

연구논문

달 표면 탐사를 위한 달 먼지 특성 및 제어 기술 관련 연구동향

엄예슬¹, 박상희¹, 정준수^{1†}, 김한샘¹, 유병현²

¹한국건설기술연구원 건축연구본부

²한국건설기술연구원 건설산업진흥본부



Received: November 8, 2024

Revised: November 18, 2024

Accepted: November 20, 2024

†Corresponding author :

Joonsoo Chung

Tel : +82-31-910-0699

E-mail : jschung@kict.re.kr

Copyright © 2024 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

Ye Seul Eom

<https://orcid.org/0000-0001-9618-8877>

Sang Hee Park

<https://orcid.org/0000-0002-1476-2378>

Joonsoo Chung

<https://orcid.org/0009-0008-3385-1625>

Hansaem Kim

<https://orcid.org/0009-0000-4879-6448>

Byunghyun Ryu

<https://orcid.org/0000-0003-4081-2655>

Research Trends in Lunar Dust Characteristics and Control Technologies for Lunar Surface Exploration

Ye Seul Eom¹, Sang Hee Park¹, Joonsoo Chung^{1†}, Hansaem Kim¹,
Byunghyun Ryu²

¹Department of Building Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang 10223, Korea

²Construction Industry Promotion Department, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang 10223, Korea

요약

전 세계적으로 달 유인 착륙과 장기 체류를 목표로 한 연구가 활발히 진행되는 가운데, 달 환경에 대한 이해와 이에 대응하는 기술 개발은 필수적이다. 특히, 달 먼지는 표면 탐사 장비의 효율적 운용, 유인 우주기지의 설계, 그리고 우주비행사의 건강에 영향을 미치는 요인으로, 이를 제어하기 위한 효과적인 기술 개발이 요구된다. 본 논문에서는 달 표면의 레골리스 및 달 먼지의 물리적 및 화학적 특성과 이로 인해 발생하는 문제인 표면 탐사 장비 및 인체에 미치는 영향을 분석하였다. 또한, 달 먼지 제어를 위한 다양한 기술 개발 사례를 검토하고, 특히 저주파음과 진동을 활용한 제어기술의 가능성을 중점적으로 논의하였다. 본 연구는 달 먼지가 탐사 장비와 인체에 미치는 영향을 분석하고, 이를 해결하기 위한 제어 기술 개발의 중요성을 강조하였다. 또한, 인공 월면토 개선 연구를 포함한 향후 연구 방향을 제시함으로써, 달 탐사의 안전성과 성공 가능성을 높이는 데 기여한다.

Abstract

With global efforts focused on achieving crewed lunar landings and long-term habitation, a comprehensive understanding of the lunar environment and the development of corresponding technologies are essential. In particular, lunar dust is a factor that affects the efficient operation of surface exploration equipment, the design of lunar surface habitats, and the health of astronauts. Therefore, the development of effective dust control technologies is crucial. This paper analyzes the physical and chemical properties of lunar regolith and dust, as well as their effects on surface exploration equipment and human health. Furthermore, the paper reviews various technologies for lunar dust control, with a particular focus on the use of low-frequency sound and vibrations, and discusses the potential of these technologies. This study highlights the importance of developing dust control technologies to mitigate the impacts of lunar dust on exploration

equipment and human health. We also propose future research directions, including the improvement of artificial lunar soil, to enhance the safety and success of lunar exploration missions.

핵심어 : 달 표면 탐사, 달 먼지, 흡입 독성, 먼지 제어 기술

Keywords : lunar surface exploration, lunar dust, inhalation toxicity, dust control technology

1. 서론

달 탐사는 인류의 과학적 및 기술적 발전을 상징하는 분야이다. 달은 지구에 가까운 천체로서 우주 탐사의 출발점 역할뿐만 아니라, 지구와 태양계의 형성 과정을 이해하는 데 중요한 정보를 제공한다[1]. 또한, 달은 미래 우주 자원의 잠재적 가치를 지니고 있어, 세계적으로 달 탐사에 관한 관심과 투자가 증가하고 있다[2].

최근 여러 나라에서 달 탐사를 위한 다양한 기술 개발과 정책을 추진하고 있다. 미국은 아르테미스 프로그램(Artemis Program)을 통해 2025-2026년 사이에 달 표면 유인 착륙을 목표로 하고 있으며, 지속 가능한 달 탐사 및 장기적 기지 건설을 위해 새로운 우주선과 착륙 시스템 개발에 집중하고 있다[3]. 중국은 달 탐사 프로그램(Chinese Lunar Exploration Program, CLEP)의 일환으로 진행된 창어 임무(Chang'E mission)를 통해 달의 뒷면에 성공적으로 착륙하였고, 달 뒷면의 토양 및 암석 표본 수집에 성공했다[4,5]. CLEP는 달 궤도 탐사, 착륙 및 표본 수집, 유인 달 탐사와 기지 건설을 목표로 단계적으로 진행되는 중국의 우주 탐사 프로그램으로, 창어 시리즈 탐사선은 이러한 목표를 달성하기 위한 핵심적인 역할을 하고 있다. 또한, 인도와 일본에서도 각각의 달 탐사 프로그램을 통해 기술력을 지속해서 발전시키고 있다[6,7]. 인도의 달 탐사 임무인 찬드라얀 프로그램(Chandrayaan Program)은 달 궤도 탐사와 착륙 임무를 목표로 하며, 2023년 찬드라얀-3 탐사를 통해 달 남극에 성공적으로 착륙하여 기술적 성과를 입증하였다. 일본은 Smart Lander for Investigating Moon(SLIM) 임무를 통해 소형 탐사 랜더를 이용한 고정밀 착륙 기술을 개발 중이며, 소형 및 경량 설계, 고성능 카메라 장착 및 자율비행 등 향후 심우주 탐사의 기반 기술과 자원 활용에 중요한 기술적 발판이 될 것으로 평가받고 있다.

이러한 달 탐사 프로그램들은 단순한 착륙을 넘어 장기 체류와 자원 활용을 목표로 하고 있다[8]. 이를 위해 각국은 고효율 추진 시스템, 3D 프린팅을 활용한 유인기지 건설 기술, 현지 자원 활용(In-situ resource utilization, ISRU) 기술, 장기 체류를 위한 생명 유지 시스템, 고성능 통신 시스템 개발에 집중하고 있다[9-14]. 또한, 각국의 정부는 민간 기업의 참여를 촉진하는 정책을 추진하고 있어, 우주 산업의 새로운 생태계가 형성되고 있다[15].

달 표면 탐사의 성공을 위해서는 달 환경에 대한 깊이 있는 이해가 필수적이며, 특히 달 토양과 먼지에 대한 연구의 중요성이 점차 주목받고 있다. 달 토양의 특성과 구성은 달의 형성과 진화 과정을 이해하는 데 핵심적인 정보를 제공하며, 이러한 정보는 착륙선, 로버, 및 주거 모듈 등의 설계와 운영에 큰 영향을 미친다. 또한, 달 토양의 물리적 특성과 화학적 조성은 현지 자원 활용(ISRU)의 가능성을 평가하는 데 기초 자료로 사용된다[16-18].

우주비행사의 건강 측면에서도 달 먼지에 관한 연구는 필수적이다. 달 먼지의 미세한 입자와 날카로운 형상은 호흡기 및 피부 질환을 유발할 수 있으며, 장기 체류 시 건강에 미치는 위험 요소로 작용할 수 있다. 따라서 이러한 위험을 최소화하는 방안이 필요하며, 보호 장비와 제어 기술 개발이 요구된다[19,20]. 더 나아가, 달 먼지는 장비와 기기의 성능에도 부정적인 영향을 미칠 수 있어, 장비 내구성과 유지 보수 계획에도 중요한 고려 요소로 작용한다. 이러한 점을 고려하면, 달 표면 탐사의 안정성과 효율성을 높이기 위한 달 먼지 제어에 관한 기술적 대응이 필요한 것으로 판단된다.

따라서 본 연구에서는 달 먼지에 대한 전반적인 개요를 제공하여 심층적인 이해를 돕고, 이를 바탕으로 달 먼지 관련 연구가 달 표면 탐사 계획 수립에 있어 중요한 분야 중 하나임을 강조하고자 한다. 또한, 달 먼지 제어 기술의 연구 동향을 분석하여 향후 연구 방향을 제시하고자 한다.

2. 달 먼지

2.1 물리적 특성

달 레골리스(lunar regolith)는 달 표면을 덮고 있는 파편화된 입자 층으로, 주로 운석 충돌에 의해 생성된 다양한 크기의 입자로 구성된다[21]. 달은 지형적으로 고도가 높은 지역을 의미하는 고지대(highland)와 상대적으로 낮고 평탄한 지역을 의미하는 바다(mare)로 구분하며 [22], 이러한 지역에 따라 레골리스의 물리적 특성이 다르게 관측된다[23]. 이는 국지적 지형 조건, 미세 운석 충돌 빈도, 태양풍 노출 정도 등 다양한 풍화 작용의 영향으로 분석된다 [21,24,25].

