

행성 시료 채취 기술의 연구 동향과 공학적 접근법

Research Trend and Engineering Approach on Extraterrestrial Soil Sampling Technology

유 병 현[†]

Byunghyun Ryu

Received: May 17th, 2022; Revised: May 23rd, 2022; Accepted: June 2nd, 2022

ABSTRACT : Planetary geotechnical investigation in charge of drilling and soil sampling is of a great importance in providing extraterrestrial geotechnical information. Extraterrestrial subsurface investigation, which includes drilling, soil sampling, and sample transportation, will be loaded in a lander or a rover. Scientists from all over the world are interested in the design and development of a drilling system with various functions due to potential applications in planetary surface exploration mission. However, it is difficult to build a fully functional drilling system in extreme environment conditions. This paper presents engineering considerations for the design and development of soil sampling including drilling and performance verification in extreme environment conditions in detail.

Keywords : Planetary, Extraterrestrial, Drilling, Soil sampling, Subsurface investigation

요 지 : 행성 지표에서 시추와 시료 샘플 채취는 행성의 지반 정보를 밝히는데 매우 중요한 역할을 담당한다. 행성 시추장비는 탐사용 착륙선이나 로버에 탑재되어 사용된다. 우주 탐사에서 광범위한 응용 가능성 때문에 전 세계의 과학자들은 다양한 기능의 시추장비의 설계 및 개발에 관심을 보이고 있다. 그러나 우주라는 극한 상황에서 완전한 기능을 갖춘 시추장비를 제작하는 것은 어려운 일이다. 본 논문에서는 지금까지 우주 행성의 극한환경에서 시추를 포함한 시료 채취에 관한 설계 및 제작, 샘플링 방법, 지상검증 등 포괄적인 지반조사 기술 개발 과정과 고려사항에 대해 소개하고자 한다.

주요어 : 행성, 외계, 시추, 시료 채취, 지반 조사

1. 서 론

인류의 우주 활동이 시작된 이래 우주 행성을 탐사하려는 시도는 계속되고 있다. 우주의 기원, 태양계의 형성, 생명체의 진화, 지구 너머 행성의 물과 외계 생명체의 존재 등 수많은 과학적 연구가 진행되고 있다. 우주 행성의 토양은 많은 광물자원 및 희귀 금속(헬륨-3) 등 인간 거주에 꼭 필요로 한 물 추출이 가능한 얼음을 포함하고 있다. 우주 행성의 토양에 대한 화학적인 분석을 통하여 행성의 기원을 찾을 수 있다. 그러나 큰 일교차, 심한 일사량, 높은 풍화도, 심각한 운석 충돌로 인해 우주 행성의 표토는 지구상의 표토와 크게 다르다(Stamen et al., 2019).

우주 행성에 착륙하여 샘플을 수집하고 과학적 정보를 획득하는 것은 행성의 구성 성분을 분석하는 가장 직접적이고 효과적인 방법일 뿐만 아니라 우주 기지를 건설하는 데 필

수적인 방법이다(Zhang et al., 2019). 이것은 인류가 우주 행성에 거주하기 위한 산업 및 기반 시설 건설을 위한 사전 연구이다.

기존의 우주 행성의 지반을 조사하는 방법에는 두 가지 방법이 있는데, 하나는 행성 주위를 도는 인공위성을 활용한 비접촉 탐지와 다른 하나는 지상 관측 레이더 및 탐사로버와 착륙선을 통한 시추 및 토양 샘플을 채취하는 방법이 있다. 인공위성을 이용한 관측은 레이더를 활용하여 대규모 지형 조사와 상세한 지역의 자원 조사를 할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 행성 지층의 다양성과 불균일성에 의해 크게 영향을 받으므로 상세한 토양의 성분 검출에는 적합하지 않다. 행성 시추 장비는 행성의 지반을 직접 시추하여 토양의 정보를 얻을 수 있다. 이러한 시추 장비를 우주로 보내기 위해서는 전력 및 무게에 제한을 둘 수밖에 없다.

우주비행사에 의한 행성 표토 탐사는 태양 복사에너지,

[†] Geotechnical Engineering Research Division, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology (KICT) (Corresponding Author : tnt306@kict.re.kr)

태양풍, 급격한 온도 변화, 고진공 상태 및 저중력과 같은 극한의 환경 조건으로 현재 기술 수준에서 이를 위한 도전적인 연구가 우주강국을 중심으로 활발히 진행되고 있다. 암석을 포함한 지반의 토양 표본을 수집하거나 지반의 지층을 조사하기 위한 다양한 지반 시추 및 샘플 추출 기술은 심우주 탐사에서 점점 더 중요한 역할을 하고 있다. 우주비행사들이 최초로 우주 행성의 토양을 성공적으로 채취한 것은 1969년 아폴로 11호가 달에서 지구로 21.6kg의 토양 샘플을 운반한 것이다. 그 이후로 현장 분석을 위해 행성 토양 샘플을 채취하거나 우주비행사 및 로버를 이용해 지구로 귀환하기 위하여 많은 장비들이 설계 및 개발되었다. 본 논문에서는 이와 관련하여 행성 토양 채취 기술 연구 동향에 대해 소개하고자 한다.

2. 행성 토양 채취 미션

냉전체제 하에서 미국 및 구소련 등 우주 강국을 중심으로 발생한 달 탐사에 관한 관심은 21세기 이후 화성과 소행성 탐사로 초점이 점차 바뀌었다. 행성 표면에 대한 더 나은 이해를 얻은 후 인간은 생명이나 물의 존재 가능성에 대한 더 많은 증거를 찾기 위한 연구를 진행하고 있다. 최근에는 행성 토양 샘플 채취를 위한 시추 장비 및 굴착 장비로 연구 범위가 확장되고 있으며 인류가 행성의 토양 표본 추출 임무에 새로운 패러다임이 붙고 있다.

2.1 달 토양 샘플링 방법

Surveyor 3과 7 착륙선은 행성 토양을 채취 장비를 가진 첫 번째와 두 번째 착륙선이었으며, 1967년과 1968년에 각각 달의 표토를 얻는 것이 목표였던 Regolith Mechanics Surface Sampler이다. 달 토양 탐사에 사용된 토양 채취 장치는 Fig. 1에서 보여주고 있다. 샘플러의 손잡이는 접이식으로 길이 조절이 가능하며 끝 부분에 시료를 채취 할 수 있는 버킷(bucket)으로 구성되어 있다(Scott & Roberson, 1968).

