

리뷰논문

우주 현지자원활용 글로벌 동향

류동영[†]

한국항공우주연구원

Global Trends of In-Situ Resource Utilization

Dong Young Rew[†]

Korea Aerospace Research Institute, Daejeon 34133, Korea



Received: July 15, 2023
Revised: August 12, 2023
Accepted: August 15, 2023

†Corresponding author :

Dong Young Rew
Tel : +82-42-870-3726
E-mail : dyrew@kari.re.kr

Copyright © 2023 The Korean Space Science Society. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ORCID

Dong Young Rew
<https://orcid.org/0000-0002-2450-4313>

요약

과거 1970년대까지의 달 표면탐사에서는 단기간 달에서의 임무 특성을 가지는 것에 비해 최근 달 표면탐사는 달에서의 장기체류와 이를 기반으로 궁극적으로 화성까지 탐사 범위를 확장하는 방향으로 진행되고 있다. 인간의 달표면 장기체류를 실현하기 위해서는 탐사 현지 자원을 활용하여 체류에 필요한 소비재나 연료 등의 현지 생산 및 사용이 중요한 전제가 된다. 국제우주탐사협의체(ISECG, International Space Exploration Coordination Group)에서 각국의 우주탐사 계획을 반영하여 제시하는 글로벌 우주탐사 로드맵에는 달표면 탐사로부터 화성탐사로 이어지는 발전 단계가 제시되며 각 단계에서 현지자원활용은 중요한 요소가 되고 있다. 본 논문에서는 국제우주탐사협의체의 현지자원활용(ISRU) 격차분석 보고서를 기반으로 현지자원활용의 기술 분야를 현지 연료 및 소비재 생산, 현지 건설, 우주상 제조, 그리고 생성 결과물의 보관 및 활용, 자원활용에 필요한 전력시스템 등과 같은 연관 분야로 분류하여 주요 분야에서의 기술 개발 및 검증 현황을 분석한다. 다수의 국가는 달 자원 중 극 지역 영구음영지역의 얼음물 이용 그리고 표토에서 산소 등의 추출에 우선 순위를 부여하고, 무인 착륙임무를 통하여 달 남극 영구음영지역 근처에서 물질 및 물 분포 확인을 준비하고 있다. 자원 활용을 위하여 수전해를 이용한 수소, 산소 등 연료 생산, 모사토를 이용한 달 표토에서 산소의 추출 등의 기술을 개발하고 있다. 자원활용 기술의 개발을 위하여 자상에 달표면 모사환경을 구현하고 기술의 개발, 시나리오의 시연 등을 통한 효율적 현지자원활용 구현 방법을 모색하고 있다. 지속 가능한 달 표면 탐사를 위하여 각국은 달 표면 도달, 자원의 조사, 물질의 추출 등에 서비스 구매 등 민간 영역의 능력을 활용하고 발전시키는 노력을 병행하고 있다.

Abstract

In contrast to the short-term nature of lunar missions in the past, lunar missions in new space era aim to extend the presence on the lunar surface and to use this capability for the Mars exploration. In order to realize extended human presence on the Moon, production and use of consumables and fuels required for the habitation and transportation using in-situ resources is an important prerequisite. The Global Exploration Roadmap presented by the International Space Exploration Coordination Group (ISECG), which reflects the space exploration plans of participating countries, shows the phases of progress from lunar surface exploration to Mars exploration and relates in-situ resource utilization (ISRU) capabilities to each phase. Based on the ISRU Gap Assessment Report from the ISECG, ISRU technology is categorized into in-situ propellant and consumable production, in-situ construction, in-space manufacturing, and related areas such as storage and utilization of products, power systems required for resource utilization. Among the lunar resources, leading countries have prioritized the utilization of ice water existing in the permanent

shadow region near the lunar poles and the extraction of oxygen from the regolith, and are preparing to investigate the distribution of resources and ice water near the lunar south pole through unmanned landing missions. Resource utilization technologies such as producing hydrogen and oxygen from water by hydroelectrolysis and extracting oxygen from the lunar regolith are being developed and tested in relevant lunar surface analogue environments. It is also observed that each government emphasizes the use and development of the private sector capabilities for sustainable lunar surface exploration by purchasing lunar landing services and providing opportunities to participate in resource exploration and material extraction.

핵심어 : 우주현지자원활용, 달표면 탐사, 문투마스, 달 얼음물, 달 표토, 글로벌 우주탐사 로드맵

Keywords : In-site Resource Utilization (ISRU), lunar surface exploration, Moon to Mars, lunar ice water, lunar regolith, global exploration roadmap

1. 서론

1960년대부터 미국과 (구)소련을 중심으로 활발하게 진행되던 달 착륙임무는 1976년 (구)소련의 루나24를 마지막으로 수십 년 동안 달표면 탐사가 중단되었다. 한동안 우주탐사의 관심대상에서 멀어져 있었던 달 표면 탐사에 2010년대부터 세계 각국의 관심이 다시 높아지고 있다. 루나24호의 착륙 이후 37년이 지난 2013년 중국의 창어-3호의 달 착륙을 시작으로 인도, 일본, 러시아, 이스라엘 등이 달 착륙을 목적으로 무인 탐사선을 발사하였고, 미국은 2023년 후반을 시작으로 상용 착륙서비스를 이용하는 일련의 무인 달 착륙 임무를 진행 중에 있다. 대한민국 또한 제4차 우주개발진흥 기본계획에 2030년대 초에 자력으로 무인 달 착륙선을 보내는 계획을 포함하고 있다.

1960년대와 1970년대의 달 착륙임무 대비 최근 다시 시작되는 달 착륙임무의 큰 차이점 중의 하나는 대부분의 임무가 달 자원과 직·간접적으로 연관된다는 점이다. 달 자원에 대한 관심은 클레멘타인(Clementine), 찬드라얀-1(Chandrayaan-1), LCROSS(Lunar Crater Observation and Sensing Satellite) 임무 등을 통하여 달의 극지역에 얼음물의 존재가 밝혀진 것과 관련이 있다. 달 극 부근 영구음영지역 얼음물의 존재는 유인탐사에서 필요한 물과 물분해를 통해 산소나 수소와 같은 연료를 지구가 아닌 달에서 조달 가능함을 의미한다. 극지역 물 외에도 극지역 고지대와 중위도, 저위도에도 히토류 등 활용가치가 높은 자원의 분포가 다수의 달탐사 임무를 통하여 확인된 바 있다.

