

• 특집 • DX시대의 제조기술, 적층제조!

## 적층제조 공정으로 제작된 소프트 그리퍼의 성능특성

# Performance Characteristics of a Soft Gripper Fabricated by Additive Manufacturing Process

정우진<sup>1</sup>, 박채영<sup>2</sup>, 신종호<sup>2</sup>, 이인환<sup>2, #</sup>

Woojin Jeong<sup>1</sup>, Chae Young Park<sup>2</sup>, Jongho Shin<sup>2</sup>, and In Hwan Lee<sup>2, #</sup>

<sup>1</sup> 충북대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Chungbuk National University)

<sup>2</sup> 충북대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Chungbuk National University)

# Corresponding Author / E-mail: [anxanx@chungbuk.ac.kr](mailto:anxanx@chungbuk.ac.kr), TEL: +82-43-261-3161

ORCID: 0000-0001-9381-4908

KEYWORDS: Additive manufacturing (적층제조), Soft gripper (소프트 그리퍼), Thermoplastic polyurethane (열가소성 폴리우레탄)

*Soft robots, known for their flexible and gentle movements, have gained prominence in precision tasks and handling delicate objects. Most soft grippers developed thus far have relied on molding processes using high-elasticity rubber, which requires additional molds to produce new shapes, limiting design flexibility. To address this constraint, we present a novel approach of fabricating pneumatic soft grippers using thermoplastic polyurethanes (TPU) through the Fused Filament Fabrication (FFF) technique. The FFF technique enables the creation of various gripper shapes without the need for additional molds, allowing for enhanced design freedom. The soft grippers were designed to respond to applied air pressure, enabling controlled bending actions. To evaluate their performance, we conducted quantitative measurements of the gripper's shape deformation under different air pressure conditions. Moreover, force measurements were performed during gripper operation by varying the applied air pressure and adjusting the mounting angle. The results of this study provide valuable insights into the design and control of soft grippers fabricated using TPU and the FFF process. This approach offers promising opportunities for employing soft robots in various fields and paves the way for further advancements in robotics technology.*

Manuscript received: July 28, 2023 / Revised: August 11, 2023 / Accepted: August 23, 2023

### 1. 서론

로봇기술은 여러 분야에서 사용되고 있으며, 최근에는 하드 로봇과 소프트 로봇으로 세분화되어 발전하고 있다. 일반적으로 산업용 로봇은 하드 로봇으로 분류되며 금속과 같은 단단한 소재로 된 구조물을 모터 등으로 구동 시킨다. 이러한 특성 때문에 하드 로봇은 강성이 강하거나 딱딱한 물체를 잡거나 이송하기 쉽다. 하지만 깨지기 쉽거나 부드러운 물체를 잡거나 이송시킬 수 있도록 제어하기 위해서는 복잡한 제어가 필요하다.

한편, 깨지기 쉽거나 부드러운 물체에 대해서는 부드러운

재료로 구조물이 만들어지는 소프트 로봇을 적용하고자 하는 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 소프트 로봇은 하드 로봇과 달리 고무나 폴리머같은 소재로 이루어져 있기 때문에 유연하고 부드러운 움직임이 가능하다. 높은 정밀도뿐만 아니라 복잡한 작업이 요구되는 로봇에 그 수요가 증가하고 있다[1].

한편, 물체를 잡는 동작을 구현하기 위해 현재까지 개발된 소프트 로봇의 대부분은 탄성이 높은 고무 등의 재료를 금형을 이용하여 형상을 만드는 것이 대부분이다[2,3]. 따라서 동일한 형상의 대량생산이 요구되는 경우에는 매우 경제적이지만 새로운 형상을 제작하기 위해서는 각각에 따른 금형이 별도로 제작되어야

한다. 하지만 이를 적층제조[4] 공정으로 제작한다면 별도의 금형이 필요없이 다양한 형상의 소프트 그리퍼를 제작할 수 있을 것으로 기대된다.

