

달 시설물을 위한 폴리머 콘크리트의 시공성 연구

이재호* · 이태식** · 안기용*** · 장병철****

Lee, Jaeho* · Lee, Tai Sik** · Ann, Ki Yong*** · Chang, Byung Chul****

Workability of Polymeric Concrete for Lunar Infrastructure

ABSTRACT

For manned planetary exploration, human beings are developing technologies that can permanently reside on the planet, and the basic three elements of residence, such as clothing and shelter, are required to support essential technologies in construction. In order to develop infrastructure construction technology internationally, various materials and methods such as local cementation, sulfur and aluminum have been tried. In this study, a purpose is proposed a polymer concrete construction validation technology that appropriates the conditions required for manmade exploration in order to develop construction infrastructure material technology using polymer. Concrete specimens with a 10% weight ratio polymer prepared by heating on the bottom were stabilized after 2 hours of heating, and the strength was lower than the top heating method, but the solidifying speed was 2 times faster. These results are expected to be applicable not only to construction of lunar facilities for manned exploration but also to improve the construction of infrastructures such as roads and levees to prevent dust.

Key words : Moon, Construction, Polymer, Human exploration, ISRU

초록

유인 행성 탐사를 위해 인류는 행성에서 반영구적으로 거주할 수 있는 기술을 개발하고 있으며, 이에 거주에 기본적인 3대 요소인 의식주(衣食住)는 건설 분야의 필수적인 기술의 뒷받침이 요구된다. 국제적으로 인프라 구축 기술을 개발하기 위해 현지 시멘트화, 황, 알루미늄 등의 다양한 재료와 방법으로 시도되고 있다. 본 연구에서는 폴리머를 이용한 건설 인프라 재료 기술을 개발하기 위해 유인 탐사에 요구되는 조건에 부합하는 폴리머 콘크리트 시공성 검증 기술을 제안하고자 한다. 하부에서 가열하는 방식으로 제작된 중량비 10%의 폴리머를 사용한 콘크리트 시험체는 가열 후 2시간이 지났을 때 안정화 되었으며, 상부 가열 방식에 비해 강도는 낮았지만 고착속도가 2배 빠른 것으로 나타났다. 이러한 결과는 향후 유인 탐사를 위한 달 시설물의 건설에 적용할 수 있을 뿐만 아니라 먼지방지를 위한 도로나 제방과 같은 인프라 시설의 시공성 향상에도 활용 가능하다고 기대된다.

검색어 : 달, 유인 탐사, 건설, 폴리머, ISRU

* 정회원 · 한양대학교 건설환경공학과 박사수료, 공학석사 (Hanyang University · engine@hanyang.ac.kr)

** 종신회원 · 한양대학교 건설환경공학과 정교수, 건설경영학박사 (Hanyang University · cmtsl@hanyang.ac.kr)

*** 종신회원 · 교신저자 · 한양대학교 건설환경공학과 부교수, 공학박사 (**Corresponding Author** · Hanyang University · kann@hanyang.ac.kr)

**** 정회원 · 한양대학교 건설환경공학과 박사수료, 공학석사 (Hanyang University · bcc@hanyang.ac.kr)

Received December 5, 2016/ **revised** January 13, 2017/ **accepted** February 17, 2017

