

우주 행성 인프라 건설을 위한 건설 재료 및 핵심 구성기술 소개

글. 김영재_미래융합연구본부 전임연구원

우주 행성 건설기술 현황

NASA와 유럽 우주국(ESA)을 비롯한 우주 개발 선진 연구기관들은 극한환경에서 지속가능한 인류의 탐사 활동을 지원하기 위해 우주 공간에 서식지 및 인프라 구조물 구축을 위한 다양한 연구개발을 수행하고 있다. ESA는 2030년까지 현지 자원을 활용(In-Situ Resource Utilization, ISRU)하여 3D 프린팅 방식으로 달에 인류의 거주가 가능한 문 빌리지(Moon Village)를 건설하는 계획을 발표한 바 있다. 인류의 탐사 활동과 거주를 위해서는 이러한 서식지 구축뿐 아니라, 착륙 및 발사대, 도로, 방사선·열·운석 차폐막, 장비 보호소, 방진벽 등의 인프라 구조물도 필요하다. 지구상의 구조물 건설에 가장 일반적으로 활용되는 콘크리트는 물과 시멘트의 수화반응을 기반으로 하기 때문에 초고진공 상태인 우주 환경에는 적용하기 어려우며, 다른 건설 재료를 활용할 수 있다고 할지라도 지구에서 우주까지 운반하는데 소요되는 천문학적 비용을 감당하기는 쉽지 않을 것이다. 따라서 우주 현지 자원을 가능한 한 최대한 활용하여 구조물을 건설하기 위한 새로운 접근 방식이 필요하다.

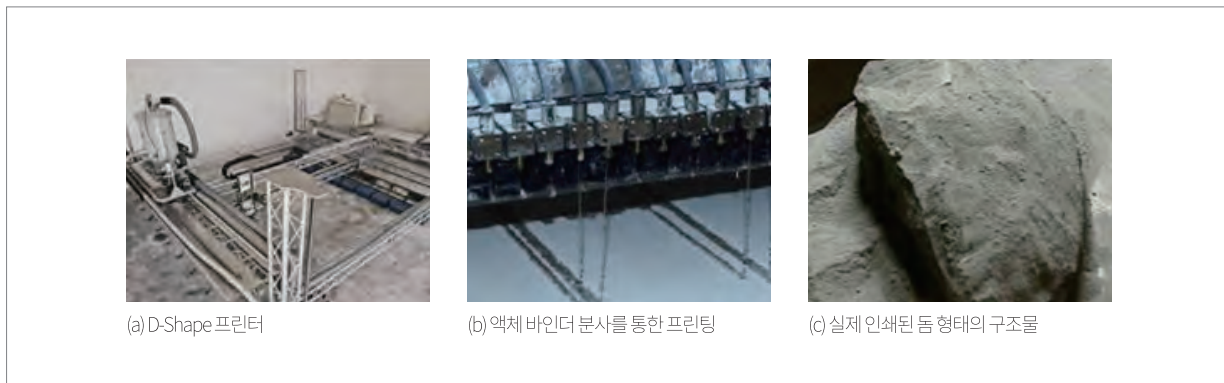
우주 건설을 위한 건설 재료 및 가공 기술

현재 달에서 인프라 시설물을 건설하는 방법은 크게 바인더를 사용하는 방법과 바인더를 사용하지 않는 방법으로 구분된다. 전자의 경우 바인더 재료가 필요하다는 제약이 있으며, 바인더를 사용하지 않는 방법은 소결 과정을 통해 재료를 고형화해야 되기 때문에 일반적으로 더 많은 에너지가 필요하다.

1. 바인더를 활용한 재료 고형화 기술

영국의 Monolite社가 제안한 D-Shape 시스템(그림 1)은 전술한 바인더 공정 중 하나로, 분말 상태의 재료 위에 액체 바인더를 분사해 굳히고 다시 분말 재료를 덮는 과정을 반복한 후 마지막에 굳지 않는 부분을 제거하여 구조물을 제작하는 기술이다. 이때 사용하는 액체 바인더인 염화마그네슘($MgCl_2$) 포화 용액은 재료 내에 존재하는 산화마그네슘(MgO)과 반응하여 소렐 시멘트로 알려진 $Mg_3Cl_2(OH)_6(H_2O)_8$ 를 생성한다. 실제 월면토에는 산화마그네슘 성분이 다량 포함되어 있어 위와 같은 화학 반응을 이용하면 월면토를 단단하게 굳힐 수 있으며 반복적인 적층과정을 통해 구조물을 형성할 수 있다.

