

소형 IoT 용 금속 기구물 제작을 위한 금속 FDM 공정 연구

강인구¹, 이선호¹, 이동진¹, 김건우¹, 안일혁^{2*}
¹동명대학교 기계공학부 학생, ²동명대학교 기계공학부 조교수

Metallic FDM Process to Fabricate a Metallic Structure for a Small IoT Device

In-Koo Kang¹, Sun-Ho Lee¹, Dong-Jin Lee¹, Kun-Woo Kim¹, Il-Hyuk Ahn^{2*}

¹Student, School of Mechanical Engineering, Tongmyong University

²Assistant professor, School of Mechanical Engineering, Tongmyong University

요약 자율주행 시스템은 빅데이터를 기반으로 하여 딥러닝 시스템을 기반으로 하고 있으며, 사용되는 데이터는 다양한 센서를 이용하여 수집된다. 그런 센서에 있어서 소형화와 고성능화는 자율주행 시스템 뿐만 아니라 IoT 기반의 다양한 제품에서도 요구되고 있다. 특히, 소형화는 센서의 소형화 뿐만 아니라 센서를 설치하기 위한 기구의 소형화도 동시에 요구하고 있다. 그런 점에서 금속 기구는 센서를 고정하기 위한 가장 좋은 방법을 제시해 주고 있다. 하지만, 소형 센서를 위한 금속 기구 형상을 가공하는 것이 어렵거나, 제작 비용이 높아질 수 있다. 이를 위한 대안으로 본 연구에서는 금속 필라멘트를 기반으로 한 FDM (Fused deposition modeling) 공정을 제시하고, 금속 FDM의 기초가 되는 공정에 대한 연구를 진행하였다. 금속 FDM 공정을 통해서 얻어지는 금속 부품은 탈지-소결의 후 과정을 통해서 만들어진 다. 본 연구에서는 출력 시 설정 변수인 내부 채움 비율(Infill rate) 과 소결 공정 후 밀도 사이에 관계를 조사하였다. 이는 내부 채움 비율과 후 처리 이후 얻어지는 시편의 밀도가 다를 수 있음을 기반으로 하고 있으며, 금속 FDM 공정 이후 얻어지는 출력물의 밀도를 높이기 위한 기초 연구로 의미가 크다고 할 수 있다.

주제어 : 소형 IoT 센서, 금속 필라멘트, 금속 FDM, 탈지, 소결

Abstract An autonomous driving system is based on the deep learning system built by big data which are obtained by various IoT sensors. The miniaturization and high performance of the IoT sensors are needed for diverse devices including the autonomous driving system. Specially, the miniaturization of the sensors leads to compel the miniaturization of the fixer structures. In the viewpoint of the miniaturization, metallic structure is a best solution to attach the small IoT sensors to the main body. However, it is hard to manufacture the small metallic structure with a conventional machining process or manufacturing cost greatly increases. As one of solutions for the problems, in this work, metallic FDM (Fused deposition modeling) based on metallic filament was proposed and the FDM process was investigated to fabricate the small metallic structure. Final part was obtained by the post-process that consists of debinding and sintering. In this work, the relationship between infill rate and the density of the part after the post-process was investigated. The investigation of the relationship is based on the fact that the infill rate and the density obtained from the post-processing is not same. It can be said that this work is a fundamental research to obtain the higher density of the printed part.

Key Words : Small IoT sensor; Metallic filament, Metal-based FDM, Debinding, Sintering

*교신저자 : 안일혁 (ahnih@tu.ac.kr)