1. 서론

1.1 연구 배경 및 목적

인류의 우주 영역 확장은 단순히 진취적인 목표로써 과학에 대한 탐구 및 지식의 확장뿐만 아니라, 지구의 자원 고갈 및 운석충돌과 같은 불가피한 상황에서 피난처의 역할을 할 수 있는 제2의 지구의 개념도 고려해야만 한다. 현재 미항공우주국(National Aeronautics and Space Administration, NASA)에서는 행성 유인 탐사에 대한 계획과 함께 거주에 필요한 기반 기술 발전방향을 제시하고 있으며, 국제적인 협력체계를 통해 효율적인 연구 개발을 할 수 있도록 장려하고 있다. 2015년, “Mars First Landing Site/Exploration Zone Workshop for Human Missions to the Surface of Mars” 워크숍에서 단순히 자원 채취나 착륙 지점의 용이성 외에도 거주지에 대한 고려사항도 포함하여 탐사 착륙지를 선정하도록 제시하였다. 이는 앞으로 건설 분야에 대한 기술적 향상과 시장의 확장을 시사한다. 인류가 달에 처음으로 발자국을 남긴, Apollo Mission은 최초의행성 유인탐사이며 1969년부터 1972년까지 총 6번의 달 착륙을 수행하였으며 기존의 무인탐사보다 많은 자료와 유인탐사의 경험을 획득하였다. 미래의 행성 유인탐사는 기존의 사례를 바탕으로 수렴이 되고 있으며, NASA에서는 Apollo Mission 유인탐사 활동 중 달의 먼지에 대한 영향을 9가지 (Vision Obscuration, false instrument readings, dust coating and contamination, loss of traction, clogging of mechanisms, abrasion, thermal control problems, seal failures, and inhalation and irritation)로 분류하고, 유인탐사에서 반드시 문제가 생길 수 있는 요소로 예측하고 있다(Gaier, 2005).

특히, 착륙할 때 달 모듈(Lunar Module, LM)에서 발생하는 기체는 직접적으로 먼지를 일으켜 주변의 시야확보를 어렵게 하고, 지구보다 낮은 1/6 중력의 영향으로 탐사 기간 동안 부유하고 있는 먼지는 장비의 계측, 달 환경과 LM 사이의 기압조절 등을 불안정하게 만들 수 있다. 따라서 달 거주를 위한 유인탐사의 첫 번째 고려 대상은 먼지를 제거하고 탐사 활동범위의 확장을 가져올 수 있는 시공성에 대한 연구로 예측된다.

본 연구는 달에서 활용할 수 있는 재료의 시공성 검증 방법을 제안하고자 한다. 달 콘크리트 시험체를 제작하기 위해 달 유사환경을 진공 챔버로 구현하고, 챔버 내의 폴리머와 달 복제토가 고형물 상태로 혼합된 시료를 가열하여 물리적으로 접착을 시킨다. 접착된 시료는 콘크리트 건설자재로서 온도변화에 따른 양생과정과 압축 강도 테스트를 통해 유인 탐사에 요구되는 조건에 부합하는 폴리머 콘크리트의 시공성을 검증한다.

1.2 연구의 범위 및 방법

사전적인 콘크리트 시공성(Workability)는 다음과 같이 정의되

고 있다. 첫째, ‘콘크리트를 혼합한 다음 운반해서 다져넣을 때까지 시공성의 좋고 나쁨을 나타내는 성질 즉 콘크리트의 시공성을 말하는데, 시공성의 좋고 나쁨은 작업의 용이한 정도 및 재료의 분리에 저항하는 정도로 나타난다(출처: 두산백과).’ 둘째, ‘워커빌리티는 정량적인 수치로 표시하는 것이 곤란하므로 “좋다”, “나쁘다”와 같이 정성적으로 밖에 표시할 수 없고, 그 판정에는 충분한 경험을 요하게 된다(출처: 구미서관).’로 정성적인 평가에 대한 한계를 나타내고 있다. 이를 기반으로 본 연구에서는 폴리머 콘크리트의 시공성의 범위를 ‘기본적으로 중요한 강도와 달 환경에 적합한 재료의 물성을 비교하는 방법’정의하였다.

시공성 검증을 위한 콘크리트 시험체 제작을 위해 달의 주간 시간대를 진공 펌프와 가열을 통해 모사할 수 있는 열 진공 챔버 장비를 구축하고, 진공 챔버 내에서 열전도로 가열이 가능한 몰드를 제작한다. 달 콘크리트 재료로는 달 환경을 모사한 달 복제토를 폴리머와 혼합하여 몰드 내에 다짐으로 채운 후, 폴리머의 접착효과를 활용하여 하부에서 가열하는 방법을 제안하였다.