[그림 1] 영국의 Monolite社가 제안한 D-Shape 시스템



출처: Cesaretti, G., 2014

미국 앨라바마 대학교(Alabama Univ.) Toutanki 교수는 황을 바인더로 이용하여 황 콘크리트를 제조하는 방안을 제안하였다. 고체 황을 인공월면토와 혼합하여 145°C에서 녹인 뒤 틀에 부은 후 굳혀서 황 콘크리트를 제조할 수 있다(그림 2 (a)). 앞서 소개된 염화마그네슘 포화용액을 바인더로 사용하는 방법은 물을 필요로 하지만, 황 콘크리트의 경우 물 없이도 재료를 고형화할 수 있다. 실제 월면토 샘플에서 황의 존재가 확인되었으며, 황화철(II)(FeS)의 형태로 황이 존재한다는 것이 밝혀졌다. 즉, 우주 환경에서 월면토로부터 황을 추출하여 황 콘크리트를 제조할 수 있기 때문에, 현지 재료만을 활용할 수 있다는 이점을 가진다. 그러나 월면토에서 황을 추출하기 위한 별도의 시스템과 추가 공정이 필요하다는 제약이 있으며, 황은 분해 온도가 낮고 진공 상태에서 승화되기 때문에 초고진공 상태인 달 환경에서는 내구성이 떨어질 수 있다. 실제로 황 콘크리트를 20°C에서 5×10^{-7} torr의 진공 환경에 60일 동안 방치했을 때, 황의 승화 현상으로 인하여 지속적인 무게 감소 현상이 나타났으며 황 콘크리트의 표면이 점차 불균해지는 것이 확인되었다(그림 2 (b)). 뿐만 아니라, 황 콘크리트는

강도, 내구성 및 내화성 측면에서 우주 환경에 적용하기 부적합하다는 평가도 받고 있다.

고분자 바인더는 월면토를 강하게 결합할 수 있다는 특성을 가지기 때문에, 우주 기지 건설을 위한 재료로 다양한 연구에 활용되어 왔다. 고분자의 고유 특성, 종류, 함량에 따라 가공도와 최종 구조물의 강도, 내구성, 방사선 차폐 성능 등이 달라질 수 있으며, 폴리우레탄 수지, 폴리에틸렌, 에폭시 레진 등이 바인더로 활용된 사례가 있다. 고분자 바인더를 활용한 구조물 제작은 3D 프린팅 장비에 의해 이루어지며, 이에 따라 가공 시간 및 가공의 용이성 측면에서 장점이 있다. 또한, 고분자를 이루는 수소 원자는 방사선 에너지를 완화하는 기능이 있어 우주 방사선을 효과적으로 차폐할 수 있는 특징이 있다. 하지만, 최저온도 -178°C , 최고온도 $+123^{\circ}\text{C}$ 에 이르는 달의 극심한 온도 변화에 의해 고분자와 월면토의 열팽창계수 차이에 의한 열적 응력이 발생할 수 있고, 이로 인해 구조물에 크랙 생성, 박리, 구조물 휨 현상 등이 야기될 수 있다. 무엇보다 지구에서 달로 고분자 재료를 운송하기 위해서는 많은 비용이 발생한다는 문제가 있다.

