

소형 IoT 기기 제작을 위한 FDM 프린팅 공정에서의 내부채움에 따른 물성치 변화 연구

안일혁*
동명대학교 기계공학부 교수

A Study for the Mechanical Properties with Infill Rate in FDM Process to Fabricate the Small IoT Device

Il-Hyuk Ahn*
Professor, School of Mechanical Engineering, Tongmyong University

요약 최근의 IoT 센서의 소형화와 센서의 소형화로 인하여 다른 센서 및 구조물들과의 간섭 및 견고성을 고려하여 더욱 복잡해 지고 있다. 최근 3D 프린팅 기술은 센서 직접 제작이나, 센서 소자를 포함하는 기구를 만드는 분야에 다양하게 적용이 되고 있다. 그 중에서, fused deposition modeling(FDM) 기술은 장비 및 소재의 가격이 상당히 저렴하며, IoT 기기의 제작이 활용이 가능한 가장 유력한 기술중에 하나이다. 그런 FDM 프린팅 기술은 플라스틱 소재 기반의 필라멘트를 녹여서 적층하여 3D 형상을 만들어 내는 기술이며, 최근에 특히 종료와 아울러 오픈 소스 기반의 저가형 프린터가 개발됨으로 일반인들에게도 널리 사용되고 있다. 이런 FDM 기술을 이용하여 출력된 출력물에 있어서 기계적 물성치는 소재의 종류와 다양한 공정 변수들에 의해서 영향을 받는다. 그 중에서도 내부 채움(infill)은 기계적 물성치에도 큰 영향을 주면, 출력 시간에도 영향을 준다. 따라서 본 논문에서 내부 채움과 기계적 물성치 및 출력 시간 사이의 관계를 규명하여, 기계 기구물을 제작할 때 출력 시간과 기계적 물성치를 고려한 최적의 내부 채움 조건 선정 방법을 제시하고자 한다. 제시된 방법을 증명하고자, 다른 공정은 모두 고정하고, 내부 채움 조건만을 변경한 인장 시편을 제작하고, 제작된 시편을 인장 실험을 통하여 내부 채움에 따른 출력물의 기계적 물성치를 비교 분석하였다.

주제어 : IoT 센서, 압출 적층 모델링, 기계적 물성치, 내부 채움, 출력 시간

Abstract Recently, the size of the IoT sensor has been decreased and the collecting direction of the IoT sensor for acquiring the data have been changed from 2D to 3D. It makes sensor structure complex. In the fabrication of the complex structure, 3D printing technology has more useful than traditional manufacturing technologies. Among 3D printing technologies, FDM (fused deposition modeling) is a candidate technology to fabricate a small IoT sensor because the price of the machine and the material is cheap. In the FDM process, a 3D shape is made by depositing the melted filament. Recently, the patent of FDM technology is expired and cheap machines are developed based on the open-source. In the FDM process, mechanical properties of a fabricated part is affected by a lots of factors such as the kind of material and process parameters. Among them, infill is affecting the mechanical properties and the production lead time as well. In this work, a new method to optimize the FDM process with the consideration of mechanical property and production lead time was proposed. To verify the method, the fabrications were performed with the different infill rates. The results of tensile tests were analyzed to verify the proposed method.

Key Words : IoT Sensor, Fused Deposition Modelling, Mechanical Property, Infill Rate, Production Lead Time

본 논문은 동명대학교 교내학술연구 과제(2018A015)로 수행되었음.

*교신저자 : 안일혁(ahnih@tu.ac.kr)