각국의 우주탐사 기관이 참여하는 국제우주탐사협의체(ISECG, International Space Exploration Coordination Group)에서는 참여기관의 우주탐사 계획을 반영하여 글로벌 우주탐사 로드맵(GER, global exploration roadmap)을 발간하고 있다. 2022년 발간된 국제우주탐사 로드맵 보완서에서는 달과 화성에서의 장기거주와 달 표면의 상용시장 가능성 확인 등을 위해 탐사 현지에서의 우주자원 생산 및 활용 기술 시연을 우주탐사 시나리오의 목적 중의 하나로 적시하고 있다[1].

과거 아폴로 프로그램에서는 아폴로 우주인의 활동에 필요한 물자와 장비 그리고 지구로 귀환하기 위해 필요한 연료 등을 모두 지구로부터 가져가는 방법을 사용하였다. 이러한 탐사 방식 기반의 달표면 장기거주를 위해서는 지구로부터 달표면까지 막대한 물류 수송을 필요로 한다. 반면 현지자원활용 기반의 우주탐사를 통하여 탐사 현지에서 필요한 연료나 소비재 중

일부를 현지 조달한다면 물류 수송 수요를 상당히 줄일 수 있을 것으로 기대된다. 미국의 ‘문 투마스’(Moon to Mars) 아키텍처에서도 유인탐사 시나리오에 현지자원 활용 기술 검증을 위한 활동을 포함하고 있다[2].

본 논문에서는 최근 우주탐사 목적 중 중요 이슈인 우주현지자원활용 관련 그 필요성과 현지자원활용 기술분류를 살펴보고, 현지자원활용 실현을 위하여 주요 국가별 진행 사항과 주요 기술에 대한 개발 현황을 기술하고 시사점을 분석한다.

2. 국제 우주탐사 로드맵 및 현지자원활용의 목표

국제우주탐사협의체에서 발간한 글로벌 우주탐사 로드맵 최근 발간자료에 의하면 글로벌 우주탐사는 Fig. 1에 요약된 것과 같이 3단계로 구분된다. 그 중 첫 단계에는 인류가 다시 달에 가는 단계로 2명의 우주인을 달 표면에 보내는 것과 유인우주탐사를 지원하기 위한 무인 착륙 임무가 포함된다. 두 번째 단계는 탐사의 확장 및 건설, 세 번째 단계는 지속성 있는 달 탐사를 구현하는 단계이다. 두 번째 단계는 다시 달표면 모빌리티, 탐사 및 과학임무를 중심으로 하는 2A 단계와 달에서의 장기 체류와 화성 탐사를 준비하는 2B 단계로 구분된다. 2A 단계에서는 비가압형 다목적 로버와 소형 가압형 유인로버, 거주시설, 수직태양전지 기반 전력시스템, 기술 시연 및 소규모 생산능력을 갖는 현지자원활용 플랜트가 사용된다. 2B 단계에서는 이전 단계의 구성 요소에 향상된 가압형 로버가 추가되며 장기 거주시설, 원자력 기반의 전력시스템, 본격적인 현지자원활용 플랜트 등이 중요한 요소가 된다. 2B 단계는 2단계의 최종 수준으로 4명의 우주인이 극지역에서 42일간 임무를 수행하는 시나리오가 고려된다. 3단계에 대한 구체적인 정의는 아직 이루어지지 않았다[1,3].

글로벌 우주탐사 로드맵은 각 단계별 구성요소를 반영한 시나리오를 제시하고 있다. 또한 Fig. 2에서 정의된 것과 같이 우주탐사의 목적 항목 별로 탐사 시나리오와 연관된 계량목표가 정의된다. 글로벌 우주탐사 로드맵의 1단계에서는 2명의 우주인이 달에서 임무를 수행하는 것을 시작으로 2단계의 완성에 해당되는 2B단계에서는 4명의 우주인이 누적 체류기간 500일 이상 기간 동안 누적거리 1만 km 이상의 이동을 수행하고, 현지자원을 활용하여 우주인의 이동 및 거주에 필요한 연료를 연간 50톤 이상의 생산을 성능지표로 설정하고 있다.

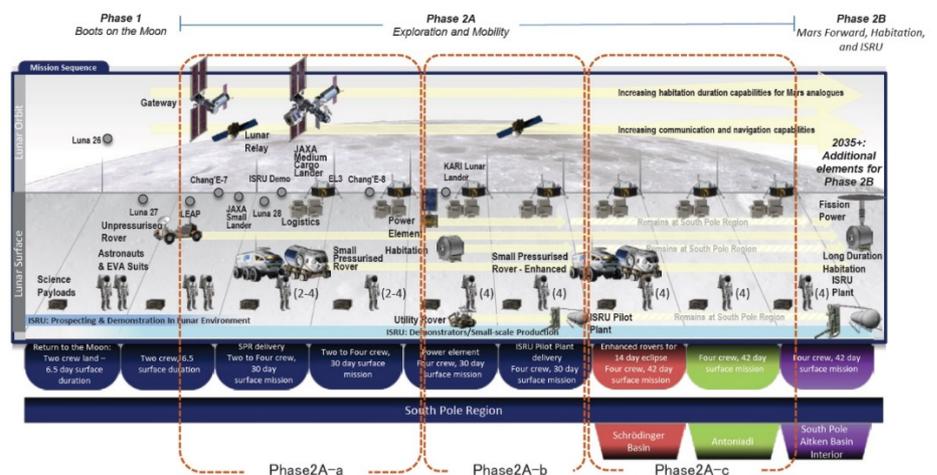


Fig. 1. Mission phase summary of global exploration roadmap [1].