접수일 2020년 9월 30일 수정일 2020년 11월 4일 심사완료일 2020년 11월 7일

1. 서론

자율 주행 시스템은 다양한 센서로부터 획득된 대량의 데이터 (Big data)를 기반으로 하여 추정 시스템을 훈련하게 된다 [1]. 따라서 추정 시스템의 정확도는 훈련에 사용되는 데이터 종류와 양에 따라서 결정된다. 획득되는 데이터의 종류를 늘리기 위해서는 다양한 종류의 센서가 설치되어야 한다. 이를 위해서는 또한 센서의 안정적인 설치를 위한 다양한 종류의 설치 지그들이 필요로 하다. 이는 센서들의 소형화됨에 따라서 센서용 지그의 중요성이 더욱 높아지고 있다 [2,3]. 그러한 지그의 제작에 다양한 소재가 적용이 가능하나 외부 외란에 대한 강성이 높은 금속 지그를 사용하는 것이 가장 합리적이라고 할 수 있다. 하지만, 소형 IoT 센서를 위한 고정용 지그는 센서 소형화와 더불어 작은 크기를 가져야하면, 센서 형상의 복잡화에 따라서 지그 형상 복잡도도 같이 증가하고 있다. 문제는 지그 형상의 복잡도 상승은 가공 비용이나 시간이 상당한 증가나 단일 공정으로 제작 자체가 불가능할 수도 있다. 복잡한 형상의 금속 부품의 제작에 있어서 최근에 금속 3D 프린팅 기술이 많이 관심을 받고 있다 [4,5]. 이는 3D 프린팅이 한층 한층 쌓는 적층 과정을 통하여 3D 부품을 제작하기 때문에 기존의 가공으로 불가능한 형상 구현이 가능하기 때문이다. 하지만 구형 분말을 사용하는 금속 3D 프린팅의 경우, 소재가 고가이면 장비 또한 안전상의 문제와 고출력의 레이저를 사용하기 때문에 고가이다.

〈Table 1〉 Filament specifications

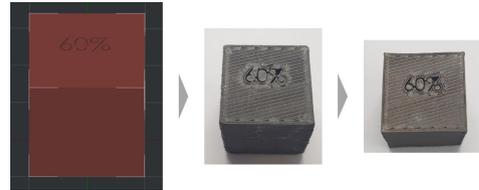
Properties	Unit	Values
Metal load	wt%	>80
Diameter	μm	±50
Density	g/cm ³	5

〈Table 2〉 Recommended process parametrs

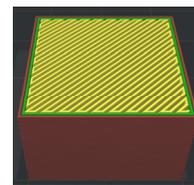
Properties	Unit	Values
Extruder temperature	℃	235
Bed temperature	℃	90
Nozzle diameter	mm	0.4
printing speed	mm/s	30
Layer height	mm	0.17

본 연구에서는 금속 분말을 포함하는 금속 필라멘트를 이용하는 공정을 소개하고, 제안된 공정에서 출력된 부품의 출력 시 설정 밀도와 후 처리 이후 밀도 사이의 관계

를 규명하여 고밀도 부품을 만들기 위한 기초 연구를 수행하였다. 본 연구로 얻어진 결과는 향후 IoT 센서를 위한 금속 지그의 제작 활용이 가능하면, 그 외에 다양한 범위에도 저렴한 가격으로 부품의 제작이 가능하다는 점에서 그 의미가 크다고 할 수 있다.



〔Fig. 1〕 Generated path and fabricated specimens before and after debinding and sintering



〔Fig. 2〕 Generated path to fabricate a specimen with infill pattern

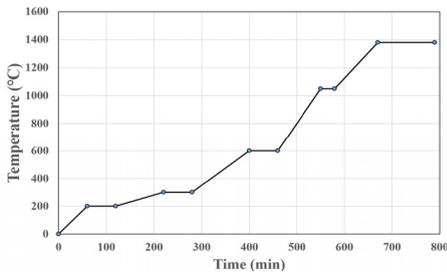
2. 제작 및 측정

2.1 시험편 제작

시험편의 제작에 사용된 금속 필라멘트는 BASF 사에서 판매 중인 Utrafulse 316LX를 이용하였다 [6]. Utrafulse 316L은 Austenite 계열의 Stainless steel이다. 금속 필라멘트에 대한 정보는 Table 1에 표기하였다. 초기에 사용한 출력의 기본 조건은 소재 업체에서 제공한 조건을 사용하였으며, Table 2에 그 조건들을 나타내었다. 출력에 사용된 3D 프린터는 오픈 소스 기반의 프린터 (LUGO-M, www.formersfarm.co.kr) 를사용하였으며, 기본 출력 조건 외에 경로 생성을 위해서는 Raised3D에서 무료로 배포하고 있는 Ideamaker 3.6 버전을 이용하였다. 출력한 시험편은 20mm x 20mm x 20mm의 정육면체로 하였다. Fig. 1은 측정을 위한 경로 생성이 된 시험편 형상과 출력된 시험편 형상을 보여주고 있다. 시험편의 제작 시 내부 채움(Infill rate)은 60~100%로 하였으며, 각 조건에서 5개의 시험편을 제작하였다. Fig. 2와 같이 내부 채움은 45도 각도를 가지는 패턴으로 가지고 출력이 되었으며, 윤곽 출력은 2줄로 설정하였다. 매 층마다 동일한 45도 직선 패턴을 유지하여 출력하였다.

