

# 달, 화성 3D 프린팅 주거지 건설을 위한 재료 사출기능 최적화 연구

이진영\* · 이태식\*\*

Lee, Jin Young\*, Lee, Tai Sik\*\*

## Optimization of Material Extruding Performance to Build a 3D Printed Habitat on the Moon and Mars

### ABSTRACT

The National Aeronautics and Space Administration (NASA) has long been studying the essential elements of manned planetary exploration and has held several international challenges to encourage the research works related to it. One of them was the NASA Centennial Challenge Programs which started in 2015. Following the second in 2017, the third is currently going on in 2019. Participating “3D-Printed Habitat Challenge”, one of the challenges in the second program, this research team designed and developed the 3D printer extruding module for the Lunar Simulant (Korea Hanyang Lunar Simulant-1; KOHLS-1) and the polymer. For optimizing the modul, a cylindrical specimen of  $\varnothing 150 \times 300 \text{ mm}^3$  volume and a specimen of  $200 \times 100 \times 650 \text{ mm}^3$  volume were manufactured and their compressive and flexural strengths were tested. The findings can help automatize the space construction in the future.

**Key words :** Lunar soil simulant, 3D printing, Extruding, Optimization, Construction

### 초록

미국항공우주국은 인류의 타 행성 거주 가능성에 대해 지속적으로 관심을 가지고 관련 연구들을 진행해오고 있다. 이에 대한 관심을 고무시키기 위해 다양한 국제 대회를 추진하여 관련 아이디어를 공유하고 정보를 모으는데 기여하고 있다. NASA Centennial Challenge Program 중 한 가지인 “3D-Printed Habitat Challenge”는 2015년과 2017에 1차, 2차 대회를 진행한 바 있으며, 현재 3차 대회를 진행 중에 있다. 본 연구진은 지난 2차 대회 참가 경험과 해외 협력을 통해 3차 대회를 진행하고 있으며 대회 참가 및 건설 자동화 시공을 위하여 건설용 3D-Printer에 적용 가능한 사출 모듈을 개발하였다. 3D 프린팅 사출 모듈과 한국에서 최초로 개발된 달 복제토 KOHLS-1, 플라스틱 폴리머를 재료로 적층식 공시체를 제작하였다. 또한 3D 프린팅을 활용한 건설 기술의 핵심인 사출 모듈을 최적화하는 과정에서  $\varnothing 150 \times 300 \text{ mm}^3$  부피의 원기둥 공시체와  $200 \times 100 \times 650 \text{ mm}^3$  부피의 보 공시체의 압축강도 및 휨 강도 시험을 진행하였다.

**검색어 :** 달 복제토, 3D 프린팅, 사출, 최적화, 건설

## 1. 서론

세계 주요국들은 국제협력을 통해 달, 화성과 같은 타 행성으로의 탐사를 계획하고 있다. NASA는 2020년 달 궤도를 선회하는 우주정거장 구축을 목표로 달 궤도 플랫폼 게이트웨이(Lunar Orbital Platform Gateway) 사업을 진행하고 있으며, 유럽을 포함한 국가기관과 민간업체 등이 참여하고 있다. 또한 일본항공우주연구개발기구(Japan Aerospace Exploration Agency, JAXA)와 유럽우주국

\* 정희원 · 한양대학교 건설환경시스템공학과 석박사통합과정 수료 (Hanyang University · rhee0908@hanyang.ac.kr)

\*\* 정희원 · 교신저자 · 한양대학교 건설환경공학과 특훈교수, 건설경영학박사 (Corresponding Author · Hanyang University · cmtsl@hanyang.ac.kr)

Received November 20, 2018/ revised December 12, 2018/ accepted January 23, 2019

(European Space Agency; ESA)의 공동연구를 통해 수성으로 탐사선을 발사하였다. 이밖에도 유럽 우주국은 문 빌리지(Moon Village)라는 프로젝트를 진행함으로써, 달 기지 건설과 탐사를 계획하고 있다. 달 또는 화성에서의 건설을 위해 3D 프린팅을 응용한 자동화 건설 기술의 연구 개발이 이루어지고 있으며, 이는 달 또는 화성에서의 거주지 건설뿐만 아니라 지구의 남극이나 사막 같은 극한지역에 적용 가능한 기술로 주목받고 있다. 2017년 아랍에미리트는 100년 뒤 인류의 화성 이주가 가능하도록 우주도시를 건설하겠다는 계획을 발표하였으며, 이에 따라 가상의 화성 과학 도시를 두바이 사막에 건설할 계획을 가지고 있다.

