

달 기지 건설을 대비한 국내외 달 탐사 동향 분석

홍성철*, 신휴성
한국건설기술연구원 미래융합연구본부

Trend Analysis of Lunar Exploration Missions for Lunar Base Construction

Sungchul Hong*, Hyu-Soung Shin

Department of Future Technology and Convergence Research,
Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

요 약 미국과 구소련을 중심으로 진행되었던 달 탐사는 1970년대에 중단되었다. 하지만 1990년대 달에 얼음 형태의 물과 희귀자원이 대량 발견되면서 유럽연합, 중국, 일본, 인도 등으로 대표되는 우주신흥강국들도 달 자원 확보와 기지 건설을 목적으로 달 탐사 경쟁에 합류하고 있다. 향후 달 탐사 사업은 국제 협력을 기반으로 전 세계 주요 우주국과 우주 민간 기업이 함께 참여할 것으로 전망된다. 또한 달 궤도선 중심의 탐사에서 벗어나 달 착륙선 및 로버 중심의 무인 탐사가 전개되어 자원 탐사, 토양 표본 채취 및 귀환 등의 임무를 수행할 것으로 예상된다. 달 탐사를 통해 발견된 자원은 향후 유인 달 기지 건설과 밀접한 연관성이 있다. 달 표면에서의 건설을 위해서는 막대한 양의 자원을 지구로부터 수송해야하므로, 달 현지 자원을 이용하여 물, 산소를 생산하고 현지 지형을 이용하여 기지를 건설하는 기술이 필요하다. 따라서 본 논문에서는 현재 진행 중인 전 세계 달 탐사 동향 및 전망과 함께, 달 표면에서의 유인 달 기지 건설 방안과 국가별 달 건설 기술 개발 현황에 대해 조사 및 비교 분석하였다.

Abstract Lunar exploration, which was led by the United States and the former Soviet Union, ceased in the 1970s. On the other hand, since massive lunar ice deposits and rare resources were found in 1990s, European Union, China, Japan, and India began to participate in lunar exploration to secure future lunar resource as well as to construct a lunar base. In the near future, it is expected that national space agencies and private industries will participate in the lunar exploration together. Their missions will include the exploration and sample return of lunar resources. Lunar resources have a close relationship with the lunar in-situ resource utilization (ISRU). To construct a lunar base, it is inevitable to bring huge amounts of resources from Earth. Water and oxygen, however, will need to be produced from local lunar resources and lunar terrain feature will need to be used to construct the lunar base. Therefore, in this paper, the global trends on lunar exploration and lunar construction technology are investigated and compared along with the ISRU technology to support human exploration and construct a lunar base on the Moon's surface

Keywords : Lunar Exploration, In-Situ Resource Utilization, Lunar Resource, Lunar Base, Lunar Construction

1. 서론

미국과 구소련 주도로 진행되던 달 탐사는 2000년대

들어 유럽, 일본, 중국, 인도를 포함한 우주 신흥강국들로 확장되어 다변화되고 있다. 일본은 2007년 달 탐사 궤도선인 Selene(Kaguya)를 발사하였고, 2008년에는 인

본 논문은 한국건설기술연구원 주요사업으로 지원을 받아 수행된 연구(극한건설 환경구현 인프라 및 TRL6 이상급 극한건설 핵심기술 개발)로 이에 감사합니다.

*Corresponding Author : Sungchul Hong(Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology)

Tel: +82-31-995-0874 email: shong@kict.re.kr

Received April 18, 2018

Revised (1st May 2, 2018, 2nd May 9, 2018, 3rd May 14, 2018)

Accepted July 6, 2018

Published July 31, 2018

도가 또 다른 달 탐사 궤도선인 Chandrayaan 1호의 발사에 성공했다. 중국은 2013년 12월 14일 달 탐사 로버인 Yutu를 달 표면 위에 성공적으로 올려놓으면서 달 착륙에 성공한 3번째 국가가 되었다. 우리나라도 국제적인 우주기술 개발경쟁에 뒤처지지 않기 위해 시험용 달 궤도선을 2020년에 발사할 예정이다[1, 2].

달의 과학적, 산업적, 경제적 이용가치가 증대됨에 따라, 우주 선진국들은 달 자원 개발 및 달 기지 건설에 대한 로드맵을 수립하여 단계적으로 달 탐사 사업을 수행 중이다 (Fig. 1) [3-5]. 먼저 달은 대기가 없기 때문에 달 크레이터 지역은 충돌 당시의 상황을 잘 간직하고 있고 심 우주 관측이 용이하다. 달 탐사를 통해 달 환경과 토양 및 지질 상태를 직접 관측하고 채취함으로써 태양계 탄생과 진화를 연구하는데 중요한 단서를 수집할 수 있다[6]. 달은 우주기술을 개발하기 위한 동기를 제공하지만, 지구와 가까워 우주탐사기술을 검증하기 위한 최적의 테스트베드이다. 또한 중력이 지구의 1/6 이기 때문에 상대적으로 적은 양의 연료로 발사체를 타 행성으로 보낼 수 있으므로, 화성을 비롯한 심우주 탐사를 위한 전진기지로 활용될 수 있다. 최근 달에 얼음 형태의 물과 헬륨-3, 티타늄 등의 희귀 광물이 대량 존재하는 것이 밝혀지면서, 달의 자원적 가치 또한 증대되고 있다[6]. 태양빛이 들지 않는 달 북극의 40개의 영구음영지역 (Permanent Shadowed Region)에는 8억 톤의 얼음이 존재하는 것이 발견됐으며[7], 핵융합 발전의 핵심원료인 헬륨-3는 달 표면에 약 250만 톤이 존재하는 것으로 추정되고 있다[8, 9].