[그림 2] 황을 바인더로 활용해 제조한 황 콘크리트



출처: Toutanji et al., 2010; Grugel, R. N. and Toutanji, H., 2008

[그림 3] 고분자 바인더를 활용해 제조한 인공월면토 블록



출처: Gosau, J.-M., 2012

우주 행성 인프라 건설을 위한 건설 재료 및 핵심 구성기술 소개

2. 소결을 통한 재료 고형화 기술

그동안 월면토를 건설 재료로 사용하기 위해 염화마그네슘, 황, 고분자 등 다양한 바인더를 활용하는 방법이 제안되어 왔다. 하지만 극한 우주 환경에서 재료의 내구성 문제와 지구에서 달까지 재료 운송 시 소요되는 막대한 비용을 고려했을 때, 현재 우주 기지 건설은 바인더 없이 현지 자원을 최대한 활용하는 방향으로 전환되고 있다. 바인더 없이 월면토를 고형화하기 위해서는 소결 과정이 필요하다. 여기서 소결이란, 재료를 녹는점 가까운 온도로 가열했을 때 입자가 서로 접한 면에서 용융과 확산 등에 의해 연결되어 하나의 덩어리를 형성하는 것을 의미한다. 월면토의 녹는점은 1,000~1,100°C 정도이며, 이러한 월면토를 소결하는 방법으로 고에너지의 레이저, 태양광, 그리고 마이크로파 에너지를 활용하는 기법 등이 제안되었다.

레이저를 이용한 소결은 레이저 소스로부터 발생하는 열에 에너지를 사용하여 재료를 선택적으로 고형화시키는 것으로, 분말 상태의 재료를 층별(layer-by-layer)로 용융 및 적층을 반복하여 구조물을 제조하는 기술이다(그림 4 (a)). 그림 4 (c)는 1.06~1.09 μm 의 파장을 가지는 레이저를 사용하여 인공월면토(JSC-1A)를 소결한 모습을 나타낸 사진이며, 미세 구조 관찰을 통해 인공월면토 입자의 용융 및 결합을 확인할 수 있다. 이러한 레이저 소결은 분말 재료의 국부적인 용융이 가능하기 때문에 복잡한 형상의 구조물 제작이 가능한 장점이 있다. 반면, 레이저 침투 깊이가 작기 때문에 소결할 수 있는 두께 및 면적이 작아 소형 구조물 제작에는 적합하지만 실제 구조물 건설을 위해서는 많은 에너지와 시간이 소요되는 단점이 있다.

[표 1] 바인더를 활용한 인공월면토 고형화

바인더		인공월면토	무게 비율 (바인더:인공월면토)	강도	특징
염화마그네슘		DNA-1	1:4.5	압축강도 20.35MPa	<ul style="list-style-type: none"> · 물 필요 · 재료 운송비 발생 · 액체 바인더 분사 방식은 진공에서 적절하지 않음
황		JSC-1	1:1.85	압축강도 22.0MPa	<ul style="list-style-type: none"> · 낮은 열적 안정성(진공에서 황의 승화) · 황 추출 기술 필요
고분자	폴리우레탄	JSC-1A	1:20	압축강도 6.9MPa	<ul style="list-style-type: none"> · 가공의 용이성 · 고분자의 낮은 열적 안정성 · 재료 운송비 발생
	폴리에틸렌	JSC-1A	1:9	굽힘강도 8-11MPa	
	에폭시 레진	JSC-1A	1:19~49	굽힘강도 30-40MPa	

둘째, 태양광을 이용한 소결은 태양에너지가 무한정이며 달 표면에서 쉽게 이용할 수 있기 때문에 현지 자원을 활용하여 기지를 건설하는데 적절한 기술이 될 수 있다. 유럽의 Regolith 프로젝트에서는 태양광과 유사한 스펙트럼 특성을 지닌 제논 태양광 장치(Xenon-High flux solar simulator)를 이용하여 인공월면토 고형화 기초 연구를 수행하였으며, 프레넬 렌즈를 장착한 갠트리 기반의 이동형 프린팅 장비를 제작해 실제 태양광을 집광하여 인공월면토 고형화를 시연하였다(그림 5). 달 표면에서 태양광 에너지를 무한정으로 사용할 수 있는 장점에도 불구하고, 다음과 같은 상황들로 인해 태양광 소결 기술을 당장 활용하는 것은 어려워 보인다. 우선, 태양광의 침투 깊이가 레이저보다는 깊지만 건설에 필요한