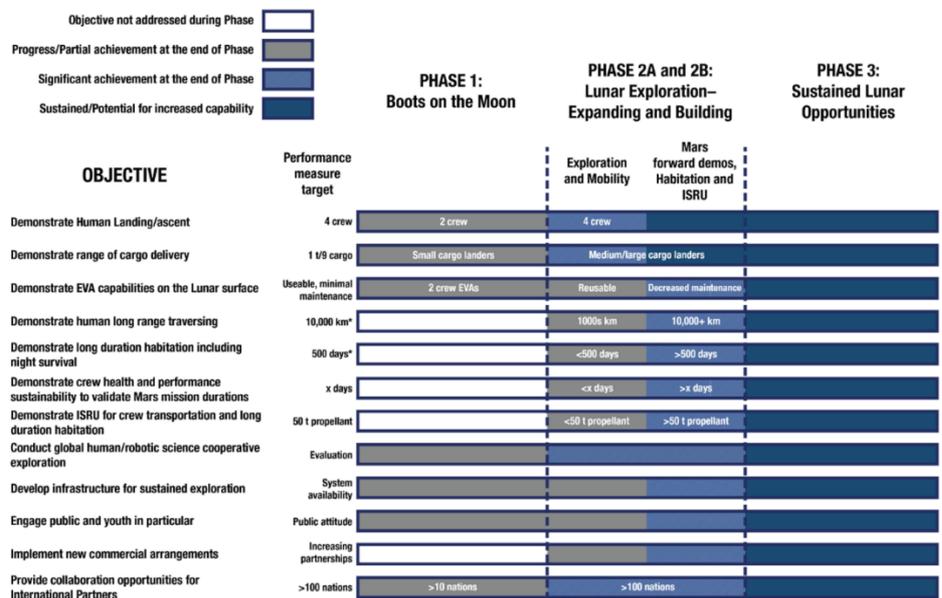


Fig. 2. Objective and performance measure target progress across phase in the global exploration roadmap [1].

국제우주탐사협의체에서 발간한 글로벌 우주탐사 로드맵 검토를 통하여 달표면에서 장기적인 유인 체류와 이동을 위해서 현지자원의 활용이 필수적이며, 국제적으로는 여러 가지 현지 자원 중에 달 극지역의 얼음물로부터 연료의 생성을 우선적으로 고려하고 있음을 알 수 있다.

3. 현지자원활용 기술 분류

국제우주탐사협의체의 기술워킹그룹(Technology Working Group)에서는 우주탐사 로드맵의 구현에 필요한 핵심기술 중 중요도가 높은 기술에 대하여 필요기술 대비 각 참여국가의 기술수준 분석 등을 포함하는 기술격차 분석을 수행하고 있다. 우주현지자원활용에 대한 기술격차 분석은 각 회원기관과 관련 분야 전문가로 팀을 구성하여 수행되었으며, 2021년 ISRU 기술 격차분석 보고서가 발간되었다[4].

현지자원활용 격차분석에서는 분석 수행을 위하여 우주자원활용 관련 기술 분류 목록을 제시한다. 우주자원활용 관련 기술은 Fig. 3에서 보는 것과 같이, 현지 연료 및 소비재 생산, 현지 건설, 우주상 제조로 대분류 된다. 우주자원활용에서 생산된 결과를 저장하거나 이용하는 분야까지 확장하여 기술 분류에 포함한다면, 생명유지 및 선외활동 지원장치, 전력시스템, 생산물의 저장 시설, 이착륙선 및 이동용 호퍼(hopper) 등을 포함한 기술 분류도 적용 가능하다. 기술 분류에는 포함되지 않았지만, 우주자원활용 기술을 지구상 유사 환경에서 검증하기 위한 장비나 재료 등도 함께 고려할 필요가 있다. 지상검증을 위한 기술의 대표적인 사례로 달 탐사 지역 표토의 성분 또는 물리적 특성 등을 모사하는 모사토가 있으며, 장비로는 모사토를 포함하여 달의 진공 및 열환경을 모사하기 위한 지반열진공챔버(dirty thermal vacuum chamber)가 있다.

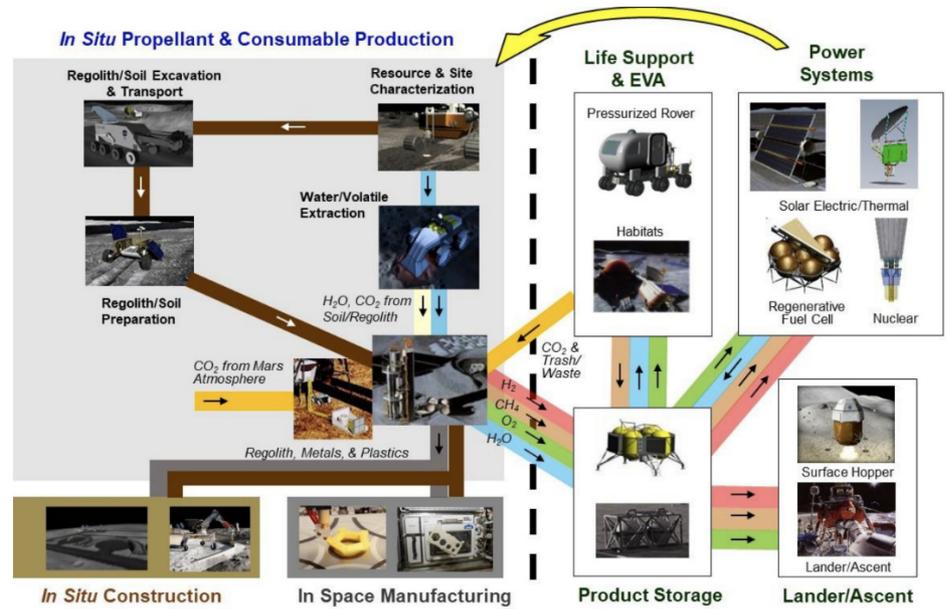


Fig. 3. In-situ resource utilization (ISRU) and connections to surface systems defined in the ISRU gap assessment report [4].

4. 현지자원활용 국가별 주요 동향

미국은 가장 적극적으로 우주자원활용 기술의 개발 및 시연임무를 추진 중인 국가이다. NASA와 같은 국가우주기관이 중심이 되어 기술개발 및 임무를 발굴하고 있으며, 국가 기관에 아닌 민간 기업 등의 참여와 투자가 활발하게 이루어지고 있다. 대형 발사체와 유인 달 착륙선 사업을 추진하고 있는 SpaceX사가 있으며, 무인 달 착륙선 및 로버를 개발하여 상업적으로 무인 달 착륙 및 표면 이동 서비스를 제공을 추진하고 있는 인튜이티브머신즈(Intuitive Machines), 아스트로보틱(Astrobotic) 등이 대표적이다. NASA는 임무 발굴 및 임무 탑재체 개발에 집중하고 달표면 탐사 임무 수행에 필요한 장비의 지구-달표면 구간 이동에 상용 달 탑재 서비스를 이용하는 CLPS(Commercial Lunar Payload Services) 프로그램의 지속적인 운영, 유인 달 착륙 프로그램인 아르테미스(Artemis) 계획에서 우주인의 달 표면 착륙과 이륙에 민간 서비스를 이용, 탐사용 드릴, 수전해 장비와 같이 현지자원활용에 필수 요소 등에 기업체 능력 활용 등의 정책을 추진함으로써 민간영역의 우주탐사 참여 확대을 위한 정책을 추진하고 있다.