과거 달 탐사는 우주인의 안정적인 달 착륙과 귀환에 초점이 맞추어 진행됐지만 최근 달 탐사는 미래 자원 확보와 기지 건설을 목적으로 진행되고 있다. 근래에는 달 착륙선과 로버를 보내 자원 탐사, 토양 표본 채취 및 귀환 등의 임무를 수행할 예정이다. 이러한 달 탐사는 달 현지자원활용과 밀접한 연관이 있다[10]. 달의 극한환경에서 달 유인 기지와 인프라 건설을 위해서는 막대한 양의 자원을 지구로부터 수송해야하며 많은 예산과 시간이 소요된다. 따라서 달 현지자원을 이용하여 유인 기지 건설에 필요한 물, 산소, 건설재료 등을 생산하는 기술은 필수적이다. 이에 본 논문에서는 전 세계 달 탐사사업 동향을 조사 및 분석하였고, 달 탐사 지역의 자원 활용 및 달 기지 건설 방안을 제시하였다.

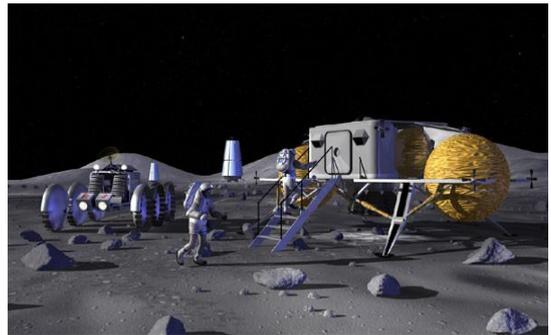


Fig. 1. Conceptual Lunar Base [11]

2. 국내외 달 탐사 동향 분석

2.1 개요

우주 강대국들은 1990년대 들어 기술시험의 목적을 가진 달 탐사 궤도선을 발사하기 시작하였다[1, 2]. 최근에는 달에 얼음 형태의 물과 희귀자원이 존재하는 것이 밝혀짐에 따라[3], 달 착륙선과 로버 중심의 달 자원 탐사를 준비 중이다. 본 장에서는 우리나라를 포함한 전세계 주요 우주 강국들과 우주 기업들의 달 탐사사업 동향과 전망을 조사하고 분석하였다.

2.2 국내외 달 탐사 사업 동향

2.2.1 우리나라

우리나라는 2007년 6월 1차 우주개발진흥 기본계획을 수립하였고, 11월에는 우주개발사업 세부 실천 로드맵을 작성하여 달 탐사 중심의 우주탐사 계획을 발표하였다. 2011년 제2차 우주개발진흥 기본계획 이후 달 탐사 계획은 수차례 수정되었으나, 최근 제3차 우주개발진흥 기본계획을 수립하여 2020년 시험용 달 궤도선, 2030년 달 착륙선 발사로 수정하였다[12]. 현재 시험용 달 궤도선은 탑재체 6종(국내 5종, NASA 1종)을 장착하고 (Table 1), 미국 우주 기업인 SpaceX의 발사체에 실려 발사될 예정이다[13]. 국내에서 달 자원 탐사 및 달 기지 건설 관련 연구는 한국우주항공연구원(KARI)외에 한국건설기술연구원(KICT), 한국지질자원연구원(KIGAM), 한양대 등을 중심으로 진행 중이다[1]. 이 중 KICT에서는 달 표면과 유사한 환경을 구현할 수 있는 실험용 지반 열진공 챔버를 제작하고 있으며(Fig. 2), 달 현지 측량, 달 지반 조사, 달 기지 건설을 위한 다양한 연구들을 진행하고 있다.

Table 1. KPLO (Korea Pathfinder Lunar Orbiter) Payload

Payload	Mission
Lunar Terrain Imager (LUTI)	takes lunar surface image with a high space resolution (<5m)
Wide-Angle Polarimetric Camera (PolCam)	takes lunar Polarimetric image with a midium space resolution (except for polar region) and investigates lunar regolith characteristics
KPLO Magnetometer (KMAG)	measures lunar magnetic strength of the lunar environments
KPLO Gamma Ray Spectrometer (KGRS)	investigates lunar recourses including rare elements and minerals
Disruption Tolerant Network experiment payload (DTNPL)	conducts space communication based on disruption tolerant network technology
NASA's ShadowCam	takes images of permanent shadowed regions with 800 times more sensitive than LRO's narrow angled camera.



Fig. 2. DTVC (Dirty Thermal Vacuum Chamber) in KICT

2.2.2 미국

2017년 12월 미국 트럼프 행정부는 1972년 이후 중단되었던 유인 달 탐사의 재추진을 선언하였다. 미국의 유인 달 탐사 계획은 2018년 연방의회에서의 예산 승인 이후 구체화 될 것으로 예상된다. 현재 NASA가 추진 중인 달 탐사 사업은 Resource Prospector와 Deep Space Gateway 등이 있다. 이중 Resource Prospector는 2022년 다양한 관측장비와 시추 장비를 탑재한 로버를 달 극 지역에 보내 영구음영지역의 얼음 자원과 휘발성 물질을 조사할 예정이다[14](Fig. 3). 한편 미국은 달의 상업적 활용을 위해 Lunar CATALYST와 같은 민-관 협력 프로그램을 강화 중이다. 향후 미국의 달 탐사는 기술적 위험성이 높은 임무는 NASA가 수행하고, 달 화물 운송과 달 자원 개발 등은 민간우주 기업에게 개방하여, 달 탐사의 효율성과 경제성을 극대화할 것으로 예상된다.

