Global Report

화성 인프라 건설을 위한 현장 자원: 검토

1. 개요
2. 화성 환경
3. 화성 인프라 건설을 위한 현장 자원
4. 화성에서 가능한 건설 기술
5. 도전과 기회
6. 결론

KAIA 국토교통 과학기술진흥원

작성자 | 최재승

1. 개요

1.1 배경

화성은 태양계의 행성 중 하나이고 태양으로부터 네 번째 행성이다. 화성의 자전 주기와 황도면에 대한 자전축의 기울기가 지구와 비슷하기 때문에, 화성의 날과 계절은 지구와 매우 비슷하다. 화성의 이러한 특징과 독특한 지세(topography) 및 지형(landforms)들은 화성 탐사와 미래의 화성 이민 가능성에 지대한 관심을 불러일으켰다. 지금까지 화성은 지구 다음으로 사람들에 의해 가장 잘 알려진 행성이다. 많은 양의 귀중한 데이터와 이미지를 얻기 위해 30개 이상의 탐사선이 화성에 도달했고 화성에 대한 상세한 조사를 수행했다. 앞으로 화성의 외부 환경조건과 내부구조 탐사를 목표로 세계 여러 나라의 화성탐사 임무가 계속 진행돼 인간 화성탐사를 더욱 현실화할 수 있는 토대를 마련하게 될 것이다.

1.2 화성 탐사의 역사

화성 탐사는 1960년 소련이 첫 탐사선 화성 1960A를 발사하면서 시작되었는데, 이 탐사선은 실패했지만 화성에 대한 인류 탐사의 시작으로 기록되었다. 1960년대부터 1990년대까지 화성 탐사는 주로 미국(8회 발사, 6회 성공)과 소련(15회 발사, 1회 성공)에서 이루어졌다. 1971년, 미국항공우주국(NASA)의 Marinar 프로그램의 일환으로 메리너 9호(Mariner-9)는 처음으로 화성 궤도에 진입했고, 처음으로 화성 위성들의 고해상도 사진을 찍었으며, 거의 1년 동안 화성 궤도에서 작동했다. 20세기 말, 미국의 "마스 패스파인더(Mars Pathfinder)"는 역사상 가장 성공적인 화성 탐사 임무 중 하나였으며, 이 임무는 화성 대기, 기후, 지질과 그 암석 및 토양의 구성에 대한 심층적인 분석을 수행했다.

21세기에, 우주 과학 및 기술의 진보와 혁신으로, 화성 탐사는 더 많은 관심을 받았다. 많은 나라들이 화성을 향한 프로그램을 만들거나 계획하고 있는데, 그 중에는 미국, 러시아, 유럽우주국(ESA), 중국, 일본, 인도가 있다. 2000년대 초, 미국과 ESA는 각각 화성으로의 임무를 수행했다. 2001년 4월 7일, 미국은 화성의 지질학과 방사능을 연구하는 것뿐만 아니라, 얼음의 증거를 감지하기 위해 분광계와 열영상기를 탑재한 오디세이(Odyssey)를 발사하였으며, 이 탐사선은 지금도 궤도를 돌고 있다. 2002년, 오디세이는 화성의 지표면 근처 층에 풍부한 얼음이 있을 수 있다는 것을 처음 발견했다. 2004년, ESA는 화성 탐사선이 화성의 남극에서 얼어붙은 물의 존재를 발견했다고 발표했다. 2020년 9월까지 화성에서 추가로 3개의 준빙하 호수를 발견한 사실이 MARSIS 레이더 연구를 기반으로 보고되었다. 2004년 조지 W 부시 미국 대통령은 미래 우주 탐사의 궁극적인 목표로 화성에 대한 인간 탐사를 제안했다. 현재 미국에서는 향후 10년에서 30년 내에 인간을 화성에 착륙시키기 위한 여러 가지 활동적인 계획과 프로그램이 있다. 2002년, 엘론 머스크는 우주 교통비를 줄이고 빠르게 재사용할 수 있는 발사 시스템을 개발하는 것을 목표로 스페이스X를 설립했다. 2020년 5월 30일, 스페이스X는 두 명의 NASA 우주인이 탑승한 크루 드래곤 우주선(Crew Dragon spacecraft)을 성공적으로 궤도에 진입시켜, 국제우주정거장에 우주인을 보낸 최초의 민간 회사가 되었다. 그러나 현재는 COVID-19 대유행으로 인해 우주비행사가 국제우주정거장에 COVID-19를 확산시키는 것을 막기 위해 적절한 방역 절차가 취해졌다. 2015년, 나사는 "화성으로의 여행"으로 명명된 화성의 인류 탐사와 식민지화를 위한 공식적인 계획을 발표했다. 이 계획은 Earth Reliant, Proving Ground, Earth Independent를 포함한 세 가지 단계를 거쳐 운영된다. 2016년, 중국은 첫 화성 탐사 임무를 시작했고 2020년 톈원 1호(Tianwen-1)를 지구-화성 이동 궤도로 진입시키는데 성공했다. Tianwen-1은 2021년 2월에 화성 궤도에 성공적으로 진입했고 다른 기후 특징들과 함께 화성의 자기권과 전리층을 연구할 것이다. 2021년 2월 20일까지, 화성에는 11대의 우주선이 운용 중에 있다.

