국내외 달 탐사 사업 및 달기지 건설기술 동향

글. 신휴성_미래융합연구본부 연구위원

국내 달 탐사 사업 동향

우리나라는 2007년 6월에 1차 우주개발진흥 기본 계획을 수립하였고, 11월에는 우주개발사업 세부 실천 로드맵을 작성하여 달 탐사 중심의 우주탐사 계획을 발표하였다. 2011년 제2차 우주개발진흥 기본 계획 이후 달 탐사 계획은 수차례 수정되었으나, 최근 제3차 우주개발진흥 기본계획을 수립하여 2020년 시험용 달 궤도선, 2030년 달 착륙선 발사로 수정하였다. 현재 시험용 달 궤도선은 탑재체 6종(국내 5종, NASA 1종)을 장착하고, 미국 우주 기업인 SpaceX의 발사체에 실려 발사될 예정이다.

국내에서 달 자원 탐사 및 달기지 건설 관련 연구는 한국우주항공연구원(KARI) 외에 한국건설기술연구원(KICT), 한국지질자원연구원(KIGAM), 한양대 등을 중심으로 진행 중이다. 이중 한국건설기술연구원은 달 표면과 유사한 환경을 구현할 수 있는 실대형 지반열진공챔버를 제작하고 있으며(그림 1), 달 현지 측량, 달 지반조사, 달기지 건설을 위한 다양한 연구를 진행하고 있다.

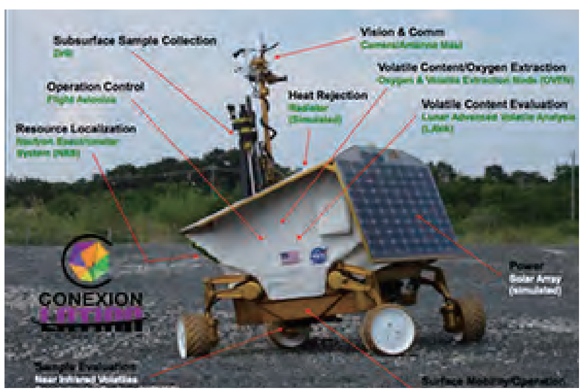
해외 주요 우주국 달 탐사 사업 동향

2017년 12월 미국 트럼프 행정부는 1972년 이후 중단되었던 유인 달 탐사를 재추진하겠다고 선언하였다. 미국의 유인 달 탐사 계획은 2018년 연방의회에서 예산이 승인된 이후 구체화될 것으로 예상된다. 현재 NASA가 추진 중인 달 탐사 사업은 Resource Prospector와 Deep Space Gateway 등이 있다. 이 중 Resource Prospector는 2022년 다양한 관측 장비와 시추 장비를 탑재한 로버를 달 극지역에 보내 영구 음영 지역의 얼음 자원과 휘발성 물질을 조사하도록 할 예정이다(그림 2). 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.

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

[그림 1] KICT 실대형 지반열진공챔버(DTVC)

[그림 2] NASA Resource Prospector Rover



기술을 실증할 예정이다. 2022년에는 달 궤도선을 보내고 2023년에는 유럽 우주국(ESA)의 시추장비를 탑재한 Lunar 27호(달 착륙선)를 극지역에 보내 자원 탐사를 진행할 계획이다. 이외에도 2025년 이후에는 달 토양 표본 채취 및 귀환 임무를 수행하기 위해 Lunar 28호(달 착륙선)를 발사할 예정이다.

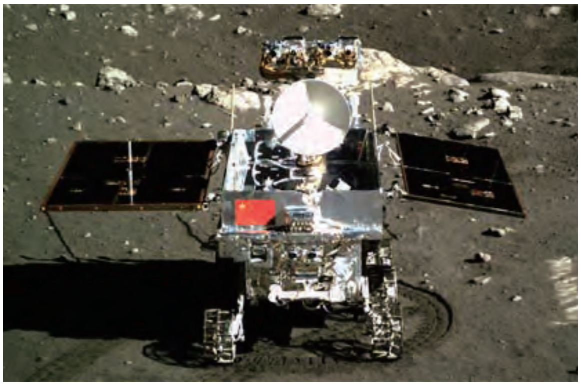
유럽 우주국 ESA는 2016년 달 영구 기지를 국제협력으로 건설하여 과학적 목적뿐 아니라 달 자원 발굴 및 활용, 우주여행, 그리고 화성 탐사의 전초기지로 활용하자는 계획을 발표하였다. 현재 ESA는 국제협력과 민간참여를 통한 달 탐사를 계획 중이다. 대표적으로 PROSPECT와 HERACLES가 있다. PROSPECT는 달 극지역에 착륙선을 보내 착륙지 주변의 토양을 채취 및 분석하여 달 현지 자원을 평가하기 위한 달 탐사 사업으로, 러시아의 Lunar 27호와 연계하여 개발 중이며 2022년 발사할 계획이다. Lunar 27호는 1.2m 깊이를 시추할 수 있는 드릴장비를 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.