재료를 녹이는데 많은 시간이 소요되어 실제 구조물 건설에 적용하기에는 한계가 있다. 또한, 태양의 위치에 따라 이동하는 태양광 집광 장치의 위치 제어 기술이 필요하며, 달 먼지가 태양광 집광 장치에 퇴적되는 경우 효율이 급격히 저하되기 때문에 이를 방지하기 위한 별도의 클리닝 기술도 수반되어야 한다. 뿐만 아니라, 달 지하의 용암동굴이나 영구 음영 지역과 같이 태양광에 노출되지 않는 지역에서는 태양광 소결 기술을 활용한 구조물 건설의 어려움이 있다. 마지막으로 마이크로파 소결은 에너지 효율 및 가공 시간, 건설 지역 등을 고려했을 때 가장 적합하다고 평가받고 있는 기술이다. 마이크로파 소결은 마이크로파를 재료에 조사하였을 때 발생하는 재료의 유전손실(ϵ'')과 자기손실(μ'')에 의해 전자기파가 열로 변환되어 물질이 가열되는 원리를

[그림 4] 레이저를 이용한 인공월면토 소결 기술



출처: Goulas, A. et al., 2016

[그림 5] 태양광을 이용한 인공월면토 소결 기술




출처: <http://regolith.eu>

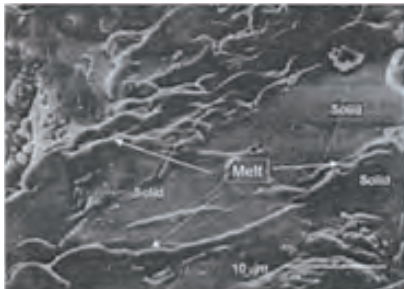
우주 행성 인프라 건설을 위한 건설 재료 및 핵심 구성기술 소개

기반으로 한다. 즉, 외부의 열원으로부터 열전달을 기반으로 하는 일반적인 가열에 비하여 마이크로파 가열은 물질 자체가 발열체 역할을 하므로 재료가 균일하게 가열될 수 있으며 매우 빠르게 온도가 상승하고 작은 에너지로도 물질을 가열할 수 있는 장점이 있다. 범용으로 사용되는 2.45GHz 마이크로파를 아폴로 미션에서 채집된 월면토에 조사하였을 때 입자 경계면이 용융된 것이 관찰되었으며, 이는 월면토 입자의 표면 부분에 존재하는 3~30nm 크기의 nanophase Fe(0)이 마이크로파 에너지를 흡수하는 현상에 의한 것으로 분석되고 있다(그림 6 (a)). 현재 한국건설기술연구원을 포함한 다양한 연구기관에서 마이크로파를 이용한 인공월면토 소결 연구를 수행하고 있으며, 마이크로파 소결 기술을 기반으로 하는 자동화 장비를 개발하기 위한 연구도 진행되고 있다(그림 6 (b)).

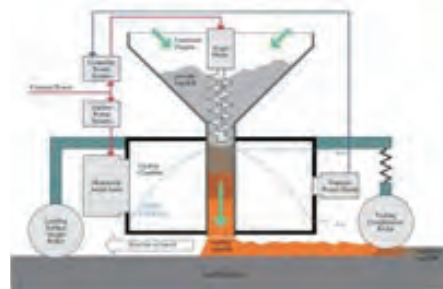
맺음말

우주 기지 건설은 강한 방사선 환경, 급격한 온도 변화와 초고진공 등 극한의 환경 조건에서 향후 인류의 탐사 활동과 우주 자원을 획득하는데 있어 필수적인 요소가 될 것이다. 현재 미국을 비롯한 세계 각국에서 우주 자원 개발 및 우주 건설 분야의 기술 선점을 위한 투자를 경쟁적으로 확대하고 있음에도 불구하고, 국내 연구개발은 여전히 미미한 수준이다. 전술한 대로, 우주 기지 건설을 위해서는 당면한 여러 한계들로 인해 현지 자원을 최대한 활용할 수 있는 기술개발 및 확보가 필수적이며, 건설뿐 아니라 분야별 다양한 전문가들의 적극적인 참여와 협조를 통해 이러한 한계들을 함께 극복해 나아가야 할 것이다. 장차 한국건설기술연구원이 우주 건설 분야의 핵심기술 확보를 통해 우주 연구개발에 선도적인 역할을 담당하게 될 날을 기대해 본다. 