1.3 목적

화성이 인류 거주의 다음 목적지가 될 것이라는 주장이 널리 제기되고 있다. 그러나, 서식지를 건설하는 것은 여러 분야의 집합적인 작업을 필요로 하며, 그 중 공학은 필수적인 부분이다. 도시 건설과 마찬가지로, 원자재 개발, 우주 건설 기술, 지능형 유지보수를 포함한 기술적인 문제는 사람이 거주하기 전에 다루어

져야 한다. 본 논문의 목적은 현재 화성 탐사 결과를 검토하고 화성의 기반 시설 건설에 활용될 수 있는 현장 자원에 대한 연구에 초점을 맞추는 것이며 실현 가능한 기반 시설 건설 기술도 제안된다. 본 논문은 향후 화성 인프라 건설에 귀중한 참고가 될 수 있는 화성 현장 엔지니어링 자원, 가능한 건설 방법 및 전망에 대한 개요를 제공한다.

2. 화성 환경

2.1 지형과 지질

Kamps 외 연구진(2020)은 클러스터 방법을 통해 콤팩트 정찰 영상 분광계(CRISM) 다중 스펙트럼 매핑 모드 데이터를 기반으로 화성 표면 유형 지도를 계산했다. 화성 표면은 주로 먼지 덮인 지역과 남부 고지대로 구성되어 있다. 주요 지형으로는 평야, 분지, 화산, 산, 협곡 등이 있다. Putzig와 Mellon(2007)은 개선된 열 모델과 열 관성 유도 알고리즘을 사용하여 3년 동안의 화성 온도 방사성 분리(TES)를 처리했으며 지질학 층이 지배하는 대부분 영역의 열 거동을 발견했다.

2005년 Bibring은 OMEGA의 관측을 바탕으로 화성 표면에서 작은 규모의 구성 다양성을 발견했으며, 북부와 남부 지각에서 매픽(mafic) 철을 함유한 규산염, 북극 캡에서 얼음과 서리, 그리고 남극에서 얇은 이산화탄소-얼음을 발견했다. 오디세이는 화성 표면이 현무암에 의해 지배되고 있으며, 그 중 일부는 감람석이 풍부하다는 것을 발견했다. 화성 탐사선 InSight는 붉은 먼지로 덮여 있는 표면 구조, 표토(regolith) 아래, 그리고 큰 바위 덩어리 하부를 탐사하였다. 화성은 지진 활동이 활발한 행성이지만 관측된 지진은 4mW 미만이었다.

2.2 대기 구성

화성 대기의 구성은 지구와 다르다. 지구의 대기는 78.08%의 질소(N_2)와 20.59%의 산소(O_2)가 지배적인 반면 화성의 대기는 2.59%의 질소 및 0.16%의 산소로 구성되어 있다. 가스의 가장 큰 비율은 이산화탄소(CO_2)인데 온도가 변화하는 동안 드라이아이스 상태와 가스 상태 사이에서 지속적으로 변환된다. 동시에 화성 표면의 중력이 지구의 38%에 불과하기 때문에 더 많은 가스가 빠져나간다. 그 결과 화성의 평균기압은 0.636kPa인 반면 지구의 평균기압은 101.325kPa이다. 극지방의 계절적 CO_2 응축 때문에 화성의 기압은 매년 20%씩 변한다.

2.3 기후

화성과 태양 사이의 거리는 태양과 지구 사이의 1.5배인 228만 킬로미터이다. 따라서 화성에서 받는 태양복사량은 586.2W/m^2로 지구에서 받는 태양 복사량인 1361.0W/m^2보다 적다. 화성의 평균온도는 지구의 평균온도보다 낮으며, 온도차는 상대적으로 더 크다. 화성 표면의 평균 기온은 -63°C이고 최대 일교차는 60°C인 반면 지구의 평균 기온은 15°C이고 최대 일교차는 30°C이다.

3. 화성 인프라 건설을 위한 현장 자원

현장 자원 활용(ISRU)은 다른 우주 물체에서 발견되거나 제조된 물질을 수집, 처리, 저장 및 사용하여 지구로부터 유래된 물질을 대체하는 것이다. 연구에 따르면 ISRU는 물, 로켓 추진제 및 건설 자재를 포함한 재료를 제공할 수 있다. 토목 공학과 표면 공사는 ISRU의 주요 분야 중 하나이다. 이 파트는 주로 건축자재의 연구 및 활용 가능성에 대해 논의한다.

