을 시행하며, 극지 현장에서 장비를 테스트하고자 한다. 이를 이해 운용 장비별 시험 절차와 통합 시험 절차 설계, 현장 시험 장비 운송 및 운용 계획 수립, 시험 장비 운송 및 인프라 활용 지원 등을 통해 궁극적으로 극지 환경에서 자원조사/추출을 원격 으로 시연하고자 한다. 또한 다년간 극지에서 수행한 동토 채굴 장비 운용 노하우를 활용해 드릴링 장비 개발 기술 고도화에 협력하고자 한다. 한편 우주탐사 장비를 통한 지구 미생물의 달/화성 오염방지는 우주탐사의 필수요건이다. 따라서 본 과제에서는 개발 장비의 활용과 목적에 맞는 오염방지 및 모니터링 프로토콜을 개발하여 오염방지 전략 확립하고자 한다.			
활용계획 및 기대효과 (500자 내외) (응용분야 및 활용범위 포함)	국가 우주탐사 로드맵과 연계되어 개발된 ISRU 및 우주 탐사 관련 장비의 성공적인 운영을 가능하게 하는 사전 테스트 기술을 개발함으로써 국가 우주 개발 분야에 기여한다. 달/화성 탐사는 수많은 모의 시연과 모사 현장에서의 실증을 필요로 한다. 본 과제는 이와 같은 모사 실증을 가능하게 하는 우수한 인재 양성에 기여할 것이다. 또한 우주 기술과 미래형 자원 이용 분야를 세계적으로 주도하여 국가 위상 제고에 이바지할 것으로 기대된다.			
국문핵심어 (8개)	우주 탐사	ISRU	달	화성
	극지	드릴링	테스트베드	환경 모니터링
영문핵심어 (8개)	Space exploration	ISRU	Moon	Mars
	Polar region	Drilling	Test bed	Environmental monitoring

○단계별 연구개발 목표와 내용

연구개발 목표 및 내용	1단계	목표	트랙형 교육체계 설계와 극지환경재현 실용화 센터 내 달환경 모사 초저온실 구축
		내용	○ 우주 및 극지환경 탐사 트랙을 위해 기존 극지과학개론 강의와 더불어 극한 환경 탐사설계, 우주탐사와 극지환경 강의를 신설 ○ 극지연구소 극지환경재현 실용화 센터 내 영하 70℃ 이하의 달환경 모사 초저온실을 구축하고, 이후 냉동 시험실 내부에 저진공 챔버를 설치하여 저온과 진공 테스트 환경을 구현하도록 함
	2단계	목표	달환경 모사 초저온실 활용 장비 테스트와 극지 현장 장비 테스트
		내용	○ 구축된 달환경 모사 초저온실을 활용하여 영하 70℃의 공간에서 외계행성(달, 화성) 탐사 장비 테스트 실시 ○ 극지 현장에서 장비 테스트 실시

〈 연구 분야 〉

										양식A103
코드구분	중심분야		관련분야1		관련분야2		관련분야3		관련분야4	
	코드	비중	코드	비중	코드	비중	코드	비중	코드	비중
국가과학기술표준분류	EA1301	40 %	EA1302	20 %	EA1304	20 %	EA0501	10 %	ND0102	10 %
국가과학기술표준분류 (적용분야)	X06	100 %		%		%		%		%
과학기술분야분류	G30503	30 %	G30502	30 %	G30414	20 %	G31201	10 %	G13110	10 %
6T 기술분류	040212	40 %	040111	20 %	040114	15 %	040314	15 %	040213	10 %
NTRM 분류	B050502	40 %	B050505	20 %	B050504	15 %	B050501	15 %	B03031 1	10 %
원천기술 개발분야	0624	45 %	0621	20 %	0622	15 %	0142	10 %	0522	10 %

〈 보안 등급의 분류 및 결정사유 〉

보안 등급 분류 (선택)	보안	일반
	N	Y
결정 사유	연구책임자 의견	연구기관 자체 검토결과
	보안과제 해당없음	보안과제 해당없음

< 목 차 >

I. 전 단계 연구개발 실적

1. 연구개발 목표 및 평가항목별 성과	1
2. 추진내용 및 연구개발결과	2
부록 1. 우주조약	33
부록 2. NASA 중간 지침 - 달 탐사 임무에서의 행성 보호	36
부록 3. NASA 중간 지침 - 화성 탐사 임무에서의 행성 보호	41
부록 4. COSPAR 행성 보호 정책	47
부록 5. MARS2020 화성임무 시 미생물 오염 방지 전략	48
부록 6. 과산화수소 증기를 활용한 미생물 살균 전략	55

II. 차기단계 연구개발 계획

1. 연구개발 목표 및 평가항목	56
2. 연구개발 내용, 방법, 추진체계 및 일정	57
3. 참여인력 계획	63
4. 연구개발비 집행계획	64
5. 연구에 활용 예정인 주요 장비 현황	67
6. 사업화 추진 계획(해당시 작성)	67
7. 연구개발 성과의 활용방안 및 기대효과	68

III. 당초 연구계획 대비 주요 변경사항

1. 전 단계 실적 부분	69
2. 차기단계 계획 부분	69

첨부1 연구개발목표의 달성도 증빙	71
첨부2 자체평가의견서	74
첨부3 연구개발결과 활용계획서	77

1. 전 단계 연구개발 실적

1. 연구개발 목표 및 평가항목별 성과

1-1. 연구개발 목표

최종목표	달/화성 탐사 장비 테스트 전문 우주기술 인력양성
세부목표	1. 외계행성(달, 화성) 표면 드릴링 테스트베드 개념 및 상세설계 2. 테스트베드 시험 절차 설계 및 달환경 모사 초저온실 구축 3. 극지 현장 드릴링 시연
연차별목표	○ 1차년도 : 외계행성(달, 화성) 표면 드릴링 테스트베드 개념설계 ○ 2차년도 : 테스트베드 상세설계 및 시험 절차 설계 ○ 3차년도(단계) : 극지환경재현 실용화 센터 내 달환경 모사 초저온실 구축 ○ 4차년도 : 달환경 모사 초저온실 활용 장비 테스트 ○ 5차년도(최종) : 극지 현장 장비 테스트

1-2. 평가항목별 성과

평가항목	가중치 (%)	관련 세부목표	연차	연차별 목표 (조건/환경)	실적요약	달성도 (%)	관련 증빙
(정성) 외계행성(달, 화성) 표면 드릴링 테스트베드 설계	10	1,2	1차년도	테스트베드 개념설계	• 테스트베드 개념 설계	100	
			2차년도	테스트베드 상세설계 및 시험 절차 설계	• 월면토 제조시설 자료조사 • 테스트베드 상세설계 (드릴 모의시험을 위한 진공챔버 제작)	100	
(정성) 테스트베드 달환경 모사 초저온실 구축	20	2	2차년도	lcy-soil and ice 샘플 제조	• lcy-soil and ice 샘플 제조	100	
			3차년도 (단계)	테스트베드 환경조성 장비 도입	• 테스트베드 환경조성 장비 도입	100	
(정성) 달환경 모사 초저온실 활용 장비 테스트	30	2	3차년도 (단계)	극지환경재현 실용화 센터 내 달환경 모사 초저온실 구축	• 극지 연구소 극지환경재현실용화 센터 내 달 환경 모사실 구축	100	
(정성) 극지 현장 장비 테스트	30	3	3차년도 (단계)	테스트 조건에 맞는 극지 현장 조사	• 극지 현장 시연 후보지 선정 • 극지 현장 시연을 위한 절차 설계	100	
(정량) 미생물 오염 측정 프로토콜 1건 개발	10	3	3차년도 (단계)	미생물 오염 방지 프로토콜 설계 및 구축	• 미생물 오염 개념 확립 • 미생물 오염 관련 자료조사 및 전략 수집 • 미생물 오염 방지 프로토콜 개발	100	
합계	100						

2. 추진내용 및 연구개발결과

2-1. 추진내용 및 연구개발결과

연구개발 시제 1 극지 현장 시험 절차 설계 시연 계획수립

■ 극지 현장 시연 후보지 선정

● 노르웨이 스발바르 군도 롱이어비엔

- 달 탐사 장비(무인지상이동체 혹은 연구측정장비)의 모사 실험 및 현장 시연을 위해 춥고 건조한 기후를 가진 시연 후보지 선정이 필요함. 시연 후보지는 달 표면과의 유사성이 있고, 로버의 이동성 평가를 위해 경사도가 있는 지역을 고려
- 노르웨이 스발바르의 롱이어비엔 지역($78^{\circ} 9'2'' - 78^{\circ} 13'54''$ N, $15^{\circ} 28'3'' - 15^{\circ} 54'22''$ E)은 연평균 6°C 의 기온과 190 mm의 강수량을 가진 춥고 건조한 툰드라 기후를 보이며, 지표면이 거칠고 경사도가 있는 지형으로 구성된 지역으로 달 탐사 장비의 모사 실험 및 현장 시연을 위한 장소로 적합함 (그림 1)

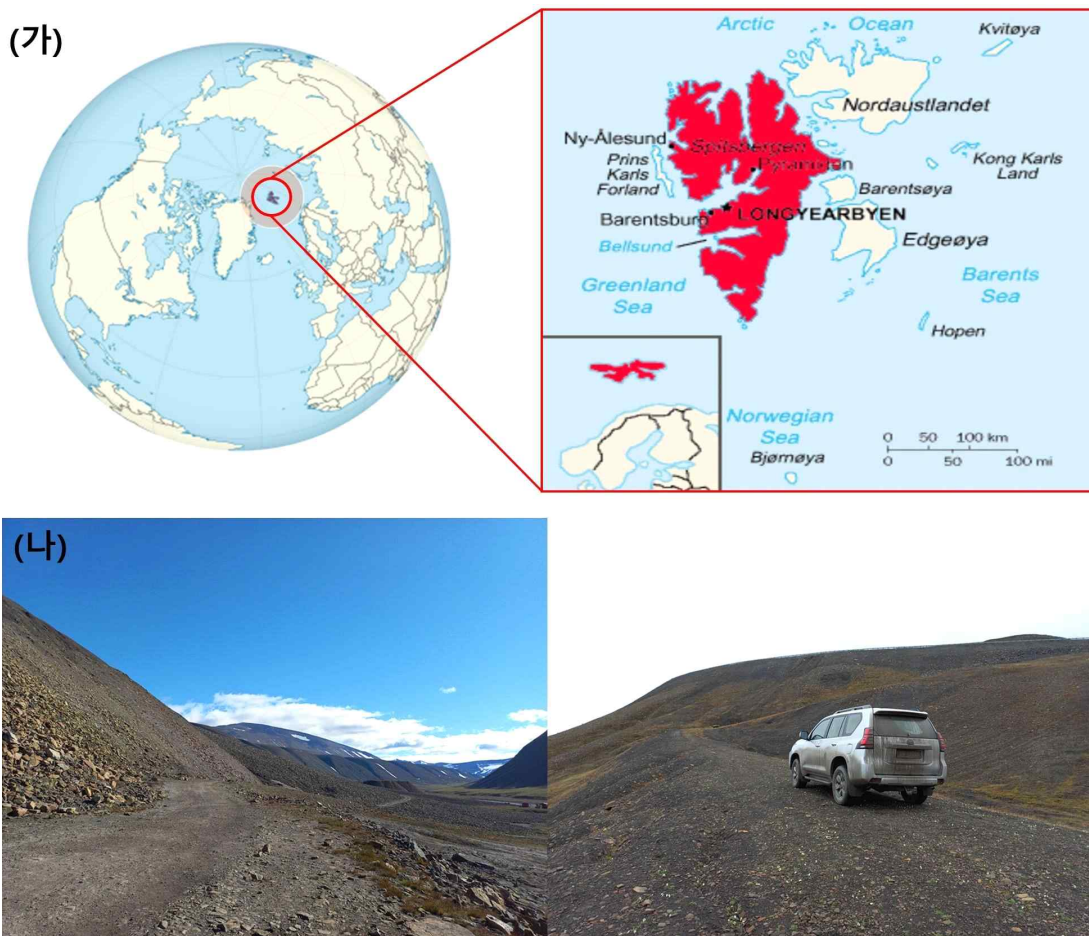


그림 1. 극지 현장 시연 후보지 (가) 스발바르 롱이어비엔의 지리적 위치 표시
<https://commons.wikimedia.org/> (나) 시연 후보지의 현장 사진

■ 극지 현장 시연을 위한 가이드라인

● 연구 장비운송 및 운용 방안 구축

- 북극 현장 시험 시연지까지 장비를 운송하는 데 여러 경로가 있으며, 운송 루트에 따라 소요되는 비용과 시간이 크게 다르므로 연구자들의 예산과 시연 계획을 고려하여 적절한 수송 방법을 선택할 수 있도록 가이드라인을 구축함
- 인천에서 롱이어비엔까지의 장비 수송은 운송 루트에 따라 3가지 방법이 있으며, 소요 비용 및 시간뿐만 아니라 수송이 허용되는 장비 규격에도 차이가 있으므로 적절한 방법을 고려하는 것이 필요함 (표 1)

표 1. 극지 시연 현장까지의 장비 운송을 위한 운송 루트별 소요 기간 및 비용 정리

운송 경로	소요 기간	비용 (왕복)	비고
1) 항공 경로 인천→오슬로→롱이어비엔	약 10일	약 2000 만원	• 항공기 컨테이너 규격으로 인하여 운송 장비의 높이는 157 cm로 제한됨
2) 항공 및 해상 경로 인천→오슬로→트롬소→롱이어비엔	약 30일	약 1420 만원	• 항공기 컨테이너 규격으로 인하여 운송 장비의 높이는 157 cm로 제한됨 • 구간별 운송 경로 상이
3) 해상 경로 인천→오슬로→롱이어비엔	약 90일	약 670 만원	• 해상 상황에 따라 운송 기간이 크게 달라질 수 있음

● 극지 현장 시험을 위한 사전 준비사항

- 북극현장활동의 위험성을 고려하여 연구자들의 안전을 위한 극지안전훈련 필요. 온라인 이론 교육인 극지일반교육과 실습 교육인 육상안전훈련을 수강 (그림 2). 극지연구소 홈페이지 (<https://www.kopri.re.kr>)의 인프라 -> 극지로 가는 길 -> 극지안전훈련을 통해 신청할 수 있으며, 교육 인원과 일정이 제한되어 있으므로 현장활동 시기를 고려하여 신청 (그림 3)

극지일반교육	
• 정원: (없음) • 주관 및 교육장소: 극지연구소 • 교육방식: 이론교육 및 온라인교육 • 교육대상: 남·북극 활동자	• 교육시간: 10:00 ~ 11:30 • 교육내용: - 극지인프라 이용 및 생활예절 안내 - 극지환경보호 및 관련 법률 안내
육상안전훈련	
• 정원: 4-20명 • 주관 및 교육장소: 극지연구소 • 교육방식: 실습교육 • 교육대상: 남·북극 활동자	• 교육시간: 13:00 ~ 17:00 • 비용 : 무료 • 교육내용: - 야외활동수칙, GPS사용법 - 무선통신, 생존용품 사용법 등

그림 2. 극지연구소에서 주관하는 극지안전훈련 내용

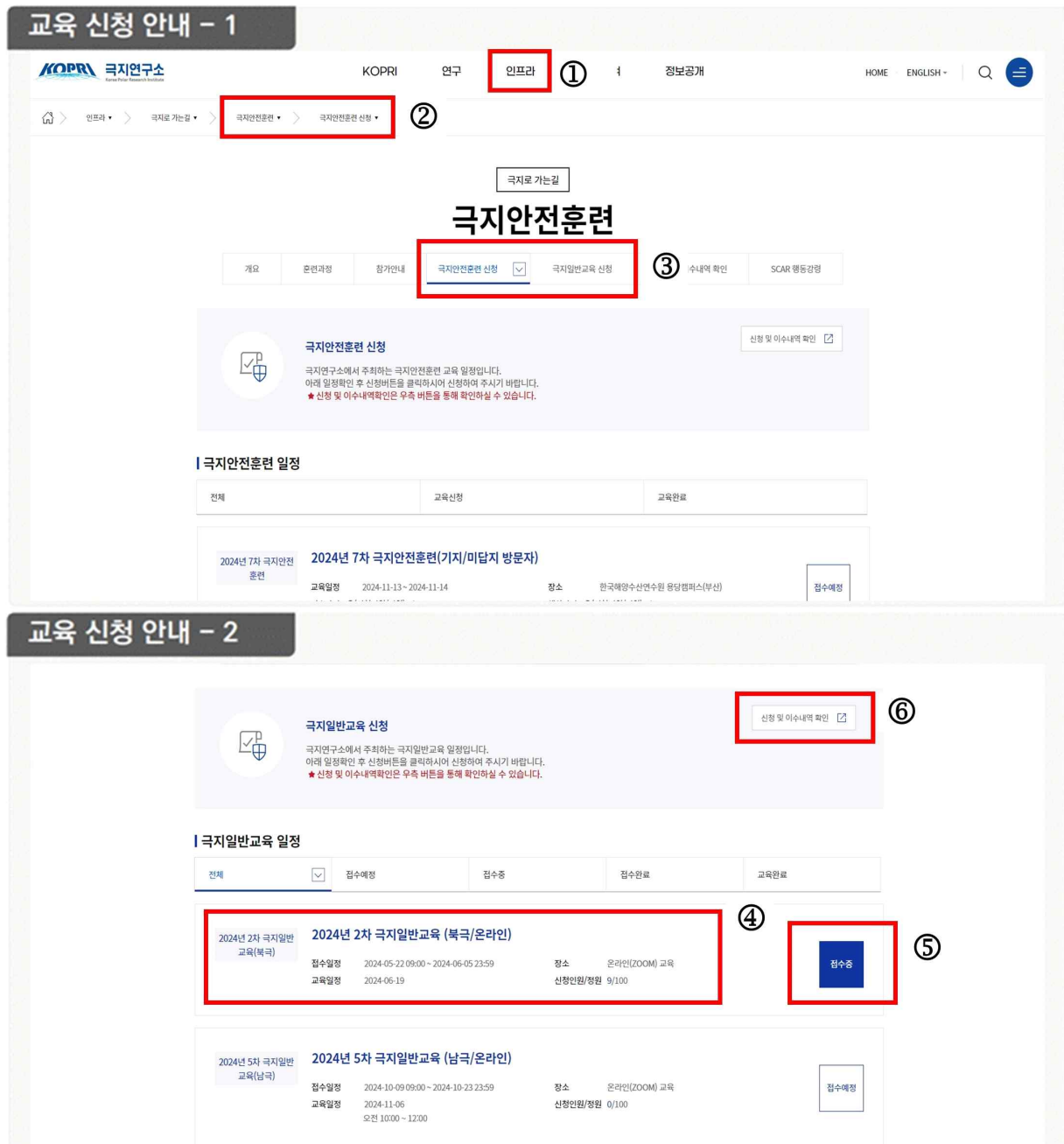


그림 3. 극지안전훈련 및 극지일반교육 신청 방법

- 북극 스발바르에서 수행되는 연구, 현장 조사 및 모니터링을 비롯한 모든 프로젝트는 Research In Svalbard (RIS, <https://www.researchinsvalbard.no/>) 포털에 등록되어야 하며, 포털 접속 후 GO TO -> My page -> Register New Project를 통해 프로젝트와 연구진의 정보를 신청 및 등록 가능 (그림 4)
- 현지 숙소와 시연 후보 장소 간 연구 장비 운송을 위하여 임차 차량을 통해 현지 운송 가능. 원활한 탐사 장비의 운송을 위하여 현지 차량 임차가 필요하며, 현지 업체(<https://www.autorent.no/>)에서 탐사 장비 크기를 고려하여 운송에 적합한 차량을

선택

- 현장 시연 후보자인 스발바르 롱이베이엔의 정책에 따라 마을 외부 이동 시 총기 소지가 의무화하므로 원활한 현장 활동을 위한 총기 대여 필요 (총기 소지 의무에 관한 스발바르 정책, <https://www.sysselimesteren.no/en/new-rules-for-lending-and-rental-of-firearms/>). 총기 대여 시 스발바르 정부의 총기사용 허가증이 필요하며 안전교육 진행이 선행되어야 하나, 군 복무 관련 서류 제출 시 교육 없이 발급 가능. 총기사용 허가증 발급에 최대 40일 정도까지 소요될 수 있음

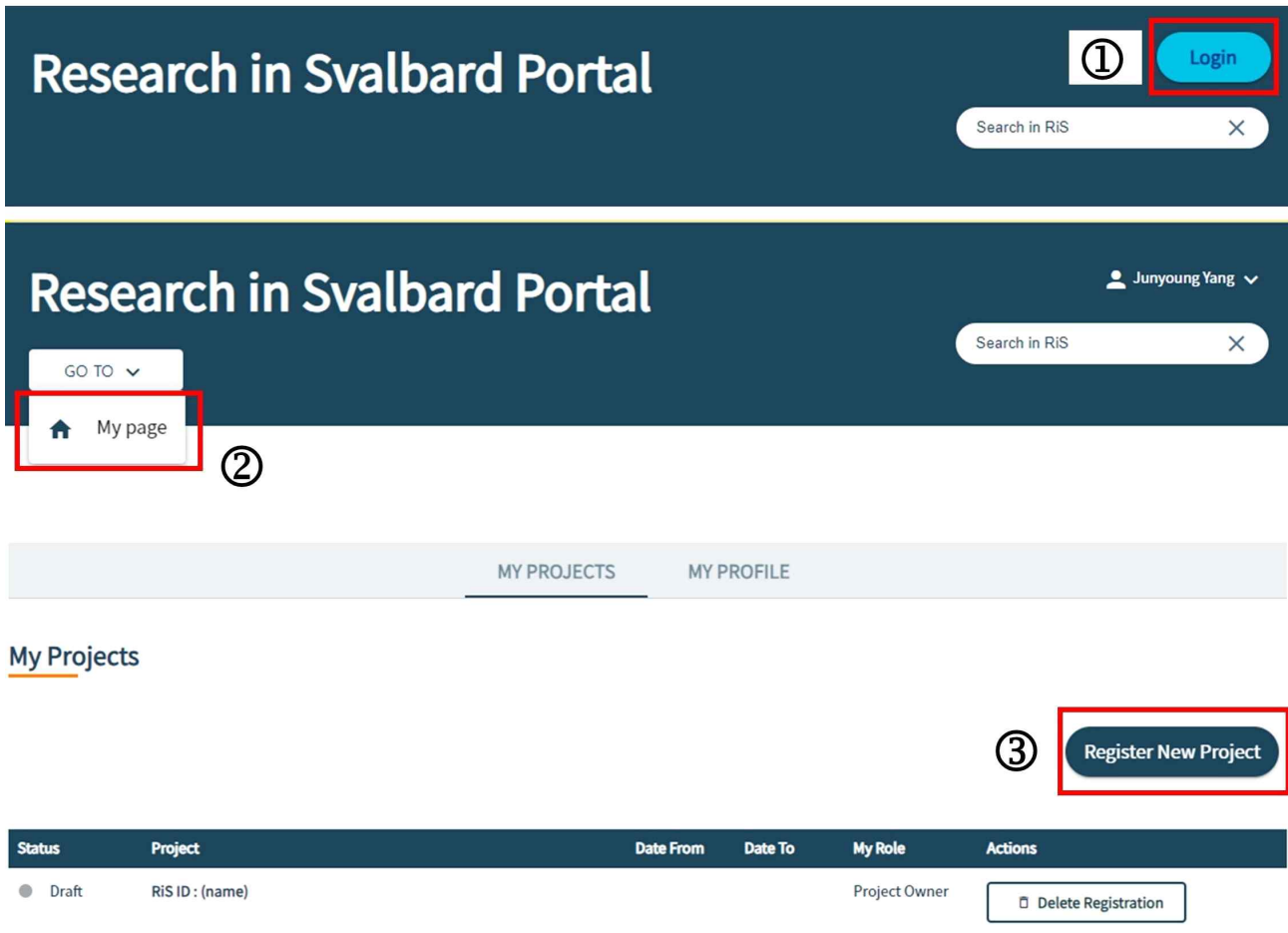


그림 4. RIS 등록 화면

■ 극지환경재현실용화 센터 내 달 환경 모사실 구축

● 시설장비 용도

- 미래 우주탐사 및 우주자원 활용 기술 연구센터에서 개발하는 달 탐사용 다목적 우주탐사 로버 시스템과 수전해 추력기 시제품을 우주환경 조건에서 시험하는 데 활용 (그림 5, 6)