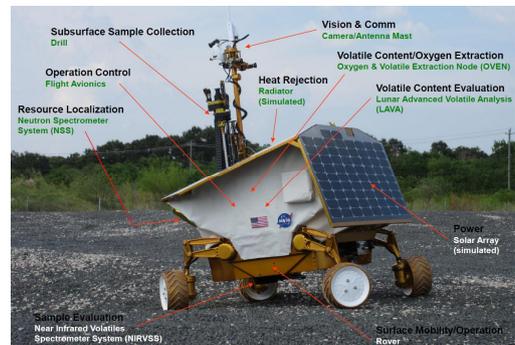


Fig. 3. Resource Prospector Rover [14]

2.2.3 러시아

러시아우주국(ROSMOS)은 1997년 달 탐사 계획인 Luna Glob를 발표하였지만 재정상황 악화로 진행하지 못하다가, 2009년 미국의 달 궤도선인 LRO 발사를 계기로 달 탐사 사업을 재개하고 있다. 현재 ROSMOS는 2020년 Lunar 25호(달 착륙선)를 달 전면부에 보내 무인 탐사를 위한 기술을 실증할 예정이다. 2022년에는 달 궤도선을 보내고 2023년에는 유럽우주국(ESA)의 시추 장비를 탑재한 Lunar 27호(달 착륙선)를 극지역에 보내 자원탐사를 진행할 계획이다. 이외에도 2025년 이후에는 달 토양 표본 채취 및 귀환 임무를 수행하기 위해 Lunar 28호(달 착륙선)를 발사할 예정이다[15].

2.2.4 유럽연합

ESA는 2016년 달 영구 기지를 국제협력으로 건설하여 과학적 목적뿐 아니라 달 자원 발굴 및 활용, 우주여

행, 그리고 화성 탐사의 전초기지로 활용하자는 계획을 발표하였다[1]. 현재 ESA는 국제협력과 민간참여를 통한 달 탐사를 계획 중이다. 대표적으로 PROSPECT와 HERACLES가 있다[16]. PROSPECT는 달 극지역에 착륙선을 보내 착륙지 주변의 토양을 채취 및 분석하여 달 현지 자원을 평가하기 위한 달 탐사 사업으로, 러시아의 Lunar 27호와 연계하여 개발 중이며 2022년 발사할 계획이다. Lunar 27호는 1.2m 깊이의 시추 가능한 드릴 장비를 탑재하여 지표면 밑의 토양을 채취하고 달 극지역의 얼음 매장량과 휘발성 자원의 화학적 성분 분석을 수행할 계획이다. HERACLES는 유럽연합 외에 일본, 캐나다와 국제공동으로 추진하는 달 탐사 사업으로, 원격 조정 가능한 달 탐사 로버를 이용하여 달 토양을 채취하고 지구로 귀환하는 임무를 포함한다.

2.2.5 일본

일본은 2015년 1월 신 우주 기본계획을 수립하여 군사, 안보 분야의 우주활동을 강화시키고, 실리형 우주 개발로 정책을 전환하고 있다. 이에 달 착륙선인 SELENE-2는 정부의 승인을 받지 못해 중단되었다. 대신 일본우주국(JAXA)은 소형 달 착륙 시험선인 SLIM을 2020년에 발사하여 달 착륙선의 정밀착륙기술을 실증할 계획이다. SLIM은 총 100kg 중량의 달 착륙선으로 100m 이내의 정확도를 가진 정밀착륙기술을 시연할 계획이나, 아직 탑재체 종류와 달 착륙지는 결정되지 않은 상태이다[17]. 또한 JAXA는 SELENE-R(달 착륙선 및 로버)을 인도우주국(ISRO)과 공동으로 개발 중이며, 2022년 달에 보내 자원탐사를 수행할 계획이다.

2.2.6 중국

중국국가항천국(CNSA)의 달 탐사계획은 달 궤도선인 Chang'E 1, 2호와 달 착륙선인 Chang'E 3호까지 진행되었다. 이중 Chang'E 3호의 로버인 Yutu는 1976년 구소련의 Luna-24 이후 처음으로 달 표면에 안착하였고, 달 표토의 성분 분석과 달 지반 구조 조사임무를 수행하였다[1]. 현재 CNSA는 2018년 달 후면부의 자원탐사를 위해 Chang'E 4호(통신 중계 궤도선, 달 착륙선 및 로버)를 발사할 계획이며, 2019년에는 달 전면부에 Chang'E 5호(달 착륙선)를 발사할 예정이다. 또한 2020년부터 2030년까지 2번의 달 극지역 자원탐사 사업을 준비하고 있으며, 2030년 까지 달 표면에 연구기지를 달에 건설할 예정이다[18].

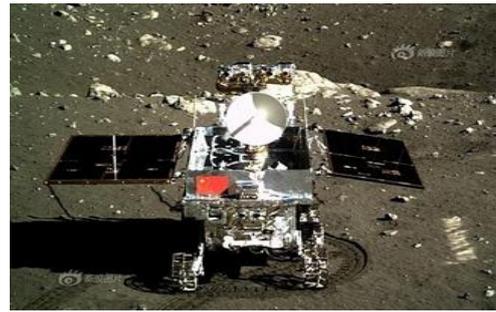


Fig. 4. Chang'E-3 Rover [19]

2.2.7 인도

ISRO는 2008년에 달 탐사 궤도선인 Chandrayaan 1호를 보냈으며, 별도로 제작한 Moon Impact Probe를 달 남극에 충돌시켜 얼음 형태의 물 존재를 전 세계 최초로 확인하였다[20]. Chandrayaan 1호는 312일 간 달 궤도에서 얼음, 헬륨-3를 포함한 달 자원 조사 등의 임무를 수행한 후 교신이 중단 되었다. 인도는 Chandrayaan 1호에 이어 달 궤도선, 달 착륙선 및 로버로 구성된 Chandrayaan 2호를 개발 중이며 2018년 달 앞면에 착륙시킬 계획을 수립하여 진행 중이다[15].