타 행성에서의 건설은 일반적인 지구에서의 건설과는 여러 면에서 다르다. 일반적인 지구에서의 건설에서는 거푸집과 시멘트 콘크리트 그리고 철근 등을 이용한 건설 공법을 사용한다. 그러나 우주 행성에는 물과 시멘트가 존재하지 않으며, 이를 지구로부터 운송하는데 약 \$1 million/kg의 비용이 요구된다. 따라서 현지 자원을 활용하는 In-Situ Resource Utilization (ISRU) 개념이 적용된 건설 공법이 필요하다(Lee et al., 2018). 뿐만 아니라, 낮은 중력과 극심한 일교차 등의 극한 우주 환경을 생각하면, 건설의 자동화 또한 필수적이다. 이에, 3D 프린팅을 이용한 자동화 건설 기술이 주목 받고 있으며, 관련 연구와 개발이 활발히 이루어지고 있다.

NASA는 1) Cube Quest Challenge 2) Space Robotics Challenge 3) Vascular Tissue Challenge 4) CO<sub>2</sub> Conversion Challenge 5) 3D-Printed Habitat Challenge 총 5가지의 Centennial Challenge를 개최한다. 그중 3D-Printed Habitat Challenge는 1차, 2차 대회가 완료된 상태이며, 현재 3차 대회가 진행 중이다. 1차 대회는 3D 프린터를 이용한 거주시설 디자인 공모전(3D Printed Habitat Challenge Design Competition)으로, 2015년 3D 프린터 기술업체인 ‘아메리카 메이크스(America Makes)’에서 3D 프린팅이 제공하는 고유의 장점과 화성 현지의 자원을 활용하여 거주지를 디자인하고 건축 개념을 발전시키는 목표로 후원한 대회로서(Janet Anderson, 2015), Team Space Exploration Architecture and Clouds Architecture Office 팀의 “화성 아이스 하우스(Mars Ice

House)”가 최종 우승을 차지하였다. 2차 대회인 “구조 부재 경연 (Structural Member Competition)”은 2016년 10월부터 2017년 8월까지 Caterpillar, Bechtel, 그리고 Bradley 대학이 공동 후원하여 행성 현지 재료와 재활용 재료를 활용하여 구조 부재 3D 프린팅 제작 기술과 재료 속성 개발을 위해 세계적인 전문가들이 경쟁에 참여하였다. 약 10 m<sup>2</sup> 규모의 ‘1/3 크기의 거주지 설계 및 건설’을 목표로 하는 최종 3차 대회는 2017년 11월부터 시작하여 2019년 5월까지 진행될 예정으로, 재활용이 가능한 자원과 결합이 가능한 현지자원 재료를 파악하고, 이를 사용하여 축소 설계된 거주지를 제작 가능한 자율 3D 프린팅 기술 개발에 초점을 두고 있다. 또한, Building Information Management (BIM)과 가상 건설(Virtual Construction, VC) 도구 및 기법을 활용한 기술 경연도 포함되어 있다. NASA는 3D-Printed Habitat Challenge 2차 대회에서 바인더로 사용가능한 플라스틱의 종류를 제시하였으며, 지난 2017년 한양대학교에서는 Moon X Construction Team으로 참가하여 2단계에서 최종우승의 성적을 거두고(Molly Porter, 2017), 최종 단계에서 3위의 순위를 기록하였다(Roman, 2017).

본 연구진은 지난해 제작한 건설용 3D 프린터의 문제점을 도출하고 개선하기 위해 사출모들의 성능, 재료의 성질과 프린팅 방법 최적화에 대한 연구를 진행하고 있다. 본 연구는 현무암질의 달 복제토인 KOHLS-1과 저밀도폴리에틸렌(Low Density PolyEthylene, LDPE)을 주재료로 3D 프린팅 된 산출물의 성형성에 대한 질적 향상과 프린팅을 위한 변수 조절에 대한 최적화를 목적으로 하고 있으며, 이후 다양한 폴리머 재료 및 사출모들의 개선된 변수를 기반으로 오차가 적은 산출물 제작이 가능할 것으로 기대한다.