구소련은 로봇을 사용한 채취 장비를 이용하여 달의 토양을 샘플링 한 최초의 국가였으며 수집된 샘플을 과학적 분석을 위해 지구로 가지고 왔다. 1970년, 1972년 및 1976년에 달에 도착한 Luna 16, 20 및 24 임무는 완전 자율 회전 항타 드릴 샘플러를 사용하여 달 토양 샘플을 수집하도록 설계되었다(Basilevsky et al., 2013). Luna 16과 20 미션의 시료 채취 장비는 동일했고 가느다란 로봇 팔의 끝에 부착되어 최대 350mm 깊이까지 샘플 수집을 할 수 있다. Luna 24의 시료 채취 장비는 시추 드릴 도구를 작동시키기 위한



(a) Contingency sampler



(b) Scoop-and tong



(c) Scoop, Small



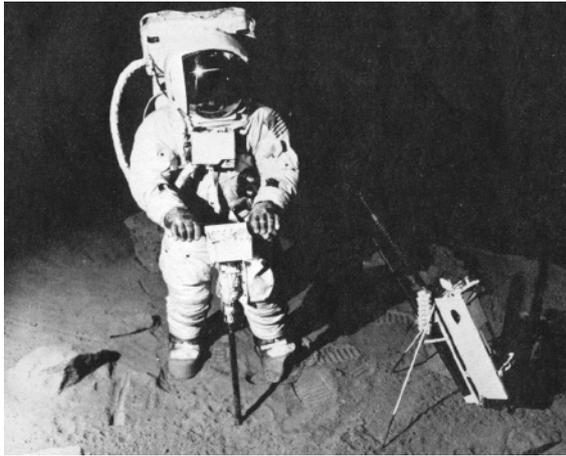
(d) Trenching Tool

Fig. 1. Lunar regolith sampler operated by astronauts in the Apollo missions (Allton, 1989)

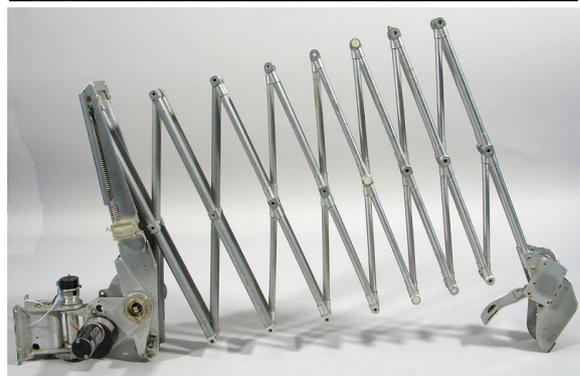
한 쌍의 2.5m 고정 레일로 구성되어 있다는 점에서 차이가 있다(Laul et al., 1982).

미국은 1969년부터 1972년까지 아폴로 프로젝트를 통해 6번의 우주인이 탑승한 달 탐사 임무를 수행하였다. 1970년 소련의 Luna 16은 달 표면의 35cm 깊이까지 채굴하여 101g의 달 토양을 지구로 가져오는 것에 성공했다. 소련에서 실시한 LUNA 16 미션에서는 회전 기능만을 장착한 드릴을 로봇 팔에 장착하여 달 표토 샘플을 채취하였고, LUNA 20 미션에서는 단단한 암석을 부수기 위한 충격장치가 포함되었다. 달 표토 채굴 미션인 LUNA 24 미션에서는 드릴 장치에 기계적 방식의 드릴링을 위한 적응형 메커니즘을 탑재하였다.

구소련의 Luna 프로젝트와 달리 아폴로 임무에서는 모든 달의 표토 샘플을 우주인이 수동으로 수집했다. 아폴로 15-17호 미션에서 지하 샘플을 채취하기 위한 회전 충격식 Apollo Lunar Surface Drill과 같은 여러 유형의 샘플러가 사용되었다. 샘플을 수집하기 위한 코어 튜브, 대량의 표면 샘플을 수집하기 위한 국자형태의 삽도 사용하였다. 2020년 12월에 성공적으로 수행된 중국의 창어 5호 달 탐사 프로젝트는 약 1m를 시추하기 위한 회전 충격식 드릴을 사용하여 달의 토양



(a) Apollo lunar surface drill



(b) Surveyor lander with the regolith mechanics surface sampler



(c) Luna 16/20 with a shallow drill rig



(d) Luna 24 with a deep drill rig

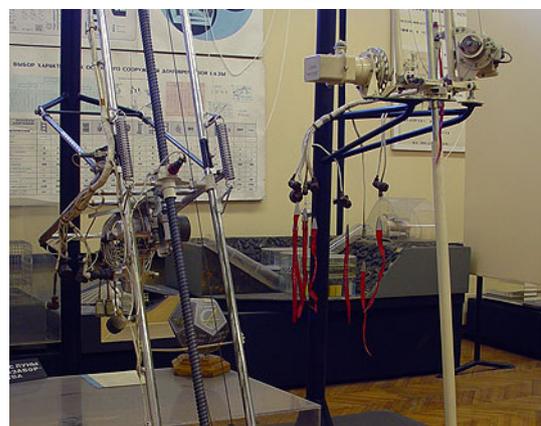
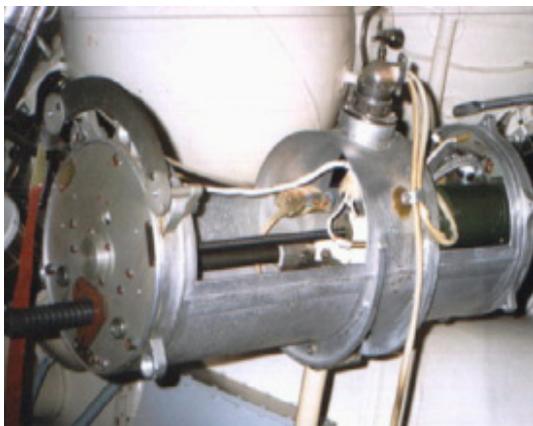
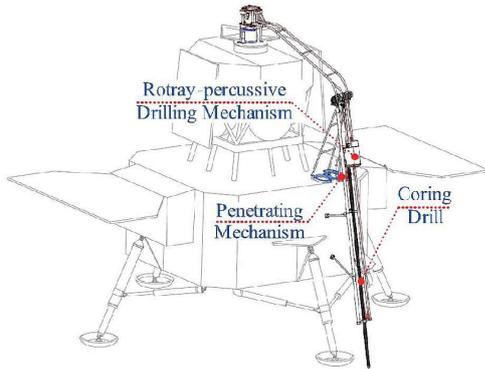


Fig. 2. Robotic regolith sampler in lunar exploration (Source: NASA, USSR Academy of Sciences, National Air and Space Museum, and China Academy of Space Technology)



(e) Chang'E 5 lander with a subsurface drilling sampler and a surface excavating sampler

Fig. 2. Robotic regolith sampler in lunar exploration (Source: NASA, USSR Academy of Sciences, National Airand Space Museum, and China Academy of Space Technology) (Continued)

샘플을 수집하였다.