또한, 달 레골리스는 입자 크기에 따라 달 토양(lunar soil)과 달 먼지(lunar dust)로 구분된다. 달 토양은 레골리스 중 입자 크기가 1 cm 이하인 부분을 의미하며, 그 중에서도 입경이 20 μm 이하이고 응집(agglutination) 과정의 일부로 형성된 미세한 입자들은 달 먼지로 정의된다[26,27]. 달 먼지는 달 토양 샘플 무게의 20%를 차지하는 데, 이는 지구환경과 비교하면 매우 많은 양이다[27].

입자 크기와 표면 형태는 우주 탐사 장비의 운용 및 흡입 독성과 같은 건강영향평가에 중요한 요소로 작용함에 따라[27,28], 다수의 선행 연구에서 아폴로 달 먼지 표본(Apollo lunar dust samples)의 연구를 통해 입자 크기 분포(particle size distribution)와 형태(shape)에 관한 연구가 수행되었다[28-33].

예를 들어, Liu et al. [29]는 주사전자현미경(scanning electron microscope, SEM)을 활용하여 달 먼지 표본의 질감과 형태를 상세히 분석하였다. 달 먼지 입자는 톱니 모양의 가장자리와 복잡한 형태를 가지고 있어 폐에 입자가 침착되는 데 영향을 미칠 수 있으며, 반응 표면적이 증가함을 밝혀냈다. 이는 입자의 밀도와 표면적에 영향을 미쳐 달 먼지의 반응성을 높여 장비 및 인체에 미치는 영향을 더욱 복잡하게 만들 수 있다. Park et al. [27]는 아폴로 임무에서 채취한 달 먼지를 분석하여, 달 먼지 입자가 인체에 미치는 독성 영향의 가능성을 제시하였다. 연구 결과, 달 먼지의 95% 이상이 호흡기 질환을 유발할 수 있는 미세 입자($< 2 \mu\text{m}$)로 구성되어 있어, 폐포까지 침투할 가능성이 높음을 밝혔다. 또한, 아폴로 11호 표본에는 나노 입자($< 100 \text{ nm}$)가 지구 먼지보다 훨씬 높은 비율인 40% 이상 포함되어 있어, 저중력 상태에

서의 나노 입자의 침착이 지구 중력과 비슷하거나 더 위험할 수 있다는 점을 강조하였다[30]. 최근 연구 [31]에서는 X-ray 컴퓨터 단층촬영(X-ray Computed Tomography)과 SEM을 통해 달 먼지 표본을 3차원으로 분석하여 입자의 모양, 크기, 표면 특성을 조사하였다. 이러한 방법을 통해 1 mm의 체를 통과하는 입자의 중량을 통한 입자 크기 분포(Table 1)[34]를 보완하여 입자 중량의 약 30%를 차지하는 20 μm 보다 작은 입자의 분포를 분석하였다. 연구 결과, 전체 단면적의 약 80%가 입경이 20 μm 미만인 입자에 의해 결정되는 것으로 나타났다.

결과적으로, 달 먼지의 물리적 특성에 대한 이해는 표면 탐사 또는 달 먼지 제어 기술 개발을 위한 필수 조건이며, 표면 탐사를 위한 효율적이고 안전한 환경 조성을 위해 달 먼지의 특성과 그 영향에 관한 지속적인 연구가 필요하다. 이러한 연구는 표면 탐사를 위한 장비 설계 및 우주인의 건강에 기초 자료로 활용될 것으로 기대된다.

2.2 화학적 구성

달 레골리스의 화학적 특성(암석, 광물, 원소 구성)의 이해는 표면 탐사에 필요한 자원을 추출하는 기술 또는 먼지 제어 기술 등을 개발하는 데 중요하다. 달 먼지의 주요 원소는 규소(Si), 알루미늄(Al), 칼슘(Ca), 철(Fe), 마그네슘(Mg), 티타늄(TiO_2) 등이 있으며, 이러한 원소들은 주로 실리케이트(silicates) 및 산화물(oxides)의 형태로 존재한다[35,36]. 또한, 태양풍 및 미세 운석 충돌로 인한 달 표면의 레골리스 형성 및 화학진화(chemical evolution) 특성이 달 표면 물질의 분산에 영향을 미쳐[37], 암석, 광물 및 원소의 분포는 달의 지질학적 영역에

Table 1. Particle size distribution (wt%) for literature sieve analysis in Apollo lunar dust samples [34]

Particle size (μm)	Lunar dust sample		
	10084, 79	14163, 120	73221, 11
< 10	14.2	25.1	21.4
10–20	11.9	9.25	6.68
20–45	19.9	15.0	14.5
45–90	19.8	11.4	11.0
90–150	12.1	9.41	9.29
150–250	8.12	11.2	13.0
250–500	7.68	6.20	9.15
500–1,000	6.3	11.4	13.9

Samples 10084 is the bulk soil sample, and is collected in front of lunar module (Apollo 11, Sea of Tranquility). Samples 14163 were collected from the bottom of a 1 m crater with glass in the bottom and at 15 m NW of lunar module (Apollo 14, Fra Mauro highlands). Samples 73221 is a skin sample from the top 1 cm of rim of a 10 m crater in light mantle region (Apollo 17, Taurus–Littrow Valley).

따라 다르다. 예를 들어, 고지대(highland)는 사장석(plagioclase) 광물 계열의 회장석(anorthite)으로 구성되어 칼슘 및 알루미늄이 풍부하지만, 바다 지대(mare)의 토양은 사장석, 휘석(pyroxene), 감람석(olivine) 및 일메나이트(ilmenite)로 구성되어 철, 마그네슘 및 티타늄이 상대적으로 더 많이 포함되어 있다[38]. 결과적으로, 산화철(FeO)의 구성비율에 따라 8.6 wt% 미만인 경우 고지대 물질, 8.6-15.9 wt%인 경우 중간조성(intermediate composition) 물질, 15.9 wt% 초과인 경우 바다(mare) 지역 물질로 구분할 수 있다[39]. 또한, 특정 광물은 칼륨(K), 희토류 원소(rare earth elements), 인(P)과 같은 중요한 원소를 함유하고 있으며, 이러한 암석과 광물은 Fig. 1과 같이 표면 탐사에 필요한 자원으로 다양하게 활용될 수 있다[40].

나노상 금속철(nanophase metallic iron, np-Fe)은 달의 중요한 화학적 특성 중 하나로, 달과 지상의 암석을 구분하는 데 유용한 지표가 된다[41]. 이 입자들은 태양풍(특히 수소 이온)과 미세 유성체 충돌에 의한 충격으로 산화된 철이 환원되어 나노상 금속철이 생성되며, 달 먼지 입자 표면에 존재한다. 나노상 금속철 입자는 자기적 특성과 높은 화학적 반응성을 지니고 있어, 장비와 인체에 미치는 영향을 복잡하게 만든다[42]. 또한, 이 입자들은 표면에서 매우 높은 화학적 활성도를 보이며, 먼지 제어와 관련된 기술 개발에 중요한 요소로 작용한다. 예를 들어, 달 먼지의 전자기적 성질에 의해 달 탐사 장비나 우주선에서 먼지로 인한 문제를 해결하기 위해서는 나노상 금속철의 특성을 고려해야 한다.

2.3 자원 활용 가능성

달 레골리스는 다양한 자원으로 활용될 수 있는 잠재성을 갖는다. 먼저, 전기화학적 공정을 활용하여 산소를 추출하고 금속 합금을 생산하는 기술이 개발된 바 있다. Lomax et al.[43]은 전기적 환원(electro-deoxidation) 공정을 통해 인공월면토(JSC-2A)에서 총 산소의 96%를 추출하고, 금속 분말과 혼합 금속 합금을 생산하였다. 하지만 이 과정에서 추출된 산소의 약 1/3은 전기적 환원 공정 중 방출되는 가스(off-gas)에서 검출되었으며, 나머지는 부식으로 인해 손실되었다. Metalysis-FFC 공정은 금속 산화물을 전기화학적으로 환원하여 산소를 분리하고, 순수한 금속이나 합금 파우더를 생성하는 전기분해 기술로, 산소를 회수함과 동시에 금속 부산물을 유용하게 활용할 수 있다는 점에서 중요한 기술이다. 본 연구의 결과는 Metalysis-

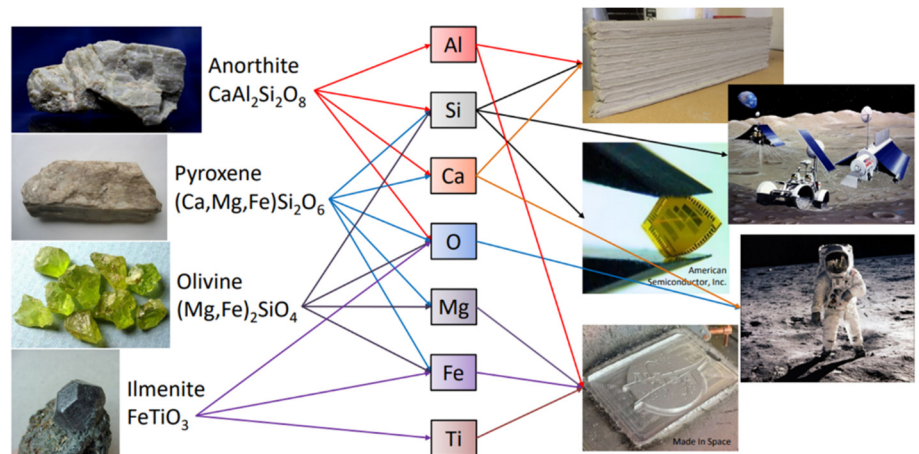


Fig. 1. Resource utilization of Lunar regolith [40].

