

월면토를 이용한 달 유인 우주기지 보호층의 기술적 요구조건에 관한 연구

Investigation of Technical Requirements for a Protective Shield with Lunar Regolith for Human Habitat

이 장 근 ¹	Lee, Janguen	공 정 ²	Gong, Zheng
진 현 우 ³	Jin, Hyunwoo	유 병 현 ⁴	Ryu, Byung Hyun
김 영 재 ⁵	Kim, Young-Jae		

Abstract

The discovery of lunar ice in the lunar polar region has fueled international interest in in situ resource utilization (ISRU) and the construction of lunar habitats. Unlike Earth's atmosphere, the Moon presents unique challenges, including frequent meteoroid impacts, direct exposure to space radiation, and extreme temperature variations. To safeguard lunar habitats from these threats, the construction of a protective shield is essential. Lunar regolith, as a construction material, offers distinct advantages, reducing transportation costs and ensuring a sustainable supply of raw materials. Moreover, it streamlines manufacturing, integration schedules, and enables easy repairs and modifications without Earth resupply. Adjusting the shield's thickness within the habitat's structural limits remains feasible as lunar conditions evolve. Although extensive research on protective shields using lunar regolith has been conducted, unresolved conflicts persist regarding shield requirements. This study conducts a comprehensive analysis of the primary lunar threats and suggests a minimum shield thickness of 2 m using lunar regolith. Furthermore, it outlines the necessary technology for the rapid construction of such protective shields.

요 지

달 극지방에 얼음이 존재한다는 사실을 발견하고 달 현지자원활용과 유인기지 건설에 국제적 관심이 증대되고 있다. 대기가 없는 달은 지구환경과 다르게 운석충돌, 우주방사선, 극한 온도편차의 위험에 노출되고 있다. 이러한 3대 위협요소로부터 유인 우주기지를 보호하기 위해 보호층 시공이 반드시 요구된다. 월면토를 보호층 시공 재료로

- 1 정희원, 한국건설기술연구원 미래스마트건설연구본부 연구위원 (Member, Research Fellow, Dept. of Future & Smart Construction Research, Korea Institute of Civil Engrg. and Building Technology, Tel: +82-31-910-0791, jlee@kict.re.kr, Corresponding author, 교신저자)
- 2 정희원, 과학기술연합대학원대학교 박사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental Engrg., Univ. of Science and Technology)
- 3 정희원, 한국건설기술연구원 미래스마트건설연구본부 수석연구원 (Member, Senior Researcher, Dept. of Future & Smart Construction Research, Korea Institute of Civil Engrg. and Building Technology)
- 4 정희원, 한국건설기술연구원 미래스마트건설연구본부 전임연구원 (Member, Research Specialist, Dept. of Future & Smart Construction Research, Korea Institute of Civil Engrg. and Building Technology)
- 5 비희원, 한국건설기술연구원 미래스마트건설연구본부 수석연구원 (Senior Researcher, Dept. of Future & Smart Construction Research, Korea Institute of Civil Engrg. and Building Technology)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2024년 4월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

Copyright © 2023 by the Korean Geotechnical 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/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

사용하는 것은 지구-달 운송에 필요한 비용 절감과 대량의 원자재 확보라는 관점에서 상당히 매력적이다. 또한, 별도의 제작 및 통합 일정을 위한 추가적인 시간이 필요치 않고 지구에서 재보급 없이 쉽게 수리 및 개조가 가능하다. 환경이 변하는 경우에도 유인 우주기지의 구조적 한계 내에서 보호층 두께 조절이 가능하다. 월면토를 이용한 보호층과 관련한 다양한 연구들이 진행되어 왔으나, 보호층의 요구조건에 대해서는 다양한 의견들이 제시되어 왔다. 본 논문에서 달 지상 3대 위험요소별로 상세히 살펴본 결과를 토대로 장기 유인거주를 위해서는 2m 이상의 보호층 시공이 필요한 것으로 판단하였다. 이를 기반으로 보호층 시공에 필요한 기술과 달 지상에서 급속으로 시공이 가능한 방안을 제시하고자 한다.