일본 우주국 JAXA에서 개발한 소행성 탐사선 하야부사의 토양 채취 장치는 Fig. 3과 같다. 2003년 일본은 하야부사 1을 소행성 이토카와에 보냈으며, 2010년 세계 최초로 소행성 샘플을 가지고 돌아온 바 있다. 그리고 분석을 통해 사상 처음으로 그 안에 들어 있는 수분 함량을 측정한 바 있다. 하야부사-2가 가져온 표본은 0.1g 정도의 샘플로 물의 근원을 찾을 수 있는 많은 증거를 확보할 수 있을 것으로 보인다.

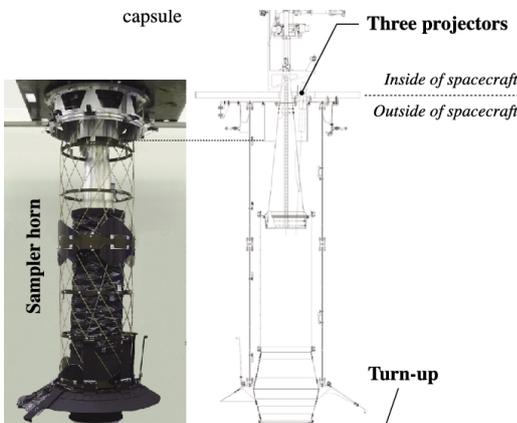


Fig. 3. Hayabusa sampler

2.2 우주 행성 시추장비

지반 시추의 가장 효과적인 접근 방식으로서 시추 샘플러는 수십 년 동안 가장 널리 사용된 방법이었고 모든 유형의 지반에 대한 행성 토양 표본 추출 임무에 적용되었다(Glass et al., 2008; Magnani et al., 2006). 무인 이동 로봇을 이용한 우주 행성 토양 샘플링은 착륙선, 로버 및 우주선 기반의 세 가지로 분류할 수 있다. 샘플링 과정에서 탐사선, 착륙선 또는 우주선이 샘플러에 반력을 제공하기 위해 정지되고 안정적인 시추 작업을 수행하게 된다(Paulsen et al., 2010). 그러나 우주 행성은 환경적 차이와 기술적 어려움으로 인해 모든 유형의 행성에서 샘플링하기 위한 다양한 요구 사항을 충족하는 시추장비를 설계하기가 상당히 어렵다. 전 세계의 과학자와 엔지니어는 다양한 샘플링 조건에 대처할 수 있는 다양한 시료 샘플링 장비를 연구개발하였으며 대부분의 우주 미션에서 시추장비를 이용한 샘플링 기법들이 사용되고 있다. 시추 샘플러는 Fig. 4와 같이 지반을 시추하기 위한 드릴 비트와 시추된 토양을 이송하여 배토하기 위한 나선 오거로 구성된다.

Fig. 5는 토양 샘플 수집용 드릴이며 토양 샘플을 채취하기 위하여 속이 빈 샘플러를 사용하였다.

시추 샘플러는 속이 비어 있는지 여부에 따라 블라인드 드릴과 코어링 드릴로 나눌 수 있다. 두 드릴 모두 시추 과정에서 발생하는 토양을 지표면으로 운송하기 위하여 나선형 날개 형태의 오거를 사용한다. 블라인드 드릴의 경우 오거 날개를 채우는 절삭 칩이 수집되는 샘플이다. 그러나 속이 빈 드릴은 내부에 통합 코어링 장치를 사용하여 표토 샘플을 유지할 수 있다. 코어링 장치가 없는 블라인드 드릴 또는 속이 빈 드릴의 경우, 드릴 스트링을 보관하여 표토 샘플을 보관해야 한다. 그렇지 않으면 샘플 표토를 제거하거나 샘플 처리 시스템으로 옮길 수 있다. 코어링 장치와

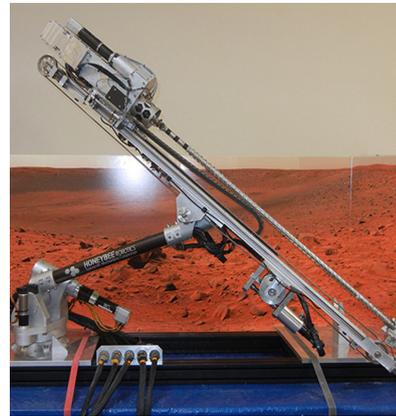


Fig. 4. Robotic arm carried portable Ice-Breaker Drill with high sampling flexibility and a suitable depth (Zacny et al., 2012)



Fig. 5. Auto-Gopher Drill to reach a great drilling depth (Cohen et al., 2016)

통합된 드릴의 경우 샘플링 작업이 완료되면 드릴 스트링을 폐기하여 반환 질량을 줄일 수 있으므로 코어링 장치만 재 활용하면 된다. 예를 들어, 중국 창어 5 미션의 로봇 드릴에서 시추된 표토 샘플을 유지하기 위해 속이 빈 오거 스트링 내부에 부드러운 튜브가 고정되어 있다(Zhang et al., 2021).