FFC 공정을 통해 달 레골리스에서 100%에 가까운 산소를 회수할 수 있음을 보여주고, 레골리스 1 kg당 잠재적 산소 수율이 40-45 wt%임을 밝혔다.

또한, 중요한 건설 자원으로서 효과적인 소결 방법을 기반으로 유인기지과 인프라 구축 기술의 발전을 가속할 수 있다. 특히, 건설 자원으로 활용하는 방법의 하나인 마이크로파 소결 기술이 주목받고 있다. Farries et al.[44]은 태양열 소결과 마이크로파 소결 방법의 에너지 소비를 비교하여, 마이크로파 소결의 에너지 효율성과 균일한 가열의 장점을 강조하였다. Jin et al.[45]은 한국형 인공월면토(KLS-1)를 사용하여 최적화된 소결 공정을 통해 균열이 없는 균질한 블록 생성에 성공하였다.

향후 장기 달 표면탐사를 위해 레골리스는 식물 재배에도 활용될 수 있다. Wamelink et al.[46]은 화성과 달의 토양 모사체에서 식물 재배 가능성을 확인하는 실험을 진행하여, 20℃로 유지되는 온실 환경에서 추가 영양분 공급 없이도 식물이 성장할 수 있음을 보여주었다. 또한, Paul et al.[47]은 인공월면토(JSC-1A)를 이용한 실험에서 높은 식물 성장률을 보였으나 (Fig. 2), 아폴로 표본에 따른 식물 재배의 편차가 크다는 점을 보고하였다. 이러한 결과는 레골리스를 식물 재배 자원으로 활용하기 위해서는 지역별 식물 재배지의 최적화가 필요함을 시사한다.

그러나 자원 활용 가능성에 관한 실험연구는 주로 인공월면토를 사용하였다는 점에서 실제 달 환경을 완벽히 재현할 수 없다는 한계를 가지고 있다. 따라서, 실제 달 환경에서의 적용 가능성을 검증하기 위해서는 추가적인 연구가 필요하다. 또한, 실제 달 먼지의 복잡한 화학적 및 물리적 특성을 반영한 실험적 접근이 요구되며, 이를 통해 달 자원 활용의 실효성을 높일 수 있을 것이다.

3. 인체 및 탐사 장비에 미치는 영향

3.1 흡입 독성 및 인체 위해성

지구와 달 환경에서의 호흡성 입자의 특성은 현저히 다르다. 지구환경에서는 일반적으로 입경 10 μm 이하의 입자(PM10)를 호흡성 입자로 간주하지만, 달에서는 중력이 지구의 약 1/6에 불과해 이보다 큰 입자도 호흡성 입자로 분류될 수 있다. 저중력 조건에서는 달 먼지

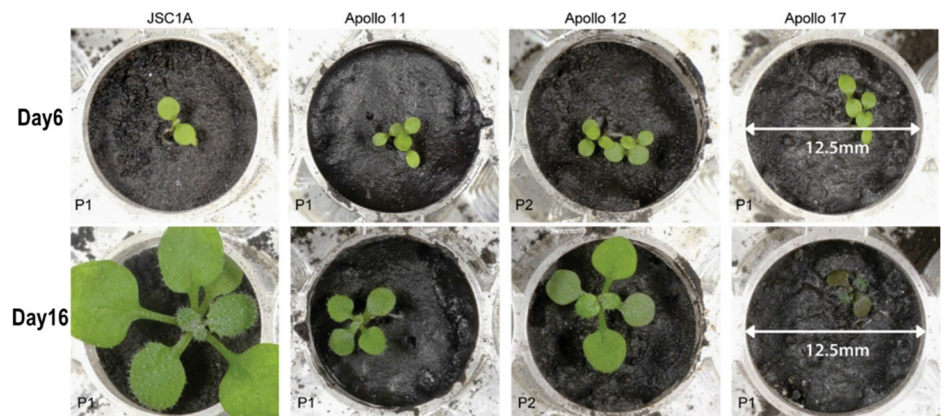


Fig. 2. Plant germination and development in the lunar regolith [47].

가 기관지 내에 침전되는 위치 및 제거하는 데 걸리는 시간 등의 메커니즘이 달라지며, 저중력 조건에서 입경 $1 \mu\text{m}$ 이하의 입자들이 기도(airway)에서 입자가 제거되지 않아 오히려 폐포에 지구환경에 비해 더 많이 증착되는 것이 관찰된 바 있다[48]. 또한, 지구에서는 수분과 결합해 더 큰 입자로 응집되지만, 달은 대기가 없고 건조하여 이러한 응집 현상이 발생하지 않으며, 달 먼지의 표면적은 크기가 동일한 구보다 약 8배 넓어 표면 반응성이 높고, 미세 유성체 충격에 의해 형성된 증기에 의해 표면이 코팅되어 있다[49]. 이러한 특성에 따라 달 먼지의 독성학적 연구가 요구되며, 이러한 반응성 구성 요소가 흡입되기 전과 수분이 풍부한 폐 환경에서 어떻게 생화학적으로 작용하는지 이해할 필요가 있다. 달 먼지의 독성학적 조사를 통해 얻은 데이터는 달 먼지 노출에 대한 인간 위험 기준을 설정하고, 달 먼지에 대한 안전 기준을 도출하는 데 중요하다.

아폴로 프로그램의 결과, 달 표면에서 탐사 작업을 수행한 우주비행사들은 달 먼지가 착용 선과 그 시스템에 미치는 영향뿐만 아니라, 건강에 미치는 위험성도 가장 예상치 못한 요소로 언급했다[50]. 달 먼지의 미세한 입자 크기와 날카로운 입자 구조는 인체에 다양한 건강 문제를 일으킬 수 있다. 특히, 호흡기를 통해 체내로 유입된 달 먼지는 폐포까지 침투하여 염증과 호흡기 질환을 유발할 가능성이 있다. Cain[19]은 달 먼지의 독성이 이산화티타늄보다는 크고, 실리카 먼지보다는 낮은 독성을 보인다고 보고했다. 그러나 나노상 금속철 입자가 포함된 경우, 달 먼지의 독성은 더욱 증가할 수 있다. 아폴로 임무의 우주비행사들은 선외 활동 후 호흡기 자극 및 눈 자극을 경험하였고, 선외 활동 후 우주복에 붙어 있던 달 먼지가 달 모듈 내부 및 인체 표면에 침착되어 영향을 미친다. 이는 인체에 대한 심층적인 연구 필요성을 시사한다.

여러 연구들은 달 먼지가 인체에 미치는 영향을 분석했다. 예를 들어, Lam et al.[51]은 쥐를 대상으로 한 흡입 독성 평가 연구에서, 4주간 달 먼지에 노출된 쥐에서 폐 염증과 섬유증이 유발되었음을 보고했다. 그러나 달 먼지 농도가 6.8 mg/m^3 이하에서는 유의미한 유해 작용이 없음을 확인하여, NOAEL(no observed adverse effect level)을 제시하였다. 이 연구는 달 먼지 농도와 흡입 노출에 따른 건강 영향을 평가하는 데 중요한 자료를 제공한다.

달 먼지에 포함된 중금속과 희토류 원소도 건강영향 평가에 중요한 요소이다. 희토류 원소는 체내에 축적되면서 다양한 생리적 영향을 미칠 수 있으며, 중금속은 신경독성 및 기타 생리적 이상을 유발할 수 있다. 따라서 달 먼지의 화학적 구성과 그에 따른 독성 평가가 필수적이다. 현재까지 달 먼지에 대한 허용 노출 한계(permissible exposure limits)는 명확히 확립되지 않았으며, 이는 추가적인 연구와 데이터 축적이 필요함을 의미한다. 특히, 만성 노출에 대한 장기적인 영향 평가가 요구되며, 이를 통해 달 탐사 중 우주비행사의 건강과 안전을 보장할 수 있는 기준을 마련할 필요가 있다.

