Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society
Vol. 19, No. 6 pp. 669-676, 2018

https://doi.org/10.5762/KAIS.2018.19.6.669
ISSN 1975-4701 / eISSN 2288-4688

달 기지 건설을 위한 달 현지 자원 및 지형의 공간 분포 분석

홍성철*, 김영재, 서명배, 신휴성
한국건설기술연구원 미래융합연구본부

Geographic Distribution Analysis of Lunar In-situ Resource and Topography to Construct Lunar Base

Sungchul Hong*, Young-Jae Kim, Myungbae Seo, Hyu-Soung Shin
Department of Future Technology and Convergence Research,
Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

요 약 달의 과학적·기술적·경제적 가치가 증대됨에 따라 세계 주요 우주국들은 달 자원 개발 및 달 기지 건설을 위한 로드맵을 수립하여 달 탐사 사업을 단계적으로 수행하고 있다. 또한 달 표면에 전초기지를 건설하기 위해서는 막대한 양의 자원을 지구로부터 수송해야하므로, 달 표면에 존재하는 자원을 활용하는 현지 건설기술(Lunar In Situ Construction Technology)이 개발 중이다. 하지만 달 지형과 자원은 달 내부의 지각 및 화산활동과 달 외부로부터의 태양광, 운석 충돌 등으로 인해 지역별로 다양한 특성을 지닌다. 이에 본 논문에서는 달 자원의 공간적 분포분석을 통해 현지 건설기술의 적용을 위한 고려사항을 제시하였다. 더불어 달 기지 건설을 위해서는 달 착륙선의 안정적인 착륙과 로버의 이동 용이성을 고려해야 하므로, 달 건설 후보지역 선정을 위한 지형조건을 함께 제시하였다. 현재 달 궤도선으로부터 주로 관측되는 달 지형 및 자원 정보는 낮은 공간해상력과 함께 달 표면에 국한되는 제약점이 있다. 향후 전개될 로버 중심의 달 탐사는 달 현지 건설기술 개발과 달 기지 건설후보지 선정에 유용한 정보를 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

Abstract As the Moon's scientific, technological, and economic value has increased, major space agencies around the world are leading lunar exploration projects by establishing a road map to develop lunar resources and to construct a lunar base. In addition, as the lunar base construction requires huge amounts of resources from the Earth, lunar in-situ construction technology is being developed to produce construction materials from local lunar resources. On the other hand, the characteristics of lunar topography and resources vary spatially due to the crustal and volcanic activities inside the Moon as well as the solar wind and meteorites from outside the Moon. Therefore, in this paper, the geospatial analysis of lunar resource distribution was conducted to suggest regional consideration factors to apply the lunar in situ construction technologies. In addition, the lunar topographic condition to select construction sites was suggested to ensure the safe landing of a lunar lander and the easy maneuvering of a rover. The lunar topographic and resource information mainly from lunar orbiters were limited to the lunar surface with a low spatial resolution. Rover-based lunar exploration in the near future is expected to provide valuable information to develop lunar in situ construction technology and select candidate sites for lunar base construction.

Keywords : Geographic Information System, Geospatial Analysis, Lunar Exploration, Lunar In Situ Construction, Remote Sensing

본 논문은 한국건설기술연구원 주요사업(극한건설 환경구현 인프라 및 TRL6 이상급 극한건설 핵심기술 개발)과 2017년 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2017R1E1A2A01077871).
*Corresponding Author : Sungchul Hong(Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology)
Tel: +82-31-995-0874 email: shong@kict.re.kr
Received April 6, 2018 Revised (1st May 3, 2018, 2nd May 10, 2018, 3rd May 25, 2018, 4th May 31, 2018)
Accepted June 1, 2018 Published June 30, 2018