● 성능 및 규격

- 기본 냉각 시스템 (Main Compressor + Sub Compressor) x 1 sets. 하나의 냉각 시스템만으로 챔버 내부의 온도를 영하 70°C 이하로 유지. Sub Compressor의 증발라인을 Main Compressor 응축라인과 열교환을 시켜 더운 여름철에도 제품의 안전성을 확보. 영하 70°C 도달 시 Main Compressor의 냉동 시스템 저압 압력이 $2\text{kg}/\text{cm}^2$ 이상유지. 장비의 안정성을 위해 Sub Compressor와 Main Compressor의 비율을 약 1:3으로 사용. 24시간 365일 사용하는 장비로 챔버 내부의 온도를 항상 영하 70°C 이하로 유지
- 냉각 성능은 상온에서 영하 70°C까지 냉각되는데 7시간 이하가 소요. 냉동고 내부의 온도 분포 편차 $\pm 7^\circ\text{C}$ 이내 (단, 최저점은 영하 70°C 이하). 냉동고 내부의 기동 온도 편차 $\pm 5^\circ\text{C}$ 이내. 냉기 손실을 위하여 출입 도어 상단에 에어커튼을 설치. 초고밀도우레탄을 적용한 초저온용 냉동판넬을 사용하여 보존력을 유지
- 온도 표시는 챔버 입구 전실룸에 별도의 컨트롤함을 장착하여 온도디스플레이, 제상설정, 온도설정 등이 가능. DIGITAL DISPLAY로 온도 유지 상태를 사용자가 정확하고 쉽게 알 수 있음
- 냉매 : 요구된 성능(효율)을 발휘할 수 있는 특수 혼합냉매, 친환경 냉매를 사용
- 온도센서 : PT 100 Ω 센서
- ALARM SYSTEM : 온도 및 장비에 문제가 발생시 ALARM 램프 및 부저가 발생하며, 온도 및 장비에 이상 발생 시 문자 알람 서비스 기능
- 전면 투시창을 2 SET 설치
- WI-FI 송수신 기능 : 냉동실 내부 실험장비와 냉동실 외부에서 무선통신(WI-FI) 연결이 가능
- 냉동실의 출입문은 방풍실을 설치하고 바닥은 결빙되지 않도록 열선을 설치
- 자동제어 : PLC Program을 사용하여야 하며, 냉동기의 운전상태와 알람 및 화재 경보 관련 접점 제공을 통해 모든 운전기기의 상태값을 제어

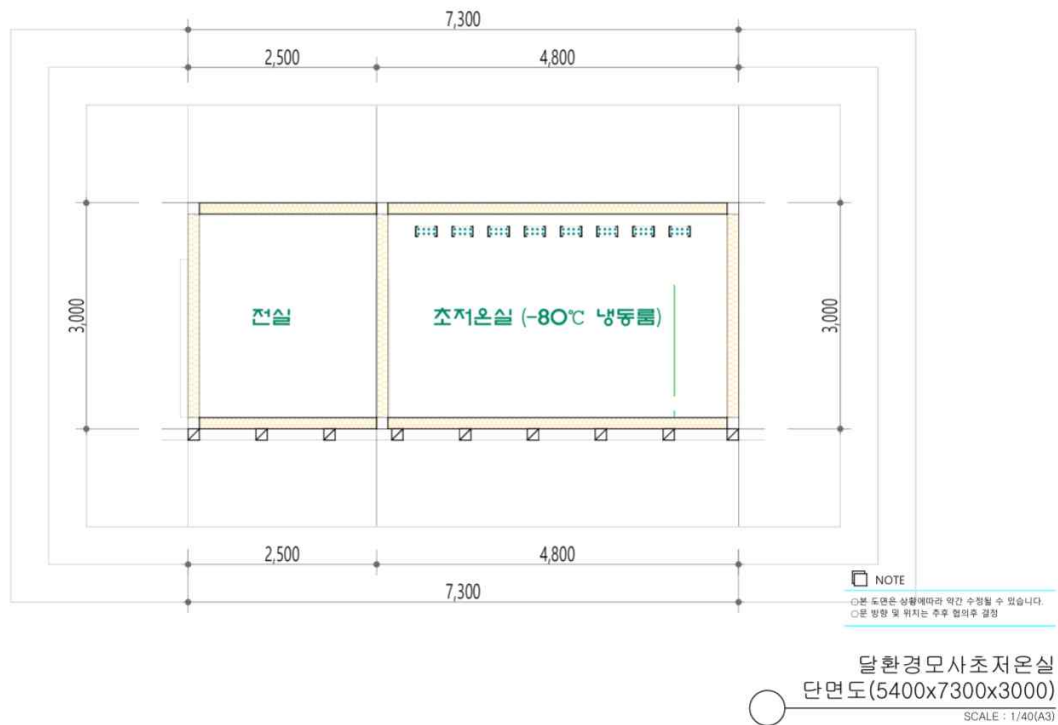


그림 5. 단면도

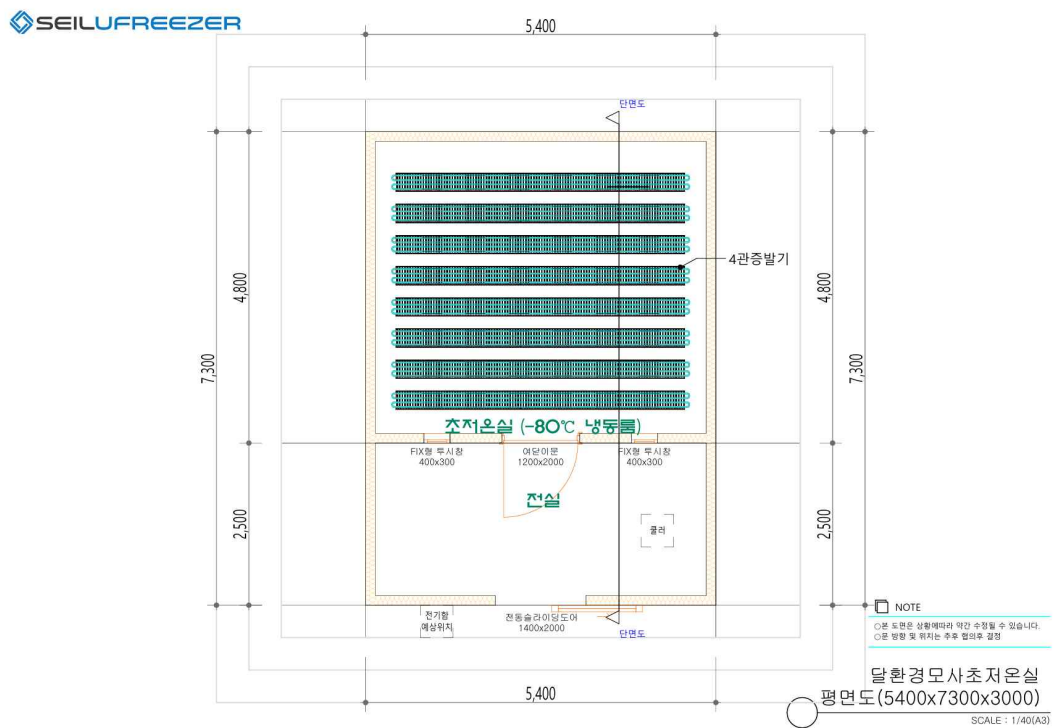


그림 6. 평면도

● 사업(연구) 부합성

- 본 과제에서는 달/화성 탐사에 필요한 다목적 우주탐사 로버 시스템과 수전해 추력기 시제품을 설계/제작하여 극지 조건과 우주환경 조건에서 시험하는 것을 목표로 함
- 달은 북위 85도를 기준으로 영하 123℃ ~ 영하 43℃의 저온 환경이므로 달에서 사용할 탐사 장비는 저온 환경에서 정상 작동 여부를 테스트해야 함
- 본 과제에서 극지환경 재현 실용화센터내에 설치하고자 하는 달환경 모사 초저온실은 영하 70℃에서 로버 시스템과 수전해 추력기 시제품 성능을 시험할 우주 환경 조건으로 설치가 반드시 필요함

● 국가전략적 필요성

- 국가 우주탐사 로드맵과 연계되어 개발하는 우주 탐사 장비의 테스트베드 필요
- 우주기술개발사업의 단위과제인 “미래 우주탐사 및 우주자원 활용 기술 연구센터” 과제의 원활한 수행을 위하여 달탐사 장비를 초저온에서 시험 운전할 수 있는 연구 시설 필요
- 극지활동 진흥법('21.10 시행) 제6조에 근거해 수립한 극지활동진흥기본계획('23-'27)의 “전략 5 참여하고 소통하는 극지활동 강화”, “5-1 첨단 인프라 공유”의 주요 추진 내용인 극지와 유사한 환경에서 연구·실험할 수 있는 ‘극지환경 재현 실용화센터’ 건립('23, 인천)

● 연구장비의 적정성

- 중소형 탐사 로버 테스트 할 수 있도록 초저온 구현 가능한 설비
- 무인 테스트가 가능하도록 초저온실 내부에 무선 통신이 가능하도록 전원과 무선 포트 설치

● 장비운영의 계획성

- 본 과제에서 개발한 달탐사 장비의 초저온 환경에서 안정적인 성능 수행
- 연구사업 종료 후에도 저온에서 작동해야 하는 인공위성 탑재 장비의 온도 성능 테스트에 활용
- 남극 내륙 탐사에 활용될 극한지 로봇 시스템 개발 및 성능 테스트에 활용
- 극지나 고산에 설치되어 겨울철 저온 환경에 노출되는 무인관측장비, 단열 인클로저, 태양광, 풍력, 통신장비, 오로라 관측기, 자력계 등 유-무인 탐사 장비 개발과 테스트에 활용

■ 극한환경 모사 인프라 건축 및 자료조사

● 한국건설기술연구원 지반열 진공 챔버

- 실제 달 표면처럼 월면토를 채운 상태에서 진공상태 구현 가능 (그림 7). 흙을 포함한 진공 챔버는 낮은 압력에 도달하는 과정에서 수분과 각종 휘발성 기체들로 인하여 1톤의 흙을 10^{-5} torr로 낮추는데 약 2주가 소요되지만 한국건설기술연구원에서는 흙을 포함하지 않는 보조 챔버를 두어 반복되는 테스트 수행 시 준비 시간을 대폭 축소
- 챔버 내부 크기는 4 m x 4 m x 4 m이며, 약 2 m 깊이의 월면토를 채운 컨테이너 투입이 가능. 최저 영하 190℃에서 최고 영상 150℃ 구현 가능. 저온 온도 조건을 위해서 액화질소 사용, 고온 온도 조건을 위해 할로겐 히터 사용. 흙이 없는 상태에서 10^{-7} torr, 흙이 있는 상태에서 10^{-4} torr 압력 유지



그림 7. 한국건설기술연구원 지반열 진공 챔버

● 한국건설기술연구원 월면토(KLS-1) 및 제조시설

- 달의 흙은 산화칼슘(CaO)의 비율이 높은 사장암과 현무암으로 이루어져 있으며, 강원도 철원에서 달의 흙과 화학성분이 80%이상 유사한 현무암을 활용하여 월면토 제작 (그림 8). 달의 흙은 지구의 흙보다 입자가 곱기 때문에 현무암을 곱게 갈고 200℃의 온도로 가열하는

과정 필요

- 하루 약 200 kg 자체 생산이 가능하고 현재 인공 월면토 자체 개발 활용 국가는 한국, 미국, 유럽(ESA), 중국, 캐나다가 있음. 달의 흙 성분은 이산화규소 약 47.3%, 이산화티타늄 약 1.6%, 산화알루미늄 약 15.3%, 산화칼슘, 산화철
- 지구와 달은 지각의 화학적 구성성분이 상당 부분 일치하지만, 달 토양은 수십억 년 동안 태양풍과 우주 방사선에 노출되어 토양 입자 내부의 원자나 전자가 영향을 받아 물리적 성질이 변함
- NASA에서 플라즈마를 쏘아 만드는 인공 월면토 JSC-1이 달의 흙과 가장 흡사하지만 달 토양의 물리적 성질까지 재현은 불가능



그림 8. 한국건설기술연구원 월면토 제조시설 및 월면토 샘플

■ 영구 동토층 드릴링 조사/기술 협력

● 영구 동토층 온도

- 영구 동토층 온도는 극지역으로 갈수록 낮지만, 일부 높은 산악 지역도 낮은 온도를 기록 (그림 9)
- 영구 동토층 온도는 깊이에 따라 증가하며 이것이 영구 동토층의 두께를 결정 (그림 10)
- 지열 열 흐름에 의한 영구 동토층 온도 상승이 가장 큼
- 스발바르의 영구 동토층은 산에서 약 400 m, 계곡과 바다 지역은 약 100 m

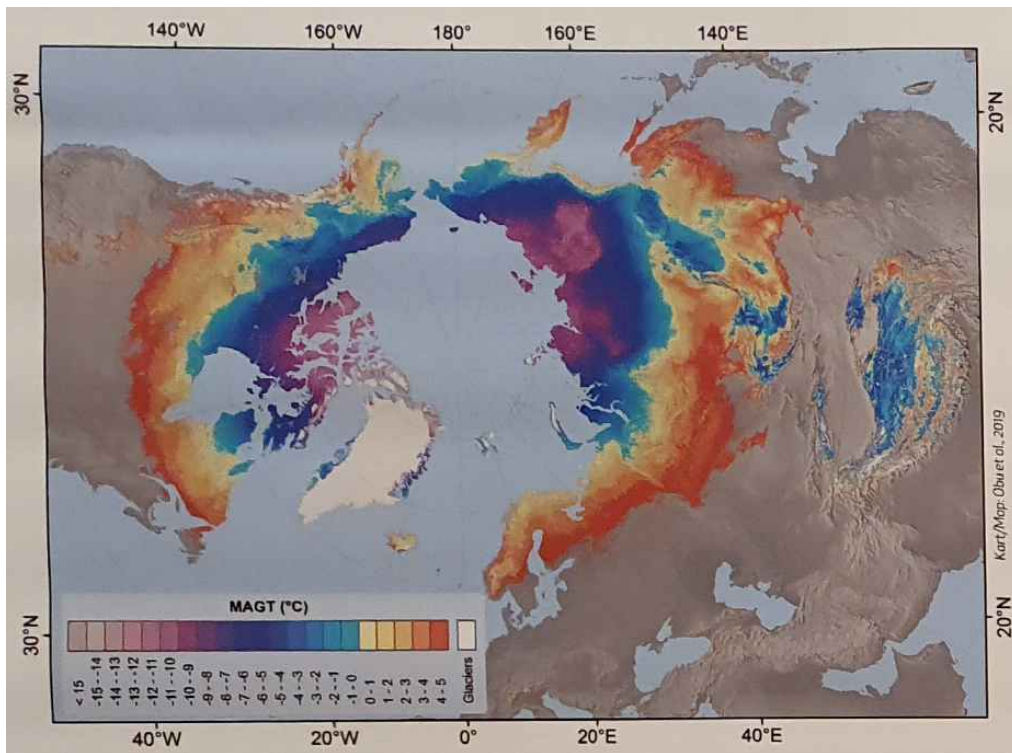


그림 9. 북반구 영구 동토층의 연간 평균 온도

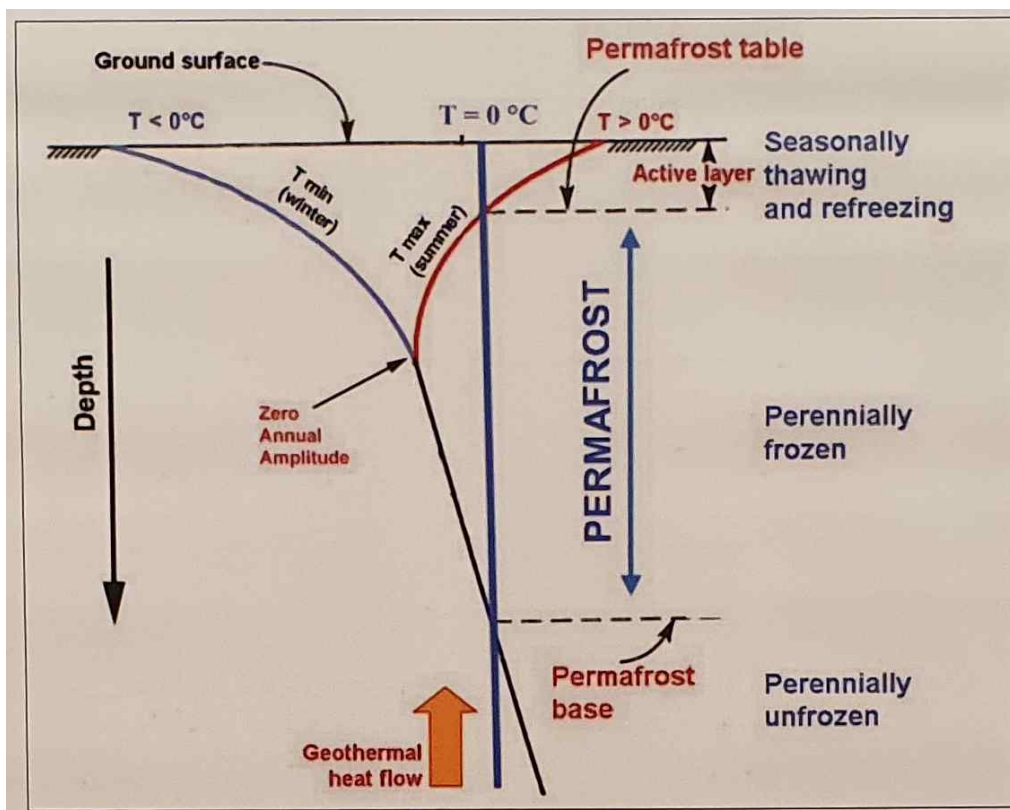


그림 10. 지면 깊이에 따른 영구 동토층의 분포

● 영구 동토층의 구성 성분 및 드릴링

- 영구 동토층은 느슨한 구성 물질, 유기 물질 또는 암석의 지하에서 발견
- 영구 동토층은 온도는 종종 0℃ 보다 조금 낮기 때문에 지구 온난화에 따라 영향
- 영구 동토층에서 코어 드릴링을 하기 위해서는 굴착 장비를 사용해야 하지만 2 ~ 4 m까지는 수동 드릴링 수행 가능 (그림 11, 12)



그림 11. 영구 동토층 드릴링에 사용되는 드릴 장비



그림 12. 영구 동토층 회전 충격 시추용 드릴

■ 테스트베드 구축

● 테스트 베드 상세설계

- 달 표면 자원 채굴용 드릴 모의실험을 위한 진공 챔버 설계
- 드릴을 개발하고 있는 인하대 연구팀과의 주기적인 회의를 통하여 예산과 시험 항목에 따라 아래와 같은 진공 챔버 사양 도출 (표 2)

표 2. 진공 챔버 사양

항목	사양
챔버 사이즈	700 mm(w) x 580 mm(d) x 1515 mm(h)
챔버 주요 재질	A6061-T6
테스트 드릴 사이즈	ø10 x 350 mm
진공 압력	5 Torr 이하
챔버 무게	약 300 kg

- 사이즈 검토 : 보유하고 있는 냉동 실험실 내부에 설치가 가능하며 드릴의 테스트 깊이를 고려하여 700 mm(w) x 580 mm(d) x 1515 mm(h) 사이즈 결정 (그림 13)

