

FDM 3D 프린터 최적 공정 변수 선정을 위한 공정 윈도우 평가법

안일혁
동명대학교 기계공학부

Estimation of Process Window for the Determination of the Optimal Process Parameters in FDM Process

Il-Hyuk Ahn
School of Mechanical Engineering, Tongmyong University

요 약 3D 프린팅 기술에 있어서, 각각의 기술들은 고품질의 출력물을 얻기 위해서는 최적화해야 할 다양한 인자들을 가지고 있다. FDM (fused deposition modeling) 방식의 3D 프린터 또한 최적화해야 할 다수의 인자들이 있다. 그 중에서도 노즐 온도와 노즐 이송 속도는 가장 기본이 되는 인자라고 할 수 있다. 안정적인 출력이 가능한 두 인자의 조합을 찾는 것은 FDM 장비를 이용한 출력에 있어서 가장 먼저 선행되어야 할 일이다. 본 연구에서는 다양한 두 인자 조합에 따라 단일 라인 출력을 수행하였고, 얻어진 출력 결과물을 평가를 통하여 안정적인 출력이 가능한 범위를 선정하는 새로운 방법을 제시하였다. 제시한 방법을 통하여 평가한 안정적 조건 범위들을 동일 범위 조건 아래에서 다층 단일 라인 출력을 통하여 검증하였다. 그 결과, 단일 라인과 다층 단일 라인 출력이 동일한 안정적 범위를 보이고 있음을 확인 할 수 있었다. 이는 본 논문에서 제안한 단일 라인 평가법을 다층 출력의 안정성을 그대로 반영할 수 있음을 보여 준다. 이상의 결과들로 볼 때, 제안한 방법은 간단한 실험과 측정 방법을 이용하여 손쉽게 수행 될 수 있다는 점과 공정 변수들의 최적화를 위한 기본 데이터를 제공한다는 점에서도 그 의미를 찾을 수 있었다.

주제어 : 적층 제조 기술, 압출 적층 기술, 공정 변수, 공정 윈도우

Abstract In 3D printing technologies, many parameters should be optimized for obtaining a part with higher quality. FDM (fused deposition modeling) printer has also diverse parameters to be optimized. Among them, it can be said that nozzle temperature and moving speed of nozzle are fundamental parameters. Thus, it should be preceded to know the optimal combination of the two parameters in the use of FDM 3D printer. In this paper, a new method is proposed to estimate the range of the stable combinations of the two parameters, based on the single line quality. The proposed method was verified by comparing the results between single line printing and multi-layered single line printing. Based on the comparison, it can be said that the proposed method is very meaningful in that it has a simple test approach and can be easily implemented. In addition, it is very helpful to provide the basic data for the optimization of process parameters.

Key Words : Additive manufacturing, Fused deposition modeling, Process parameters, Process window

*This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea(NRF) funded by the Ministry of Education(Grant 2018R1D1A1B07048284)

*Corresponding Author : Il-Hyuk, Ahn (ahnih@tu.ac.kr)

Received June 12, 2018

Revised August 2, 2018

Accepted August 20, 2018

Published August 28, 2018

1. 서론

FDM (Fused deposition modeling) 방식의 3D 프린팅 기술은 긴 선형대의 필라멘트를 높은 온도의 노즐 팁 (Nozzle tip)을 통과 시켜서 용융 시키고, 용융된 필라멘트를 서로 일정한 형태로 붙임으로써 3D 형상을 만들어 나가는 기술이다 [1-3]. 이 방식은 최근 관련 특허가 만료 되었으면, 프린터 개발 관련 많은 기술들이 오픈 소스로 공개되어 있다. 공개된 오픈 소스를 기반으로 하여 많은 제조사들이 장비를 앞 다투어 개발함으로써, 장비의 가격이 하락이 가장 크게 일어나고 있는 기술이기도 하다[4,5].