2. 달 탐사의 거주 조건 및 달 콘크리트 연구 동향

2.1 달 탐사의 시공 조건 및 달 환경

달 먼지를 안정화할 수 있는 개념과 함께 행성 탐사의 거주 조건에 가장 기본적인 개념으로 현지자원화(In-Situ Resource Utilization, ISRU)를 통해 필요한 물자 운송을 줄여 경제적이고 검증된 기술을 통해 활용할 수 있는 안전한 방법이 필요하다(Sanders, 2005).

행성 탐사의 전초기지이자 극한의 환경으로 건설 기술을 검증할 수 있는 달은 지구와 비교적 가까운 거리이며 운송비용이 경제적이며 화성보다 극한의 환경이기 때문에 우선순위로 유인 탐사의 시발점이 되어야 한다. Table 1과 같이 달과 지구의 환경을 비교하면, 달은 지구중력의 1/6 이고, 기압이 10^{-14} torr로 대기가 희박하기 때문에 달 표면온도가 최저 -233°C에서 최고 123°C까지 356°C의 온도 차이를 보인다. 또한 진공 상태의 영향은 방사선과 먼지 발생에서도 매질에 대한 저항이나 마찰이 없기 때문에 중력 외에는 우주정거장과 동일한 조건으로 볼 수 있다.

Table 1. Difference of Moon and Earth

Environment	Earth	Moon
Gravity	9.807 m/s ² (1 G)	1.622 m/s ² (1/6 G)
Atmosphere	101.325 kPa	$10^{-7} - 10^{-10}$ Pa
Temperature	-89.2 ~ 56.7°C	-233 ~ 123°C
Rotation Period	1 day	29 days 12 hours 44min 2.9sec

따라서, 달에 시공을 위해 건설재료의 온도 내구성과 진공 상태에서 시공 가능성을 우선적으로 고려해야 할 조건이다. 기본적인 압축강도는 먼지방지를 위한 도로나 파편을 막을 수 있는 벽과 같은 기반시설을 시공할 경우에는 하중이 지구보다 상대적으로 적게 재하를 받기 때문에 설계의 목표수준에 맞추어야 할 필요가 있다.

2.2 달 콘크리트 연구 동향

국제적으로 달에 건설하기 위한 개념으로 일반콘크리트를 달의 토양으로 동일하게 제작하는 방법, 달 토양에서 황이나 알루미늄을 추출하여 토양을 물리적으로 접합하거나 테르미트(Thermite) 방법 등 다양한 가능성의 개념으로 연구를 진행하고 있다.

유인탐사를 위한 초창기 구조물 건설에 대해 방안을 제시한 T.D. Lin (1987)은 Apollo 16호에서 채취한 샘플 40 g을 활용하여 지구에서 사용하는 콘크리트와 같은 수경화 방식으로 건설 재료로서 검증을 하였고, 물을 얻을 방법으로는 ilmenite (FeTiO_3)를 수소와 결합하여 산화티타늄(TiO_2), 철(Fe)과 물(H_2O)을 추출하는 방안으로 콘크리트 사용에 대한 가능성을 제시하였다. 현재도 일본(Horiguchi, 1996)과 독일(Wilhelm, 2014)에서 Dry Mixed / Steam Injection (DM/SI) 공법으로 지속적으로 재료에 대한 연구를 하고, 활용 가능성이 있다고 판단하고 있다. 현지자원을 추출하여 재생산하는 개념은 동일하지만, 생산에 필요한 플랜트가 부수적으로 필요하게 된다. 또한 2009년 LCROSS 미션에서 달의 극지방에서 PSR 지역의 물로 추정되는 자원을 발견을 하였지만, 한정적인 수자원을 건설재료로서 사용할 수 있는 단계의 현실성은 아직 부족하다.