1. 서론

1950년 구소련의 Lunar Program으로 시작된 달 탐사는 1970년대까지 무인탐사중심의 구소련과 유인탐사 중심의 미국을 중심으로 경쟁적으로 진행돼왔으나, 냉전완화와 더불어 30년간 종료되었다. 근래 달 탐사는 1990년 일본의 달 탐사궤도선으로부터 다시 시작되었다. 2000년대에 들어서는 미국, 러시아 외에 일본, 중국, 유럽연합 등의 신흥우주강대국들이 달 탐사 궤도선, 달 착륙선, 달 탐사 로버를 경쟁적으로 보내고 있고, 대한민국도 2020년 시험용 달 탐사 궤도선을 발사할 예정이다[1,2]. 달에는 헬륨-3, 토륨, 티타늄 등의 희귀자원이 존재하고 달 극지역에는 얼음 형태의 물이 존재하는 것이 밝혀졌다[3-5]. 이에 현재 달 탐사는 과학적 목적 외에, 달 자원개발, 유인탐사를 위한 전초기지 건설을 목적으로 진행되고 있다(Fig. 1.) 전 세계 주요 우주강국들은 향후 10년간 달 극지역과 뒷면에 달 착륙선과 탐사로버를 보내 정밀 지형 및 자원탐사를 계획 중이다[6]. 또한 미국과 유럽연합은 유인 달 탐사와 달기지 건설계획을 발표하였다[7,8]. 하지만 달의 극한환경에서 전초기지와 거주시설을 건설하고 자원개발을 위해서는 막대한 양의 자원을 지구로부터 수송해야하므로 많은 예산과 시간이 소요된다. 따라서 달 현지자원을 이용하여 건설 활동에 필요한 자원을 생산하는 기술이 개발 중이다[9].

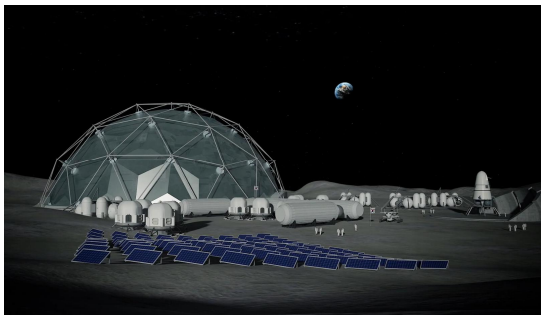


Fig. 1. Lunar Base

달 현지 건설기술(Lunar In-Situ Construction Technology)은 지구에서 가져올 수 있는 자원을 대신하기 위해, 유인 또는 무인 탐사 과정에서 취득할 수 있는 달 현지 자원을 이용하여 전초기지, 착륙장, 도로 등을 건설하는 기술이다. 하지만 과거 달의 지각 및 화산 활동과 태양풍, 운석 충돌 등의 외부 영향으로, 달 지형과 자원은 지역별 다양한 분포 특성을 지닌다. 이에 본 논문에서는 먼저 달 현지 건설 기술 동향에 대해 조사하였고, 달 자원과 지형의 공간분석을 통해 달 현지 건설기술 적용을 위한 고려사항을 제시하였다.

2. 달 현지 건설기술 개발 동향

2.1 개요

달 현지 건설기술은 달 전초기지 외에 기반시설인 달 착륙장, 차폐벽, 도로 등의 건설을 포함한다. 달 현지에서 건설 재료는 극심한 온도편차에 대해 낮은 열팽창과 진공환경에서의 증기 불침투성을 가져야 하고, 사람이 거주하기 위해 최소 내부압력을 유지하기 위해서는 높은 인장력과 압축강도를 지녀야 한다. 달 현지 건설기술은 달 현지의 토양(또는 토양의 금속 산화물)을 이용하는 기법과 지구에서 수송한 유기재료를 달 토양과 배합하는 기법으로 구분된다. 본 장에서는 우주강대국들을 중심으로 개발되고 있는 달 현지 건설기술과 건설 자원에 대해 조사하였다.

2.2 소결 기법

달 토양은 미세한 입자크기를 가지며 유리질 성분의 현무암 물질로 구성된다. 달 토양입자는 1000℃ - 1100℃ 사이의 녹는점을 지니므로 마이크로파 또는 고 에너지의 레이저 빔을 이용하여 달 토양을 녹이고 벽돌이나 블록을 빠르게 주조하는 소결 기법(Sintering Method)이 제안되었다. 특히 달 토양에 가정용 마이크로파를 조사했을 때 수십 초 내에 1,000 ℃ 이상 고온에 도달하여 달 토양이 녹는 현상이 발생하였다. 이는 달 토양입자의 표면 부분에 존재하는 3~30 nm 크기의 nanophase Fe(0)이 마이크로파 에너지를 흡수하는 현상에서 비롯된 것으로 분석되고 있다[10].