## 2. 시험 설계

### 2.1 시험 재료

본 연구는 현무암질의 달 복제토인 KOHLS-1과 저밀도폴리에틸렌(Low Density PolyEthylene, LDPE)을 주재료로 사용하였다(Ko et al., 2009). KOHLS-1과 LDPE를 7:3의 비율로 혼합하여,

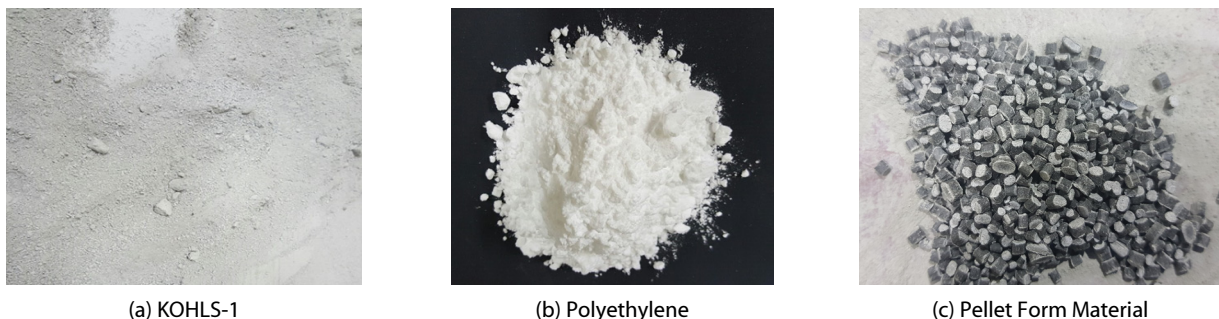


Fig. 1. Materials Used (a) KOHLS-1, (b) Polyethylene, (c) Mixed Material-Pellet Form

LDPE의 녹는점인 127°C 이상의 온도에서 사출한 후, 수조를 통하게 하여 냉각 및 양생하였다. 제작된 표본은 일정한 크기로 절삭하여, 약 1 mm의 지름과 2 mm의 높이를 가지는 펠릿 형태가 되게 하였다(Fig. 1(C)). 이를 3D 프린팅의 재료로 사용하였다. 분말 형태는 높은 마찰계수와 입계각으로 인해 입자간 인력이 강하게 작용하여 원활한 투입이 이루어지지 않았으므로 이를 개선하기 위해 펠릿 형태로 제작한 후 사용하였다. 두 재료의 배합은 NASA 3D-Printed Habitat Challenge에서 제시하였던 “현지자원 70% 이상”조건을 충족시키기 위해서 상기 비율로 제작하였다 (NASA, 2017). KOHLS-1은 달에서 채취한 토양의 일부를 토대로 화학조성과 조립도를 달에서 채취한 것과 유사하게 제조한 것으로 화학적 조성을 다음 Table 1에 나타냈다.

## 2.2 시험체 제작

시험체의 제작에는 국내 연구진이 개발한 갠트리 방식의 3D-Printer가 사용되었다. 본 연구에서 시험체 제작을 위해 개발 및 사용된 3D-Printer는 지지대 및 이동 역할을 하는 X, Y, Z 축 3축으로 구성된다. 프로그램의 코드에 따라 개별 또는 동시에 이동이 가능한 각 축은 자유로운 이동이 가능하다. 또한, 압출 방식의 사출 스크류, 재료를 배출하는 노즐, 재료 투입부로 이루어진 사출 모듈이 설치된다. 3축의 자유로운 이동과 사출 모듈의 재료 배출을 통해 적층식 구조물의 제작이 이루어진다. 본 연구에서는 지름 150 mm, 높이 300 mm의 원기둥 공시체 제작을 통해 사출 모듈의 최적화 연구를 진행하였다. 본 연구에서 출력하고자 하는 목표 원기둥 시험체는 압축강도를 측정하는 표준 시험방법인 ASTM C 39 (Ø 150 × 300 mm<sup>3</sup>)의 원기둥 시험체이며 빔 공시체는 횡강

도를 측정하는 표준 시험방법인 ASTM C 78 (200 × 100 × 650 mm<sup>3</sup>)의 빔 시험체이다.