Vaniman (1992)은 달에 존재하는 황을 추출하여 건설재료로 사용하는 방법에 대해 제안을 하였고 Omar (1993)는 건설재료에 대한 기본적인 테스트를 하여 중량비 35% 일 경우 33.8 MPa의 최대강도가 발현되며 인장강도를 증가시키기 위해 알루미늄 섬유(fiber)를 0.05 mm 정방형으로 얹혀서 최대 43 MPa의 강도가 지 도달하였다. 또한, 타당성을 검증하기 위해, 미소운석(micrometeorites)을 모사한 충격강도와 우주 방사선에 대한 고려한 재료 시험을 하였다. 현재는 유인 탐사를 위한 연구로 3D Printing의 개념을 접목하여 Khoshnevis (2015)의 Sulfur Concrete Contour Crafting (SCCC) 자동화 기술로 응용하고, 달뿐만 아니라 화성에서도 사용 가능하다고 기대하고 있다.

Faieron (2010)은 아치형 돔을 33조각으로 구분하여 조립식 공법으로 거푸집방식으로 각 부분에 맞는 크기를 제작하는 개념으로 건설을 고려하여 67%의 달 복제토와 33%의 알루미늄을 섞은 250 g의 혼합물을 거푸집에 담아 니켈크롬(NiCr)선을 양 끝에 꽂아 7~12 분 동안 18~24 A 전류로 서서히 증가를 시키고 테르미트 반응(Thermite Reaction)이 일어나는 동안 7~15 분 정도를 유지하

여 제작한다. 강도테스트를 하기 위해 1:2 세장비로 지름이 2.5 cm로 제작하여 측정된 결과 10~18 MPa 수준으로 바인딩의 비율에 비해 높은 강도를 발현하지는 않았지만 Apollo Mission에서 사용했던 착륙선의 재활용이나 기존의 문헌에서 제시하는 방안으로 달 토양의 화학적인 추출을 통해 대안을 제시하고 있다.

현재 국내에서 진행하고 있는 폴리머 콘크리트의 제작 방식은 진공 챔버에서 모르타르 사이즈(5×5×5 cm)안에 한국형 달 복제토(Korea-Hyang Lunar Simulant -1, KOHLS-1)와 폴리머를 중량비 10%로 배합하여 달 표면 최대온도 123°C를 모사하고 열판을 혼합물 상부에서 5시간 가열을 한 콘크리트의 압축강도가 12.9 MPa 로 달의 중력을 고려하여 충분한 강도로 판단하였다(Lee, 2015). 그러나 상부에서 가열하여 하부로 열이 전도되는 과정에서 실질적인 온도나 시간에 대한 검증이 부족하기 때문에 시공성을 판단하기에는 제한적이다.

3. 달 콘크리트 시험체 제작 및 시공성 검증

3.1 시험체 설계 및 제작

달 콘크리트 제작을 위해 0.01 torr 의 진공이 유지되고 내부사이즈가 500×500×500 mm 인 진공 챔버를 구축하였다. 달의 주간(Daytime)동안 콘크리트 제작을 하는 시나리오로 최고기온 123°C 설정하고, 2시간 정도 진공 챔버 내부의 온도가 예열이 되었을 시점부터 기존의 제작과 동일하게 230°C로 하부에서 가열한다.

달 콘크리트에 제작되는 시료는 국내에서 상부 가열만 했던 연구와 동일한 조건으로 KHOLS-1과 폴리머 중량비 10% 를 유지하며 혼합물 상태로 몰드에 75 g 씩 나눠담으면서 총 5번의 다짐으로 챔버 밖의 상온의 온도에서 몰드내부를 채운다.

Fig. 1에 설계한 몰드의 개념 설계와 실제 제작된 몰드를 참고하여, 시공성에 대한 열 영향 범위와 효율성을 알아보기 위해 몰드의 사이즈는 50×50 mm의 동일한 넓이를 사용하였으며, 기존보다 열전도가 높을 수 있기 때문에 전도되는 높이를 100 mm 로 제작하였다. 그리고 총 18개의 열센서(Thermocouple)를 시료의 중심에 위치할 수 있도록 25 mm 깊이로 삽입하고, 상부와 하부는 10 mm로 높이차를 두고, 나머지는 시료의 중심축을 기준으로 16 mm 간격으로 삽입한다.