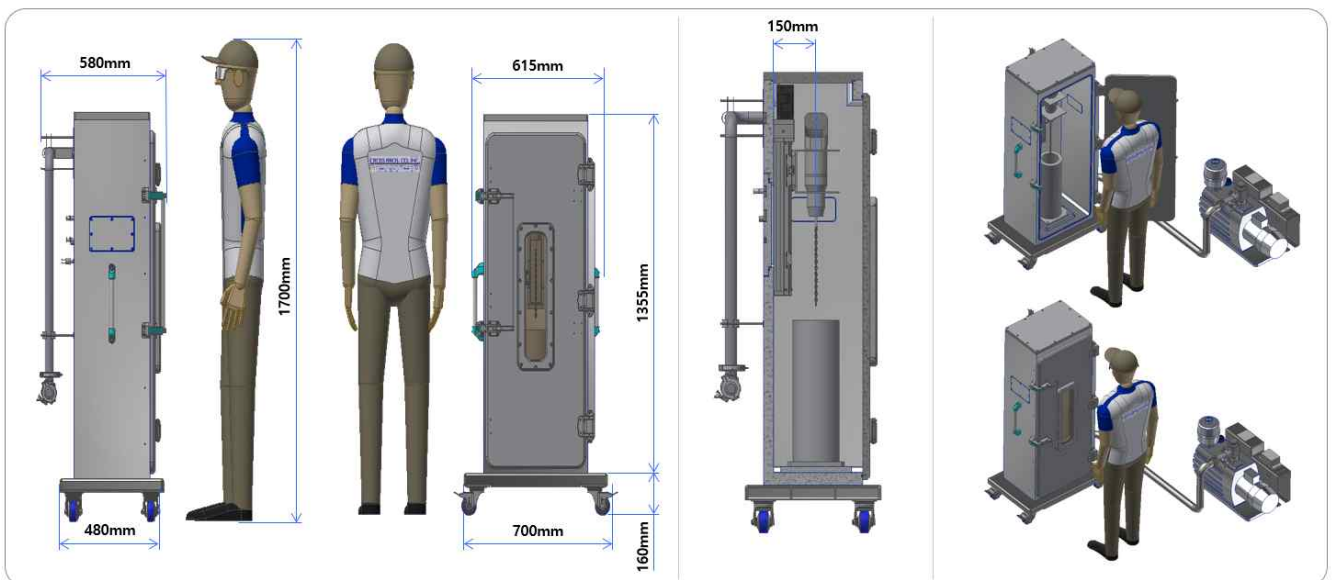


그림 13. 모델링을 이용한 사이즈 검토

- 진공 챔버의 주요 구성품인 진공 펌프는 인하대 연구실 보유 중인 복수의 진공 펌프 중에서 해당 챔버에 적합한 MVP-60(우성진공;現 벅스코) 진공 펌프를 활용하는 것으로 결정 (표 3) (그림 14)



그림 14. MVP-60, www.vacsko.com

표 3. MVP-60 진공펌프 사양, www.vacsko.com

Displacement Speed	60Hz	ℓ /min	1000
	50Hz		830
Ultimate Pressure	Gas Ballast C	Torr	5.0×10^{-4}
	Gas Ballast I		5.0×10^{-3}
	Gas Ballast II		5.0×10^{-2}
Water Vapor Tolerance		Torr	40
Oil Filling		ℓ	4.5
Inlet Port		DN	40 KF
Outlet Port		DN	40 KF
Motor Power(3-Ph.)		kW	1.5
Rotational Speed	60Hz	RPM	1750
	50Hz		1450
Noise Level(Without Gas Ballast)		db	56
Weight(with Motor)		kG	68

- 진공 챔버 구성품인 진공 커넥터, 진공 포트, 펌프 스위치, 매뉴얼 밸브, 벤트 밸브 등 구성품 선정 완료 (그림 15, 16). 진공챔버의 진공도 측정 편의성을 높이기 위하여 디지털 방식의 진공 게이지를 설치하여 제어반을 통하여 수치를 확인할 수 있도록 설계 반영 (그림

17). 진공챔버 내 온도 측정을 위한 KF 타입 온도 센서를 선정하여 챔버 설계에 반영 (그림 18). 드릴링 테스트 중 드릴에 걸리는 힘을 측정하기 위한 로드셀 설치를 위하여 9핀 D-sub Feedthrough 커넥터 반영 (그림 19). 월면도와 접촉부 온도 측정을 위하여 K타입 열전대를 연결할 수 있는 2 pairs Thermocouple Feedthrough 커넥터 반영

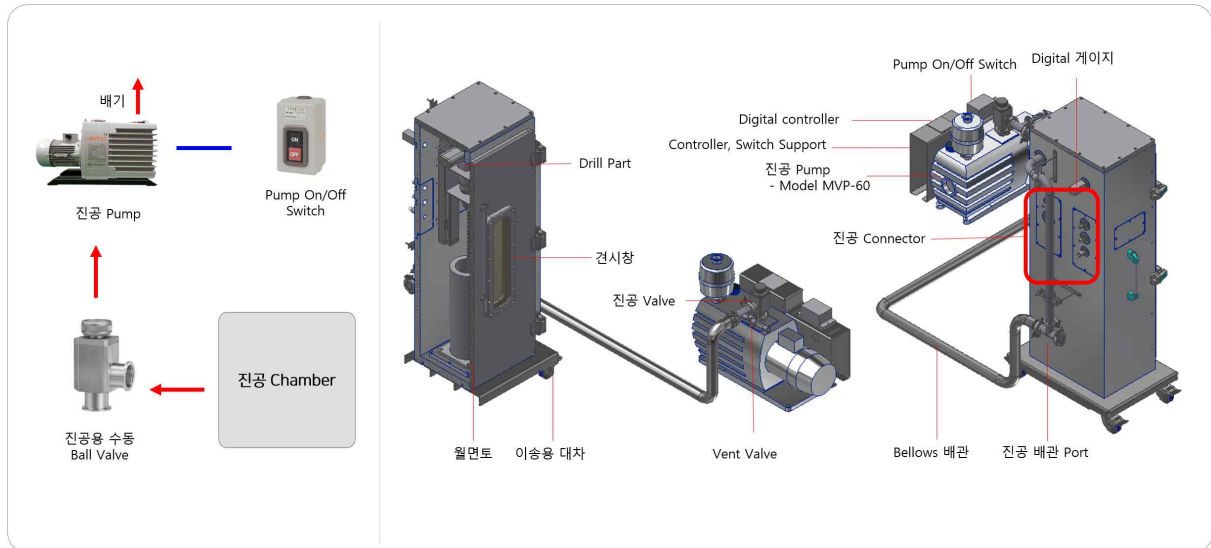


그림 15. 진공 챔버 시스템 구성도

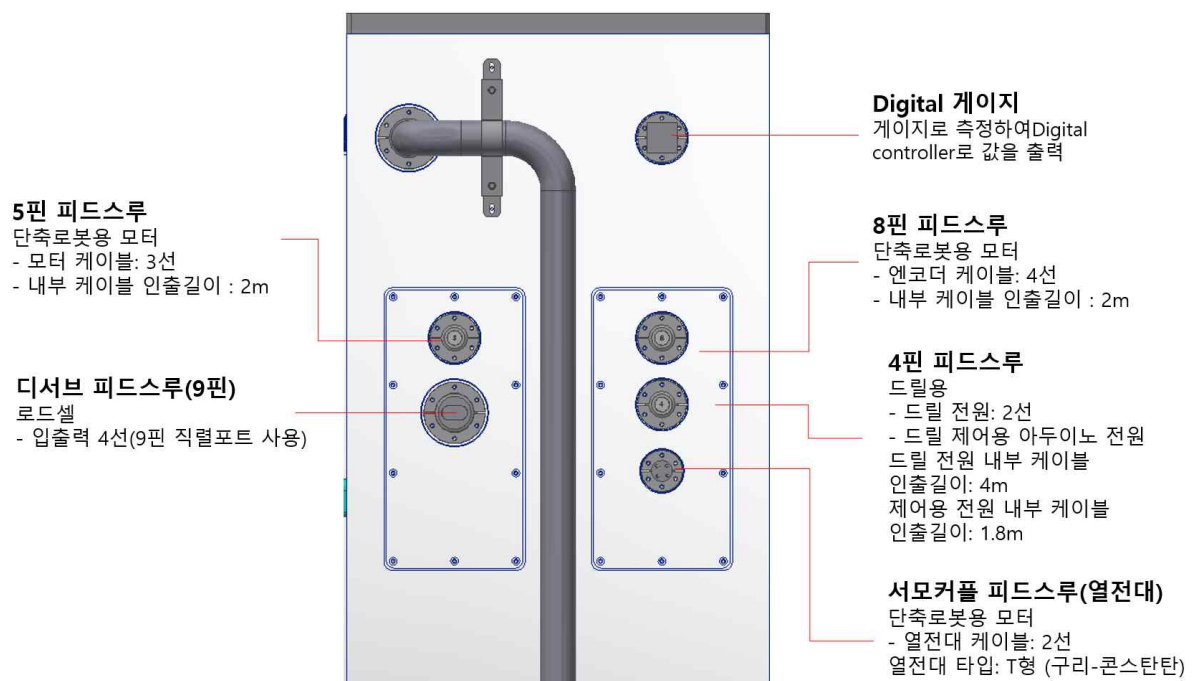


그림 16. 케이블 구성도



그림 17. 디지털 게이지 설치 위치 및 디지털 진공 게이지와 화면 표시부

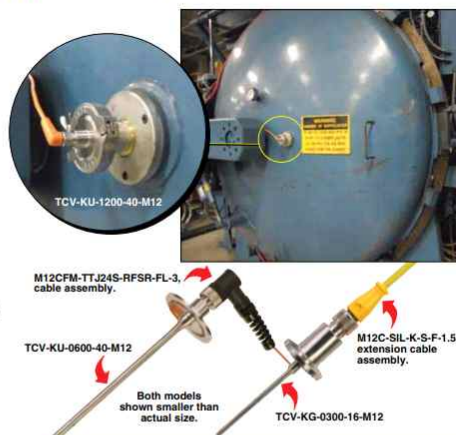
Vacuum Thermocouple Assemblies KF Style Flange with M12 Connector

TCV-M12 Series

- ✓ ISO 2861 KF Fittings Standard Size #10, #16, #25 and #40
- ✓ #10 and #16 Flanged Sensors Have 1/8" Diameter Probe
- ✓ #25 and #40 Flanged Sensors Have 1/4" Diameter Probes
- ✓ M12 Connector with Thermocouple Pins
- ✓ 304 Stainless Steel Construction
- ✓ Grounded or Ungrounded Type K, T, and E Thermocouples are Special Limits of Error
- ✓ Single or Dual Thermocouple Construction Optional
- ✓ Probe Length Optional*

The OMEGA® TCV Series thermocouple probe assemblies are available in standard lengths of 3, 6, and 12" with a grounded or ungrounded thermocouple junction at the tip. Standard probes are available in K, T and E calibrations.

* Please call sales for available options including special probe lengths.



Mounting Flange Guide			
Size	A Dia mm (inch)	B Dia mm (inch)	
#10	30 (1.18)	12.2 (.48)	
#16	30 (1.18)	17.2 (.68)	
#25	40 (1.57)	26.2 (1.03)	
#40	50 (1.97)	41.2 (1.62)	

Unsure of your flange size, verify it by using this size chart.

Thermocouple Specifications

Thermocouple Type	Temperature Range at Tip °C (°F)	Accuracy (Above 0°C)
K	-200 to 900 (-328 to 1652)	2.2°C or 0.75 whichever is greater
E	-200 to 900 (-328 to 1652)	1.7°C or 0.5 whichever is greater
T	-200 to 400 (-328 to 752)	1.0°C or 0.75 whichever is greater

To Order

Model No.	KF Flange	Thermocouple Type	Sheath Diameter
TCV-(-)(**)(***)-10-M12	#10	K, T or E	1/8"
TCV-(-)(**)(***)-16-M12	#16	K, T or E	1/8"
TCV-(-)(**)(***)-25-M12	#25	K, T or E	1/4"
TCV-(-)(**)(***)-40-M12	#40	K, T or E	1/4"

(*) = Specify Type ("K", "T" or "E" thermocouple).

(**) = Specify junction style ("G" = grounded, "U" = ungrounded).

(***) = Specify the probe length in inches ("0300" = 3", "0600" = 6", "0950" = 9 1/2", "1200" = 12").

For lengths between those shown, indicate the required length as shown above and select the next longer length price. For lengths greater than 12", add the additional cost per inch to the 12" price.

Ordering Examples: TCV-KU-0600-16-M12, Type K ungrounded thermocouple with 1/8" diameter probe and #16 flange with M12 connector.

TCV-TG-0950-40-M12, Type T grounded thermocouple with 1/4" diameter probe and #40 flange with M12 connector.

그림 18. 선정한 온도센서 사양서,

www.kr.omega.com/pptst/TCV-M12.html



그림 19. D-sub Feedthrough(좌), 2 pairs Thermocouple Feedthrough(우)

● 테스트 베드 시험 절차 설계

- 수분을 함유한 동토 상태의 월면토의 상태를 유지할 수 있도록 온도를 유지할 수 있는 냉동 실험실과 설계가 완료된 진공 챔버를 활용한 시험 절차 설계
- 진공 챔버는 20피트 냉동 컨테이너를 개조하여 제작된 냉동 실험실 내부에 설치될 예정이며, 진공 펌프를 운용하기 위한 시설들은 냉동 실험실과 칸막이로 구분된 준비실에 구성 예정
- 냉동 실험실에 설치된 진공 챔버는 각각 장비의 운용에 따라 $0^{\circ}\text{C} \sim -40^{\circ}\text{C}$ 의 저온 환경, 저 진공 환경, 저온과 저 진공이 결합된 실험 환경을 각각 구성할 수 있음
- 저온과 저 진공 환경은 우선 냉동 실험실의 온도를 목표 온도로 낮추고, 이후 진공 챔버의 문을 닫고 진공 환경을 구성하는 순서로 환경 세팅 가능 (그림 20)

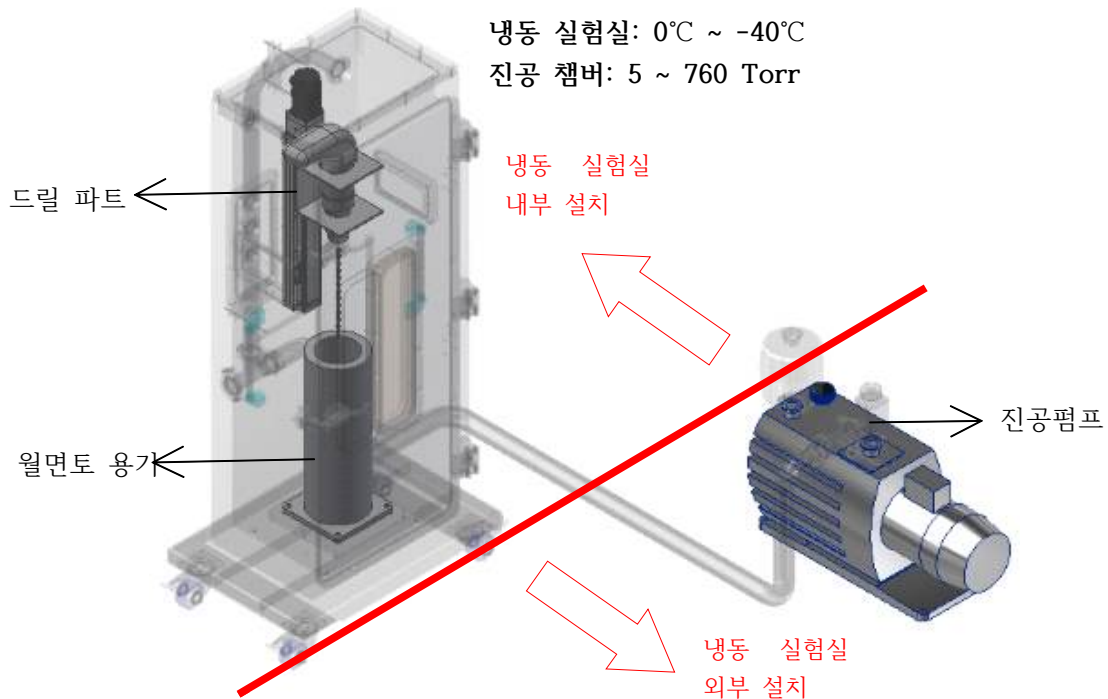


그림 20. 진공 챔버의 구성 및 설치 계획

- 테스트 베드 시험을 위해서는 먼저 월면토 용기에 인공 월면토와 테스트하고자 하는 수분량으로 배합하고 동결시켜 샘플을 제조해야 함
- 인공 월면토를 포함한 용기를 진공 챔버 내부에 설치하고 측정에 필요한 센서들의 연결 상태 점검

● Icy-soil and Icy 샘플 제조

- 한국건설기술연구원에서 개발한 인공 월면토 Korea Lunar Stimulant-Type 1(KLS-1) 약 100 kg을 지원받아 확보 (그림 21, 22). KLS-1은 전체 철 함량이 월면토와 유사하고 채석 및 이용이 용이한 강원도 철원의 관입 현무암을 분쇄 후 입도별로 분류한 후 재입도하는 과정을 수행하여 제작
- KLS-1의 입도분포는 다른 국외 인공월면토(JSC-1, 미국; FJS-1, 일본)들 보다 실제 달 토양(lunar soil 14163)의 입도분포에 가장 근접한 것으로 평가 (그림 23)

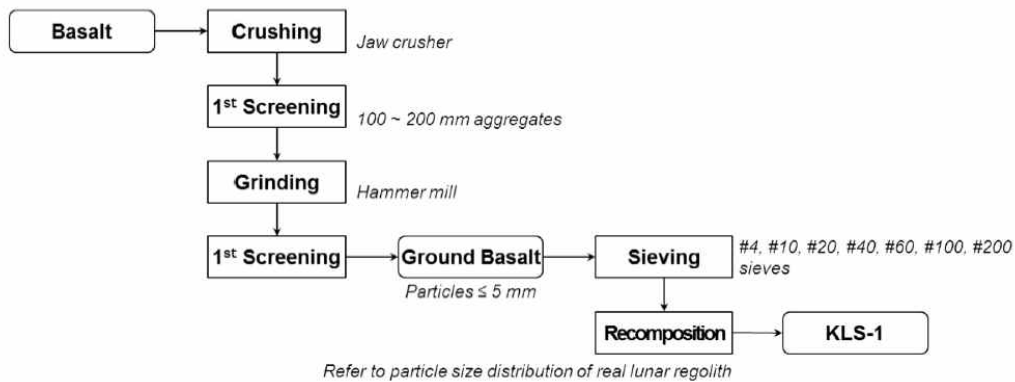
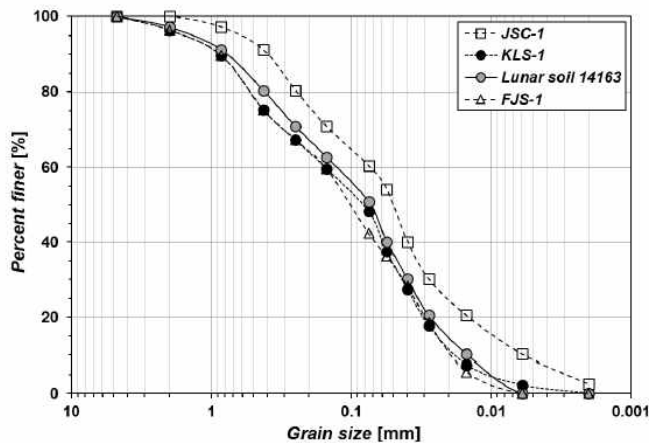


그림 21. 천연 화성 현무암을 활용한 KLS-1 달 모사토 시제품 제작 과정



그림 22. 한국건설기술연구원으로부터 지원받은 인공 월면토 KLS-1



Element	KLS-1	Lunar Soil 14163	Difference
SiO ₂	48.00	47.30	+0.70
TiO ₂	1.67	1.60	+0.07
Al ₂ O ₃	15.30	17.80	-2.50
Cr ₂ O ₃	—	—	—
FeO	6.64	10.50	-3.86
Fe ₂ O ₃	4.75	—	-4.75
MnO	0.17	0.14	+0.03
MgO	9.64	9.60	+0.04
CaO	8.38	11.40	-3.02
Na ₂ O	3.42	0.70	+2.72
K ₂ O	1.52	0.55	+0.97
P ₂ O ₅	0.33	—	-0.33
S	0.01	—	-0.01

그림 23. 실제 달 표토와 인공 월면토 입자 크기 분포(좌), 달 표토와 KLS-1 화학조성(우)
출처: Ryu, Byung-Hyun et al. (2015) “Basic Study for a Korean Lunar Simulant (KLS-1) Development,” Journal of the Korean Geotechnical Society. 한국지반공학 회, 31(7), pp. 53-63.