과거 아폴로 임무를 통해 수집된 달 토양 표본과 달 궤도선에서 관측된 광물자원 정보를 통해, nanophase Fe(0)는 달 토양의 성숙도와 철 함유량과 높은 상관관계가 있는 것으로 보고되고 있다[11]. 지구상의 현무암과 달 복제토를 이용하여 제작된 달 구조물은 높은 압축강도와 인장력을 지니고 있어, 달 전초기지, 달 도로, 달 착륙장 등의 건설재료로 활용 가치가 높다[12]. 하지만 소결 기법을 통해 주조된 현무암은 높은 표면 강도를 지니고 있어 자르기와 구멍 내기를 동반한 성형작업이 어려

우므로, 냉각과정 중에 발생하는 구조물의 변형과 깨짐 문제를 해결해야한다.

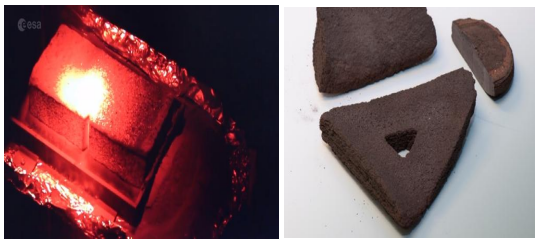


Fig. 2. Sintering Method [13]

2.3 테르미트 반응 기법

알루미늄, 철, 마그네슘, 티타늄은 달 토양의 주요 성분으로 산화물의 형태로 최대 36 wt%의 함량을 지닌다. 따라서 달 표면에서의 금속 채굴을 위해서는 달 토양으로부터 금속을 추출하는 화학적 처리기법의 개발과 적용이 중요하다. 건설재료를 생산하는 대안으로 제시되는 기법은 달 토양과 알루미늄 분말을 이용한 테르미트 반응(Thermite Reaction) 기법이다. 알루미늄은 산소와 화합하기 쉽고 발열량이 크다. 따라서 알루미늄과 금속 산화물의 산화-환원 반응에 의해 발생하는 열을 이용하여 건설 구조물을 제작하는 기법이 소개 되었다 [14]. 달 복제토와 점화 특성이 더 우수한 마그네슘 분말을 이용한 테르미트 반응 기법도 제안되었다[15]. 그러나 낮은 비등점을 가지는 알루미늄과 마그네슘은 진공상태인 달 환경에서 안정적인 연소 반응이 어렵다. 불안정한 연소로 인해 발생하는 기체로 다공성의 구조물이 생성될 수 있다는 문제가 있다[15]. 따라서 테르미트 반응 기법을 달 기지건설에 적용하기 위해서는 낮은 압축강도와 진공환경에서의 불완전한 연소 및 반응 문제를 해결해야 한다. 또한 주조 과정에서 많은 양의 알루미늄 및 마그네슘 분말이 필요하므로, 착륙선의 재활용이나 달 토양에서의 화학적 추출 방안을 고려해야 한다.

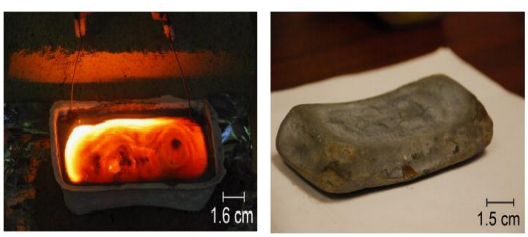


Fig. 3. Thermite Reaction[14]

2.4 적층기법

2.4.1 황 콘크리트

달 토양에서 황은 FeS 형태로 존재하며 0.16wt%에서 0.27wt%의 함량을 지닌다. 달 토양에서 황을 추출하기 위해서는 1100°C에서 1300°C까지의 가열과정이 필요하다. 황은 열가소성 수지처럼 가열하면 연화하여 쉽게 변형되고 식히면 다시 굳어지는 성질이 있다. 따라서 시멘트와 유사한 특성을 지닌 황을 달 골재와 혼합하여 건설재료로 이용하는 기법이 소개되었다[16,17]. 황 콘크리트는 3D 프린팅과 접목되어 SCCC (Sulfur Concrete Contour Crafting) 시공기법으로 개발되었다[18]. 하지만 황은 온도와 압력에 민감하며 우주 방사능에 대한 차폐 기능이 약하다. 또한 녹는점이 115.2℃ 이므로 123℃까지 올라가는 적도지역에서는 건설재료로 활용이 불가능하므로, 달 고위도 지역에서 사용돼야 한다는 제약점이 있다.