3.2 시험체 검증 결과

먼저 온도변화에 따른 안정화 과정을 실험한 결과는 Fig. 2와 같다.

외기온도 예열 2시간 과 양생 가열 5시간으로 실험 진행하였으며, 예열하는 시간동안 샘플의 내부온도도 45°C 정도로 소폭 상승을 하였으나, 폴리머의 녹는점이 133°C 인 점을 감안하면 실질적인

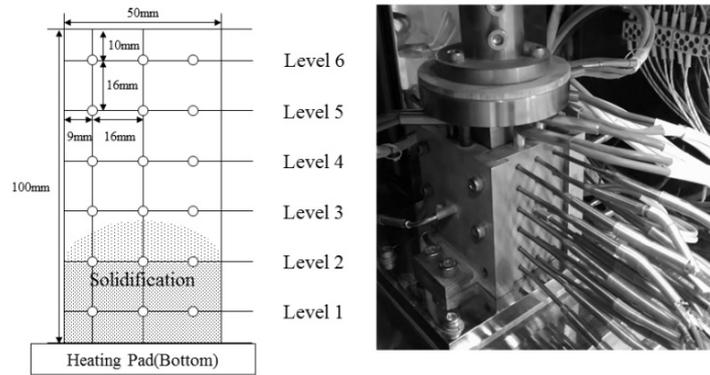


Fig. 1. Concept of Experiment and Equipment Setting

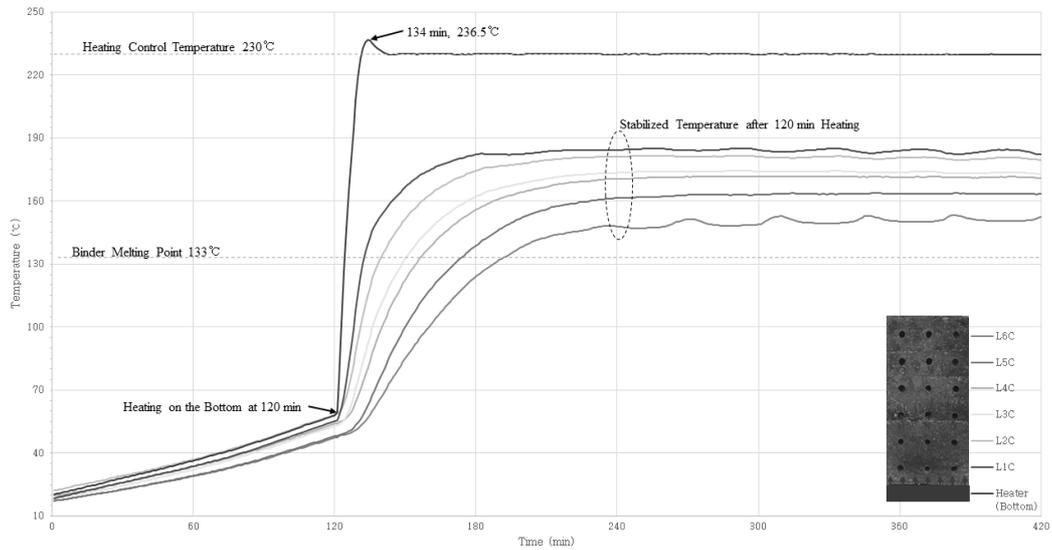


Fig. 2. Temperature on the Time for Curing Polymeric Lunar Concrete

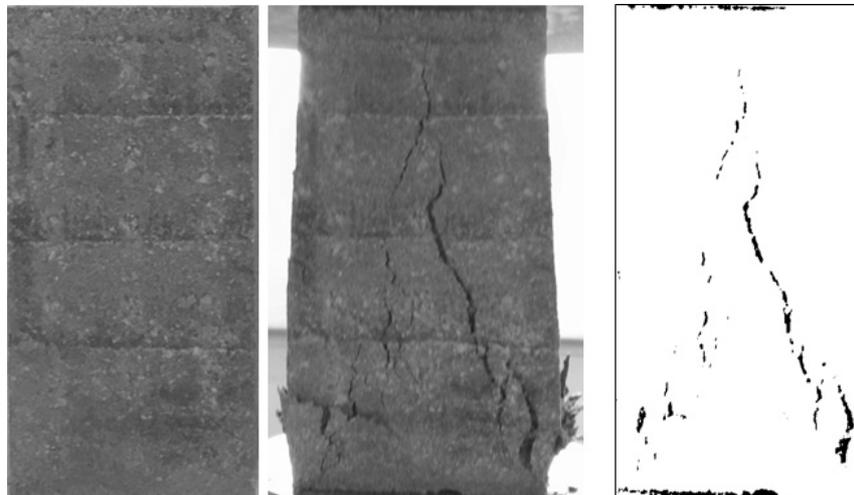


Fig. 3. Fracture Surface of Polymeric Lunar Concrete after Compressive Strength Test

접합의 영향을 미치지 않는다. 이후, 가열한 지 14 분 에 가열 판은 236.5°C에 도달하여 230°C로 안정화되었으며, 동시에 샘플 내에 삽입된 열센서의 측정치도 함께 상승하고 있다. 최종적으로 샘플의 온도가 안정화되는 단계는 가열 후, 2시간 이 지났을 때 안정화가 되었으며, 동일한 시간의 조건으로 상부 가열의 영향으로 고착되는 길이가 45 mm 정도 였던 것에 반해, 하부 가열은 100 mm 모두 고착이 되었다. 또한 열 측정점 1층 중심(Level 1 Center, LIC)부터 측정점 6층 중심(L6C)까지 30-40°C 열의 차이를 보이고 있으며 각 측정점은 열원에 가까울수록 열의 간극차가 줄어들고 있다. 따라서 열원으로부터의 거리가 멀수록 열손실이 급수적으로 늘어나는 것을 알 수 있다.