[그림 6] 마이크로파를 이용한 인공월면토 소결 기술



(a) 마이크로파에 의해 소결된 월면토



(b) 3D 마이크로파 프린트 헤드의 모식도

참고자료

- 한국건설기술연구원(2017), “극한건설 환경 구현 인프라 및 TRL6 이상급 극한건설 핵심기술 개발”, KICT 3차년도 연구보고서, KICT 2017-169
- Allan, S. M., Merritt, B. J., Griffin, B. F., Hintze, P. E., and Shulman, H. S. (2013) High-Temperature Microwave Dielectric Properties and Processing of JSC-1AC Lunar Simulant. *Journal of Aerospace Engineering*, Vol. 26, Issue 4, pp. 874-881
- Cesaretti, G., Dini, E., De Kestelier, X., Colla, V., and Pambaguian, L. (2014) Building components for an outpost on the Lunar soil by means of a novel 3D printing technology. *Acta Astronautica*, Vol. 93, pp. 430-450
- Chen, T., Chow, B. J., Wang, M., Shi, Y., Zhao, C., and Qiao, Y. (2016) Inorganic-Organic Hybrid of Lunar Soil Simulant and Polyethylene. *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 28, Issue 4, 06015013
- Chen, T., Chow, B. J., Zhong, Y., Wang, M., Kou, R., and Qiao, Y. (2017) Formation of polymer micro-agglomerations in ultralow-binder-content composite based on lunar soil simulant. *Advances in Space Research*
- Gosau, J.-M. (2012) Regolith Stabilization and Building Materials for the Lunar Surface. *Earth and Space*, 5th NASA/ASCE Workshop On Granular Materials in Space Exploration, Pasadena, CA
- Goulas, A., Harris, R. A., and Friel, R. J. (2016) Additive manufacturing of physical assets by using ceramic multicomponent extra-terrestrial materials. *Additive Manufacturing*, Vol. 10, pp. 36-42
- Grugel, R. N. (2008) Sulfur 'Concrete' for Lunar Applications- Environmental Considerations, NASA/TM-2008-215250, M-1223
- Grugel, R. N. and Toutanji, H. (2008) Sulfur concrete for lunar applications – Sublimation concerns. *Advances in Space Research*, Vol.41, Issue 1, pp. 103-112
- Lim, S., Prabhu, V. L., Anand, M., and Taylor, L. A. (2017) Extra-terrestrial construction processes - Advancements, opportunities and challenges. *Advances in Space Research*, Vol. 60, Issue 7, pp. 1413-1429
- Taylor, L. A. (1988) “Generation of native Fe in lunar soil.” *Engineering, construction, and operations in space I*, ASCE, New York, pp. 67–77
- <http://regolight.eu>

[표 2] 소결 방법에 의한 인공월면토의 고형화

에너지원	특징	
	장점	한계
레이저	<ul style="list-style-type: none"> · 현지 자원 활용 · 복잡한 형상의 구조물 제작 가능 	<ul style="list-style-type: none"> · 소결 가능 두께 및 면적 제한 · 장비 가동을 위한 별도의 에너지 필요 · 시간 및 에너지 소요
태양광	<ul style="list-style-type: none"> · 현지 자원 활용 · 달 표면에서 태양에너지 활용 용이 	<ul style="list-style-type: none"> · 태양광 집광 장치의 위치 제어 기술 필요 · 태양광 집광 장치에 달 먼지 클리닝 기술 필요 · 건설 지역 제한
마이크로파	<ul style="list-style-type: none"> · 현지 자원 활용 · 자체 발열에 의한 빠른 온도 상승 및 균일 가열, 높은 에너지 효율 · 건설 지역 무제한 	<ul style="list-style-type: none"> · 장비 가동을 위한 별도의 에너지 필요