

3D 프린터 PLA 출력재료의 최적 출력조건

Optimal Printing Conditions of PLA Printing Material for 3D Printer

유도현*
(Do-Hyun You)

Abstract - The purpose of this study optimizes the conditions of PLA printing material for 3D printer. Deltabot type 3D printer is used. The ranges of printing temperature, printing speed, and infill density are 195~215°C, 10~70mm/sec, and 10~100% respectively. From the results of printing temperature, printing quality is almost same every printing temperature. From the results of printing speed and infill density, printing quality is excellent under 40mm/sec, and over 50% respectively. Surface roughness is 2.28 μmRa at 205°C, 10mm/sec, 100%, and is 5.93 μmRa at 205°C, 70mm/sec. Surface roughness is directly proportional to the printing speed, and is inversely proportional to the infill density. Objects fabricated PLA printing material adhere bed at room temperature.

Key Words : PLA printing material, 3D printer, Deltabot type, Printing temperature, Printing speed, Infill density, Surface roughness

1. 서론

최근 매스컴에서 3D 프린터와 관련된 기사를 종종 볼 수 있을 만큼 3D 프린터는 우리생활과 점차 가까워지고 있다.

국내에서는 그동안 3D 프린터에 대한 관심이 높지 않은 가운데, 2013년 7월 세계 최초로 3D 프린터를 이용하여 제작한 총기가 발사되는 동영상은 유튜브에 공개되면서 관심이 고조되기 시작했다. 이 동영상은 과거 SF소설에서 알려졌던 플라스틱 총기를 개인이 제작할 수 있다는 사실과 3D 프린터로 무엇을 제작할 수 있는 지에 대한 관심을 증폭시켰다[1].

1984년 세계 최초로 3D 프린터 기술이 개발된 후 특정업체가 특허를 독점하여 대중화가 잘 이루어지지 않았지만, 특허가 만료되면서 많은 업체에서 3D 프린터에 대한 관심을 갖게 되었다. 현재 저가형으로 널리 보급되고 있는 FDM(Fused Deposition Modeling)방식의 3D 프린터는 미국의 Stratasys가 원천 특허를 가지고 있다가 2008년 만료되면서 대중화되었고, 보다 정밀하게 제작할 수 있는 3D Systems의 SLS(Selective Laser Sintering) 관련 특허가 2014년 2월에 만료됨에 따라서 많은 사람들이 더욱 관심을 갖게 되었으며, 이는 가격 인하로 이어져 상업용으로만 사용되던 3D 프린터가 가정용으로 제작할 수 있는 계기가 되었다[2].

미국의 오바마 대통령은 2014년 2월 교서 연설에서, 미래의 핵심기술 중의 하나로 3D 프린터 기술을 지정하였다. 이와 같은 상황에서 미국은 물론, 중국과 유럽의 각국에서도 3D 프린터 기

술을 차세대 생산 기술로 지정하며 적극적으로 지원하고 있다. 우리나라에서도 미래지향산업으로 그 중요성이 증가하면서 가정과 업체에서 3D 프린터 기술을 활용한 창업이 점차 확대되고 있는 실정이다.

미국의 오바마 대통령은 3D 프린팅 기술을 미국을 이끌 신기술의 하나라고 공포하고 3천만 달러 규모의 3D 프린팅 기관을 설립하여 중국 등 아시아로 이전된 제조업을 미국이 다시 되찾겠다는 야망으로 대대적인 투자를 하고 있다.

중국 역시 3D 프린팅을 포함한 '국가기술발전 연구계획 및 2014년 국가과학기술 제조영역 프로젝트 지침'을 발표한 바 있고 유럽 및 일본도 3D 프린팅에 대한 기술 개발과 국가적인 투자 계획을 수립한 상태이다[3].

현재 특허가 만료되어 전세계 3D 프린터 사용자들이 가장 널리 사용하고 있는 FDM 방식 3D 프린터의 기술수준을 분석해 보면, 직교 방식에 대한 연구는 이미 많이 진행되어 3D 프린터 시장에서는 포화상태에 이른 가운데, 본 연구에 사용한 델타봇 방식에 대한 연구는 초보단계에 불과하기 때문에 이에 대한 연구가 시급한 실정이다.

한편 소수의 기업이 독점하고 있던 출력재료에 대한 특허가 만료되고 있는 가운데, 2009년부터 액체, 파우더 형태의 폴리머 재료로 인쇄하거나 금속 파우더 형태의 재료를 사용하여 여러 가지 출력물을 제작하는 수준에 이르렀다.