접수일 2020년 8월 12일 수정일 2020년 9월 2일 심사완료일 2020년 9월 9일

1. 서론

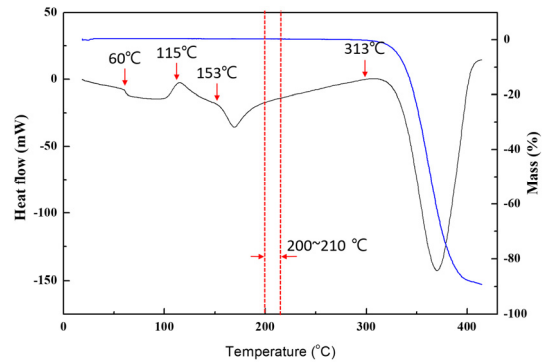
최근의 IoT 센서를 기반으로 하는 다양한 디바이스들이 개발이 되고 있으며, 개발되고 있는 디바이스의 크기는 점점 작아지고 있는 추세이다[1-3]. 또한 데이터를 수집하는 차원도 2차원 데이터에서 3차원 데이터로 확장되고 있다. 이는 IoT 센서를 제조하기 위해서는 더욱 복잡한 구조를 만드는 기술이 필요로 하게 된다. 최근에는 그런 요구의 증가와 기술적인 발전으로 인하여 3D 프린팅 기술이 복잡한 구조의 제조에 많이 활용되고 있다[4,5]. 그 중에서도 압출 적층 방식 (Fused deposition modeling) 기술은 특히 만료와 오픈소스 기반의 저가형 장비의 보급으로 인하여 대중화와 아울러 응용 범위도 급격하게 증가하는 있는 기술이다. FDM 방식 3D 프린트의 가장 큰 장점은 기존에 사용되고 있는 대부분의 플라스틱 소재를 그대로 사용할 수 있다는데 있다.

FDM 방식은 필라멘트 소재로 하여 가열 구조를 가지고 있는 노즐을 통과 시키면서 용융 상태로 변화시키고, 용융된 소재를 일정한 계획된 경로를 따라 적층하여 3D 형상을 만들게 된다[6,7]. 이러한 경로의 생성은 FDM 프린터를 사용하기 위한 준비 단계인 슬라이싱 과정을 통하여 생성된다. 경로의 생성은 출력물의 형상을 만드는 가장 기본이 되며, 또한 구조물의 가지는 물성치에도 영향을 준다[8,9]. 그러한 경로에는 다수의 패턴이 존재하며, 그 중에서 기계적 물성치에 관련성이 가장 높은 것은 내부 채움(Infill rate)이라 할 수 있다[10]. 내부 채움은 윤곽(Contour) 경로를 출력 후 내부를 채울 정도를 결정하는 경로 생성 변수로 채움 밀도가 증가함에 따라서 기계적 물성치는 증가하게 된다. 그에 반해서 내부 채움이 증가함에 따라서 출력을 하는 시간 증가하게 된다[11]. 이처럼 다양한 변수들은 기계적 물성치에 영향을 주고 있으면, 출력물의 대표 물성치를 언급할 때에는 반드시 그런 변수들에 대한 조건이 같이 제시되어야 만 한다.

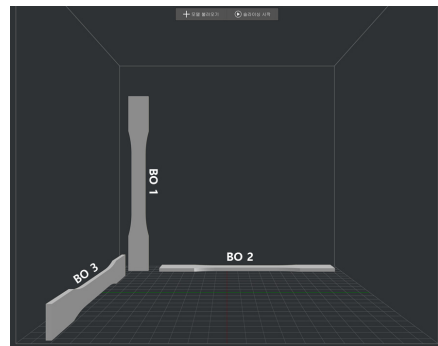
본 연구에서는 내부 채움 비율과 출력 방향에 따른 기계적 물성치 변화를 확인하고, 이를 기반으로 IoT 부품의 제작 시 FDM 방식을 활용 방안에 대해서 제시를 하고자 한다.

2. 실험 및 측정

2.1 시험편 제작



[Fig. 1] DSC result for PLA filament



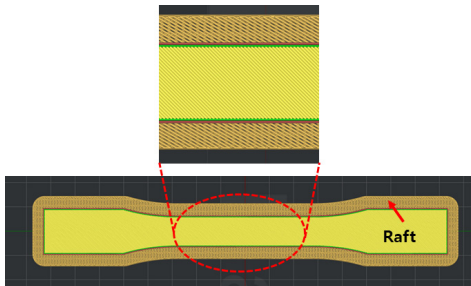
[Fig. 2] Definition of build orientation for specimen fabrication