- 합리적인 시간과 비용 안에서 여러 샘플을 준비하기 위하여 일반적으로 사용되는 ‘mud-pie’ 기술을 사용하여 샘플 준비하였으며 이 방법은 특정 중량 비율로 물과 인공 월면토를 혼합
- 100 g의 인공월면토를 비닐 팩에 넣고 3, 6, 9, 12, 15 g의 물을 추가한 후 밀봉하고 손으로 물과 인공월면토가 잘 섞이도록 주무른 다음 물이 균일하게 분배되도록 12시간 이상 방치
- 12시간 이상 방치된 이후에도 수분 함량 차이가 나지 않는 것을 확인 후 그릇에 옮겨 담아 약 -30℃의 냉동고에서 최소 하루 동안 냉동하여 샘플 제작 (그림 24)



그림 24. 제작된 샘플(KLS-1, 15wt.%)

■ 미생물 오염방지 프로토콜 개요

● 우주 탐사에서의 미생물 오염 정의

- 우주 탐사 장비의 생물학적 오염(biological contamination)이란 유기체(미생물 원형 혹은 미생물 포자)가 탐사 장비 표면에서 제거되지 않은 채로 남아있는 것을 의미함
- 생물학적 오염은 오염원과 오염 방향에 따라 크게 두 가지로, 지구의 오염원이 타 행성으로 전파되는 순방향 오염(Forward contamination)과 외계행성의 오염원이 지구 환경을 오염시키는 역방향 오염 (Backward contamination)으로 구분 (그림 25)



그림 25. 순방향 생물 오염과 역방향 생물 오염의 예, 출처: www.nasa.gov

● 미생물 오염방지 프로토콜의 필요성

- 1967년 제정된 우주조약(1967 Outer Space Treaty, 부록1)은 우주활동과 탐사에 있어 준수해야 할 규율을 담은 국제조약으로, 제 9조에서 우주활동 시 탐사 행성의 유해한 오염을 회피하여 행성 환경을 보호할 의무를 명시하고 있음
- 탐사 장비 표면에 남아있는 생물학적 오염은 외계행성에서의 탐사 연구의 과학적 신뢰성을 떨어뜨리는 요인이 될 수 있음. 탐사 장비 표면의 생물학적 오염은 외계행성의 환경을 오염시킬 수 있음. 향후 달/화성의 우주기지를 운용할 시 기지 내부의 생물학적 오염의 원인이 될 수 있음
- 이와 같은 위험성을 방지하고, 한국형 우주탐사를 위해 탐사 장비 표면에 잔존해있는 생물학적 오염을 방지하고 오염도를 평가하기 위한 구체적인 한글 가이드라인이 필요함

■ 미생물 오염방지 선행 조사

● NASA 오염방지 선행자료 조사

- 미국 항공우주국(National Aeronautics and Space Administration, NASA)에서는 화성

- 탐사와 같은 우주 미션을 위해 미생물 오염 방지 전략을 개발하고, 활용하고 있음
- NASA 중간 지침(부록 2, 3)에서는 달, 화성과 같은 외계 환경을 탐사하고 연구할 시 탐사 장비로 인한 행성의 생물학적 오염 방지의 필요성을 강조
- NASA의 미생물 오염 방지 전략을 조사하고 정리하여 한국형 우주탐사 임무에 이를 적용하여 탐사 장비 멸균과 오염도 평가에 활용하고자 함

● 행성보호정책: COSPAR categories

- 국제우주연구위원회(Committee on Space Research, COSPAR)에서는 탐사 장비의 남아있는 지구 미생물로 인한 외계행성의 생물 오염을 예방하기 위하여 행성보호정책 기준을 제안하였음(부록 4)
- 탐사 임무 목적에 따라 Category I ~ Category V로 구분하여, 생물 거주성이 높은 행성(화성, 유로파)을 탐사하거나 행성의 표면과 탐사 장비가 직접 접촉하는 임무(착륙 임무, 샘플 회수)의 경우 높은 Category로 배정되어 다수의 오염방지 전략을 가지도록 제안되었음
- 생물 거주성이 낮은 달 탐사의 경우 Category II로 배정되어 발사 단계에 따른 간단한 보고에서 그치지만, 화성 착륙 임무의 경우 Category IV로 배정되어 일정 성능의 클린룸, 생물학적 부하도 평가, 바이오섀드, 생물 오염에 대한 지속적인 모니터링과 같은 자세한 생물 오염 평가가 필요
- 최근 달 표면에 다량의 얼음이 존재할 가능성이 제안됨에 따라, 지구 유래 오염원이 달에서 증식할 수 있는 환경이 만들어질 수 가능성 또한 존재. 향후 달 기지를 운용할 시 미생물로 인한 생물학적 오염이 발생할 수 있는 가능성을 고려할 때 달 탐사 또한 구체적인 미생물 오염 방지 전략이 구축되어야 할 필요가 있음

● 미생물 오염 방지 사례: NASA MARS2020

- MARS2020과 같은 화성 탐사 임무는 외계행성에서 생명체 탐색 연구를 수행하는 만큼, 철저한 미생물 오염 방지 전략이 적용되었음. MARS2020 임무에서는 행성 환경 보호의 목적과 리턴 샘플의 과학적 신뢰도를 유지하기 위해 구체화 된 미생물 오염 방지 전략이 수립되어 활용됨(부록 5)
- 화성 착륙 탐사선의 경우 COSPAR의 Category IVa에 속해있으며 장비 표면에 남아있는 미생물 수가 3×10^5 개 이내여야 한다는 기준에 따라, 해당 임무의 perseverance 탐사선은 남아있는 미생물 포자가 최대 4.1×10^4 이내가 되도록 조절하였음
- 한 큐빅의 공기 부피당 0.5 마이크론 입자가 10,000개 미만으로 조절되고, 공기가 1시간에 70회 주기로 순환되는 클린룸 내부에서 탐사 장비 조립 및 제작이 이루어짐 (그림 26)

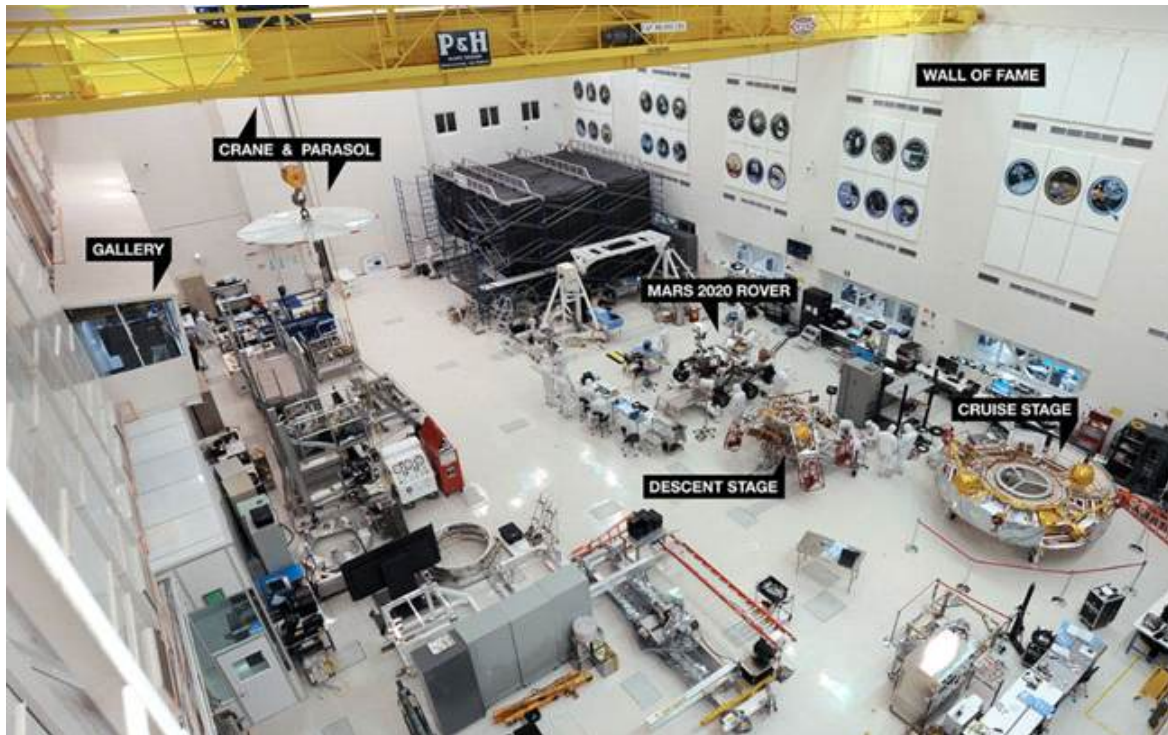


그림 26. 화성 탐사 로버를 제작하고 있는 JPL 클린룸 내부. 출처: www.nasa.gov

- 포자 형성 박테리아를 방지하기 위해 멸균 천을 이용한 알코올 살균, 고온 살균 (110 ~ 200°C Heating), 과산화수소 증기를 사용하여 탐사 장비 소독(그림 27)
- 살균 후에도 탐사 장비 표면에 남아있는 미생물을 수집하여 리스트 화, 추후 화성 샘플 분석 시 리스트 내 미생물을 배제하는 방법 활용
- 생물학적 연구와 관련된 샘플을 보관하는 샘플 튜브의 경우 24시간 150°C 온도에서 추가적인 가열을 통해 미생물 오염 대비



그림 27. 멸균 천과 과산화수소를 이용한 탐사 장비표면 소독. 출처: www.nasa.gov

● 과산화수소(H₂O₂)를 활용한 미생물 오염 방지 전략

- 특정 미생물은 극한의 온도, 건조 등의 외부 스트레스나 증식 및 생리 활동에 필요한 영양분이 부족한 환경에 노출되었을 때, 생존하기 위하여 자신의 주변에 단백질을 형성하여 포자(Spore)를 형성하는 생리 주기를 가짐(그림 28). 극한 환경에서 휴면상태로 전환되는 포자는 열, 화학물질 및 방사선 등에 높은 저항성을 가지고 있으며, 추후 주변 환경이 미생물 성장에 유리해지면 다시 세포로 분화되어 미생물의 생존성을 극대화할 수 있음 (그림 29)

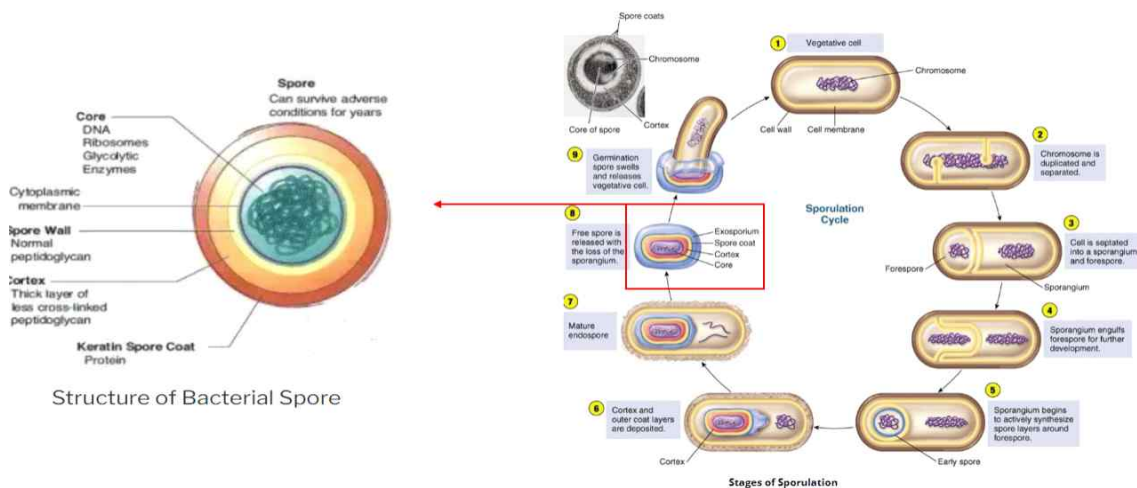


그림 28. 미생물 포자 구조(좌), 포자형성 미생물의 생활사(우).
(출처: <https://microbeonline.com/bacterial-spores/>)

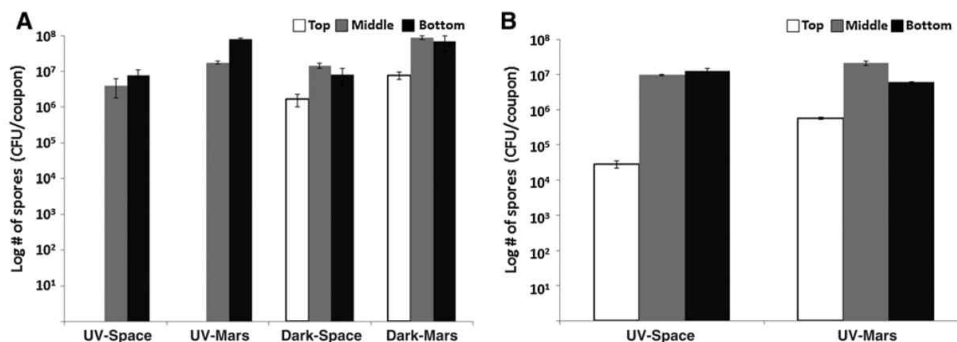


FIG. 2. Survival of *Bacillus pumilus* SAFR-032 spores after exposure to space conditions. (A) Solar extraterrestrial electromagnetic radiation with 100% transmission of insulated samples. (B) Solar extraterrestrial electromagnetic radiation with 0.1% transmission neutral density filter. All fluences were calculated for the biologically active UV wavelength region 200–400 nm. Data points represent the averages and standard errors of the mean of duplicate determinations from each of two separate experiments. The top layer was exposed to solar electromagnetic radiation. The spore count for top-layer coupons in each exposure condition was about 10⁷ spores/coupon, while the middle (second from the top layer) and bottom (third from the top layer) coupons had about 10⁸ spores/coupon. Details of filters, UV fluences, simulated martian conditions are given in Materials and Methods. CFU, colony-forming units.

그림 29. 우주 모사 환경에서의 포자형성 미생물인 *Bacillus pumilus*의 높은 생존 가능성을 확인. (출처: Vaishampayan, Parag A., et al. "Survival of *Bacillus pumilus* spores for a prolonged period of time in real space conditions." *Astrobiology* 12.5 (2012): 487–497.)

- 우주탐사장비 표면에 남아있는 미생물 포자(microbial spore)는 외계행성과의 접촉을 통해 행성의 생물학적 오염을 야기할 수 있으며, 탐사 결과의 과학적 신뢰도를 저해하는 요인이 됨
- 기존의 멸균 방식들은 미생물 포자를 제거하는 데 어려움이 있으며, 외계행성의 생물학적 오염을 방지하기 위해 포자를 타겟으로 한 효과적인 멸균 전략이 필요함. 과산화수소 증기를 이용한 멸균방법은 기존 방법 대비 효과적으로 미생물 포자를 제거할 수 있는 것으로 알려져 있음. 예시로, Nitrogen, Ultrapure Water, Alcohol을 이용할 경우 *Bacillus species* (포자 형성 박테리아) 일부가 남아있는 반면, 과산화수소는 이를 효과적으로 제거한 연구 결과 존재 (그림 30)

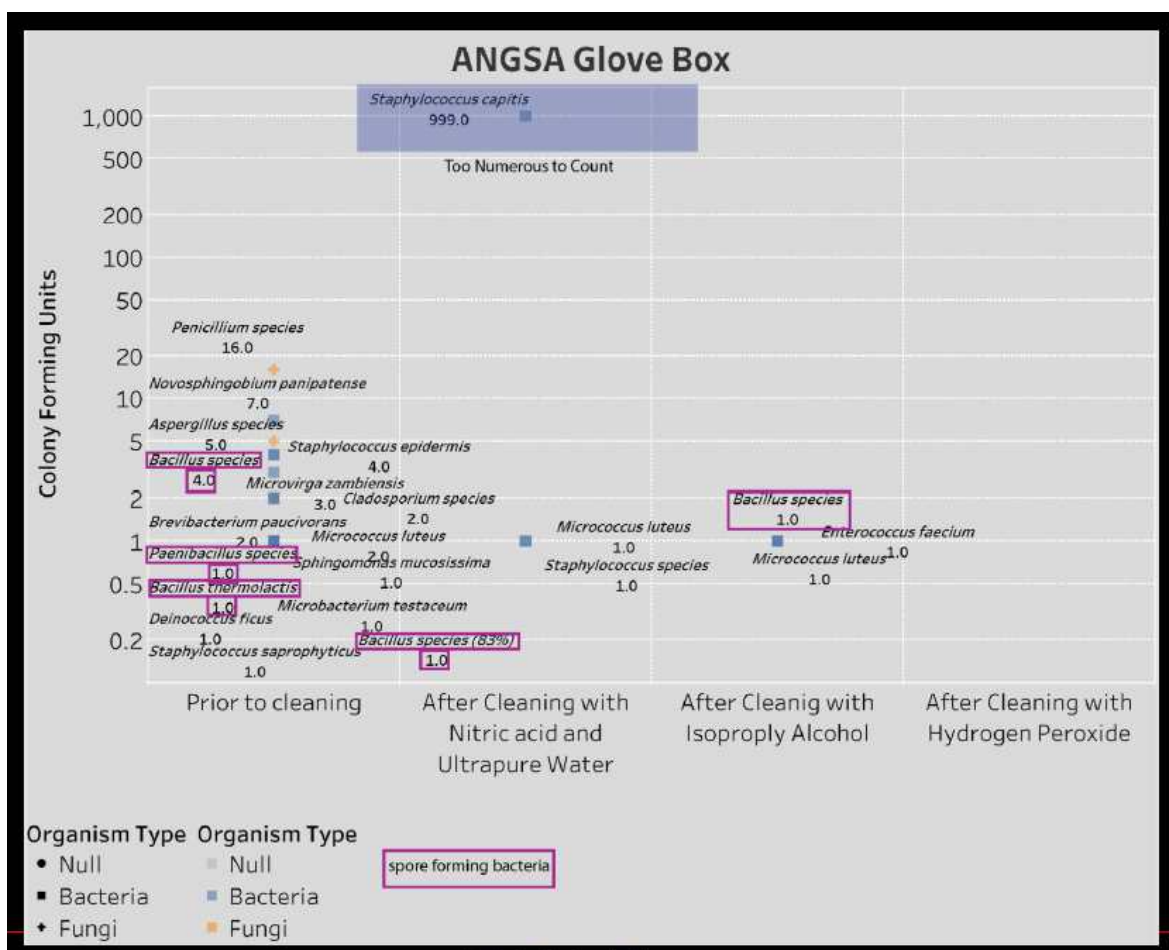


그림 30. 멸균 방식에 따라 미생물 오염원(포자 형성 박테리아)의 생존 가능성 실험 결과. 과산화수소(Hydrogen Peroxide)를 이용할 경우, 오염원의 생존가능성이 제일 낮음을 확인할 수 있음. (출처: A.B. Regberg et al. 'Hydrogen Peroxide as a Method for Bioburden Reduction in Facilities with Strict Materials Requirements' 2021.)

- 우주탐사 장비의 전자기기와 하드웨어가 열에 민감하다는 것을 고려했을 때, 저온 살균이 가능한 과산화수소 증기 방식은 효과적인 대안이 될 수 있음. 또한, 멸균 목적으로 유기용매를 사용할 경우 탐사 장비 하드웨어가 유기물질로 인해 손상 가능성이 있으므로 과산화수소 증기 방식은 이를 방지하는 효과적인 전략으로 고려됨. 과산화수소는 부산물로 산소와 물만이 생성된다는 점에서 외계행성의 환경을 크게 오염 시키지 않는 친환경적인 살균 방식이기도 함. 과산화수소를 이용한 멸균 방식의 이점으로 인해, NASA에서는 다양한 우주탐사 미션에서 이를 활용하고 있음 (그림 31, 32)



그림 31. NASA Europa 탐사를 위해 Vapor hydrogen peroxide (VHP) generator와 chamber를 활용한 미생물 오염 방지 전략 (출처: Aaron, Kim M., et al. "Planetary protection for Europa radar sounder antenna." Advances in Space Research 57.9 (2016): 2013-2021)

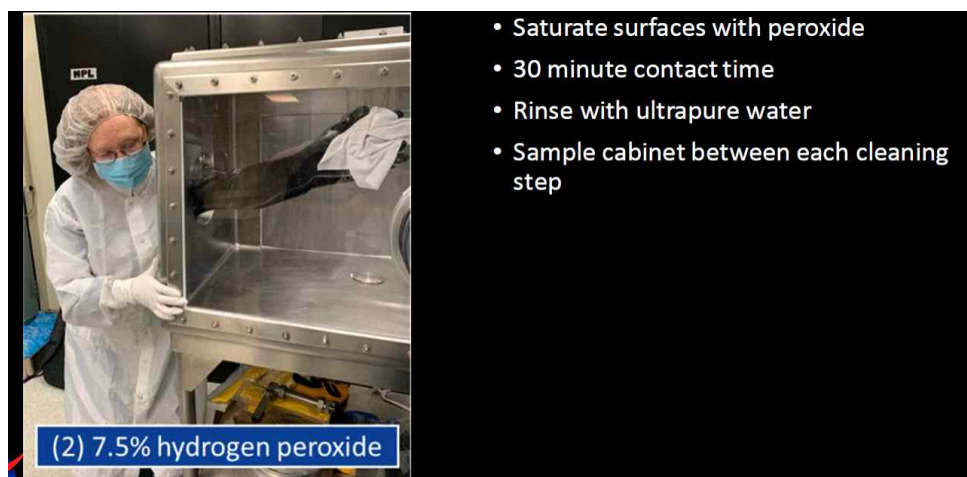


그림 32. Hydrogen peroxide를 이용하여 탐사 장비 및 살균 챔버의 미생물 오염원 제거 (출처: A.B. Regberg et al. 'Hydrogen Peroxide as a Method for Bioburden Reduction in Facilities with Strict Materials Requirements' 2021)

■ 한국형 달 탐사를 위한 미생물 오염방지 프로토콜

● 한국형 달 탐사를 위한 미생물 오염 방지 프로토콜

- 미생물 오염방지 프로토콜은 1) 멸균(물리 및 화학적 방법을 통해 탐사 장비 표면의 생물 오염원을 제거), 2) 검증(멸균 후 잔존한 오염원을 평가하여 프로토콜의 안전성 검증)의 단계로 구분할 수 있음
- 멸균 방식은 고온, 과산화수소 등을 이용하고, 검증 방식은 NASA ASSAY를 따름
- NASA의 프로토콜을 참고하여, 한국형 달 탐사를 위한 미생물 오염 방지 전략을 다음과 같이 제안함

● 멸균 단계

- 고온 멸균 준비: 멸균할 장비나 샘플을 고온에 견딜 수 있는 전용 용기에 배치. 장비를 오염 가능성이 있는 환경으로부터 격리하고, 적합한 보호 장비를 착용하여 오염을 최소화.
- 고온 처리: 장비가 들어 있는 용기를 오토클레이브나 건열 멸균기로 이동. 121°C에서 최소 15 ~ 20분 동안 멸균 처리. 또는 더 높은 온도가 필요할 경우, 샘플의 내열성에 맞춰 160 ~ 180°C에서 2시간 정도 건열 처리할 수 있음. 고온 처리 후 냉각 구역으로 이동하여 장비가 안전한 온도로 식을 때까지 방치.
- 고온 처리 후 품질 확인: 온도와 시간 기록 장치를 통해 멸균이 적절히 완료되었는지 확인. 표면 샘플링을 통해 미생물의 존재 여부를 검사. 검사 결과 음성인 경우, 멸균이 완료된 것으로 간주.
- 과산화수소 멸균 준비 단계: 장비를 과산화수소 기화가 가능한 멸균 챔버에 배치. 챔버 내부를 밀폐하고 적정 온도와 습도를 조정하여 멸균이 원활히 이루어지도록 함.
- 과산화수소 기화 처리: 챔버에 35 ~ 70% 농도의 과산화수소 증기를 주입. 과산화수소가 챔버 내 모든 표면에 접촉하도록 설정하며, 2 ~ 6시간 정도의 멸균 시간을 유지. 멸균 후, 챔버를 환기하여 과산화수소 잔류물을 제거하고, 안전한 수준으로 감소했는지 확인.
- 과산화수소 멸균 처리 후 품질 확인: 멸균 후 샘플 표면에서 과산화수소 잔류물이 없는지 확인하고, 멸균 정도를 평가하기 위해 미생물 배양 검사를 실시. 미생물 배양 검사 결과 음성이면 멸균이 완료된 것으로 간주.