FDM 방식 출력재료인 PLA는 강도 유지기간이 6개월에서 1년으로 효소 및 미생물에 의해 큰 영향을 받지 않고 가수분해되어 강도를 오랜기간 유지하기 때문에, 뼈의 접합제와 같은 의료분야 등에서 사용되고 필름이나 섬유 등과 같은 보편적 용도의 분해성 플라스틱으로도 사용되고 있다[4].

따라서 본 논문에서는 FDM 방식 델타봇 3D 프린터의 출력물

* Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Shin Ansan University, Korea.
E-mail : dhyou@sau.ac.kr
Received : January 17, 2016 ; Accepted : February 22, 2016

특성을 개선하기 위해서, PLA 필라멘트에 대한 최적의 출력온도, 출력속도, infill density 및 표면 거칠기에 대해 연구하였다.

2. 실험방법

2.1 연구에 사용한 3D 프린터와 출력용 필라멘트

그림 1은 본 연구에 사용한 3D 프린터(모델명 : AMC ROSTOCK-V1, 제조사 : (주)에이엠씨)이다.

그림 2는 본 연구에 사용한 PLA(PolyLactic Acid) 필라멘트(제조사 : Reprapper Tech. Co., Hong Kong)이다.

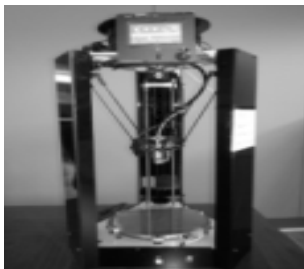


그림 1 연구에 사용한 3D프린터

Fig. 1 3D printer used for research



그림 2 연구에 사용한 PLA 출력재료

Fig. 2 PLA printing material for research

2.2 Thingiverse 프로그램(3D 모델링용)을 사용한 출력물 제작

그림 3은 thingiverse 사이트의 메인 화면이다. Thingiverse 사이트는 전 세계 3D 모델링 제작자들이 제작한 3D 모델링 파일을 업로드한 곳이기 때문에, 거의 모든 분야의 3D 모델링 파일을 무료로 다운받아 출력할 수 있는 장점이 있다.

따라서 본 논문은 thingiverse 사이트에서 bitcoin 파일을 다운로드하고 출력물의 최적 출력조건을 설정하여 출력물을 제작하였다.

이 사이트에는 전기·전자, 기계뿐만 아니라, 가전 및 의료분야의 3D 모델링 파일이 있는 가운데, 파일을 STL 형식으로 다운받아 슬라이스 프로그램에 의해 G-code로 변환시켜 3D 프린터로 출력할 수 있기 때문에 직접 3D 모델링 설계를 할 필요가 없다.

2.3 Cura 프로그램을 사용한 G-code 생성

그림 4는 Cura 프로그램으로서, 이 프로그램 thingiverse 사이트에서 STL 파일로 exporting한 bitcoin 파일을 3D 프린터에서 출력할 수 있는 슬라이스 프로그램으로 변환하기 위해서 사용하였다. 슬라이스 프로그램을 수행해야 하는 이유는 3D 프린터의 원리가 출력물을 제작 시, 한층 씩 쌓아 적층하는 방식으로써, 3D 프린터에서 3D 모델링 파일을 출력 전에 미리 슬라이스 해야 하기 때문이다.

출력물에 대한 최적의 출력조건을 도출하고자, 출력온도, 출력속도, infill density, 레이어 높이, 베드온도 등 3D 출력에 영향을 줄 수 있는 제반 조건들을 설정한 후 G-code로 변환하였다.

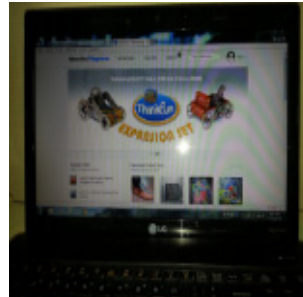


그림 3 Thingiverse 사이트 메인 화면

Fig. 3 Main scene of thingiverse site

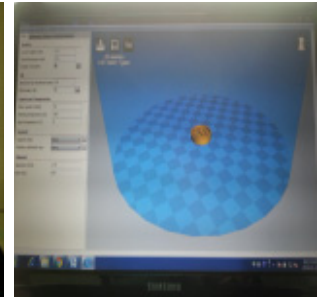


그림 4 G-code 변환을 위한 출력재료 Cura 프로그램

Fig. 4 Cura program for G-code transformation

2.4 출력조건 변화에 따른 출력물 제작

그림 5는 변환한 G-code를 SD 카드에 저장 후, SD 카드 3D 프린터에 삽입하고 최적의 프린트 조건을 설정하기 위해서 PLA 필라멘트의 preheat 온도(Nozzle 온도)를 185°C로 설정하였다. Preheat 온도를 185°C로 설정한 이유는 PLA 필라멘트는 출력온도가 195~215°C이기 때문에, 노즐의 온도를 미리 예열해 놓는 것이다.