미국의 우주자원활용은 달에서의 기술이 궁극적으로 화성 장기체류를 가능하게 하는 능력의 확보로 이어지는 ‘문투마스’(Moon to Mars) 관점에서 추진되고 있다. 달의 현지활용이 가능한 자원은 극지 부근 영구음영지역의 얼음물, 고지대 또는 바다지역의 암석(광물), 태양풍 등으로부터 기인한 휘발성 물질 등 다양하게 존재한다. NASA는 활용자원의 우선 순위를 정하는 데 있어 채굴이 가장 용이한 자원, 인프라를 최소로 필요로 하는 자원, 즉각적으로 현지 활용이 가능한 자원 등의 조건을 고려한다. 이러한 조건을 기반으로 선정된 우선 대상으로는 극지역 고지대 표토에 함유된 자원(예: 산소, 알루미늄, 규소)과 극지역의 물 및 휘발성 물질이다. 다음으로 고려되는 자원으로는 일메나이트, 화산석 등의 자원(예: 철, 티타늄, 태양풍 기원 휘발물질), 희귀원소 및 토륨 등이 있다[5].

일본은 하야부사-1,2(Hayabusa-1,2) 임무를 통한 마이크로 중력 천체인 소행성 샘플리턴을 성공적으로 추진한 것과 같이 중력 천체인 달 표면에 접근할 수 있는 독자기술을 확보하기 위하여 소형 달 착륙선인 SLIM(Smart Lander for Investigating Moon) 프로그램을 진행 중이며, SLIM에서 확보한 정밀 착륙기술을 기반으로 극지역과 같은 협지에서 본격적인 탐사를 수행하기 위한 LUPEX(Lunar Polar EXploration mission) 계획을 인도와의 국제협력 방식으로 추진하고 있다. 유인 우주탐사 영역에서는 국제우주정거장에서의 성과를 기반으로 게이트웨이(Gateway), 아르테미스 등 유인 달 탐사 프로그램에 적극적인 참여와 역할 담당하고 있다. 일본은 국제우주탐사협의체에서 우주선도국의 역할을 수행하고 있으며, 글로벌 우주탐사 로드맵에서 중요한 달 면 요소인 가압형 유인로버 개발을 산업체의 참여로 추진 중이다.

인도는 찬드라얀 달 탐사 임무를 지속적으로 수행하여 우주 강국의 위치를 강화하고 있다. 찬드라얀-1 달 궤도선에는 NASA가 제공하는 레이더 영상 레이다 탑재체인 Mini SAR 및 영상 분광기인 M3(Moon Mineralogical Mapper)를 탑재하여 달에 물의 존재를 규명하는 중요한 정보를 제공하였다[6]. 2023년 8월 23일 두 번의 도전 끝에 달 착륙에 성공한 찬드라얀-3 착륙선은 남위 약 69.3도로 지금까지의 달 착륙 임무 중 남극에 가장 가까운 지역에 착륙하여 지표 근처의 플라즈마 환경, 달표면의 열특성, 지진활동 등을 측정하고, 로버를 이용한 달 표면 화학조성 및 구성원소 분포 등을 조사하는 임무를 수행하였다[7]. 찬드라얀-3는 달 남극 지역에서의 표면탐사의 시작을 알리는 임무로 볼 수 있다.

룩셈부르크는 우주탐사의 다양한 분야 중 우주자원에 집중을 통하여 국제 우주탐사에서의 역할을 확장해 나가고 있다. 매년 Space Resources Week의 개최와 함께 ESRIC(European Space Resources Innovation Centre)의 설립 지원 및 주도적 운영을 통하여 비교적 적은 국가 자원의 투입으로도 우주자원 관련 기술개발, 교육, 정책수립, 기술협력 등에 대한 정보 교류의 허브 역할을 담당하고 있다[8].

우리나라는 제4차 우주개발진흥 기본계획에 달착륙과 함께 현지우주자원활용(ISRU)이 포함되어 있어 우주자원활용 추진의 근거가 확보되었다. 다누리 달 궤도선 탑재체 중 감마선 분광기 및 섀도우캠(ShadowCam)은 각각 달 자원의 분포 및 영구음영지역 영상 등의 확보를 통하여 현지자원활용에 필요한 정보를 제공 등 우주탐사에 기여할 것으로 기대된다. 달 표면 탐사와 우주자원활용에 대한 국가적 관심의 고조에 따라 정부 출연연구기관 및 산업체에서는 각자의 강점 기술 분야와 관심에 따라 달표면 방사선 및 먼지 환경, 분포 자원의 식별, 달 표토로부터 휘발성물질의 추출, 달 표면 모빌리티, 원자력 및 방사선동위원소 기술의 우주활용 등 분야에서의 기술 개발을 진행 중이다.

5. 현지자원활용 기술별 주요 동향

5.1 현지 자원 및 지역적 특성 분석

현지에서의 연료 및 소비재 생산을 위해 우선적으로 현지 자원 및 지역적 특성을 분석이 수행되어야 한다. 최근에 이루어진 달 궤도선을 이용한 원격탐사와 무인 착륙임무에는 대부분 자원과 지역적 특성 정보를 확보하기 위한 임무가 포함되어 있다.

국제적으로 관심있는 달 자원 활용 방안으로는 극지역 얼음물 추출·활용과 표토로부터 산소 및 금속의 추출·활용 두 가지가 있다. 극지역 얼음 관련한 원격 자원 조사는 한국의 다누

리에 NASA가 제공하여 탑재한 쉐도우캠을 이용한 영구음영지역에 대한 조사가 있다. 달 표면에서의 직접적인 조사로는 NASA에서 추진하고 있는 남극에 있는 영구음영지역 표토의 직접적인 조사를 위한 PRIME-1(Polar Resources Ice-Mining Experiment-1) 임무, 극지역 얼음 및 휘발물질의 분포를 달 표면에서 직접 조사하기 위한 VIPER(Volatiles Investigating Polar Exploration Rover) 임무 등이 있다. 2023년 착륙에 성공한 인도의 찬드라얀-3와 착륙에 실패한 러시아의 루나-25가 남극에 가까운 지역에 착륙을 목표로 하는 것은 남극에서의 현지자원활용 가능성과 이를 기반으로 한 달에서의 활동에 대한 국제적인 관심을 반영한 것이다.