● 검증

- 시약 준비: 검증 단계의 분석에서 사용되는 물은 ASTM D1193 Deionized Distilled Water를 사용함. 배양 배지는 Tryptic Soy Agar (TSA) 분말을 사용하며, 표준 포자로 *Bacillus atrophaeus* ATCC 9372(DSM 675) 사용. 완충 용액은 34.0 g의 인산이수소칼륨(KH_2PO_4)을 500 mL의 증류수에 용해시키고 1N NaOH로 pH를 7.2 ± 0.1 로 조정하고 증류수와 함께 1 L로 희석함. 완충 증류수는 2.2.3의 완충 용액 1.25 mL를 멸균된 증류수 1 L에 첨가하여 준비
- 무균 세척 용액: 완충 증류수에 Tween 80을 0.02% 부피 대 부피 비율로 첨가하여 최종 pH를 7.1-7.3으로 조절. 생성된 용액을 고압멸균기로 멸균

- 무균 제품 준비: 건조하거나 액체 물질을 고압 멸균할 시 최소 121°C에서 1.03 bar(15 psi)로 15분 동안 진행. 실험 용품(예: 핀셋, 시험관, 페트리 접시)은 멸균하거나 멸균된 상태로 준비. 포자 검사에 사용되는 면봉은 상업적으로 이용 가능한 흡수성 면봉으로, 한쪽 끝에 5 x 19 mm 크기로 단단히 꼬여 있는 스틱을 사용한다(멸균되어 포장된 상태로 이용). 닥기용 천은 상업적으로 이용 가능한 100% 폴리에스터 본드 클린룸 닥개로, 크기는 23 x 23 cm을 권장하며, 15 ~ 18 mL의 물을 적셔 사용한다(멸균되어 개별 포장된 상태로 이용)
- 초음파 세척기: 내부표면이 스테인리스강으로 만들어진 Bath를 사용하며, 세척조의 액체는 물과 폴리옥시에틸렌 소르비탄 모노올레산(polyoxyethylene sorbitan monooleate, Tween 80)의 0.02% volume-to-volume 비율의 수용액으로 구성. 수용액은 매일 새롭게 제작하며, 20°C ~ 32°C 사이의 온도를 유지. 샘플을 초음파 처리하기 전에 세척조를 최소 5분간 가동하여 탈기화(degassing) 시킴
- Pilot 용기: 시험 샘플에 사용된 용기와 동일한 용기를 Pilot 용기로 사용하여 다음 정의된 과정을 따른다. 하나의 Pilot 용기를 시험 샘플에 사용된 것과 동일한 부피의 용액으로 채우고 파일럿 용기에 온도 측정 장치를 넣어 다음을 모니터링 함. 용기의 온도가 요구된 온도에 도달했을 때 열 충격 동안 온도를 기록
- 시료 샘플링: 무균 면봉을 꺼내 시험관에 있는 증류수에 면봉 끝을 적심(과도하게 적셔질 경우, 면봉을 시험관 내부 벽에 대어 과도한 수분을 제거할 것). 탐사 장비 표면에서 면봉 끝을 회전시키며 한 방향으로 표면을 가로지르고, 가로, 세로, 대각선으로 반복하여 샘플을 수집(이 때, 샘플 채취 영역은 면봉 당 25 cm² 이하로 제한). 면봉 끝을 원래의 무균 증류수가 들어 있는 시험관에 다시 넣고, 면봉을 잡은 손잡이 부분 아래에서 면봉 끝을 시험관 옆에 대어 부러뜨려 샘플을 획득. 10개 이하의 샘플마다 음성대조군을 준비해야 하며, 샘플 처리는 1시간 이내로 시작한다. 그렇지 않으면 샘플을 4°C에서 최대 24시간 동안 보관. 면봉 대신 닥개 천을 사용하여 샘플링이 가능하며, 이 때 천 면적의 35% ~ 75%이내의 면적만을 사용하여 0.1 m² ~ 1.0 m² 사이의 표면적에서 시료를 채취해야 한다. 무균 면봉을 꺼내 시험관에 있는 증류수에 면봉 끝을 적심. 닥개 샘플링은 6개 이하의 샘플마다 음성대조군을 준비하며, 이 역시 샘플 처리는 1시간 이내로, 보관은 4°C에서 최대 24시간 동안 할 수 있음
- 시료 처리: 원하는 포자 농도로 양성 대조군을 준비하고 사용하지 않은 면봉을 포함한 음성 대조군을 준비. 각 시료를 5 ~ 6초 동안 철저히 혼합하고 각 시료를 2분 ± 5초 동안 초음파 처리 함. Bath의 액체를 초음파 처리 중인 플라스크의 액체 위로 올리며 이 때, 플라스크와 시험관이 다른 표면과 접촉하지 않도록 하고, Bath 안에 완전히 부유시킴. 각 시료는 다음과 같이 열 충격을 가함. 혼합된 용액과 면봉 머리가 포함된 시료를 Pilot 용기에 10 mL의 물과 함께 넣고 측정 장치를 사용하여 78 ~ 82°C의 수조에 15분 동안 넣음. 처리가 끝난 시료를 즉시 얼음물에 식히고, 배양하기 전까지 45분을 넘기지 않도록 함. 각 시료의 추출액을 무균 상태에서 페트리 접시에 8.0 mL씩 옮겨 배양. 각 접시에 멸균된 액체 TSA(48 ~ 50°C)를 약 20 mL씩 추가하고, 내용물을 부드럽게 회전시켜 혼합한 후 실온에서 혼합물을 고체화. 음성 대조군으로 사용하기 위해 하나의 물만 포함된 blank를 배양한다. 이

때, TSA black를 부어 사용하는 것을 권장

- Counting: NASA STANDARD SPORE ASSAY 결과의 포자 수를 계산하기 위해 다음 절차를 따름. 모든 시료, 대조군 및 Blank를 32°C에서 뒤집은 상태로 호기성 배양. 최종 계수는 배양 72시간 지난 후에 수행. 미생물 군락이 관찰되면, 데이터를 계수하고 기록합니다. 잠재적 오염을 모니터링하기 위해 24시간 및 48시간 후 추가 계수를 권장. 표면을 분석할 때 결과는 단위 면적당 총 미생물 수를 사용하여 표현하고 최종 오염도를 평가
- Quality Control: 양성 대조군(Positive Control)을 이용한 분석을 위해 표준 포자(standard spore)가 포함된 용액을 배양. 적절한 대조군을 배양하여 표준 포자를 평가. 음성 대조군(Negative Control)을 이용하기 위해 사용되지 않은 면봉 또는 닭개 천을 활용하여야 함. 각 TSA 용액의 살균 여부가 테스트 되어야 함
- 정확도 및 재현성: 절차의 정확성 및 재현성은 매년 내부적으로 검증되어야 함

■ 우주탐사 및 자원활용 관련 연구인력 양성 및 교육체계 구축

● 극지현장에서의 우주탐사 장비 테스트 전문연구인력 양성

- 우주 및 극지환경 테스트베드 인력 양성을 위한 지속적인 실무형 교육을 수행하고 관련 논문 공부 및 토론을 통해 미래우주교육센터 수혜 학생 교육
- UST 극지과학 및 우주과학 기초/심화 이론 교육을 통해 극지현장 장비 테스트 전문인력 배출을 목표로 하고 극한환경탐사를 비롯한 설계 수업을 통한 전문 교육 시행
- 현장 강의 수업을 통한 우주/달 탐사 연구 공유 및 대학원생 실습/실험을 진행하고 수혜 졸업생 1명 (UST 석사, 양준영), 수료자 1명 (UST 박사, 장승연) 배출

■ 학점교류 트랙과목 설계

● 극지과학개론

- UST 극지과학개론 강의를 활용 우주 및 극지환경 탐사 트랙의 기초이론강의 설계. 극지 지구과학, 해양, 기후, 생물 및 국제정치 등에 대한 기본 지식의 습득과 최신 이슈 제시를 통한 극한 환경 이해를 목표. 극지연구소 내 10명 이상의 UST교수가 참여하는 연합강의로 극한환경의 생물, 물질의 물리화학적 변화, 우주고층대기, 원격탐사와 같은 다학제적 수업 및 교육 진행

● 극한 환경 탐사설계

- 전공설계 트랙을 위한 UST 극한 환경 탐사설계 과목 개설 및 운용. 우주탐사 및 극지 인프라 이론을 습득하여 극한 환경에서의 탐사 및 연구 장비 설계. 무선통신, 데이터회수, 이동 플랫폼, 무인관측, 전력시스템과 같이 우주탐사를 위한 장비 운용의 필수요소를 익히고, 직접 모의 탐사장비 설계를 수행

● 우주탐사와 극지환경

- 전공실험/실습을 위한 UST 우주탐사와 극지환경 과목 개설 및 운용. 극지에서 연구 장비를 운용하는데 고려해야 할 극한 환경 요소들과 현재 극지에서 운용 중인 무인 장비들을 소개하고, 우주탐사 장비의 미생물 오염 방지 전략을 학습. 효과적인 우주탐사와 극지환경 연구를 위하여 인공지능 기반의 데이터 분석 및 통계 실습. 토론과 수업을 통해 극한환경을 이해를 높이고, 데이터 실험/실습을 통해 우주탐사를 위한 모의 연구 수행

● 기타 인하대 강의

- 인하대 기초이론 과목 ‘우주탐사 및 자원활용 개론’ 온라인 강의 제작
- 극지연구소 강의 ‘극지 극한 환경 대응 설계 기초’ 제작

■ 현장실습

● 극지연구소 미래우주교육센터 2023년 동계 현장실습 개요

- 우주탐사를 위한 미생물 오염 방지 전략 현장실습 계획 마련. 인하대 항공우주공학과 대학원생 3명 현장실습 진행(안주훈, 조자룡, 유혜은 학생)
- 1주 차 미생물 개념 및 오염 방지 전략 강의 (그림 33). 2주 차 미생물 배양 및 오염 방지

실험. 3주 차 극지연구소 미래기술센터 내 극지 탐사 및 연구 장비 견학. 4주 차 미생물 방지 전략 수립에 대한 발표 및 평가



그림 33. 미생물 개념 및 오염 방지 전략 강의

● 2023년 동계 현장실습: 미생물 오염 방지 전략 실험

- 실험 재료: 오염원 (모사 우주탐사 장비), LB 배지, Clean bench, 멸균봉, 멸균천, 과산화수소, 알코올, UV, Incubator, 라벨링 테이프, 파라 필름
- 실험방법 (미생물 오염 방지 실험)
 - ① Clean bench 내에서 샘플용 멸균 봉을 사용하여 멸균 처리 전 오염원(모사 우주탐사 장비)의 표면을 닦아낸다.
 - ② 닦아낸 멸균 봉을 LB 배지 표면의 한쪽에서부터 S자형으로 가볍게 그어 배지 전면에 획선을 긋는다.
 - ③ 멸균 방법(과산화수소수, 알코올, UV 등)을 사용하여 오염원(모사 우주탐사 장비)의 표면을 멸균하고, 멸균 봉을 사용하여 표면을 닦아낸다.
 - ④ 다른 LB 배지를 준비하여 2의 과정을 반복한다.
 - ⑤ 도말한 LB 배지들을 37°C incubator에 넣어 하루 배양한다.
 - ⑥ LB 배지를 확인하여, 멸균 처리 전후에 따른 잔존 미생물 배양 정도를 비교한다.
 - ⑦ 가장 효과적으로 미생물 배양을 억제한 멸균 방법을 결정하고, 평가한다.
- 주의 사항: 멸균 처리에 사용되는 재료(과산화수소, 알코올, UV 등)들을 사용 시, 몸에 직접 노출되지 않도록 주의

2-2. 추진 일정 실적

1차년도													
추진내용	추진 일정												책임자 (소속기관)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
달/화성 표면 테스트베드 개념설계													(극지연구소)
미생물 오염방지 선행 연구 분석													(극지연구소)
2차년도													
테스트베드 상세설계/시험 절차 설계													(극지연구소)
미생물 오염 방지 전략 수립													(극지연구소)
달/화성 표면 샘플 제조													(극지연구소)
3차년도													
테스트베드 구축													(극지연구소)
극지 현장 조사/시험 절차 설계													(극지연구소)
미생물 오염 방지 프로토콜 설계 및 구축													(극지연구소)

2-3. 연구개발성과의 관련 분야에 대한 기여정도

- 극지 환경과 달 환경을 재현할 수 있는 모사시설 구축은 우주 탐사 장비의 설계, 시험, 검증에 위한 기반 기술을 제공. 이는 한국이 독자적으로 우주 탐사 기술을 개발하는 데 필요한 기반을 마련하고, 국제적인 기술 경쟁력을 강화하는 데 기여함
- NASA의 사례 및 COSPAR 기준을 참고하여 한국형 달 탐사에 적합한 미생물 오염 방지 프로토콜을 구축함으로써, 향후 한국의 독립적 우주 탐사 임무가 국제적 행성 보호 정책에 부합할 수 있도록 지원. 고온 및 과산화수소 기반 멸균 기술은 우주 탐사에서의 미생물 오염 문제를 효과적으로 해결할 수 있는 방법을 제시하며, 이는 국내 우주 연구 및 산업 분야의 발전에 기여
- 극지와 유사한 환경에서 실질적인 실험과 실습을 통해 우주 탐사 장비 및 기술 개발에 필요한 전문 인력을 양성함으로써 국가 우주 개발 역량을 증진하며, 극지과학 및 우주탐사 관련 교과목 개발은 우주 탐사 분야에 대한 학문적 기반을 강화하고, 차세대 연구자들에게 실질적인 기술과 지식을 제공함

2-4. 연구개발성과의 관리 및 활용 계획

- 연구개발성과의 관리와 장비 유지 및 보수
 - 극지 시연 및 달 환경 모사 실험에서 수집된 데이터를 체계적으로 보관하고, 이를 국가 데이터베이스화하여 후속 연구 및 산업적 활용이 가능하도록 관리합니다. 이를 통해 데이터

중복 연구를 방지하고, 새로운 연구 아이디어를 발굴할 기반을 제공

- 극지 및 달 환경 모사 장비는 주기적인 점검과 성능 평가를 통해 안정적으로 운영. 또한, 사용자 매뉴얼 및 기술 교육을 병행하여 장비의 활용도를 극대화
- 미생물 오염 방지 프로토콜은 국제 행성 보호 정책 변화에 따라 지속적으로 업데이트되어, 최신 기준을 충족할 수 있도록 관리

● 연구개발성과의 활용 계획

- 극지 환경에서 검증된 우주 탐사 장비 기술은 상용화를 통해 민간 기업에 제공될 수 있으며, 이는 우주 관련 산업 생태계를 활성화하는 데 기여.
- 극지 시연과 테스트베드 구축은 국제 우주 탐사 프로젝트와의 협력 기회를 확대할 수 있는 발판이 됨
- 개발된 교육 프로그램 및 현장 실습은 정규 학위 과정뿐만 아니라 산업체 및 일반인을 대상으로 한 평생교육 프로그램으로 확장될 수 있음. 이를 통해 우주 탐사 기술의 대중화와 기술 인재 양성에 기여할 것
- 미생물 오염 방지 기술은 단순히 우주 탐사에만 국한되지 않고, 극지 환경 연구, 제약 산업, 생명 과학 등 다양한 분야에서도 활용될 수 있음.

● 국가 전략적 활용

- 연구개발 성과는 한국의 우주탐사 로드맵 구현 및 행성 탐사 미션 준비 과정에서 정책적 근거자료로 활용
- Icy-soil 제조 및 극지 환경 모사 기술은 미래 화성 거주지 개발 및 자원 활용 기술의 초석으로 활용될 가능성이 높음
- 테스트베드와 모사실은 국내외 연구자들에게 제공되어 공동 연구와 기술 교류를 촉진하며, 한국을 극지 및 우주 탐사 연구의 허브로 자리잡을 것

부록

부록 1. 우주조약

- 1967년에 제정된 달과 기타 천체를 포함한 외기권의 탐색과 이용에 있어서의 국가 활동을 규율하는 원칙에 관한 조약(Treaty on Principles Governing the Activities of States in the Exploration and Use of Outer Space, including the Moon and the Other Celestial Bodies), 약칭 **우주조약(Outer Space Treaty)**, 은 우주활동과 탐사에 대한 규율을 담고 있으며, 현재 전 세계 107개 이상의 국가가 서명하여 참여하고 있음
- 해당 부록은 행성 간 오염방지 규약이 서술된 조약의 전체 내용 중 일부이며, 영어원문은 유엔우주업무사무소(United Nations Office for Outer Space Affairs, UNOOSA, <https://www.unoosa.org/>)에서, 한글 번역본은 법제처 국가법령정보센터(<https://www.law.go.kr/>)에서 찾아볼 수 있음

[원본] Treaty on Principles Governing the Activities of States in the Exploration and Use of Outer Space, including the Moon and Other Celestial Bodies [The Outer Space Treaty of 1967]

THE STATES PARTIES.

TO THIS TREATY, INSPIRED by the great prospects opening up before mankind as a result of man's entry into outer space, RECOGNIZING the common interest of all mankind in the progress of the exploration and use of outer space for peaceful purposes, BELIEVING that the exploration and use of outer space should be carried on for the benefit of all peoples irrespective of the degree of their economic or scientific development, DESIRING to contribute to broad international co-operation in the scientific as well as the legal aspects of the exploration and use of outer space for peaceful purposes, BELIEVING that such co-operation will contribute to the development of mutual understanding and to the strengthening of friendly relations between States and peoples, RECALLING resolution 1962 (XVIII), entitled "Declaration of Legal Principles Governing the Activities of States in the Exploration and Use of Outer Space", which was adopted unanimously by the United Nations General Assembly on 13 December 1963, RECALLING resolution 1884 (XVIII), calling upon States to refrain from placing in orbit around the earth any objects carrying nuclear weapons or any other kinds of weapons of mass destruction or from installing such weapons on celestial bodies, which was adopted unanimously by the United Nations General

Assembly on 17 October 1963, TAKING account of United Nations General Assembly resolution 110 (II) of 3 November 1947, which condemned propaganda designed or likely to provoke or encourage any threat to the peace, breach of the peace or act of aggression, and considering that the aforementioned resolution is applicable to outer space, CONVINCED that a Treaty on Principles Governing the Activities of States in the Exploration and Use of Outer Space, including the Moon and Other Celestial Bodies, will further the Purposes and Principles of the Charter of the United Nations, Articles HAVE AGREED ON THE FOLLOWING:

Article IX

In the exploration and use of outer space, including the moon and other celestial bodies, States Parties to the Treaty shall be guided by the principle of co-operation and mutual assistance and shall conduct all their activities in outer space, including the moon and other celestial bodies, with due regard to the corresponding interests of all other States Parties to the Treaty. States Parties to the Treaty shall pursue studies of outer space, including the moon and other celestial bodies, and conduct exploration of them so as to avoid their harmful contamination and also adverse changes in the environment of the Earth resulting from the introduction of extraterrestrial matter and, where necessary, shall adopt appropriate measures for this purpose. If a State Party to the Treaty has reason to believe that an activity or experiment planned by it or its nationals in outer space, including the moon and other celestial bodies, would cause potentially harmful interference with activities of other States Parties in the peaceful exploration and use of outer space, including the moon and other celestial bodies, it shall undertake appropriate international consultations before proceeding with any such activity or experiment. A State Party to the Treaty which has reason to believe that an activity or experiment planned by another State Party in outer space, including the moon and other celestial bodies, would cause potentially harmful interference with activities in the peaceful exploration and use of outer space, including the moon and other celestial bodies, may request consultation concerning the activity or experiment.

[국문 번역] 달과 기타 천체를 포함한 외기권의 탐색과 이용에 있어서의 국가 활동을 규율하는 원칙에 관한 조약 [발효일 1967. 10. 13] [다자조약, 제262호, 1967. 10. 18]

이 조약의 당사국은,

외기권에 대한 인간의 진입으로써 인류 앞에 전개된 위대한 전망에 고취되고, 평화적 목적을 위한 외기권의 탐색과 이용의 발전에 대한 모든 인류의 공동이익을 인정하고,

외기권의 탐색과 이용은 그들의 경제적 또는 과학적 발달의 정도에 관계없이 전 인류의 이익을 위하여 수행되어야 한다고 믿고,
평화적 목적을 위한 외기권의 탐색과 이용의 과학적 및 법적 분야에 있어서 광범한 국제적 협조에 기여하기를 열망하고,
이러한 협조가 국가와 인민간의 상호 이해증진과 우호적인 관계를 강화하는데 기여할 것임을 믿고, 1963년 12월 13일에 국제연합 총회에서 만장일치로 채택된 "외기권의 탐색과 이용에 있어서의 국가의 활동을 규율하는 법적 원칙의 선언"이라는 표제의 결의 1962(XVⅢ)를 상기하고, 1963년 10월 17일 국제연합 총회에서 만장일치로 채택되고, 국가에 대하여 핵무기 또는 기타 모든 종류의 대량파괴 무기를 가지는 어떠한 물체도 지구주변의 궤도에 설치하는 것을 금지하고, 또는 천체에 이러한 무기를 장치하는 것을 금지하도록 요구한 결의 1884(XVⅢ)를 상기하고, 평화에 대한 모든 위협, 평화의 파괴 또는 침략행위를 도발 또는 고취하기 위하여 또는 도발 또는 고취할 가능성이 있는 선전을 비난한 1947년 11월 3일의 국제연합총회결의 110(Ⅱ)을 고려하고 또한 상기 결의가 외기권에도 적용됨을 고려하고, 달과 기타 천체를 포함한 외기권의 탐색과 이용에 있어서의 국가 활동을 규율하는 원칙에 관한 조약이 국제연합헌장의 목적과 원칙을 증진시킬 것임을 확신하여,
아래와 같이 합의하였다.

제9조

달과 기타 천체를 포함한 외기권의 탐색과 이용에 있어서 본 조약의 당사국은 협조와 상호 원조의 원칙에 따라야 하며, 본 조약의 다른 당사국의 상응한 이익을 충분히 고려하면서 달과 기타 천체를 포함한 외기권에 있어서의 그들의 활동을 수행하여야 한다. 본 조약의 당사국은 유해한 오염을 회피하고 또한 지구대권외적 물질의 도입으로부터 야기되는 지구 주변에 불리한 변화를 가져오는 것을 회피하는 방법으로 달과 천체를 포함한 외기권의 연구를 수행하고, 이들의 탐색을 행하며 필요한 경우에는 이 목적을 위하여 적절한 조치를 채택하여야 한다. 만약, 달과 기타 천체를 포함한 외기권에서 국가 또는 그 국민이 계획한 활동 또는 실험이 달과 기타 천체를 포함한 외기권의 평화적 탐색과 이용에 있어서 다른 당사국의 활동에 잠재적으로 유해한 방해가 가져올 것이라고 믿을 만한 이유를 가지고 있는 본 조약의 당사국은 이러한 활동과 실험을 행하기 전에 적절한 국제적 협의를 가져야 한다. 달과 기타 천체를 포함한 외기권에서 다른 당사국이 계획한 활동 또는 실험이 달과 기타 천체를 포함한 외기권의 평화적 탐색과 이용에 잠재적으로 유해한 방해가 가져올 것이라고 믿을 만한 이유를 가지고 있는 본 조약의 당사국은 동 활동 또는 실험에 관하여 협의를 요청할 수 있다.