Fig. 4. Sulfur Concrete[19]

2.4.2 폴리머 콘크리트

폴리머 콘크리트는 달 토양의 접착제로 폴리에틸렌과 같은 열경화성 수지를 사용한다. Marshall Space Flight Center(MSFC)는 달 복제토인 JSC-1와 폴리에틸렌 분말을 사용하여 건설재료 활용 가능성을 조사하였다[20]. 국내에서는 한양대학교에서 폴리머 콘크리트를 개발하였다. 한국형 복제토인 KOHLS-1과 폴리머를 중량비 10%로 배합하고 0.01 torr 진공환경에서 강도실험을 함으로써 달에서의 시공 가능성을 확인하였다[21]. 하지만 달에는 고분자 화합물이 존재하지 않는다. 따라서 달 기지건설을 위해서는 많은 양의 폴리머를 지구로부터 수송해야 한다는 제약점이 있다.

Fig. 5. Lunar Polymer Concrete[21]

3. 달 현지 건설자원 및 지형의 공간 분포 분석

3.1 개요

달 지형과 자원은 과거 화산과 같은 내부 지각활동과 태양풍, 운석 충돌에 의한 외부 영향에 의해 지역별로 다양한 특성을 지닌다. 본 장에서는 달 탐사 궤도선의 관측 데이터를 기반으로 제작된 달 자원 및 지형 지도를 이용하여 현재 개발 중인 달 현지 건설기술의 지역적 적용 방안을 도출하고자 하였다. 이를 위해 달 표면에 존재하는 알루미늄, 마그네슘, nanophase Fe(0)와 지형의 공간 분포에 대해 분석하였다. 다만 지구로부터 수송이 불가피한 폴리머 콘크리트와 달 고위도 지역에만 적용 가능한 황 콘크리트는 분석 대상에서 제외하였다.

3.2 달 공간 데이터

달 건설 자원과 지형의 분포를 분석하기 위해 미국 지질조사국(USGS)에서 제공하는 달 자원 지도 및 토양 성숙도와 항공우주국(NASA)에서 구축한 달 수치표고모델을 이용하였다[22,23](Table 1). 이들 데이터 들은 각기 다른 달 탐사 궤도선과 관측센서를 통해 제작되었다. 또한 달 전역의 자원과 지형을 보여주나 다른 공간해상도를 가지므로, 지리정보시스템에서의 공간 데이터 중첩을 위해 원통투영법과 경위도 좌표체계를 가지도록 설정하였다. 철, 알루미늄, 마그네슘 분포 지도는 Lunar Prospector의 감마선 분광기를 이용하여 제작되었다. 감마선 분광기는 달 표면의 화학적 구성성분을 알기위해 개발된 센서로 달 자원의 분포와 함께 자원 함량(wt%)을 관측한다. Clementine의 자외선-가시광선 카메라를 이용하여 제작된 토양 성숙도(Optical Maturity)는 달 토양이 화산 또는 운석 등의 영향 없이 얼마나 외부에 노출되었는지를 보여주며, 수치가 낮은 지역일수록 장기간 노출되어 토양 성숙도가 높은 지역임을 의미한다. 마지막으로 달 음영기복도와 경사도는 Lunar Reconnaissance Orbiter의 레이저 고도계 데이터를 기반으로 구축된 수치표고모델을 이용하여 제작하였다.