본 연구에서는 오픈 소스를 기반으로 하는 FDM 장비 (LUGO-M, www.formersfarm.co.kr)와 국내에서 제조된 PLA (Polylactic acid)를 선정하였다. PLA 소재는 옥수수 전분을 포함하는 친환경 소재로 온도 변화에 따른 상변화 시 수축률이 작아서, 출력 시 발생 가능한 수축에 인한 문제 발생이 적게 이어나고 치수 정밀도가 높은 출력물을 얻을 수 있다. 본 연구에서 사용한 PLA 소재에 대하여 시차주사열량 분석법 (Differential Scanning Calorimetry, DSC) 분석법을 이용하여 소재의 분석한 결과는 Fig. 1에 나타내었으며, 분석을 통하여 얻어진 결과를 용융 온도를 기준으로 하여 최적 온도 측정을 위한 사전 시험을 수행하였으며, 그 결과를 기본으로 하여 노즐 설정 온도를 210°C로 선정하였다. 작업 베드(Working bed)의 온도는 일반적인 온도인 65°C를 사용 하였다. 온도 변수 외에 경로를 생성을 위해서는 Raised3D에서 제공하고 있는 IdeaMaker를 이용하였다. 기본적인 경로 생성을 위해서 사용된 조건은 프린터 제조업체에서 사용한 조건을 사용하였다. 시편 제작에 사용된 프린터는 자동 레벨링 기능이 없는 장비이기에,

Raft라는 기본 밑판 구조물을 출력 후 그 위 시편이 출력 되도록 하였다. 본 실험에 사용된 시편은 ASTM D638-14 Type I 형으로 제작하였으며, Fig. 2과 같이 출력 방향의 영향성을 고려하기 위하여 3가지 적층 방향에 대하여 시편을 각각 3개씩 제작 하였다. 내부 채움 패턴의 영향을 알아보기 위하여 내부 채움 패턴을 Fig. 3과 같이 Grid 타입을 이용하여 제작하였다. Grid는 45/145도의 각도 측별로 번갈아 가면서 제작이 되었다. 고려한 내부 채움 비율은 60~100%를 10% 단위로 제작하였다.

2.2 인장 실험

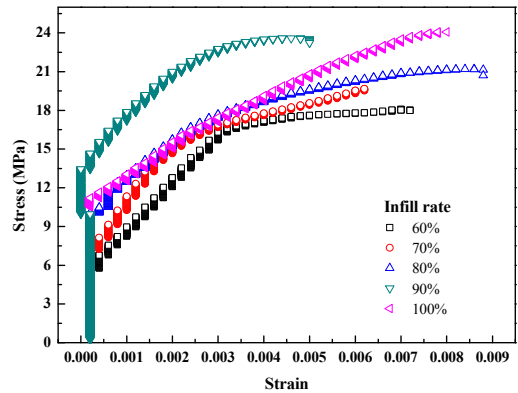
인장 실험은 Fig. 4와 같은 범용 인장 시험기 (MMS tech, HZ-1003B)를 이용하여 측정을 하였다. 시험 조건은 ASTM D638-14에서 제시하고 있는 5mm/min 일정 변위 속도를 이용하였으며, 표점 거리 50 mm에 신장계를 설치하여 연신율을 측정하였다.



[Fig. 3] Infill pattern for the specimens



[Fig. 4] General purpose tensile test machine



[Fig. 5] Strain-stress curve with infill rate at BO1

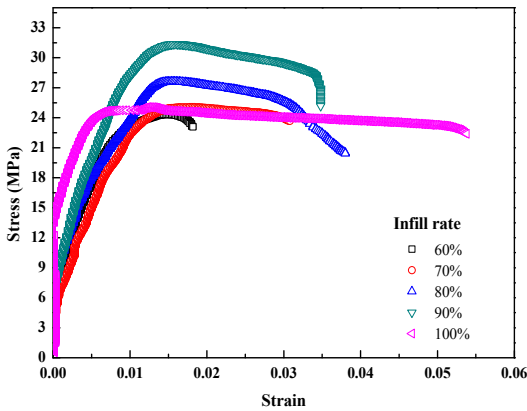
3. 실험 결과 및 분석

3.1 인장 실험 결과

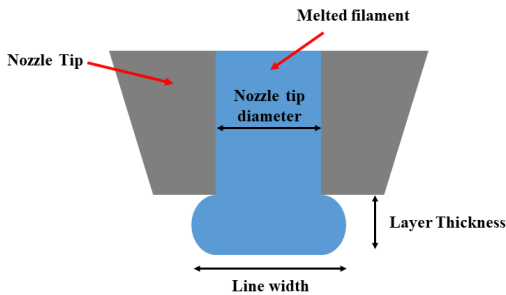
3.1.1 내부 채움 비율 영향

Fig. 5는 BO1 경우 내부 채움에 따른 응력-변형률 선도를 나타내고 있다. 그림에서 보고 있듯이 일반적으로 내부 채움이 증가함에 따라서 항복 강도와 인장 강도 모두 증가하는 경향을 보이고 있음을 확인 할 수 있다[12].