부록 2. NASA 중간 지침 - 달 탐사 임무에서의 행성 보호

- NASA 중간 지침 부록은 달 탐사에서 행성 오염 방지의 필요성을 강조하고 절차를 소개함

NASA Interim Directive (NID)

Effective Date: July 9, 2020 Expiration Date: December 7, 2021

NID 8715.128

NRW 1400.112

Planetary Protection Categorization for Robotic and Crewed Missions to the Earth's Moon

Responsible Office: Office of Safety and Mission Assurance

Preface

A.1 Purpose

- This directive sets forth NASA requirements applicable to robotic and crewed missions travelling to the Earth's Moon. These requirements define NASA's implementation of obligations to avoid harmful contamination under the Treaty on Principles Governing the Activities of States in the Exploration and Use of Outer Space, including the Moon and Other Celestial Bodies (UN, 1967), Article IX for such missions.
- This directive specifically addresses the control of terrestrial biological contamination associated with space vehicles intended to land, orbit, flyby, or otherwise encounter Earth's Moon.

Note: Return of samples from Earth's Moon to Earth has been unrestricted since the Interagency Committee on Back Contamination opinion following the end of Apollo 14 in 1971.

A.2 Applicability

- a. This NID is applicable to NASA Headquarters and NASA Centers, including Component Facilities and Technical and Service Support Centers. This language applies to the Jet Propulsion Laboratory (JPL) (a Federally-Funded Research and Development Center), other contractors, grant recipients, or parties to agreements to the extent specified or referenced in the appropriate contracts, grants, or agreements.

- a. The requirements of this directive apply to all NASA missions that may encounter Earth's Moon. The provisions of this NID cover robotic and crewed spaceflight missions with NASA involvement, which may intentionally or unintentionally carry Earth organisms and organic constituents to the Moon. Specifically, this includes NASA-controlled missions, commercial missions sponsored by NASA, joint missions in which NASA participates, and NASA support of non-NASA missions to the extent specified or referenced in the applicable contracts, grants, or agreements.

- a. This directive is specifically not applicable to Terrestrial (Earth-orbital) missions.

- a. In this directive, all mandatory actions (i.e., requirements) are denoted by statements containing the term "shall." The term "may" denotes a discretionary privilege or permission, "can" denotes statements of possibility or capability, "should" denotes a good practice and is recommended, but not required, "will" denotes expected outcome, and "are/is" denotes descriptive material.

- a. In this directive, all document citations are assumed to be the latest version unless otherwise noted.

A.3 Authority

- a. The National Aeronautics and Space Act, 51 U.S.C. § 20113(a).

A.4 Applicable Documents

- a. Treaty on Principles Governing the Activities of States in the Exploration and Use of Outer Space, including the Moon and Other Celestial Bodies (UN, 1967), Article IX.

- a. NPR 7120.5, NASA Spaceflight Program and Project Management Requirements.

- a. NID 8020.109A, Planetary Protection Provisions for Robotic Extraterrestrial Missions.

A.5 Measurement/Verification

- a. To ensure compliance with this NID, the Planetary Protection Officer (PPO) monitors the planetary protection related activities and development of required documentation by individual NASA missions.
- a. Program and project compliance with requirements described in this NID are subject to verification by the PPO as part of the Safety and Mission Assurance Technical Authority.

A.6 Cancellation

None.

Chapter 1. Roles and Responsibilities

1.1 Planetary Protection Categorization of Earth's Moon

1.1.1 The Office of Planetary Protection (OPP), as delegated by the Office of Safety and Mission Assurance, evaluates all robotic and crewed missions to Earth's Moon. Based on the evaluation, the PPO recommends approval or non-concur to the Chief Safety and Mission Assurance for the final gate products identified in this directive at Key Decision Points (KDPs), by review of milestone products and control plans due at life-cycle reviews. Signed and approved documents are to be completed in association with KDPs as described in this directive and in accordance with NPR 7120.5

1.1.2 The Mission Directorate Associate Administrator shall assign, with OPP concurrence, all missions to the Moon a NASA Mission Planetary Protection Category I-L (Table 1), except for missions to the following sensitive locations:

- a. Permanently Shadowed Regions (PSRs) that have scientific value in the study of the history of the solar system and of significant interest relative to the process of chemical evolution, as well as potential value for In-Situ Resource Utilization (ISRU), and
- b. Apollo landing and other lunar historic sites, which have both historical and scientific value, specifically protecting studies of the biological materials left by the Apollo astronauts. For additional information, see NASA Recommendations to Space-Faring Entities: How to Protect and Preserve the Historic and Scientific Value of U.S. Government Lunar Artifacts, (Technical Guidelines) published in 2011.

1.1.3 The Mission Directorate Associate Administrator shall assign, with OPP concurrence, missions to these two exceptions a NASA Mission Planetary Protection Category II-L (Table 1). For the purposes of complying with this NID, the PSRs include areas of the Moon south of 79°S latitude and areas north of 86°N latitude, based on Lunar Reconnaissance Orbiter mapping.

1.1.4 The Mission Directorate shall implement the planning and documentation requirements for Category II-L missions in accordance with Category II in the NID 8020.109A, with the change in requirement for organic inventory in Category II replaced by the following for Category II-L:

a. Provide an inventory of biological materials (living and dead) included in spacecraft hardware and payloads.

a. For crewed missions only, provide a listing of amount and disposition of biological materials, including waste, to remain in the lunar environment.

1.1.5 Because there is incomplete knowledge of transport mechanisms on the lunar surface, this NID is subject to change if new information about lunar environments indicate a different planetary protection categorization should be used for such missions.

Table 1. NASA Mission Planetary Protection

Lunar Target Sensitivity	Mission PP Category
Not of direct interest for understanding the process of chemical evolution or where exploration will not be jeopardized by terrestrial contamination. No protection of such regions is warranted.	I-L
Of significant interest relative to the process of chemical evolution but only a remote chance that biological contamination by spacecraft could compromise future investigations. Reporting of biological materials is warranted.	II-L

Appendix A. References

A.1 NASA-HDBK-6022, NASA Standard Procedures for the Microbial Examination of Space Hardware.

A.1 NASA Recommendations to Space-Faring Entities: How to Protect and Preserve the Historic and Scientific Value of U.S. Government Lunar Artifacts, (Technical Guidelines) published in 2011.

부록 3. NASA 중간 지침 - 화성 탐사 임무에서의 행성 보호

- NASA 중간 지침 부록은 화성 탐사에서 행성 오염 방지의 필요성을 강조하고 절차를 소개함

Effective Date: July 9, 2020. Expiration Date: July 9, 2023

NRW 1400.132

Subject: Biological Planetary Protection for Human Missions to Mars

Responsible Office: Office of Safety and Mission Assurance

Preface

A.1 Purpose

- This directive defines NASA's obligation to avoid harmful forward and backward biological contamination under Article IX of the Treaty on Principles Governing the Activities of States in the Exploration and Use of Outer Space, including the Moon and Other Celestial Bodies (the "Outer Space Treaty"), October 19, 1967.
- This directive specifically addresses the control of forward biological contamination of Mars and backward biological contamination of the Earth-Moon system associated with human presence in space vehicles intended to land, orbit, flyby, and return from Mars.
- The 1967 Outer Space Treaty provides in relevant part: "States Parties to the Treaty shall pursue studies of outer space, including the Moon and other celestial bodies, and conduct exploration of them so as to avoid their harmful contamination and also adverse changes in the environment of the Earth resulting from the introduction of extraterrestrial matter and, where necessary, shall adopt appropriate measures for this purpose." NASA recognizes that the 1967

Outer Space Treaty (OST) sets forth legal requirements on U.S. governmental and non-governmental entities to prevent such forward and backward harmful biological contamination.

A.2 Applicability

- a. This NASA Interim Directive (NID) is applicable to NASA Headquarters and NASA Centers, including Component Facilities and Technical and Service Support Centers. This language applies to the Jet Propulsion Laboratory (a Federally-Funded Research and Development Center), other contractors and subcontractors, recipients of grants, cooperative agreements or agreements concluded under provisions of the Space Act, and other agreements, including international agreements, to the extent specified or referenced in the applicable contracts, grants, or agreements.
- a. The provisions of this NID cover human spaceflight missions with NASA involvement, which may intentionally or unintentionally carry terrestrial organisms and organic constituents to the planets or other solar system bodies, including missions employing spacecraft where hardware elements are intended to return to Earth and/or the Earth-Moon System from missions to Mars. Specifically, this includes NASA-controlled missions, commercial missions sponsored by NASA, joint missions that NASA participates in, and NASA support of non-NASA missions to the extent specified or referenced in the applicable contracts, grants, or agreements.
- a. In this directive, the term “should” denotes a good practice and is recommended, but not required, and “will” denotes expected outcome.
- a. In this directive, all document citations are assumed to be the latest version unless otherwise noted.

A.3 Authority

- a. The National Aeronautics and Space Act, 51 U.S.C. § 20113(a).
- a. Space Policy Directive 1 (2017): Reinvigorating America's Human Space Exploration Program.
- a. NPD 1000.0, Governance and Strategic Management Handbook.
- a. NPD 8020.7, Biological Contamination Control for Outbound and Inbound Planetary Spacecraft.

A.4 Applicable Documents

- a. Treaty on Principles Governing the Activities of States in the Exploration and Use of Outer Space, Including the Moon and Other Celestial Bodies (the "Outer Space Treaty"), October 19, 1967, Article IX.

A.5 Measurement/Verification

- a. Compliance with this directive is continuously monitored by the Project Safety and Mission Assurance Technical Authority and by the NASA Office of Safety and Mission Assurance. Compliance may also be verified as part of selected life-cycle reviews and by assessments, reviews, and audits of the processes defined within this directive.
- a. To ensure compliance with this NID, the Office of Planetary Protection (OPP) evaluates planetary protection related activities and developments by NASA programs, including calls for mission concept studies and proposals.

A.6 Cancellation

NPI 8020.7, NASA Policy on Planetary Protection Requirements for Human Extraterrestrial Missions.

Chapter 1. Mitigating Backward and Forward Harmful Biological Contamination from Human Missions to Mars

1.1 Overview

1.1.1 Biological planetary protection is the practice of protecting solar system bodies from contamination by Earth life to enable scientific exploration and protecting Earth from possible harmful biological contamination that may be returned from other solar system bodies. The Office of Planetary Protection supports NASA's responsible exploration of the solar system to enable science, exploration/discovery, and commercial activities.

1.1.2 NASA's existing relevant policies and planetary protection requirements ensure the search for extraterrestrial life can be conducted in a safe and verifiable manner. Specifically, the primary objectives are to:

- a. Control forward contamination of other worlds by terrestrial organisms and organic constituents carried by spacecraft in order to support the integrity of the search and study of extraterrestrial life, if it exists.
- a. Preclude backward contamination of Earth by extraterrestrial life and bioactive molecules, such as prions, in returned samples from habitable worlds.

1.1.3 NASA's programmatic authorities provide resources to achieve and assure compliance with applicable planetary protection requirements. The Office of Planetary Protection (OPP) will coordinate with relevant programmatic authorities to establish appropriate resource levels.

1.2 Guidance for Biological Planetary Protection for Human Missions to Mars

1.2.1 NASA has been a key participant and advocate for the development of internationally accepted protocols to prevent backward and forward contamination, including the guidelines for "Human Missions to Mars" in the Committee on Space Research (COSPAR) planetary protection policy.

1.2.2 Specifically, NASA concurs with the general COSPAR planetary protection policy paradigm that:

- a. "Safeguarding the Earth from potential back[ward] contamination is the highest planetary

protection priority in Mars exploration.”

- a. “The greater capability that human explorers can contribute to the astrobiological exploration of Mars is only valid if human-associated contamination is controlled and understood.”
- a. “For a landed [human] mission conducting surface operations, it will not be possible for all human-associated processes and mission operations to be conducted within entirely closed systems.”
- a. “[Humans] exploring Mars, and/or their support systems, will inevitably be exposed to martian materials.”

1.3 NASA Policy on Biological Planetary Protection for Human Missions to Mars

1.3.1 NASA will develop risk-informed decision making implementation strategies for human missions to Mars, which account for and balance the needs of human space exploration, science, commercial activities, and safety. Specifically, NASA will develop guidelines and utilize data and experience gained via ground-based tests, the International Space Station (ISS), Artemis, and other missions.

1.3.2. If there is a gap between current knowledge/capability and the desired outcome as described in 1.3.1, NASA will undertake a program of activities to close the knowledge/capability gap.

1.3.3 NASA will adopt the following research structure, leveraging information from the NASA Planetary Protection Knowledge Gaps for Human Extraterrestrial Missions Workshop Report, Race et al. (2015), developing as needed:

- a. Capabilities to monitor biological processes associated with the human presence in space exploration and to evaluate changes over time;
- a. Technologies for mitigating contamination release or intrusion, potentially including closed- loop systems; cleaning/re-cleaning capabilities; quarantine, support systems, and biological waste disposal that minimize impact of humans on the environment of Mars; and
- a. An understanding of environmental processes on Mars that would contribute to transport and sterilization of terrestrial organisms released by human activity.

1.3.4 NASA will determine if it is necessary to conduct a precursor in situ experiment at a location

close to the human mission landing or operating sites to characterize any organic constituents that are present, noting that the measurement should be on airborne materials and on materials from the surface and down to a depth to which astronauts may be exposed, and to establish a baseline scientific understanding.

Note: This is recommended in part because of the Mars Science Laboratory finding of complex organic constituents in the surface and the shallow subsurface, and also because it was recommended in the National Research Council 2002 Safe on Mars report.

1.3.5 NASA will continue to leverage the ISS as a testbed in preparation for human missions to Mars. Specifically, increased frequency of biological monitoring of crew, hardware, and environmental control and life-support system (ECLSS), processes inside and outside of the ISS will allow for the development of critical baseline data.

1.3.6 NASA will make public the data from such programs, for use by any academic, industrial, or private sector entities contemplating participation in a human mission to Mars.

Appendix A. References

A.1 Actions Normally Requiring an EIS, 14 CFR § 1216.306.

A.1 PD/NSC-25, Scientific or Technological Experiments with Possible Large-Scale Adverse Environmental Effects and Launch of Nuclear Systems into Space, as amended May 8, 1996.

A.1 NPD 8900.5, NASA Health and Medical Policy for Human Space Exploration.

A.1 COSPAR Planetary Protection Policy, Kminek et al. (2017) Space Research Today 200 p.12.

A.1 Planetary Protection Knowledge Gaps for Human Extraterrestrial Missions Workshop Report, Race et al. (2015) NASA Washington DC downloadable from https://sma.nasa.gov/docs/default-source/sma-disciplines-and-programs/planetary-protection/2015-report.pdf?sfvrsn=b2fcff8_6.

A.1 Safe on Mars: Precursor Measurements Necessary to Support Human Operations on the Martian Surface, Hauck et al. (2002) National Academy Press Washington DC downloadable from <http://www.nap.edu/catalog/10360.html>.

부록 4. COSPAR 행성 보호 정책

- 국제우주연구위원회(Committee on Space Research, COSPAR)에서는 탐사 장비의 남아있는 지구 미생물로 인한 외계행성의 생물 오염을 예방하기 위하여 행성보호정책 기준을 제안하였음
- 해당 부록은 COSPAR에서 제안된 행성 보호 정책에 대한 일부 내용이며, 탐사 행성과 임무의 목적에 따라 5개의 Category로 분류하여 필요한 오염 방지 절차들을 규정하였음
- 전체원문은 COSPAR 홈페이지(<https://cosparhq.cnes.fr/>)에서 찾아볼 수 있음

Table 1: Categories for solar system bodies and types of missions

	Category I	Category II	Category III	Category IV	Category V
Type of Mission	Any but Earth Return	Any but Earth Return	No direct contact (flyby, some orbiters)	Direct contact (lander, probe, some orbiters)	Earth Return
Target Body	See Category-specific listing	See Category-specific listing	See Category-specific listing	See Category-specific listing	See Category-specific listing
Degree of Concern	None	Record of planned impact probability and contamination control measures	Limit on impact probability Passive bioburden control	Limit on probability of non-nominal impact Limit on bioburden (active control)	If <u>restricted</u> Earth return: - No impact on Earth or Moon; - Returned hardware sterile; - Containment of any sample.
Representative Range of Requirements		Documentation only (all brief): - PP plan - Pre-launch report - Post-launch report - Post-encounter report - End-of-mission report	Documentation (Category II plus): - Contamination control - Organics inventory (as necessary) Implementing procedures such as: - Trajectory biasing	Documentation (Category II plus): - P_c analysis plan - Microbial reduction plan - Microbial assay plan - Organics inventory	Outbound Same category as target body/ outbound mission Inbound If <u>restricted</u> Earth return: Documentation (Category II plus):
(continued)			- Cleanroom - Bioburden reduction (as necessary)	Implementing procedures such as: - Trajectory biasing - Cleanroom - Bioburden reduction - Partial sterilization of contacting hardware (as necessary) - Bioshield - Monitoring of bioburden via bioassay	- P_c analysis plan - Microbial reduction plan - Microbial assay plan Implementing procedures such as: - Trajectory biasing - Sterile or contained returned hardware - Continual monitoring of project activities - Project advanced studies and research If unrestricted Earth return: - None

부록 5. MARS2020 화성임무 시 미생물 오염 방지 전략

- MARS2020은 화성 표면에 탐사 로버를 착륙시켜 생명체 탐색을 위한 화성 표면 연구 및 샘플 채취와 같은 직접적인 탐사 임무를 수행하고 있음
- 이에 따라, 생물오염원으로 인한 행성 오염을 방지하기 위한 구체화 된 미생물 오염 방지 전략이 구축되어 적용되었음
- 해당 부록은 화성임무 시 생물 오염 방지의 필요성과 perseverance(MARS2020 탐사 로버)에 적용된 미생물 오염 방지 전략을 소개하고 있음

National Aeronautics and Space Administration

Biological Cleanliness for Mars 2020

Mars 2020 will seek signs of ancient microbial life on Mars. Image credit: NASA/JPL-Caltech

Previous Mars missions have established that there are places on the surface of Mars that had environmental conditions suitable to support life in the ancient past. These conditions include long-term liquid water on the planet's surface long ago and the presence of key chemical ingredients. Whether life actually existed on the Red Planet is still an open question. NASA's Mars 2020 mission will take the next logical step in Mars exploration and search for signs of past microbial life on the Red Planet.

SEEKING SIGNS OF PAST LIFE

A biosignature is an object, substance, or pattern observed in a sample—rocks, sediment, atmosphere—that could have been produced by life as we know it. If microbial life did exist on Mars, it could have left behind signs of its presence, or biosignatures, in the planet's regolith and its rock record. The Mars 2020 rover will search for these biosignatures at its landing site in Jezero Crater using a suite of advanced instruments.

The rover will study the landscape and analyze rocks and regolith down to a scale that is compatible with finding traces of past life. The Mars 2020 rover will collect and store a set of rock and sediment samples that could be returned to Earth by a future mission. The rover and a small helicopter that will fly with it to Mars will test new technologies to benefit future robotic and human exploration of Mars.

NASA works diligently to keep its Mars-bound spacecraft extremely clean. Spacecraft must carry

only a minimum amount of biological material from Earth. As it is the first mission to collect samples of Mars rock and sediment that could be returned to Earth in the future, Mars 2020 will meet its cleanliness requirements and do much more to preserve the scientific integrity of the samples.



The Mars 2020 team at work. Image credit: NASA/JPL-Caltech

A bacterial spore is a dormant form of life that helps microorganisms endure tough environments. Only certain kinds of microorganisms can produce this resilient form of life. When conditions threaten their lives, key parts of such microorganisms can go dormant inside their protective structures. When conditions become more favorable again, the spores can transform back into cells, grow, and multiply after hundreds to even thousands of years. This is why spore-forming bacteria are a focus during spacecraft cleaning.

At launch, the entire Mars 2020 spacecraft, which includes the rover, the Mars helicopter, the descent stage, cruise stage, heat shield and backshell, must carry less than 500,000 spores—that's a

tiny number as far as spores go and wouldn't even cover a typical smartphone camera lens. Of this number, parts of the Mars 2020 spacecraft that are intended to land on Mars, such as the parachute and the descent stage, must have no more than 300,000 spores in total. The rover itself is allocated just 41,000 spores, spread out over the rover's large surface area.

To meet these cleanliness standards, engineers assemble the rover and spacecraft in a "clean room." This type of room has air filters that limit dust particles, and its surfaces and floors are frequently treated with strong cleaning solutions to kill and remove living microbes.

Mission hardware is cleaned using techniques that have proven effective on many previous missions and are designed not to damage the spacecraft. This includes techniques such as hand-wiping the hardware with special sterile cloths and alcohol wipes, heating durable parts to high temperatures (230 to 392 degrees Fahrenheit, or 110 to 200 degrees Celsius), and cleaning some parts with hydrogen peroxide vapor.



Cleaning and sampling hardware in the Spacecraft Assembly Facility. Image credit: NASA/JPL-Caltech

GETTING TO MARS SAFELY

At launch, the Atlas V rocket launching Mars 2020 will be pointed along a trajectory that would not intercept Mars. That's because only some portions of the Atlas V can be cleaned as thoroughly as the spacecraft. Once the spacecraft separates from the launch vehicle's upper stage, the spacecraft will be redirected toward landing on Mars. This is known as "trajectory biasing,"

and it ensures that the launch vehicle has a less than 1 in 10,000 chance of accidentally encountering Mars for 50 years after launch.

The rover will land at Jezero crater. The scientific community recommended this location because it is where an ancient crater lake once existed, and in which a river delta formed and is preserved. A variety of measurements from orbit have shown that this region could have collected and preserved ancient organic molecules and other potential signs of microbial life from the water and sediments that flowed into the crater billions of years ago. In addition, the material carried into the delta from a large watershed may contain a variety of minerals from inside and outside the crater.

Since the mission is seeking signs of ancient—not current, or "extant" life—it can accomplish its scientific goals without visiting a potential "special region." This is a type of region that could have water ice or liquid water in some form within 16 feet (five meters) of the surface.

ENHANCED MEASURES FOR RETURNED SAMPLE SCIENCE

The samples that Mars 2020 will carry may be brought back to Earth by a future mission for more detailed study. This is why the mission must take many additional cleanliness precautions beyond what's required of missions that might simply explore the surface of Mars. This effort identifies possible terrestrial contamination and preserves the scientific integrity of the samples for possible future analysis on Earth, or "returned sample science."

As part of this effort, the mission team determines how clean the sample tubes are through all mission phases.

Before launch, project teams take samples of hardware surfaces using wipes or swabs, and study microbes collected from those surfaces in a laboratory. The cleaning process is repeated if necessary. The data collected during hardware sampling helps scientists identify any microbes that may still be present on the hardware after cleaning. This includes microbes that can survive clean room environments despite a lack of nutrients and having endured repeated exposure to strong cleaning chemicals. This process is one of several tools available to scientists that would help them

clearly identify any living or dead microbes that may have hitchhiked from Earth as Earth-source contamination, and that would not be an indication of Martian extraterrestrial life.