2.2 후처리 공정

출력된 시편은 탈지와 소결 과정을 거쳐서 최종 시편을 제작하였다. 탈지 공정은 자체 제작한 로(Furnace)에서 질산, 질소 혼합 가스를 이용하여 130도에서 3시간을 진행하였다. 소결 공정도 자체 제작한 박스형 로에서 수행을 하였으면, 로 분위기는 수소 (99.9999%) 분위기에서 Fig. 3와 같은 온도 프로파일에 따라서 소결을 진행하였다 [7]. 냉각은 질소 분위기에서 로냉으로 수행하였다. 온도 프로파일은 안정적인 공정을 위하여 최종 온도까지 올라가기 전에 3구간으로 나누었으며, 시편의 내부까지 일정 온도에 완전히 전달되어서 시편 전체가 균일한 온도를 가질 수 있도록 특정 온도 구간은 최소 30분을 유지하였다 [8].



[Fig. 3] Temperature profile for sintering process

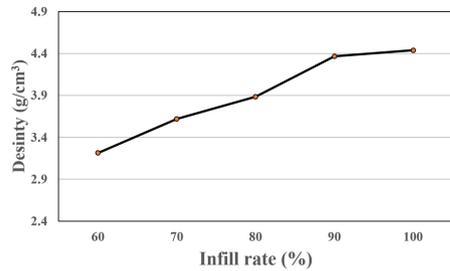
2.3 측정

내부 채움 변화에 따라 제작된 시편은 아르키메데스 원리를 이용한 Mettler Toledo 사의 ML204T 장비를 이용하여 밀도를 측정하였으며, 탈지/소결 이후에 동일한 방법을 이용하여 밀도를 다시 측정하였다 [9]. 탈지/소결 이후의 치수의 변화를 측정하기 위하여 시편의 길이를 측정하였다.

3. 실험 결과 및 분석

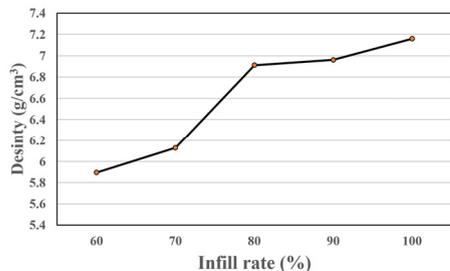
3.1 밀도 변화

내부 채움 비율(infill rate)에 따라서 제작된 5개의 시편을 후 처리(Post-processing, 탈지와 소결 공정) 수행하기 전에 측정을 하였다. 이는 내부 채움 비율에 따라서 일정 공간이 생기게 되고 이는 결국 밀도를 낮추는 원인이 된다. 하지만 일정 수준 이상일 경우 출력 라인간 겹침으로 인해 밀도의 변화가 발생하지 않을 수 있기 때문에 그것을 확인해 보고자 수행하였다 [10].

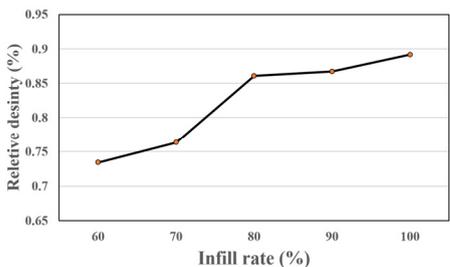


[Fig. 4] Density of fabricated specimens with infill rate

Fig. 4는 후처리 이전에 시편의 밀도를 측정된 결과를 보여주고 있다. 내부 채움 비율이 증가함에 따라서 밀도가 증가하는 것을 볼 수가 있다. 내부 채움 비율이 90% 이상인 경우는 밀도가 4.4 g/cm³로 수렴을 하는 것을 알 수가 있다. 즉 내부 채움 비율이 일정 수준으로 도달하면 내부에서 채움 정도는 유사해지는 것을 알 수가 있다. 이러한 현상은 결국 경로 생성에 비율은 다르지만 내부를 채움에 있어서 생성된 경로와 다르게 공간이 발생하고 있음의 의미한다고 할 수 있다. 소재 업체에서 알려주고 있는 Filament의 밀도는 5.08 g/cm³로 상대 밀도로 본다면, 86.6% 수준이라고 볼 수 있다. 이는 내부 채움 비율을 100%한 경우에도 여전히 내부에 기공이 존재함을 알 수가 있다 [11].