극한의 우주환경에서 암석과 단단한 지반을 물리적으로 천공하기 위해 회전식 및 회전식 향타 드릴링 방식이 적용된다(Zacny et al., 2005). 메커니즘의 복잡성 관점에서 회전 드릴은 기계 부품이 적고 극한의 환경에 쉽게 적응할 수 있다. 또한, 적은 전력을 소비하고 회전식 향타 드릴보다 경량으로 만들 수 있다. 그러나 회전식 향타 드릴은 더 낮은 에너지에서 작동하고 훨씬 더 낮은 상호 작용력으로 관통하며 교체가 필요하기 전에 동일한 드릴 비트로 훨씬 더 많은 재료를 뚫는 것이 입증되었다(Zacny et al., 2008). 우주 행성 지반에 대한 드릴링의 경우 로버와 착륙선의 낮은 질량으로 인해 시료 채취 장비는 실제로 적용할 수 있는 비트에 대한 최대 하중이 매우 제한적이다(Backes et al., 2006). 낮은 반력으로 관통하는 효율적인 천공은 충격 메커니즘으로 회전 드릴을 보강하는 것이다. 그러나 결과적으로 전력 소비와 메커니즘 복잡성도 증가한다(Hironaka et al., 2010).

다중 스트링 연결은 심도가 높은 샘플링을 수행하기 위해

행성 표토 획득에 대해 가장 널리 연구된 기술이다. 일반적으로 오거의 직경에 따라 두 가지 종류가 있다. 첫 번째 유형의 드릴 직경은 동일하며 오거 파이프는 다중 파이프 저장 및 이송 메커니즘을 통해 연결된다. 예로는 2007년 Beihang University에서 개발한 로봇 Multi-Rod Deep Driller와 Apollo Lunar Surface Drill(Zacny & Cooper, 2006)이 있다. 두 번째 유형은 오거의 직경이 다르며, 화성 지하 표면의 200m 침투 및 샘플링을 위해 NASA에서 제안한 개념적 드릴링 시스템이 있다. 드릴링 샘플러는 가장 단단한 암석을 만나도 탁월한 절삭 효율, 깊은 샘플링에 도달하기 위한 높은 시추능력, 다양한 플랫폼과의 우수한 통합성, 지층 깊이 정보를 유지하는 우수한 능력과 같은 매우 중요한 이점을 가지고 있다. 그러나 제한된 샘플링 볼륨, 절삭칩과 공벽과의 마찰, 윤활 유 없이 고온으로 인한 열적 손상 등의 다양한 문제를 발생시킬 수 있다.

3. 극한 우주환경에서 시추장비 조건

최근 수십 년 동안 우주 기술에서 큰 발전을 이루었지만 여전히 광대한 우주를 탐험하는 초기 단계이다. 현재 우주 탐사를 위한 과학 기술 수준은 여전히 제한적이며 심우주의 모든 제약 조건을 극복하기 위해서는 풀어야 할 문제점들이 있다. 최적의 샘플링 위치를 선택하기 위해 사전에 지층 이미지 스캐닝을 수행하여야 한다. 그러나 우주 행성의 시추 샘플링은 지구에서 매우 멀리 떨어져 있고 환경 조건도 지구의 환경에 비해 가혹하기 때문에 완전히 다르다. 우주 행성에서의 샘플링은 주로 제한된 전력, 에너지 및 질량을 포함하는 큰 도전과 제약에 직면해 있다. 중력 가속도, 큰 온도 변화 또는 극한 온도, 고진공, 샘플링 할 표토의 지질학적 불확실성 등의 다양한 문제점을 극복하여야 한다(Zacny et al., 2011).

3.1 우주 환경 시추 장비의 기술적 특징

우주 환경 시추 장비는 경량, 소형화, 저전력 소모와 같은 우수한 성능을 보유하며 극한의 환경에서 구동하기 위한 설계 및 장비 제작 기술이 요구된다.

3.1.1 무게 제한

지구에서 달 까지 1kg의 물체를 실어서 운반하는 데는 수 천 달러가 들어가며 현재 로켓을 쏘아 올리는 경제적인 비용으로 인하여 가능한 가벼운 장비가 요구된다. 시추 장비의 재료 특성 및 시스템 설계 및 제조 방법에 따라 장비의

질량에 영향을 준다. 예를 들어 Luna 24 착륙선의 2m 샘플링 장치의 무게는 55kg 미만이고, Phoenix 착륙선의 로봇 굴착 암의 무게는 9.7kg 미만이다(Zacny et al., 2011).

3.1.2 크기 제한

우주로 시추용 샘플링 장비를 이송하기 위하여 협소한 로켓의 공간에 제약을 받는다. 대부분의 장비는 폴딩 형태로 접어서 로켓에 탑재되며 우주 행성 지표에서 장비를 펼치게 되는 형태로 구성되어 있다. 예를 들어 Exo-Mars 2022 로버에 탑재된 토양 샘플링 장치는 로봇 드릴의 전체 길이를 줄이기 위해 다중 구조로 설계하였다(Zacny et al., 2007).

3.1.3 신뢰성 검증

신뢰성 검증은 우주 행성에서 매우 중요한 문제이다. 토양 채취 장비는 행성 지반의 토양과 드릴 비트의 접촉 및 상호 작용으로 구동하기 때문에 고장의 위험성이 매우 크다. 오거와 질삭된 토양과의 마찰로 인하여 시추공에 오거가 끼이는 현상으로 인한 미션 실패의 경우도 있다. 전체적인 시스템의 관점에서 보면 시스템 구성이 복잡할수록 오작동이 더 발생할 수 있다. 우주용 행성 토양 채취를 위하여 안정적인 샘플링이 가능한 시추 장비 구축이 매우 중요하다.

3.2 시추 장비의 우주 행성 환경 적응성

우주 행성의 환경 조건은 저중력, 극저온, 기압 및 표면 온도의 급격한 차이 등 지구보다 가혹한 환경이다. 또한 지질학적 불확실성과 다양성은 토양 샘플 추출 작업에 상당한 어려움을 가지고 있다. 이러한 차이점으로 인해 행성 시추 및 장비는 극한의 행성 환경에서 안정적으로 작동하기 위해 우수한 환경 적응성을 갖추고 있어야 한다.

3.2.1 저중력 및 무중력 환경

우주 행성에서는 지구환경과 다른 저중력 또는 무중력 상태이며 이러한 환경에서 행성 시추를 위한 드릴링은 반력의 감소로 인한 시추 성능 감소를 발생시킬 수 있다. 우주 환경에서 중력 가속도는 토양 샘플링 방법을 결정하는 주요 인자이다. 예를 들어 화성과 달의 중력은 각각 지구의 약 1/3과 1/6이다. 대부분의 우주 행성의 토양 샘플 추출 작업은 중력이 낮은 조건이며, 따라서 낮은 반력을 가진 샘플링 방법을 사용해야 한다(Hironaka et al., 2010).