Keywords : Extreme temperature, Lunar habitat, Lunar regolith, Meteoroid impact, Shield, Space radiation

1. 서론

세계 우주국은 달의 영구음영지역 주변으로 존재하는 얼음을 현지에서 채굴, 선별, 활용하는 현지자원활용에 관심이 높아지고 있다(Anand et al., 2012). 현지자원 활용의 개념은 달에 존재하는 얼음의 활용에서 비롯되어, 최근에는 달 토양을 활용하는 연구도 활발히 진행되고 있다. 현지자원활용을 위해 달 유인 우주기지는 반드시 필요하다. 달 기지는 이착륙장(landing pad), 자원운송 도로(roadway), 유인거주(habitat or shelter), 보호층(shield), 방폭벽(blast wall), 자원활용 플랜트 설비 등 다양한 건설 활동이 요구된다. 이러한 건설 분야에서 각광받고 있는 자원이 바로 현지 월면토이며, 현지자원활용 기반 건설재료 생산 및 자동화 건설에 대한 연구가 세계적으로 활발히 진행되고 있다(Ulubeyli, 2022; Wong et al., 2022). 최근 들어 레이저, 태양열, 마이크로파, 플라즈마 등 다양한 에너지를 활용한 신터링 기법을 활용하여 월면토를 건설재료로 활용하는 방안에 대한 연구 결과도 다양하게 발표되고 있다(Fateri et al., 2019; Phuah et al., 2020; Farries et al., 2021; Kim et al., 2021).

달 유인 장기 탐사 또는 거주를 위해서는 산소 공급과 온도유지가 가능한 고기밀성 건축 구조물이 필요하다. 이러한 고기밀성 건축 구조물은 지구에서 완전 조립된 형태로 달까지 이송되는 방안이 합리적이라 판단된다. 유인 거주를 위해서는 달 표면에서 발생하는 잦은 유성체 충돌, 우주 방사선에 직접적인 노출, 극한의 온도조건에 대응한 고기밀성 건축 구조물의 보호가 요구된다. 단기적으로 인류의 달 체류에는 문제가 없으나 장기적인 거주를 위해서는 3가지 위험요소로부터 보호가 필요하다. 달 지상의 월면토를 이용하여 1차적으로 이러한 위험요소의 영향을 감소한다면 유인 우주기지를 보

호하는데 도움이 될 것으로 예상된다(Carrier and Mitchell, 1976). 월면토를 고형화하여 건설재료를 생산하는 기술은 보호층 건설에 활용이 가능하다. 이러한 보호층은 대기가 없는 달 지상의 위험요소들로부터 인류 생존과 직결되는 중요한 시설로 설계단계에서 세밀한 검토가 필요하다.

월면토를 이용한 보호층과 관련한 다양한 연구들이 진행되어 왔으나, 보호층의 요구조건에 대해서는 다양한 의견들이 제시되어 종합적인 검토가 필요한 실정이다. 본 논문에서는 달 지상에서 장기 유인거주를 위해 반드시 필요한 보호층의 요구조건을 3대 위험요소별로 상세히 살펴보고 최소 요구되는 보호층의 두께를 제안하고자 한다. 이를 기반으로 보호층 시공에 필요한 기술과 달 지상에서 급속으로 시공이 가능한 방안을 제시하고자 한다.

2. 달 지상환경 조건 및 월면토의 공학적 특성

Table 1은 달과 지구의 물리적 특성의 차이를 간단히 정리하고 있다(Heiken et al., 1991). 달은 지구중력의 $1/6(1.62\text{m/s}^2)$ 로 자전주기는 약 1달(27.3일)이 소요된다. 달과 지구의 표면 평균 온도는 위치에 따라 차이가 있음에도 불구하고 달에서는 밤의 극저온과 낮의 극고온에 대한 대비가 반드시 필요하다. 최근 달 얼음 발견으로 세계 우주국의 관심이 증대되고 있는 달 영구음영지역은 평균온도가 -233°C 로 추정되고 있다.

월면토는 현무암을 모암으로 대부분 유성체 충돌(meteoroid impact)로 인한 파쇄로 생성된 토양이다. 따라서, 입자는 각진 형상(angular shape)이고 표면에서 깊이 수 cm까지만 비교적 느슨한 상태지만, 50cm 이상의 깊이에서는 건조밀도가 $1.7\sim 1.9\text{g/cm}^3$ 의 상당히 조밀한

Table 1. Comparison of physical characteristics of the Moon and Earth (Heiken et al., 1991)

Property	Moon	Earth
Gravity acceleration (m/s ²)	1.62	9.81
Sidereal rotation time	27,32 d	23,93 h
Surface pressure (atm)	10 ⁻¹⁵	1
Mean surface temp. (°C)	-153 (night), 107 (day)	22
Temperature extreme (°C)	-233 ~ 123	-89 ~ 58