## 3. 시험 결과

### 3.1 3D 프린팅을 위한 사출모듈의 문제점

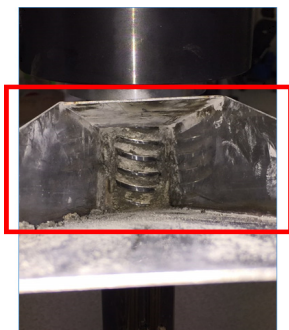
본 연구는 현지 자원과 플라스틱 폴리머를 활용하여 일정 규모 이상 크기의 구조물 제작이 가능한 3D 프린팅 장비의 사출 모듈의 개발 및 최적화를 목적으로 한다. 개발 초기단계에서는 KOHLS-1 과 LDPE를 파우더 형태로 배합하여 실험을 진행하였으나, 파우더 형태의 경우 달 복제토의 높은 마찰계수와 입계각으로 인해 재료 투입부에서 입자간 인력이 강하게 작용하여 재료가 서로 뭉쳐 투입구를 막아 재료가 일정하게 투입되는 것을 방해하는 현상이 발생하였고, 열에 의해 폴리머가 먼저 녹아 투입부에 달라붙어 입구를 막는 등 재료가 일정하게 투입되지 않아 구조물 제작이 불가능 하였다.

### 3.2 사출모듈의 효율성 증진을 위한 개선방안

상기 문제를 해결하기 위해, 다음과 같은 사항을 진행하였다. 1) 선배합을 통해 펠릿 형태로 제작하였고, 2) 밴드히터의 온도를 투입부부터 노즐까지 점차 증가하도록 설정하였다. 재료 투입부에 가깝게 배치된 히터는 폴리에틸렌이 재료 투입부에서 녹지 않도록 재료의 녹는점보다 낮은 50°C로 설정하고, 노즐부로 갈수록 점차 증가하여 마지막 부분은 280°C로 설정 하였다. 그 결과 재료 투입 부 쪽에서 재료가 녹아 입구를 막아 재료가 일정하게 투입되지 않는 문제를 해결하였고 투입부와 접촉하는 부분에는 재료가 둘러

Table 1. Oxide Composition of KOHLS-1 (Ko et al., 2009)

	Oxide composition (%)										
	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Etc.
KOHLS-1	54.56	0.70	16.73	5.68	0.18	2.32	5.44	2.28	3.38	0.21	8.52



(a) Before Improvement



(b) After Improvement

Fig. 2. Before and After Improvement of the Extruding Module

붙은 현상이 발생하지 않은 것을 확인 하였다(Fig. 2).

개발된 사출 모듈에 3축으로 구동되는 갠트리 방식을 적용한 3D 프린팅 장비를 개발하고 사출 모듈의 효율성 증진을 위한 실험을 진행하였다. 3D 프린팅은 사출 속도, 축의 이동속도, 온도에 따른 재료의 유동성 등이 모두 적합한 값으로 형성된 상태에서 적층을 통해 원하는 구조물 형성이 가능하다. 기존에는 폴리에틸렌을 3D 프린팅 재료로 사용한 사례가 없으며, 본 연구에서는 KOHLS-1과 LDPE를 7:3 비율로 배합한 재료를 사용하였기 때문에 각 변수에 대한 적절한 값을 도출하는 연구가 필수적으로 이루어져야 한다. 따라서, 히터의 온도, 축의 이동속도, 모듈의 사출 속도를 변수로 실험을 진행하였다. 본 실험에서 출력하고자 하는 목표 모형은 압축강도를 측정하는 표준 시험방법인 ASTM C 39 ( $\varnothing 150 \times 300 \text{ mm}^3$ )의 원기둥 공시체이다. 5단계로 구분하여 원기둥 공시체의 최적화를 위한 제작 과정 및 형상을 Table 2와 Fig. 3에 나타내었는데, 최초 시험은 축의 이동 속도와 사출 속도가 동일하며, 단계별로 온도가 증가하는 6개의 히터 중 가장 아래 히터의 온도를 300°C로 설정하고 시험을 진행하였다. 그 결과 필요 이상의 높은 온도로 인해 사출물의 유동성이 크게 증가하였고, 적층 구조가 붕괴되어 결과물을 출력하지 못하였다. 두 번째 시험에서는 히터의 온도를 280°C로 변경하여 시험을 진행하였지만 동일한 이유로 최종 결과물의 출력이 불가능하였다. 세 번째 시험에서는 히터의 온도를 더 감소하여 250°C로 설정하였고, 그 결과 재료의 유동성이 감소하여 적층 효율이 증가하였다. 그러나 축의 이동 속도와 사출 속도가 빠르다고 판단되어, 각 변수의 속도를 20 mm/s 및 1570 mm<sup>3</sup>/s에서 15 mm/s 및 1178 mm<sup>3</sup>/s로 감소시킨 후 다음 시험을 진행하였다. 네 번째 시험에서는 적층 효율이 많이 개선된 것으로 확인되었지만, 최종 결과물을 도출하지 못하였다. 이는 사출 속도 대비 축의 이동속도가 빨라 단일 층의 적층 높이가 예상보다 낮게 형성되는 것으로 판단하고, 다섯 번째 시험에서는 축의 이동 속도를 12 mm/s로 감소하여 진행하였다. 다섯 번째