[Fig. 5] Density of post-processed specimens with infill rate

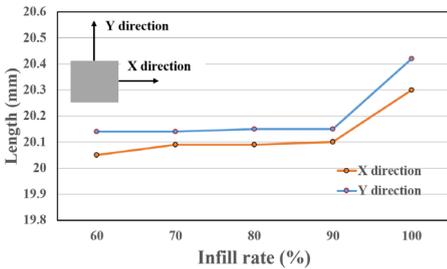


[Fig. 6] Relative Density of post-processed specimens with infill rate

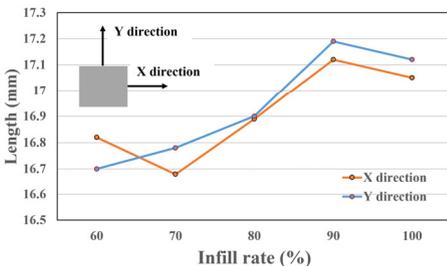
Fig. 5 는 후처리(Post-processing) 과정을 거친 후에 측정된 시편의 밀도를 보여주고 있다. Fig. 4에서 보이는 경향과 같이 후처리 이후의 밀도도 내부 채움 비율이 증가함에 따라 선형적으로 증가하고 있는 것을 확인할 수 있다. 하지만, 이 결과도 소재 업체에서 제공하는 순수 316L의 밀도인 7.83 g/cm^3 에 비하면 낮은 것을 알 수가 있다. Fig. 5의 측정된 밀도를 소재 업체에서 제공한 밀도인 7.83 g/cm^3 으로 나누어서 상대 밀도를 Fig. 6에 나타내어 보았다 [12]. Fig. 6를 보면 후처리 후에 시편의 상대 밀도가 소재 업체에서 제시하고 있는 90~99% 밀도보다 낮다는 것을 알 수 있다. 이는 여전히 내부 채움 패턴, 그 외에 경로 생성을 위한 파라미터들의 설정에 있어서 최적화가 되고 있지 않음을 알 수 있다.

3.2 치수 변화

금속 Filament에는 다수의 폴리머 성분이 포함되어 있다. 따라서 후처리 이후에는 치수가 줄어들게 된다. 이는 포함되어 있는 폴리머 성분의 무게 비중에 따라서 결이 된다. 그래서 후처리 공정 이후에 치수와 최소 치수를 측정하여 그 변화를 확인하여 보았다.



[Fig. 7] Measured length for two direction (X and Y) from as-fabricated specimens



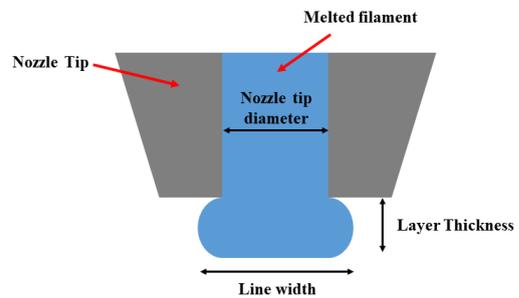
[Fig. 8] Measured length for two direction (X and Y) from post-processed specimens

출력된 시편의 치수는 출력을 하는 3D 프린터의 정밀도와 밀접한 관계를 가지는데, 내부 채움 비율 60~

100%에서도 길이의 편차는 크게 나타나고 있지 않았다. 측정 결과는 실제 치수인 20mm 와 0.2mm 수준이 오차만을 보여주고 있다. 이는 상업용 FDM 장비에서 오차 수준이다. Fig. 7은 출력된 시편의 치수를 보여주고 있는데, 내부 채움의 100%인 경우에 오차가 크게 나온 것은 출력물의 외부 표면이 거칠기가 다른 경우보다 커서 발생한 측정 오차를 포함하기 있기 때문이다 [13,14]. 하지만, 그 외의 경우를 보면 모두 0.2 mm 이내의 오차값을 가지는 것을 알 수가 있다. Fig. 8 은 후처리 후의 치수의 변화를 보여주고 있다. 출력된 시편의 경우와 다르게 내부 채움 비율이 변함에 따라서 치수는 0.5mm 수준까지 변동하고 있음을 확인할 수 있다. 이는 소결 과정에서 금속 성분들이 내부의 기공 부분으로 더욱 많이 유입되어서 치수에 영향을 주었기 때문인 것으로 보인다.