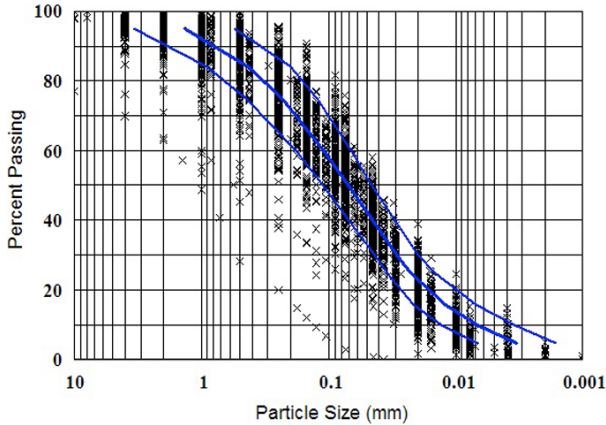


Fig. 1. Lunar soil particle size distribution (Carrier, 2003)

상태로 예상된다(Heiken et al., 1991). 입정에 따른 입도 분포 곡선을 살펴보면(Fig. 1), 평균적으로 굵은 모래가 약 2%, 중간모래가 14% 가는 모래가 33%, 실트가 51% 를 차지하고 있어 입도분포가 비교적 양호하다(Carrier, 2003).

각진 형상의 입자 형태로 인해 내부마찰각이 크고 지구중력의 1/6로 인해 줄어든 자중(self-weight)으로 티파기와 흠쌓기 경사각이 지구환경에서 가능한 경사각과 비교하여 상당히 다른 경향을 보여주고 있다. Fig. 2에서 보는 바와 같이 달에서는 수직으로 티파기는 약 2m, 다짐으로 수직 흠쌓기는 약 1m가 가능할 것으로 추정된다(Heiken et al., 1991).

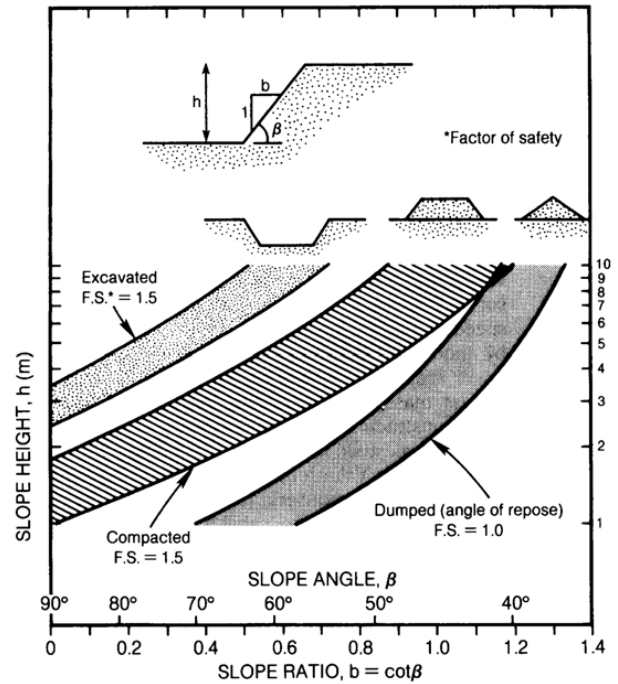


Fig. 2. Calculated stability of artificial slopes constructed in lunar surface material (Heiken et al., 1991)

3. 보호층 요구조건 및 조건별 월면토 두께

3.1 열 차단

달에서는 지구의 27일에 해당하는 긴 하루로 약 14일의 주기적인 낮과 밤으로 구성되며, 극지의 영구적으로

Table 2. Internal temperature variations with respect to regolith cover (Aulesa et al., 2008)

	Permanent shadow region	Other polar areas	Equatorial zone	Mid-latitude
Average temperatures	-233,15	-53,15	-18,15	-35,65
Monthly variation (°C)	0	±10	±140	±50
Thickness of regolith cover (m)				
0.5	0	± 3.9	± 55.8	± 19.6
1.0	0	± 1.2	± 16.6	± 5.8
1.5	0	± 0.5	± 7.5	± 2.7
2.0	0	± 0.3	± 4.3	± 1.5
2.5	0	± 0.2	± 2.8	± 1.0