3.2 탐사 장비와 기계설비의 성능 저하

3.2.1 마모 현상

달 먼지는 미세하고 날카로운 입자로 구성되어 있어, 우주복 및 탐사 장비의 기계적 부품에 지속적인 마찰을 일으키며 마모를 가속한다. 이로 인해 기계적 성능이 저하되고, 탐사 장비의

수명이 단축될 수 있다. 특히, 이동 장비의 바퀴나 기어는 먼지와와의 접촉으로 인해 조기 고장이 발생할 위험이 높다(Fig. 3).

예를 들어, Christoffersen et al.[52]은 아폴로 12호와 17호의 우주복 외피 직물을 분석한 결과, 달 먼지 입자로 인해 마모가 가속되었음을 확인하였다. 특히, 달 먼지 입자가 우주복 직물의 섬유를 분리하고 표면 재료를 오염시키는 현상이 관찰되었다. 이는 우주복의 내구성과 장비의 수명에 직접적인 영향을 미칠 수 있으며, 추가적인 보호 조치가 필요함을 시사한다. 또한, 우주복의 압력 장갑 마모가 우주비행사의 움직임과 작업 효율에 직접적인 영향을 미친다는 점을 강조했다[53]. 크롬(20%)과 니켈(80%)로 구성된 와이어로 만들어진 직물(Chromel-R)로 구성된 압력 장갑의 표면은 달 먼지 입자에 의해 심각하게 마모되었지만, 손목 회전 베어링은 먼지 입자가 마감부위를 통과하지 않았거나, 통과하더라도 마모는 미미하게 관찰되었다. 이는 먼지 저항성을 가진 회전 마감 개발이 유용함을 시사하며, 향후 우주복 설계 시 먼지 저항성을 강화할 수 있는 소재와 구조의 개선이 필요함을 보여준다.

Gaier et al.[53]는 모든 아폴로 미션 중 달 먼지에 의한 탐사 장비의 운영 중 막힘 및 마모 현상이 보고되었음을 밝혔다(Fig. 4). 연구에 따르면, 달 표면에 머무는 시간과 관계없이 모든 우주인이 달 표면 탐사차량(Lunar Roving Vehicle, LRV), 우주복의 지퍼, 및 생명유지장치 호스의 잠금장치 등의 마모현상을 경험했다. 또한, 아폴로 16호 임무 중 LRV의 계기판이 마모에 의해 식별이 불가능했으며, Harrison Schmitt의 헬멧 차양장치가 마모에 의해 특정 방향을 볼 수 없는 문제점이 아폴로 임무 후 논의된 바 있다[52]. 이러한 연구결과는 특히 우주인의 임무기간이 연장되거나 장기 표면탐사를 수행하기 위해 달 먼지 제어가 중요한 고려 사항으로 간주되어야 함을 강조한다.

3.2.2 먼지 축적 및 시각적 방해

달 먼지는 로버의 카메라, 센서 등 광학 장비와 우주복에 축적되어 성능 저하를 유발할 수 있으며, 태양 전지판에 먼지가 쌓이면 발전량이 감소하여 달 표면 탐사 중 에너지 공급에 영향을 미친다.



Fig. 3. Lunar dust emission of the Apollo rover [63].



Fig. 4. Lunar dust contamination on the Apollo rover [64].

Christoffersen et al. [52]은 우주복의 부츠, 장갑, 헬멧을 포함한 모든 표면에 달 먼지가 빠르게 축적되는 것을 밝혔다(Fig. 5). 그 결과 우주복에 축적된 먼지가 실내로 쉽게 유입되었고, 우주복을 벗는 과정에서 우주인의 피부 및 호흡기에도 직접적으로 영향을 미쳤다(Fig. 6). 아폴로 11호 우주인이 달 먼지로 덮인 케이블이 식별되지 않아 반복적으로 걸려 넘어졌고, 아폴로 12호의 탐사 차트는 달 먼지 속에 떨어진 후 사용할 수 없었다. 또한 우주인들은 장비에 축적된 달 먼지를 털고 닦는 일에 많은 시간을 소요했지만, 효과가 없었다고 보고했다. 달



Fig. 5. Apollo astronaut's spacesuit covered with lunar dust [49].



Fig. 6. Crews body surface and spacesuit covered with lunar dust following an extravehicular activity (EVA). Lunar dust can be seen inside the lunar module.

먼지는 탐사 중 시각적 방해에도 영향을 미친다. 센서 및 카메라 렌즈에 먼지가 쌓이면 관측 데이터의 정확성을 떨어뜨리고, 이미지의 품질이 저하되어 과학적 분석 및 탐사의 효율성을 크게 방해할 수 있다. 따라서, 라디에이터 표면뿐만 아니라 모든 주요 장비의 먼지 축적을 방지하기 위한 청소 및 유지 보수 기술이 필요하다. 하지만, 달 먼지의 높은 부착 특성에 의해 제거가 어려운 문제점을 가짐에 따라 유지보수 작업이 복잡해질 수 있다. 특히, 로봇 팔, 로버 및 감지 장비의 기능에 영향을 미칠 수 있다.

달 먼지가 열 관리에 미치는 영향과 관련하여, Moore et al.[54]는 달 먼지가 라디에이터 표면에 침착됨에 따라 표면 방사율이 저하되고, 이는 열 관리 시스템의 효율을 감소시킨다고 보고하였다. 아폴로 12호 임무 중 다섯 위치에서 측정된 온도는 열 제어 표면의 달 먼지로 인해 예상보다 약 68°F 높았으며, 아폴로 16호와 17호에서 LRV 배터리는 축적된 먼지를 제거하지 못해 작동 온도 한계를 초과했다[52]. 이러한 현상은 달 기지의 안정적인 열 관리에 심각한 문제를 야기한다. 라디에이터 외에도 기타 장비 표면에 먼지가 축적되면 열 방출이 저해되어 장비의 과열이나 냉각 실패에 영향을 미칠 수 있다.

4. 달 먼지 제어 기술 현황분석

달 먼지 제어 기술에는 HEPA(high-efficiency particulate air) 필터, 정전기력, 저주파음과 진동을 활용한 기술 외에도 나노소재를 활용하여 먼지의 부착을 방지하는 기술과 자기장을 활용하는 기술 등이 있다. 하지만 나노소재를 활용한 기술은 달 환경에서의 적용성과 장기적인 내구성에 대한 연구가 아직 진행 중이며, 고비용, 기술적 복잡성, 그리고 환경적 적합성 문제 등으로 인해 상용화를 위한 연구가 더 필요하다. 또한, 자기장 기술은 달 먼지 성분이 다양함에 따라, 자기장을 적용할 수 있는 범위가 효율성이 제한적일 수 있다. 따라서, 본 논문에서는 기존 연구로부터 실험적으로 입증되고 더 광범위하게 적용 가능한 3종의 제어 기술(HEPA 필터, 정전기력, 저주파음과 진동 활용 기술)을 중점적으로 분석하였다.

4.1 HEPA(High-Efficiency Particulate Air) 필터

HEPA 필터는 매우 미세한 입자를 효과적으로 제거할 수 있는 필터 기술로, 먼지 제거에 널리 사용되고 있다. HEPA 필터는 $0.3 \mu\text{m}$ 크기 이상의 입자를 99.97% 이상 제거할 수 있는 능력을 지니고 있어서, 달 먼지를 효과적으로 포집할 수 있다. NASA의 아폴로 프로그램과 현재의 우주 탐사 미션에서도 HEPA 필터는 우주선 내부의 공기 정화 시스템에서 중요한 역할을 담당하고 있다.

Toon et al.[55]은 달의 레골리스를 우주복이나 장비표면에서 효율적으로 분리하고 포집할 수 있는 HEPA 필터가 설치된 진공 청소기를 달 먼지 제어 방법으로 제안하였다. 이 진공 청소기는 지구환경에서 사용되는 기성품을 개조하였고 달 환경에서의 먼지제거 효율을 최적화하기 위해 먼지의 표면분리, 진공 요구사항 및 최적 세척기술을 제안하였다. 해당 기술을 제안하기 앞서 달 먼지의 물리적 및 화학적 특성을 분석하였고, 이를 고려한 다양한 유량조건에서의 성능 요구조건을 도출하였다.

달 환경에서는 낮은 중력과 진공 상태로 인해 HEPA 필터의 성능이 지구와 다르게 나타날 수 있으므로, 필터의 설계와 유지 관리에 대한 추가적인 연구가 필요하다. 특히, HEPA 필터의 재사용 가능성을 높이기 위한 기술 개발도 활발히 진행 중이다. 예를 들어, 자가 세척 기능을 갖춘 HEPA 필터는 장기 임무 동안 필터의 효율성을 유지하면서 유지 보수 비용을 절감할 수 있을 것이다.