시험에서 최종 결과물을 출력할 수 있었으며, 적층 높이, 속도가 모두 적절한 것으로 확인하였다.

제작된 실제 공시체의 크기는 지름 144 mm, 높이 295 mm로 측정 되었으며, 총 적층 횟수는 85회, 한 층의 높이는 약 3.5 mm로 측정되었다. 한 층의 높이와 층의 개수를 통한 이론적 제작 높이는 297.5 mm으로 계산되지만, 각 층의 높이가 균일하게 형성되지 않았기 때문에 실제 높이는 295 mm로 제작되었다. 또한, 지름과 높이의 오차는 각 4%와 1.7%로 도출되었다. 이는 일정하지 않은 사출량에 의해 매 층 마다 높이가 다르게 형성됨과 동시에 재료의 수축에 의해 일어난 현상으로 판단한다. 실제 우주에서 규모가 큰 건축물을 건설 할 경우, 설계된 구조물과 실제 건축된 구조물의 크기가 상이할 것으로 예상된다. 따라서, 최종 산출물의 오차를 줄이는 사출모듈의 추가적인 최적화 연구가 필요하다.

본 연구에서는 세 가지 변수를 조정하며  $\varnothing 150 \times 300 \text{ mm}^3$  부피의 원기둥 공시체와  $200 \times 100 \times 650 \text{ mm}^3$  부피의 보 공시체를 제작하였으며(Fig. 4), 각각 ASTM C 39와 ASTM C 78

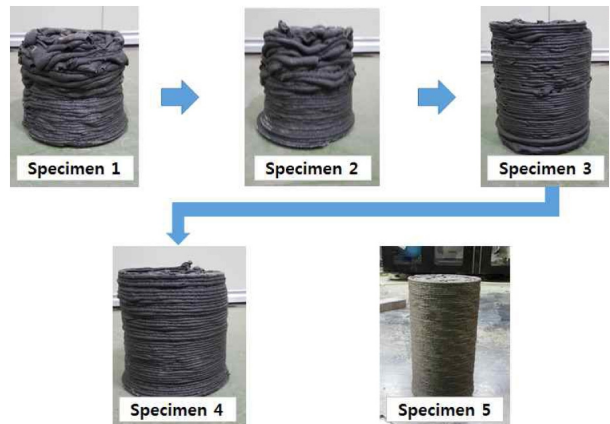


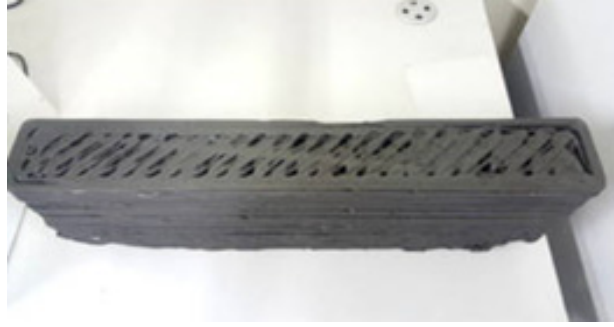
Fig. 3. Results of Cylinder Specimen from the Optimization Process

Table 2. Problems Identification and Improvement Measures of Each Parameter for Optimization