그늘진 지역(Permanent Shadow Region, PSR)은 -233°C 에서 적도 지역은 $+123^{\circ}\text{C}$ 까지 변하는 극한의 온도환경을 고려해야 한다. 중위도 지역은 $-35.5 \pm 50^{\circ}\text{C}$, 적도의 온도는 낮과 밤 사이의 전환에서 $+100^{\circ}\text{C}$ 에서 -150°C 까지 극적으로 변한다(Nair et al., 2008). 이러한 급격한 온도변화는 열 응력과 변형 및 피로 문제를 야기 시켜 유인 우주기지에 문제가 발생한다. 고진공의 환경에서 월면토의 열전도율은 $1 \sim 2 \times 10^{-6} \text{W/mK}$ 로 상당히 낮다(Carrier and Mitchell, 1989; Jin et al., 2021). Table 2에서 정립된 바와 같이 약 2.5m의 월면토 보호층은 달 적도 지역의 최대 일교차에도 불구하고 최대 $\pm 2.8^{\circ}\text{C}$ 변동으로 기지 내부 온도를 일정하게 유지할 수 있다고 추정된다(Aulesa et al., 2008).

3.2 유성체 충돌 보호

유성체 충돌로 인한 구조체의 위험성에 대한 연구는 우주왕복선 운항 중에 발생하는 유성체 충돌로 우주선의 단일 판 구조(single plate structure) 관통을 예측(penetration predictor equation)하는 연구에서 시작되었다(Hayashida and Robinson, 1991). 다양한 관통 해석 모델 중 Fish-Summer Equation이 가장 간단하면서도 보수적으로 유성체 충돌에 대응이 가능한 방호 두께를 평가하고 있다(Lindsey, 2003). 기존의 연구는 우주선의 단일 판 구조 관통에 국한되어 있어 월면토의 보호층 두께 산정에 적용하기에는 한계가 있을 것으로 예상된다. 그럼에도 불구하고 유성체 충돌 시 필요한 월면토의 최소 두께를 공학적으로 계산하는데 활용이 가능하다. 다만, 제안된 예측 값의 정확도를 평가하기 위한 추가적인 연구가 필요하다. 유성체 충돌에 따른 알루미늄계 합금(2024-T3, 2024-T4, 6061 T6, 7075-T6)의 관통 두께는 다음과 같이 산출이 가능하다.

$$t_{al} = 0.57 \times M_m^{0.352} \times V_m^{0.875} \times \rho_m^{1/6} \quad (1)$$

여기서, t_{al} 은 알루미늄 합금의 관통 두께, M_m 은 유성체 질량, V_m 은 유성체 속도, ρ_m 은 유성체 밀도이다. Anderson and Smith(1994)의 연구에 따르면 0.01g 이상의 질량을 가진 유성체의 평균밀도는 0.5g/cm^3 이며, 평균 속도는 약 $17 \sim 19\text{km/s}$ 로 추정된다. 유성체 중에서도 직경이 수십 cm인 미소 유성체(micrometeoroid)가 가장 많이 충돌하게 되며, 충돌 시 속도는 $3 \sim 70\text{km/s}$ 로 평균 속

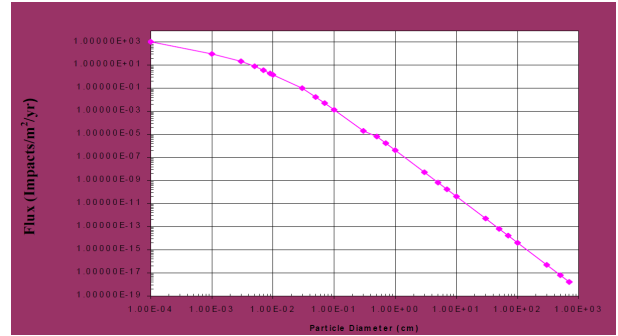


Fig. 3. Meteoroid impact prediction (Lindsey, 2003)

도는 20km/s (충돌속도는 약 2km/s)에 해당한다(Moorhead et al., 2015). 이러한 연구결과를 토대로 질량 89.75g의 직경 7cm(밀도는 약 0.5g/cm^3)의 유성체가 20km/s 로 충돌할 경우, 요구되는 알루미늄계 합금의 최소두께는 34cm이다. 알루미늄계 합금의 두께는 식 (2)를 이용하여 월면토 두께로 전환이 가능하다(Lindsey, 2003).

$$t = \frac{t_{al} \times \rho_{al}}{\rho_s} \quad (2)$$

여기서, ρ_{al} 는 알루미늄계 합금의 밀도(2.7g/cm^3), ρ_s 는 월면토의 밀도이다. 월면토 밀도를 $1.5 \sim 2.0\text{g/cm}^3$ 범위로 고려할 경우, 예상되는 두께는 $46 \sim 61\text{cm}$ 로 예상된다. 직경 7cm의 유성체가 1m^2 면적에 충돌은 10^{10} 년에 한 번으로 충돌 위험은 상당히 낮다(Fig. 3). 그럼에도 충돌 시 발생하는 파급효과는 막대하기에 이에 대한 대비가 반드시 필요하다.