Table 1. Description of Lunar Topography and Resource Dataset

Spatial Data	Data Source	Spatial Resolution
Iron Abundance Map	Lunar Prospector/Gamma Ray Spectrometer	15km
Magnesium Abundance Map		30km
Aluminum Abundance Map		
Optical Maturity Map	Clementine/UV-Vis Camera	1km
Terrain Shaded Relief and Slope Maps	Lunar Reconnaissance Orbiter/Lunar Orbiter Laser Altimeter	30m

Table 2. Major Mineral for Mare and Highland on Moon [24]

Mineral	Element	Rich Region
Pyroxene	Fe, Mg, Ca, Si, O	Mare
Olivine	Fe, Mg, Si, O	
Ilmenite	Fe, Ti, O	
Plagioclase	Ca, Al, Si, O	Highland
Feldspar		

3.3 달 건설 자원의 공간 분포 분석

달 표면의 모습은 다양하고 복잡한 지형으로 구성되지만, 크게 육안으로 보았을 때 밝게 빛나는 고지(Highland)와 어둡게 보이는 바다(Mare)로 분류된다[24]. Fig. 6은 달 전역의 지형 분포를 보여주고 있으며, 바다 지역을 파란색 폴리곤으로 표시하였다. 바다 이외의 지역은 고지를 의미한다. 달 고지는 소행성들의 충돌로 인해 생겨난 크레이터들과 작은 돌들이 모인 암석으로 구성되며 사장석으로 이루어져 있다. 반면 바다는 화산이 폭발하면서 분출된 용암이 부분적으로 분지를 매워 완만한 경사도를 가진다. 바다는 달의 35%를 차지한다. 전면부에 바다의 84%가 존재하는 반면, 후면부에는 16%의 바다가 존재한다.

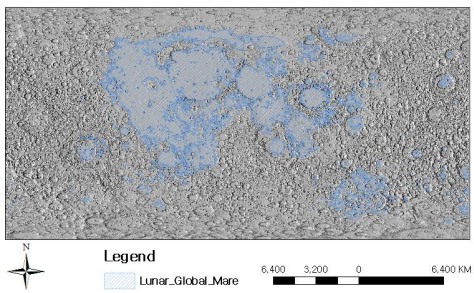
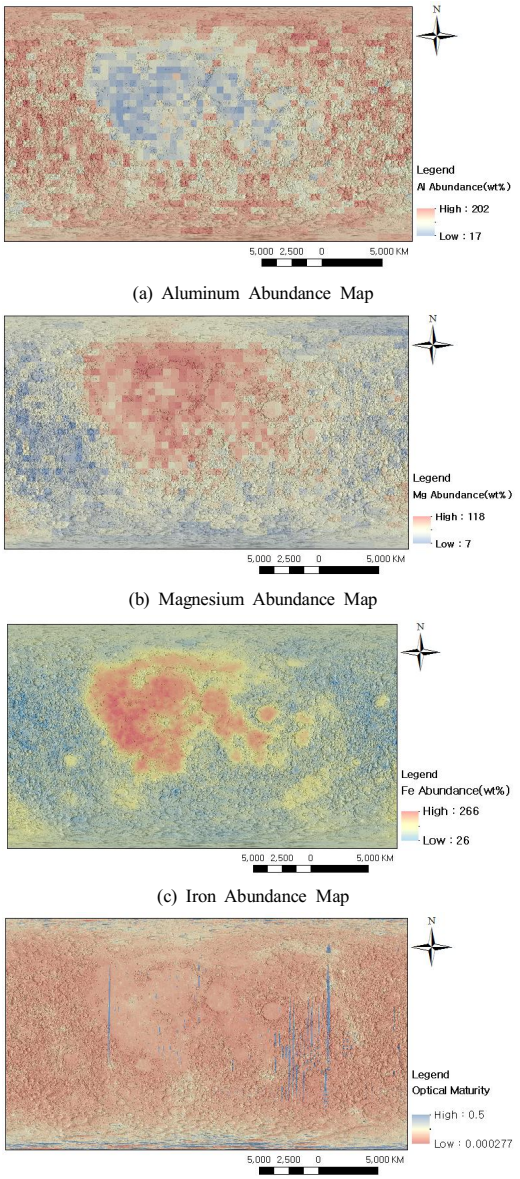


Fig. 6. Lunar Mare Resource Map

달 광물은 주로 산화 광물 형태로 존재한다. 주요 광물로는 휘석(Pyroxene), 감람석(Olivine), 티탄철(Ilmenite), 사장석(Plagioclase), 장석(Feldspar) 등이 있다(Table 2). 휘석, 감람석, 티탄철은 바다지역에 주로 분포하며, 사장석과 장석은 고지에 분포한다. 또한, 달 바다에 존재하는 주요 광물은 공통적으로 철을 함유하고 있는 반면, 고지는 공통적으로 칼슘과 알루미늄을 함유하고 있다.