2.3 민간 달 탐사 동향

미국은 우주 기술은 물론 민간분야의 우주산업 또한 선도하고 있다. 미국은 2006년부터 COT 사업을 통해 과거 정부주도로 진행되던 우주 산업을 민간 분야에 개방하였다. 현재 미국은 SpaceX와 Orbital Science가 개발한 발사체와 우주선을 이용하여 국제우주정거장으로 화물을 수송 중이다(Fig. 5)[21]. 미국 NASA의 COT 사업은 기존 국제우주정거장로의 화물수송 비용을 1/10로 절감하면서, 민-관 우주협력의 대표적인 성공적인 사례로 인식되고 있다.



Fig. 5. Space Launch Vehicle and Spacecraft in SpaceX [22]

미국은 COTS 사업의 성공에 힘입어, 2014년 Lunar CATALYST를 기획하였고, Moon Express, Mastern Space Systems, Astrobotic Technology를 기술 협력사로 선정하였다[23]. 이들 민간 기업들은 NASA의 기술 지원으로 상업용 달 착륙선과 탐사로버를 자체 개발하고 있다. 미국은 달 자원 탐사, 달 자원 채굴 및 샘플 귀환, 우주신기술 시연 등 다양한 목적으로 진행되고 있는 달 탐사 사업을 민간 기업에 개방함으로써, 우주 민간 기업을 육성하는 한편, 새로운 우주 사업 분야를 발굴하려고 하고 있다. 이외에도 NASA의 Centennial Challenge는 우주기술 개발에 민간 기관을 직접 참여시켜 기술적 해법을 개발하는 경진대회로, 2005년부터 달 토양 채취, 달 토양 샘플 귀환, 달 현지 자원을 활용한 산소 생산 등에 대한 기술개발 대회를 개최하고 있다. 최근 개최된 3D-Printed Habitat Challenge는 달 기지를 건설하기 위한 3D 프린팅 기술 경연대회로, 2단계 심사에서는 한국 건설기술연구원과 한양대 연합팀이 2단계 경진대회에서 우승을 차지했다. 향후, 3단계 최종심사에서는 2단계에서 선정된 팀들을 중심으로 3D 프린팅 기술을 이용하여 만든 돔 구조의 구조물을 평가할 예정이다[24].

2.4 국내외 달 탐사 전망 및 분석

우주 강대국들은 달 탐사를 경쟁적으로 추진하고 있으며, 달 전 지역에 궤도선과 착륙선 및 로버를 보내 자원 및 지형 관측, 토양 표본 채취 및 귀환 등 다양한 탐사 활동을 수행할 계획을 수립하고 있다[15]. 달 탐사 후보지역 중, 달 남북극의 영구음영지역은 달 궤도선을 통해 얼음 형태의 물이 다량 존재하는 것이 발견되어, 전세계적인 주목을 받고 있다[7]. 달 극지역 탐사를 준비 중인 국가는 우리나라를 포함하여 미국, 유럽연합, 중국, 일본 등이 있다. 우리나라 KARI는 2020년 시험용 달 탐

사 궤도선을 발사할 예정이다. 시험용 달 탐사 궤도선에 탑재될 NASA의 ShadowCam은 태양빛이 없는 영구음영지역의 지형을 촬영할 수 있도록 설계되었다(Table 1)[25]. 100km 고도에서 1.7m 공간 해상도의 지형 이미지가 촬영이 가능하므로, 달 극지역 착륙 후보지 선정과 영구음영지역 탐사 경로 수립에 유용한 정보를 제공할 수 있을 것으로 기대된다. 우리나라에 이어 미국과 유럽연합은 각각 2022년과 2023년 로버와 착륙선 중심의 달 극지역 탐사를 추진 중이다. 이들 로버와 착륙선은 관측 장비 외에 시추장비를 탑재하여 달 표면뿐만 아니라 지표면 아래의 얼음 매장량과 분포, 그리고 달 토양 샘플의 화학적 분석을 수행할 예정이다[14, 16]. 달 착륙선과 로버는 달의 극한환경과 험한 지형조건에서 활동하는데 제약이 많다. 하지만 달 착륙선과 로버에서 측정된 현지 지형 및 자원 정보는 달 궤도선 데이터의 낮은 공간 해상도를 보완하고, 달 환경 및 자원 분포 모델을 검증할 수 있는 보정 데이터로 활용이 가능하다. 현재 우리나라의 달 착륙선 발사 계획은 2030년으로 연기되었다. 향후 국제적인 달 탐사계획에 부합된 달 탐사 후보지 및 임무 선정을 위해서는 지속적인 동향 파악 및 분석과 함께, 국제협력을 바탕으로 한 달 탐사계획 수립이 중요하다.