4.2 정전기력 활용 기술

정전기력을 활용한 달 먼지 제어 기술은 먼지 입자와 표면 간의 정전기적 상호작용을 이용하여 먼지를 효과적으로 제거하는 방법이다(Fig. 7). Berkebile & Gaier[56]의 연구에 따르면,

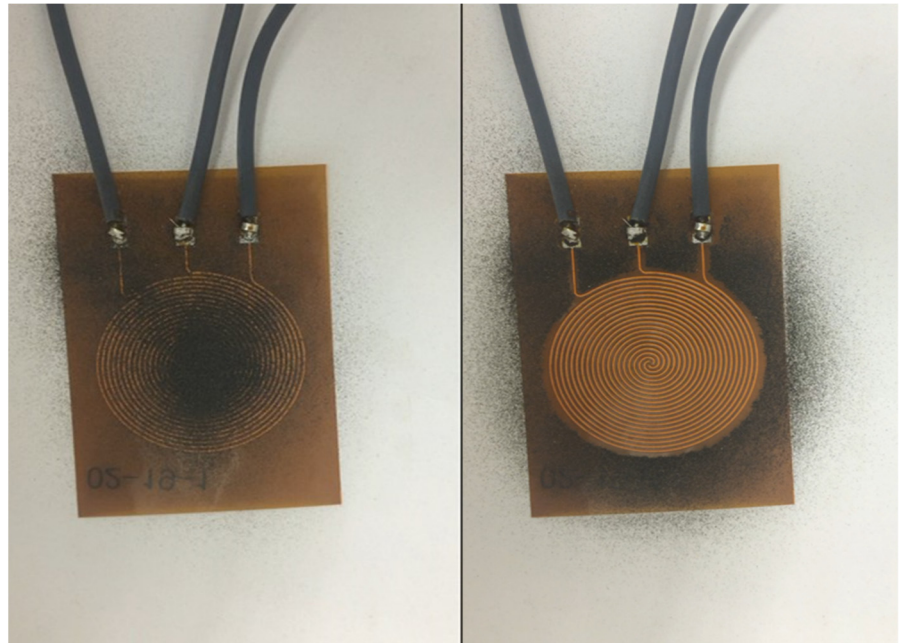


Fig. 7. Lunar dust removal of electrodynamic dust shield (EDS) using electrodes patterns [65].

달 먼지와 우주선 재료 간의 정전기력은 다른 물리적 접촉 메커니즘보다 훨씬 강력하며, 이는 먼지 제거에 있어 중요한 역할을 한다.

Cannon et al.[57]은 달 표면 물질과 관련된 먼지 제거 및 확산을 분석하며, 정전기력이 먼지 제거에 있어 결정적인 역할을 제시하였다. Batten & Iles[58]는 우주복에서의 정전기 먼지 제거 실험을 통해 정전기력을 활용한 기술이 유망하다는 것을 보여준다. Patal et al.[59]은 전기역학적 차폐(electro-dynamic shield, EDS) 기술이 태양에너지 하베스팅 장치에 축적된 먼지 제거에 효과적임을 제시했다. 이 태양에너지 하베스팅 장치에서 생성된 전력의 일부로 작동되며, 전기장은 태양열 수확 장치 표면에 증착된 전극에 전압을 인가하여 생성된다. 하지만, 이 기술을 달 표면 탐사에 적용하기 전에 전극 형상이 먼지 제거에 미치는 영향과 EDS에 적용되는 주파수 및 파형의 역할에 대한 연구가 추가로 수행될 필요가 있다고 언급했다.

이와 같이 앞서 언급된 연구들은 정전기력을 이용하여 우주복 표면 및 태양에너지 하베스팅 장치에 부착된 먼지를 효과적으로 제거할 수 있음을 시사한다. 정전기력 활용 기술의 장점은 에너지 효율성이 높고, 먼지 제거 과정에서 물리적 접촉이 필요 없다는 점이다. 이는 장기 임무 동안 우주복과 장비의 내구성을 유지하는 데 중요한 요소로 작용할 수 있다. 그러나, 정전기력의 효과는 먼지의 전하 상태와 표면 재료의 특성에 따라 달라질 수 있어, 이를 최적화하기 위한 추가적인 연구가 필요하다.

4.3 저주파음 및 진동 활용 기술

달 먼지 제어 기술 개발에서 음향적 접근 방식은 새로운 가능성을 제공할 수 있다. 예를 들어, Seiffert & Gibbs[60,61]는 고강도 저주파음과 진동을 이용하여 금속 표면에 부착된 먼지 층을 제거하는 연구를 수행하였고, 이를 통해 음압, 진동 레벨 및 주파수 특성을 정량화하였다. 연구 결과는 고강도 저주파음이 전기집진기 필터의 세척에 응용될 수 있음을 보여준다. 이 연구에서 활용된 저주파는 긴 파장을 가져 넓은 영역에 균일한 음압을 형성할 수 있으며, 적은 에너지로도 강한 진동을 일으킬 수 있어 우주 환경의 제한된 자원에 적합한 방법으로 고려될 수 있다. 하지만 이를 달 환경에 적용하기 위해서는 음파가 전달될 수 있는 적합한 매질이 필요하다.

이에 따라, 본 연구에서는 달 환경에 적용 가능한 저주파음 및 진동을 활용한 먼지 제어 기술을 제시하였다. Fig. 8과 같이, 내부 압력을 1기압으로 유지하는 달 먼지 제어 모듈은 유인 기지 출입구에 설치되어 선외 활동(extravehicular activity, EVA) 중 우주복에 침착된 달 먼지를 저주파음을 활용하여 탈착시켜 달 먼지가 기지 내부로 유인되는 것을 차단한다[62]. 그러나, 우주인이 선외활동 후 우주복을 탈의할 때, 달 먼지가 우주인의 피부 표면에 침착되거나 호흡기로 유입될 수 있는 한계점이 존재하며, 먼지 제거시스템에 적용될 설비(스피커 출력, 먼지 포집 장치, 압력 유지 장치 등)에 대한 구체적인 설계와 검증이 부족하다. 또한, 달 먼지 제거시스템이 작동할 때, 스피커 출력으로 인한 진동이 거주 모듈에 전달되지 않도록 진동 방지 댐퍼를 설계하고, 달 환경을 고려한 진공 상태 설정 등이 고려되어야 한다. 이러한 한계점은 유인 기지의 에어락과 슈트포트 기능을 연계한 기술을 통해 개선할 수 있다. 제시된 음향적 먼지 제어 기술을 보안을 위해 우주 환경에 효과적으로 적용하기 위한 구조적 강도와 내구성 확보, 모듈 내부 음파의 반사를 최적화하여 먼지 제거 성능을 극대화하는 설계가 필요하다. 향후 인공 월면토를 활용한 저주파음의 우주복 표면의 먼지를 제거 효과를 실험적으로

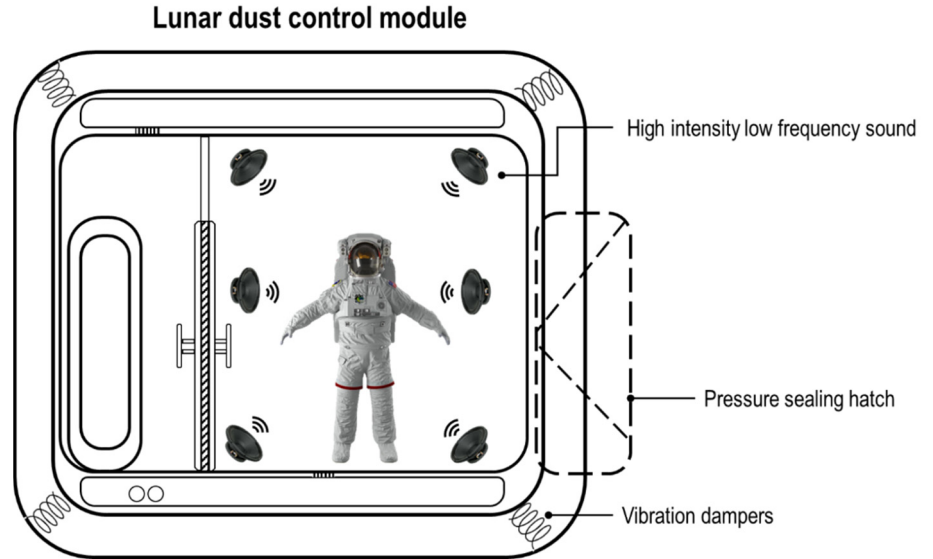


Fig. 8. Schematic diagram of lunar dust control module using by sound and vibration.

검증할 예정이다. 또한, 이 기술이 우주복이나 장비의 구조적 안정성을 유지하면서도 달 먼지를 효과적으로 제거할 수 있도록 최적의 주파수와 강도를 설정하는 것도 중요한 과제로 남아있다.