3.1 화성 토양

다중 소스(multi-source) 원격 감지 및 현장 감지 데이터 모두 화성 표면이 많은 양의 응집되지 않았거나 약하게 응집된 풍화 물질로 덮여 있음을 보여준다. 현재, 이 물질의 정의는 주로 표토, 풍화 또는 충적 퇴적물, 침전물, 먼지 및 흙을 포함하여 다양하다. 2020년 Certini 외 연구진은 화성 토양의 구성과 형성의

관점에서 현재의 용어를 통일할 필요성을 강조했으며 화성의 비응집 퇴적물을 나타내기 위해 "토질(soil)"이라는 용어를 사용하는 것이 적절하다고 생각했다. 하지만, 화성의 전반적인 모습을 파악하기에는 제한된 정보가 존재하여, 토양의 상세한 분류는 더 많은 연구가 필요하다. 화성 토양은 체에 걸러 건설 자재의 집적물로 적용될 것으로 추정된다. 지금까지 화성 표본은 지구로 오지 않았지만, 토양이 탐사선과 궤도선을 이용해 토양에 대해 원격으로 연구했다.

3.2 화성 토양 모사

화성 토양은 지구에서 합성하여 테스트와 개발이 된 후에 활용할 수 있다. 따라서, 연구원들은 다양한 화성 우주선의 분석을 바탕으로 화성 토양을 시뮬레이션하는 데 집중하고 있다. 한편, 시뮬레이션된 토양은 우주생물학 실험, 국제 우주 정거장 실험, 풍동 실험, 기반 시설 개발 등과 같은 과학적 연구 요구를 충족시키기 위해 사용될 수 있다. 또한 화성 표면 탐사선의 착륙, 이동, 시추 실험에도 적용할 수 있다.

화성 토양 시뮬레이터의 전통적인 형성 방법에는 전암(whole-rock) 시뮬레이션과 단일 광물 시뮬레이션이 포함된다. 전암 시뮬레이션 방법은 보통 모의 토양과 유사한 광물 및 화학 성분을 가진 암석을 선택한다. 단일 광물 시뮬레이션 방식은 단일 광물을 원료로 선택하거나 모의 토양의 재료 구성에 따라 다른 광물을 원료로 선택한다. 건조 후, 원재료를 으깨고 다른 크기의 반제품으로 선별한 후 시뮬레이션 물체의 특성에 따라 혼합한다. 2011년, ESA의 Gouache 외 연구진은 상업적으로 이용 가능한 지상 물질을 사용하여 화성 표면의 세 가지 유형의 토양을 복제했으며, 토양의 물리적 특성을 확인하기 위해 추가 테스트를 실시했다. 2017년, Chow 등은 화성 토양 시뮬레이터 Mars-1a가 첨가물 없이 주변 환경에서 강한 고체로 직접 압축될 수 있음을 입증하여 화성 현장 자원 활용의 가능한 측면을 강조했다. 2018년 Scott과 Oze는 뉴질랜드 뱅크스 반도에서 감람석 현무암과 화산유리를 사용해 Gusev crater Columbia Hills 지역에서 확인된 화성 토양 대표 물질을 생산했다. 2020년 류 외 연구진은 전 세계적으로 시뮬레이션된 화성 토양의 연구 진행 상황을 체계적으로 검토하고 연구 및 엔지니어링 용도로 다양한 유형의 화성 토양을 추가로 개발할 필요가 있다고 제안했다.

미국, ESA, 러시아는 토양 형성 기술이 더 발달한 반면, 중국은 아직 걸음마 단계이다. 현재 화성 표면에는 40종 이상의 화성 토양 시뮬레이터가 있다. 일반적인 현무암 외에도 산성, 알칼리성, 점토, 진흙, 과염소산염, 염화물, 황산염, 탄산염, 헤마타이트(hematite) 및 기타 발열성 표토도 포함한다. 미국, 러시아, 중국, 일본이 화성 토양을 지구로 돌려보낼 수 있는 다수의 화성 표본 귀환 임무(MSR)를 계획하고 있다.

3.3 현무암

현무암은 화성 표면의 흔한 바위이기도 하다. 현무암은 마그네슘과 철이 풍부한 용암이 지구형 행성의 표면 또는 매우 가까이에 노출되어 형성된 화성암의 일종이다. 2000년, 밴드필드 외 연구진은 화성지구 탐사선(MGS)의 TES 데이터를 적용하여 화성 저알베도 영역의 구성 및 분포를 결정하였으며, 2007년 플라지옥산염(plagioclase)과 크리노피록센(clinopyroxene)으로 구성된 현무암과 안데스산염(andesite)으로 구성되었다고 제안하였다. 화성 표면의 암석들을 4가지 범주로 나뉜다: 높은 실리카 유리가 풍부한 라임애쉬 현무암, 감람석이 함유된 피록신 현무암, 감람석이 함유된 라임애쉬 현무암, TES를 사용한 라임애쉬 현무암. 2015년, Kading과 Straub은 현장 자원 현무암의 3D 프린팅을 이용하여 구조물이 건설될 수 있다는 전망을 제시했다.