3.2.2 극한 온도 조건

행성의 온도 조건은 토양의 특성뿐만 아니라 열 생성, 전달 및 소산 과정에도 상당한 영향을 준다. 극한의 온도와

오랜 기간의 온도변화에 따라 행성 표토의 특성은 다양하다. 달 표면의 경우 밤에는 -180°C , 낮에는 130°C 에 이르는 등 급격한 온도차를 보인다(Zacny et al., 2007). 드릴링 장비의 온도 제어는 설계 단계에서 고려해야 하는 중요한 요소이다.

3.2.3 대기압

행성의 대기압은 착륙선이나 탐사선의 착륙 방식에 영향을 미칠 뿐만 아니라 압력이 극도로 낮은 경우 지반 시추 장비의 작동을 제한할 수 있다. 일반적으로 다공성 및 미립자 토양 입자의 경우 가스 대류가 열 전달 과정을 방해한다. 그러나 달 표면의 기압과 같은 낮은 압력이나 진공 상태에서 입자는 완전히 탈기되며 열은 입자 사이의 고체 전도와 복사를 통해서만 전달된다. 깊은 지반의 드릴링 및 샘플링 작업에서 비트와 지반 상호작용에 의해 축적된 마찰열이 분산되기 어렵다. 따라서 드릴 도구가 과열되어 비트가 손상되거나 토양 샘플의 과열로 인해 과학적 정보가 손실될 수 있다.

3.2.4 우주 행성 지반 구조의 불확실성

우주 행성의 지반 공학적 분석은 토양 샘플을 수집하고 분석하는 것만으로는 부족하다(Zacny et al., 2006). 화학성분 및 광물 조성, 입도 분포, 지반 강도, 온도 분포 및 우주 환경에 의한 장기간의 노출된 우주 행성 지반의 특성은 지구의 환경과는 차이가 있다. 우주 행성 지반의 밀도, 강도, 기계적 및 열적 특성은 위치 및 심도에 따라 다르다. 따라서 지반 구조 특성을 분석하기 위한 행성 지반 시추 장비는 다양한 조건을 처리할 수 있어야 하며 작업을 제어하는 데 사용되는 기술은 다양한 극한 상황을 예상하고 처리해야 한다.

4. 극한 환경 성능 검증

행성 탐사를 실행하기 위해 우주로 발사될 모든 장비는 탐사 기간 동안 임무를 수행하기 위해서 지상에서 여러 가지 검증시험을 수행한다. 일반적으로 초기 체계개발모델(EM, Engineering Model), 중기 인증모델(QM, Qualification Model), 최종 비행모델(FM, Flight Model)까지 여러 검증 시험을 반복해야 한다. 지상 검증에서 과학자와 엔지니어는 일반적으로 행성 시료 채취 장비의 운영 성능을 평가하기 위하여 실험실 규모의 행성 지반 환경을 모사한 시험 환경을 구현한다(Zhang et al., 2021). 행성 지반이 구현된 실험 환경은 객관적이고 포괄적인 테스트 결과를 제공하기 위해 대상 행성 지반 환경과 유사해야 한다. 그러나 현재의 항공우주 기술

에서는 완전히 동일한 행성 지반 환경을 구현하는 것은 거의 불가능하다.

4.1 우주 환경 시험 조건

지상 검증 시 행성의 지상 환경을 구현하기 위해 실제 행성의 토양 시료가 필요하다. 우주 행성 탐사 미션으로 채집해 온 적은 양의 토양으로는 지상 환경 구현이 불가하여 대부분의 우주 개발 국가들은 행성 토양과 물리적 화학적 특성이 유사한 인공의 행성 토양을 개발하여 지상 검증 실험에 폭 넓게 활용하고 있다. 과학 연구 및 우주 미션 성공을 위하여 전 세계의 엔지니어와 과학자는 JSC-1A(Arslan et al., 2010), CAS-1(Zheng et al., 2009), KLS-1(Ryu et al., 2018)와 같은 다양한 천체 또는 지질 조건에 대한 많은 행성 인공 토양을 제작하였다(Gouache et al., 2010). 이러한 인공 토양은 다양한 광물 및 화학 성분, 입도 분포 및 모양, 밀도가 유사하도록 제작되었다. 지상 환경 검증에서 행성 시료 채취 장비의 성능 검증을 위해서는 행성 환경에 적합한 인공 토양을 선택하는 것이 매우 중요하다. 예를 들어, 우주 행성 지반의 특성은 깊이에 따라 달라지기 때문에 표면 굴착 및 지하 드릴링 테스트의 환경은 달라야 한다.

4.1.1 지구 환경 구동 프로세스 최적화 시험

운동학적 및 작동 성능, 구조적 신뢰성, 기계적 특성, 저중력 적응성, 피로 및 내구성 성능, 진동 및 충격 저항과 같은 행성 표토 샘플링 작업의 대부분의 매개변수에 대한 가장 일반적인 시험 환경이다. 일련의 연속 깊이 증가에 대한 샘플링 속도, 가속도, 힘, 전력 소비 및 도구 마모를 모니터링할 수 있으며 이러한 테스트를 통해 잠재적인 단점을 찾을 수 있다(Zhang & Ding, 2017). 샘플링 도구의 기하학적 특징, 토양의 기계적 및 열-물리적 특성, 작동 매개변수는 반응 하중에 큰 영향을 미치므로 이러한 테스트에서 확인해야 한다(Zacny & Cooper, 2007). 또한 임계 회전 속도(Zacny et al., 2006), 재밍(Jamming) 현상(Tang et al., 2017), 토양 이송 거동 및 안정적인 시추 성능(Zhao et al., 2016; Tian et al., 2015)과 같은 중요한 작업도 이 프로세스 동안 반복적으로 최적화해야 한다.