소프트 그리퍼가 대상물을 잡는 힘이나 변형량을 제어하는 데에는 와이어나 공압이 많이 사용된다[1,5]. 그 중 공압을 이용하는 소프트 그리퍼는 공기의 압력이 전달되는 통로가 있고 여기에 압력을 인가하면 형상의 일부가 팽창하여 전체 형상이 변형되기 때문에 비교적 낮은 공기 압력과 재료의 작은 변형으로도 빠른 형상 변경이 가능하다. 특히 소프트 로봇을 이용하여 크기가 작거나 높은 취성을 갖는 대상을 다루기 위해서는 가해지는 공압에 따른 소프트 그리퍼의 형상 변형 및 물체에 가해지는 힘을 알고 있을 필요가 있다.

이에 본 연구에서는 적층제조 공정 중 열 가소성 플라스틱을 재료로 하는 재료압출 공정에 해당하는 FFF (Fused filament Fabrication) 기술을 이용하여 상대적으로 부드러우며 저렴한 재료인 TPU (Thermoplastic Polyurethanes)로 소프트 그리퍼를 설계 및 제작하였다. 제작된 소프트 그리퍼는 공압에 의해서 구부러지는 동작을 하도록 설계되었으며 이의 성능 평가를 위해 가해지는 공압에 따른 소프트 그리퍼의 형상 변화를 정량적으로 측정하였다. 또한 소프트 가해지는 공압에 따라 소프트 그리퍼가 발휘할 수 있는 힘을 정량적으로 측정하였다.

2. 소프트 그리퍼의 제작

기존 연구를 통해서 적층 공정을 이용해 쉽게 형상을 제작할 수 있으면서 적층 공정에서 지지대가 필요 없는 소프트 그리퍼의 구조를 제안한 바 있다[6]. 또한 기존에 제안한 소프트 그리퍼보다 안정적으로 성형이 가능하면서 제작시간이 단축된 개선된 소프트 그리퍼를 설계하고 이를 TPU를 재료로 제작하는 것을 제시하였다[7].

본 연구에서는 이상과 같은 기존 연구를 바탕으로 제작된 소프트 그리퍼의 성능평가를 수행하였다. 즉, 기존 연구에서 개발된 것과 동일한 소프트 그리퍼를 FFF 방식의 적층제조 장치 (Fine Bot Co., FB-9600)을 이용하여 TPU (Cubicon Co.)로 제작하였다. 그리고 제작된 소프트 그리퍼에 가해지는 공압 변화에 따른 형상 변화뿐만 아니라 이 때 소프트 그리퍼가 대상물에 가해주는 힘 또한 측정하였다. Fig. 1은 본 연구에 사용된 소프트 그리퍼의 구조를 및 단면을 나타낸 개략도이다.

3. 압력에 따른 소프트 그리퍼의 형상 변화

본 연구에서는 소프트 그리퍼에 가해지는 공압의 변화에 따른 형상 변화를 측정하기 위해 Fig. 2와 같은 소프트 그리퍼 형상 변화 측정 시스템을 구성하고 이를 이용하였다. 즉, 시스템의 상단에 고정된 머신 비전 카메라(HIKROBOT Co., MV-CA050-