NASA의 PRIME-1 임무는 극지역 자원 및 얼음 채굴 시험 임무로 인튜이티브머신즈사의 상용달탐재서비스(CLPS)를 이용하여 2023년 후반 달 표면에 도달하여 임무를 수행하는 것을 목표로 추진되고 있다. PRIME-1 임무는 드제라쉬 크레이터(de Gerlache Crater)에서 쉐클턴 크레이터(Shackleton Crater)로 이어지는 능선에서 착륙선에 장착된 드릴 TRIDENT(The Regolith and Ice Drill for Exploring New Terrain)를 이용하여 약 1미터 깊이의 토양을 채굴하고, 질량분석기 MSolo(Mass Spectrometer observing lunar operations)를 이용하여 토양에 포함된 휘발성 물질 분석으로 구성된다(Fig. 4) [9,10].

PRIME-1 임무가 영구음영지역 부근 고정된 지점에서의 표토를 조사하는 임무라면 무인 로버를 이용한 이동을 통하여 얼음의 분포를 조사하기 위한 VIPER 임무가 준비되고 있다. VIPER 임무는 아스트로보틱사의 그리핀 착륙선을 이용하여 남극 부근의 노빌레(Nobile) 지역에 착륙하여 100일 동안 영구음영지역을 포함한 20 km 거리를 주행하면서 극지역 얼음의 분포, 물리적인 상태, 성분 등을 조사한다. VIPER 형상 및 임무운영 개념도는 Fig. 5와 같다. 로버는 1.5 m × 1.5 m × 2.5 m 크기에 450 kg의 중량으로 최고 시속 약 720 m의 이동속도를 갖는다. 임무를 위한 탑재체는 PRIME-1에서 사용되어 성능과 신뢰도가 검증된 TRIDENT 드릴과 MSolo 질량분석기를 사용하여 임무 성공 가능성을 높이고 있다[11,12].

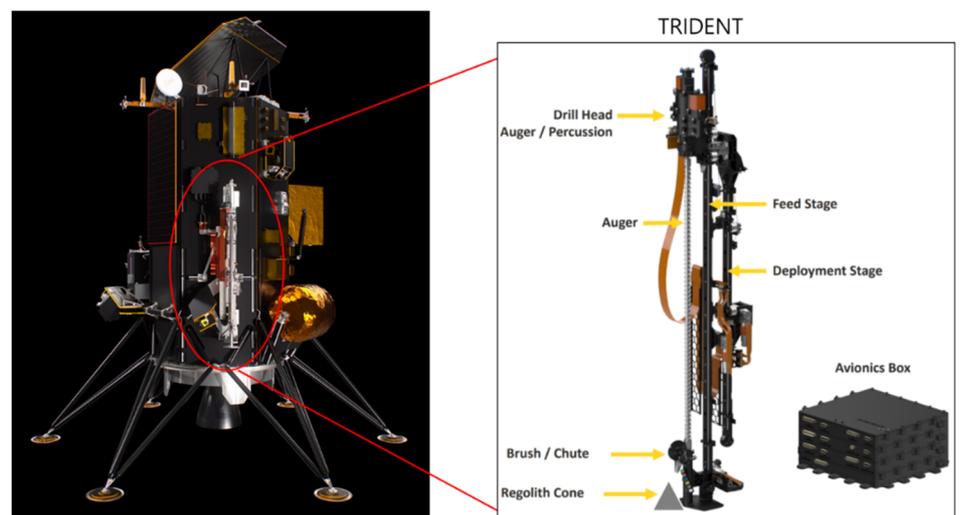


Fig. 4. PRIME-1 payloads on the intuitive machines Nova-C lander (left) and enlarged TRIDENT drill (right) [10,11]. PRIME-1, polar resources ice-mining experiment-1; TRIDENT, the regolith and ice drill for exploring new terrain.



Fig. 5. An artist's concept of the completed design of NASA's volatiles investigating polar exploration rover [12].

5.2 자원 추출

우주 현지자원으로부터 연료(추진제)로 사용 가능한 산소를 획득하는 기술은 우주자원활용에서 핵심분야 중 하나이다. NASA는 화성탐사선 퍼시비어런스(Perseverance)의 현지자원활용 검증 탑재체인 MOXIE(Mars OXYgen In-situ resource utilization Experiment)를 이용하여 화성 대기 중 이산화탄소로부터 산소를 추출하는 시험을 성공적으로 수행하고 있다. 17.1 kg의 MOXIE는 탐사 로버 내부에 장착되어 300 W의 전력을 소비하며 시간 당 최대 10 g의 산소를 생산하고 있다[13]. NASA에서는 MOXIE 부품 중 고체 산화물 전기분해 장치(SOEC, Solid Oxide Electrolyzer Cell)의 기술 고도화를 통하여 실사용 수준의 생산 능력을 키우는 기술과 달에서 산소 생산에 적용하기 위하여 화성 대기 대신 달 현지에서 획득한 물에서 산소를 추출하는 기술 개발을 민간기업을 통하여 수행하고 있다. 달에서 기술 시연 수준의 활용을 위한 목표는 시간 당 수소 1.8 kg 생산, 전력 효율 46 kWh/kgH₂를 목표로 하고 있다[14].

수전해 기술은 이미 지구상에서 많이 사용되는 기술로 우리나라를 비롯한 여러 국가에서 다양한 방식의 수전해 기술이 이미 상용화되어 있는 상황이어서 지구상의 기술을 달의 환경에 적합하게 발전시키기 위한 연구 개발이 필요하다. 고려가 필요한 달 환경으로는 진공 상태의 대기 조건, 우주 방사선 환경, 달의 낮과 밤 기간 100℃ 이상에서 -150℃ 이하로 변동하는 주변온도, 지구 중력의 1/6 수준의 낮은 중력 등이 있으며, 특히 영구음영지역의 얼음을 이용하여 연료를 추출하기 위하여 연료 생산 플랜트를 영구음영지역 부근에 두는 경우 -173℃ 이하의 극한 온도조건에서의 운전을 고려해야 한다. 또한 달에서 생산될 수 있는 전력량을 고려한다면 단기간 대량생산보다는 장기간에 걸친 운전을 통하여 필요한 양의 연료 생산이 적합할 수도 있기 때문에 달 환경에서 장기간 안정적으로 작동을 보장하는 신뢰도 확보가 필요하다. 달에서의 생산된 연료를 액체 수소 추진장치의 연료로 사용 실현 추진 시, 수전해 방식으로 생산된 산소 및 수소 가스를 액화하기 위한 극저온까지의 방열 방법에 대한 고려가 함께 이루어져야 한다.