일본은 2015년 1월 신 우주 기본계획을 수립하여 군사, 안보 분야의 우주활동을 강화하고, 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. 또한 JAXA는 SELENE-R(달 착륙선 및 로버)을 인도우주국(ISRO)과 공동으로 개발 중이며, 2022년 달에 보내 자원 탐사를 수행할 계획이다.

중국국가항천국(CNSA)의 달 탐사 계획은 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. 현재 CNSA는 2018년 달 후면부의 자원 탐사를 위해 Chang'E 4호(통신 중계 궤도선, 달 착륙선 및 로버)를 발사할 계획이며, 2019년에는 달 전면부에 Chang'E 4호(달 착륙선)를 발사할 예정이다. 또한 2020년부터 2030년까지 2번의 달 극지역 자원 탐사 사업을 준비하고 있으며, 2030년까지 달 표면에 연구기지를 건설할 예정이다.

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

[그림 3] 중국 Chang'E-3 Rover



국내외 달 탐사 사업 및 달기지 건설기술 동향

민간 달 탐사 사업 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(그림 4). 미국 NASA의 COT 사업은 기존 국제우주정거장으로의 화물수송 비용을 1/10로 절감하면서, 민-관 우주협력의 대표적인 성공 사례로 인식되고 있다. COTS 사업의 성공에 힘입어, 2014년 Lunar CATALYST를 기획하였고, Moon Express, Mastern Space Systems, Astrobotic Technology를 기술 협력사로 선정하였다. 이들 민간 기업들은 NASA의 기술지원으로 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 경진대회다. 2005년부터 시작되어 달 토양 채취, 달 토양 샘플 귀환, 달 현지 자원을 활용한 산소 생산 등에 대한 기술개발 대회를 개최하고 있다.

[그림 4] SpaceX 발사추진체 및 우주선

국내외 달 탐사 사업 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. 달 탐사 후보지역 중, 달 남북극의 영구 음영 지역은 달 궤도선을 통해 얼음 형태의 물이 다량 존재하는 것이 발견되어, 전 세계적인 주목을 받고 있다. 달 극지역 탐사를 준비 중인 국가는 우리나라를 포함하여 미국, 유럽연합, 중국, 일본 등이 있다.

우리나라 KARI는 2020년 시험용 달 탐사 궤도선을 발사할 예정이다. 시험용 달 탐사 궤도선에 탑재될 NASA의 ShadowCam은 태양빛이 없는 영구 음영 지역의 지형을 촬영할 수 있도록 설계되었다. 100km 고도에서 1.7m 공간 해상도의 지형 이미지 촬영이 가능하므로, 달 극지역 착륙 후보지 선정과 영구 음영 지역 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 관측장비 외에 시추장비를 탑재하여 달 표면뿐만 아니라 지표면 아래의 얼음 매장량과 분포, 그리고 달 토양 샘플의 화학적 분석을 수행할 예정이다. 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 탐사 계획에 부합된 달 탐사 후보지 및 임무 선정을 위해서는 지속적인 동향 파악 및 분석과 함께, 국제협력을 바탕으로 한 달 탐사 계획 수립이 중요하다.