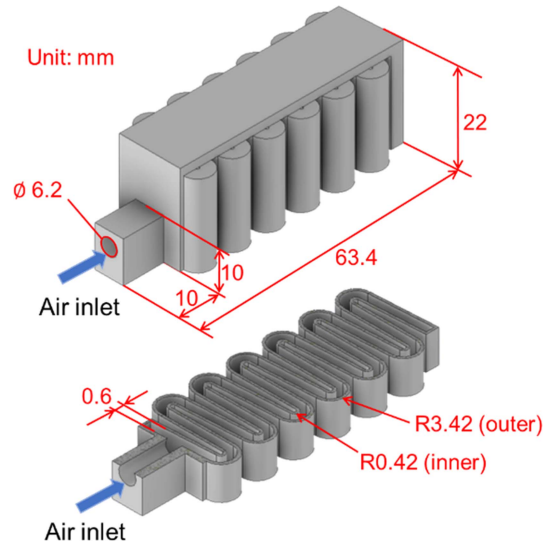


Fig. 1 Schematic drawing of developed soft gripper

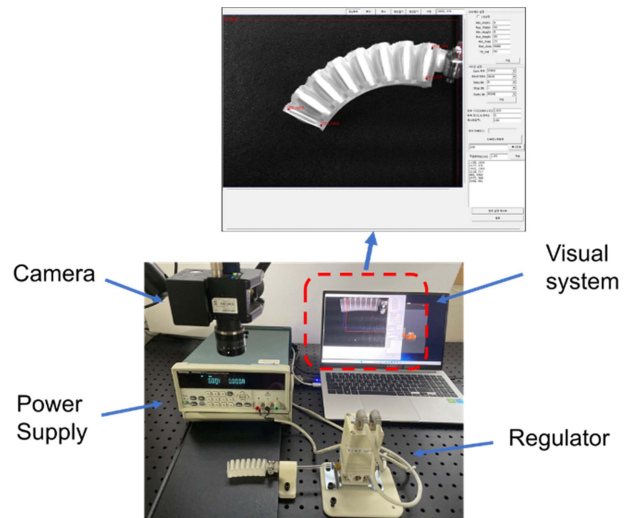


Fig. 2 Experimental set-up for deformation inspection under applied air pressure

20GM)로 그 아래에 놓인 소프트 그리퍼의 형상을 촬영하였다. 그리고 공압을 레귤레이터(SMC Co., ITV2050-RC28L)를 통해서 일정한 압력이 유지되도록 한 후 소프트 그리퍼에 가해지도록 하였다. 소프트 그리퍼의 고정부와 머신 비전 시스템은 광학 테이블 위에 설치하였다. 한편, 머신 비전 카메라에서 측정된 소프트 그리퍼의 형상은 자체적으로 개발한 측정 소프트웨어를 통해서 실시간으로 관측 및 측정이 가능하도록 하였다.

본 연구에 사용된 측정 소프트웨어는 머신 비전 카메라에서 촬영된 특정 위치의 색 차이를 이용하여 소프트 그리퍼의 형상 좌표를 얻을 수 있도록 되어 있다. 따라서 공압에 따른 소프트 그리퍼의 형상 변화 측정을 위해 동일한 크기의 점을 소프트 그리퍼의 특정 위치에 표기한 후 실시간으로 그 위치를 기록하였고 이를 이용해서 소프트 그리퍼가 구부러지는 각도를 측정하였다. 즉, 그림 3과 같이 소프트 그리퍼에 점 A, B, C, D를 각각

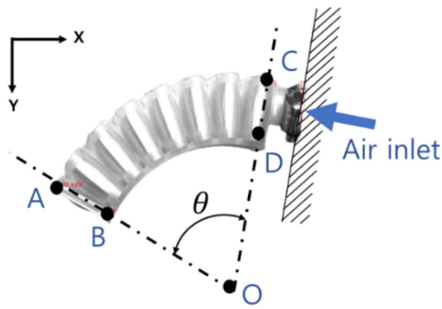


Fig. 3 Definition of deflection angle  $\theta$

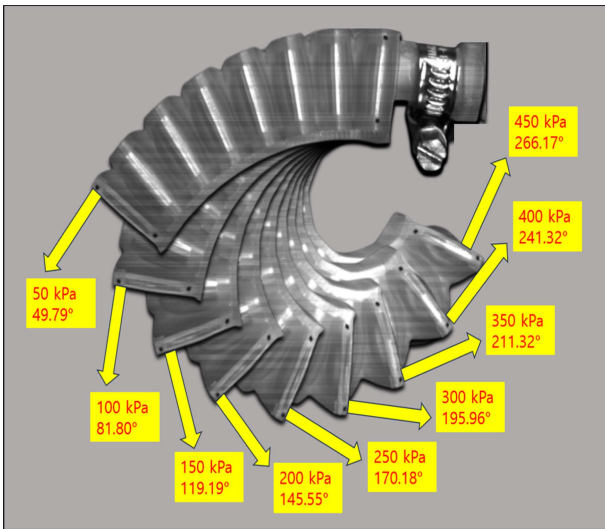


Fig. 4 Overlapped photograph of soft gripper deflection by applied pressure

표기하였다. 이 때 점 C와 D 고정되어 있기 때문에 공압에 의해서 소프트 그리퍼가 변형되면 점 A와 B의 좌표가 변하게 된다. 각 측정 위치에서 점 AB를 잇는 직선과 고정된 점 CD를 잇는 직선의 사이각  $\theta$ 를 구하여 이를 굽힘 각도로 정의하였다. 따라서 공압에 의해 소프트 그리퍼가 변형되면 굽힘 각도가 점 점 커지게 된다.