5.3 현지자원활용 기술의 지상검증

우주 현지자원활용의 성공 가능성을 높이기 위해서는 달에 임무 장비를 보내기 전에 지구 상에 달 임무 환경과 유사한 환경을 구축하고 충분한 성능과 신뢰성 등에 대한 검증이 필요하다. 대표적인 달 표면 환경 모사 분야로 표면 토양 모사토, 열 및 진공환경 등이 있으며, 토양의 굴착, 채집된 표토 처리를 위한 호퍼, 건설 관련 기술 시험, 달 중력 모사 장치 등 다양한 종류의 검증 시설이 있다.

달 표면 모사토는 로버 주행, 착륙 안정성 등의 지상시험에서 임무 지형 조건 모사에 사용되기도 하지만 현지자원활용과 관련하여 달 표토에 포함되어 있는 산소나 휘발성 물질, 금속 등의 추출 기술 검증용으로 사용되기도 한다. 활용 목적과 착륙지 환경에 따라 다양한 모사토가 필요하기 때문에 각국의 연구기관 또는 민간 영역에서 다양한 모사토를 개발, 활용하고 있다. 미국의 존스홉킨스대의 응용물리실험실(JHU/APL)에서는 NASA의 위탁으로 매년 달 토양 모사토 분석 보고서를 발간하여 NASA 및 달 관련 커뮤니티에 정보를 제공하고 있다[13]. 우리나라는 한국건설기술연구원에서 달 토양 모사토를 대량으로 생산할 수 있는 기술과 장비를 보유한 상태이다(Fig. 6)[16].

NASA 존슨스페이스센터(Johnson Space Center)에서는 로봇을 사용한 채굴 및 건설 기술을 모사된 달 환경에서 시험하기 위한 일련의 시설을 구축하여 활용 중이다. 채굴 및 건설 기술 시험 시설인 ARGO(Advanced Regolith Ground Operations)는 챔버 내부의 크기가 1.5 m × 1.5 m × 1.5 m 규모의 소형 지반진공챔버 ASSIST, 적층기술을 이용한 건설, 채굴 및 채굴지역 준비 장치의 시연 등을 위한 ARGO 겐트리(gentry), 액체헬륨을 이용하여 최대 25°K 까지 내릴 수 있는 극저온 장치, 유사환경에서 적층 방식의 건설 기술 시험장치인 REACT,

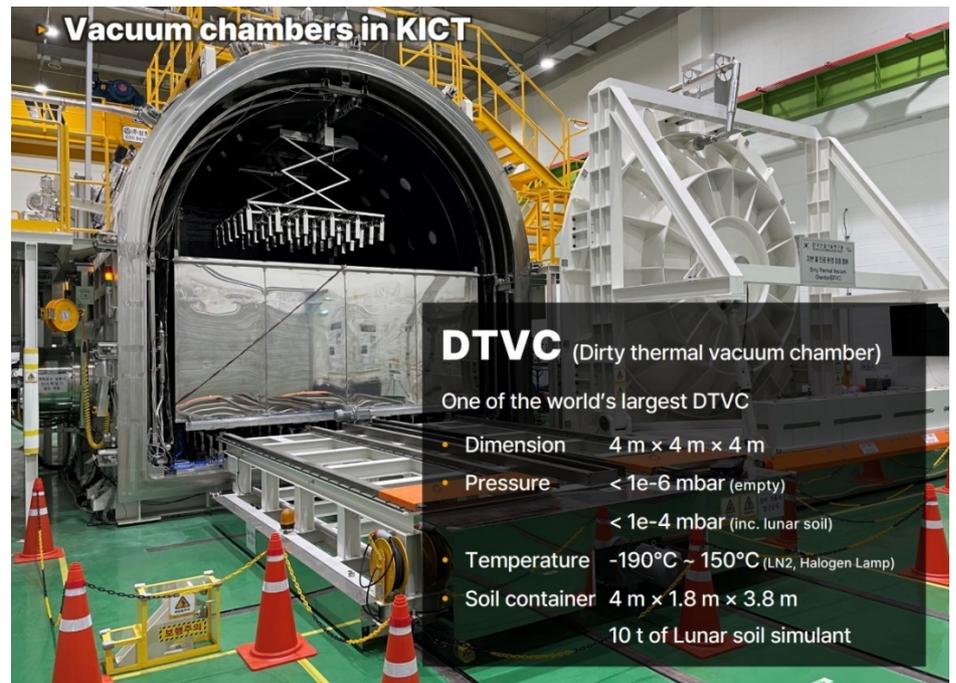


Fig. 6. Dirty thermal vacuum chamber in Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology (KICT) [19].

고온조건의 표토 전기분해 방식을 적용하여 표토로부터의 산소 가스 추출 시험장치 GaLORE 등이 포함되어 있다[17].

한국건설기술연구원은 내부 크기가 4 m × 4 m × 4 m, 달 토양을 넣은 조건에서 압력 10⁻⁴ mbar, 온도 조건 -190℃에서 150℃, 모사토 투입 중량 10톤 규모의 대형 지반열진공챔버와 소형 파일럿 지반열진공챔버를 개발하여 달 표면 환경 모사 시험에 활용하고 있다[18,19].

달에서 자원활용을 위한 지형 조성이나 건설 등에 무인으로 운용되는 장비가 이용될 수 있다. 이 경우 무인 장비는 건설이 이루어지는 달 표면 현장에서 멀리 떨어진 지구의 관제소나 달의 유인기지에서 수행될 것으로 예상할 수 있다. JAXA(Japan Aerospace Exploration Agency)는 달에서 물을 생산하는 플랜트 기지를 무인 건설장비를 이용하여 수행하는 상황을 재현하기 별도의 건설 부지와 수송차, 굴삭기 등의 무인 건설장비를 준비하고, 거리가 떨어진 별도의 관제소에서 원격 조정과 자동화 방식으로 물 활용 시설 건설 시나리오를 실행하였다. 이러한 시험을 통하여 원격 조정에 의한 무인 건설이 효율적으로 진행되기 위해서 건설 현장에서 취득된 데이터를 기반으로 장비와 지형에 대한 동적 상황 모사가 실시간으로 이루어질 필요성을 파악하였다[20].