저주파음과 진동을 활용한 달 먼지 제어 기술은 NASA에서 검토 및 개발 중인 다른 먼지 제어 기술들과 상호 보완적으로 사용될 수 있다. 예를 들어, 정전기를 활용한 방법은 주로 소규모 평판에서의 먼지를 제거하는 데 유용하며, 태양광 패널이나 로버와 같은 장비에 활용되지만, 굴곡이 많은 우주복에는 추가적인 기술개발이 필요하다. 따라서, 달 환경의 제한된 자원을 고려할 때, 저주파음을 포함한 다양한 기술을 복합적으로 적용하는 접근법이 달 탐사의 안전성과 효율성 향상에 기여할 것이다.

5. 토의

5.1 달 먼지의 특성과 인공 달먼지 개발의 필요성

달 먼지는 그 특성상 탐사와 장기 체류에 있어 다양한 도전 과제를 제시한다. 달 표면의 먼지는 날카로운 모서리와 복잡한 형태를 갖는 미세 입자로 구성되어 있어, 우주인의 호흡기에 침투하거나 장비에 부착될 가능성이 크다. 특히, 달 먼지 입자 중 95% 이상이 호흡기 질환을 일으킬 수 있는 미세 입자($2\ \mu\text{m}$)로 이루어져 있어 폐에 침착될 가능성이 크다. 또한, 달 먼지에 포함된 나노상 금속철 입자는 자기적 특성과 높은 화학적 반응성을 지니고 있어 장비와 인체에 미치는 영향이 더욱 복잡하다.

이러한 달 먼지의 물리적 및 화학적 특성은 우주 탐사 장비와 우주인의 건강에 심각한 영향을 미칠 수 있다. 이에 따라 달 먼지 제어 기술에 관한 연구가 활발히 수행되고 있으며, 개발된 달 먼지 제어 기술의 적용성과 효율성 평가를 위해 실험적 접근이 요구된다. 하지만, 아

폴로 임무로부터 채취된 달 토양의 표본이 한정적임에 따라, 인공 월면토 개발 및 이를 개선하기 위한 연구가 지속적으로 이루어지고 있다.

현재 개발되는 인공 월면토는 주로 20 μm 이하의 작은 입자를 충분히 포함되지 않는 경우가 많아, 이는 위해성 평가나 장기적인 탐사 환경에 대한 연구에서 제약이 될 수 있다. 실제 달 먼지의 물리적, 화학적 특성을 제대로 반영하려면 인공 월면토의 입자 크기뿐만 아니라 나노 입자와 같은 더 작은 입자들의 특성을 반영하는 것이 중요하다. 또한, 입자 크기와 분포, 독성 및 접착력에서 차이를 보이는 경우가 많아, 개발된 인공 월면토를 활용한 위해성 평가나 장기 탐사 환경을 모사하는 데 한계가 있다. 따라서 인공 월면토가 실제 달 먼지와 유사한 특성(입자 크기와 독성 특성 등)을 갖도록 개선하는 연구가 지속적으로 필요하다.

달 먼지의 특성에 대한 깊이 있는 이해를 바탕으로, 실제 달 먼지와 유사한 특성을 가진 인공 월면토의 개선이 이루어져야 달 탐사 장비의 안전성과 우주인의 건강을 위한 연구에 효과적으로 활용될 수 있으며, 이를 통해 달 환경에서의 먼지 문제를 해결하고, 우주 탐사의 안전성을 높이는 기술 개발에 기여할 수 있을 것이다.

5.2 향후 연구 방향

향후 달 표면 탐사에서 필수적인 연구로는 달 먼지의 입자 크기 분포 특성을 반영한 인공 월면토의 개발과 저주파음과 진동을 활용한 달 먼지 제어 기술의 개발이 수행되어야 할 것이다. 이 두 가지 연구는 달 표면 탐사와 장기 체류의 안전성을 높이는 데 중요한 기여를 할 것으로 기대된다.

달 먼지의 입자 크기 분포 특성을 반영한 인공 월면토의 개발은 달 환경과 유사한 실험 환경을 모사하고, 보다 정확한 실험 데이터를 얻기 위한 핵심적인 기초 연구이다. 실제 달 먼지의 특성을 반영한 인공 월면토 개발은 달 탐사와 관련된 다양한 기술, 특히 먼지 제어 기술의 효율성 평가에 중요한 역할을 한다. 인공 월면토의 입자 크기와 독성 특성을 실제 달 먼지와 유사하게 개선하면, 우주인의 건강과 탐사 장비의 안전성을 높일 수 있다. 달 먼지의 특성을 재현하는 인공 월면토를 개발함으로써, 탐사 장비와 우주인의 건강에 미치는 영향을 미리 예측하고 대응할 수 있으며, 달 먼지로 인해 발생할 수 있는 문제를 해결할 수 있는 기초 자료를 제공할 수 있다. 그러나, 실제 달 먼지와 유사한 크기와 독성을 가진 인공 월면토를 개선하는 과정에는 입자 크기, 화학적 특성, 접착력 등 여러 복잡한 요소를 고려해야 한다는 한계가 있다.

저주파음과 진동을 활용한 달 먼지 제어 기술은 우주인이 선외 활동 후 기지로 복귀하는 과정에서 달 먼지를 효과적으로 제거할 수 있는 실용적인 기술 개발에 중점을 두고 있다. 저주파음과 진동을 활용한 먼지 제어 기술은 우주복이나 장비에서 달 먼지를 제거하는 데 유용하며, 달 탐사 중 우주인의 안전을 확보하는 데 중요한 역할을 할 수 있다. 이러한 기술은 실험적 검증을 통해 상호 보완적으로 사용될 수 있는 잠재력이 크므로, 기술의 실용성과 효율성을 높이는 데 중요한 연구 방향으로 판단된다. 또한, 저주파음을 활용한 기술은 효율적인 먼지 제거가 가능하며, 다른 먼지 제어 기술과의 융합을 통해 효율성을 극대화할 수 있다. 그러나, 효과적인 먼지 제거를 위해서는 최적의 주파수와 강도를 설정하는 것이 중요한 해결 과제이다. 잘못 설정된 주파수나 강도가 우주복이나 장비의 구조적 안정성에 영향을 미칠 수 있으

므로 이를 최적화하는 과정이 필수적이다. 또한, 음파가 반사되거나 전달되는 환경의 제약으로 인해, 우주 환경에서 실용적으로 적용하려면 추가적인 실험과 검증이 요구된다.

입자 크기 분포 특성을 반영한 인공 월면토 개발은 달 탐사 장비와 우주인의 건강에 미치는 영향을 실험적으로 예측하고 대응할 수 있는 기초 데이터를 제공하는 데 큰 기여를 할 것이다. 반면, 저주파음과 진동을 활용한 달 먼지 제어 기술은 실용적인 먼지 제어 기술로서 탐사 및 장기 체류 환경에서 먼지를 제거하는 데 중요한 역할을 할 수 있다. 두 연구는 상호 보완적으로 진행되어야 하며, 인공 월면토 개선과 저주파음 활용 기술이 결합되면 더욱 안전하고 효율적인 달 탐사가 가능할 것으로 판단된다.

6. 결론

달 탐사는 지속 가능한 심우주 탐사의 기반을 마련하는 데 필수적인 과제이다. 이 중에서도 달 먼지는 탐사 및 장기 체류의 안정성과 효율성에 중대한 영향을 미치는 주요 요인으로, 이를 효과적으로 제어하는 기술적 해법이 요구된다. 본 연구는 달 먼지의 특성과 이로 인해 발생하는 문제를 분석하고, 이를 해결하기 위한 제어 기술의 현황과 발전 방향을 제시하였다.

달 먼지는 날카로운 입자와 복잡한 나노구조를 가진 미세 입자로 구성되어 있으며, 높은 화학적 반응성과 자기적 특성을 지니고 있다. 이는 우주비행사의 건강과 탐사 장비의 성능에 심각한 문제를 일으킬 가능성이 높다. 특히, 달 먼지 입자의 95% 이상이 $2\ \mu\text{m}$ 이하의 미세 입자로 이루어져 있어 폐에 침착될 위험성이 크며, 나노상 금속철 입자가 포함되어 있어 장비의 마모와 오작동을 유발할 수 있다. 따라서 달 먼지를 효과적으로 제어하고 탐사 환경을 안전하게 유지할 수 있는 달 먼지 제어 기술의 개발이 필수적이다.

현재 논의되고 있는 주요 제어 기술에는 HEPA 필터, 정전기를 이용한 먼지 제거 장치, 저주파음 및 진동을 활용한 먼지 제어 기술이 포함된다. 특히, 저주파음과 진동을 활용한 기술은 비접촉식 방식으로 달 먼지를 제거하여 장비와 우주복의 손상을 줄이고, 우주비행사의 안전성을 높일 수 있다. 그러나 극한의 달 환경에서 높은 신뢰성과 내구성을 확보하기 위해 먼지의 입자 크기와 독성 특성이 고려된 인공 월면토 개선 연구가 상호보완적으로 수행될 필요가 있다. 인공 월면토 개선 연구는 달 먼지 제어 기술의 효율성을 검증하고, 탐사 장비 및 우주비행사의 건강을 보호하기 위한 실험 환경을 조성하는 데 필수적이다. 특히, 실제 달 먼지와 유사한 입자 크기와 독성 특성을 반영한 인공 월면토는 실질적인 탐사 환경을 모사하여 기술 신뢰성을 높이고, 달 환경에서 발생할 수 있는 문제를 사전에 예측하고 대응할 수 있게 한다.