3.3 우주방사선 차폐

달 장기 유인 탐사가 계획됨에 따라 태양 플레어 및 은하 고에너지 하전 입자 방사선과 같은 환경영향이 매우 중요하다. 대형 태양 플레어는 며칠 동안 많은 양의 고에너지 입자(Solar Energetic Particles, SEPs)를 방출할 수 있다. 또한 매우 높은 에너지의 은하 우주 광선(Galactic Cosmic Rays, GCRs)이 태양계 외부 소스에서 꾸준히 달과 충돌한다. 지구와 달리 달은 이러한 방사선에 대한 보호층으로 대기나 자기장 영역의 보호 덮개를 갖지 않기 때문에 우주인의 건강과 안전을 위협한다.

상대적으로 짧은 기간(2~3개월)의 경우 가장 중요한 방사선 위험은 생성되는 에너지가 높은 태양 플레어 양성자의 매우 높은 흐름이다. 태양 플레어는 또한 X선과

감마선, 전자, 중성자, 일부 더 무거운 하전 입자와 양성자를 포함하고 있다. 그러나 큰 플레어 복사 플럭스에 대한 이전 관측을 조사한 결과, 고에너지 양성자에 대한 차폐가 효과적이라면 다른 태양 복사로부터 흡수된 선량은 아마도 중요하지 않을 것으로 예상된다(Nealy et al., 1988). 그러나 장기 유인 거주를 위해서는 GCR로 인한 방사선 축적도 무시할 수 없다(Montes et al., 2015). 따라서 달 유인 기지의 설계는 가능한 1~12개월의 체류 기간 동안 지정된 노출 한계 내에서 방사선량을 유지하기 위해 모든 방사선원으로부터 충분한 차폐가 필요하다. 우주 비행사에게 설정된 권장 선량 한계는 신체의 5cm 깊이에 혈액 형성 기관(Blood Form Organ, BFO)에 대한 방사선량이 상당히 중요하다. 5cm 깊이에서 지정된 최대 레벨은 25rem/month와 50rem/year로 제한하고 있다(NCRP, 1989). 참고로 지구 환경에서 연간 방사선 종사자의 전신 선량 등가 한도는 5rem/year로 제시하고 있다(USNRC, 2014).

Nealy et al.(1988)은 대형 플레어 양성자 흐름을 대상으로 달 표토의 두께에 따른 BFO 선량을 Fig. 4와 같이 제시하였다. 월면토의 밀도는 $1.5g/cm^3$ 을 사용하여 수치 해석을 수행하였다. 단기간에 유인 탐사활동 중 발생하는 대형 태양 플레어에 대비한 차폐 성능은 두께 50cm의 월면토로 충분하다고 예상하였다. 다만, 1956년 사건의 경우, 풍부한 고에너지 입자는 훨씬 더 관통하는 흐름을 초래하여 차폐가 50cm인 경우에도 예상 BFO 선량은 10rem을 훨씬 상회한다. 장기간 임무를 수행하는 우주 비행사는 다른 출처에서 선량을 축적할 수 있어 주

의가 필요하다.

태양 플레어는 상대적으로 짧은 기간의 임무(특히 최대 태양 주기 조건 동안)의 주요 위협이 될 수 있지만 장기 체류(4~6개월 이상)는 은하 우주 광선(GCR) 선량을 고려해야 한다. 매우 높은 에너지의 은하 우주 광선으로부터 보호하는 문제는 여러 측면에서 태양 플레어와 관련된 문제와는 차이가 있다. GCR 플럭스는 태양 플레어에 비해 낮지만 시간에 따라 거의 일정하다. GCR 에너지는 매우 높을 수 있으며($>> 1 GeV$) 알루미늄 보호층으로 허용 가능한 연간 수준으로 제한하려면 상대적으로 두꺼운 두께(약 10cm)가 필요하다(Nealy et al., 1988). Montes et al.(2015)은 시뮬레이션을 통해 $1.98g/cm^3$ 밀도의 월면토 100cm 두께로 보호하면, GCR로 인한 12개월 체류 시 지구환경에서 연간 전신 방사선 작업자 한도(5cSv, 5rem)와 유사하다고 평가하였다.