시험체의 압축강도테스트를 위해 열센서의 삽입 없이 양생 가열 하였으며 그 결과는 Fig. 3에 나타나있다.

파단면 형상에 나타나 있듯이 다짐에 따른 층이 일정하게 구분되어 있음을 알 수 있다. 또한, 압축강도 측정 시, 3.92 MPa 의 수치가 확인되었으며, 파괴 단면의 형상이 중심축으로부터 하부 양 끝단으로 갈라지고, 상부에 비해 하부가 비대하게 팽창하는 형상을 하고 있으며 상부의 접합이 하부보다 강하게 결속되어 있다고 유추할 수 있다.

이는 혼합물의 상태가 고체상태의 파우더를 사용하였고, 달의 환경은 우주의 환경과 동일한 진공상태로서 액상의 상태로 혼합이 불가능하기 때문에 액상의 혼합과는 한계가 있다. 또한 상부 가열보다는 강도가 적게 발현된 근거에 대해서는 상부에서는 열과 폴리머가 녹으면서 발생하는 공극을 가열판 자체의 하중으로 압축을 해주는 효과가 발생했을 것으로 예측된다.

4. 결론

본 실험을 통해 기존의 연구 결과들과 비교하면 Table 2와 같다. 해외에서 연구되고 있는 황(Vaniman, 1992), 알루미늄(Faierson, 2010)과 같은 건식으로 제작되는 콘크리트는 국내에서 연구하고 있는 폴리머 콘크리트(Lee, 2015)보다 강도효율이 상대적으로 낮은 것으로 나타나고 있다. 그리고 달의 최대 표면온도에 비해 황은 녹는점이 낮기 때문에 한정적인 위도 내에서 사용이 제한되어

있다. 또한, 황이나 알루미늄의 기본 개념은 달의 자원을 100% 활용할 수 있도록 플랜트와 같은 정제 장비 운용의 한계가 있으며 한정적 에너지를 플랜트 공정으로 추가 사용해야 하는 문제점이 내제되어 있다.