현무암은 건축(예: 건축 블록 또는 포장 재료)에 광범위하게 적용되어 자갈돌과 장식 공예품을 만들 수 있다. 현무암을 가열하고 압출하면 보온성 물질인 석모(stone wool)가 생산된다. 그러나 화성 토양과 유사하게 화성 환경에서의 유용성을 더 잘 이해하기 위해서는 화성의 여러 현무암 조성의 특성에 대한 연구가 수행되어야 한다.

3.4 화산재

화성에는 많은 화산 지형이 있다. 대형 순상 화산은 Tharsis Bulge 및 Elysium Bulge 고지대에 주로 분포한다. 폭발하는 화산 운동으로 인해, 단단한 암석과 녹은 슬러리는 미세한 입자로 분해되어 화산재를 형성한다.

화성이 붉은 이유는 고대에는 많은 양의 철 성분이 행성 표면을 덮고 있었고, 산화 후에는 붉게 변했기 때문이다. "화성 익스프레스(Mars Express)" 탐사선은 주로 휘석과 감람석으로 구성된 메리디아니 평원(Meridiani Planum)의 화산재 퇴적물을 촬영했다. 화산재는 실온과 물이 있을 때 석회(CaO)와 반응하여 수압 겔화 능력을 가진 하이드레이트를 형성할 수 있다. 따라서 연마 후 시멘트 혼입재 및 콘크리트 혼화재로 사용할 수 있다.
포틀랜드 시멘트와 비교하여 포졸란 시멘트(화산재가 있는 시멘트)는 작은 비중, 낮은 수화열, 더 나은 부식 저항성은 있지만 물 수요와 수축은 더 크고 서리 저항성은 더 떨어진다. 환경 조건은 포졸란 시멘트의 수화 및 강도 발달에 상당한 영향을 미치며, 습한 환경은 시멘트의 강도 발달에 도움이 된다. 포졸란 시멘트는 일반적으로 지하, 물 및 습한 환경의 콘크리트 프로젝트에 적합하지만 건조한 환경, 동결-토 사이클, 건조한 상태와 습한 상태를 번갈아 가며 사용하는 상태 및 높은 초기 강도가 필요한 프로젝트에는 적합하지 않다.

3.5 화성 콘크리트

화성에 콘크리트를 성공적으로 적용하기 위해서는 기존의 현장 자원에 대한 비교 검토가 필요하다. 화성 환경에서 콘크리트를 만들기 위해, 첫 번째는 바인더, 물, 골재를 포함하여 콘크리트 생산을 위한 잠재적 원자재를 탐구하는 것이다. 이전에 소개된 바와 같이, 화성 토양은 골재로 사용될 수 있다. 최근 탐사 결과 화성에 얼음이 존재하므로 물은 응축되거나 회수될 수 있다. 실현 가능한 바인더 용액으로는 시멘트가 일반적으로 지구상의 바인더로 사용되며, 포틀랜드 시멘트의 주요 화학 성분은 산화 칼슘, 이산화 규소, 산화 철, 산화 알루미늄 및 물이다. 시멘트는 공기나 물에서 굳을 수 있고 모래, 돌, 그리고 다른 재료들을 단단하게 결합시킬 수 있어 건설 자재에 유리하다. 따라서 우주에서 유사한 물질을 발견할 수 있다면 콘크리트 생산이 가능할 것이다.
2006년부터 NASA 팀은 황과 폴리머를 포함한 많은 종류의 바인더를 조사하고 그것들을 우주에서 표토와 혼합하여 적층 건축에 응용하고 있다. 2016년, Wan과 연구진은 화성 콘크리트를 개발하기 위해 표토와 용융 유황 바인더를 결합했고, 이 콘크리트가 더 높은 강도를 가지고 있으며 화성의 대기압과 온도 범위 하에서 건설에 더 적합하다는 것을 발견했다. NASA는 이제 행성 표면에서 생산될 수 있는 황, 폴리머와 같은 다른 바인더까지 범위를 넓혔다. 2017년 Ordonez 외 연구진은 바인더를 사용하여 일반 포틀랜드 시멘트(OPC)와 마그네슘 산화물 기반 소렐 시멘트를 개발하여 과속도 충격 저항성을 테스트한 결과 골재 구성이 충격에 대한 재료의 내성에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 비수체 파쇄 현무암과 같이 첨가적으로 배치된 행성 건설 자재는 골재로 개발되어야 한다. 2018년 Scott과 Oze는 감람석 가수분해(즉, 사문석화 작용(serpentinization))와 탄산마그네슘($MgCO_3$)을 포함한 관련 제품들이 개발돼 일종의 Mg 기반 시멘트 및 수소(H_2)를 에너지 자원으로 생산할 수 있다고 지적했다. 리체스(2019)는 바사나이트 또는 석고, 오팔 및 황산염 등 화성에 존재하는 잠재적인 적용 가능한 바인더 유형을 체계적으로 나열했다. 화성 콘크리트에 대한 가공 및 양생 방법도 화성의 저온, 저중력, 저압 조건에 대해 제안되었다.
달의 표토를 이용한 콘크리트 형성에 대한 많은 연구가 진행 중임을 알 수 있다. 바인더 대안으로는 수지, 에폭시 및 폴리머 매트릭스가 있다. 또한, 지오폴리머를 사용하여 개발된 콘크리트 파생물의 종류가 있다. 지오폴리머는 알루미노실리케이트(aluminosilicate) 전구체와 알칼리성 용액 사이의 반응을 통해 생성되는 물질이다. Montes 및 연구진(2015)의 연구에 따르면 지정성 바인더는 표토에서 생성될 수 있으며 이러한 바인더는 16.6 - 33.1MPa범위의 압축 강도에 도달할 수 있다. 지정합성의 원천 재료로 사용되는 화성 표토의 활용 가능성을 조사하기 위해 유사한 연구가 수행될 수 있다.