3. 달 현지 자원을 활용한 유인 기지 건설 방안

3.1 개요

달 탐사는 미래 자원 확보, 유인 기지 건설과 밀접한 관련이 있다. 달의 극한환경에서 자원 개발과 유인 탐사 활동을 위한 기지를 건설하기 위해서는 막대한 양의 자원을 지구로부터 수송해야한다. 따라서 달 현지 자원과

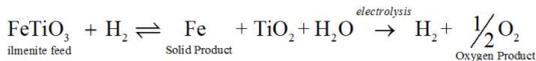
Table 2. Lunar In Situ Resource Utilization

	Ice	Metal	Rare Earth Metal	Solar Wind
Lunar Resource				
	H2O	Ti, Al, Fe, Si	U, Sm, Y,	He-3, H, N, C
Usage	Water, Air, Fuel	Infrastructure and habitat Construction, Solar Panels, Machinery Device	Energy, Trade	Energy, Plant Growth, Air

지형을 이용하여 물과 산소를 생산하고 달 기지를 건설하는 기술이 필요하다. 본 장에서는 달 현지자원활용 기술을 이용한 유인 달 기지 건설 방안에 대해 설명하고자 한다.

3.2 달 현지 자원을 활용한 물·산소 생산

달 현지자원활용 기술은 달에 존재하는 자원을 이용하여 우주인의 생명유지를 위한 물, 산소, 우주선 연료, 건축재료 등을 생산하여 장기간의 유인탐사를 가능하게 하는 기술이다(Table 2)[26]. 달 극지역에는 유인탐사에 필수적인 물이 얼음형태로 존재하는 것이 밝혀졌다. 얼음은 우주인의 식수로 직접 활용되지만, 산소와 수소로 분해될 수 있다. 산소는 물과 함께 유인탐사를 위해 사용될 수 있고 수소는 달 추진체의 연료로 사용되어 우주인의 지구귀환과 자원수송에 활용될 수 있다. 또한 달 저위도에서 채굴 가능한 티탄철을 이용하여 물과 산소를 생산하는 기술도 제시되었다. 아래 화학식은 티탄철을 이용하여 물과 산소를 생산하는 과정을 보여준다.



과거 아폴로 임무를 통해 수집된 달 토양의 분석을 통해, 달 저위도 지역의 지질 및 자원 분포와 자원 간의 상관성에 대한 연구가 활발히 수행되었다. 달에서 수소는 주로 태양풍과 달 토양이 화학적으로 결합된 형태로 존재하고, 티탄철의 함량이 높을수록 달 토양의 수소 함량 또한 높은 것으로 보고되고 있다. Fig. 6는 달 표면에서 티탄철의 분포와 매장량을 보여준다. 달에서 티탄철의 화학적 구성성분은 FeTiO₃로 900℃ 이상으로 가열하고 수소가스에 노출시킴으로써, 철, 산화 티타늄, 물을 생산할 수 있다. 생산된 물은 다시 전기 분해함으로써 수소와 산소를 생산할 수 있다. 이중 수소는 다시 티탄철에 적용함으로써 재활용이 가능하다[27].

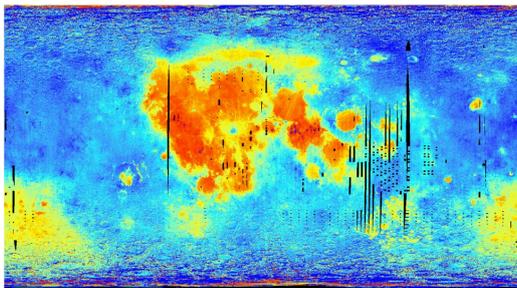


Fig. 6. Iron Distribution Map of Moon [28]

3.3 달 현지 지형을 이용한 기지 건설

달 남북극을 포함한 극지역에서의 기지 건설은 두 가지 측면에서 유리하다. 첫째, 극지방의 일부 음영 지역에는 얼음이 존재하므로, 유인 탐사에 필요한 물과 산소, 발사체 연료인 수소를 효율적으로 생산할 수 있다. 둘째, 달의 자전축은 황도면과 거의 수직에 가깝기 때문에 달의 극지역의 태양열 발전소는 햇빛에 항상 노출되도록 배치할 수 있다. 태양 에너지는 월식 기간 동안에는 이용할 수 없다. 하지만, 극지역에서의 월식은 상대적으로 짧으며 예측 가능하다. 달은 자전주기와 공전주기가 같아 늘 같은 면이 지구를 보며 돈다. 때문에 달에서의 하루는 지구에서의 한 달과 비슷하다. 따라서 반대 방향을 가진 두개의 태양 전지를 이용하면 거의 연속적으로 전력을 생산할 수 있다. 달 극지역 크레이터 내부의 낮은 온도는 적외선 장비 운영에 적합하고, 지구로부터의 광범위한 전파 노출에 안전하다. 따라서 달 극지역의 크레이터는 천문학적 관측을 위한 최적의 장소 중 하나이다.