Fig. 7은 달 전 지역의 철, 알루미늄, 마그네슘 분포지도, 토양 성숙도(Optical Maturity)를 음영기복도와 중첩시킨 영상으로 달 광물 자원의 지형 공간적 분포를 보여준다. 달 토양의 광물 함량(wt%)이 높은 지역은 짙은 빨간색으로 나타나게 하였으며, 반대인 지역은 파란색으로 나타나도록 하였다. 반면 토양 성숙도의 수치가 낮은 지역은 운석충돌이나 화산활동 없이 우주에 장기간 노출되었음을 의미하므로 빨간색으로 나타내게 하였고, 토양 성숙도 수치가 높은 지역은 반대로 파란색으로 나타내게 하였다. Table 2와 Fig. 7에서 보여주듯이, 달 표면에서 알루미늄은 고지대 지역에 주로 존재하고(Fig. 7 (a)), 마그네슘과 철은 바다 지역에 존재한다(Fig. 7 (b) and (c)). 다른 광물과 달리 nanophase Fe(0)는 대기가 없는 달의 특수한 환경에서 지속적인 운석충돌과 태양풍의 영향으로 달 토양의 표면에 생성되는 물질로 지구에는 존재하지 않는다. 따라서 nanophase Fe(0)는 달 전역에 분포하나 바다의 철 함유량과 토양 성숙도가 높은 지역에 함유량이 높을 것으로 추정된다(Fig. 7 (c) and (d)).



(a) Aluminum Abundance Map

(b) Magnesium Abundance Map

(c) Iron Abundance Map

(d) Optical Maturity

Fig. 7. Lunar Resource Map

3.4 달 현지 건설기술 적용을 위한 고려사항

향후 달 표면에 전초기지를 건설하기 위해서는 지역별 자원 분포와 지형 특성에 따른 현지 건설기술이 적용돼야 한다. 달은 대기와 물이 없으므로 평탄한 지형이 생기기 어렵다. 바다지역은 용암이 녹아 흘러나온 장소이기 때문에 달 관측 이미지 상에서는 평탄하게 보이지만, 현장 이미지를 보면 오히려 구릉지와 같은 모습을 지니고 있다. Fig. 8은 과거 아폴로 17호 임무 수행기간 동안 촬영한 영상으로, 달 표면에도 큰 규모의 암괴와 다양한 경사도를 지닌 지형이 존재하는 것을 보여준다. 따라서 향후 지구에서 인력과 자원을 수송하기 위한 기반시설을 달 표면에 건설하기 위해서는 굴착이 용이한 장소를 선정하여 평탄화 하는 작업이 필요하다.

Fig. 8. Lunar Landscape [25]

달 전초기지의 건설부지는 달 착륙선의 안정적인 이착륙과 건설 로버의 이동이 용이한 지역을 선정해야한다[26]. Fig. 9.은 달 경사도를 음영기복도와 중첩시킨 영상이다. 달 착륙선의 이착륙과 건설 활동이 용이한 경사도 7도 미만의 평탄한 지역은 녹색으로 표시했다. 달 착륙은 어려우나 건설 로봇의 이동이 용이한 경사도 7도에서 10도 사이의 지역은 노란색으로 표시했고, 건설 활동이 어려운 경사도 10도 이상 지역은 빨간색으로 표시하였다. 마지막으로 달 현지 건설기술 중에서 마그네슘과 알루미늄을 이용한 테르미트 반응 기법은 각각 바다와 고지대에 적합하다. 소결 기법은 달 전 지역에 적용 가능하나 nanophase Fe(0)의 분포와 특성을 고려할 때, 철의 함유량이 높은 바다지역의 건설에 효과적일 것이다. 이외에도 황 콘크리트는 낮은 녹는점으로 인해 달 남북극의 고위도 지역에 적합하다. 폴리머 콘크리트는 달 전역에 적용가능하나 지구로부터의 자원 수송이 불가피 하므로, 달 개척 초기 단계에 유용할 것으로 예상된다.