3.6 금속 및 합금

2009년 Fairen 외 연구진이 현무암의 풍화 작용으로 화성 액체의 동결 및 증발 과정을 모델링한 결과, Si, Fe, S, Mg, Ca, Cl, Na, K 및 Al의 상당 부분이 차가운 온도(273K 이하)에서 액체 상태로 유지되는 것을 발견했다. 2018년, Naser와 Chehab은 화성에서는 금속을 쉽게 구할 수 없지만, 존재하는 원소들은 채굴되어 금속과 합금을 생산하는 데 사용될 수 있다고 제안했다. 2019년에 Naser는 다양한 금속들 중에서 마그네슘, 철 및 알루미늄이 기계적 특성과 강철 기반 지상 구조에서 활용성을 고려했을 때 화성에서

초기 개발에 사용하기에 적합하다고 추가로 열거했다.

3.7 에너지원

실제로, 많은 현장 자원 개발 및 처리 활동은 복잡한 기계적 작동과 에너지 변환을 포함하며, 이들 중 대부분은 전기를 주요 에너지원으로 사용한다. 현재 화성 탐사에 적용된 첨단 에너지 기술은 동위원소 열전 발생기와 태양 전지판이다. 운용 중인 화성 탐사선의 대부분은 태양 에너지와 원자력을 에너지원으로 사용한다. 또한 지능형 전력 분배 및 관리 및 에너지 스토리지 기술은 점차 더 많은 관심을 받고 있다.

1. 동위원소 열전 생성: 열전 전환 효과는 방사성 동위원소의 붕괴열을 전기로 변환하는 데 사용된다. 낮은 효율과 높은 비용에도 불구하고, 이 에너지 생성 방법은 높은 에너지 품질 비율과 긴 사용 수명을 가지고 있다. 이 방법은 군사 정찰위성과 통신위성에 성공적으로 적용돼 외부 환경에 영향을 받지 않기 때문이다. 그것은 달 표면과 깊은 우주와 같은 성간 임무에 대한 선택의 원자력 에너지원으로 남아있다. 현재, 미국은 동위원소 열전 발전 분야에서 여전히 선두를 달리고 있다.

2. 태양 전지판: 광 에너지를 전기로 변환하기 위해 정사각형 배열의 단일 태양 전지를 사용하는 전력 시스템을 말한다. 우주선에 장착된 태양 전지판의 두 가지 주요 기능은 센서를 작동하고 우주선을 추진하기 위한 동력을 제공하는 것이다. 지금까지, 태양 에너지는 예를 들어, Mars Global Surveyer와 Mars Observer와 같은. 화성 주변을 운행하는 우주선에 널리 적용되어 왔다. 2017년 ESA는 3D 프린팅과 결합된 집광기를 적용했고 1000°C의 달 토양 벽돌을 개발하여 태양광 3D 프린팅 엔지니어링 재료의 실현 가능성을 검증했다. Gu 외 연구진은 화성 공전 동안 각각 태양 에너지의 분포를 계산하고 대기 산란 및 모래 폭풍과 같은 요인을 고려했다. 그들은 화성 표면의 황사 폭풍이 태양 전지판을 쉽게 덮을 것이고, 이는 발전 효율의 현저한 감소로 이어질 것이라고 믿었다. 이 문제는 우선 지구의 사막에서 태양 에너지의 적용을 연구함으로써 해결될 수 있을 것이다.