The parts of the rover that directly contact Mars during sample collection will be assembled in “aseptic” spaces, which provide an increased level of stringency for cleanliness that some sample collection hardware must meet. These parts are also thoroughly sterilized, exceeding the cleanliness standards of tools that doctors use in surgery. Mission teams will also identify and keep track of any known materials that remain on the spacecraft after thorough cleaning. This helps maintain a list of what’s known to be on board before the sample tubes leave Earth.

PROTECTING MARS SAMPLES

The elements of the Mars 2020 rover that participate in sample collection are handled with extra care. The mission will also thoroughly document the sample collection process and related storage activities so that this information is available for future analysis.



Before launch, project teams take samples of hardware surfaces using wipes or swabs, and study microbes collected from those surfaces in a laboratory.

Image credit: NASA/JPL-Caltech

Mars 2020's sampling system will carry 43 metallic tubes to store samples of rock and sediment obtained using the rover's coring and regolith-collecting bits.

Some of those tubes will serve as witness blanks to keep track of terrestrial contamination. These tubes and other parts of the rover's sampling system that contact Mars samples directly will undergo several special cleaning processes. For example, before assembly, this hardware will be heated to 302°F (150 °C) for 24 hours and then protected from subsequent contamination.

To keep the sampling system clean, engineers will integrate its critical parts into the rover only after the spacecraft arrives at Kennedy Space Center for final processing shortly before launch. The sample caching elements will be enclosed behind a door under the rover's belly that will unseal and detach only after landing. An additional barrier behind this door will limit the flow of unwanted material into the parts that will touch the sample and should remain clean.

Mars 2020 will collect and cache Mars samples; the task of potentially returning these tubes to Earth lies with future missions to the Red Planet. This approach should result in the most pristine, well-documented planetary samples ever obtained, ready for imaging and analysis in advanced laboratories and study by scientific specialists from around the world.



Mission hardware is cleaned using techniques that have proven effective on many previous missions. Image credit: NASA/JPL-Caltech

부록 6. 과산화수소 증기를 활용한 미생물 살균 전략

- 과산화수소 증기를 이용한 멸균 방법은 Nitrogen, Ultrapure Water, Alcohol 기존 멸균 방법에 비하여 효과적으로 미생물 포자를 제거하는 것으로 알려져 있음. 특히 우주탐사 장비의 전자기와 하드웨어가 열에 민감하다는 것을 고려했을 때 과산화수소 방법은 저온으로 멸균이 가능하다는 이점이 있으며, 부산물로 산소와 물만을 생성하기 때문에 행성보호측면에서도 친환경적이라는 장점을 가지고 있음
- 해당 부록은 과산화수소 증기(Vapor Hydrogen Peroxide, VHP)를 이용한 멸균 방법을 소개하고 있으며, 원본은 NASA 행성보호연구 홈페이지(<https://planetaryprotection.jpl.nasa.gov/>)에서 찾아볼 수 있음

Vapor Hydrogen Peroxide (VHP) Sterilization

Modern spacecraft with thermally sensitive electronics and hardware materials are not compatible with heat microbial reduction (HMR). Therefore, several vapor phase sterilization methods were considered as a low temperature alternative; Ethylene oxide & Methyl bromide and Formaldehyde & Paraformaldehyde leave organic residue, which is not ideal for organic sensitive hardware. Hydrogen peroxide (H_2O_2) on the other hand, does not leave organic residue. Its only by-products are oxygen and water. Additionally, the technique is cheaper, ideal for heat sensitive parts, more efficient, and takes a shorter amount of time to process than HMR.

To pursue vapor phase hydrogen peroxide (VHP) as an alternative sterilization technique, the Biotechnology and Planetary Protection Group at JPL conducted literature review and research work to define process specifications. During research work, microbes were selected to test the lethality of the technique, including *Bacillus stearothermophilus*, *Bacillus subtilis* var. *niger*, *Bacillus pumilus* and *Bacillus circulans*. The microbes were deposited on different materials including aluminum, polymer, paint, and epoxied graphite. Following the research work and results, NASA PPO granted approval to use this technique for spacecraft subsystems and systems.

The initial stage for VHP sterilization involves a vacuum chamber where water is evacuated from the environment. In the next stage, H_2O_2 is injected into the chamber. In the third stage, sterile filtered air is injected into the chamber, which allows H_2O_2 vapor to penetrate packaging and diffusion restricted areas to enhance the efficacy of the sterilization process. In the final stages of the process, the chamber is evacuated once more, followed by venting with sterile filtered air: the concentration of hydrogen peroxide vapor returns to ambient levels and the enclosure can be opened to retrieve contents.

NASA PPO has approved use of VHP as a low-temperature sterilization modality, for simple surfaces, with specifications for time, rate, and H_2O_2 concentration levels. Complex geometries (e.g., vented boxes and electronic chassis inside the warm electronics box of a rover), however, require further directions. Thus, an additional study aims to describe the effect of VHP on electronic materials, materials with different configurations, solder joints, etc. Work has also begun for developing a portable VHP system that can be used locally (e.g., at the site of hardware integration in a cleanroom or on the launch pad).

II. 차기단계 연구개발 계획

1. 연구개발 목표 및 평가항목

1-1. 연구개발 목표

최종목표	달/화성 탐사 장비 테스트 전문 우주기술 인력양성
세부목표	1. 외계행성(달, 화성) 표면 드릴링 테스트베드 개념 및 상세설계 2. 테스트베드 시험 절차 설계 및 달환경 모사 초저온실 구축 3. 극지 현장 드릴링 시연
연차별목표	○ 1차년도 : 외계행성(달, 화성) 표면 드릴링 테스트베드 개념설계 ○ 2차년도 : 테스트베드 상세설계 및 시험 절차 설계 ○ 3차년도(단계) : 극지환경재현 실용화 센터 내 달환경 모사 초저온실 구축 ○ 4차년도 : 달환경 모사 초저온실 활용 장비 테스트 ○ 5차년도(최종) : 극지 현장 장비 테스트

1-2. 평가항목의 연차별 목표

평가항목	가중치 (%)	관련 세부목표	연차	연차별 목표 (조건/환경)
(정성) 외계행성(달, 화성) 표면 드릴링 테스트베드 설계	10	1,2	4차년도 (2단계 1차년도)	월면토를 이용한 극지 식물 재배
			5차년도(최종) (2단계 2차년도)	월면토에서 재배한 식물 평가
(정성) 테스트베드 달환경 모사 초저온실 구축	20	2	4차년도 (2단계 1차년도)	달환경 모사 초저온실 유지 및 관리 운영 계획 수립
			5차년도(최종) (2단계 2차년도)	달환경 모사 초저온실 유지 및 관리 평가
(정성) 달환경 모사 초저온실 활용 장비 테스트	30	2	4차년도 (2단계 1차년도)	달환경 모사 초저온실 활용 장비 테스트
			5차년도(최종) (2단계 2차년도)	달환경 모사 초저온실 활용 장비 테스트 결과 정리
(정성) 극지 현장 장비 테스트	30	3	4차년도 (2단계 1차년도)	극지현장 장비 테스트
			5차년도(최종) (2단계 2차년도)	극지현장 장비 테스트 결과 정리
(정량) 미생물 오염 측정 프로토콜 1건 개발	10	3	4차년도 (2단계 1차년도)	미생물 오염 프로토콜 운용과 유지 및 보완
			5차년도(최종) (2단계 2차년도)	미생물 오염 프로토콜 보완 및 평가
합계	100			

2. 연구개발 내용 · 방법, 추진체계 및 일정

2-1. 연구개발 내용, 방법 및 추진체계

연구개발 시제 1 외계행성(달, 화성) 표면 드릴링 테스트베드 활용

■ 달/화성 표면 테스트베드 설계

● 테스트베드 활용 - 월면토(KLS-1)

- 한국건설기술연구원에서 개발한 인공 월면토 Korea Lunar Stimulant-Type 1(KLS-1) 100 g을 비닐 팩에 넣고 3, 6, 9, 12, 15 g의 물을 추가한 후 밀봉하고 손으로 물과 인공 월면토가 잘 섞이도록 주무른 다음 물이 균일하게 분배되도록 12시간 이상 방치. 12시간 이상 방치된 이후에도 수분 함량 차이가 나지 않는 것을 확인 후 그릇에 옮겨 담아 약 -30°C 의 냉동고에서 최소 하루 동안 냉동하여 샘플 제작

● 테스트 베드 시험

- 수분을 함유한 동토 상태의 월면토의 상태를 유지할 수 있도록 온도를 유지할 수 있는 냉동 실험실 안에서 진공 챔버를 활용한 장비 시험
- 냉동 실험실에 설치된 진공 챔버는 각각 장비의 운용에 따라 $0^{\circ}\text{C} \sim -40^{\circ}\text{C}$ 의 저온 환경, 저 진공 환경, 저온과 저 진공이 결합된 실험 환경을 각각 구성할 수 있음
- 저온과 저 진공 환경은 우선 냉동 실험실의 온도를 목표 온도로 낮추고, 이후 진공 챔버의 문을 닫고 진공 환경을 구성하는 순서로 환경 세팅 가능
- 인공 월면토를 포함한 용기를 진공 챔버 내부에 설치하고 측정에 필요한 센서들의 연결 상태 점검
- 유지하고자 하는 목표 온도로 냉동 실험실 온도 세팅. 목표 온도에 도달하면 진공 챔버의 목표 진공도 세팅. 목표 진공도에 도달하면 드릴링 시험 수행

■ 달환경 모사 초저온실 구축 및 운영

● 달환경 모사 초저온실 시운전

- 사전작업: 달환경 모사 초저온실(그림 34) 모든 전기 배선 공사가 올바르게 되었는지 모든 단자 접속 부분이 느슨해지지 않았는지 점검. Room Thermostat가 정확한 Setting 되었는지 확인
- 시운전: 1대씩 단계적으로 가동하면서 아래 사항을 중점적으로 점검. Pump Down S/W를 On/Off하여 Low Press S/W의 Cut-In/Cut-Off 압력을 점검. Compressoer의 토출측 Service Valve를 서서히 닫아 High Pressure S/W의 Cut-Out 압력을 점검. 전원을 Off하고 Magnetic Contactor의 부하 측에서 Compressor Wire를 제거. 즉, Comp만 제외한 나머지 모든 부분은 정상 운전되도록) 전원을 On하여 Condenser Fan이 몇 초간 운전되는지 기록하며, 이 운전 시간이 Oil Pressure Safety S/W의 Trip 시간으로 60~900sec 사이이어야 함. 위 점검 과정에서 불량품은 교체하고 재검사한 다음 모두 정상이면 연속 운전에 들어갈 수 있음
- 시운전 완료: 시운전 완료 후 필요시 전 냉동기의 필터 드라이어 교체, Comp Oil 교환, Compressor Suction Strainer 청소 작업을 시행. 위 작업 시 배관 내로 이물질 및 수분의 유입이 절대 없도록 유의. 위 작업을 시행하기 전 모든 Valve를 닫아야 함. 위 작업 완료 후 Valve를 개방하기 전에 moisture Indicator를 검사하여 황색으로 변색되어 있으면, 수액기 출구와 Filter Drier 출구변(Shut Off Valve) 사이의 진공 작업 후 냉매를 보충 충전하고 시운전에 들어가야 함



그림 34. 달환경 모사 초저온실 실외(좌)와 실내 전경(좌)

● 달환경 모사 초저온실 유지 관리 및 운영 방침 구상

- 원활한 장비 사용과 유지 보수를 위해 장비 사용 방침 제작

■ 달환경 모사 초저온실 활용 장비 테스트

● 시설장비 용도

- 미래 우주탐사 및 우주자원 활용 기술 연구센터에서 개발하는 달 탐사용 다목적 우주탐사 로버 시스템과 수전해 추력기 시제품을 우주환경 조건에서 시험하는 데 달환경 모사 초저온실 (그림 35) 활용



그림 35. 달환경 모사 초저온실 전실(좌)와 내부(우)

● 장비운영의 계획성

- 본 과제에서 개발한 달탐사 장비의 초저온 환경에서 안정적인 성능 수행. 연구사업 종료 후에도 저온에서 작동해야 하는 인공위성 탑재 장비의 온도 성능 테스트에 활용
- 남극 내륙 탐사에 활용될 극한지 로봇 시스템 개발 및 성능 테스트에 활용
- 극지나 고산에 설치되어 겨울철 저온 환경에 노출되는 무인관측장비, 단열 인클로저, 태양광, 풍력, 통신장비, 오로라 관측기, 자력계 등 유-무인 탐사 장비 개발과 테스트에 활용

■ 극지 현장 장비 테스트

● 노르웨이 스발바르 군도 롱이어비엔

- 달 탐사 장비(무인지상이동체 혹은 연구측정장비)의 모사 실험 및 현장 시연을 위해 춥고 건조한 기후를 가진 시연 후보지 선정이 필요했으며, 노르웨이 스발바르의 롱이어비엔 지역($78^{\circ} 9'2'' - 78^{\circ} 13'54''$ N, $15^{\circ} 28'3'' - 15^{\circ} 54'22''$ E)은 연평균 6°C 의 기온과 190 mm의 강수량을 가진 춥고 건조한 툰드라 기후를 보이며, 지표면이 거칠고 경사도가 있는 지형으로 구성된 지역으로 달 탐사 장비의 모사 실험 및 현장 시연을 위한 장소로 선정 (그림 36)

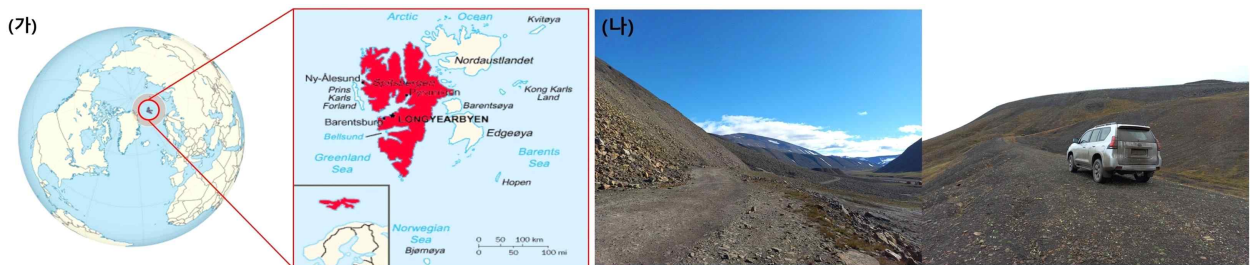


그림 36. 극지 현장 시연 후보지 (가) 스발바르 롱이어비엔의 지리적 위치 표시
<https://commons.wikimedia.org/> (나) 시연 후보지의 현장 사진

- 롱이어비엔 지역에서 달 탐사 장비(무인지상이동체 혹은 연구측정장비)에 대한 장비 테스트를 실시 하여 극한 환경에 대한 장비 성능 평가 실시

■ 한국형 달 탐사를 위한 미생물 오염 방지 프로토콜

● 한국형 달 탐사를 위한 미생물 오염 방지 프로토콜 테스트

- 고온 멸균 준비: 멸균할 장비나 샘플을 고온에 견딜 수 있는 전용 용기에 배치. 장비를 오염 가능성이 있는 환경으로부터 격리하고, 적합한 보호 장비를 착용하여 오염을 최소화.
- 고온 처리: 장비가 들어 있는 용기를 오토클레이브나 건열 멸균기로 이동. 121℃에서 최소 15 ~ 20분 동안 멸균 처리. 또는 더 높은 온도가 필요할 경우, 샘플의 내열성에 맞춰 160 ~ 180℃에서 2시간 정도 건열 처리할 수 있음. 고온 처리 후 냉각 구역으로 이동하여 장비가 안전한 온도로 식을 때까지 방치.
- 고온 처리 후 품질 확인: 온도와 시간 기록 장치를 통해 멸균이 적절히 완료되었는지 확인. 표면 샘플링을 통해 미생물의 존재 여부를 검사. 검사 결과 음성인 경우, 멸균이 완료된 것으로 간주.
- 과산화수소 멸균 준비 단계: 장비를 과산화수소 기화가 가능한 멸균 챔버에 배치. 챔버 내부를 밀폐하고 적정 온도와 습도를 조정하여 멸균이 원활히 이루어지도록 함.
- 과산화수소 기화 처리: 챔버에 35 ~ 70% 농도의 과산화수소 증기를 주입. 과산화수소가 챔버 내 모든 표면에 접촉하도록 설정하며, 2 ~ 6시간 정도의 멸균 시간을 유지. 멸균 후, 챔버를 환기하여 과산화수소 잔류물을 제거하고, 안전한 수준으로 감소했는지 확인.
- 과산화수소 멸균 처리 후 품질 확인: 멸균 후 샘플 표면에서 과산화수소 잔류물이 없는지 확인하고, 멸균 정도를 평가하기 위해 미생물 배양 검사를 실시. 미생물 배양 검사 결과 음성이면 멸균이 완료된 것으로 간주.

■ 시연 연계를 통한 미생물 오염 평가

● 달환경 모사 초저온실 테스트 장비 미생물 오염 평가

- 극한 조건의 달환경 모사 초저온실에서 미생물 오염 방지 프로토콜을 적용하여 미생물 오염 평가 실시

2-2. 추진 일정 계획

4차년도 (2단계 1차년도)													
추진내용	추진 일정												책임자 (소속기관)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
테스트베드를 활용한 드릴링 시험													정창현 (극지연구소)
극지 현장 예비 시연													이유경 (극지연구소)
시연 연계를 통한 미생물 오염 평가													이유경 (극지연구소)
우주 환경 식물 재배													이유경 (극지연구소)
5차년도 (2단계 2차년도)													
테스트베드를 활용한 드릴링 시험													정창현 (극지연구소)
극지 현장 최종 시연													이유경 (극지연구소)
미생물 오염방지 전략 확립													이유경 (극지연구소)
우주 환경 식물 재배													이유경 (극지연구소)

3. 참여인력 계획

3-1. 연구책임자 및 참여연구원 참여현황 (학생연구원 제외)

구분	자격	성명	소속기관명	소속부서명	직급(직위)	최종학위	전공
공동	공동책임자	이유경	대한민국	극지연구소	책임 연구원	10057287	박사
	참여연구원	이주한	대한민국	극지연구소	책임 연구원	10140306	박사
	참여연구원	정창현	대한민국	극지연구소	책임 기술원	10953890	박사
	참여연구원	김형권	대한민국	극지연구소	선임 기술원	11197927	석사
	참여연구원	윤동진	대한민국	극지연구소	선임 기술원	11330643	석사

4. 연구개발비 집행계획

4-1. 연구개발비 총괄표

(단위: 천원)

													양식A611		
비목	세목			1차년도	2차년도	3차년도	4차년도	5차년도	6차년도	7차년도	8차년도	9차년도	10차년도	합계	
				2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031		
직접비	인건비	내부인건비	미지급	12059	13000	13000	13000	13000						64,059	
			지급(A)	현금	19957	21610	21610	30000	21610						114,787
				현물											0
		외부인건비	미지급											0	
			지급(B)	현금				13000							13,000
				현물											0
		연구지원인력인건비(C)												0	
		학생 인건비(D)			16000	20000	20000	55000	40000						151,000
	인건비 소계(E=A+B+C+D)			35,957	41,610	41,610	98,000	61,610						278,787	
	연구시설·장비비(F)	현금	일반			380000									380,000
			통합관리												0
			현물												0
		연구활동비(G)	현금	15153	9800	9540	76050	22950							133,493
			현물												0
		연구재료비(H)	현금	20800	20100	12000	6000	5000							63,900
			현물												0
		연구수당(I)			9600	10000	10000	10000	10500						50,100
		위탁연구개발비(J)													0
		직접비 소계(K=E+F+G+H+I+J)			81,510	81,510	453,150	190,050	100,060						906,280
간접비(L)			3,990	3,990	21,850	9,450	4940						44,220		
(간접비 중 연구실 안전관리비)			481	547	547	547	547						2,669		
연구개발비 총액(M=K+L)			85,500	85,500	475,000	199,500	105,000						950,500		

4-2. (해당 시) 기업 및 정부 외 출연금 부담 계획 (2단계 1차년도)

(단위: 천원)

양식A000										
구분	년 도	기업체부담금					정부외출연금			
		기업명	유형	현금 (A)	현물 (B)	합계 C=(A+B)	기관명	현금 (D)	현물 (E)	합계 F=(D+E)
계 획 시										
변 동 시										
비고										

4-3. 참여인력 상세내역(해당 연도만, 1차년도 비목별 연구개발비 소요명세)

1) 내부인건비

(단위: 천원)

양식A401							
자격	성명	소속기관명	직급(직위)	신규채용여부	참여시작일	참여종료일	지급구분
	국가연구자번호	소속부서명	국적	월급여	계상률(%)	참여개월수	총액
연구책임	이유경	한국해양과학기술원 부설 극지연구소	책임급	N	2022.04.11	2022.12.31	지급
	10057287	KOPRI-NPI 협력센터	대한민국	10,252	10 %	9	9,227
공동연구	이주한	한국해양과학기술원 부설 극지연구소	책임급	N	2022.04.11	2022.12.31	미지급
	10140306	미래기술개발부	대한민국	9,540	5 %	9	4,293
공동연구	정창현	한국해양과학기술원 부설 극지연구소	책임급	N	2022.04.11	2022.12.31	지급
	10953890	기술개발지원실	대한민국	7,828	5 %	9	3,523
공동연구	윤동진	한국해양과학기술원 부설 극지연구소	선임급	N	2022.04.11	2022.12.31	지급
	11330643	기술개발지원실	대한민국	6,109	5 %	9	2,749
공동연구	김형권	한국해양과학기술원 부설 극지연구소	선임급	N	2022.04.11	2022.12.31	지급
	11197927	기술개발지원실	대한민국	6,232	5 %	9	2,804

2) 외부인건비

(단위: 천원)

양식A612							
자격	성명	소속기관명	직급(직위)	신규채용여부	참여시작일	참여종료일	지급구분
	국가연구자번호	소속부서명	국적	월급여	계상률(%)	참여개월수	총액
인턴	이세은	극지연구소	일용직		25.1.1	25.2.26	지급
	1329 8393		대한민국	3000	100 %	2	6000
인턴	미정		일용직		25.4.1	25.6.13	지급
				3000	100 %		7000