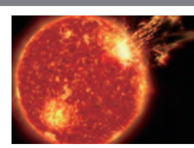
달기지 건설을 위한 달 현지 자원 및 지형 활용

달 탐사는 미래 자원 확보, 유인 기지 건설과 밀접한 관련이 있다. 달의 극한환경에서 자원 개발과 유인탐사 활동을 위한 기지를 건설하기 위해서는 막대한 양의 자원을 지구로부터 수송해야 한다. 따라서 달 현지 자원과 지형을 이용하여 물과 산소를 생산하고 달기지를 건설하는 기술이 필요하다. 달 현지 자원 활용 기술은 달에 존재하는 자원을 이용하여 우주인의 생명유지를 위한 물, 산소, 우주선 연료, 건축재료 등을 생산하여 장기간의 유인탐사를 가능하게 하는 기술이다(표 1). 달 극지역에는 유인탐사에 필수적인 물이 얼음형태로 존재하는 것으로 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.

달 남북극을 포함한 극지역에서의 기지 건설은 두 가지 측면에서 유리하다. 첫째, 극지방의 일부 음영지역에는 얼음이 존재하므로 유인탐사에 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 기간에는 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 두 개의 태양 전지를 이용하면 거의 연속적으로 전력을 생산할 수 있다. 달 극지역 크레이터 내부의 낮은 온도는 적외선 장비를 운영하는데 적합하고, 지구로부터의 광범위한 전파 노출에 안전하다. 따라서 달 극지역의 크레이터는 천문학적 관측을 위한 최적의 장소 중 하나이다.

달기지 건설 시 문제되는 것은 태양풍, 우주 방사선, 대형 운석이다. 달에는 대기로 인한 마찰이 없기 때문에 미세 운석의 충돌도 전초기지에 충격을 줄 수 있다. 이러한 극한 환경 조건을 고려할 때, 전초기지를 지하 수m 아래에 건설하는 것이 효과적일 수 있다. 일부 시설물을 반지하 구조로 건설할 수도 있을 것이다. 특히 전초기지에 중·단기 체류해야 하는 우주인들을 고려할 때, 전초기지의 생활공간은 지하에 있는 것이 바람직하다. 최근 달 탐사 궤도선으로 달 전역에 함몰 지형(Lunar Pit)이 존재함이 밝혀졌다. 이중 200여 개의 함몰 지형이 용암동굴(Lava Tube)

[표 1] 달 현지 자원 활용

	Ice	Metal	Rare Earth Metal	Solar Wind
Lunar Resource				
	H_2O	Ti, Al, Fe, Si	U, Sm, Y	He-3, H, N, C
Usage	Water, Air, Fuel	Infrastructure and habitant Construction, Solar Panels, Machinery Device	Energy, Trade	Energy, Plant Growth, Air

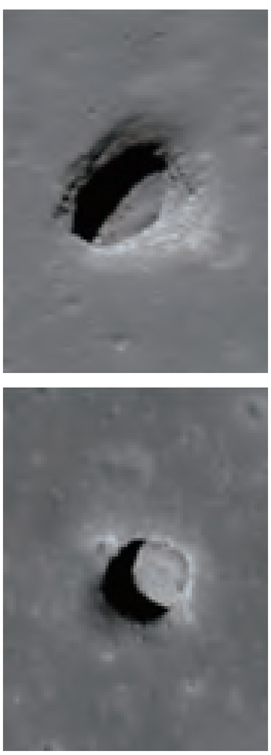
국내외 달 탐사 사업 및 달기지 건설기술 동향

입구로 추정된다(그림 5). 용암동굴은 달 초기의 화산 활동으로 분출한 용암이 땅속으로 흘러가면서 생긴 지형이다. 달 함몰 지형은 용암동굴이 부분적으로 붕괴되면서 생성됐다고 추정된다. 최근 세계 주요 우주국들은 달기지 건설을 위한 대표적인 후보지로 달 용암동굴을 주목하고 있다. 달 용암동굴은 잦은 운석 충돌, 고에너지의 자외선 복사, 미세먼지, 높은 온도 편차와 같은 달 표면의 극한환경으로부터 보호소 역할을 할 수 있다. 예를 들어 달 표면의 평균 기온은 약 -5°C이다. 하지만, 낮 시간의(약 354 시간) 평균 온도는 123°C 이고 123°C까지 상승한다. 밤 기간 동안(354 시간) 평균 온도는 -153°C 이다. 용암동굴은 두 기간 동안 약 -23°C의 온도를 유지할 수 있을 것으로 예상된다.