본 연구는 달 먼지 제어 기술의 중요성을 강조하고 향후 연구 방향을 제시하였다. 이러한 연구는 우리나라의 장기 유인 탐사와 우주기지 설계에서 기초 자료로 활용될 수 있다. 향후, 달 탐사의 안전성을 확보하기 위해 다양한 학문 분야의 협력과 기술 혁신이 필요하다. 또한, 국제 협력을 통해 첨단 기술을 개발하고 이를 실증하는 과정을 지속한다면, 미래의 달 탐사 임무는 더욱 안전하고 성공적으로 수행될 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 과학기술정보통신부 한국건설기술연구원 연구운영비지원([20240182-001] 유인 우주기지 건설 핵심기술 협력 개발(2차년도))로 수행되었습니다.

References

1. Crawford IA, Anand M, Cockell CS, Falcke H, Green DA, et al., Back to the Moon: the scientific rationale for resuming lunar surface exploration, *Planet. Space Sci.* 74, 3-14 (2012). <https://doi.org/10.1016/j.pss.2012.06.002>
2. Besha P, Economic Growth and National Competitiveness Impacts of the Artemis Program (NASA, Washington, DC, 2022).
3. Smith M, Craig D, Herrmann N, Mahoney E, Krezel J, et al., The Artemis program: an overview of NASA's activities to return humans to the moon, in 2020 IEEE Aerospace Conference, Big Sky, MT, 7-14 Mar 2020.
4. Xiao L, Qian Y, Wang Q, Wang Q, The chang'e-5 mission, in *Sample Return Missions: The Last Frontier of Solar System Exploration*, ed. Longobardo A (Elsevier, Amsterdam, Netherland, 2021), 195-206.
5. Li C, Hu H, Yang MF, Liu J, Zhou Q, et al., Nature of the lunar far-side samples returned by the Chang'E-6 mission, *Natl. Sci. Rev.* 11, nwae328 (2024). <https://doi.org/10.1093/nsr/nwae328>
6. Hoshino T, Wakabayashi S, Ohtake M, Karouji Y, Hayashi T, et al., Lunar polar exploration mission for water prospection - JAXA's current status of joint study with ISRO, *Acta Astronaut.* 176, 52-58 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2020.05.054>
7. Goswami JN, Annadurai M, Chandrayaan-1: India's first planetary science mission to the Moon, *Curr Sci.* 486-491 (2009).
8. NASA, NASA's Lunar Exploration Program Overview, NP-2020-05-2853-HQ (NASA, Washington, DC, 2020).
9. Meurisse A, Makaya A, Willsch C, Sperl M, Solar 3D printing of lunar regolith, *Acta Astronaut.* 152, 800-810 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2018.06.063>
10. Cesaretti G, Dini E, De Kestelier X, Colla V, Pambaguian L, Building components for an outpost on the lunar soil by means of a novel 3D printing technology, *Acta Astronaut.* 93, 430-450 (2014). <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2013.07.034>
11. Liu H, Yao Z, Fu Y, Feng J, Review of research into bioregenerative life support system(s) which can support humans living in space, *Life Sci. Space Res.* 31, 113-120 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.lssr.2021.09.003>
12. Grenier A, Giordano P, Bucci L, Cropp A, Zoccarato P, et al., Positioning and velocity performance levels for a lunar lander using a dedicated lunar communication and navigation system, *Navig. J. Inst. Navig.* 69, 1-24 (2022). <https://doi.org/10.33012/navi.513>
13. Sanders GB, Larson WE, Progress made in lunar in situ resource utilization under NASA's exploration technology and development program, *J. Aerosp. Eng.* 26, 5-17 (2013). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)AS.1943-5525.0000208](https://doi.org/10.1061/(ASCE)AS.1943-5525.0000208)
14. Ryu G, Ryu B, In-situ resources utilization technologies for human activities on the Moon, *J. Korean Geo-Environ. Soc.* 23, 41-53 (2022).

15. Kim MJ, Toward coherence: a space sector public-private partnership typology, *Space Policy*. 64, 101549 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.spacepol.2023.101549>
16. Wang X, Pedrycz W, Petrologic characteristics of the lunar surface, *Sci. Rep.* 5, 17075 (2015). <https://doi.org/10.1038/srep17075>
17. Zong K, Wang Z, Li J, He Q, Li Y, et al., Bulk compositions of the Chang'E-5 lunar soil: insights into chemical homogeneity, exotic addition, and origin of landing site basalts, *Geochim. Cosmochim. Acta.* 335, 284–296 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.gca.2022.06.037>
18. Isachenkov M, Chugunov S, Landsman Z, Akhatov I, Metke A, et al., Characterization of novel lunar highland and mare simulants for ISRU research applications, *Icarus*. 376, 114873 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2021.114873>
19. Cain JR, Lunar dust: the hazard and astronaut exposure risks. *Earth Moon Planets*. 107, 107–125 (2010). <https://doi.org/10.1007/s11038-010-9365-0>
20. Scully RR, Meyers VE, Risk of Adverse Health and Performance Effects of Celestial Dust Exposure, No. JSC-CN-33795 (NASA, Washington, DC, 2015).
21. McKay DS, Heiken G, Basu A, Blanford G, Simon S, et al., The lunar regolith, in *Lunar Sourcebook*, eds. Heiken GH, Vaniman DT, French BM (Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1991).
22. Stuart-Alexander DE, Howard KA, Lunar maria and circular basins: a review, *Icarus*. 12, 440–456 (1970). [https://doi.org/10.1016/0019-1035\(70\)90013-8](https://doi.org/10.1016/0019-1035(70)90013-8)
23. Gross J, Treiman AH, Mercer CN, Lunar feldspathic meteorites: constraints on the geology of the lunar highlands, and the origin of the lunar crust, *Earth Planet. Sci. Lett.* 388, 318–328 (2014). <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2013.12.006>
24. Wurz P, Rohner U, Whitby JA, Kolb C, Lammer H, et al., The lunar exosphere: the sputtering contribution, *Icarus*. 191, 486–496 (2007). <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2007.04.034>
25. Housley RM, Cirlin EH, Paton NE, Goldberg IB, Solar wind and micrometeorite alteration of the lunar regolith, in *Proceedings of the 5th Lunar Science Conference*, vol. 3, Houston, TX, 18–22 Mar 1974.
26. Colwell JE, Batiste S, Horányi M, Robertson S, Sture S, Lunar surface: dust dynamics and regolith mechanics, *Rev. Geophys.* 45, 1–26 (2007). <https://doi.org/10.1029/2005RG000184>
27. Park J, Liu Y, Kihm KD, Taylor LA, Characterization of lunar dust for toxicological studies. I: particle size distribution, *J. Aerosp. Eng.* 21, 266–271 (2008). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0893-1321\(2008\)21:4\(266\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0893-1321(2008)21:4(266))
28. Pohlen M, Carroll D, Prisk GK, Sawyer AJ, Overview of lunar dust toxicity risk, *npj Microgravity*. 8, 55 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41526-022-00244-1>