3.3 논의

본 연구에서는 금속 Filament를 이용하여 내부 채움에 따른 탈지/소결 이후의 변화에 대하여 알아보았다. 밀도의 경우는 내부 채움에 비례해서 증가하는 것을 확인할 수가 있었다. 소결 시 결합하는 금속 소재의 중량비가 증가함에 따라서 증가하는 것으로 쉽게 이해할 수 있다. 하지만 내부 채움 100% 인 경우에도 소재의 기본 밀도 7.83 g/cm^3 의 90% 이하의 수준을 보여 주고 있다.



[Fig. 9] Schematics of extruded line width in FDM process

이런 원인에 대해서 2가지로 생각을 해볼 수 있을 것 같다. 첫 번째로 경로 생성에 사용된 라인 폭의 오차이다. 일반적인 경로 생성 프로그램의 경우 경로 생성의 기본 라인 폭 (Fig. 9 참조)을 노즐 팁 홀의 직경으로 이용한다. 하지만 라인 폭은 소재를 적층 두께, 노즐 팁의 온도 등에 따라서 변화하게 된다. 따라서 정확한 라인 폭은 실제 내부 채움 비율과 직접적으로 영향이 있다. 그런데 본 시편의 제작에서는 단순히 0.4mm 의 노즐 팁 홀 직

경을 그대로 사용함으로 인해서 설정 내부 채움 비율과 실제 내부 채움 비율에 사이에 차이가 발생을 하였기 때문으로 이해할 수 있다. 다른 원인으로 생각해 볼 수 있는 것은 적절한 라인 겹침률에 미 선정이다. FDM 방식의 프린터에서는 내부 라인을 서로 일정 부분 겹쳐서 출력력을 하게 된다. 이를 통해서 내부의 기공을 제거하게 된다. 본 연구에서는 이 내부 겹침률을 기존의 폴리머에서 적용하던 10%를 활용하였다. 이는 폴리머 기준으로 라인 간 결합력을 확보하기 위한 설정이었다. 하지만, 금속 Filament의 경우에는 소결 과정에서 금속 소재들이 확실히 결합할 수 있도록 라인 사이에 충분히 공급되어야 한다. 본 실험 결과 라인 겹침률이 낮은 것으로 판단이 된다. 이상의 2가지 이유가 합쳐져서 100%의 내부 채움 비율에서 상대 밀도가 90%를 넘지 못한 것으로 최종 판단이 된다 [15,16].

이상의 논의에서 언급된 것을 종합해 보면, 금속 Filament를 이용하여 고밀도의 금속 부품을 제작하기 위해서는 금속 성분의 공급을 최대한 높여서 FDM 공정에서 발생하는 기공을 소결과과정에서 모두 제거할 수 있도록 하여야 한다는 것이다. 그를 위해서는 다양한 변수들이 있을 수 있을 것으로 예상이 된다. 하지만, 그 중에서 가장 중요한 것은 정확한 라인 폭과 적절한 겹침률을 선정하는 것이라고 할 수 있다. 할 수 있을 거 같다.

4. 결론

본 연구에서는 금속 Filament를 이용한 FDM 공정에 있어서 내부 채움 비율에 따른 밀도의 변화와 길이 변화에 대하여 조사하였다. 밀도와 치수의 변화는 내부 채움이 증가함에 따라서 같이 증가하고 있다는 사실을 알 수 있었다. 이는 내부 채움 비율이 증가함에 따라서 공급되어 지는 금속 양이 증가하기 때문으로 생각된다. 하지만, 내부 채움 비율이 100%인 경우에도 상대 밀도가 90% 이하로 나오는 것은 경로 생성 시 라인 폭과 겹침률 설정에 적절한 값이 설정되지 않았기 때문인 것으로 보인다.

경로 생성 시 라인 폭과 겹침률과 같은 금속 양과 직접적으로 연관이 있는 변수들의 적절한 설정이 부재했기 때문인 것으로 보인다.

따라서 차후 연구에서는 본 연구를 기반으로 하여서 공정 변수 및 후 처리 공정 최적화 연구를 하고자 한다.