4.1.2 열-진공 환경시험

열-진공 환경시험은 진공 적응성 및 열 내구성에 대한 우주 장비의 특성을 분석하기 위함이다. 첫째는 변속기 조인트, 전자 장치 및 진공 내부의 고체 윤활의 작동 성능을 검증하는 데 사용된다(Zacny et al., 2002). 둘째는 극한의 온도에서 열적 생존 능력을 검증하고 시추장비-토양의 상호 작

용 중에 생성된 열이 제 시간에 소산될 수 있도록 보장하는데 사용된다. 빠른 비트의 회전과 토양과의 접촉을 통한 얇은 샘플링의 경우 샘플링 도구의 온도 변화는 미미하다. 그러나 깊은 지하 드릴링에서의 열 발생은 비트 커트에 국한되어 상호 작용이 길고 발생된 열을 발산하기 어렵다(Zhang et al., 2019). 따라서 행성 지반 샘플 채취 장비는 우수한 열전도율 설계에 주의를 기울여야 하며 작동 온도를 엄격하게 제어해야 한다. 예를 들어, 동결된 JSC-1A 인공 월면토를 사용한 진공 챔버의 달 시추 샘플러 테스트(Zacny et al., 2002), Ross Island의 달 지상 환경 사이트에서 Lunar Vader 드릴 테스트(Cui et al., 2017)와 같은 최근 몇 년 동안의 다양한 연구가 진행되었다(Paulsen et al., 2011). 화성 시추 시뮬레이션 중 비트 및 암석 전체에 대한 열 응답 테스트, 열 진공 챔버 내부의 Lunar Prospecting Drill로 시추 과정 중 휘발성 물질 손실 테스트(Kleinhenz et al., 2015), 달의 극한 온도 구현 환경에서 달의 표토 또는 암석을 모사한 심층 드릴 등이 있다(Cui et al., 2014).

4.1.3 저중력 환경시험

우주 행성 지반의 샘플링은 무중력 및 저중력 환경에서 수행된다. 그러나 지상 환경 실험에서 중력은 샘플링 과정에서 토양 입자의 움직임에 큰 영향을 미치고 샘플링 성능에 영향을 미친다. 따라서 작동 성능을 확인하기 위해 저중력 환경에서 샘플링 테스트를 수행하기도 한다. 무중력을 모사하는 방법에는 드롭 타워, 무중력 항공기, 수상 또는 공기 부유식 방법, 서스펜션 방법, 저밀도 재료를 사용한 질량 감소 방법 등 여러 가지가 있다. 토양 입자의 경우 드롭 타워와 무중력 항공기는 최소의 잔류 중력 가속도를 사용하여 우주에서 무중력 환경을 모사할 수 있으므로 샘플 이동에 대한 무중력 환경을 제공할 수 있다. 예를 들어, 일본 Hayabusa 샘플러는 Bremen Drop Tower에서 테스트되었으며, OSIRIS-Rex 샘플러는 NASA의 Mc Donnell Douglas C-9 및 Zero-G Corp.의 Boeing 727에서 테스트하였다(Shi et al., 2011).

4.2 우주 환경 행성 샘플의 신뢰성

극한의 우주 환경에서 행성 토양의 물리적, 생화학적 및 열-물리적 특성에 대한 탐사는 행성 광물 자원 이용 연구를 위한 기초자료를 제공할 수 있다(Bierhaus et al., 2018). 핵심은 지반을 시추하여 깊이에서 토양 샘플을 얻고 시험 및 분석을 수행하여 현장 특성을 분석하여야 한다. 얼음과 같은 휘발성 물질은 독특한 행성 지층 환경으로 인해 생명체 또는 행성 진화에 대한 필수적인 단서를 포함할 수 있으며 특정 깊이의 토양에 남아 있을 수 있다.

4.2.1 불교란 시료 샘플링

지구의 지질구조와 유사하게, 외계 행성도 내부 및 외부의 동적 지질학적 과정을 가지고 있다. 지반의 지층별 정보는 환경 풍화, 침식, 광물 퇴적 등을 포함하여 수백만 년 동안 행성의 진화적 증거를 기록하기 때문에 유용하다. 현재 표토 샘플링 임무에서는 지층 정보를 유지하는 것을 거의 고려하지 않은 반면, 지하 샘플링에서는 주상도 유지를 매우 중요하게 고려하고 있다. 지금까지 소련의 Luna 24 임무와 중국의 창어-5 임무만이 섬세한 샘플링 방법을 설계하여 불교란 시료를 샘플링할 수 있는 유연한 튜브를 사용하였다.

4.2.2 압력 유지

기압과 주변 압력 모두 수집된 토양 샘플의 특성에 영향을 미친다. 기압은 입자 내부와 입자 사이의 공간과 열 및 물질 전달에 영향을 미치는 반면, 주변 압력은 토양 샘플의 압축 및 변형에 영향을 미친다. 응력 방출로 인해 원래의 토양 샘플은 자연스럽게 땅으로 가져올 때 부서지고 유효하지 않은 샘플이 된다. 토양 표본 추출 임무에서 교란된 시료는 과학적 품질을 저하시켰으며, 이는 실제 행성 지반의 지질학적 지층 구조, 물리적 및 화학적 특성 또는 기타 특성을 반영할 수 없다. 그 결과, 토양 샘플을 기반으로 한 자원 및 구성 정보의 추정 데이터는 과학적으로 얻을 수 없다. 원래 압력을 유지할 수 있는 메커니즘이나 장치를 설계하는 것은 행성 표토 샘플링에 매우 중요한 기술이다.

4.2.3 온도·빛·수분 유지

온도는 행성 토양의 특성과 행성 생명체의 생존 조건을 지배하는 중요한 요소이다. 행성 토양에서 미생물, 박테리아 및 바이러스의 존재는 항상 우주 탐사의 문제였으며 점점 더 많은 관심을 끌고 있다. 그러나 이러한 미생물의 대부분은 압력, 온도, 습기 및 빛에 민감하다. 원래 위치에서 아무렇게나 토양 샘플을 채취하면 존재할지 모르는 생명체가 죽을 수 있으므로 과학적 연구의 기회를 잃을 수 있다. 기계적 방법만 사용하여 이 목표를 달성하는 것은 거의 불가능하다. 기계적, 물리적, 화학적 및 생물학적 수단을 결합하여 현장 온도, 빛 및 습기를 유지하는 것은 표토 샘플의 과학적 정보를 유지하는 데 중요하다.