본 연구에서 수행한 폴리머 콘크리트 시공성 검증 결과, 가열 위치에 따른 시공방법에 따라 강도와 고착시간이 차이가 있는 것으로 분석되었다. 고착되는 속도는 상부 가열에서 50 mm 수준인 반면, 하부 가열에서는 100 mm로 같은 시간대에 2배의 고착 속도가 차이가 났다. 반면 하부 가열 방식은 상부 가열 방식보다 강도 효율이 낮은 것으로 나타났다.

이러한 결과는 설계 목표를 강도나 시공 시간에 대한 중점에 따른 폴리머 콘크리트 시공 공법을 선택하는 데 활용될 수 있다. 하부에서 가열 할 경우, 강도측면은 낮아질 수 있으나, 달의 미세 입자와 고착을 하여 먼지 발생을 예방하고 상부에서 가열하는 것보다 동일한 에너지 대비 2배 정도 적은 시간이 소요됨에 따라, 높은 강도 보다 단시간 내 양생이 요구되는 도로나 정거장과 같은 시설물 건설 재료로도 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문은 미래창조과학부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 해외우수연구기관유치사업 연구 입니다(2011-003 1645).

References

Faierson, E. J., Logan, K. V., Stewart, B. K. and Hunt, M. P. (2010). "Demonstration of concept for fabrication of lunar physical assets utilizing lunar regolith simulant and a geothermite reaction." *Acta Astronautica*, Vol. 67, No. 1, pp. 38-45.

Gaier, J. R. (2005). "The effects of lunar dust on EVA systems during the apollo missions." *National Aeronautics and Space Administration*.

Horiguchi, T., Saeki, N., Yoneda, T., Hoshi, T. and Lin, T. D. (1996). "Study on lunar cement production using hokkaido anorthite and hokkaido space development activities", *Engineering, Construction,*

Table 2. Comparison of Lunar Concrete Workability

Materials	Sulfur (S)	Aluminum (Al)	Polymer (Top Heating)	Polymer (Bottom Heating)
Compressive Strength (Mpa)	35	18	13	4
Binder Ratio (%)	33.8	33	10	10
Efficiency of Strength (strength / binder ratio)	1.03	0.55	1.3	0.4
Melting Point (°C)	119	660	133	133
Binding Method	150°C Melting	Thermite Reaction	230°C One-side heating	230°C One-side heating

- and Operations in Space V : Proc. of Space '96, 5th International Conference on Space*, ASCE, 1996.
- Khoshnevis, B., Yuan, X., Zahiri, B. and Xia, B. (2015). "Construction by contour crafting using sulfur concrete with planetary applications." *Research Report supported by Phase II NASA Innovative Advanced Concept(NIAC) Program*.
- Lee, T. S., Lee, J. and Ann, K. Y. (2015). "Manufacture of polymeric concrete on the moon." *Acta Astronautica*, Vol. 114, pp. 60-64.
- Omar, H. A. (1993). "Production of lunar concrete using molten sulfur." *Final Research Report for JoVe NASA Grant NAG8-278*.
- Sanders, G. B., Romig, K. A., Larson, W. E., Johnson, R., Rapp, D. and Johnson, K. R. (2005). "Results from the NASA capability roadmap team for In-Situ Resource Utilization (ISRU)." *International Lunar Conference 2005*.
- Vaniman, D., Pettit, D. and Heiken, G. (1992). "Uses of lunar sulfur." *In Lunar Bases and Space Activities of the 21st Century*.
- Wilhelm, S. and Curbach, M. (2014). "Manufacturing of lunar concrete by steam." *Earth and Space 2014*, ASCE.