또한 그림 5에서 베드온도를 0°C로 설정하였다. 이는 PLA 필라멘트는 상온에서 출력 시, 수축이 거의 발생하지 않기 때문에 베드온도를 높이지 않았다.

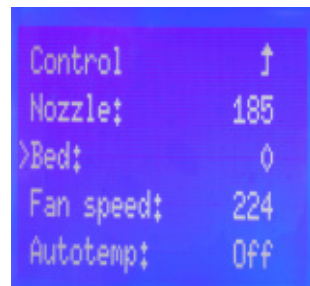


그림 5 PLA의 Preheat온도와 베드온도

Fig. 5 Preheat temp. and bed temp. of PLA

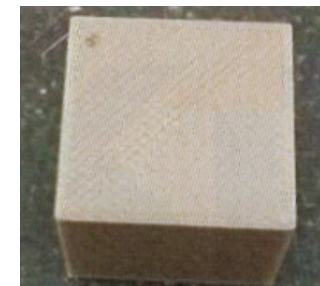


그림 6 표면 거칠기 측정에 사용한 정육면체

Fig. 6 Cube for Measuring Surface Roughness

2.5 표면 거칠기 측정용 출력물 제작

그림 6은 출력물의 표면상태를 측정하기 위해서 출력온도, 출력속도, infill density에 따라 제작한 출력물이다. 출력물의 표면 거칠기를 측정하기 위해서 표준 형상인 정육면체(15mm(L)×

15mm(D)×15mm(H))를 제작하였으며, 측정에 사용한 장비는 Stylus Type Roughness Testers(제조사 : Taylor Hobson, 형식 : Taysarf Series2)이다.

표 1은 출력물의 표면 거칠기를 분석하기 위해서 제작한 정육면체 출력물의 출력조건이다.

표 1 정육면체 표면 거칠기 출력조건

Table 1 Printing conditions for surface roughness of cube

구분	출력온도 (°C)	출력속도 (mm/sec)	Infill Density (%)
Sample1	205	10	100
Sample2	205	40	30
Sample3	205	70	10

3. 결과 및 고찰

3.1 3D 프린터 FDM 방식의 원리

그림 7은 FDM 방식 3D 프린팅의 적층 원리이다. 파일을 출력할 때 필라멘트가 extruder라고 불리는 고온의 압출기 속에서 녹게 되는데, 녹은 필라멘트는 0.3mm의 노즐을 통해 얇은 층 형태로 베드 위에 한 층씩 형상을 쌓으며 올라간다.

필라멘트가 3D 프린터의 헤드로 투입되면 프린터 헤드는 X축 및 Y축을 따라 이동하면서 재료를 분사한다. 1개의 레이어가 완성되면 헤드가 Z축을 따라서 1층 올라가 다음 레이어 작업을 한다.

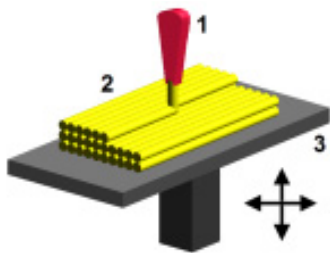


그림 7 FDM 방식 3D 프린팅 적층 원리

Fig. 7 Stackable principle of FDM type 3D printing

3.2 3D 프린터 출력용 PLA 필라멘트 물성

3.2.1 PLA 필라멘트의 주요 성분 분석

표 2는 본 연구에 사용한 3D 프린터 출력용 PLA 필라멘트의 주요 성분 분석표이다. 표 2로부터 PLA 필라멘트의 화학식은 $(C_3H_4O_2)_n$ 로서, 주요 성분을 중량비로 표시하면 polylactic acid > 90%, n,nethylene bistearamide < 5%, typical antioxidant < 5%, typical pigment < 5%로 구성되어 있다.