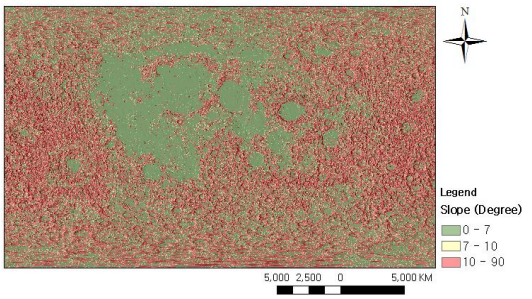


Fig. 9. Lunar Topography Map

4. 결론

최근 미국은 1972년 이후 중단되었던 유인 달 탐사의 재추진을 선언하였고, 유럽연합은 달 영구 유인기지를 국제협력으로 건설하여 달 자원 개발과 화성탐사 전초기지로 활용하자는 계획을 발표하였다. 하지만 달 전초기지를 건설하기 위해서는 막대한 양의 건설 자원을 지구로부터 수송해야하므로, 달 현지의 자원을 활용한 건설기술이 주요 우주국을 중심으로 개발 중이다.

이에 본 논문에서는 달 현지의 건설 자원 및 지형의 공간 분포 분석을 통해 달 현지 건설기술의 적용을 위한 고려사항을 제시하였다. 주요 달 건설자원인 알루미늄과 마그네슘은 각각 고지대와 바다에 주로 존재하며, nanophase Fe(0)는 달 바다의 토양 성숙도가 높은 지역에 주로 존재할 것으로 추정된다. 하지만 이들 건설자원은 달 내부 활동과 우주로 부터의 영향으로 인해 지역별로 다양한 특성을 보여주므로, 달 전초기지 건설을 위해서는 달 건설자원의 분포와 매장량을 고려하여 건설 부지를 선정해야한다. 더불어 우주선의 안정적인 착륙과 건설 로봇의 이동 용이성을 위해서는 건설 후보지역의 지형적 조건을 고려돼야 할 것이다.

향후 달 전초기지 건설을 위해서는 달 건설자원 및 지형 조건 이외에도, 달 현지 자원을 활용한 물/산소 생산 가능성과 달 현지 자원의 경제적 가치 등을 고려하여 건설 후보지를 선정해야 한다. 또한 달 기지 건설 후보지역은 달의 과학적 탐사 목적에도 부합돼야한다. 하지만 달 궤도선의 관측 정보는 낮은 공간해상력을 지니며 달 표면에 국한된다는 제약점이 있다. 현재 주요 우주 강대국들은 무인 로봇 중심의 달 탐사를 준비 중이다. 무인 로봇 중심의 달 현지 탐사는 정확한 지형정보와 함께 달

지표면과 지표면 아래의 자원정보를 제공할 수 있으므로, 향후 달 현지 건설기술 개발과 달 건설 후보지 선정에 유용한 정보를 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

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] Ministry of Science and ICT, "3rd Basic Space Development Plan", 2018.

[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: https://doi.org/10.7854/JPSK.2017.26.4.373

[4] 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)

[5] 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.

[6] ISECG, "The Global Exploration Roadmap", Available from https://www.nasa.gov/sites/default/files/files/GER-2013_Small.pdf (accessed February, 6, 2018)

[7] NASA, "New Space Policy Directive Calls for Human Expansion Across Solar System", https://www.nasa.gov/press-release/new-space-policy-directive-calls-for-human-expansion-across-solar-system (accessed March, 19, 2018)

[8] ESA, "Moon Village: A Vision for Global Cooperation and Space 4.0", Available from https://www.esa.int /About_Us/Ministerial_Council_2016/Moon_Village (accessed March, 19, 2018)

[9] 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/https://doi.org/10.1016/j.asr.2010.08.020

[10] L. A. Taylor, "Generation of native Fe in lunar soil", Engineering, Construction, and Operations in Space, ASCE, New York, pp. 67–77, 1988.

[11] R. L. Korotev, R. V. Morris, "On the Maturity of Lunar Regolith", Workshop on New Views of the Moon, pp. 49. January. 1998.

