

논문

NASA 워크숍 및 해외 착륙임무에 기반한 달 착륙 후보 지역과 임무에 대한 고찰

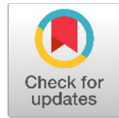
이주희[†], 류동영

한국항공우주연구원

A Review of the Candidate Areas and Missions for Lunar Landing Sites based on NASA Workshop & Overseas Landing Missions

Joohee Lee[†], Dong-Young Rew

Korea Aerospace Research Institute, Daejeon 34133, Korea



Received: October 13, 2021
Revised: November 1, 2021
Accepted: November 4, 2021

[†]Corresponding author :

Joohee Lee
Tel : +82-42-860-2378
E-mail : jhl@kari.re.kr

Copyright © 2021 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

Joohee Lee
<https://orcid.org/0000-0001-8968-0900>
Dong-Young Rew
<https://orcid.org/0000-0002-2450-4313>

요약

우리나라는 2022년 8월 시험용 달 궤도선을 처음으로 달에 보낼 계획이다. 그리고 제3차 우주개발 진흥 기본계획을 통해서 밝힌 바에 따르면 이후 2030년 이전까지는 달 착륙선을 달에 보낸다는 계획이다. 달 착륙지역 선정에는 착륙선의 임무에 따라 적합한 착륙 지역이 달라질 수 있으며, 따라서 성공적인 달 탐사 임무 설계를 위해서는 달 착륙지역에 대한 사전 연구가 반드시 필요하다. 본 논문에서는 2018년 NASA 워크숍에서 제안한 주요 달 착륙 후보지역에 대한 자료를 바탕으로 NASA의 MoonTrek을 이용하여 14개 제안 지역중 주요 지역의 특성을 분석하였다. 그리고 이런 지역이 향후 어떠한 달 착륙 임무에 적합한지 알아보았다. 또한 최근 달 착륙 국가들의 달 착륙 지역과 아르테미스(Artemis) 계획을 통해 달 남극의 중요성에 대해서도 알아 보았다.

Abstract

Korea plans to send a pathfinder lunar orbiter to the Moon for the first time in August 2022. And according to the 3rd Basic Plan for Space Development Promotion, the plan is to send a lunar lander to the Moon before 2030. The selection of the lunar landing area can be varied depending on the lunar lander's mission, therefore preliminary research on the lunar landing sites is essential for a successful lunar exploration mission design. This paper analyzed the characteristics of major regions among 14 proposed regions using NASA's MoonTrek based on the data on the candidate areas for the major moon landing proposed sites by the NASA workshop in 2018. And we looked into what kind of future moon landing missions are suitable for these areas. We also looked at the importance of lunar Antarctica area through the recent lunar landing areas of Moon landing countries and Artemis plan.

핵심어 : 달 착륙 지역, 달 남극 지역, Shackleton 충돌구, 아르테미스 프로그램

Keywords : lunar landing site, lunar polar region, Shackleton crater, Artemis program

1. 서론

우리나라는 2022년 8월 시험용 달 궤도선을 국내 최초로 달에 보낼 예정이다. 시험용 달 궤도선(KPLO)은 달의 궤도를 공전하는 달 관측 임무를 수행할 예정이다. 달 궤도선 이후 2030년 이전까지는 달 착륙선을 달에 보낸다는 계획을 제3차 '우주개발진흥 기본계획(2018년)'을 통해 밝히고 있다[1]. 달 착륙 임무를 위해서는 임무의 형태에 따라 착륙지역이 다르게 선정될 수 있다. 그렇지만 기본적으로 달 착륙지는 착륙선의 안전한 착륙을 위해 암석이 적고 경사도가 완만한 지역이 선호되며, 착륙선의 운용과 임무 기간 측면에서 태양의 일조량이 고려되어야 한다. 이에 따라 달 착륙지역 선정에는 달 착륙선의 임무에 따라 착륙 지역이 다르게 선정될 수 있다.

또한 성공적인 임무설계를 위해서는 달 착륙지역에 대한 사전 연구가 반드시 필요하다. 국내의 경우, 달 연구에 대한 연구자들이 이전보다 증가는 하고 있지만 아직도 부족한 실정이며, 이에 달 착륙지역에 대한 상세한 연구도 부족하다. 그렇지만 이미 1969년 아폴로(Apollo) 유인 달 착륙을 진행한 미국 NASA는 다양한 달 지형과 특성에 대한 많은 자료들과 지속적인 연구가 진행되고 있다.

최근에는 아시아 지역의 중국, 일본, 인도 등이 달 착륙 임무를 진행했거나 계획하고 있다. 중국의 경우, 이미 창어(Chang'e) 4호를 통해 달 뒷면 착륙에 성공하였으며, 창어 5호를 통해 달 샘플 귀환 임무를 성공적으로 수행하였다. 인도에서는 찬드라얀(Chandrayaan) 1호를 통해 궤도선 발사를 수행하였으며, 비록 실패를 했지만 찬드라얀 2호를 통해 달 착륙을 시도하였다. 일본도 일찍이 셀레네(Selene, 가구야) 달 궤도선 발사에 성공하였으며, 달 착륙 임무를 수행할 슬림(SLIM, Smart Lander for Investigating Moon) 착륙선 발사를 계획하고 있다. 미국 항공우주국(NASA)에서는 늦어질 수는 있지만 2024년 아르테미스(Artemis) 계획을 통해 다시 달에 사람을 보낸다는 계획을 추진하고 있다. 이를 위해 아르테미스 발사 이전에 민간 기업을 중심으로 상업용 달 탐사 탑재체 발사 서비스(CLPS, Commercial Lunar Payload Services)를 통해 우리나라를 비롯한 여러 국가들과 협력하고 있다. 또한 이스라엘의 민간기업에서도 비록 착륙에는 실패하였지만 베레시트(Beresheet)라는 달 착륙선의 달 착륙을 시도한 바 있다[2].

해외의 달 착륙 임무는 통상적으로 과학적 목적에 따라 분류하고 있지만, 우리의 경우는 과학, 기술, 활용 등의 측면에 따라 임무의 목적을 분류하는 것도 가능하리라 생각한다. 목적에 따라 분류하는 달 착륙 임무는 여러 유형(대분류로 과학, 기술, 활용, 유인 등)으로 분류할 수 있으며, 달의 구성성분 및 진화 연구와 관련한 순수 과학 목적(과학 목적에도 세부적인 분류가 다양하게 있을 수 있음)을 위한 임무, 달과 같은 태양계 내의 다른 천체에 착륙하는 기술 개발을 위한 기술적 목적의 임무, 달의 자원을 연구하고 활용하기 위한 자원탐사 임무, 향후 인간의 체류 탐사 준비를 위한 유인탐사 활용 임무 등[3,4,5]으로 구분할 수 있을 것이다.

따라서 본 논문에서는 미국 NASA를 중심으로 해외에서 연구된 달 착륙 주요 후보지역에 대한 자료를 바탕으로 미국 NASA의 문트랙(MoonTrek)[6]을 이용해 주요 지역의 특성을 분석하고, 향후 어떤 달 착륙 임무에 적합한지 알아보았다.

2. NASA 워크숍 자료 주요 지역 분석 및 임무 분류

달 착륙 지역의 특성을 분석하기 위해서 SSERVI(Solar System Exploration Research

Virtual Institute)와 LEAG(Lunar Exploration Analysis Group) 주관으로 2018년 1월에 미국 NASA의 에임즈 연구센터에서 개최되었던 달 착륙 임무를 위한 달 과학 워크숍에서 도출된 14개 지역[7]에 대해서 정리하고, 주요 관심 대표 지역에 대해서 NASA의 MoonTrek을 이용하여 지역 환경을 분석하고 관련 임무를 정리해 보았다.

미국 NASA의 JPL에서 개발한 MoonTrek을 이용하면 달 착륙지 지형에 대한 거리, 경사도, 태양 고도각, 3D 지형도 등을 알아볼 수 있으며, 착륙지역의 지형에 대해 대략적인 특성을 확인할 수 있다. 여기서는 주로 착륙지의 경사도와 같은 착륙 안정성에 초점을 두었다.

Fig. 1에서는 달 착륙 임무를 위한 달 과학 워크숍에서 제시한 주요한 14곳의 착륙지역을 보여주고 있다. 달 앞면의 바다 지역과 적도 부근의 저위도 지역에 다수의 착륙 후보지역을 제안하고 있으며, 달 과학 임무뿐만 아니라 달 남극 지역도 기술적 발전과 유인 탐사 임무를 위해 향후 착륙 임무에 중요한 지역으로 고려되고 있음을 알 수 있다.

우리나라의 경우, 아직 달 착륙 임무 및 착륙지역에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있지는 않지만, 시험용 달 궤도선에 탑재된 관측카메라인 LUTI의 촬영 계획에 향후 착륙 후보지역으로 예상되는 지점을 촬영하는 임무도 계획되어 있는 만큼 이러한 자료를 활용하여 국제협력으로 착륙지역에 대해 연구한다면 향후 우리의 달 착륙 지역 연구에도 많은 도움이 되리라 본다. 우리나라는 달 착륙 임무 및 착륙지역 선정시 고려해야 할 사항은 많이 있겠지만 과학 기술적 사항뿐만 아니라, 기본적으로 지속적 탐사 연구를 위해 우리나라의 '우주개발진흥 기본계획' 상에 반영 또는 반영해야 할 임무(계획 상의 과학연구, 자원탐사, 기술개발 및 향후 우주기지 건설 등)를 고려할 것인가?, 시험용 달 궤도선의 과학적 임무(탑재체로는 PolCam, KGRS, KMAG, LUTI, ShadowCam 등이 탑재됨) 지속을 고려할 것인가?, 과학, 기술검증 및 향후 활용 측면의 임무보다는 기술적 제한사항을 우선시하여 도전적보다는 안정적 착륙지를 고려할 것인가? 등의 정책적 사항도 고려될 수 있을 것이다. 또한 임무 고려사항으로 달 착륙 임무의 큰 범주인 달 과학 연구, 달 탐사 기술검증, 달 자원 개발 연구, 달 유인탐사 준비 연구 등의 임무 중 어느 임무에 우선순위를 둔 것인가도 반드시 고려해야 할 것이다.