5.4 현지자원활용 임무 시스템 설계

현지자원활용 구현을 위한 개별기술 외에도 현지자원활용 임무 시나리오에 대하여 임무 시스템의 구성과 크기, 필요전력을 산정하기 위한 개념을 도출하는 것은 구현하고자 하는 임무 시스템의 형상을 예측하고 필요한 기술적 요구사항을 사전에 도출하여 기술 개발의 방향성을 설정하는 데 도움이 된다. JAXA는 글로벌 우주탐사 로드맵에 제시된 현지자원활용 기술시연 성능 목표 중 달 표면에서 필요한 연료 생산 목표인 연료 57.6톤을 생산하기 위한 임무 시스템 개념을 제시하고 있다.

개념 도출에 사용한 조건은 다음과 같다: 연료생산 장치는 남극 영구음영지역 근처에 두고 고지대에 태양전지를 높이 세워 연평균 일조율 50% 조건을 가정한다. 연료생산 장치와 전력 장치와의 거리는 20 km이며, 유선 전력전송 방법을 사용한다. 개념설계 대상이 되는 임무 플랜트에는 표토 채굴, 물 추출, 물 농축 및 정제, 수전해, 가스 산소 및 수소의 액화, 액체 연료의 저장 등을 위한 장비 등이 포함된다.

연료 생산 플랜트로 제시된 개념 형상은 전력 요구 조건을 만족하기 위한 태양전지판 면적 2,000 m², 액화에 필요한 방열판 면적 300 m²이며, 플랜트 전체 중량은 293톤 등이다. 연료 생산 장치는 20 ft 표준 ISO 컨테이너에 들어갈 수 있을 정도의 크기를 목표로 하고 있다. 전체 플랜트를 구성하는 요소 별로 산정된 무게는 태양전지 관련 및 전력 변환기, 연료전지, 전력 케이블, 방열판 등이 전체 무게의 95% 이상을 차지하는 것으로 나타났다. 이러한 결과를 고려하면 실제 현지자원활용 플랜트 건설 시 전체 플랜트의 무게를 줄이기 위해서는 전력 생산, 전송, 저장 등의 전력 관련 장비와 방열판의 무게를 줄이기 위한 방안 모색이 필요한 것으로 제시되었다[21].

원자력이 아닌 태양에너지 기반의 전력을 영구음영지역 얼음으로부터 연료를 생산하는 과정에 사용하는 경우, 일조율을 높이기 위해 고지대에 위치해야 하는 태양전지와 물의 채취와 액화를 위한 저온 조건을 위해 음영지역 가까이 설치가 필요한 자원활용 플랜트 사이의 거리

가 멀어지는 조건이 발생하게 되어 케이블 방식의 대안으로 무선 전력전송 또는 태양광 반사판 등의 방법 등에 대한 고려가 필요한 것으로 판단된다.

한국항공우주연구원에서도 국내 현지자원활용 관련 관심 연구기관과 기업체 등의 관심 자원을 기반으로 현지자원활용 기술 시연을 위한 소규모 플랜트에 대한 개념연구를 수행 중에 있다.

6. 결론

본 논문에서는 달표면 현지자원활용이 달표면 장기 체류와 ‘문투마스’ 계획에 차지하는 의미를 살펴보고, 현지자원활용과 관련된 주요 기술 분야에 대한 국내외의 기술 개발 현황을 살펴보고, 현지자원활용은 탐사 및 우주인의 거주에 필요한 소비재, 연료 등을 탐사 현지에 존재하는 자원을 활용하여 확보하는 것으로 달표면에 다수 우주인의 장기 체류와 달에서의 이동, 지구에서 활용 가능한 자원의 지구로의 송출, 달 또는 우주에서 급유를 통한 화성 탐사 실현을 가능하게 하는 미래 우주탐사의 핵심요소가 됨을 알 수 있었다.

미국을 중심으로 한 우주탐사 선도국에서는 2030년대 중반까지의 달 표면탐사와 장기체류, 이를 기반으로 한 화성탐사에 대하여 이해를 같이 하고, 각 우주기관 독자 또는 협력 관계를 통하여 현지자원활용 관련 기술 개발 추진 중임을 알 수 있었다. 유인 장기 거주를 목표로 하는 우주탐사에 가장 앞선 계획과 기술력을 보유한 NASA는 현지자원활용 관련된 중요 분야 대부분을 자체 또는 산업체와의 협력으로 기술 개발을 진행 중인 것으로 파악되었다. 달 표면까지의 이동, 자원활용에 대한 기술 개발에서 산업체의 참여를 적극적으로 지원하고 확보된 기술 서비스 구매를 통한 산업체의 기회 제공을 통한 지속 가능한 우주탐사의 추진 방식은 우리의 우주탐사 계획 수립에도 참고할 필요가 있다고 생각된다.

다양한 달 표면 자원 중에서도 가장 현실적이고 즉각적인 효과를 거둘 수 있는 극지역 부근의 표토 자원 및 영구음영지역의 물을 우선 활용 대상으로 하고, 점차 중·저위도 표토에 포함된 금속, 휘발성 물질 활용 등으로 확장해 나가는 방법은 우주탐사와 현지자원활용 관련 자원이 제한된 우리나라에서도 참고할 필요가 있다. 일본의 경우 우주탐사를 위한 개별 기술의 독자적 개발과는 별도로 국제적으로 협의된 우주탐사 로드맵의 구현을 위한 구체적인 임무 개념설계 등을 통하여 개념을 보다 분명하게 하고 기술 개발의 방향성 제시 등을 통하여 우주 선도국의 역할을 수행하고 있는 것으로 보인다.