국내외 달기지 건설기술 동향

달 현지 자원 탐사는 달기지 건설과 밀접한 연관이 있다. 달 현지 자원을 활용한 건설기술은 전 세계적으로 개발 초기 단계로 우리나라를 포함한 미국, 유럽연합, 중국 등에서 개발되고 있다. 달기지 건설을 위해서는 달 모사토 제작, 달 표면 모의 환경 구현, 달 건설 재료, 달 건설 로봇 등의 기술이 필요하다(표 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 성능평가, 달 현지 자원 활용 기술 개발 등에 이용될 수 있다. 달 복제토는 과거 아폴로 미션을 통해 채집된 미국의 복제토가 달 토양과 가장 유사하다. 우리

[그림 5] 달 용암동굴



[표 2] 개발 중인 달기지 건설기술

Lunar Construction Technology	Nation	Description
Lunar Simulant	USA, EU, Japan, China, Canada, Korea	· 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	· Dirty Thermal Vacuum Chamber(DTVC) under development · Size: 4.7m(W)π4.7m(H)π 4.65m(L), 50m^3 · Vacuum: 10^{-2}~10^{-4} Torr (with Soil) · Temp: - 190~150°C
Lunar Construction Material	Korea	· Lunar polymer concrete
	USA	· 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	· Liquid binding material for lunar regolith · Direct sintering of lunar regolith with concentrated solar energy
Lunar Construction Robot	USA	· Prototype of unmanned construction robots for excavation, load-haul-dump, transfer, and building a lunar base

나라를 포함한 달 탐사 관련 국가 역시 미국의 복제토를 참조하여 제작하고 있다. 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}~10^{-4}Torr의 진공도와 –190 ~150°C의 온도 구현이 가능한 50m^3 급 규모의 지반열진공챔버(Dirty Thermal Vacumm Chamber)를 세계 최초로 구축 중이다. 지반열진공챔버는 달의 지표면 환경과 유사한 환경을 지구에서 미리 구현함으로써 개발된 달 건설기술의 성능을 검증하는데 활용될 수 있다.

달 건설 재료 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. 우리나라도 열경화성 수지인 폴리에틸렌을 한국형 복제토인 KOHLS-1과 배합하고 블록을 제조하여 달에서의 시공 가능성을 확인하였다. 달 건설재료 및 시공 기술은 각국에서 다양한 형태로 개발되고 있으나, 고진공, 극고온 및 극저온으로 대표되는 달 극한환경에서 실험한 결과는 존재하지 않는다. 따라서 향후 성능 개선을 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. 향후 달 탐사 및 달기지 건설은 많은 비용과 시간이 소요되므로 국제협력을 기반으로 진행될 것으로 예상된다. 우리나라의 달 건설기술 개발은 우주 강대국보다 늦게 시작하였지만, 달 표면 모의 환경구현 기술에서 빠르게 투자가 이루어지고 있으며, 달 모사토 제작 및 건설 재료 분야에서도 우주 강대국과의 기술격차를 줄이기 위한 노력이 이뤄지고 있다. 향후 국제적인 추세에 부합된 달 현지 건설기술을 개발하기 위해서는 지속적인 동향 파악과 함께 개발된 달 건설기술의 연계를 위한 국제협력 및 교류가 중요하다.

맺음말

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 다변화되는 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 달기지 건설과 밀접한 연관이 있다. 달 현지 자원을 이용한 물, 산소 생산과 달 용암동굴을 이용한 기지 건설은 장기적인 유인 달 탐사를 가능하게 한다.

국제적으로 달 현지 자원을 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 달기지 건설은 국제 협력을 기반으로 이루어질 것으로 예상된다. 따라서 달기지 건설을 준비하기 위해서는 지속적인 국제 달 탐사 동향 파악과 함께 국제협력 및 교류를 통한 달 건설기술 개발이 필요하다. K

참고자료

- 과학기술정보통신부(2018), "제3차 우주개발진흥계획"
- 한국건설기술연구원(2017), "극한건설 환경 구현 인프라 및 TRL6 이상급 극한건설 핵심기술 개발", KICT 3차년도 연구보고서, KICT 2017-169
- 주광혁 (2016), 국내외 우주탐사 프로그램 및 관련 기술의 개발 현황, 한국항공우주학회지, Vol. 44, No. 8, pp. 741-757
- G. B. Sanders, W. E. Larson(2011), "Integration of in-situ resource utilization into lunar/Mars exploration through field analogs," Advances in Space Research, vol. 47, pp. 20-29