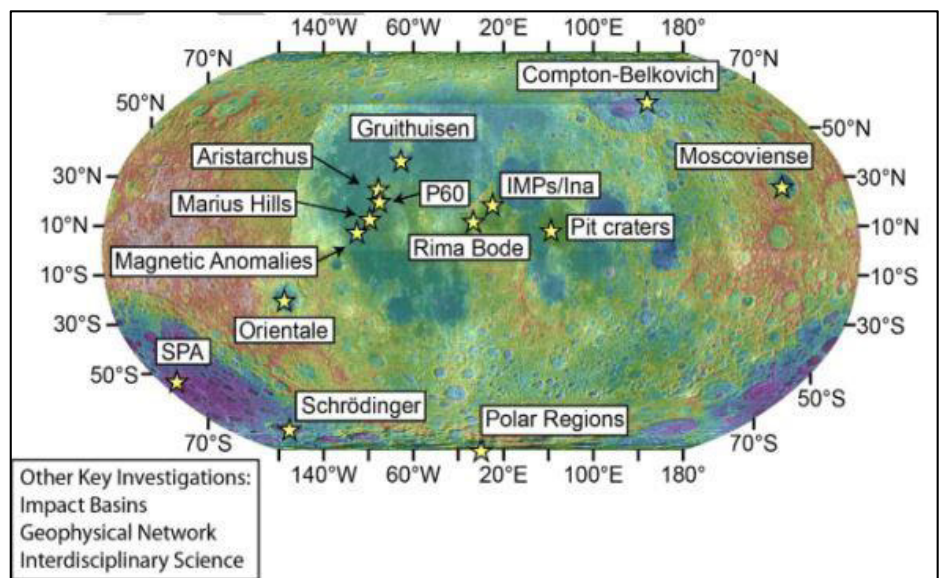


Fig. 1. Yellow stars indicate the high-priority landing sites outlined in the workshop report [7].

2018년 NASA 달 착륙지 과학임무 워크숍에서는 달 과학을 위한 착륙 임무에 대해 여러 과학적 측면을 고려하여 가능성 있는 지역을 제시하였으며, 아래에 제시한 지역의 주요 특징에 대하여 정리하였다. 일부 지역은 우리나라 연구자들이 관심을 갖고 있는 지역과도 중복되는 경우가 있어서 관심을 갖고 분석해 볼 필요성이 있다. Erica R. Jawin 등이 NASA 워크숍 보고서에서 제시한 14곳은 (1) 아리스타쿠스 충돌구(Aristarchus, 50°W, 25°N), (2) 콤프턴-벨코비치 화산 퇴적물 지역(Compton-Belkovich Volcanic Deposit, 99.5°E, 61.1°N), (3) 그루이트휘젠 돔(Gruithuisen domes, 40.5°W, 36.6°N), (4) IMPs 지역(Irregular mare patches, 5.3°E, 18.66°N, Ina), (5) 자기장 이상 지역(Magnetic anomalies, e.g., 59°W, 7.5°N, 레이너 감마/Reiner Gamma), (6) 마리우스 힐스(Marius Hills, 53°W, 13°N), (7) 모스크바의 바다(Mare Moscoviense, 147°E, 26°N), (8) 동방의 바다(Mare Orientale, 95°W, 20°S), (9) P60 현무암 지대(P60 basaltic unit, 49°W, 20°N), (10) 원형 구덩이(pit craters, e.g., 33.22°E, 8.336°N, 고요의 바다/Mare Tranquillitatis), (11) 극 지역(polar regions, e.g., 0.0°E, 89.9°S, 새클턴 충돌구/Shackleton crater), (12) 리마 보데(Rima Bode, 3.5°W, 12°N), (13) 슈뢰딩거 충돌구(Schrödinger, 135°W, 75°S), (14) SPA(South Pole Aitken) 분지(SPA basin, 170°W, 53°S) 등이다[7].

이러한 주요 지역에 대해서 임무별(과학, 기술, 활용, 유인 등)로 어떤 임무가 가능한지 분석해 보고, 임무 목적에 따라 대표적인 주요 지역에 대해서는 NASA의 MoonTrek을 이용하여 세부적인 환경을 조사해 보았다. 달 지형에 대한 구체적인 설명보다는 임무의 여러 유형 중에서 어떠한 목적으로 탐사 주제를 정할 것인지에 대해서 분석하였다.

2.1 아리스타쿠스 충돌구(Aristarchus Crater, 50°W/25°N, 달 앞면/바다 지역, 과학 임무)

달 앞면 폭풍의 대양(Oceanus Procellarum) 지역의 아리스타쿠스 고원 고지대에 있으며, 화산 쇄설물이 축적되어 있어 화산과 충돌구에 대하여 동시 연구가 가능한 것으로 알려졌다. 또한 이러한 화산 쇄설물에는 많은 휘발성 물질이 포함되어 있을 수 있다[7]. 비교적 젊은 아리스타쿠스 충돌구와 고원지대는 지질학적으로 달에서 가장 복잡한 지형 중의 하나로 보며, 달 탐사 임무 중에서 달 과학(지질) 연구 측면에서 탐사지역으로써 의미가 있다고 판단된다. 또한 이 지역은 아폴로 18호의 유인 임무(실제 진행 안됨)와 향후 아르테미스(Artemis) 계획의 착륙 후보지역으로 거론되었다[8]. Fig. 2에서는 아리스타쿠스 충돌구의 LROC(Lunar Reconnaissance Orbiter Camera) 탑재체 관측 이미지를 보여주고 있다. Fig. 3에서는 NASA의 MoonTrek을 이용하여 기본적인 경사도와 태양각 등을 분석하였다. 아리스타쿠스 충돌구의 왼쪽 상단 11시 방향으로 경사도가 양호한 지역이 확인되며, 태양각도 달의 낮 시간 동안 양호한 것으로 보여 향후 자세한 주변지역 분석을 통해 기술적으로 착륙에 안전한 착륙 후보 지역으로 적합한지를 검토할 필요성이 있다고 판단된다. Fig. 4에서는 아리스타쿠스 충돌구 주변(Fig. 3의 왼쪽 상단 노란색 박스 부분)의 3차원 지형을 출력한 화면으로 중간 지점까지 약 10 km 정도는 양호한 지형 기울기를 확인할 수 있다.

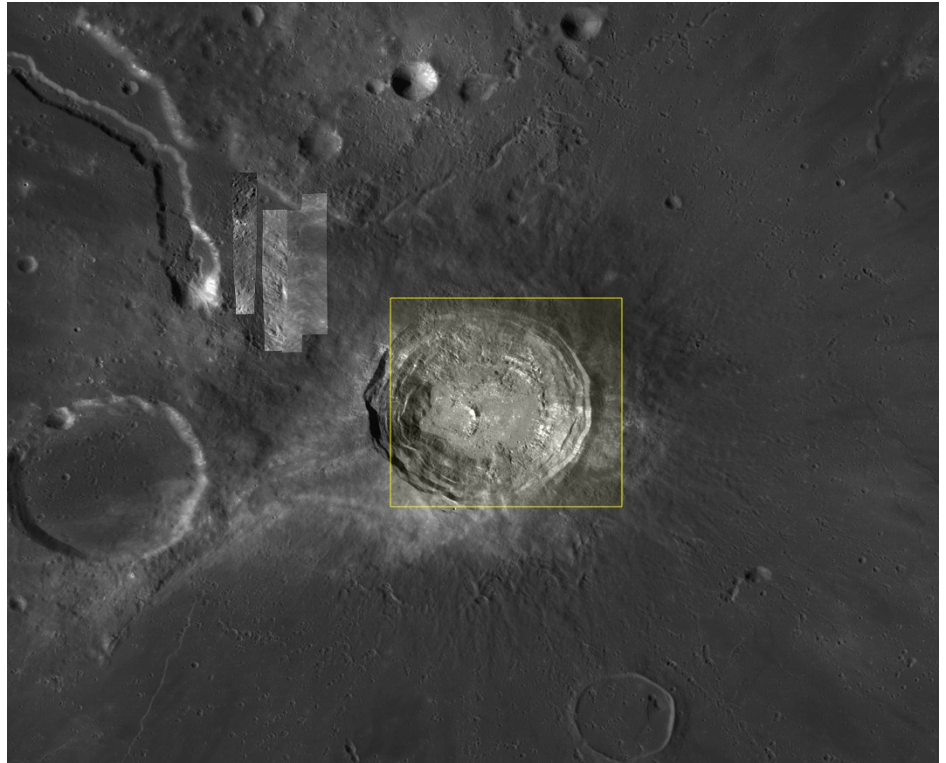


Fig. 2. Aristarchus crater search result using NASA MoonTrek website. LRO NAC and Chang'e 2 CCD Merge, Ortho Mosaic [6].

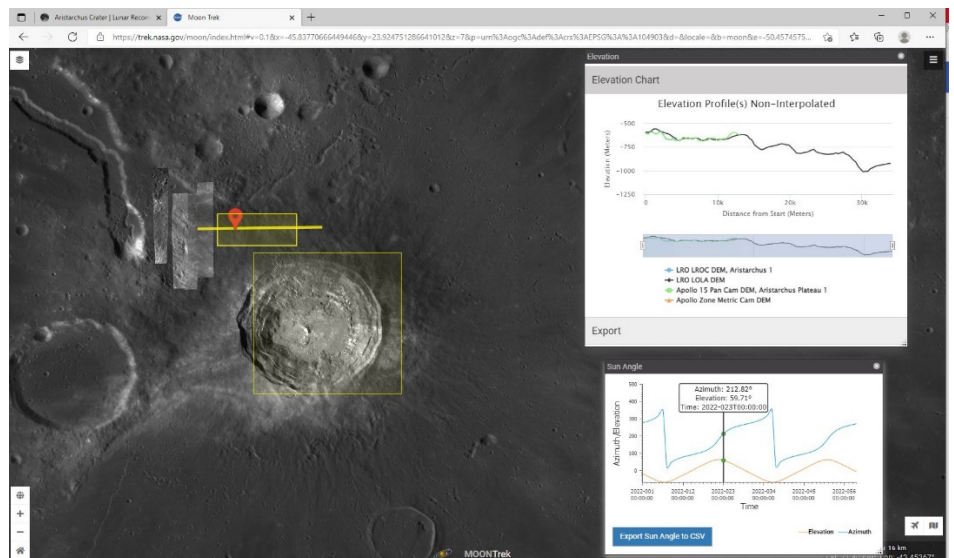


Fig. 3. Elevation profile and Sun angle at near site of Aristarchus crater.