이상의 방법으로 가해지는 공압에 따른 소프트 그리퍼의 변형을 측정하였다. 즉, 예비실험 결과 소프트 그리퍼가 손상되지 않고 변형되는 범위인 0 kPa에서 450 kPa까지 압력을 50 kPa씩 증가시키면서 각 공압에 따른 굽힘 각도를 측정하였다. Fig. 4는 각 공압에 따른 소프트 그리퍼의 변형을 촬영한 후 이를 중첩한 것으로서, 개발된 소프트 그리퍼는 가해지는 공압이 증가함에 따라서 굽힘 각도가 점차 증가함을 알 수 있다.

Fig. 5는 소프트 그리퍼에 가해지는 각 공압에 따른 굽힘 각도 3회 측정 후 그 평균값들을 그래프로 나타낸 것이다. 공압 변화에 따라 소프트 그리퍼의 굽힘 각도는 선형적으로 증가하는 것을 알 수 있다. 따라서 소프트 그리퍼에 가해지는 공압을 통해서 변형을 예측하는 것이 가능하다. 한편 최대 공압 450 kPa 일 때 굽힘 각도는 266.17°로 매우 큰 값을 보인다.

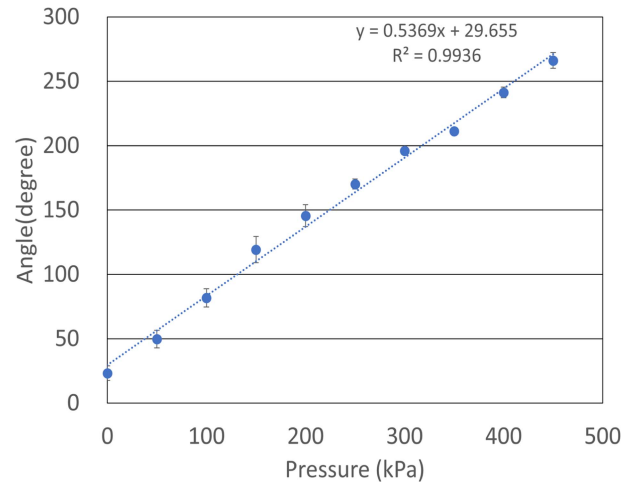


Fig. 5 Measurement results of soft gripper deflection angle for applied pressure

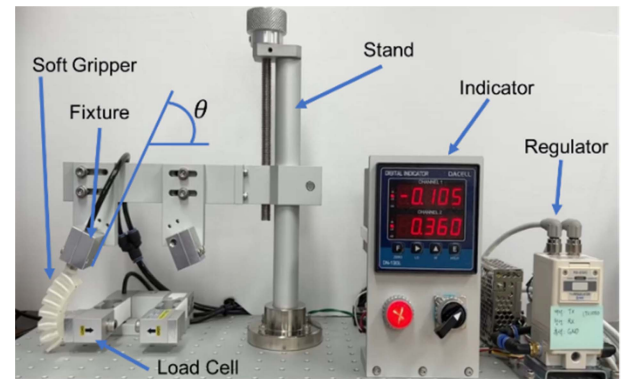


Fig. 6 Experimental set-up for force measurement of soft gripper

따라서 본 연구에서 적층제조 공정으로 제작된 소프트 그리퍼는 매우 큰 굽힘 각도 범위에서 동작이 가능하기 때문에 다양한 형상과 크기를 가진 물체를 다루는 것이 가능할 것으로 기대된다.

#### 4. 소프트 그리퍼 형상 변화에 따른 작동력

제작된 소프트 그리퍼는 공압에 의해서 변형되며, 이 때 소프트 그리퍼가 다루게 되는 물체에 가해지는 힘인 작동력이 서로 다를 수 있다. 따라서 본 연구에서는 이를 측정하기 위한 시스템을 Fig. 6과 같이 구성하였다. 소프트 그리퍼의 고정부를 지지할 수 있으면서 입구 부분에서 공기누출이 일어나지 않게 제작된 고정구에 소프트 그리퍼를 부착하고 이를 길이와 각도를 변화시킬 수 있는 스탠드에 고정하였다. 소프트 그리퍼가 부착된 스탠드 및 일정한 공압을 유지하기 위한 레귤레이터는 광학테이블에 고정하였다. 공압이 가해짐에 따라 소프트 그리퍼가 물체에 가해지게 되는 작동력은 로드셀(DACLELL Co., CB1-K15)에 의해서 측정되게 된다. 이 때 소프트 그리퍼가 장착되는 각도에 따라