4. 토 의

월면토를 보호층 시공 재료로 사용하는 것은 지구-달 운송에 필요한 비용절감과 대량의 원자재 확보라는 관점에서 상당히 매력적이다. 또한, 별도의 제작 및 통합 일정을 위한 추가적인 시간이 필요치 않고 지구에서 재 보급 없이 쉽게 수리 및 개조가 가능하다. 환경이 변하는 경우에도 유인 우주기지의 구조적 한계 내에서 보호층 두께 조절이 가능하다. 보호층의 두께는 유인 우주기지의 구조체의 안정성과도 직결된다. 최대 다짐상태(건조밀도 $2g/cm^3$)의 월면토로 보호층을 2m 높이로 시공하면, 달 환경에서 지구중력의 1/6의 저중력으로 인해 구조체에 전달되는 최대응력은 7kPa 이하로 평가된다. 유인 우주기지 구조체 내부는 우주인의 생존을 위해 공기압이 필요하고 지구 대기환경과 유사하게 조성할 경우, 최대 100kPa의 내부 팽창압을 구조체가 지지해야 한다. 즉, 월면토 보호층은 고기밀성 건축 구조물의 내외부 압력차를 완화시켜 구조적인 안정성을 향상 시키는데 도움이 될 것으로 예상된다.

이러한 장점과 더불어 단점으로는 월면토를 보호층으로 시공하기 위해서는 사전 처리가 필요하다는 점이다. 뿐만 아니라 월면토를 이용한 보호층 시공에는 건설 장비의 제약으로 상당한 시간이 필요하다. 보호층 시공에 막대한 시간이 소요될 경우, 시공 중 유인 우주기지를 보호해야 하는 별도의 장치나 방안이 필요하다. 지구에서 사용되는 대형 건설장비를 달 표면에서 사용하기

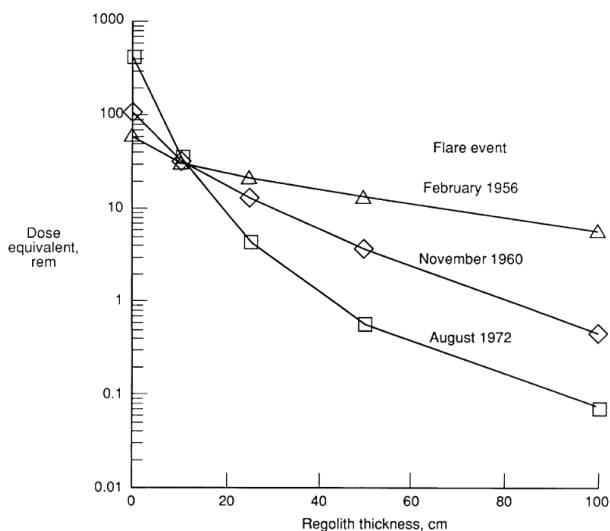


Fig. 4. Predicted BFO dose equivalents for lunar regolith thickness from 0 to 100 cm (Nealy et al., 1988)