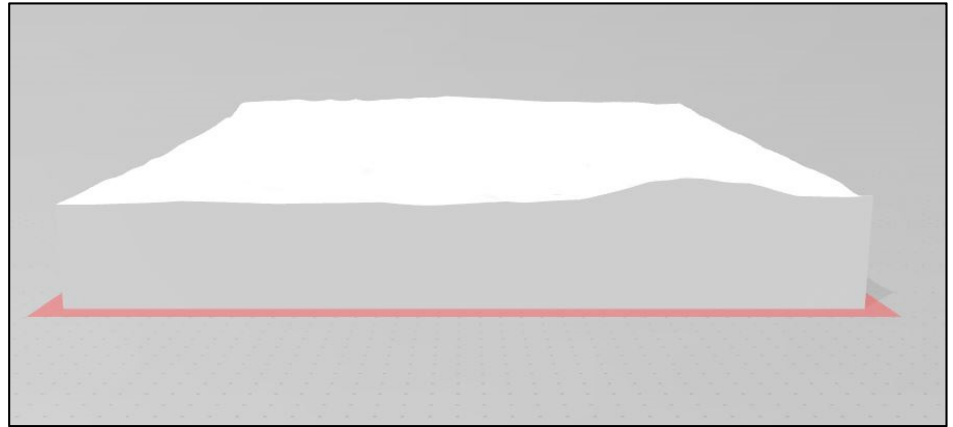


Fig. 4. Generated 3D print file of surrounding areas at Aristarchus crater.

2.2 자기장 이상 및 스월 지역(Magnetic Anomalies and Swirls, 59°W/7.5°N, 레이너 감마(Reiner Gamma), 달 앞면, 과학 연구)

달에서 지역적으로 자기장을 띠며, 알베도(Albedo)가 높아 밝게 보이는 대표적인 루나 스월 지역으로 8곳 정도가 있는데, 레이너 감마 지역(Fig. 5)은 그 중의 한 곳으로 자기장도 강하게 측정되고 있다[7]. 달에 스월이 발생한 가설로는 태양풍의 부분적 차폐 현상, 혜성 충돌, 부서진 혜성의 충돌, 하전 입자 먼지의 이동[7,9] 등이 있으며, 최근 달 과학 주요 연구 주제 중의 하나인 스월 연구에 적합하다고 본다. 또한 달 형성 이후 점차적으로 소멸하고 있는 달 주변 미세한 자기장 세기를 측정해 세계적 수준의 고정밀 3차원 자기장 지도를 작성하는 것이 임무인 KPLO 달 자기장 측정 탐재체의 관측 대상 지역이기도 하다. 달 표면의 자기 이상 지역 연구 등을 통해 달 생성과 진화과정, 태양과 상호작용 관계 규명에 필요한 자료를 확보할 달 과학 연구 측면에서 탐사지역으로써 의미가 있다고 본다.

Fig. 6에서는 NASA의 MoonTrek을 이용하여 레이너 감마 지역의 기본적인 경사도를 조사

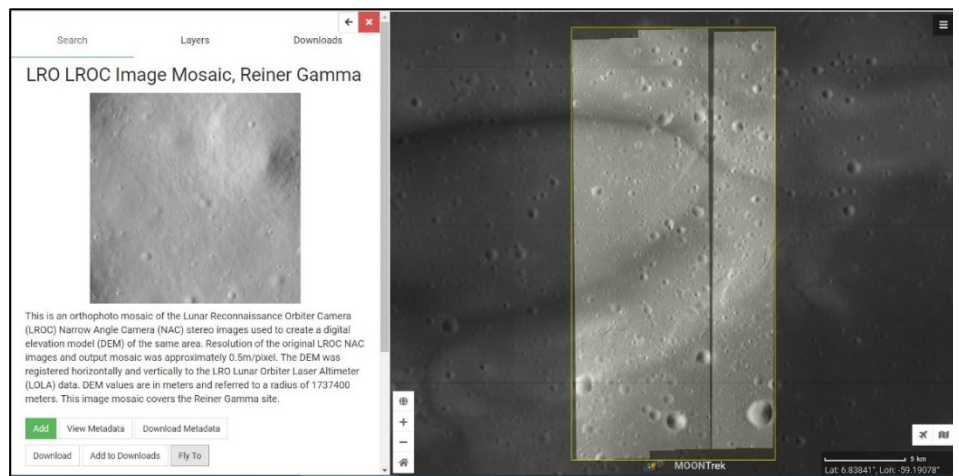


Fig. 5. Reiner Gamma Lunar Swirl search using MoonTrek.

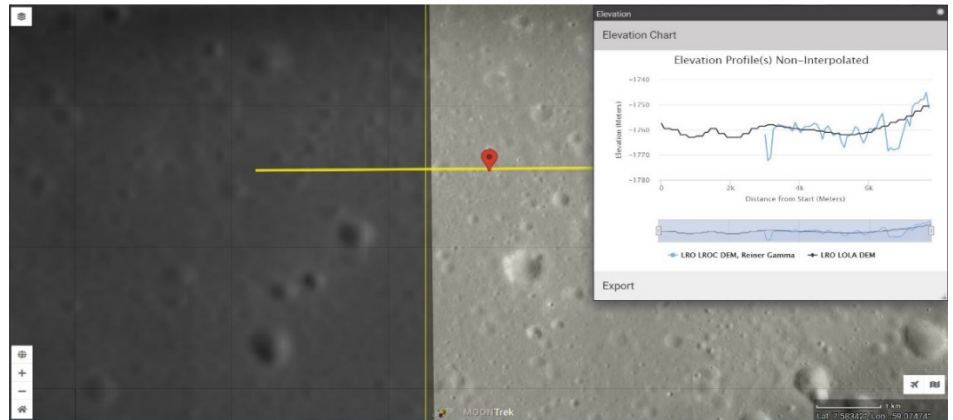


Fig. 6. Elevation profile at near site of Reiner Gamma lunar swirls.

하였다. 레이너 감마 주변 지역의 경사도는 안전한 착륙에 필요한 경사도를 갖는 지역이 다수 확인되는 것으로 보여 향후 자세한 주변지역 분석을 통해 적합한 착륙 후보지역을 검토할 필요성이 있다고 판단된다. Fig. 7에서는 레이너 감마 주변의 3차원 지형을 출력한 화면으로 거시적으로 양호한 지형 기울기를 확인할 수 있다.

2.3 마리우스 힐스(Marius Hills, 53°W/13°N, 달 앞면의 바다 지역, 유인 탐사 연구)

달의 화산 지대에 속하며, 용암 동굴이 발견된 지역으로 원형 구덩이(Pit Crater)와 용암 동굴(Lava Tubes)이 연계되어 있는 경우가 많이 있다. 일본 달 궤도선인 셀레네(Selene)의 레이더 관측 자료를 이용하여 지하 동굴의 터널을 확인(최소 폭 1 km, 길이 50 km)하기도 하였다 [7]. 향후 유인 달 탐사시 달에 떨어지는 운석 등으로부터 인간을 보호하는 거주시설인 월면 기지를 건설할 수 있는 후보지역 중의 한 곳으로 판단된다.

Fig. 8에서는 NASA의 LRO에서 LROC를 이용해 촬영한 지역의 영상을 MoonTrek을 이용하여 검색한 이미지이다. 마리우스 힐 지역의 경사도를 조사한 이미지(Fig. 9)와 3차원 지형을 출력한 이미지(Fig. 10)를 통해 대략적으로 착륙선의 착륙이 가능 정도의 경사도를 갖는 지형이 있음을 확인하였다. 향후 주변지역에 대한 보다 정밀한 분석을 통해 기술적으로 착륙에 안전한 착륙 후보지역인지를 검토할 필요성이 있다고 판단된다.



Fig. 7. Generated 3D print file of surrounding areas at Reiner Gamma lunar swirls.

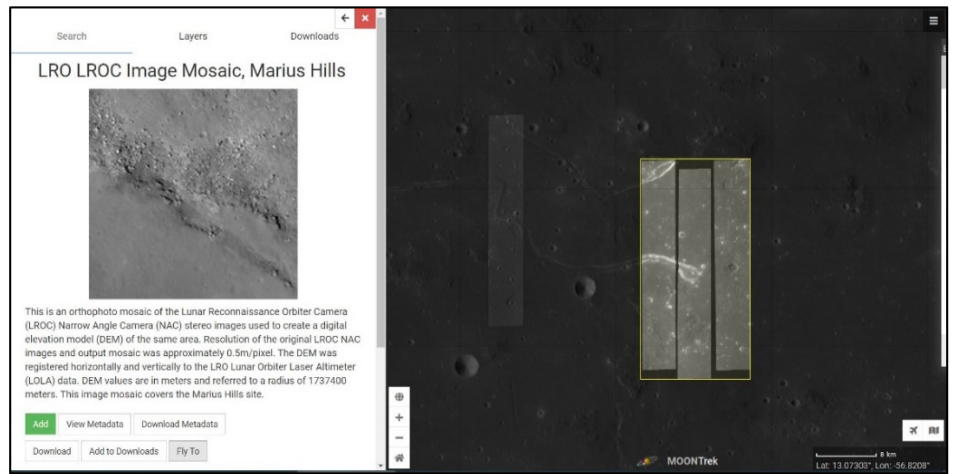


Fig. 8. Marius Hills search using MoonTrek.