BO1는 Fig. 2에서 보이는 것과 같이 적층 방향이 인장 하중이 가하여 지는 방향에 대하여 수직인 경우이다. 이 경우 시편의 인장 강도는 적층 계면 사이의 결합력이 인장 강도를 결정하는 주 인자로 작용하게 된다. 즉, 내부 채움이 증가할수록 측간 결합되는 양이 증가되고, 그것이 강도를 증가시키는 주원인으로 이해할 수 있다. 내부 채움이 60%에서 항복강도는 5.9 MPa 로 측정되나, 70%에서는 7.15 MPa로 내부채움 60%에서의 항복강도에 비해서 1.25 MPa 증가에 그치지만, 80%인 경우에는 9.7 MPa로 크게 증가하는 것을 확인 할 수 있다. 반면, 80%에서 100%로 내부 채움이 증가하여도, 항복 강도는 10% 이내의 소폭 증가만이 확인된다. 하지만, 인장 강도에서는 오히려 90% 내부 채움이 100% 내부 채움에 비해서 더 높은 인장 강도를 보여주고 있다. 이는 Fig. 6에서와 같이 BO2의경우에도 동일하게 관찰되고 있다. 이는 지나친 내부 채움이 기계적 물성치에 도움이 되지 않고 있음을 의미한다. 이는 출력 라인 폭의 설정에서 오는 문제라고 생각이 된다.



[Fig. 6] Strain-stress curve with infill rate at BO2



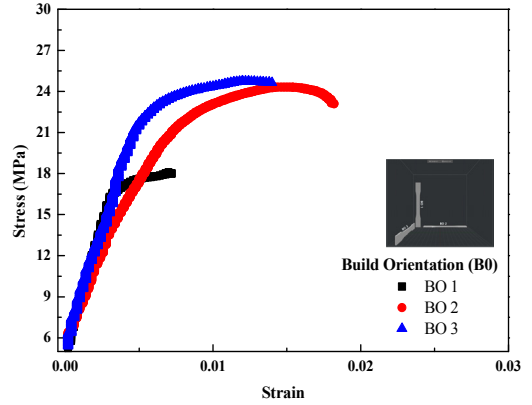
[Fig. 7] Schematics of extruded melt polymer

일반적으로 FDM 방식에서는 라인 폭을 노즐 팁의 출직경으로 선정을 하여 사용을 한다. Fig. 7은 일반적인 FDM 노즐에서의 팁에서 용융 수지가 토출될 때, 용융 수지의 상태를 보여주고 있다[13]. 그림에서 보인 듯이 용융된 수지가 노즐 팁을 나오게 되면 압축되어 있던 용융 수지는 낮은 대기압으로 나오면서 확장을 하여 더 넓은 라인 폭을 가지게 된다. 내부 채움 100%와 라인폭 설정을 0.4로 할 경우, 실제 생성되는 라인 폭에 의해서 라인들 사이의 겹침 현상이 크게 일어나게 되고 있는 이것이 결국 인장 강도에 저하를 가져오는 것으로 예상된다. 이는 과도한 겹침으로 인한 내부 응력이 항복 강도 및 인장 강도에 영향을 주고 있음을 의미한다.

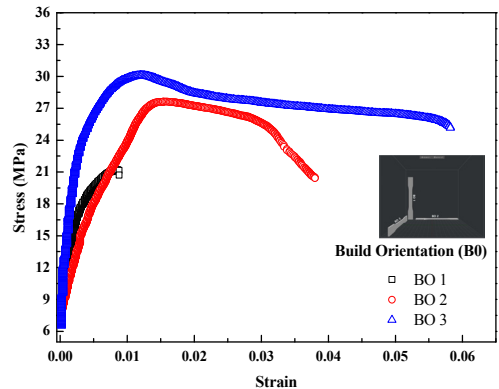
3.1.2 출력 방향 영향

항복강도 및 인장 강도에 대한 출력 방향 (Build orientation)의 영향은 기존의 다른 연구에서도 많이 연구가 된 부분이다. 하지만, 내부 채움이 달라짐에 따라서 출력방향의 영향에 대한 연구는 간단하지만 많이 되고 있지 못하다. 그래서 본 연구에서는 내부 채움의 변화에