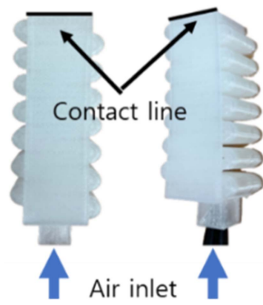


Fig. 7 Initial contact position for force measurement

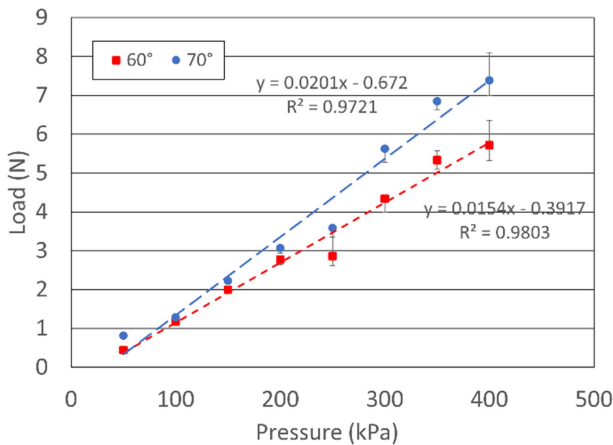


Fig. 8 Measured activation force for applied pressure

측정되는 힘이 달라질 수 있으므로 장착각  $\theta$ 를 변화시키면서 압력에 따른 힘을 측정하였다. 한편, 소프트 그리퍼가 로드셀에 접촉하는 위치에 따라서 측정된 작동력이 달라질 수 있다. 이에 본 연구에서는 소프트 그리퍼의 동일한 위치에서 힘을 측정하기 위해 Fig. 7과 같이 소프트 그리퍼의 끝단이 로드셀에 선접촉을 하도록 초기 설정을 하고 공압을 증가시키면서 힘을 측정하였다.

소프트 그리퍼에 가해지는 압력에 따른 작동력을 측정하기 위해서 가해지는 압력을 50 kPa부터 450 kPa까지 변경하면서 실험을 수행하였다. 이 때 10번씩 반복하여 동일한 공압을 인가하면서 로드셀에 측정된 값을 평균하였다. Fig. 8은 장착각이 각각 60°와 70°일 때 압력 변화에 따라 측정된 작동력을 각각 나타낸 그래프이다. Fig. 8에서 알 수 있듯이 가해지는 공압이 증가함에 따라서 소프트 그리퍼에 의한 작동력이 선형적으로 점차 증가한다. 그리고 최대 공압 450 kPa에서 장착각이 60°와 70°일 때 최대 작동력은 각각 5.721 N과 7.390 N이다. 따라서 동일한 형상의 소프트 그리퍼에 동일한 압력을 가하는 경우에도 초기에 대상물에 접촉하는 각도에 따라서 최대 작동력이 다르게 발생함을 알 수 있다. 향후 연구를 통해서 제작된 소프트 그리퍼의 다양한 장착각 및 측정위치에 따른 작동력에 대한 평가가 수행될 예정이다.

한편, Fig. 8의 두 경우 모두 가해지는 압력이 250 kPa인 지점에서 작동력이 일정하게 증가하지 않다가 더 큰 압력이 가해지면 다시 일정하게 증가하는 경향을 보인다. 이는 Fig. 9와

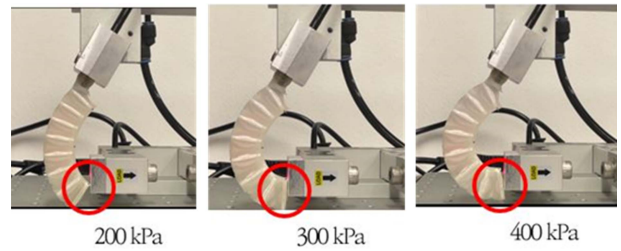


Fig. 9 Change in contact location according to applied pressure

같이 낮은 압력에서는 초기에 설정된 선 접촉에 의한 하중이 로드셀에 가해지다가 압력이 증가하여 250 kPa가 되어 일정 각도 이상으로 변형되게 되면 소프트 그리퍼의 끝단 면에 의한 면접촉으로 접촉 양상이 변화하기 때문이다. 따라서 소프트 그리퍼가 대상 물체에 접촉하여 다루기 위해서는 가해지는 공압에 따른 굽힘각뿐만 아니라 작동력과 접촉위치도 함께 고려해야 함을 알 수 있다.