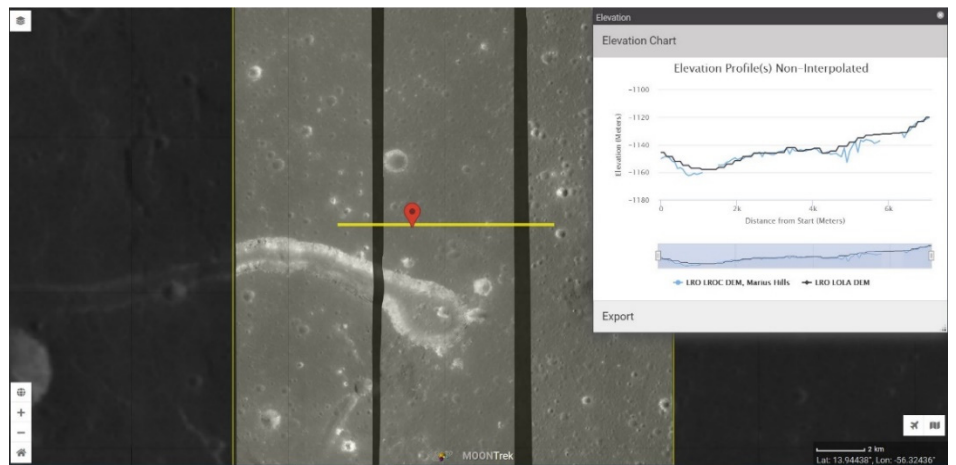


Fig. 9. Elevation profile at near site of Marius Hills.

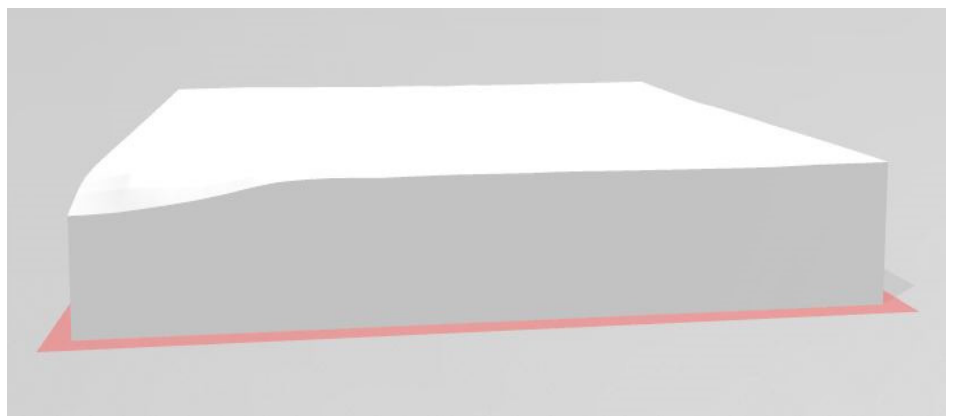


Fig. 10. Generated 3D print file of surrounding areas at Marius Hills

2.4 모스크바의 바다(Mare Moscoviense, 147°E/26°N, 달 뒷면, 자원 활용 연구)

모스크바의 바다는 달 뒷면에 위치하며 지역은 표면이 평평하며 높은 함량의 이산화티타늄이 존재하는 것으로 알려졌으며, 화산 쇄설암과 루나 스윌이 나타나는 지역으로 측정되는 자기장은 약한 편(4 nT)이지만 헬륨-3가 풍부한 것으로 분석되고 있다[7]. 또한 모스크바의 바다는 국내 달 과학 연구자인 Kim et al.은 헬륨-3가 풍부한 달 착륙 가능한 지역이라는 논문을 발표하기도 했다[10]. 따라서 이들 연구진은 시험용 달 궤도선(KPLO)에 탑재될 고해상도 카메라(LUTI)의 임무 기간 중에 이 지역에 대한 영상 촬영을 제안하기도 하였다. 따라서 달 과학 및 자원탐사 연구 측면의 탐사임무 지역으로써 의미가 있다고 볼 수 있다. Fig. 11에서는 NASA의 MoonTrek을 이용하여 LROC로 촬영한 모스크바의 바다 지역의 검색 영상을 보여준다. 이 지역의 경사도를 조사하면 Fig. 12에서와 같이 일부 지역에서는 경사도가 착륙에 적합하지 않은 지역도 볼 수 있다. 그렇지만 Fig. 13에서와 같이 3차원 지형을 출력해 보면 전체적으로는 경사도가 완만한 지역이 많아 착륙선의 착륙에 적합한 지역을 찾을 수 있다. 주변 지역에 대한 보다 정밀한 분석을 통해 기술적으로 착륙에 안전한 착륙 후보지역과 위험한 지역을 분석할 필요성이 있을 것이다.

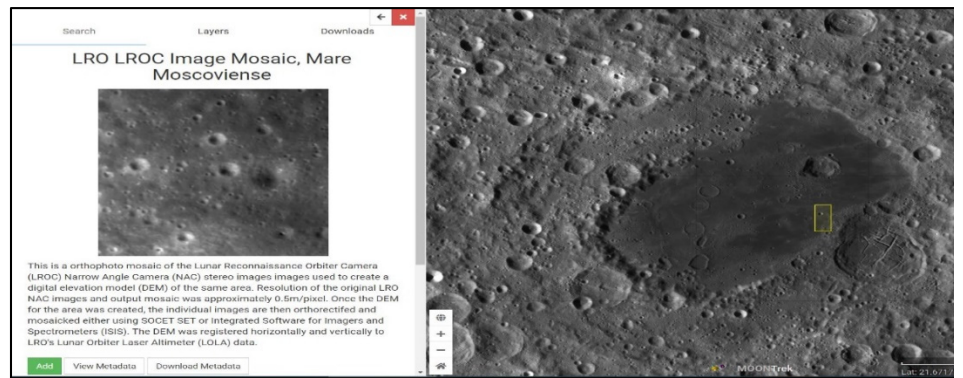


Fig. 11. Mare Moscoviense search using MoonTrek.

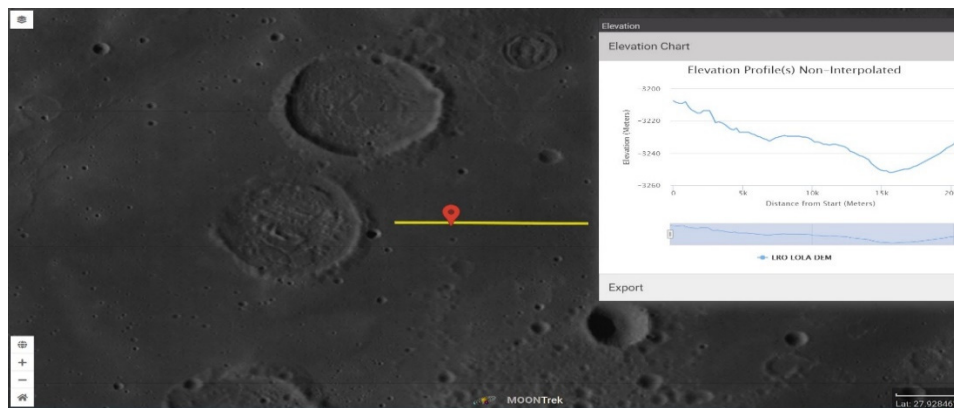


Fig. 12. Elevation profile at near site of Mare Moscoviense.

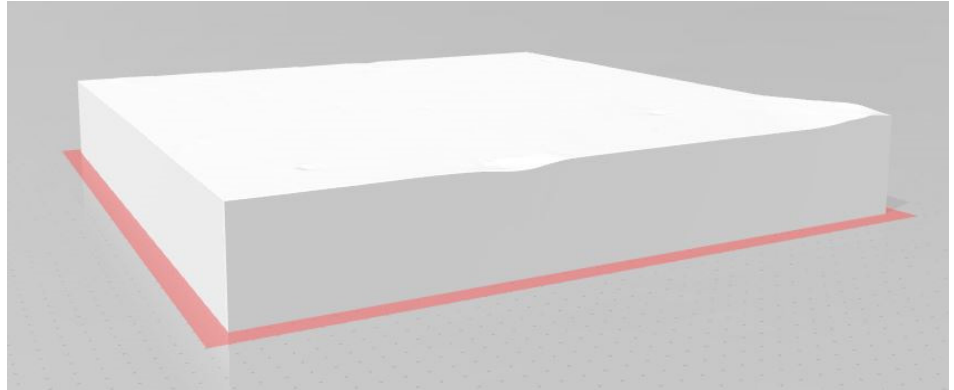


Fig. 13. Generated 3D print file of surrounding areas at Mare Moscoviense.

2.5 원형 구덩이/용암동굴(Pit Crater/Lava Tubes, 고요의 바다(Mare Tranquillitatis), 33.22°E/ 8.336°N, 달 앞면, 유인 탐사연구)

달에 존재하는 원형 구덩이는 일반적으로 화산체의 중심부가 수직으로 침강한 함몰 구조를 보이며, 달 표면에 존재하는 수직 구덩이 형태의 용암 동굴로 구덩이는 용암 동굴 위의 표면이 붕괴되면서 형성된 것으로 추정되고 있다. 관측된 구덩이들의 지름은 5~900 m로 다양하며, 지하로 가면서 넓어지는 형태를 보인다[7,11]. NASA LRO 탐사선에 의해 2009년부터 달 표면에서 약 200개 이상을 발견했다. 대표적으로 고요의 바다 지역을 비롯하여 라쿠스 모티스(Lacus Mortis), 마리우스 힐(Marius Hills), 지혜의 바다(Mare Ingenii) 등에 있다. 향후 유인 우주탐사 시에 거주 공간으로 활용 가능하다고 볼 수 있는 지형이다. Fig. 14는 달의 앞면 고요의 바다 지역을 검색한 결과를 보여주고 있으며, Fig. 15는 NASA의 MoonTrek을 이용하여 본 주변지역의 경사도를 볼 수 있다. Fig. 16에서는 고요의 바다 주변 지역에 대한 3차원 지형을 출력한 화면으로 약 30 km 정도는 양호한 지형 기울기를 확인할 수 있다.

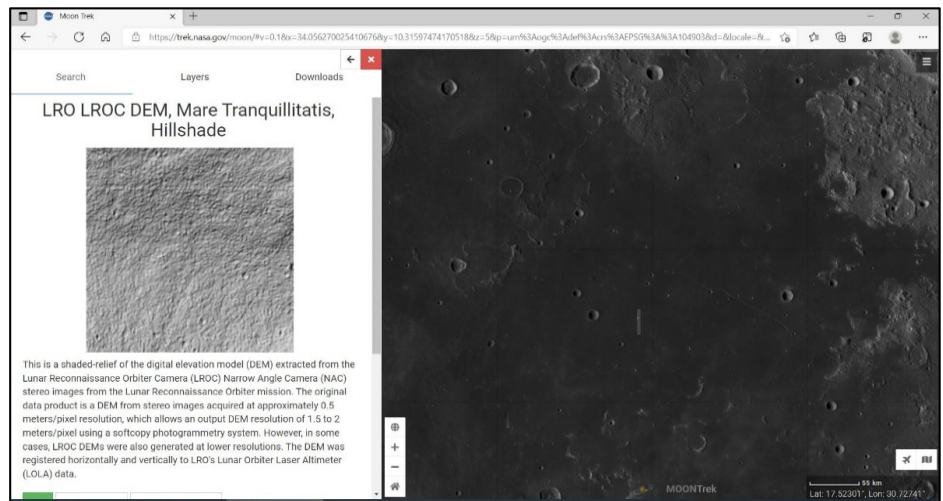


Fig. 14. Mare Tranquillitatis regions search using MoonTrek.