5. 결 론

우주 행성은 풍부한 광물 및 에너지 자원을 포함하고 있으며 인간 사회의 장기적 지속 가능한 발전을 위한 밑거름

이 될 수 있다. 행성 자원의 탐사와 활용은 피할 수 없는 추세이자 인류 사회의 발전에 지대한 영향을 미친다. 미국, 중국, 일본과 같이 전통적으로 항공우주 기술이 강한 국가들은 우주 행성 토양에서 광물, 물 및 휘발성 자원을 탐사하기 위해 경쟁하고 있다. 우리는 지금까지 우주 행성의 표면 탐사를 위한 미션을 주로 수행해 왔다. 앞으로 우주 행성의 다양한 샘플링 및 깊은 심도의 시추를 위하여 우주 행성 시료 채취 장비를 설계하고 제작해야 한다. 우주 행성 자원 채취는 세계 각국의 연구자에 의하여 기술의 놀라운 발전을 이루었다. 행성 토양 샘플러를 적용하여 위대한 과학적 발견이 이루어졌지만 행성 표토 영역의 더 많은 미스터리는 여전히 인간의 추가 탐사를 기다리고 있다. 우주 행성 자원 탐사를 위한 시추 장비의 개발은 실제 우주행성으로 운송을 고려하여 경량, 고집적 형태로 제작되어야 하며, 우주 환경에서 운용을 고려하여 저전력, 고효율, 고성능 형태로 구현이 가능하며 우주의 극한 환경은 저중력과 급격한 온도변화를 극복하기 위한 조건을 만족하여야 한다. 행성 탐사의 다양한 미션과 함께 행성 토양 채취 장비는 미래에 우주에 대한 우리의 도전 과제이며 더 많은 노력을 위한 보완 연구를 진행할 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술정보통신부 한국건설기술연구원 연구운영비지원(주요사업)사업으로 수행되었습니다(과제번호 20220124-001, 극한건설 환경 구현 인프라 및 TRL6 이상급 극한건설 핵심기술 개발).

References

1. Allton, J. (1989), Catalog of Apollo lunar surface geological sampling tools and containers, Prepared for NASA/JSC Solar System Exploration Division, Contract NASA 9-17900, Job Order J2-J60 pp. 5~13.
2. Arslan, H., Batiste, S. and Sture, S. (2010), Engineering properties of lunar soil simulant JSC-1A, Journal of Aerospace Engineering, Vol. 23 pp. 70~83.
3. Basilevsky, A. T., Ivanov, B. A., Ivanov, A. V. and Head, J. W. (2013), Clarification of sources of material returned by Luna 24 spacecraft based on analysis of new images of the landing site taken by lunar reconnaissance orbiter, Geochemistry International, Vol. 51, pp. 456~472.
4. Backes, P., Khatib, O., Diaz-Calderon, A., Warren, J., Collins, C. and Chang, Z. (2006), Concept for coring from a low-mass rover, 2006 Aerospace Conference, IEEE, Big Sky, Montana,