FDM 공정에 있어서 기본 소재인 필라멘트는 노즐 팁을 지나면서 용융이 되고, 노즐로부터 토출이 되어서 기존의 구조물에 적층되고 냉각되어 고화가 된다. 이러한 과정 동안 필라멘트의 상 (phase)은 고상에서부터 액상 다시 고상으로 상 변태를 하게 된다. 그런 상 변태가 안정적으로 일어나기 위해서는 일정한 양의 열이 필라멘트에 꾸준히 공급되어야 한다. 이는 노즐 팁에 설치된 히터를 통해서 공급되며, 온도 센서를 통하여 그 온도는 일정하게 제어된다 [6,7]. 일정하게 제어된 온도에 의해서 필라멘트는 일정한 양이 용융이 되고, 용융된 필라멘트는 위치 제어 기구에 의해서 일정 속도로 움직이고 있는 노즐 밖으로 토출되어 고화 된다. 이때, 노즐 팁으로부터 토출된 필라멘트는 노즐 팁의 이동 속도에 맞추어서 적층 된다. FDM 기술에 있어서 다양한 공정 변수 중에 이동 속도에 대한 변수가 많은 것은 속도에 맞는 적절하게 필라멘트가 토출되어야 최고의 출력 품질을 얻을 수 있기 때문이다. 또한, 그러한 노즐 이동 속도는 출력 생산성과도 밀접한 관계가 있다[8,9].

따라서 안정적인 출력 품질을 확보할 수 있는 노즐 이동 속도 (Moving speed, mm/s)와 안정적으로 용융된 필라멘트를 확보하기 위한 노즐 팁의 온도 (Temperature, °C) 범위를 파악하는 것은 가장 기본적인면서도 중요한 일이라고 할 수 있다 [10-13]. 이는 금속 3D 프린팅 기술 중에 하나인 SLM (Selective laser melting)에서는 레이저 출력 (laser power, W)와 조사 속도 (Scan speed, mm/s)로 구성되어 있는 공정 윈도우와 유사하다고 할 수 있다 [14, 15].

본 논문에서는 범용으로 사용되고 있는 FDM 방식의 프린터를 활용하여, 노즐 온도와 이동 속도에 따른 출력 품질을 평가하여 공정 윈도우를 수립하는 실험적 방법을 제시하고자 한다. 실제 3D 형상 출력과 유사한 출력 실험

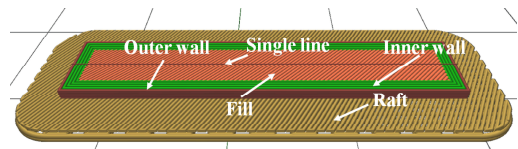


Fig. 1. Shape of a specimen and generated paths for the specimen

결과와 비교하여, 제시된 방법에 대한 유효성을 검증하였다.

2. 실험 및 측정

2.1 실험 장치

본 연구에는 오픈 소스 기반의 범용 FDM 장비 (LUGO-M, www.formersfarm.kr)를 이용하여 실험을 수행 하였으면, 국내에서 제조된 PLA (Polylactic acid) 소재 필라멘트를 이용하여 수행되었다. 사용된 FDM 프린터는 크게 토출된 필라멘트가 적층되는 작업 판 (Working bed), 노즐 및 노즐의 상대 운동을 만들어 내는 위치 제어 시스템으로 구성되어 있다. 작업 판은 토출된 필라멘트의 안정적인 안착 및 후 수축에 의한 품질 저하를 방지하기 위하여 가열 판이 하단에 부착되어 있으면, 온도 센서를 통하여 일정하게 온도가 제어된다. 본 연구에서는 작업 판의 온도는 범용 장비들에서 가장 널리 사용되고 있는 온도인 65°C로 고정하여 사용하였다. 위치 제어 시스템은 스텝 모터와 벨트 시스템으로 구성되어 있으면, 오픈 소스 기반의 제어 보드를 통하여 노즐의 이동 속도 및 위치를 제어하였다. 3D 형상을 출력하기 위한 슬라이싱 및 경로 생성을 위해서 Raised3D에서 무료로 제공하고 있는 ideaMaker를 이용하였다.