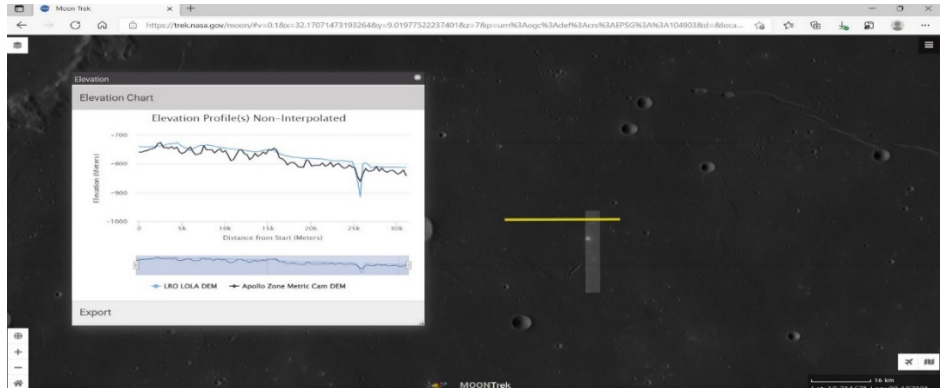


Fig. 15. Elevation profile at near site of Mare Tranquillitatis.

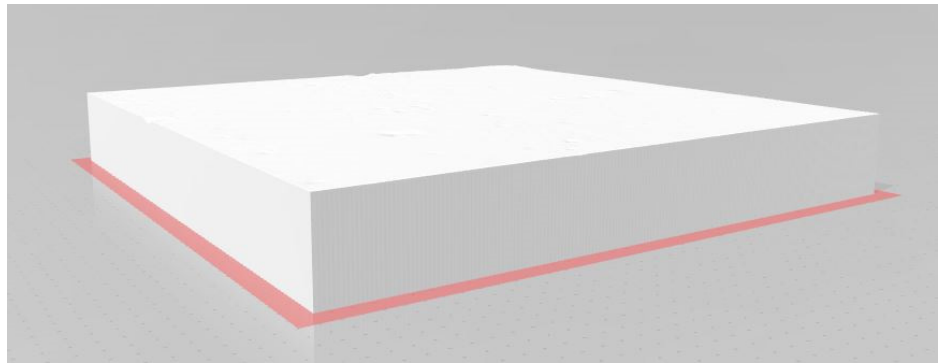


Fig. 16. Generated 3D print file of surrounding areas at Mare Tranquillitatis.

2.6 새클턴 충돌구/극 지역(Shackleton Crater/Polar Regions, 0.0°E/89.9°S, 달 남극 지역, 유인 탐사 임무)

가로 7 km, 세로 2 km 정도 크기로 주변보다 지대가 높으며, 햇빛이 비치는 기간이 한 달에 50%~70%로 많다. 1998년 Lunar Prospector 탐사선은 이곳에서 물의 존재 증거를 발견하기도 했다. 즉, 태양광이 도달하지 않는 지역에 수십억 년 이상 얼음이 안정된 상태로 있을 가능성이 있다고 밝혔다[7]. 또한 2008년 찬드라얀 관측결과로 얼음 형태의 물 존재를 확인하기도 하였다. 달 남극 지역은 2024년 미국의 유인 달 착륙(아르테미스 계획)시 착륙지역 중의 한 곳으로 고려되는 지역으로 영구 음영지대가 존재하며, 새클턴 크레이터 표면에 얼음이 존재하는 것으로 추측되고 있다. 또한 충돌구 주변의 하워스(Haworth), 슈메이커(Shoemaker) 충돌구에도 물 존재가 예측된다[7,12].

향후 달 기지를 건설할 후보지역으로 유력한 지역으로 일조량이 많아 태양광 발전에 유리하고 지구와 통신에도 좋은 조건을 갖추고 있으며, 인간에게 필수적으로 필요한 물을 얻을 수 있는 곳으로 판단되고 있다.

Fig. 17에서는 NASA의 MoonTrek을 이용하여 달의 남극 지역과 대표적인 충돌구인 새클턴 충돌구 지역을 검색한 결과를 보여주고 있으며 Fig. 18은 MoonTrek을 이용하여 본 주변 지역의 경사도를 볼 수 있으며, 약 5 km 정도의 거리에 대하여 완만한 경사도를 갖는 착륙지로서의 가능성을 볼 수 있다. Fig. 19에서는 새클턴 충돌구 주변 지역에 대한 3차원 지형을 출력한 화면으로 좁지만 착륙 가능성이 있는 지형을 확인할 수 있다.

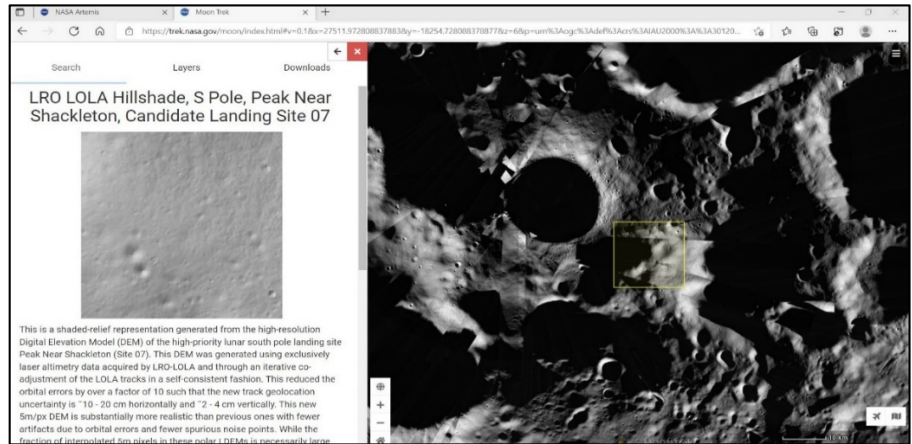


Fig. 17. Shackleton crater and surrounding areas (South-pole) search using MoonTrek.

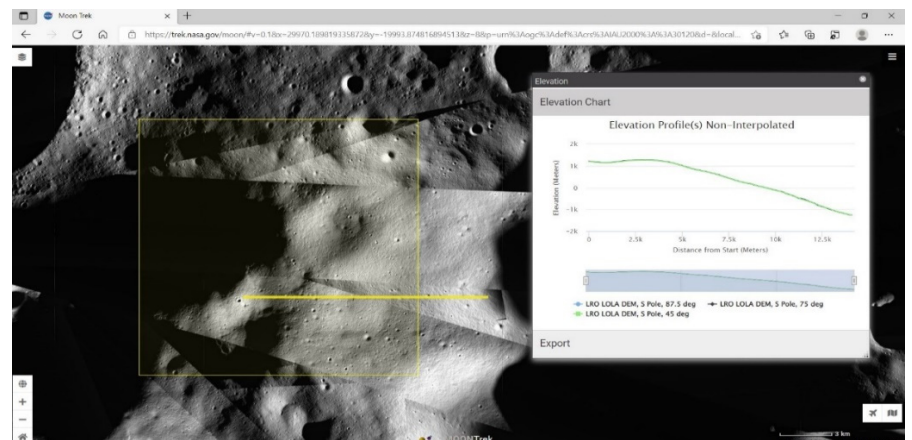


Fig. 18. Elevation profile at near site of Shackleton crater.

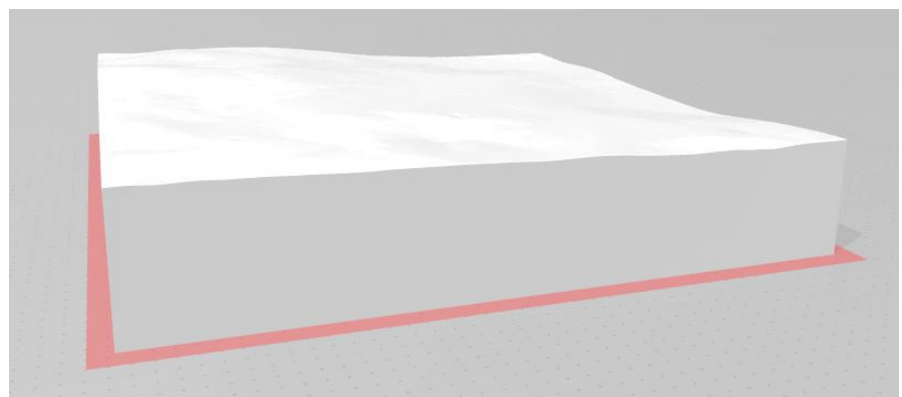


Fig. 19. Generated 3D print file of surrounding areas at Shackleton crater.

2.7 SPA 분지(SPA Basin, 170.0°W, 53.0°S, 달 남극 지역, 과학/유인 탐사 연구)

달의 뒷면에 있는 직경이 2,500 km 달하는 달에서 가장 오래되고, 깊고, 넓은 충돌 분지로 달의 진화 역사 초기에 대형 천체와 충돌한 흔적으로 당시 충돌 여파로 달의 지각 50 km 아래 맨틀 층까지 녹아 내린 것으로 추측되고 있다[7]. 중국 창어 4호의 착륙 지역으로 SPA 분

지 내의 폰카르만(Von Karman) 충돌구(177.589E, 45.457S) 지역이 이용되었다. 달 과학 연구와 달기지 건설 측면에서 탐사지역으로써 의미가 있다고 판단된다.