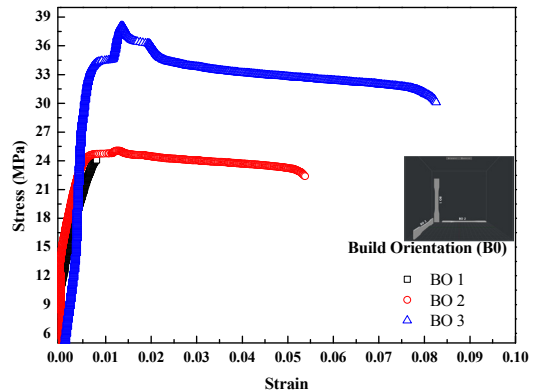
따른 출력 방향의 강도 변화 경향에 대하여도 알아보고자 하였다.



(a) 60% infill rate

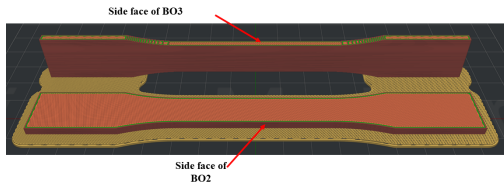


(b) 80% infill rate



(c) 100% infill rate

[Fig. 8] Strain-stress curve with infillrate of 60%(a), 80%(b) and 100%(c)



[Fig. 9] Side face in BO2 and BO3

Fig. 8은 내부 채움 60%, 80%, 100% 일 경우, 출력 방향에 따른 응력-변형률 곡선을 보여주고 있다. 그림에서 먼저 관측되는 결과는 BO1과 BO2의 사이의 강도의 차이가 내부 채움이 증가함에 따라서 점점 커지고 있음을 알 수가 있다. Fig. 9에 보이는 것과 같이, BO3 경우는 측면이 적층 단면이 된다. 따라서 내부 채움 밀도가 증가함에 따라서 측면의 밀도 따라서 증가하게 된다. 하지만, BO2의 경우는 내부 채움 밀도가 높아져도 측면의 밀도는 영향을 받지 않고, 단면의 밀도만 증가하는 효과를 얻게 된다.

3.2 논의

FDM 방식의 프린터를 이용하여 소재를 제작할 경우 다양한 인자들이 기계적 물성치에 영향을 준다는 사실은 많은 연구를 통해서 밝혀져 왔다[14]. 내부 채움이 변함에 따라서 소재의 강도 사이에 변화를 일으키는 주 인자는 조금씩 바뀔 수 있음을 실험을 통하여 알 수 있었다. 내부 채움이 60%~80%와 같은 수준일 경우에는 내부 채움이 증가함에 따라서 기계적 물성치도 증가를 하게 된다. 이는 내부 채움의 증가에 따라서 소재 간 결합면적의 증가로 쉽게 이해 할 수 있다. 하지만 90%~100%와 같은 경우에는 기계적 강도는 증가를 기대할 수는 있지만, 반드시 높은 내부 채움이 높은 기계적 강도를 보이는 것은 아님을 알 수 있었다. 이는 출력 라인 폭의 정확한 설정을 통해서 해결할 수 있다. 출력 조건에 따른 정확한 라인 폭 설정은 경로의 생성에 영향을 주면, 내부 채움 비율이 높아 지더라도 내부 채움 라인 사이의 과점침이 발생하지 않아서 내부 채움 비율이 증가함에 따라서 인장 강도도 같이 증가할 것으로 예상 해 볼 수 있다. 하지만 라인 폭은 압출률과 적층 두께 및 이송 속도와 같은 다양한 인자들에 영향을 받게 된다. 따라서 사실 최적의 공정 조건을 얻는 것은 쉽지 않은 일이다. 또한 이런 변수들은 출력률의 치수 정밀도와 표면 조도와도 직접적으로 영향이 있기 때문에 모든 조건을 만족 시키는 최적의 조건을 찾기가 쉽지 않을 것으로 생각된다[15].