2.2 실험 방법 및 측정

본 실험에 사용된 FDM 장비는 노즐과 작업 판 사이의 수평도를 일정하게 유지할 수 있도록 도와주는 오토 레벨링 기능이 없는 장비로써, 모든 실험에서는 Raft라고 하는 기본 밑판 구조물을 출력을 하고, 그 위에 Fig. 1에서 보이는 것과 같이 본 논문에서 제안한 형태의 구조물이 출력되도록 하였다. 본 논문에서 제안한 기구물은 50 mm × 10 mm × 2 mm 얇은 판상 구조 위에 50 mm × 0.08 mm × 0.08 mm 가는 직각 사각형이 놓여 있는 형태이다. 가는 직각 사각형은 하단의 판상 위에 단일 라인

Table 1. Process parameters conditions

Parameter	Unit	conditions
Nozzle temperature	℃	190~240
Moving speed	mm/s	20~180

Table 2. Single line images at 210℃ nozzle temperature with different speeds (mm/s)

Temperature	20	40	60
210℃			
	80	100	120
	140	160	180

(Single line) 경로를 생성하기 위한 것으로, ideaMaker에서는 이 라인을 외벽으로 인식하였다. 따라서, 단일 라인 출력력을 위한 속도 제어는 외벽 속도 변수를 변경하여 진행하였다. 공정 윈도우를 만들기 위한 속도의 범위는 제조사 제시하여 준 제어 가능 속도 범위(<200mm/s) 보다 낮은 범위 안에서 선정하였으며, 노즐은 온도 범위는 범용 FDM 프린터에서 PLA 출력력을 위해서 일반적으로 가장 널리 사용되는 범위를 포함하도록 선정하였다. 최종적인 조건 상세 조건은 Table 1에 나타내었다.

출력된 단일 라인의 폭은 USB 타입의 Dino-Lite 광학 현미경을 통하여 개별 시편마다 총 6개 지점을 측정하였다.

3. 결과

3.1 실험 결과

3.1.1 단일 라인 출력

Fig. 1에서 제시된 형상을 Table 1에서 제시된 조건으로 하여 출력 실험을 수행하였다. Table 2는 210℃ 온도 조건에서 이송 속도에 따른 단일 라인의 결과를 보여주고 있다. 일정 온도(210℃)에서 노즐의 이송 속도가 증가함에 따라서 몇 가지 현상이 발생함을 확인 할 수 있다.

하나는 속도가 증가함에 따라서 단일 라인의 폭이 감소하고 있다는 사실이다. 이는 노즐 이송 속도가 증가함

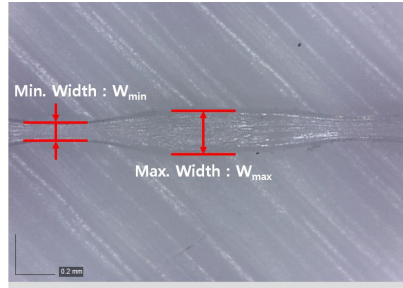


Fig. 2. Fluctuated width in the single line with 190℃ and 120 mm/s

에 따라서 노즐에서 용융되어야 할 필라멘트의 양도 증가해야 하는데, 일정 온도 하에서 단위 시간당 용융시킬 수 있는 필라멘트의 양이 제한적이기 때문에 생기는 현상이라고 볼 수 있다. 다른 하나는 속도가 증가함에 따라 폭이 변화도 점점 커짐을 확인 할 수 있다. 가장 빠른 속도인 180 mm/s 인 경우는 가장 폭이 작을 뿐만 아니라, 일정한 주기로 폭의 변화가 생김을 알 수 가 있다.

이를 이해하기 위해서는 고상의 필라멘트가 용융 필라멘트를 토출시키기 위해서 밀면서 발생하게 되는 압축 하중에 대해서 이해할 필요가 있다. 고상의 필라멘트가 용융된 필라멘트를 밀면서 압축 하중의 받게 되면, 그러한 압축 하중이 한계 압축 하중에 이르게 되면 고상 필라멘트에서 버클링 (Buckling) 현상이 발생한다고 보고하였다 [16,17]. 그러한, 버클링 현상이 발생하게 되는 한계 압축 하중은 식(1)과 같은 제안되었는데[18],

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 E d_f}{16 L_f^2} \quad (1)$$

여기에서, E 는 필라멘트의 탄성 계수, d_f 는 필라멘트 지름, L_f 는 압출기(Extruder)에서 노즐 상단까지의 거리이다.

위 식(1)은 한계 압축 하중은 L_f 가 길어지게 되면 급격하게 낮아지는 것을 볼 수 있다. 보우덴 방식을 사용하는 본 실험용 장비에서는 한계 압축 하중은 상당히 낮아졌을 것으로 예상해 볼 수 있다.