Fig. 20에서는 NASA의 MoonTrek을 이용하여 달의 SPA 분지 지역을 검색한 결과로 다양한 형태의 충돌구들이 존재하고 있음을 볼 수 있다. Fig. 21은 MoonTrek을 이용하여 SPA 중심 지역의 경사도를 볼 수 있으며, 충돌구 내부 및 주변에 약 5 km 정도의 거리에 대하여 완만한 경사도를 갖는 착륙지로서의 가능성 지역을 볼 수 있다. Fig. 22에서는 SPA 주변 지역에 대한 3차원 지형을 출력한 화면으로 착륙 가능성이 있는 지형을 확인할 수 있다.

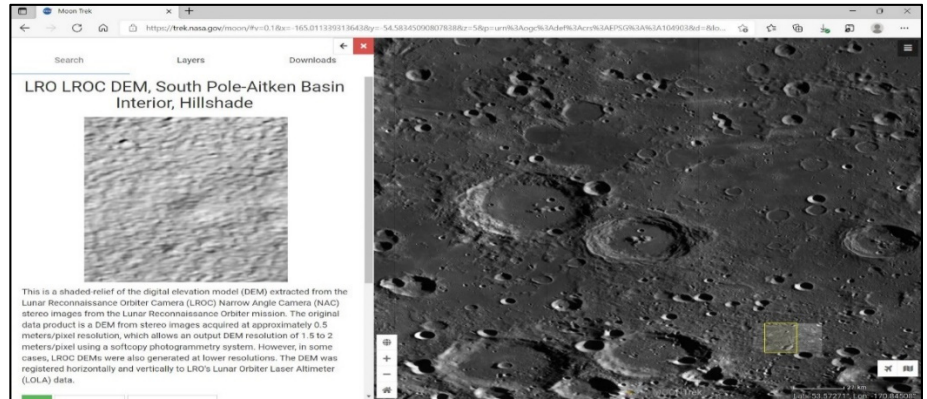


Fig. 20. SPA basin and surrounding areas search using MoonTrek. SPA, South Pole Aitken.

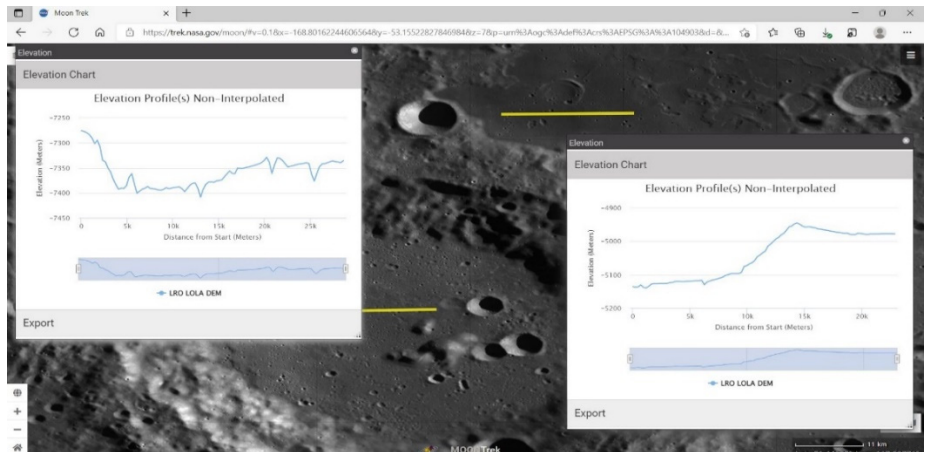


Fig. 21. Elevation profile at center site of SPA basin. SPA, South Pole Aitken.

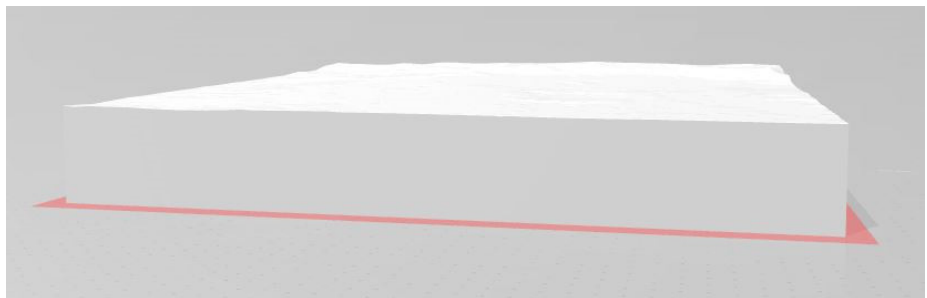


Fig. 22. Generated 3D print file of surrounding areas at SPA basin. SPA, South Pole Aitken.

3. 해외의 달 착륙 지역 조사 분석

3.1 중국 창어(Chang'e) 4호 및 5호

중국의 창어 4호는 달 뒷면 남극 에이트켄(SPA) 분지의 '폰 카르만(Von Karman) 충돌구(177.589E, 45.457S)' 지역에 2019년 1월 성공적으로 착륙하였다[Fig. 23(a)]. 착륙선에 실린 로버인 위투(Yutu) 2호의 가시광 및 근적외선 영상 분광계(VNIS) 탑재체가 관측한 영상을 분석한 결과, 달 표면에서 달 지각과 핵 사이의 맨틀 구성 물질의 성분인 감람석, 휘석 등을 발견하였다[13,14].

창어 5호는 달 앞면 폭풍의 대양(Oceanus Procellarum) 지역 내의 MONS RÜMKER[Fig. 23(b)] 부근 예정 착륙지(51.916°W, 43.057°N)에 2020년 12월 성공적으로 착륙하였다. 이후 12월 16일 달 표면 토양/암석 샘플 약 2 kg을 싣고 네이멍구 자치구 초원지대인 쓰쩌왕 지역에 착륙 귀환하였다[15,16].

중국의 경우, 창어 4호 착륙선의 착륙지로 달 뒷면의 SPA 분지를 선택함으로써 세계 어느 국가보다도 먼저 달 뒷면 탐사의 선점과 유인 달 기지 건설과 관련한 도전을 시작하였다고 본다. 또한 창어 5호 달 샘플 귀환선의 착륙지로 사용된 곳은 지금까지 대다수의 착륙선과 미국의 아폴로 탐사에 이용한 달의 앞면이지만, 달의 화산활동에 대한 연구가 가능한 샘플을 채취하여 귀환함으로써 달 과학 연구와 샘플 채취/귀환 기술을 확인하였다고 볼 수 있다. 이를 분석하면 중국은 달 탐사 임무에서 달 뒷면 탐사와 샘플 귀환을 수행함으로써 기술력과 과학 연구, 유인탐사 지역 확인/준비 등의 다양한 임무를 수행하였다고 판단된다.

중국의 착륙 지역을 Fig. 24(a), (b)처럼 MoonTrek를 통해 살펴보면, 창어 4호의 경우, 달 뒷면에 대한 첫 착륙지역임을 감안하여 SPA 분지의 안정적 지역을 고려하고, 지구와 통신은 달 궤도선에 의한 중계를 선택하였다. 창어 5호는 샘플 채취 귀환 임무를 고려하여 달 앞면의 안정적 지역을 고려하였으며, 두 곳 모두 2 km 정도 완만한 경사도 지역이 존재함을 볼 수 있다.

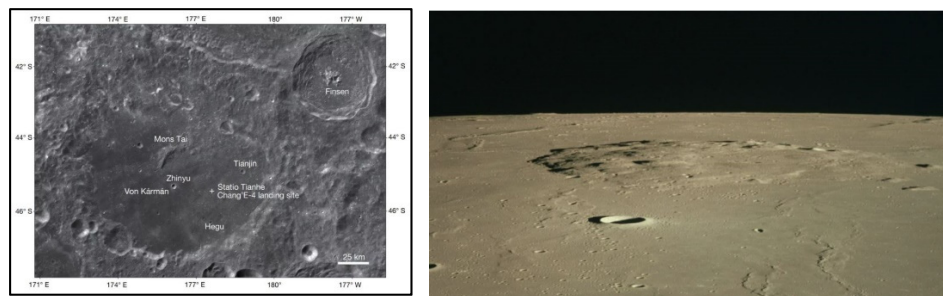


Fig. 23. Chang'e 4 & 5 landing sites. (a) The Chang'e-4 landing site and Finsen on a 7-meter-resolution Chang'e-2 digital orthophoto map [14], (b) Chang'e 5 landing site, MONS RÜMKER. This image of Mons Rümker on the Moon was captured by Apollo 15 astronauts in 1971. Located in Oceanus Procellarum—the Ocean of Storms—Mons Rümker is a raised region formed by volcanic activity late in the Moon's history [16].

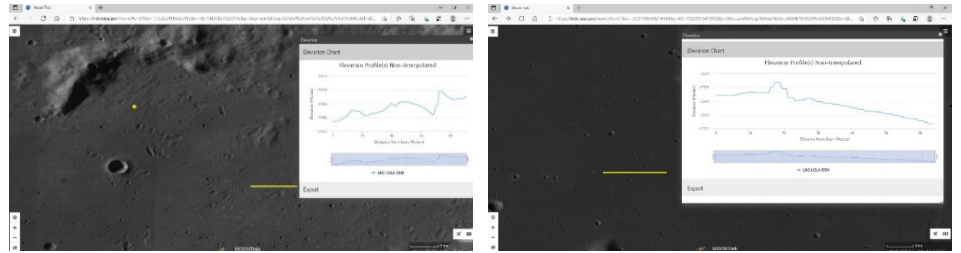


Fig. 24. Elevation profile of Chang'e 4 & 5 landing sites. (a) Chang'e 4 landing site (b) Chang'e 5 landing site using MoonTrek.

3.2 인도 찬드라얀(Chandrayann) 2호

인도의 찬드라얀 2호는 궤도선, 착륙선, 로버로 구성되어 있으며, 착륙선은 2019년 7월 9-16일 발사 및 9월 6일 달 남극 표면에 착륙시킬 계획이었다. 찬드라얀 2호는 2007년에 개발을 시작해 당초 계획은 2018년에 발사할 계획이었으나, 2019년 1월 → 4월말 → 7월로 계속 발사가 연기되었다[17]. 그리고 수차례의 발사 연기 끝에 2019년 7월 22일 발사하여 9월 6일 달 표면에 착륙을 시도하던 중 착륙까지 약 2.1 km를 남기고 통신 두절이 발생하여 달 표면에 충돌하였다.