5. 연구에 활용 예정인 주요 장비 현황

보유 기관	연구 시설·장비명	수량	용도	보유여부 (확보방안)	활용도 (필수여부)	시기
극지연구소	달환경 모사 초저온실	1	달탐사 장비 저온 테스트	기확보		

6. 사업화 추진 계획 (해당시 작성)

7. 연구개발 성과의 활용방안 및 기대효과

■ 기술적 측면

- 우주 진입 기술 확보를 통한 국내 달, 소행성 탐사 사업에 활용
 - GPS 부재 상황의 우주공간 정밀항법/비행제어 설계 및 검증 기술 확보
 - 달 진입, 화성 진입 등 우주 진입 성공 가능성 제고
- 다목적 탐사로버 시제 개발을 통한 우주활용 기술력 제고
 - 우주 자율 주행 기술 확보, 달 탐사 사업에 활용 가능한 기반 기술 확보
 - 우주 탐사, 채굴, On-site 분석 등 다기능 활용 가능한 이동플랫폼 기반 기술 확보
 - Mining rocket 시스템과 drill 기술을 접목한 우주자원 채취 신기술 확보
 - 우주 내 자원 자동 분류, On-site 분석 기술 확보
- 달 극지 탐사에 필요한 기술로 활용, 국내 우주탐사 기술력 확대
 - 달 극지 환경 모사를 통한 개발 시스템의 성능 검증 기술 확보
 - 향후 국내 달탐사 로드맵 실현 가능성 제고
- 수전해 추력기 개발을 통한 현지 자원 활용과 지속가능형 우주 탐사 및 우주자원 회수 기술 확보
 - 친환경 우주 활용 추진기술에 대한 선제적 기술 개발
 - 소형, 중형 위성 시스템 제어를 위한 추력기 기술로 확대 활용
 - 현지 자원 활용 및 자원 회수 기술 구현을 통한 소행성 탐사 기술 기반 구축
 - 수전해 기초 기술의 응용 및 수소 산업 발전 기여, 친환경, 고성능 수소 연료 활용 기반 확대
- 재사용 발사체 등 미래형 로켓 기술 개발을 위한 기반기술 확보
 - 수소 연료를 이용한 고성능 로켓 기반 기술 확보
 - 3D 프린팅 적층 가공 기술을 적용한 미래형 로켓엔진 및 발사체 기술 확보

■ 경제·산업적 측면

- 국내 대표 우주활용 분야 인력양성 및 산업 활성화 거점 구축
 - 권역별 우주기술 연구센터 도약을 통한 우주기술의 질적, 양적 확대
- 우주산업 연계를 통한 지역 산업 고도화에 기여
 - 지자체와의 연계를 통한 우주 관련 지역 산업 고도화 지원
 - 국가 민간주도 우주산업화 초석 마련 및 세계 최고 수준 연구성과 기대
- 첨단우주 기술 확보 및 인력 배출을 통한 타 분야 산업 발전에 기여
 - 국내 산업 발전과 경제 성장을 직접적으로 견인 가능
 - 국내 우주산업 분야의 생산, 부가가치, 고용 창출 등 긍정적 효과 유도
 - 국내 기술력의 인지도 상승에 따른 국내 타 산업 제품에 대한 인식 향상 및 수출 증가에 기여
- 차세대 우주 탐사 사업을 위한 지속적인 인력양성 체계 구축
 - 향후 달, 화성, 태양계 등 우주 탐사 원천기술의 독자적인 개발
 - 우주기술 기반 신산업 육성, 벤처 창업 지원 및 기업역량 강화

■ 사회적 측면

- 심우주 및 태양계 탐사 기술의 초석 마련을 통하여 우주기술 선진국 진입
 - 독자적인 국가 우주기술 개발의 능력 강화와 우주 탐사 기술의 초석 마련
 - 자원 활용 기술 선진화 토대 구축
- 우주개발을 통한 국제사회에서의 경쟁력과 정치적 영향력 강화 토대 마련
 - 국가 간 이전이 불가능한 우주기술의 국산화
 - 국제사회에서의 영향력과 경쟁력 강화
- 국가 우주, 국방 기술개발 사업에 투입 가능한 우주 엔지니어 양성 기여
 - 국가 우주 및 국방 사업에 바로 투입 가능한 고급 우주 엔지니어 양성

Ⅲ. 당초 연구계획 대비 주요 변경사항

1. 전 단계 실적 부분

구분	변경 전	변경 후	변경 사유 및 조치사항	협약변경 승인일
연구목표 및 주요내용				
연구책임자				
주관기관				
연구비				
연구기간				

2. 차기단계 계획 부분

구분	변경 전	변경 후	변경 사유 및 조치사항	협약변경 승인일
연구목표 및 주요내용				
연구책임자				
주관기관				
연구비				
연구기간				

[첨부목록]

구분	목록	제출여부(Y/N)
첨부1	연구개발 목표의 달성도 증빙	Y
첨부2	자체평가 의견서	Y
첨부3	연구개발결과 활용계획서	Y
첨부4	[해당 시] 연구장비도입 심의요청서	N
첨부5	[해당 시] 연구데이터 관리계획(DMP)	N
첨부6	[해당 시] 연구개발성과 공개제한 요청사유서	N
첨부7	[해당 시] 청년 의무채용 관련 실적	N
첨부8	[협약용] 안전관리 계획 등	N
첨부9	[협약용] 평가의견에 대한 수정 · 보완 대비표	N

첨부1

연구개발 목표의 달성도 증빙

평가항목	가중치 (%)	관련 세부목표	연차	연차별 목표 (조건/환경)	실적요약	관련증빙
(정성) 극지 현장 시험 절차 설계	40	1	3차년도 (1단계 3차년도)	• 운용 장비별 시험 절차 설계 • 통합 시험 절차 설계 • 현장 시험 장비 운송 및 운용 계획 수립	극지현장 시험 절차 설계	
(정량) 테스트베드 구축	40	2	3차년도 (1단계 3차년도)	• 극지환경재현 실용화 센터 내 달환경 모사 초저온실 구축	달환경 모사 초저온실 구축	
(정량) 우주탐사 및 자원 활용 관련 교육 시행	20	1, 2	3차년도 (1단계 3차년도)	• <강의> 수업을 통한 달 탐사 연구 공유 및 대학원생 실습/실험 교육 진행 • 우주관련 학회 참석 및 발표 • 논문 출판	우주탐사 및 자원 활용 교육 시행	1, 2
합계	100					

번호	관련증빙 명
1	우주관련 학회 참석 및 발표
45th COSPAR Scientific Assembly 2024 Space Studies of the Earth's Surface, Meteorology and Climate (A) New Technology in Earth Observation and Applications for Sustainable Land Ecosystem (A3.1) SPECTRAL UNMIXING-BASED MAPPING OF ARCTIC PLANT SPECIES USING AN UNMANNED AERIAL VEHICLE SPECTRAL LIBRARY AND A WORLDVIEW-3 SATELLITE IMAGE Junyoung Yang, jyayang@kopri.re.kr Korea Polar Research Institute, Incheon, Korea Yoo Kyung Lee, yklee@kopri.re.kr Korea Polar Research Institute, Incheon, Korea Junhwa Chi, jchi@pknu.ac.kr Pukyong National University, Busan, Korea Remote sensing serves as an invaluable tool for monitoring the rapid changes in the distribution and composition of Arctic vegetation in response to climate change. However, mapping Arctic plant species remains challenging due to the difficulty in data acquisition from the Arctic region and the mixed pixel issue that represents a mixture of more than one plant species caused by low spatial resolution in large-scale remote sensing imagery. To address these problems, our current study aims to achieve two main objectives, (1) collecting hyperspectral information for Arctic plant species and developing a spectral library using an unmanned aerial vehicle (UAV), and (2) estimating class-specific abundances from a Worldview-3 image using the UAV-based spectral library and the spectral unmixing solution. In this study, we acquired UAV-based high-resolution RGB images, hyperspectral images, and a Worldview-3 satellite image in Adventdalen, Svalbard, Arctic. Then we constructed labeled datasets by extracting pixels associated with Arctic vegetation from the hyperspectral images. The labeling was performed using visual inspection with the RGB images and field surveys. A spectral library was developed using the mean spectrum per class of the labeled datasets and used for spectral unmixing to estimate the abundance of classes in the Worldview-3 image. For validation, a machine learning-based classifier, a one-dimensional convolutional neural network (1D-CNN), was used to classify hyperspectral pixels and create a vegetation map for identifying ground truth. The spectral unmixing results of the Worldview-3 image using the UAV-based spectral library demonstrated high consistency with ground truth, both quantitatively and qualitatively. In conclusion, this study provides valuable insights into Arctic vegetation, offering crucial insights into large-scale vegetation mapping using remote sensing data. We believe that our results will play a crucial role in detecting and understanding changes in Arctic vegetation in response to climate change.	



Spectral unmixing-based Arctic plant species analysis using a spectral library and terrestrial hyperspectral Imagery: A case study in Adventdalen, Svalbard

Junyoung Yang^{a,b}, Yoo Kyung Lee^{a,b,*}, Junhwa Chi^{c,*}

^a Division of Life Sciences, Korea Polar Research Institute, Incheon, 21990, Republic of Korea

^b Department of Polar Sciences, University of Science and Technology, Incheon, 21990, Republic of Korea

^c Major of Big Data Convergence, Division of Data and Information Sciences, College of Information Technology and Convergence, Pukyong National University, Busan 48513, Republic of Korea

ARTICLE INFO

Keywords:

Hyperspectral image
Arctic vegetation mapping
Machine learning classification
Spectral library
Spectral unmixing

ABSTRACT

Remote sensing is an invaluable tool for monitoring the rapid changes in Arctic vegetation distribution caused by global warming. Although hyperspectral data consisting of contiguous spectral bands enables the quantitative analysis of remote sensing data, mapping Arctic vegetation using hyperspectral remote sensing remains challenging due to the difficulty in acquiring data from the region. Additionally, the mixed pixel issue, which represents a mixture of more than one plant species due to low-spatial resolution, hinders accurate mapping of Arctic vegetation. To address these limitations, we collected hyperspectral information on the dominant plant species, such as shrubs and graminoids, in Adventdalen, Svalbard, and investigated effective methods for mapping Arctic vegetation using spectral unmixing. First, labeled datasets were constructed for Arctic plant species by extracting pixel data from terrestrial hyperspectral images. A spectral library was developed using the labeled datasets and used for spectral unmixing as endmembers. We employed three established classifiers, random forest, support vector machine, and one-dimensional convolutional neural network (1D-CNN) for hyperspectral image classification. Subsequently, we quantitatively and qualitatively compared the classification performances of these machine learning-based classifiers to determine the optimal classification method for validation purposes. The first derivative spectra of smoothed reflectance ($R_{s,m}$) and the 1D-CNN classifier were used to identify ground truth by classifying pixels of Arctic vegetation because they achieved the highest statistical accuracies of 0.9892 (Kappa = 0.9880) and 0.9352 (Kappa = 0.9280) for the two independent test sets and produced the most accurate vegetation maps. The spectral library using the $R_{s,m}$ spectrum showed high spectral discriminability and potential for estimating the abundance of classes from simulated mixed pixels, resulting in good agreement with the ground truth. Accordingly, our findings provide valuable insights and references for large-scale mapping studies using remote sensing data and offer effective monitoring strategies for Arctic vegetation changes in response to climate change.

1. Introduction

The Arctic region is undergoing rapid ecological changes caused by climate change. Vegetation in the polar region plays a critical role as a primary producer in providing habitats and food for a wide variety of species, contributing to sustaining the Arctic ecosystem. However, in recent decades, global warming has induced changes in the composition and distribution of vegetation in the Arctic region (Bjorkman et al., 2020; Mekonnen et al., 2021; Myers-Smith et al., 2019). Pearson et al.

(2013) predicted that, owing to rapid warming, at least half of the Arctic vegetation would be redistributed to a different physiognomic class by 2050. These changes, including shifts in dominant vegetation types like shrubs, graminoids, and mosses, can strongly influence the diversity of Arctic terrestrial ecosystems. Although vegetation monitoring is vital for understanding ecological changes in the Arctic, conducting field surveys is difficult because of the challenges associated with labor, time, costs, and inaccessibility.

Remote sensing is a useful alternative to field surveys as it offers a

* Corresponding authors.

E-mail addresses: yklee@kopri.re.kr (Y.K. Lee), jchi@pknu.ac.kr (J. Chi).

<https://doi.org/10.1016/j.jag.2023.103583>

Received 4 August 2023; Received in revised form 7 November 2023; Accepted 19 November 2023

Available online 6 December 2023

1569-8432/© 2023 The Authors. Published by Elsevier B.V. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

자체평가의견서			
사업명	① 거대과학연구개발사업 - ② 우주기술개발사업 - ③ 우주분야 전문인력양성사업		
과제명	미래 우주탐사 및 우주자원 활용 기술 연구센터		
주관연구기관명	인하대학교	주관연구책임자 성명	유 창 경
총 연구기간	2022.04.11.~2026.12.31	자체평가 해당 연구기간	2022.04.11.~2022.12.31

I. 연구개발 실적

1. 연구개발성과의 우수성/창의성

■ 등급: 아주 우수

■ 의견: 미래 우주탐사 및 우주자원 활용 관련 3가지 시제품의 연구개발을 수행함. 각 시제품별로 천측향법 알고리즘 설계 및 검증과 궤도선 6자유도 자세 제어 모듈 설계, 이동기능 테스트용 로버 설계, 중성자 분광기 전자부 설계, 소형 LIBS 분광기 개념 설계, 자원 추출모듈 설계, Lab-scale 드릴링 및 추출 테스트 시스템 개념설계, 수전해 추력기 구성품 개념 설계 등을 수행하였으며, 이는 최종 5단계 종료시 목표 수준을 만족할 수 있는 연구개발 진행 상황인 것을 판단됨.

2. 연구개발성과의 파급 효과

■ 등급: 아주 우수

■ 의견: 미래우주교육센터의 1단계 교육 성과를 통해 차세대 우주 탐사 사업을 위한 지속적인 인력양성 체계를 구축하기 위한 기반이 마련됨. 또한 1단계 연구 성과를 통해 각 시제품별 개념 설계가 수행됨. 이는 GPS 부재 상황의 우주 정밀항법 설계 및 검증 기술 확보, 우주 탐사, 채굴, On-site 분석 등 이동플랫폼 기반 기술 확보, 달 극지 환경 모사를 통한 개발 시스템의 성능 검증 기술 확보, 수전해 추력기 개발을 통한 현지 자원 활용 기술 확보로 이어질 수 있음.

3. 연구개발성과에 대한 활용 가능성

■ 등급: 아주 우수

■ 의견: 1단계의 연구개발 성과는 대부분 개념설계 결과로 즉시 활용되기에는 무리가 있으나 향후 시제품 개발의 기반 기술 및 우주탐사 및 자원활용 관련 인재 배출을 위해 활용될 수 있음. 달 및 소행성 탐사 관련 국가 우주개발 로드맵 실현에 즉시 투입 가능한 인력을 배출하고 우주탐사 및 자원활용 기술 기반의 지속적인 고급 인력 투입을 목표로 함. 또한 달 극지 진입, 달 토양 채취/분석, 물 채수/활용 기반 기술 확보를 통해 독자적인 ISRU 기술 확보를 위한 인력 제공을 목표로 함.

4. 연구개발 수행의 성실도

■ 등급: 아주 우수

■ 의견: 우주활용 전주기 관련 기초이론 과목의 교육 과정 체계 구축을 완료하였으며, 각 시제품별 1단계 연구개발 목표를 대부분 달성하여 높은 수준의 성실도를 보인 것으로 판단됨. 또한 석박사과정 학생 45명(주관기관 30명), SCI급 논문 2건 게재, 특강 및 세미나 5회 개최 등 2단계 사업 목표를 충실히 이행한 것으로 판단됨.

5. 공개 발표된 연구개발성과(논문, 지적소유권, 발표회 개최 등)

■ 등급: 아주 우수

■ 의견: 수전해 추력기 개념 설계 및 행성진입 기체역학 관련 SCI급 논문 게재 실적 보유

II. 연구 목표 달성도

세부 연구 목표 (연구계획서의 목표)	비중 (%)	달성도 (%)	자체평가
• 우주활용 전주기 관련 기초이론 과목 신설	30	100	• 우주탐사 및 자원활용 관련 개론 교육을 위한 교육 과정 체계 구축 및 전산구조역학 기초 이론의 교육 과정 체계 구축 및 시행 완료
• 궤도선 항법 및 자세 제어 설계	20	100	• 천측항법 알고리즘 설계 및 검증, 궤도선 6자유도 자세 제어 모듈 설계 완료
• ISRU모듈 PSR반입을 위한 로버시스템 설계 • 분광기 요구조건 도출 및 구성품 개념설계 • 토치 및 드릴링 기반 물, 희소광물 추출 기초 기술 확보 • 달/화성 표면 드릴링 테스트베드 개념 설계	30	100	• 이동기능 테스트용 로버 설계 완료 • 중성자 분광기 센서 구매 및 전자부 설계, 소형 LIBS 분광기 개념 설계 완료.(소형 LIBS 개발 협력 관련 국제공동연구협약 추진) • Lab-scale 드릴링 및 추출 테스트 시스템 및 자원 추출모듈(가열장치) 설계 완료 • 극지 시험 방안 조사 및 테스트베드 개념 설계 완료
• 수전해 추력기 구성품 개념설계	20	100	• 구성품 개념 설계 완료
합계	100점		

III. 종합 의견

1. 연구개발성과에 대한 종합의견

본 사업은 미래 우주탐사 및 우주자원 활용 관련 시제품을 연구개발하고 동일한 과정에서 실무형 다학제 인재 양성을 목표로 함. 이러한 사업 목표에 따라 1단계에는 우주탐사 및 자원활용 개론 관련 교육과정 체계를 구축하였으며, 3가지 시제품의 개념설계를 수행함. 본 사업의 1차년도 연구개

발 성과는 향후 2단계 연구개발의 기반기술로 활용될 것이며 인재 양성 교육을 위한 기반이 될 것으로 사료됨.

2. 평가 시 고려할 사항 또는 요구사항

본 사업은 올해 처음으로 시행되는 사업으로 사업 관련 체계가 완전하게 구축되지 않은 것으로 보임. 이러한 상황에 대한 고려가 수혜 인력 인정 기준, 예산 관리 등 사업 평가 기준에 반영될 필요가 있을 것으로 보임.

3. 연구개발성과의 활용방안 및 향후 조치에 대한 의견

1단계의 연구개발 성과는 대부분 개념설계 결과로 즉시 활용되기에는 무리가 있으나 향후 시제품 개발의 기반 기술 및 우주탐사 및 자원활용 관련 인재 배출을 위해 활용될 수 있음. 1단계 연구개발 성과를 기반으로 2단계 연구개발을 진행할 예정임.

IV. 보안성 검토 (※ 보안성이 필요하다고 판단되는 경우 작성)

1. 연구책임자의 의견

해당없음

2. 연구기관 자체의 검토 결과

해당없음

첨부3

연구개발결과 활용계획서

연구개발결과 활용계획서															
사업명	① 거대과학연구개발사업 - ② 우주기술개발사업 - ③ 우주분야 전문인력양성사업														
과제명	미래 우주탐사 및 우주자원 활용 기술 연구센터														
주관연구기관명	인하대학교	주관연구책임자 성명	유 창 경												
총 연구기간	2022.04.11.~2026.12.31	자체평가 해당 연구기간	2024.04.11.~2024.12.31												
1. 연구성과 및 활용 현황 ■ 달 및 화성 환경을 모사한 달환경 모사 초저온실 구축을 통해 우주탐사 장비의 사전 테스트를 수행. 극지 환경과 유사한 시험 조건을 조성하여 드릴링 장비 성능 및 설계 개선에 필요한 데이터를 수집. 미생물 오염 방지 및 모니터링 프로토콜 개발로 우주탐사 장비의 위생 및 안전성 강화. ISRU(In-Situ Resource Utilization) 관련 장비 설계 및 테스트베드 구축. ■ 국내 우주탐사 로드맵 실현을 위한 장비 테스트 기반을 확보하였으며, 극지 연구소와 협력하여 드릴링 및 자원 추출 기술 고도화의 기반을 구축함. 달 및 화성 자원 활용을 위한 후보 지역 탐사 전략 마련하고 극지 환경 연구 및 응용 기술로 민간산업 및 국제 협력을 확대함. 2. 연구개발결과 활용 계획 (해당항목에 “○” 표시) <table border="1"> <thead> <tr> <th>기술이전</th> <th>기업화</th> <th>후속연구 추진</th> <th>타 사업 활용</th> <th>그 밖의 목적 활용</th> <th>연구결과 활용 중단</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td></td> <td></td> <td>○</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> ■ 우주탐사 로드맵과 연계하여 국가 우주탐사 프로그램에 투입. 달/화성 극지 환경을 모사한 시설과 데이터를 활용하여 드릴링 및 자원 탐사 장비 상용화. 미생물 오염 방지 프로토콜을 국제 표준으로 제안하여 우주탐사 분야의 위상 강화. 극지 현장 시연 결과를 바탕으로 드릴링 및 자원 추출 기술의 상업적 응용 촉진. 우주탐사와 관련된 전문 인력 양성을 위한 교육 및 훈련 프로그램 개발. 3. 기대효과 ■ 국가 우주 탐사 기술 발전: 자원 탐사 및 ISRU 기술 확보로 우주탐사 비용 절감 및 지속 가능성 향상. 극지 환경 시연을 통해 현실적이고 신뢰도 높은 기술 검증. ■ 경제적 및 기술적 파급효과: 우주탐사 장비 상용화 및 관련 산업 활성화로 신시장 창출. 극지 환경 연구를 통한 지구 기후 변화 연구 기여. ■ 인재 양성: 우주탐사 장비 설계 및 테스트 전문가 양성을 통해 미래 우주산업 인프라 강화. 기술집약적 산업에서 국제적 경쟁력 확보. 4. 문제점 및 건의사항 ※ 연구성과의 제고를 위한 제도·규정 및 연구관리 등의 개선점				기술이전	기업화	후속연구 추진	타 사업 활용	그 밖의 목적 활용	연구결과 활용 중단			○			
기술이전	기업화	후속연구 추진	타 사업 활용	그 밖의 목적 활용	연구결과 활용 중단										
		○													

주 의

1. 이 보고서는 과학기술정보통신부에서 시행한 우주분야 전문인력양성사업 미래 우주탐사 및 우주자원 활용 기술 연구센터 단계보고서이다.
2. 이 연구개발내용을 대외적으로 발표할 때에는 반드시 과학기술정보통신부에서 시행한 우주분야 전문인력양성사업의 결과임을 밝혀야 한다.