빠른 이송 속도로 용융 필라멘트를 토출하게 되면, 노즐 내 용융 필라멘트의 양은 적어지게 되고, 토출이 되지 않고 남아 있게 된다. 이는 고상 필라멘트에 압축 하중을 증가 시키게 되며, 낮아진 한계 압축 하중에 도착하게 된다. 증가된 압축 하중은 고상 필라멘트 내에 탄성 에너지로 저장이 되고, 노즐이 토출을 위한 최소 용융 필라멘트

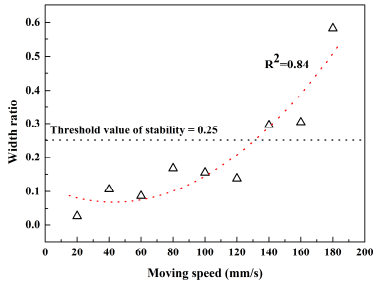


Fig. 3. Variation of W_{ratio} values at 210 °C

양 만큼을 녹이게 되면, 필라멘트 내에 저장되어 있던 탄성에너지로 인하여 기존보다 빠르게 용융 필라멘트는 토출되게 된다. 이러한 현상이 주기적으로 반복되게 된다. 이로 인하여 단일 라인의 폭의 변화도 크게 되는 것으로 보인다. 노즐 온도 190 °C에서는 120 mm/s 이송 속도에서 Fig. 2와 같이 큰 폭 변화 현상이 관측된 것으로 보아, 이러한 현상은 노즐 온도에 따라서 다른 속도에서 나타나게 됨을 알 수 있었다.

이상에서 측정된 결과는 필라멘트를 공급하는 시스템과 노즐 내 필라멘트의 용융 상태의 안정성에 따라서 그 폭 변화가 달라짐을 보여 준다고 할 수 있다. 즉, 안정적 단일 라인을 위한 안정적 노즐 온도와 이송 속도 조건을 판단하기 위하여 단일 라인의 폭 변화를 평가 지표로 이용할 수 있음을 의미한다.

따라서 그러한 단일 라인의 폭 변화를 평가지표로 이용하기 위해서, 본 논문에서는 식(2)에서 보이는 것과 같은 식을 이용하였다.

Fig. 2에서 보이는 것과 같이, 최대 폭 (W_{max})과 최소 폭 (W_{min})은 측정이 가능하면, 안정성의 평가 지표로써 두 폭 사이의 비율 (W_{ratio})을 사용 하였다. W_{ratio} 는 다음과 같이 식(2)를 이용하여 계산할 수 있다.

$$W_{ratio} = \frac{W_{max} - W_{min}}{W_{max}} \quad (2)$$

여기에서, W_{max} 는 측정된 최대 폭, W_{min} 는 최소폭을 의미하며, W_{ratio} 는 폭의 변화량을 의미하며 평가지표를 의미한다.

Fig. 3은 210 °C에서 측정된 W_{ratio} 값들을 보여주고 있다. Fig. 3에서 보면 W_{ratio} 값은 일정 속도 이상에서 갑자기 크게 증가 하는 것을 확인 할 수 있다. 이는 속도

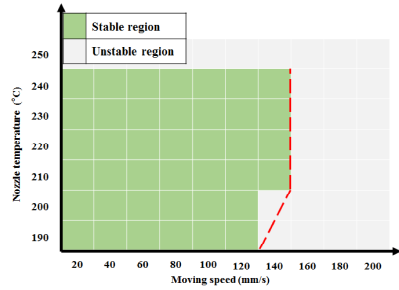


Fig. 4. Stable process window from experiments

가 빨라짐에 따라서 W_{max} 와 W_{min} 은 동시에 감소하지만, W_{min} 의 감소가 더 크기 때문에 나타난다. 본 연구에서는 단일 라인의 안정성을 평가하기 위한 W_{ratio} 의 임계값으로 0.25를 선정하였다. 이는 W_{max} 와 W_{min} 사이의 차이가 측정 오차를 포함하여 가시적으로 나타나기 시작한 값으로 판단되었기 때문이다.

3.1.2 공정 윈도우

실험 조건에 따라서 제작된 시편들을 3.1.1 장에서 제안한 방법을 통하여 개별 조건들에 따른 단일 라인의 안정성을 평가하여 보았으면, 그 결과는 Fig. 4에 나타내었다.