달 기지 건설 시 문제되는 것은 태양풍, 우주 방사선, 대형 운석 문제이다. 달에는 대기로 인한 마찰이 없기 때문에 미세운석의 충돌도 전초기지에 충격을 줄 수 있다. 이러한 극한환경 조건을 고려할 때, 전초기지를 지하 수 미터 아래에 건설하는 것이 효과적일 수 있다. 일부 시설물을 반 지하 구조로 건설할 수도 있을 것이다. 특히 전초기지에 중·단기 체류해야 하는 우주인들을 고려할 때, 전초기지의 인간 생활공간은 지하에 있는 것이 바람직하다. 최근 달 탐사 궤도선으로 인해 달 전역에 함몰 지형(Lunar Pit)이 존재함이 밝혀졌다. 이중 200여개의 함몰 지형이 용암동굴(Lava Tube) 입구로 추정되고 있다(Fig. 7). 용암동굴은 달 초기의 화산활동으로 분출한 용암이 땅속으로 흘러가면서 생긴 지형이다. 달 함몰 지형은 용암동굴이 부분적으로 붕괴되면서 생성됐다고 추정된다. 최근 세계 주요 우주국들은 달 기지 건설을 위한 대표적인 후보지로 달 용암동굴을 주목하고 있다. 달 용암동굴은 짙은 운석 충돌, 고 에너지의 자외선 복사, 미세먼지, 높은 온도 편차와 같은 달 표면의 극한환경으로부터 보호소 역할을 할 수 있다. 예를 들어, 달 표면의 평균 기온은 약 -5℃이다. 하지만, 낮 시간의(약 354 시간) 평균 온도는 123℃ 이고 123℃까지 상승한다. 밤 기간 동안(354 시간) 평균 온도는 -153℃ 이다. 용암 동굴은 두 기간 동안 약 -23℃의 온도를 유지할 수 있을 것으로 예상된다.

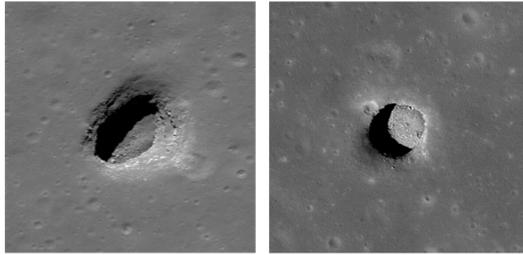


Fig. 7. Lunar Pits [29]

4. 국가 별 달 건설 기술 비교 분석

달 현지 자원탐사는 달 기지 건설과 밀접한 연관이 있다. 달 현지 자원을 활용한 건설기술은 전 세계적으로 개발 초기 단계로 우리나라를 포함한 미국, 유럽연합, 중국 등에서 개발되고 있다. 달 기지 건설을 위해서는 달 모사토 제작, 달 표면 모의 환경 구현, 달 건설재료, 달 건설로봇 등의 기술이 필요하다(Table 2). 달 모사토 제작 기술은 달 토양과 물리적·화학적 구성성분이 유사한 토양을 인공적으로 제작하는 기술이다. 직접 채취 및 수송이 어려운 달 토양을 인공적으로 생산함으로써, 달 탐사 로버 설계 및 성능 평가, 달 현지자원활용 기술 개발 등에 이용될 수 있다. 달 복제토는 과거 아폴로 미션을 통해

채집된 달 토양 표본을 보유하고 있는 미국의 복제토가 달 토양과 가장 유사하다. 우리나라를 포함한 달 탐사 관련국가 역시 미국의 복제토를 참조하여 제작하고 있다 [30]. 달 표면 모의 환경 구현기술은 달 모사토가 포함된 진공 챔버를 이용하여 대기가 없는 달 표면의 고진공, 극고온 및 극저온 환경을 구현하는 기술이다. 우리나라는 $10^{-2} \sim 10^{-4}$ Torr의 진공도와 $-190 \sim 150^{\circ}\text{C}$ 의 온도 구현이 가능한 50m^3 급 규모의 지반열진공챔버(Dirty Thermal Vacuum Chamber)를 세계 최초로 구축 중이다[31]. 지반열진공챔버는 달 지표면 환경과 유사한 환경을 지구에서 미리 구현함으로써 개발된 달 건설기술의 성능을 검증하는데 활용될 수 있다.

달 건설재료 기술은 달 현지 토양을 녹여 벽돌이나 블록을 빠르게 주조하는 소결 및 테르미트 반응 기법과 시멘트와 유사한 성질을 지닌 유기재료를 달 토양과 배합하는 적층기법으로 구분되며, 미국과 유럽연합을 중심으로 건설 로봇기반의 시공 기법과 연계되어 개발되고 있다[32]. 우리나라도 열경화성 수지인 폴리에틸렌을 한국형 복제토인 KOHLS-1과 배합하고 블록을 제조하여 달에서의 시공 가능성을 확인하였다[33]. 달 건설재료 및 시공 기술은 각국에서 다양한 형태로 개발되고 있으나, 고진공, 극고온 및 극저온으로 대표되는 달 극한환경에서 실험한 결과는 존재하지 않는다. 따라서 향후 성능 개

Table 3. Lunar Construction Technology Under Development

Lunar Construction Technology	Nation	Description
Lunar Simulant	USA, EU, Japan, China, Canada, Korea	<ul style="list-style-type: none"> Lunar simulant based upon lunar regolith samples from Apollo Missions Lunar simulant (JSC-1), which was made in Johnson Space Center in NASA, is known as the most similar to lunar regolith
Lunar Surface Environment Realization	Korea	<ul style="list-style-type: none"> Dirty Thermal Vacuum Chamber(DTVC) under development Size: 4.7m(W)×4.7m(H)× 4.65m(L), 50m³ Vacuum: $10^{-2} \sim 10^{-4}$ Torr (with Soil) Temp: $-190 \sim 150^{\circ}\text{C}$
Lunar Construction Material	Korea	<ul style="list-style-type: none"> Lunar polymer concrete
	USA	<ul style="list-style-type: none"> Direct sintering of lunar regolith with microwave irradiation or laser beam Thermite Reaction between metals and metal oxides Contour crafting of lunar sulphur concrete
	EU	<ul style="list-style-type: none"> Liquid binding material for lunar regolith Direct sintering of lunar regolith with concentrated solar energy
Lunar Construction Robot	USA	<ul style="list-style-type: none"> Prototype of unmanned construction robots for excavation, load-haul-dump, transfer, and building a lunar base