Fig. 25에서와 같이 찬드라얀의 착륙선인 비크람(Vikram)과 로버 프라그얀(Pragyan)의 주 착륙지(prime landing site, PLS54)는 70.90267°S, 22.78110°E이었으며, 예비 착륙지(alternate landing site, ALS01)는 67.874064°S, 18.46947°W이었다. 임무는 남위 70° 부근



Fig. 25. Chandrayaan-2 candidate landing sites. This wide-angle Moon view shows the prime (right blue dot) and alternate (left blue dot) Chandrayaan-2 landing sites [18].

에 착륙, 달의 낮 기간 동안 물의 흔적, 헬륨-3 등을 탐사하는 것이었다. 그러나 착륙선은 착륙에 성공하지 못하고 아쉽게도 맨지누스(Manzinus)와 심펠리우스(Simpelius) 충돌구 사이로 추락하여 충돌하였다[17].

인도의 착륙 지역은 주 착륙지와 예비 착륙지를 두어 원하는 지역 부근에 착륙할 수 있도록 준비하였으며, Fig. 26과 같이 주 착륙지에 대해 MoonTrek를 통해 살펴보면 비록 착륙에는 성공하지 못했지만 안전한 착륙(약 7 km 정도의 완만한 경사도 지역)과 달 낮 기간의 임무를 충실하게 수행할 수 있도록 준비하였다는 것을 착륙지형을 통해 확인할 수 있다.

3.3 이스라엘 베레시트(Beresheet)

이스라엘의 항공우주기업과 비영리단체인 스페이스일(SpaceIL)이 개발한 베레시트는 2019년 2월 22일 발사되었다. 그리고 4월 11일 달의 앞면 평온의 바다(Mare Serenitatis_31.9°N, 18.3°E) 지역에 착륙(Fig. 27)을 시도하였으나, 주 엔진 고장으로 추락하였다[19].

이스라엘의 착륙 지역을 보면 착륙의 성공확률을 높이기 위하여 비교적 평탄한 지역이 많은 달 앞면의 바다 지역을 선택하였으며, Fig. 28과 같이 MoonTrek를 통해 살펴보면 약 3 km 정도의 완만한 경사도를 갖는 착륙 안전성에 무난한 지형임을 알 수 있다.

4. 아르테미스(Artemis) 계획 및 달 남극 지역의 중요성

1960년대 NASA의 아폴로 계획 이후, 달 유인 탐사 재개를 목적으로 하는 아르테미스 계획에서 NASA는 2024년 우주인 2명을 달의 남극 지역에 착륙시키는 것을 목표로 하는 추진 방안을 발표(NASA's Lunar Exploration Program Overview, 2020년 9월)하였다[21].

NASA의 달 탐사 계획은 Fig. 29에서와 같이 2024년 인간 달 착륙 및 2025년 이후의 지속 가능한 달 탐사(화성 유인탐사로의 연계) 등 두 가지 목표에 초점을 두고 있으며, 아르테미스

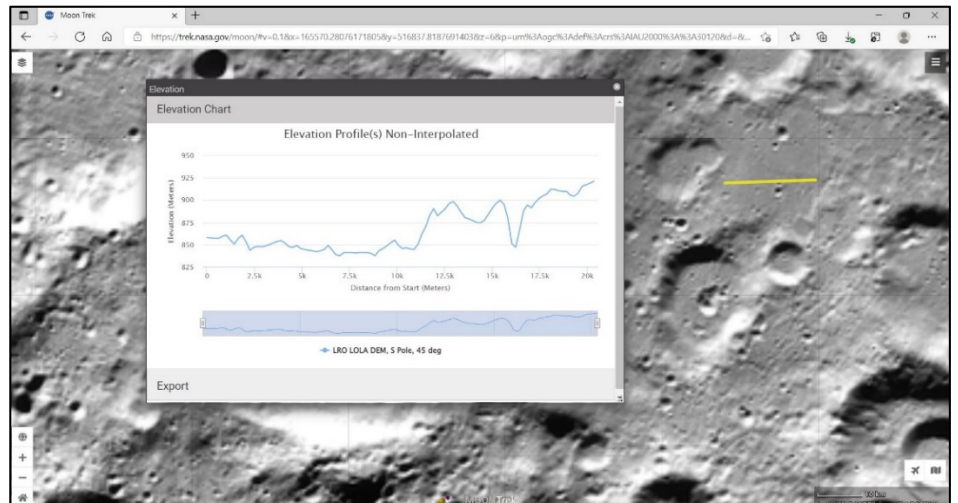


Fig. 26. Elevation profile of Chandrayaan-2 primary landing site using MoonTrek.



Fig. 27. Beresheet landing site. Beresheet attempted to land in Mare Serenitatis, the "Sea of Serenity," shown as the larger circle. The approximate landing site is in the inner circle [20].

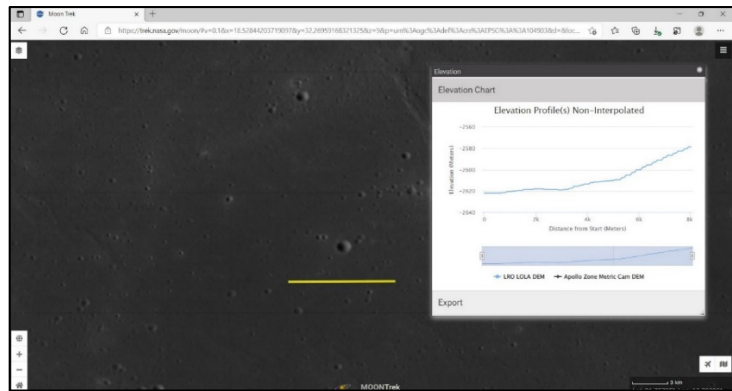


Fig. 28. Elevation profile of Beresheet landing site using MoonTrek.

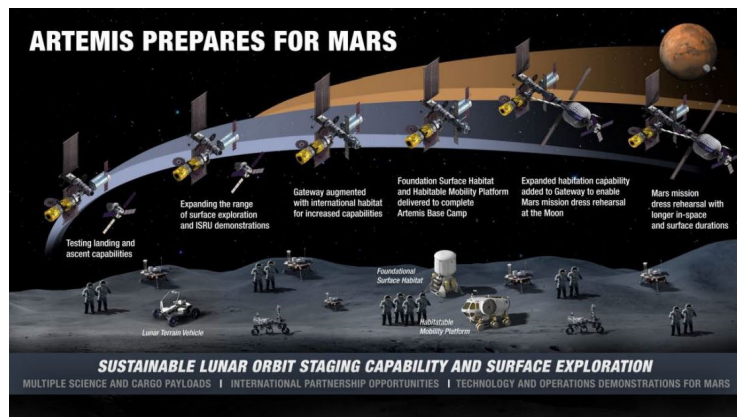


Fig. 29. Artemis program for Mars exploration [21].

계획은 2021년 비행체의 성능을 시험하는 1단계 무인 임무, 2023년 통신과 운항 시스템을 시험하는 2단계 유인 임무를 거쳐, 2024년 우주인을 달 남극 표면에 보내는 3단계 임무로 구성되어 있다. 그렇지만 최근 NASA의 여러 일정상 문제로 아르테미스 계획의 실현 시기가 2026년까지 늦춰질 것이라는 이야기도 있다.

프로그램의 각 단계가 다 중요하고 관심을 갖겠지만, 달 착륙지 연구자 입장에서는 아르테미스 계획의 최종 단계인 달 남극 착륙지 베이스 캠프(base camp) 지역에 관심과 흥미가 많이 있을 것이다. 사실 NASA의 달 탐사 착륙선을 위한 완벽한 착륙 지점을 찾는 것은 매우 까다로울 것이다. NASA는 달에 대한 아르테미스 임무를 위해 이미 남극 지역을 우주비행사의 목적지로 선택했지만, 정확한 착륙 지점은 아직 결정되지 않았다. 달의 중위도 지역에 착륙한 아폴로 임무와 달리 아르테미스 계획에서 착륙 지역은 달의 남극 근처에 위치한다.

달에서 우주인들은 일조량과 온도의 극심한 변화에 노출되므로 임무를 수행하기에 매우 어려운 환경이지만, 극 지방에는 얼음 형태의 물이라는 귀중한 자원이 있다고 예측되므로 이에 대한 실체를 확인하는 것이 핵심적인 임무가 될 수 있다. NASA가 선택한 달 남극 착륙 지역은 우주인들이 체류하는 베이스 캠프에 전력을 공급하는 데 사용할 햇빛에 대한 충분한 노출과 얼음 형태의 물이 풍부한 지역으로의 쉬운 접근성을 제공해야 할 것이다. NASA에서는 충돌 분화구의 가장자리를 따라 착륙하는 것이 가능할 수 있다고 판단하고 있으며, 이는 충돌구와 같은 내부의 영구 음영지역에 대한 접근성을 쉽게 제공할 수도 있을 것이다.

현재 NASA가 고려하고 있는 개념은 햇빛이 잘 비치는 충돌구 가장자리 또는 능선을 따라 비교적 평평한 표면에 착륙선의 안전한 착륙을 시도하는 것이다. 그러나 동시에 착륙 지점은 주요 우주인들의 활동 지역에서 조금은 멀리 떨어져 있어야 한다. 달 착륙선의 추진장치가 달 먼지와 암석, 가스와 같은 형태의 많은 물질을 밀어내 착륙 지역을 오염시킬 수 있기 때문이다. 일반적으로 이러한 상황을 예방하기 위하여 태양 전지판을 포함할 베이스 캠프 거주지역이 착륙지점과 약 800 m 정도는 떨어진 곳에 위치해야 하는 이유이다[21].

이러한 환경조건을 고려하여 다양한 착륙지 제안이 있으며, Fundacion Universidad Empresa와 같은 기관에서는 얼음 형태의 물이 있을 수 있다는 증거를 제공하는 달 남극의 여러 충돌구를 제안하기도 하였다. 달 착륙지를 연구하는 연구자들이 아르테미스 계획의 착륙지역으로 제안하는 여러 곳이 있지만 다수의 연구자들이 공통적으로 이야기하는 곳 중의 하나가 새클턴 충돌구(Shackleton crater) 지역이다.