앞 장에서 언급한 것과 같이 낮은 노즐 온도에서는 안정적 단일 라인 형성을 위한 이송 속도는 낮은 속도에서만 가능하면, 노즐 온도가 증가할수록 그 안정적 속도 범위가 증가됨을 확인 할 수 있다. 하지만, 그 증가도 일정한 한계 속도 이상으로 범위가 넓어지지 않고 있음을 알 수 있다. 그런 현상은 용융 필라멘트양의 증가에 따른 용융 필라멘트와 노즐 내부 면 사이의 마찰력에 의한 압력강하 증가로 설명이 가능할 것으로 생각된다. 온도가 증가함에 따라서 용융 필라멘트의 양도 증가하게 되고, 증가된 양에 비례해서 노즐 내부 면과 용융 필라멘트의 사이의 마찰력도 증가하게 된다. 즉, 토출을 위한 압축 하중을 크게 증가 시키고, 한계 압축 하중에 도달하여, 버클링 현상을 나타날 수 있다. 그로 인하여, 용융 필라멘트의 큰 폭 변화가 일어나게 되는 것으로 보여 진다[19].

3.1.3 다층 출력 평가

이상의 장에서 본 연구에서 연구자가 보유한 범용 FDM 프린터에서 안정적 출력이 가능한 공정 조건 (노즐 온도와 이송 속도)에 대하여, 본 연구에서 제안한 방

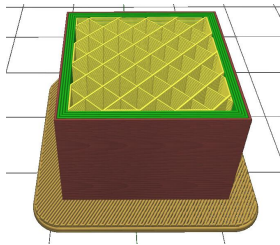


Fig. 5. Fill pattern for multi-layered single line tests

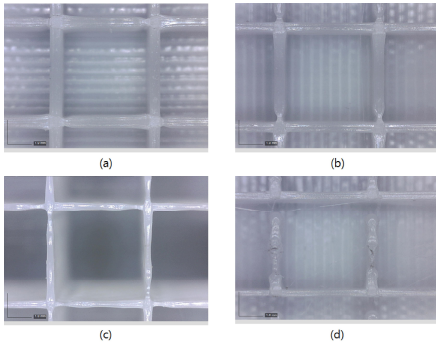


Fig. 6. Results from multi-layered single line tests at 210 °C with (a) 40 mm/s, (b) 80 mm/s, (c) 120 mm/s and (d) 160 mm/s, respectively.

법을 통하여 평가하여 보았다. 본 연구에서 제시한 실험 방법은 온도에 따른 단일 라인을 속도를 변화를 주면서 출력하여 그 출력된 단일 라인의 폭 변화와 폭 변화의 주기성을 평가하여 공정 조건의 안정성을 평가하였다.

하지만, 실제 3D 프린팅은 그러한 단일 라인이 좌우 및 상하로 겹쳐져서 3D 형태를 만들어 나가게 된다. 따라서 단일 라인의 평가가 과연 겹쳐진 출력 상태에서도 출력 안정성을 대표할 수 있는지를 알아 볼 필요가 있을 것이다. 이를 위해서 본 연구에서는 30 mm × 30 mm × 30 mm 정육면체를 내부 밀도 10%로 하여 출력하여 보았다. 실험 출력을 위하여 생성된 내부 경로는 Fig. 5에서 보이는 것과 같이 내부 채움은 체크 박스 형태로 하였으면, 체크 박스의 개별 라인들은 단일 라인이 상하로 겹쳐지도록 하였다. 시편은 조건 별로 내부 채움을 확인하기 위하여 중간에 출력을 중단 시켜 단층 단일 라인 출력을 평가하였다. 제작에 활용된 조건은 210°C 노즐 온도 조건에서 속도에 따른 다층 출력 품질을 조사하였다. 그 결과를 Fig. 6에 나타냈었다.

Fig. 6에서 공정 조건에 따른 내부 채움 라인의 상태를 보면, Fig. 4에서 보여준 안정성이 그대로 반영되고 있

음을 알 수 있다. 즉, 단일 라인 평가를 통하여 얻어진 결과를 기반으로 하여 다층으로 확대를 하여도 라인들이 안정적으로 형성 된다는 것을 확인 할 수 있다.