선을 위해서는 달 환경모사가 가능한 챔버에서의 검증과 개선이 필요하다. 이외에도 미국은 달 토양 굴삭, 수송, 보관, 시공 등을 위한 프로토타입의 무인 건설로봇을 개발하였고, 달 유사지형에서 성능 검증을 함으로써 달 건설로봇 기술을 선도하고 있다[26]. 향후 달 탐사 및 달 기지 건설은 많은 비용과 시간이 소요되므로 국제협력을 기반으로 진행될 것으로 예상된다. 우리나라의 달 건설 기술 개발은 우주 강대국 보다 늦게 시작하였지만, 달 표면 모의 환경구현 기술에서 빠르게 투자가 이루어지고 있으며, 달 모사도 제작 및 건설재료 분야에서도 우주 강대국과의 기술격차를 줄이기 위한 노력이 이뤄지고 있다. 향후 국제적인 추세에 부합된 달 현지 건설기술을 개발하기 위해서는 지속적 동향 파악과 함께 개발된 달 건설기술의 연계를 위한 국제협력 및 교류가 중요하다.

5. 결론

미국과 구소련 주도로 진행되던 달 탐사는 2000년대 들어 유럽, 일본, 중국, 인도를 포함한 우주 신흥강국들로 확장되고 있다. 달 탐사 임무 또한 우주 기원 및 진화 규명과 같은 과학적 목적 외에, 미래 자원 확보, 우주 기술 검증, 우주 사업 분야 개척 등의 산업적, 경제적 목적을 위해 다변화 되는 추세이다. 달 탐사 사업은 국제 협력을 기반으로 전 세계 주요 우주국과 우주 기업이 참여할 것으로 예상된다. 특히 달 착륙선과 로버에서 취득된 현장 데이터는 기존 달 탐사 궤도선의 원격탐사 데이터를 보완함으로써, 달 자원 분포 및 매장량을 보다 정확히 파악할 수 있을 것으로 기대된다. 달 자원 탐사는 미래 유인 달 기지 건설과 밀접한 연관이 있다. 달 현지 자원을 이용한 물, 산소 생산과 달 용암 동굴을 이용한 기지 건설은 장기적인 유인 달 탐사를 가능하게 한다.

국제적으로 달 현지자원을 활용한 건설기술 개발은 시작단계로 미국, 유럽연합 등의 우주 강대국을 중심으로 개발되고 있다. 국내 달 건설기술 개발은 늦게 시작되었지만 달 표면 모의 환경 구현 기술을 중심으로 우주 강대국들과의 기술 격차를 좁히기 위한 노력이 이루어지고 있다. 향후 달 기지 건설은 국제 협력을 기반으로 이루어 질것으로 예상된다. 따라서 달 기지 건설을 준비하기 위해서는 지속적 국제 달 탐사 동향 파악과 함께 국제협력 및 교류를 통한 달 건설 기술 개발이 필요하다.

References

- [1] G. Ju "Development Status of Domestic & Overseas Space Exploration & Associated Technology," Journal of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences, vol. 44, no. 8, pp. 741-757, 2016. DOI: <https://doi.org/10.5139/JKSAS.2016.44.8.741>
- [2] E. Sim "Current Development Trends in Lunar Explorers Around the World," Aeronautical and Space Sciences, vol. 44, no. 8, pp. 741-757, 2016
- [3] K. J. Kim "A Research Trend on Lunar Resource and Lunar Base", The Journal of The Petrological Society of Korea, vol. 26, no. 4, pp. 373-384, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.7854/JPSK.2017.26.4.373>
- [4] ISECG "The Global Exploration Roadmap," Available from https://www.nasa.gov/sites/default/files/files/GER-2013_Small.pdf assessed February, 6, 2018.
- [5] LEAG "The Lunar Exploration Roadmap: Exploring the Moon 21st Century: Themes, Goals, Objectives, Investigations, and Priorities, 2016," Available from <https://www.lpi.usra.edu/leag/LER-2016.pdf> accessed January, 15, 2018.
- [6] H. Seo, E. Kim, J. H. Kim, J. H. Lee, G. Choi, E. Shim "Case Study for Lunar Landing Site Selection", Aeronautical and Space Sciences, vol. 10, no. 2, pp. 93-101, 2012.
- [7] NASA "NASA Radar Finds Ice Deposits at Moon's North Pole" Available from https://www.nasa.gov/mission_pages/Mini-RF/multimedia/feature_ice_like_deposits.html accessed June, 20, 2017.
- [8] D. G. Shrunck, B. L. Sharpe, B. L. Cooper, M. Thangavelu, "The Moon, Resources, Future Development and Settlement, 2nd Edition, Praxis Publishing, Chichester, UK, 2008.
- [9] E. N. Slyuta, A. M. Abdrakhimov, E. M. Galimov, V. I. Venadsky, "The Estimation of Helium-3 Probable Reserves in Lunar Regolith," 38th Lunar and Planetary Science Conference, Abstract no. 2175, 2007.
- [10] H. J. Cho, "Space Development and Law in Asia," The Justice, vol. 158, no. 3, pp. 476-503, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/G704-001304.2017.158.3.001>
- [11] NASA "Entering human presence into the solar system" Available from <https://www.nasa.gov/exploration/multimedia/jfa18833.html> accessed December, 10, 2017.
- [12] Ministry of Science and ICT, "3rd Basic Space Development Plan, 2018.
- [13] KARI "Korean Lunar Exploration Program" Available from https://www.kari.re.kr/kor/sub03_04_01.do accessed February, 02, 2018.
- [14] A. Colapreta, R. Elphic, D. Andrews, J. Trimble, B. Bluethmann, J. Quinn, G. Chavers, "Resource Prospector: Evaluating the ISRU Potential of the Lunar Poles," Proc. of LEAG Workshop, Abstract #5025, November, 2016.
- [15] ISECG MCD Meeting, "International Lunar Robotic Exploration Mission Timeline," Tele-conference, November, 2017.