앞서 살펴보았지만 새클턴 충돌구의 경우, NASA의 달 탐사선(LRO)이 새클턴 분화구 표면 물질의 일부분을 얼음이 차지할 수 있다는 분석 자료를 내놓았으며, Fig. 30에서와 같이 MoonTrek을 본 내부는 달 남극과 거의 일치하기 때문에 직사광선이 들어오지 않고, 이 때문에 영구 음영지역이 존재하는 지역이다. 따라서, 다양한 달 남극 지역에서 인간의 거주에 필수적인 얼음 형태의 물이 존재할 수 있는 곳이 필수적으로 아르테미스 계획의 달 착륙 지역으로 고려될 것으로 판단된다. 또한 유인 탐사 임무를 위해 장기간 태양 빛이 비치는 지역, 지구와 직접 통신이 가능한 지역, 착륙선의 안전한 착륙 등에 적합한 지역이 달 남극 쪽에 충분히 존재하며, 이러한 조건이 고려될 것이다.

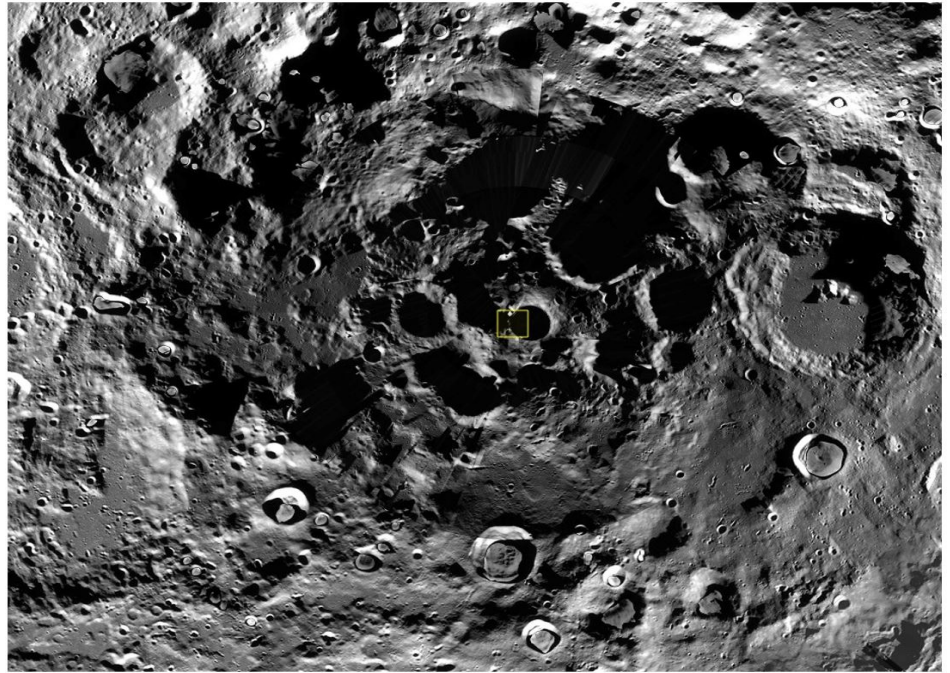


Fig. 30. Shackleton crater and its rim areas (yellow box) using MoonTrek.

5. 제안

본 논문에서는 논문에서는 미국 NASA 워크숍에서 제안된 달 착륙 주요 후보지역에 대한 자료를 바탕으로 미국 NASA의 MoonTrek 분석 도구를 이용해 14개 제안 지역중 일부 주요 관심 지역의 특성을 분석하고, 향후 어떤 달 착륙 임무에 적합한지 알아보았다. 전체적으로 모든 지역을 세부적으로 분석하지는 못했지만, 착륙지역의 지형 경사도에 초점을 두고 관심 지역에 대해서 분석하였다. 따라서 지속적으로 추가적인 분석이 계속 필요할 것으로 본다. 또한 달 착륙 임무에 참여하는 국가는 전통적인 미국, 러시아, 유럽 이외에 최근에 중국, 인도, 이스라엘 등이 참여하고 있으며, 이들 국가 중에서 달 착륙 임무를 시도하였던 달 착륙 지역에 대해서 알아보고, 착륙지로 선정된 지역에 대해서 알아보았다. 그리고 미국 NASA에서 추진 중인 아르테미스 계획에서 착륙지역으로 계획 중인 달 남극 지역의 중요성에 대해서 알아보았다.

이러한 분석에 NASA의 MoonTrek을 이용하면 대략적인 달 지형 정보를 확인할 수 있으며, 좀 더 자세한 정보는 NASA PDS(Planetary Data System)의 원본 지형 데이터나 NASA Quick map 등을 활용하여 좀 더 구체적으로 확인하는 것을 고려해야 한다.

우리나라는 아직 달 착륙 계획이 구체적으로 진행되고 있지는 않으나, 달 착륙지 선정에 많은 시간이 소요되는 점을 감안한다면 지금부터 해외의 제안지역이나 국내 연구자들이 제안하는 지역 등에 대해서 조금씩 분석해 나갈 필요성이 있다고 생각한다. 따라서 앞으로 우리나라가 계획하게 될 달 착륙 임무에 대해 과학 연구, 기술 검증, 달 환경 활용, 유인 우주탐사 준비 등의 목적에 입각하여 어느 것을 주 임무로 할 것인지 고민하고, 착륙 후보지역을 조사하고 분석할 필요성이 있다. 물론 여러 목적이 함께 고려되는 지역도 있을 수 있고, 한가지 주

요 목적에 따라 고려될 지역도 있을 것이다. 중요한 것은 탐사 연구의 지속성과 활용성을 고려하여 적합한 달 착륙 후보지역 선정을 진행할 필요가 있다고 본다.

감사의 글

본 연구는 한국항공우주연구원의 기본사업인 ‘달 착륙 핵심기술 및 행성탐사 임무연구’ 사업을 통해 수행되었으며, 지원에 감사드립니다.

References

1. Ministry of Science and ICT, The 3rd Basic Plan for Space Development Promotion (Ministry of Science and ICT, Sejong, 2018).
2. ESA, Sharing Earth observation resources/missions database (ESA 2000-2001) (2021) [Internet], viewed 2021 Sep 15, available from: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions>
3. National Research Council [NRC], The Scientific Context for Exploration of the Moon (National Academies Press, Washington, DC, 2007).
4. Lunar Exploration Analysis Group [LEAG], Advancing science of the Moon, Specific Action Team Report (2017).
5. National Research Council [NRC], Vision and Voyages for Planetary Science in the Decade 2013-2022 (National Academies Press, Washington, DC, 2011).
6. Moon Trek, NASA JPL web-based portal for exploration of Moon (2021) [Internet], viewed 2021 Sep 15, available from: <https://trek.nasa.gov/moon/index.html>
7. Jawin ER, Valencia SN, Watkins RN, Crowell JM, Neal CR, et al., Lunar science for landed missions workshop findings report, *Earth Space Sci.* 6, 2-40 (2019). <https://doi.org/10.1029/2018EA000490>
8. NASA, Aristarchus crater (2018) [Internet], viewed 2021 Sep 15, available from: <https://moon.nasa.gov/resources/347/aristarchus-crater>
9. NASA, Lunar swirls (2006) [Internet], viewed 2021 Sep 15, available from: https://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2006/26jun_lunarswirls
10. Kim KJ, Wöhler C, Berezhnoy AA, Bhatt M, Grumpe A, Prospective ³He-rich landing sites on the Moon, *Planet. Space Sci.* 177, 104686 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.pss.2019.07.001>
11. Kim YH, Choi SH, Yu Y, Kim KJ, Basic lunar topography and geology for space scientists, *J. Space Technol. Appl.* 1, 217-240 (2021). <https://doi.org/10.52912/jsta.2021.1.2.217>
12. Spudis PD, Bussey B, Plescia J, Josset JL, Beauvivre S, Geology of Shackleton crater and the south pole of the Moon, *Geophys. Res. Lett.* 35, L14201 (2008). <https://doi.org/10.1029/2008GL034468>
13. Wikipedia, Chang'e 4 (2021) [Internet], viewed 2021 Sep 15, available from: https://en.wikipedia.org/wiki/Chang%27e_4

14. Bruce Murray Space Image Library, Regional map of the Chang'e-4 landing site [Internet], viewed 2021 Sep 15, available from: <https://www.planetary.org/space-images/regional-map-of-ce-4-site>
15. Wikipedia, Chang'e 5 (2021) [Internet], viewed 2021 Sep 15, available from: https://en.wikipedia.org/wiki/Chang%27e_5
16. The Planetary Society, Mons Rümker [Internet], viewed 2021 Sep 15, available from: <https://www.planetary.org/space-images/mons-r%C3%BCmker>
17. Wikipedia, Chandrayann-2 (2021) [Internet], viewed 2021 Sep 15, available from: <https://en.wikipedia.org/wiki/Chandrayann-2>
18. The Planetary Society, Chandrayaan-2 candidate landing sites (wide) (2021) [Internet], viewed 2021 Sep 15, available from: <https://www.planetary.org/space-images/chandrayaan-2-candidate>
19. Wikipedia, Beresheet [Internet], viewed 2021 Sep 15, available from: <https://en.wikipedia.org/wiki/Beresheet>
20. The Planetary Society, Beresheet landing site (global map) [Internet], viewed 2021 Sep 15, available from: <https://www.planetary.org/space-images/spaceil-lander-site>
21. NASA, Artemis plan: NASA's lunar exploration program overview, NASA report, NP-2020-05-2853-HQ (2020).

Author Information

이 주 희 jhl@kari.re.kr



2013년 우주과학 박사학위를 취득하였으며, 1998년부터 현재까지 한국항공우주연구원 우주탐사연구부 책임연구원으로 재직 중이다. 주요 연구 분야는 유인 우주 실험, 임무 설계 및 시스템 개발 연구, 달 및 행성 과학 분야의 임무 개발 및 탑재체 분야에 대한 연구 등이다.

류 동 영 dyrew@kari.re.kr



한국과학기술원 항공우주공학과에서 1996년 공학박사 학위를 취득한 후, 민간 기업체에서 인공위성 및 항법시스템 개발 업무를 담당하였으며, 2010년부터 현재까지 한국항공우주연구원에서 연구를 수행하고 있다. 주요 연구 및 관심 분야는 달 탐사를 포함한 우주탐사, 탐사선 시스템 설계, 착륙 유도 · 항법 · 제어 기술 개발 및 검증 등이다.