3.2 논의

본 연구에는 노즐 온도와 노즐 이송 속도에 따른 단일 라인의 안정적 형성을 판단하는 방법을 제시하고, 오픈소스 기반으로 한 FDM 방식의 프린터의 안정적 공정 윈도우를 평가하였다. 또한, 단일 공정의 안정적 공정 윈도우가 다층 공정에서도 유효하다는 것을 보였다. 간단한 몇 가지 조건 실험과 광학 현미경을 통한 측정만으로 안정적 공정 조건을 알아 낼 수 있다는 점에서 제안한 방법이 상당히 유용하다는 것은 알 수 있었다.

하지만, 여전히 몇 가지 문제점도 있다. 그 중에서도 가장 큰 문제라고 생각되는 부분은 안정성 평가를 위한 W_{ratio} 의 임계값을 설정하는 것이다. 본 연구에서는 그 임계값으로 0.25를 사용하였지만, 이 임계값에는 측정 오차에 변화까지를 포함하고 있다. 즉, 보다 정확한 측정 장비를 사용할 경우, 이 값은 좀 더 작은 값으로 설정될 수도 있다. 하지만, 단일 폭이 정밀 측정으로 하여도 임계값의 크기는 0.2~0.25 수준에서 보통의 오픈소스 기반 FDM 프린터에서는 결정이 될 것으로 예상된다.

다른 문제점이라고 할 수 있는 것은 본 연구는 단일 라인의 측정을 윗면(top view)에서만 측정했다는 것이다. 사실, 안정적 단일 라인의 평가하기 위해서는 윗면(top view)과 단면(sectional view) 결과를 동시에 평가해야만 한다. 윗면 측정은 상대적으로 측정이 쉽다는 장점이 있지만, 단면의 안정성의 보장해 주지는 못한다. 반면에 단면 측정은 단면의 안정성을 보장할 수는 있지만, 별도의 후처리 공정이 필요하다는 단점이 있다. 본 연구에서는 단면의 안정성을 평가하지 못한다는 단점이 있지만 윗면 측정을 선택한 것은 새로운 장비나 새로운 소재에 대한 빠른 안정적 영역의 판정이 중요하다고 판단했기 때문이다. 또한, 단층 단일 라인 출력 실험의 통하여 간접적으로 윗면 측정만으로도 충분히 단면 안정성도 확보할 수 있음을 보였다.

이는 본 연구에서 제안한 공정 윈도우(범위) 평가법의 개발을 평가의 효율성에 집중했기 때문에 내려진 결정이다. 이는 향후 다른 연구에서도 계속적으로 수행될 것이면 그 결과에 따라서 본 논문에서 제안된 방법을 개선해 나갈 예정이다.

4. 결론

본 논문에서는 FDM 프린터의 안정적 영역을 평가할 수 있는 방법을 제시하였으며, 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

1. 본 연구에서 제시한 평가 방법은 간단한 단일 라인 출력 실험을 기반으로 하며, 측정된 결과는 단일 라인의 폭 변화를 기준으로 공정 조건의 안정성을 평가할 수 있었음.
2. 단일 라인의 폭 변화를 기반으로 안정적 공정 윈도우를 평가해 본 결과, 노즐 온도가 높아질수록 안정적인 속도의 범위가 일정 증가한다. 하지만 일정 속도 이상에서는 노즐 온도에 상관없이 불안정한 출력이 이루어 짐.
3. 단일 라인 출력의 평가 결과를 다층 라인 출력을 수행한 결과를 비교하여 본 결과 두 조건은 유사한 결과를 보여 주고 있음을 확인 할 수 있었음. 이는 단일 라인 평가를 통하여 3D 형상 출력의 안정성을 평가할 수 있음을 보여 줌.

이상의 결과로부터 본 연구에서 제시한 평가 방법은 오픈소스 기반의 FDM 프린터의 공정 윈도우를 평가를 간단한 방법을 통하여 효율적으로 수행할 수 있음을 보였다. 하지만, 여전히 정확한 범위를 선정하기 위해서는 추가적인 연구가 필요로 하다. 또한, 구하여진 공정 윈도우를 기반으로 하여 형상에 따른 최적 조건을 선정하는 방법에 대한 연구도 동시에 필요할 것으로 생각된다.