No.	Axis Transfer Velocity (mm/s)	Flow Rate (mm <sup>3</sup> /s)	Heater Temperature (°C)	Note
1	20	1570	300	Excessive fluidity of material due to the high temperature
↓ Lower the heating temperature ↓				
2	20	1570	280	Excessive fluidity of material due to the high temperature
↓ Lower the heating temperature ↓				
3	20	1570	250	High velocity of the axis transfer and Flow Rate
↓ Lower the velocity of axis Transfer and Flow Rate ↓				
4	15	1178	250	The transfer velocity of axis faster than the Flow rate
↓ Lower transfer velocity of axis ↓				
5	12	1178	250	-
The efficiency of Extruding module improved to derive the optimum value				



(a) Cylinder for Compressive Strength



(b) Beam for Flexural Strength

Fig. 4. Manufactured (a) Cylinder and (b) Beam Structure

기준에 의거 압축강도와 휨 강도를 측정하였다. 그 결과 압축강도, 휨강도 값은 각각 13.9 MPa, 14.9 MPa으로 측정되었다.

#### 4. 결론

본 연구는 현무암질의 달 복제토인 KOHLS-1과 LDPE를 주재료로 3D 프린팅 된 산출물의 성형성에 대한 질적 향상과 프린팅을 위한 변수 조절에 대한 최적화를 목적으로 진행하였다. 원기둥 및 빔 형태의 구조물 제작을 통해 달 복제토와 재활용 폴리머를 주재료로 한 개발된 사출 모듈의 효율성 증진에 대한 연구를 하였으며, 이를 활용하여 NASA 3D-Printed Habitat Challenge Phase 3를 위한 BIM 설계 기반의 3.2 m(가로) × 3.0 m(세로) × 2.5 m(높이)의 거주지 제작 가능성을 확인하였다. 그러나, 실제 산출물의 오차를 확인함으로써, 사출 모듈의 일정한 사출을 위한 최적화 연구가 추가적으로 필요할 것으로 보인다.

#### 감사의 글

이 논문은 국토교통부 국토교통기술촉진연구사업의 연구비지원(과제번호 18CTAP-C145187-01)에 의해 수행되었습니다.

본 논문은 2018 CONVENTION 논문을 수정·보완하여 작성되었습니다.

#### References

- Janet Anderson (2015). *3D-Printed Habitat Challenge Phase 1*, NASA, MarshallSpace Flight Center, Available at : [https://www.nasa.gov/directorates/spacetech/centennial\\_challenges/3DPHab/2015winners.html](https://www.nasa.gov/directorates/spacetech/centennial_challenges/3DPHab/2015winners.html)(Accessed : December 27, 2018)
- Ko, S. W., Jang, B. C., Koo, J. K. and Lee, T. S. (2009). "Study for korea lunar simulant prototype development." *Proc. of the KSCE Conf., KSCE*, Vol. 10, pp. 3598-3601 (in Korean).
- Lee, J., Ann, K. Y., Lee, T. S. and Mitikie, B. B. (2018). "Bottom-up heating method for producing polyethylene lunar concrete in lunar environment." *Advances in Space Research*, Vol. 62, No. 1, pp. 164-173.
- Molly, P. (2017). *Six Teams Earn Honors, Prize Money in Second Construction Level of NASA Challenge to 3-D Print a Habitat*, NASA, Marshall Space Flight Center, Available at : [https://www.nasa.gov/directorates/spacetech/centennial\\_challenges/3DPHab/6-teams-earn-prize-money-in-second-level-of-challenge](https://www.nasa.gov/directorates/spacetech/centennial_challenges/3DPHab/6-teams-earn-prize-money-in-second-level-of-challenge) (Accessd : December 18, 2018).
- NASA (2017). *3D-Printed Habitat Challenge Phase 2, Structural Member Competition Rules V.5*, BRADLEY University, Available at : [https://www.bradley.edu/sites/challenge-phase2/documents/Competition\\_Rules.pdf](https://www.bradley.edu/sites/challenge-phase2/documents/Competition_Rules.pdf) (Accessed : December 27, 2018).
- Roman, M. C., Kim, T., Prater, T. J. and Mueller, R. P. (2017). "NASA centennial challenge: 3D-Printed Habitat." *In AIAA SPACE and Astronautics Forum and Exposition*, p. 5279.