3. 잠재적 현장 에너지 지원 전략: 태양 전지나 동위원소 열전 발전기에 의존하는 것은 충분하고 지속적인 에너지 공급을 제공하지 못할 것이다. 따라서, 현장 에너지 공급 기술의 개발만이 화성 표면에서 다양한 작업을 실행하는 열쇠이다. Xie 외 연구진(2020)은 달 표토와 암석 상온층 및 달 표면 간의 온도 차이를 이용하여 내부 에너지 지원 기술의 개념화를 제안했다. 이들의 연구에서, 달 열전 재료 열전 발전 기술과 자기 부상 발전 기술은 낮에는 달 표면의 복사 에너지를, 밤에는 달 토양에 있는 열에너지를 전기로 지속적으로 변환하기 위해 개발되었다. 비슷하게, 화성의 표면 온도는 매우 다양하다. 예를 들어 바이킹 착륙 지점의 일 온도는 최대 100°C까지 변할 수 있다. 동시에, 화성의 희박한 대기 때문에, 대기의 이동을 통해 태양 복사의 열을 전달하는 것이 어려워서, 대기 온도와 지상 온도 사이에 큰 차이를 초래한다. 이 온도 차이를 활용할 수 있는 경우 현장 에너지원으로도 사용할 수 있다.

또한 바이킹, 화성 패스파인더, 큐리오시티 등 여러 화성 탐사선에 의한 화성 표면 풍속 탐지 결과 화성 표면의 풍속은 일반적으로 2~7m/s였으나 40m/s 폭풍도 기록되었다(2020). 화성의 경도를 따라 기압과 기온의 차이는 화성의 표면에 거대한 먼지 폭풍을 일으킬 수 있다. 화성 표면의 먼지와 먼지 폭풍은 화성 탐사와 태양 에너지 이용에 심각한 영향을 미칠 수 있지만, 다른 한편으로는, 그것들은 또한 잠재적인 풍력 자원이다.

화성 풍력 자원의 활용은 주로 움직이는 대기 입자의 운동 에너지의 일부를 전기, 열 에너지 또는 기계적 에너지로 변환하는 것이다. Zhang 외 연구진(2020)은 풍력 발전 및 풍력회전(tumbleweed) 조사장비와 같은 화성 풍력 자원의 활용에 대한 종합적인 분석에 초점을 맞추었다. 미래에는 화성 대기환경과 바람의 탐지를 강화할 필요가 있다. 화성에 풍력발전 장비를 건설하려면 장비의 품질을 최대한 낮추고, 저온과 황사 등 화성의 혹독한 기후조건에 풍력발전 시스템이 적응할 수 있도록 새로운 소재와 디자인을 채택해야 한다.

4. 화성에서 가능한 건설 기술

현장 자원은 사람들이 사용하고 생활할 수 있는 인프라로 처리 및 구축되어야 한다. 2019년, Reches는 화성 콘크리트로 만든 콘크리트 구조물을 제안했는데, 우리가 지구에서 알고 있는 콘크리트가 화성에서 항상 활용할 수 있는 것은 아니라는 사실을 제시했다.

4.1 처리 기술

화성 토양 처리 기술은 달의 표토로부터 교훈을 얻을 수 있다. 연구진(Zhenping 외, 2019년, Rui, 2020년)은 알칼리 활성화, 달 콘크리트 등 정상 온도 이하의 기술과 연소합성, 증기건조혼합법, 소결법 등 고온기술 등 많은 토양 현장 가공법을 제안했다. 또한 연구원들(Lihua 등, 2011, Zhenping 등, 2019)은 드라이믹스/증기 주입(DMSI) 방법을 사용하는 콘크리트와 비수압 콘크리트 파생 재료로서 유황 콘크리트(물이 필요하지 않음)를 포함한 전략들을 제안했다. 태양 소결은 대기의 부족이 더 높은 수준의 햇빛이 화성 표면에 도달하게 한다는 사실 때문에 화성에서 지배적인 기술로 여겨질 수 있다. 2018년, Meurise 외 연구진은 태양 에너지와 3D 인쇄를 사용하여 달 벽돌을 형성했지만 압축 강도는 달 건설 요건을 충족할 수 없었다. 2018년, Naser와 Chehab은 우주 건설 자재의 가능한 처리 기술을 추가적으로 정리하였다.