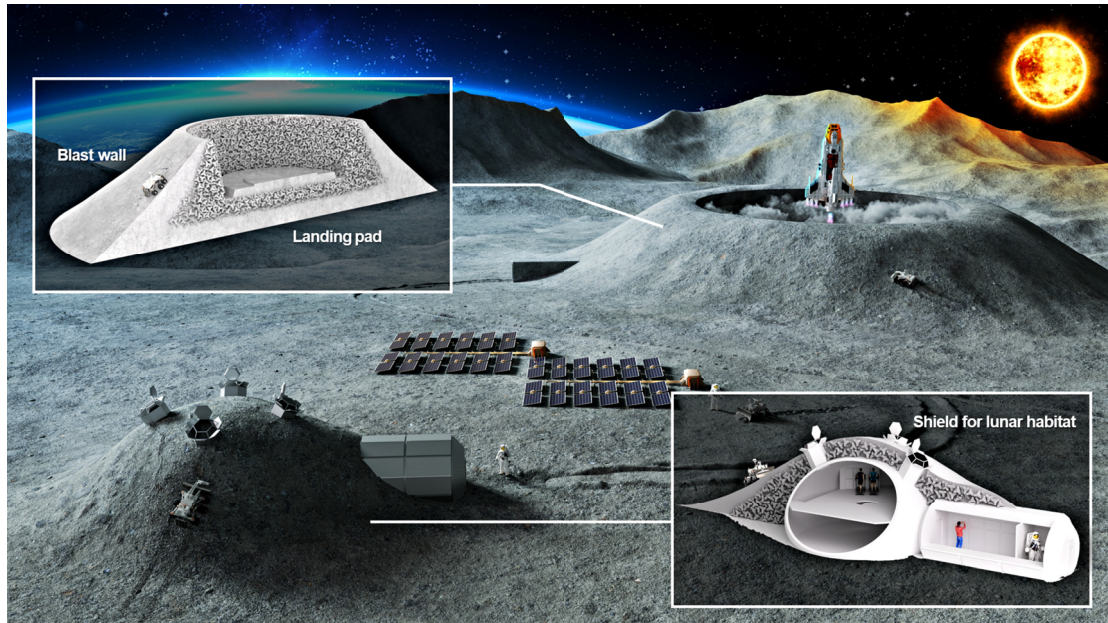


Fig. 5. Conceptual design for landing pad, blast wall, and shield on the Moon

에는 한계가 있어 급속시공 방안이 필요하고 월면토를 활용한 공사 중 발생하는 비산먼지 제어가 가능한 시공 방안이 요구된다. Fig. 5는 이러한 어려움을 극복 가능한 시공법을 보여주고 있다. 달 현지에서 우선적으로 월면토를 고형화하여 비정형 블록을 충분히 제조하고 유인 우주기지가 달 표면에 설치되면 비정형 블록으로 1차 보호층을 형성한다. 1차 보호층이 완성되면 월면토로 1차 보호층을 덮은 후 신터링 기법을 적용해 먼지비산을 최소화하여 2차 보호층을 형성한다. 이러한 비교적 간단한 보호층은 시공에 필요한 시간을 획기적으로 단축할 수 있다. 다만, 본 연구에서 제시된 시공법은 달 표면에서 발생하는 지진파로 인한 영향은 검토되지 않아 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

5. 결론

지속가능한 유인 달 탐사를 위해서는 달 지상 3대 위협요소인 운석충돌, 우주방사선, 온도편차에 대응할 수 있어야 한다. 이에 대한 대비책으로 월면토를 활용한 보호층 시공이 제안되어 왔다. 본 연구에서는 각 위협요소별로 요구되는 보호층 두께에 관한 문헌조사를 기반으로 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 달 적도 부근의 극심한 온도편차에도 보호층 두께 2m는 $\pm 4.3^{\circ}\text{C}$ 의 내부 온도편차 유지가 가능하다. 이

러한 온도편차는 유인 장기 거주를 위한 공조시스템의 최소화 가능하다는 장점을 보유하고 있다.

- (2) 소형 유성체 충돌은 1m 이하의 보호층 두께로도 충분히 유인 우주기지 보호가 가능하다. 그러나 잦은 유성체 충돌로 인해 발생하는 보호층 두께 감소를 고려하여 유지관리 측면에서 합리적인 2m 두께로 시공하는 것이 합리적이다.
- (3) 본 연구에서 달 지상의 3대 위협요소별로 보호층의 두께를 살펴본 결과, 달 지상의 3대 위협요소 중 우주방사선 차폐에 요구되는 보호층의 두께가 지배적이다. 지속가능한 장기 달 탐사를 위해서는 우주방사선 권장선량 한계와 태양 플레어의 영향에 대한 고려가 반드시 필요하다. 우주인에게 설정된 우주방사선 권장선량 한계를 고려할 경우, 우주방사선 대응을 위해서는 2m 보호층 두께로 충분히 보호가 가능하다. 다만, 특히 대형 태양 플레어 현상이나 지구 환경에서 연간 방사선 종사자의 전신 선량 등가 한도를 고려할 경우 2m 이상의 보호층 두께가 요구되어 추가적인 검토가 필요하다.
- (4) 보호층의 두께는 유인 우주기지에 자중으로 작용하여 우주인의 생존에 필요한 내부 팽창압력(약 100kPa)을 구조적으로 감소시켜 안정화 하는데 도움이 될 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술정보통신부 한국건설기술연구원 연구운영비지원(주요사업)사업으로 수행되었습니다(과제번호 20230144-001, 유인 우주기지 건설 핵심기술 협력 개발).