[12] J. A. Happel, "Indigenous materials for lunar construction", *Applied Mechanical Reviews*, vol. 46, no. 6, pp. 313-325, 1993.
DOI: https://doi.org/10.1115/1.3120360

[13] ESA, "3D printing of a model building block for a lunar base outer shell", http://www.esa.int/Our_Activities/Space _Engineering_Technology/Shaping_the_Future/3D_ printing _of_a_model_building_block_for_a_lunar _base_outer_shell. (Accessed November 13, 2017)

[14] E. J. Faierson, K. V. Logan, B. K., Stewwart M. P. Hunt, "Demonstration of concept for fabrication of lunar physical assets utilizing lunar regolith simulant and a geothermite reaction", *Acta Astronautica*, vol. 67, no. 1–2, pp. 38-45, 2010.
DOI: https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2009.12.006

[15] Delgado, A., E. Shafirovich, "Towards better combustion of lunar regolith with magnesium", *Combustion and Flame*, vol. 160, pp. 1876-1882, 2013.
DOI: https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2013.03.021

[16] D. Vaniman, D. Pettit, G. Heiken, "Uses of lunar sulfur. Second Conference on Lunar Bases and Space Activities of the 21st Century", Johnson Space Center, NASA, USA, pp. 429–435, 1992.

[17] H. A. Omar, "Production of lunar concrete using molten sulphur", Final Research Report, Grant NAG8–278, NASA, USA.1993.

[18] B. Khoshnevis, A. Carlson, N. Leach, M. Thangavelu, "Contour crafting simulation plan for lunar settlement infrastructure buildup", Earth & Space 2012: Engineering, Construction, and Operations in Challenging Environments", *ASCE, Pasadena, California, USA*, pp. 1458-1466. 2012.
DOI: https://doi.org/10.1061/9780784412190.155

[19] The New Stack, "3D printed buildings made by robots for the earth, moon and mars", Available from https://thenewstack.io/3d-printed–buildings-made-by-robots-for-the-earth-moon-and-mars/ (accessed November 29, 2017)

[20] M. P. Bodiford, K. H. Burks, M. R. Perry, R. W. Cooper, and M. R. Fiske, "Lunar in situ materials-based habitat technology development efforts at NASA/MSFC", Earth & Space 2006: Engineering, Construction, and Operations in Challenging Environments, ASCE, Houston, Texas, USA, pp. 1–8. 2006.
DOI: https://doi.org/10.1061/40830(188)70

[21] J. Lee, T. S. Lee, K. Y. Ahn, B. C. 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

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

[23] NASA, "PDS Geosciences Node: Lunar Reconnaissance Orbiter", Available from http://pds-geosciences.wustl.edu/missions/lro/default.htm (accessed April, 30. 2018)

[24] D. Rapp, "Lunar ISRU Technology" Use of Extraterrestrial Resources for Human Space Missions to Moon or Mars. *Springer, Berlin, Heidelberg*, pp. 91-111, 2013.
DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-32762-9_3

[25] NASA, "Apollo 17 Extravehicular Activity", Available from https://www.nasa.gov/mission_pages/apollo/images.html (accessed May, 09, 2018)

[26] A. A. Berezhnoy, J. Flahaut, C. Wohler, D. Rommel, A. Grumpe, E. A. Feoktistova, V. V. Shevchenko, C. Quantin, P. Williams “Candidate landing sites for the luna-glob mission,” The 7th Lunar Exploration Symposium, pp. 235-245

홍 성 철(Sungchul Hong) [정회원]

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

<관심분야>
달 탐사, 지리정보시스템, 원격탐사

김 영 재(Young-Jae Kim) [정회원]

- 2014년 8월 : 서울대학교 화학부 (화학 박사)
- 2017년 1월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 전임연구원

<관심분야>
우주 건설 재료, 3D 프린팅

서 명 배(Myung-Bae Seo) [정회원]

- 2001년 2월 : 조선대학교 전자계산학과 (공학석사)
- 2003년 2월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 수석연구원

<관심분야>
건설정보, BIM, 3D 프린팅 건설

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>
우주건설, 지반공학, 수치모델링, 인공지능, 딥러닝, 영상처리