4.2 3D 프린팅

3D 프린팅 기술은 1970년대에 발명된 이후 지난 10년 동안 발전해 왔으며, 건물 구조를 3차원으로 인쇄함으로써 적층 건축이 실현되고 있다. NASA와 미국 육군 공병대(USACE)는 각각 행성 표면 인프라 요소, 콘크리트 기반 주택 및 장벽을 위한 적층 건설을 추진하고 있다. 그러므로, 3D 프린팅은 우주에 인간의 거주지를 짓는 데 매우 중요하다. 2014년, NASA와 극미중력 사용을 위한 3차원 프린터의 엔지니어링과 제조를 전문으로 하는 미국 기반 회사인 MIS는 세계 최초로 우주 3D 프린팅을 달성하기 위해 협력했다. 2015년, Kading과 Straub는 가압 작업 환경을 유지하기 위해 돔 구조물에 3D 프린터를 적용해야 한다고 제안했다. 2017년에 ESA는 DLR(쾰른 독일 항공우주 센터)의 집광기 장비를 사용하여 1000°C에서 여러 개의 달 벽돌을 층별로 준비하여 처음에는 3D 프린팅의 실현 가능성을 검증했다. Wang(Rui, 2020)은 달 표토용 3D 프린팅 기술 개발을 검토하고 에너지 변환 효율성, 극한 환경 조건, 제조 특성이 향후 중요한 연구 방향이 될 것이라고 지적했다.

4.3 지능형 건설

Kading의 연구(Kading과 Straub, 2015)에서, IRSU는 두 개의 임무로 나뉘었다. 하나는 인간의 삶을 지원하기 위해 필요한 기반시설을 건설하는 무인 준비 임무이다. 또 다른 방법은 기반시설에 사람들을 보내는 것이다. 따라서, 지능적이고 자동화된 건설은 필연적으로 개발되고 적용될 필요가 있다. 화성의 혹독한 환경을 고려하면 로봇, 완전 자동 건설 및 엔지니어링 시스템(장비) 개발이 필요하다. 이러한 건설 시스템은 조사, 구조 설계 업데이트 및 실시간 건설 관련 의사 결정을 내릴 수 있어야 한다. 화성의 건설 작업에 지능형 자율 로봇을 사용하는 것은 인간에게 가혹한 우주 환경의 위험을 줄이는 데 매우 중요하다. 또한 로봇 무리, 특히 서로 다른 특정 기능을 가진 이질적인 로봇을 사용하는 것은 지구에서 인간을 모방하는 합리적이고 자연스러운 방법일 수 있다.

현재, 지구상의 현대 공사는 기본적으로 건설 기계의 위치 인식, 토공 공사의 지능형 제어, 지능형 포장, 도로의 압축 등을 포함한 기계의 자동 제어를 실현할 수 있다. 이 기술들은 우주 환경에서 더 많이 구현될 것으로 기대된다. 사실, 연구들(Brooks 등, 1990)은 자율적인 건설 장비에 주목했고 달에 우주 건설 임무를 위해 로봇을 보낼 가능성을 조사했다. 하지만, 로봇과 기계 또한 탄력 있는 물질로 만들어져야 한다는 것에 주목해야 한다.

5. 도전과 기회

5.1 현재 당면 과제

우주에서 에너지 변환 장비를 위한 건설 자재 및 자재는 복원력, 내구성 및 경제성 세 가지 요구 사항을 충족해야 한다.

- 복원력: 건설 자재는 저압, 저온 및 기타 다양한 환경 조건을 가진 화성의 극한 환경에서 수행될 것으로 예상된다. 예를 들어, 화성 온도 조건은 건설 자재가 고온, 저온, 큰 온도 차이를 견딜 수 있을 뿐만 아니라 인간의 단열 요구도 충족시킬 수 있어야 한다. 또한 운석의 충돌도 무시할 수 없다. 현재 NASA의 ACME(Additive Construction with Mobile Emplacement) 프로젝트는 행성 건설 자재와 고속 충돌 영향에 대한 내성을 위해 적층 건설 재료를 조사하고 있다.

- 내구성: 적층 구조에 사용되는 재료는 예측 가능한 모양으로 침전되는 능력, 일정 시간 후에 겹쳐진 층을 지탱하는 능력, 위와 아래의 층에 결합하는 능력, 사용을 위한 구조적 무결성을 갖는 능력과 같은 특정한 요구 사항을 가지고 있다. 혹독한 환경 조건을 고려해 저온·저압 환경에서 물질의 강도를 보장하고 강한 자외선과 일사 방지의 기능을 갖추는 것이 필요하다. 특정 반사 소재를 사용하여 소재의 노화를 방지하고 내구성을 확보할 수 있다.

- 경제: IRSU의 이유는 지구에서 우주로의 운송은 비용이 많이 들고 미래의 연구는 화성의 현지의 자원으로 건설 자재를 생산하는 것과 전체 수명 주기 동안 지구에서 필요한 자재를 수송하는 것 사이의 경제적 균형을 고려할 수 있기 때문이다.

5.2 향후 기회

화성 토양, 현무암, 콘크리트 재료는 인류가 화성 탐사를 위해 가장 연구되고 실현 가능한 미래의 건설 자재 중 하나이다. 한편, 화성 토양의 시뮬레이션은 지구상의 다양한 산업들을 위한 새로운 물질의 합성과 개발에 적용될 수 있다. 콘크리트 재료와 그 파생물은 우주 건설에 사용될 가능성이 가장 높은 것으로 간주된다. 그러나, 화성 토양 구성과 환경 조건에 대한 제한된 연구 때문에, 화성 여행의 잠재력을 이용하기 위해서는 다음의 측면에서 기반시설 건설을 위한 ISRU의 추가 작업이 필요하다.