29. Liu Y, Park J, Schnare D, Hill E, Taylor LA, Characterization of lunar dust for toxicological studies. II: texture and shape characteristics, *J. Aerosp. Eng.* 21, 272-279 (2008). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0893-1321\(2008\)21:4\(272\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0893-1321(2008)21:4(272))
30. Darquenne C, West JB, Prisk GK, Dispersion of 0.5- to 2- μm aerosol in μG and hypergravity as a probe of convective inhomogeneity in the lung, *J. Appl. Physiol.* 86, 1402-1409 (1999). <https://doi.org/10.1152/jappl.1999.86.4.1402>
31. Goguen J, Sharits A, Chiamonti A, Lafarge T, Garboczi E, Three-dimensional characterization of particle size, shape, and internal porosity for Apollo 11 and Apollo 14 lunar regolith and JSC-1A lunar regolith soil simulant, *Icarus.* 420, 116166 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2024.116166>
32. Taylor LA, Pieters CM, Britt D, Evaluations of lunar regolith simulants, *Plane. Space Sci.* 126, 1-7 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.pss.2016.04.005>
33. Zhang H, Zhang X, Zhang G, Dong K, Deng X, et al., Size, morphology, and composition of lunar samples returned by Chang'E-5 mission, *Sci. China Phys. Mech. Astron.* 65, 1-8 (2022). <https://doi.org/10.1007/s11433-021-1818-1>
34. Graf JC, Lunar Soils Grain Size Catalog, No. NASA-RP-1265 (NASA, Washington, DC, 1993).
35. Loftus DJ, Tranfield EM, Rask JC, McCrossin C, The Chemical Reactivity of Lunar Dust Relevant to Human Exploration of the Moon (NASA Ames Research Center, Silicon Valley, CA, 2008).
36. Zanon P, Dunn M, Brooks G, Current lunar dust mitigation techniques and future directions, *Acta Astronaut.* 213, 627-644 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2023.09.031>
37. Pieters CM, Noble SK, Space weathering on airless bodies, *J. Geophys. Res. Planets.* 121, 1865-1884 (2016). <https://doi.org/10.1002/2016JE005128>
38. Ryu GU, Kim YJ, Shin HS, Review of the sintering technologies using in-situ resources for lunar construction and future works, *J. Korean Soc. Aeronaut. Space Sci.* 50, 839-856 (2022). <https://doi.org/10.5139/JKSAS.2022.50.12.839>
39. Korotev RL, Irving AJ, Lunar meteorites from northern Africa, *Meteorit. Planet. Sci.* 56, 206-240 (2021). <https://doi.org/10.1111/maps.13617>
40. Kleinhenz J, Sanders G, Lunar in-situ resource utilization concept to reality, in ASCE Earth and Space Conference, online conference, 19-23 Apr 2021.
41. Keller LP, McKay DS, Discovery of vapor deposits in the lunar regolith, *Science.* 261, 1305-1307 (1993). <https://doi.org/10.1126/science.261.5126.1305>
42. Liu Y, Taylor LA, Thompson JR, Schnare DW, Park JS, Unique properties of lunar impact glass: nanophase metallic Fe synthesis, *Am. Mineral.* 92, 1420-1427 (2007). <https://doi.org/10.2138/am.2007.2333>
43. Lomax BA, Conti M, Khan N, Bennett NS, Ganin AY, et al., Proving the viability of an electrochemical process for the simultaneous extraction of oxygen and production of

- metal alloys from lunar regolith, *Planet. Space Sci.* 180, 104748 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.pss.2019.104748>
44. Farries KW, Visintin P, Smith ST, van Eyk P, Sintered or melted regolith for lunar construction: state-of-the-art review and future research directions, *Constr. Build. Mater.* 296, 123627 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123627>
 45. Jin H, Lee J, Zhuang L, Yeom S, Shin HS, et al., Optimized manufacturing process of homogeneous microwave-sintered blocks of KLS-1 lunar regolith simulant, *J. Build. Eng.* 88, 109193 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.job.2024.109193>
 46. Wamelink GWW, Frissel JY, Krijnen WHJ, Verwoert MR, Goedhart PW, Can plants grow on Mars and the moon: a growth experiment on Mars and moon soil simulants, *PLOS ONE*. 9, e103138 (2014). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0103138>
 47. Paul AL, Elardo SM, Ferl R, Plants grown in Apollo lunar regolith present stress-associated transcriptomes that inform prospects for lunar exploration, *Commun. Biol.* 5, 382 (2022). <https://doi.org/10.1038/s42003-022-03334-8>
 48. Linnarsson D, Carpenter J, Fubini B, Gerde P, Karlsson LL, et al., Toxicity of lunar dust, *Planet. Space Sci.* 74, 57-71 (2012). <https://doi.org/10.1016/j.pss.2012.05.023>
 49. Khan-Mayberry N, The lunar environment: determining the health effects of exposure to Moon dusts, *Acta Astronaut.* 63, 1006-1014 (2008). <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2008.03.015>
 50. Zakharov AV, Zelenyi LM, Popel' SI, Lunar dust: properties and potential hazards, *Sol. Syst. Res.* 54, 455-476 (2020). <https://doi.org/10.1134/S0038094620060076>
 51. Lam C, Scully RR, Zhang Y, Renne RA, Hunter RL, et al., Toxicity of lunar dust assessed in inhalation-exposed rats, *Inhal. Toxicol.* 25, 661-678 (2013). <https://doi.org/10.3109/08958378.2013.833660>
 52. Christoffersen R, Lindsay JF, Lunar Dust Effects on Spacesuit Systems: Insights from the Apollo Spacesuits (Johnson Space Center, Houston, TX, 2009).
 53. Gaier JR, The Effects of Lunar Dust on EVA Systems during the Apollo Missions, No. NASA/TM-2005-213610/REV1 (NASA, Washington, DC, 2007).
 54. Moore JS Jr, Mengers DR, Swanson TD, Radermacher R, Costello FA, Low-temperature thermal control for a lunar base, *SAE Trans.* 598-612 (1990).
 55. Toon K, Lee S, Edgerly R, Development of a modified vacuum cleaner for lunar surface systems, in 40th International Conference on Environmental Systems, 6051, Barcelona, Spain, 11-15 Jul 2010.
 56. Berkebile S, Gaier J, Adhesion in a vacuum environment and its implications for dust mitigation techniques on airless bodies, in 42nd International Conference on Environmental Systems, 3465, San Diego, CA, 15-19 Jul 2012.
 57. Cannon KM, Dreyer CB, Sowers GF, Schmit J, Nguyen T, et al., Working with lunar surface materials: review and analysis of dust mitigation and regolith conveyance technologies, *Acta Astronaut.* 196, 259-274 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2022.04.037>

58. Batten SS, Iles GN, Topical: Electrostatic Dust Removal from Spacesuits (NASA, Washington, DC, 2021).
59. Patel S, Veerasamy VS, St. John JP, Orlov A, A comprehensive review on dust removal using electrodynamic shield: mechanism, influencing factors, performance, and progress, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 183, 113471 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113471>
60. Seiffert G, Gibbs B, Removal of electrostatically deposited powders using high intensity low frequency sound part 1: experimental deposition and removal, *J. Low Freq. Noise Vib. Act. Control.* 29, 171-187 (2010). <https://doi.org/10.1260/0263-0923.29.3.171>
61. Seiffert G, Gibbs B, Removal of electrostatically deposited powders using high intensity low frequency sound, part 2: quantification of adhesive and cohesive forces using vibration, *J. Low Freq. Noise Vib Act. Control.* 29, 267-279 (2010). <https://doi.org/10.1260/0263-0923.29.4.267>
62. Park SH, et al. Republic of Korea Patent application, No. 10-2024-0080217, Device, system and method for removing foreign substances of space suit (2024).
63. Zhang K, Wu J, Zhang Y, Shi J, Dust emission evaluation of the flexible metal wheel over lunar terrain and fender effect, *Mech. Based Des. Struct. Mach.* 52, 7522-7547 (2024). <https://doi.org/10.1080/15397734.2024.2303657>
64. National Aeronautics and Space Administration, 50 years ago: Apollo 17 lands at Taurus-Littrow (2022) [Internet], viewed 2024 Oct 20, available from: <https://www.nasa.gov/history/50-years-ago-apollo-17-lands-at-taurus-littrow/>
65. Zeitlin N, Calle C, Hogue M, Johansen M, Mackey electrodynamic dust shield for lunar/ISS experiment project, NASA Kennedy Space Center Technical Report, KSC-E-DAA-TN25543 (2015).

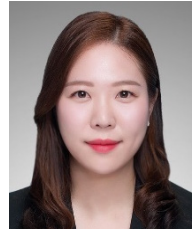
Author Information

엄 예 슬 yseom@kict.re.kr



서울시립대학교 건축공학과에서 2022년 박사 학위를 취득한 후, 현재 한국건설기술연구원 에서 유인우주기지의 내부환경제어를 위한 생명유지시스템(life support system), 설비설계, 및 달 먼지 제어 기술과 관련된 업무를 수행 하고 있다.

김 한 샘 tree@kict.re.kr



한양대학교 도시공학과에서 2010년 석사학위 를 취득했고, 2014년부터 한국건설기술연구원 에서 공간정보를 활용한 도시 인프라 환경 분 석 및 리질리언스 향상 기술 개발 업무를 수행 하였으며, 현재는 디지털 기반 유인 우주기지 건설 시뮬레이션 관련 업무를 수행하고 있다.

박 상 희 sangheepark@kict.re.kr



영국 리버풀대학교에서 2019년 건축음향 박 사학위를 취득한 후, 현재 한국건설기술연구 원 수석연구원으로 근무하고 있다. 음환경을 비롯해 다양한 건축환경(built environment) 에서 재실자의 삶의 질 및 건강 관련 연구를 수행하고 있다.

유 병 현 tnt306@kict.re.kr



한국건설기술연구원에서 극한지(남극, 사막, 우주) 관련 연구를 수행 중이며, 현재 달 현지 자원을 활용한 연구 중에서 월면토 개발을 진 행하고 있다.

정 준 수 jschung@kict.re.kr



한양대학교 건축공학과에서 2006년 박사학위 를 취득한 후, 2006년부터 한국건설기술연구 원에서 박사후연구원과 수석연구원으로 재직 하면서, 장수명/모듈러 주택 및 유인우주기지 관련 연구를 수행하고 있다.