REFERENCES

- [1] R.G.Park, H.J.Yun, E.G.Han, S.W.Kang, D.H.Jeon, J.H. Park, K.Y.Jung and T.K.Kang, "A Study on an intergrated System for Urban Autonomous Driving Technology and its Application," Journal of Institute of Control, Robotics and Systems, Vol.26, No.5, pp.279-294, 2020.
- [2] D.G.Kim, H.S. Lee, T.W.Kim and H.W.Lee, "LBS/GPS based Bicycle Safety Application with Arduino," Journal of The Korea Internet of Things, Vol.2, No.1, pp.7-15, 2016.
- [3] S.C.Jang and J.W.Lee, "Development of Intelligent IoT Exhaustion System for Bag Filter Collector," Journal of The Korea Internet of Things, Vol.5, No.1, pp.29-34, 2019.
- [4] T.Wohler, Wohlers report 2018, Wohlers Associattes Inc. 2018.
- [5] B.Stucker, I.Gibson and D.Rosen, Additive manufacturing Technologies, 2nd ed., New York: Springer, 2015.
- [6] Ultrafuse 316L [Internet], <https://forward-am.com/find-material/filaments/ultrafuse-316l>
- [7] B.Verlee, T.Dormal and J.Lecomte-Beckers, "Density and porosity control of sintered 316L stainless steel parts produced by additive manufacturing," Powder Metallurgy, Vol.55, No.4, pp.260-267, 2012.
- [8] L.Malekmotier, G.Z.Voyiadjis, A.S.Dooki, F.Lu and J.Zhou, "The Effects of annealing temperature on interrelation between the microstructural evolution and plastic deformation in polymers," Journal of polymer science part B: Polymer Physics, Vol.55, No.17, pp. 1286-1297, 2017.
- [9] S.Bai, N.Perevoshchikova, S.Yu and X.Wu, "The Effects of Selective Laser Melting Process parameters on Relative Densith of the AlSi10Mg Parts and Suitable Procedures of the Archimedes Method," Journal of applied Sciences, Vol.9, No.3, 10.3390/app9030583, 2019.
- [10] I.H.Ahn, "A Study for the Mechanical Properties with Infill Rate in FDM Process to Fabricate the Small IoT Device," Journal of The Korea Internet of Things, Vol.6, No.3, pp.77-82, 2020.
- [11] S.Riecker, J.Cluse, T.Studnitzky, O.Andersen and B.Kieback, "Fused Deposition Modelling-Opportunities for Cheap Metal AM," World PM2016-AM-Deposition Techlogoies, 2016.
- [12] T.Kurzynowski, W.Stopyra, K.Gruber, G.Ziolkowski, B.kuznicka and E.Chlebus, "Effect of Scanning and Support Strategies on Relative Density of SLMed H13 Steel in Relation to Sspecimen Size," Materials, Vol.12, No.2, doi.org/10.3390/ma12020239, 2019.
- [13] A.Armillotta and M.Cavallaro, "Edge quality in fused deposition modeling: I. Definition and analysis,"

Rapid Prototyping Journal, Vol.23, No.6, pp.1079-1087, 2017.

- [14] A.Armillotta and M.Cavallaro, "Edge quality in fused deposition modeling: II. experimental verification," Rapid Prototyping Journal, Vol.23, No.4, pp.686-695, 2017.
- [15] J.K.Jha and A.Narasimhulu, "A Critical Review of Process Parameters of Fused Deposition Modelling," Journal of Material Science and Mechanical Engineering, Vol.5, No.3, pp.138-141, 2018.
- [16] H.Ch.Wu, and T.C.T.Chen, "Quality control issues in 3D-printing manufacturing: a review," Rapid Prototyping Journal, Vol.24, No.3, pp.607-614, 2018.

강 인 구(In-Koo Kang) [준회원]



■ 2017년 3월 ~ 현재 : 동명대학교 기계공학부 재학

<관심분야>
3D printing, Mechanical design,

이 선 호(Sun-Ho Lee) [준회원]



■ 2017년 3월 ~ 현재 : 동명대학교 기계공학부 재학

<관심분야>
3D printing, Mechanical design

이 동 진(Dong-Jin Lee) [준회원]



■ 2016년 3월 ~ 현재 : 동명대학교 기계공학부 재학

<관심분야>
3D printing, Mechanical design

김 건 우(Kun-Woo Kim) [준회원]



■ 2017년 3월 ~ 현재 : 동명대학교 기계공학부 재학

<관심분야>
3D printing, Mechanical design

안 일 혁(Il-Hyuk Ahn) [정회원]



- 1999년 2월 : 고려대학교 기계공학과(공학사)
- 2001년 8월 : 고려대학교 기계공학과(공학석사)
- 2010년 8월 : 고려대학교 기계공학과(공학박사)
- 2011년 1월 ~ 2014.1: LG 전자 생산기술원
- 2014년 3월 ~ 2017년 2월 : Nanyang Technological University, Research fellow
- 2017년 3월 ~ 현재 : 동명대학교 기계공학부 조교수

<관심분야>
3D printing, Product design, Manufacturing