- 내구성 재료: 화성 표면, 얕은 지하층, 깊은 지하공간에서 이용되고 이용될 수 있는 현장자원의 추가 탐색, 화성환경에 적합한 재료처리기술 연구, 화성의 저압 및 저온환경에서의 재료의 강도 보장, 그리고 또한 강한 자외선과 태양 복사에 대한 저항, 건축 자재의 내진 및 충격 저항성을 확보하여야 한다.

- 지능형 건설 기술: 에너지 전환의 효율성 향상, 우주 환경에서의 기계 장치 배치, 원격 제어의 적시성 보장 등이 포함된다. 현재, 우주왕복선과 지상 사이의 통신을 수행하기 위해 우주 레이저 통신 기술은 널리 연구되고 있다.

- 현장 에너지 활용: 화성의 에너지 탐사는 아직 자급자족 단계에 있다. 핵에너지와 태양에너지는 개발과 이용의 대상이다. 향후 현장 자원으로 추가 개발할 수 있는 에너지원으로는 원자력, 태양광(열발전), 풍력 등이 있다. 화성의 에너지 탐사 문제를 고려할 때, 극도로 낮은 온도와 교대 열부하 하에서 발전 시스템의 열 교환 부품 변형, 노화 및 고장을 고려할 필요가 있다. 발전 시스템의 출력은 불연속적일 수 있으며, 이는 전기의 안정적이고 지속적인 출력을 실현하기 위해 에너지 저장 기술과 결합되어야 한다. 화성 서식지의 건설에서, 지속적이고 충분한 에너지 공급을 제공하기 위해 태양 에너지, 핵 에너지, 풍력 에너지로 에너지 요구 조건을 충족시킬 수 있다.

- 지하 공간 이용: 달 표면의 특정 깊이 이하에서는 온도가 일정하게 유지되어 일정한 온도층을 형성한다. 따라서 많은 연구자들은 달의 지하 공간에 위치하는 일정 온도 층 활용을 위한 일련의 아이디어를 내놓았다. 향후 화성 탐사가 계속 심화되면서 화성 지하공간 개발도 화성 지하기지, 지하철도(전자파 기술 기반) 등 화성 식민지를 건설하는 길이 될 것으로 보인다.

6. 결론

태양계에서 지구와 가장 비슷한 행성인 화성에서 물과 가능한 생명체의 발견은 화성의 추가 탐사에 대한 관심을 자극했다. 화성이 인간이 살 수 있는 다음 장소가 될지는 분명하지 않지만, 화성으로 가는 여정에 앞서 몇 가지 가정과 가설이 필요할 수도 있다. 화성 인프라 구축을 위한 현장 자원의 유형을 제안하고 본 논문에서 관련 연구를 검토한다. 결론은 다음과 같다.

1. 화성 토양, 현무암, 화성 콘크리트를 포함한 현장 자원은 화성에서 가장 실현 가능한 미래 건설 자재 중 하나이다. 그러나 이 물질들은 은하 우주선과 자외선을 포함한 낮은 압력, 낮은 온도, 큰 온도 차이와 높은 우주 복사를 견뎌야 한다. 화성 콘크리트에 대해서는, 혹독한 환경 조건에서의 성형 공정과 유지 관리 방법에 대해 심도 있는 연구가 필요하다.

2. 핵에너지와 태양에너지는 화성 에너지 탐사의 주요 대상이다. 향후 현장 자원으로 추가 개발할 수 있는 에너지원으로는 원자력, 태양광(열발전), 풍력 등이 있다. 안정적이고 지속적인 에너지 지원을 실현하기 위해서는 에너지 조합 및 스토리지 기술이 필요하다.

3. 화성 환경이 인체에 미치는 피해는 여전히 미스터리로 남아있기 때문에 화성에서는 인공지능을 이용한 건설이 불가피하다. 3D 프린팅은 화성의 현장 자원으로부터 건축 자재를 생산하는 데 사용될 수 있다. 지능형 건설 과정을 수행하기 위해서는 군집 로봇 공학과 자동화된 관리 시스템을 갖춘 로봇이 필요하며, 지구상의 인간은 실시간 제어를 할 수 있어야 한다.

4. 건설에 적합한 현장자원을 발굴하고 화성 환경조건에 대한 심층적인 이해를 바탕으로 복원력, 내구성 및 경제성 요건을 충족하는 재료의 개발이 다음 단계가 될 것이다.

<원문제목> In-situ resources for infrastructure construction on Mars: A review
<원문출처> International Journal of Transportation Science and Technology