REFERENCES

- [1] B. Stucker, I. Gibson, & D. Rosen. (2010). *Additive Manufacturing Technologies*. New York: Springer.
- [2] T. Wohlers. (2014). *Wohlers report 2018*. Wohlers Associates Inc.
- [3] S. J. Shin, C. K. Ahn & K. Y. Park, (2017), A case study on the application of new hand splint using 3D printing, *Convergence Society for SMB*, 7(2), 25-29.
- [4] H. C. Kim, (2015). A study on the socio-economic impact of 3D printing, *The Society of Digital Policy & Management*, 13(7), 23-31.
- [5] K. J. Sung & S. R. Kim. (2016), A study on the Curriculum by the Process of Actual use of 3D Printer - Focus on the College of Design, *The Society of Digital Policy & Management*, 14(6), 381-393.
- [6] K. S. Boparai, R. Singh & H. Singh. (2016). Development of rapid tooling using fused deposition modeling: a review. *Rapid Prototyping Journal*, 22(2), 281-299.
- [7] T. J. Coogan & D. O. Kazmer. (2017). Bond and part strength in fused deposition modeling. *Rapid Prototyping Journal*, 23(2), 414-422.
- [8] W. Han, M. A. Jafari, & K. Seyed. (2008). Process speeding up via deposition planning in fused deposition-based layered manufacturing processes. *Rapid Prototyping Journal*, 9(4), 212-218.
- [9] D. Y. Chang & B. H. Huang.(2011). Studies on profile error and extruding aperture for the RP parts using the fused deposition modeling process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 53(9-12), 1027-1037.
- [10] O. Mohamed, S. H. Masood & J. L. Bhowmik. (2015). Optimization of fused deposition modeling process parameters: a review of current research and future prospects. *Advances in Manufacturing*, 3(1), 42-53.
- [11] A. Peng, X. Xiao & R. Yue. (2014). Process parameter optimization for fused deposition modeling using response surface methodology combined with fuzzy inference system. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 73(1-4), 87-100.
- [12] B. N. Turner, R. Strong & S. A. Gold. (2014). A review of melt extrusion additive manufacturing processes: I. Process design and modeling. *Rapid Prototyping Journal*, 20(3), 192-204.
- [13] B. N. Turner, R. Strong & S. A. Gold. (2015). A review of melt extrusion additive manufacturing processes: II. Materials, dimensional accuracy, and surface roughness. *Rapid Prototyping Journal*, 21(3), 250-261.
- [14] L. E. Criales, Y. M. Ansoy & T. Özel. (2016). Sensitivity analysis of material and process parameters in finite element modeling of selective laser melting of Inconel 625. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 86(9-12), 2653-2666.
- [15] A. B. Spierings, M. Schoepf, R. Kiesel & K. Wegener. (2014). Optimization of SLM productivity by aligning 17-4PH material properties on part requirements. *Rapid Prototyping Journal*, 20(6), 444-448.
- [16] M. Nikzad, S. H. Masood, & I. Sbarski. (2011). Thermo-mechanical properties of a highly filled polymeric composites for fused deposition modeling. *Materials & Design*, 32(6), 3448-3456.

- [17] A. Bellini, L. Shor & S. I. Guceri. (2005). New developments in fused deposition modeling of ceramics. *Rapid Prototyping Journal*, 11(4), 214-220.
- [18] N. Venkataraman, S. Rangarajan, M. J. Matthewson, A. Safari, & Y. A. DanforthSC. (1999). Mechanical and rheological properties of feedstock material for fused deposition of ceramics and metals (FDC and FDMet) and their relationship to process performance. *Solid Freeform Fabrication Proceedings*, University of Texas at Austin, Austin, 351-360.
- [19] O. Mohamed, S. H. Masood & J. L. Bhowmik. (2016). Optimization of fused deposition modeling process parameters for dimensional accuracy using I-optimality criterion. *Measurement*, 81, 174-196.

안 일 혁(Ahn, Il Hyuk)

[정회원]



- 1999년 2월 : 고려대학교 기계공학과(공학사)
- 2001년 8월 : 고려대학교 기계공학과(공학석사)
- 2010년 8월 : 고려대학교 기계공학과(공학 박사)
- 2011년 1월 : LG 전자 생산기술원
- 2014년 3월 : Nanyang Technological University (NTU), Singapore Center for 3D Printing(SC3DP), Research fellow
- 2017년 3월 ~ 현재 : 동명대학교 기계공학부 조교수
- 관심분야 : 3D printing
- E-Mail : ahnih@tu.ac.kr