우주현지자원활용은 일회성 임무가 아니고 달에 장기 체류와 연료 생산 활용 등 상용화와 연관되어 있어서 장기적인 국가적 계획하에 치밀하게 준비가 이루어져야 할 우주탐사 분야이다. 가장 단순한 현지자원활용을 고려한다 하여도 원시 자원의 채광 또는 채취, 이송, 필요 자원의 추출, 정제, 보관, 활용 등을 포함하는 전체적인 라이프사이클 구성이 필요하며, 각 단계별로 필요한 전력 플랜트, 이동수단, 저장수단, 제조수단 등의 조달 방법 또한 함께 고려되어야 한다. 각 단계에 필요한 장비도 그 규모가 크며, 물로부터 연료를 생산하는 플랜트 규모가 중량 300톤 정도이다. 따라서 우주자원활용은 한 국가가 독자적 또는 독점적으로 구축하기 보다는 국제협력에 의한 역할 분담이 반드시 필요하며, 글로벌 우주탐사 로드맵, 미국의 ‘문투마스’, 중국의 국제달연구기지(ILRS, International Lunar Research Station) 등의 추진에서 국제협력이 강조되는 이유이다. 우리나라도 독자적인 달 착륙 기술과 병행하여 국제협력을 기반으로 한 현지자원활용 기술의 개발과 달표면에서의 검증 기회 확보가 필요하다. 이를 통

하여 미래에 국제적으로 추진되는 현지 자원활용 플랜트 구축과 장기체류 관련 기여할 수 있는 기회 확보의 효과를 기대할 수 있다.

감사의 글

본 논문은 한국항공우주연구원의 자체과제인 ‘우주현지자원활용(ISRU) 기술 시연 시스템 개념설계 연구’의 지원으로 이루어졌습니다.

References

1. ISECG [International Space Exploration Coordination Group], The global exploration roadmap supplement, ISECG (2022) [Internet], viewed 2023 Jun 20, available from: https://www.globalspaceexploration.org/wp-content/isecg/GER_Supplement_Update_2022.pdf
2. Moon-to-Mars Architecture Definition Document (ESDMD-001), Exploration systems development mission directorate, NASA/TP-20230002706 (2023).
3. ISECG [International Space Exploration Coordination Group], The global exploration roadmap supplement, ISECG (2020) [Internet], viewed 2023 Jun 20, available from: https://www.globalspaceexploration.org/wp-content/uploads/2020/08/GER_2020_supplement.pdf
4. ISECG [International Space Exploration Coordination Group], In-situ resource utilization gap assessment report, ISECG (2021) [Internet], viewed 2023 Jun 20, available from: <https://www.globalspaceexploration.org/wordpress/wp-content/uploads/2021/04/ISECG-ISRU-Technology-Gap-Assessment-Report-Apr-2021.pdf>
5. Sanders G, Kleinhenz J, In situ resource utilization (ISRU): update on strategy, scope, plans, and priorities, Proceedings of the XXIII Space Resources Roundtable, Golden, CO, 6-9 Jun 2023.
6. Pieters CM, Goswami JN, Clark RN, Annadurai M, Boardman J, et al., Character and spatial distribution of OH/H₂O on the surface of the Moon seen by M₃ on Chandrayaan-1, *Science* 326, 568-572 (2009). <https://doi.org/10.1126/science.1178658>
7. ISRO [Indian Space Research Organisation], Chandrayaan-3 (2023) [Internet], viewed 2023 Sep 4, available from: <https://www.isro.gov.in/Chandrayaan3.html>
8. Lamboray B, SpaceResources.lu - recent developments, Proceedings of the XXIII Space Resources Roundtable, Golden, CO, 6-9 Jun 2023.
9. NASA, Polar resources ice mining experiment-1 (PRIME-1) (2022) [Internet], viewed 2023 Jul 31, available from: https://www.nasa.gov/directorates/spacetech/game_changing_development/projects/PRIME-1
10. Quinn JW, Captain JE, Eichenbaum AS, Aguilar-Ayala R, Kleinhenz JE, et al., Polar resources ice mining experiment-1 (PRIME-1) NASA's first polar drilling and volatiles detection mission, Proceedings of the XXIII Space Resources Roundtable, Golden, CO, 6-9 Jun 2023.

11. King I, Honeybee robotics, test campaign to baseline flight telemetry for the TRIDENT lunar drill on PRIME-1 and VIPER, Proceedings of the XXIII Space Resources Roundtable, Golden, CO, 6–9 Jun 2023.
12. NASA, VIPER mission overview (2022) [Internet], viewed 2023 Jul 31, available from: <https://www.nasa.gov/viper/overview>
13. NASA, Mars 2020 mission perseverance rover (2020) [Internet], viewed 2023 Jul 31, available from: <https://mars.nasa.gov/mars2020/spacecraft/instruments/moxie/>
14. Hartvigsen J, OxEon Energy, Scale up and coupling of the MOXIE solid oxide electrolyzer for mission-scale lunar and Martian applications, Proceedings of the XXIII Space Resources Roundtable, Golden, CO, 6–9 Jun 2023.
15. Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory, Lunar simulants [Internet], viewed 2023 Jul 31, available from: <https://lsic.jhuapl.edu/Our-Work/Working-Groups/Lunar-Simulants.php>
16. Ryu BH, Kim YJ, Jin H, Lee J, Advanced manufacturing process of Korea lunar simulant, *Earth Space* 2021. 222–228 (2021). <https://doi.org/10.1061/9780784483374.022>
17. Bell E, NASA Kennedy Space Center (KSC), Development of the advanced regolith ground operations (ARGO) test bed: a robotic excavation and construction test facility with simulated lunar environments, Proceedings of the XXIII Space Resources Roundtable, Golden, CO, 6–9 Jun 2023.
18. Yoo Y, Chung HS, Shin EL, Patrick R, Graham GF, et al., The KICT dirty thermal vacuum chamber (DTVC): large-scale space environment simulation of the Moon and Mars, Proceedings of the Lunar and Planetary Science Conference, The Woodlands, TX, 19–23 Mar 2018.
19. Park S, Photoelectric current density measurement for lunar daytime simulation: guiding large-scale experiment design, Proceedings of the XXIII Space Resources Roundtable, Golden, CO, 6–9 Jun 2023.
20. Sutoh M, Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA), Remote construction experiment for utilizing water resources on the Moon, Proceedings of the XXIII Space Resources Roundtable, Golden, CO, 6–9 Jun 2023.
21. Shimada J, Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA), JAXA's concept of a lunar ISRU plant -In-situ production of LOX/LH2 from lunar regolith, Proceedings of the XXIII Space Resources Roundtable, Golden, CO, 6–9 Jun 2023.

Author Information

류 동 영 dyrew@kari.re.kr



한국과학기술원에서 1996년 박사학위를 취득한 후, 산업체 및 연구기관에서 인공위성, 항법 등의 기술분야 개발 업무를 수행하였다. 2010년부터 한국항공우주연구원에서 달 탐사 기술 개발에 참여하였고 현재는 달표면 탐사 기술과 우주 현지자원활용 관련 연구를 수행하고 있다.