- USA, pp. 1~10.
5. Bierhaus, E. B., Clark, B. C., Harris, J. W., Payne, K. S., Dubisher, R. D., Wurts, D. W., Hund, R. A., Kuhns, R. M., Linn, T. M., Wood, J. L., Dworkin, J. P., Beshore, E. and Lauretta, D.S. (2018), The OSIRIS-REx spacecraft and the touch-and-go sample acquisition mechanism (TAGSAM), *Space Science Reviews*, Vol. 214, No. 107, pp. 1~46.
 6. Cohen, B., Badescu, M., Lee, H. J., Sherrit, S., Zacny, K., Paulsen, G., Beegle, L. Bao, X. (2016), Auto-Gopher-2 - Wireline Deep Sampler Driven by Percussive Piezoelectric Actuator and Rotary EM Motors, *Advances in Science and Technology*, Vol. 100, pp. 207~212.
 7. Cui, J., Hou, X., Zhao, D., Hou, Y., Quan, Q., Wu, X., Deng, Z., Jiang, S. and Tang, D. (2014), Thermal simulation and experiment of lunar drill bit in vacuum, *Indonesian Journal of Electrical Engineering Computer Science*, Vol. 12, No. 6, pp. 4756~4763.
 8. Cui, J., Hou, X., Deng, Z., Pan, W. and Quan, Q. (2017), Prediction of the temperature of a drill in drilling lunar rock simulant in a vacuum, *Thermal Science*, Vol. 21, No. 2, pp. 989~1002.
 9. Gouache, T. P., Brunskill, C., Scott, G. P., Gao, Y., Coste, P. and Gourinat, Y. (2010), Regolith simulant preparation methods for hardware testing, *Planetary and Space Science*, Vol. 58, pp. 1977~1984.
 10. Glass, B. J., Thompson, S. and Paulsen, G. (2005), Robotic planetary drill tests, 10th International Symposium on Artificial Intelligence, JAXA, Sapporo, Japan, pp. 1~7.
 11. Hironaka, R. and Stanley, S. (2010), Lightweight low force rotary percussive coring tool for planetary applications, 40th Aerospace Mechanisms Symposium, NASA Kennedy Space Center, Florida, USA, pp. 17~30.
 12. Kleinhenz, J.E., Paulsen, G., Zacny, K. and Smith, J. (2015), Impact of drilling operations on lunar volatiles capture: Thermal vacuum tests, 8th Symposium on Space Resource Utilization, Kissimmee, Florida, USA, pp. 1~13.
 13. Laul, J. C., Papike, J. J. and Simon, S. B. (1982), The lunar regolith-comparative studies of the Apollo and Luna sites. Chemistry of soils from Apollo 17, Luna 16, 20, and 24, 12th Lunar and Planetary Science Conference, Vol. 12B, Houston, Texas, USA, pp. 371~388.
 14. Magnani, P. G., Re, E., Senese, S., Cherubini, G. and Olivieri, A. (2006), Different drill tool concepts, *Acta Astronautica*, Vol. 59, pp. 1014~1019.
 15. Paulsen, G., Zacny, K., McKay, C., Shiraishi, L., Kriechbaum, K., Glass, B., Szczesiak, M., Santoro, C., Craft, J. and Malla, R. B. (2010), Rotary-percussive deep drill for planetary applications, *Earth and Space 2010: Engineering, Science, Construction, and Operations in Challenging Environments*, Honolulu, Hawaii, USA, pp. 1423~1436.
 16. Paulsen, G., Zacny, K., Szczesiak, M., Santoro, C., Mellerowicz, B., Craft, J., McKay, C., Glass, B., Davila, A. and Marinova, M. (2011), Testing of a 1 meter Mars Icebreaker drill in a 3.5 meter vacuum chamber and in an Antarctic Mars analog site, AIAA Space 2011 Conference & Exposition, Long Beach, California, USA, pp. 7236~7324.
 17. Ryu, B. H., Wang, C. C. and Chang, I. H. (2018), Development and Geotechnical Engineering Properties of KLS-1 Lunar Simulant, *Journal of Aerospace Engineering*, Vol. 31, pp. 04017083 (1~11).
 18. Scott, R. F. and Roberson, F. I. (1968), Soil mechanics surface sampler: Lunar surface tests, results, and analyses, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 73, No. 12, pp. 4045~4080.
 19. Shi, H., Duan, L. and Li, T. (2011), Analysis of thermal field on the process of auger drilling simulative lunar soil, *Geological Science and Technology Information*, Vol. 30, No. 6, pp. 138~141 (in Chinese).
 20. Stamenković, V., Beegle, L., Zacny, K., Arumugam, D., Baglioni, P., Barba, N., Baross, J., Bell, M., Bhartia, R. and Blank, J. (2019), The next frontier for planetary and human exploration, *Nature Astronomy*, Vol. 3, pp. 116~120.
 21. Tang, J., Quan, Q., Jiang, S., Liang, J., Lu, X. and Yuan, F. (2017), Investigating the soil removal characteristics of flexible tube coring method for lunar exploration, *Advances in Space Research*, Vol. 61, No. 3, pp. 799~810.
 22. Tian, Y., Tang, D., Deng, Z., Jiang, S. and Quan, Q. (2015), Drilling power consumption and soil conveying volume performances of lunar sampling auger, *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 28, pp. 451~459.
 23. Zacny, K. A. and Cooper, G. A. (2005), Strategies for drilling on Mars, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 1 pp. 1~10.
 24. Zacny, K. A. and Cooper, G. A. (2007), Coring basalt under Mars low pressure conditions, *International Journal of Mars Science and Exploration*, Vol. 3, pp. 1~11.
 25. Zacny, K., Bar-Cohen, Y., Brennan, M., Briggs, G., Cooper, G., Davis, K., Dolgin, B., Glaser, D., Glass, B. and Gorevan, S. (2008), Drilling systems for extraterrestrial subsurface exploration, *Astrobiology*, Vol. 8, pp. 665~706.
 26. Zacny, K., Bartlett, P., Davis, K., Glaser, D., Gorevan, S. and the CRUX Project Team (2006), Test results of core drilling in simulated ice-bound lunar regolith for the subsurface access system of the Construction & Resource Utilization eXplorer, *Earth & Space 2006*, League City/Houston, Texas, USA, pp. 1~8.
 27. Zacny, K., Paulsen, G., Szczesiak, M., Craft, J., Chu, P., McKay, C., Glass, B., Davila, A., Marinova, M., Pollard, W. and Jackson, W. (2012), LunarVader: Testing of a 1 meter lunar drill in a 3.5 meter vacuum chamber and in the Antarctic lunar analog site, *Journal of Aerospace Engineering*, pp. 1~9.
 28. Zacny, K. and Cooper, G. (2006), Considerations constraints and strategies for drilling on Mars, *Planetary and Space Science*, Vol. 54, No. 4, pp. 45~356.
 29. Zacny, K., Paulsen, G. and Szczesiak, M. (2011), Challenges and methods of drilling on the Moon and Mars, 2011 Aerospace Conference, IEEE, Big Sky, Montana, USA, pp. 1~9.
 30. Zacny, K. and Cooper, G. (2007), Coring basalt rock under simulated Martian atmospheric conditions, *Mars*, Vol. 3, pp. 1~11.
 31. Zacny, K., Quayle, M., McFadden, M., Neugebauer, A., Huang, K. and Cooper, G. (2002), A novel method for cuttings removal from holes during percussive drilling on Mars, *Revolutionary Aerospace Systems Concepts-Academic Linkage*, Cocoa Beach, Florida, USA, pp. 107~121.
 32. Zacny, K., Quayle, M., McFadden, M., Neugebauer, A., Huang, K. and Cooper, G. (2002), A novel method for cuttings removal from holes during percussive drilling on Mars, *Revolutionary Aerospace Systems Concepts-Academic Linkage*, Cocoa Beach, Florida, USA, pp. 107~121.
 33. Zhang, T., Ding, X., Liu, S., Xu, K. and Guan, Y. (2019), Experimental technique for the measurement of temperature

- generated in deep lunar regolith drilling, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 129, pp. 671~680.
34. Zheng, Y., Wang, S., Ouyang, Z., Zou, Y., Liu, J., Li, C., Li, X. and Feng, J. (2009), CAS-1 lunar soil simulant, *Advances in Space Research*, Vol. 43, pp. 448~454.
 35. Zhao, D., Tang, D., Hou, X., Jiang, S. and Deng, Z. (2016), Soil chip convey of lunar subsurface auger drill, *Advances in Space Research*, Vol. 57, pp. 2196~2203.
 36. Zhang, T., Zhang, Y., Xu, K., Ding, X., Wei, H., Chao, C., Wang, B. and Wang, B. (2021), Robotic drilling tests in simulated lunar regolith environment, *Journal of Field Robotics*, Vol. 38, pp. 1011~1035.
 37. Zhang, T., Chao, C., Yao, Z., Xu, K., Zhang, W., Ding, X., Liu, S., Zhao, Z., An, Y., Wang, B., Yu, S., Wang, B. and Chen, H. (2021), The technology of lunar regolith environment construction on Earth, *Acta Astronautica*, Vol. 178, pp. 216~232.
 38. Zhang, T., Xu, K., Yao, Z., Ding, X., Zhao, Z., Hou, X., Pang, Y., Lai, X., Zhang, W., Liu, S. and Deng, J. (2019), The progress of extraterrestrial regolith-sampling robots, *Nature Astronomy*, Vol. 3, pp. 487~497.
 39. Zhang, T. and Ding, X. (2017), Drilling forces model for lunar regolith exploration and experimental validation, *Acta Astronautica*, Vol. 131, pp. 190~203.