### 5. 결론

본 연구에서는 재료압출 공정 중 열 가소성 플라스틱을 재료로 하는 FFF 기술을 이용하여 TPU로 제작된 공압에 의해 구부러지는 동작을 수행할 수 있도록 설계된 소프트 그리퍼의 성능 평가를 수행하였다. 가해지는 공압에 따른 소프트 그리퍼의 형상 변화를 측정하였으며, 그 결과, 가해지는 공압이 증가할수록 소프트 그리퍼의 변형량이 선형적으로 점차 증가하였다. 또한, 본 연구에서 적층제조 공정으로 제작된 소프트 그리퍼는 매우 작은 각도부터 매우 큰 각도까지 변형이 가능하며, 이로 인해 다양한 형상과 크기의 물체를 다룰 수 있는 장점이 있다. 또한, 가해지는 공압에 따른 소프트 그리퍼의 작동력을 측정하였으며 가해지는 압력이 증가함에 따라 작동력이 선형적으로 증가하였다. 한편, 초기 접촉 각도 및 접촉 위치에 따라 최대 작동력이 달라진다. 따라서 소프트 그리퍼가 대상 물체를 다루기 위해서는 가해지는 공압뿐만 아니라 작동력과 접촉 위치도 고려되어야 한다. 본 연구 결과는 FFF 기술과 TPU 재료를 이용한 소프트 그리퍼의 효과적인 설계와 제어를 위한 기반을 제공하며, 로봇 기술의 발전과 다양한 응용 분야에서의 활용이 가능할 것으로 기대된다.

### ACKNOWLEDGEMENT

이 논문은 2021년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(No. 2021R1A4A1033141)과 2022년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2022R1A2C1091587).

## REFERENCES

1. Hirose, S., Umetani, Y., (1978), The development of soft gripper for the versatile robot hand, *Mechanism and Machine Theory*, 13(3), 351-359.
2. Yoon, J., Yun, D., (2021), Design of low pressure driven soft actuators for soft gripper, *The Journal of Korea Robotics Society*, 16(1), 23-28.
3. Udupa, G., Sreedharan, P., Sai Dinesh, P., Kim, D., (2014), Asymmetric bellow flexible pneumatic actuator for miniature robotic soft gripper, *Journal of Robotics*, 902625.
4. Lee, I. H., Kim, H.-C., Ahn, D.-G., (2020), Korean terminologies for additive manufacturing according to the ISO/ASTM 52900 standard, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 37(12), 929-936.
5. Zhang, Z., Ni, X., Wu, H., Sun, M., Bao, G., Wu, H., Jiang, S., (2022), Pneumatically actuated soft gripper with bistable structures, *Soft Robotics*, 9(1), 57-71.
6. Park, C. Y., Kim, H. E., Lee, I. H., (2022), Design of support-free soft gripper structure for additive manufacturing, *Proceedings of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers Spring Conference*, 198. <https://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE11063997>
7. Baek, S. R., Park, C. Y., Lee, I. H., (2023), Development of a soft gripper using additive manufacturing, *Proceedings of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers Conference*, 272. <https://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE11444706>

**Woojin Jeong**

B.Sc. candidate in the School of Mechanical Engineering, Chungbuk National University. His research interest is additive manufacturing.

E-mail: woojin2791@naver.com

**Chae Young Park**

M.Sc. candidate in the Department of Mechanical Engineering, Chungbuk National University. Her research interest is multi-material additive manufacturing.

E-mail: pcd0118@naver.com

**Jongho Shin**

Professor in the Department of Mechanical Engineering, Chungbuk National University. His research interest is autonomous system.

E-mail: jshin@chungbuk.ac.kr

**In Hwan Lee**

Professor in the Department of Mechanical Engineering, Chungbuk National University. His research interest is multi-material additive manufacturing.

E-mail: anxanx@chungbuk.ac.kr