참고문헌 (References)

1. Anderson, J. and Smith, R.E., "Natural Orbital Environment Guidelines for Use in Aerospace Vehicle Development", NASA TM-4527, 1994.
2. Aulesa, V., Ruiz, F., and Casanova, I. (2000), "Structural Requirements for the Construction of Shelters on Planetary Surfaces", Proc., Space 2000, K. M. Chua et al., eds., ASCE, Reston, Va., 403-409.
3. Carrier, W. D. and Mitchell, J. K. (1989), "Geotechnical Engineering on the Moon", De Mello Volume, Editora Edgard Blücher Ltda., São Paulo, pp.51-58.
4. Carrier, W. D. (2003), "Particle Size Distribution of Lunar Soil", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol.129, No.10, pp.956-959.
5. Farries, K. W., Visintin, P., Smith, S. T., and van Eyk, P. (2021), "Sintered or Melted Regolith for Lunar Construction: State-of-the-art Review and Future Research Directions", *Construction and Building Materials*, Vol.296, p.123627.
6. Fateri, M., Meurisse, A., Sperl, M., Urbina, D., Madakashira, H. K., Govindaraj, S., Gancet, J., Imhof, B., Hoheneder, W., Waclavicek, R., Preisinger, C., Podreka, E., Mohamed, M. P., and Weiss, P. (2019), "Solar Sintering for Lunar Additive Manufacturing", *Journal of Aerospace Engineering*, Vol.32, No.6, p.04019101.
7. Hayashida, K. B. and Robinson, J. H. (1991), "Single Wall Penetration Equations", NASA Technical Memorandum 103565, Huntsville, Alabama.
8. Jablonski, A. M. and Ogden, K. A. (2008), "Technical Requirements for Lunar Structures", *Journal of Aerospace Engineering*, Vol.21, No.2, pp.72-90.
9. Jin, H., Lee, J., Ryu, B.H., Shin, H.S., and Chung, T. (2021), "Vacuum Pressure Effect on Thermal Conductivity of KLS-1", *J. Korean Geotechnical Society*, Vol.37, No.8, pp.51-58.
10. Kim, Y. J., Ryu, B. Y., Jin, H., Lee, J., and Shin, H. S. (2021), "Microstructural, Mechanical, and Thermal Properties of Microwave-sintered KLS-1 Lunar Regolith Simulant", *Ceramic International*, Vol.47, No.19, pp.26891-26897.
11. Lindsey, N. J. (2003), "Lunar Station Protection: Lunar Regolith Shielding", *Proceedings of International Lunar Conference*, Hawaii, pp.143-148.
12. Montes, C., Broussard, K. Gongre, M., Simicevic, N., Mejia, J., Tham, J., Allouche, E., and Davis, G. (2015), "Evaluation of Lunar Regolith Geopolymer Binder as a Radioactive Shielding Material for Space Exploration Applications", *Advances in Space Research*, Vol.26, pp.1212-1221.
13. Moorhead, A.V., Koehler, H.M., Cooke, W.J., and Space, M. (2015), NASA meteoroid engineering model release 2.0.
14. Nair, G. M., Murthi, K. R. S., and Prasad, M. Y. S. (2008), "Strategic, Technological and Ethical Aspects of Establishing Colonies on Moon and Mars", *Acta Astronaut*, Vol.63, pp.1337-1342.
15. National Council on Radiation Protection and Measurements (1989), "Guidance on radiation received in space activities", NCRP Rep. No.98.
16. Nealy, J. E., Wilson, J. W., and Townsend, L. W. (1988), "Solar-Flare Shielding With Regolith at a Lunar-Base Site", NASA Technical Paper 2869.
17. Phuah, X. L., Wang, H., Zhang, B., Cho, J., Zhang, X., and Wang, H. (2020), "Ceramic Material Processing Towards Future Space Habitat: Electric Current-assisted Sintering of Lunar Regolith Simulant", *Materials*, Vol.13, No.18, p.4128.
18. Ulubeyli, S. (2022), "Lunar Shelter Construction Issues: The State-of-the-art Towards 3D Printing Technologies", *Acta Astronautica*, Vol.195, pp.318-343.
19. United States Nuclear Regulatory Commission (2014), "Standards for protection against radiation", <https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/cfr/part020/full-text.html>.
20. Wong, I. M., Siochi, E. J., Grande, M. L., Moses, R. W., Waltz, S. W. J., Silbermagel, R., Hayward, E. G., and Barkhurst, M. E. (2022), "Design Analysis for Lunar Safe Haven Concepts", Proceeding AIAA SCITECH 2022 Forum, 1567.

Received : September 13th, 2023

Revised : September 25th, 2023

Accepted : September 25th, 2023