[16] J. Carpenter, "Lunar Missions in ESA's Reference Exploration Roadmap," Proc. of Lunar Science for Landed Missions Workshop, SSERVI ID: LLW2018-71 January 2018.

[17] J. Haruyama, "Lunar Landing Site Candidates Discussed In The Japan's Science Community," Lunar Science for Landed Missions Workshop, SSERVI ID: LLW2018-51, January 2018.

[18] Q. Wang, L. Xiao, "China's Lunar Exploration Programme," Proc. of LEAG Workshop, Abstract no. 2041, November, 2016.

[19] E. Lakdawalla, "Chang'e 3 data: Lander Terrain Camera(TCAM)", Available from <http://planetary.s3.amazonaws.com/data/change3/tcam.html> accessed May, 3, 2018.

[20] R. Sridharan, S. M. Ahmed, T. P. Das, P. Sreekatga, P. Pradeepkumar, N. Naik, G. Supriya, "Direct evidence for water (H₂O) in the sunlit lunar ambience from CHACE on MIP of Chandrayaan 1," Planetary and Space Science, vol. 58, pp. 947-950, 2010.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pss.2010.02.013>

[21] NASA, "Commercial Space Transportation", Available from <https://www.nasa.gov/commercial-orbital-transportation-services-cots> accessed December, 2, 2017.

[22] SpaceX, "Space Launch Vehicle and Spacecraft in SpaceX" Available from <http://www.spacex.com/galleries> accessed May, 4, 2018.

[23] NASA, "Lunar CATALYST," Available from <https://www.nasa.gov/lunarcatalyst> accessed January, 12, 2018.

[24] NASA, "Six Teams Earn Honors, Prize Money in Second Construction Level of NASA Challenge to 3-D Print a Habitat," Available from https://www.nasa.gov/directorates/spacetech/centennial_challenges/3DPHab/6-teams-earn-prize-money-in-second-level-of-challenge accessed July, 10, 2017.

[25] G. Ju, "Korean Pathfinder Lunar Orbiter(KPLO) Status Update," Available from <https://www.hou.usra.edu/meetings/leag2017/presentations/tuesday/ju.pdf> accessed April, 30, 2018.

[26] G. B. Sanders, W. E. Larson, "Integration of in-situ resource utilization into lunar/Mars exploration through field analogs," Advances in Space Research, vol. 47, pp. 20-29, 2011.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2010.08.020>

[27] M. Anand, I. A. Crawford, M. Balat-Pichelin, S. Abanades, W. Y. Westrenen, G. Péraudea, R. Jaumann, and W. Seboldt, "A brief review of chemical and mineralogical resources on the Moon and likely initial In Situ Resource Utilization (ISRU) applications," Planetary and Space Science, vol. 74, pp. 42-48, 2012.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pss.2012.08.012>

[28] USGS, "U.S.G.S. Planetary GIS Web Server", Available from <https://webgis.wr.usgs.gov/index.html> accessed April, 30, 2018.

[29] NASA, "Lunar Pits Could Shelter Astronauts, Reveal Details of How 'Man in the Moon' Formed" Available from <https://www.nasa.gov/content/goddard/lunar-pits-could-shelter-astronauts-reveal-details-of-how-man-in-the>

-moon-formed accessed May, 4, 2018.

[30] B. Ryu, C. Wang, I. Chang, "Development and Geotechnical Engineering Properties of KLS-1 Lunar Simulant", Journal of Aerospace Engineering, vol 31, no. 1, pp. 04017083, 2018.
DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)AS.1943-5525.0000798](https://doi.org/10.1061/(ASCE)AS.1943-5525.0000798)

[31] KICT, "Development of environmental simulator and advanced construction technologies over TRL6 in extreme conditions(II)", KICT Research Report, KICT 2017-169, 2017.

[32] S. Wilhelm, M. Curbach "Review of possible mineral materials and production techniques for a building material on the moon. Structural Concrete", vol. 15, no. 3, pp. 419-428, 2014.
DOI: <https://doi.org/10.1002/suco.201300088>

[33] J. Lee, T. Lee, K. Ahn, B. Chang "Workability of Polymeric Concrete for Lunar Infrastructure," Journal of the Korean Society of Civil Engineers, vol. 37, no. 2, pp. 507-512, 2017.
DOI: <https://doi.org/10.12652/Ksce.2017.37.2.0507>

홍 성 철(Sungchul Hong)

[정회원]



- 2005년 5월 : 미국 위스컨신주립대 토목환경공학과 (지형공간정보공학 석사)
- 2010년 12월 : 미국 위스컨신주립대 토목환경공학과 (지형공간정보공학 박사)
- 2013년 12월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 수석연구원

<관심분야>

지리정보시스템, 원격탐사, 공간분석

신 휴 성(Hyu-Soung Shin)

[정회원]



- 1996년 3월 : 한양대학교 자원공학과 암반공학전공 공학석사
- 2002년 1월 : 영국 University of Wales Swansea, 토목공학과 (전산지반공학전공 공학박사)
- 2003년 6월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 연구위원

<관심분야>

지반공학, 수치모델링, 인공지능, 딥러닝, 영상처리