그런 문제에 대한 해결 방안은 본 연구 결과를 바탕으로 한 가지 시나리오를 만들어 볼 수 있다. FDM에 있어서 윤곽 치수 정밀도와 조도를 최적으로 하는 조건을 먼저 선정을 한다. 이 두 가지 조건은 Fig. 7에서 언급된 출력 라인 폭의 정확한 설정으로 해결할 수 있다. 이 조건에서 내부 채움 비율 90%~100% 일정 간격으로 조절을 하면서 기계적 물성치를 평가한다면, 최적의 공정 조건은 선정될 수 있을 것으로 생각이 된다.

이런 조건을 기반으로 하여 기구를 제작 해야만 제품의 물성과 품질을 모두 보증할 수 있을 것으로 생각된다.

4. 결론

본 연구에서는 내부 채움 비율과 출력 방향에 따른 기계적 물성치의 변화를 인장 실험을 통하여 알아보았다. 최고 물성치를 얻기 위한 내부 채움 비율은 출력 단일 라인 폭의 영향을 받으며, 이는 경로 생성에 있어서 출력 라인 폭의 영향을 큼을 알 수 있었다.

차후의 연구에서는 라인 폭의 설정에 따른 과점침 현상과 이로 인한 물성치의 변화에 대한 연구와 윤곽 출력의 특징에 따른 기계적 물성치의 변화에 대해서 연구해 보고자 한다.

ACKNOWLEDGMENTS

본 논문은 2018년 동명대학교 교내학술연구비 지원에 의하여 연구되었음(2018A015).

REFERENCES

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] T.K.Kim, "IoT(Internet of Things)-based Smart Trash Can," Journal of The Korea Internet of Things, Vol.6, No.1, pp.17-22, 2020.
- [4] T.Wohler, Wohlers report 2018, Wohlers Associates

Inc. 2018.

- [5] B.Stucker, I.Gibson and D.Rosen, Additive Manufacturing Technologies, 2nd ed., New York: Springer, 2015.
- [6] Z.Liu, Y.Wang, B.Wu, C.Cui, Y.Guo and C.Yan, "A Critical Review of Fused Deposition Modeling 3D Printing Technology in Manufacturing Polyactic Acid Parts," The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol.102, pp.2877-2889, 2019.
- [7] T.N.A.T.Rahim, A.M.Abdullah and A.H.Akil, "Recent Developments in Fused Deposition Modelling-based 3D Printing of Polymers and their Composites," Polymer Reviews, Vol.59, No.4, pp.589-624, 2019.
- [8] M.Ouhsti, EL.B.Haddadi and S.Belhouideg, "Effect of Printing Parameters of the Mechanical Properties of Parts Fabricated with Open-source 3D Printers in PLA by Fused Deposition Modeling," Mechanics and Mechanical Engineering, Vol.22, No.4, pp.895-908, 2020.
- [9] N.K.Maurya, V.Rastogi and P.Singh, "Experimental Investigations of Improving Part Strength in Fused Deposition Modeling," International Journal of Engineering and Technology, Vol.7, No.39, pp.457-461, 2018.
- [10] C.Alvarez, L.Kenny, F.Rodrigo, C.Largos and A.Miguel, "Investigating the Influence of Infill Percentage on the Mechanical Properties of Fused Deposition Modelled ABS Parts," Ingeniería e Investigación, Vol.36, No.3, pp.110-116, 2016.
- [11] K.Ransikarbum, S.Ha, J.Ma and N.Kim, "Multi-objective Optimization Analysis for Part-to Printer Assignment in a Network 3D Fused Deposition Modeling," Journal of Manufacturing Systems, Vol.43, No.1, pp.35-46, 2017.
- [12] H.Li, S.Zhang, Z.Yi, J.Li, A.Sun, J.Guo and G.Xu, "Bonding Quality and Fracture Analysis of Polyamide 12 Parts Fabricated by Fused Deposition Modeling," Rapid Prototyping Journal, Vol.23, No.6, pp.973-982, 2017.
- [13] T.J.Coogan and D.O.Kazmer, "Bond and Part Strength in Fused Deposition Modeling," Rapid Prototyping Journal, Vol.23, No.2, pp.414-422, 2017.
- [14] A.V.Borille, J.D.O.Gomes and D.Lopes, "Geometrical Analysis and Tensile Behaviour of Parts Manufactured with Flame Retardant Polymers by Additive Manufacturing," Rapid Prototyping Journal, Vol.23, No.1, pp.169-180, 2017.
- [15] H.C.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, 2017.

안 일 혁(An-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