표 2 PLA 필라멘트의 주요 성분표

Table 2 Main ingredient table of PLA filament

성분	중량비	성분	중량비
PolyLactic Acid	>90%	Typical antioxidant	<5%
N,Nethylene Bistearamide	<5%	Typical pigment	<5%

출처 : www.reprappertech.com

3.2.2 PLA 필라멘트의 화학적 특성

표 3은 본 연구에 사용한 3D 프린터 출력용 PLA 필라멘트의 화학적 특성표이다. 표로부터 PLA 필라멘트는 density 1.24g/cm³(23°C 기준), melting point 160°C, thermal distortion temperature 70°C, tension speed 6mm/min, ultimate elongation 145%, diameter tolerance 1.75±0.03mm이다.

표 3 PLA 필라멘트의 화학적 특성

Table 3 Chemical properties of PLA filament

항목	화학적 특성
Density	1.24g/cm ³ (23°C 기준)
Melting point	160°C
Thermal distortion temp.	70°C
Tension speed	6mm/min
Ultimate elongation	145%
Diameter tolerance	1.75±0.03mm

출처 : www.reprappertech.com

3.2.3 PLA의 화학구조

그림 8은 PLA의 화학구조를 나타낸다. PLA는 자연계에 광범위하게 존재하는 물질로서, 인체에 전혀 무해하고 방부제 또는 향신료 등에도 널리 사용하고 있는 천연 분자이다.

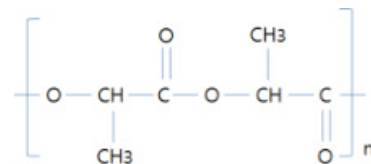


그림 8 PLA의 화학구조

Fig. 8 Chemical structure of PLA

3.3 출력조건에 따른 출력특성 분석

3.3.1 출력상태 분석

표 4는 출력상태 기준표이다. 표 4로부터 출력물의 표면상태가 평탄하고 기공이 없으면 '우수', 출력물의 표면상태가 거칠고 기공이 많으면 '나쁨'으로 설정하였다.

표 4 출력상태 기준표

Table 4 Criterion table of printing status

출력 상태			
	우수 (◎)	보통 (○)	나쁨 (×)

표 5는 제작한 정육면체의 표면 거칠기 분석표이다. 표 5로부터, Sample1(출력속도 10 mm/sec, infill density 100% : 출력상태 '우수')의 평균 표면 거칠기는 2.28 μ mRa인 반면, Sample3(출력속도 70 mm/sec, infill density 10% : 출력상태 '나쁨')의 평균 표면 거칠기는 5.93 μ mRa로 나타났다.

위의 결과로부터, 출력속도가 느리고 infill density가 높을수록 표면 거칠기는 낮아지고, 출력속도가 빠르고 infill density가 낮을수록 표면 거칠기가 높아지는 것을 알 수 있다.

표 5 정육면체 표면 거칠기 분석표

Table 5 Analysis table of surface roughness for cube

구분	단위	1회	2회	3회	4회	5회	평균
Sample1	μ mRa	2.31	2.21	2.33	2.30	2.26	2.28
Sample2	μ mRa	4.25	4.32	4.38	4.30	4.28	4.31
Sample3	μ mRa	5.95	5.93	5.93	5.93	5.93	5.93

3.3.2 PLA 필라멘트 출력상태 분석

표 6~10은 PLA 필라멘트의 출력조건을 변화시킴에 따라서 출력물의 출력상태를 비교하였다. 출력조건으로는 출력온도 195~215 $^{\circ}$ C, 출력속도 10~70mm/sec, infill density 10~100%로 설정하였다. PLA 필라멘트는 옥수수과 사탕수수 원료로 만들어진 친환경 수지로서, 생분해되는 비교적 간단한 결정성 구조의 지방족 폴리에스테르계 고분자이며 유해요소가 적다. 이산화탄소 발생량, 수축 및 찌꺼기가 적으며 접착성이 우수하고 기포발생이 없는 반면, 습기에 약하며 출력물이 60 $^{\circ}$ C 이상의 온도에서 변형을 일으킬 수 있다.

3.3.2.1 출력온도에 따른 출력상태 분석

표 6~10으로부터, 출력온도를 195~215 $^{\circ}$ C로 설정하였다. 표로부터 전 출력온도에 걸쳐 거의 동일한 출력상태를 보이고 있다.

3.3.2.2 출력속도에 따른 출력상태 분석

표 6~10으로부터, 출력속도를 10~70mm/sec로 설정하였다. 표로부터 전 출력온도에 걸쳐 출력속도 10mm/sec일 때, infill density 10%에서는 출력상태가 '보통'이거나 '나쁨', infill density 50~100%에서는 출력상태가 '우수'하게 나타났다.

전 출력온도에 걸쳐 출력속도 40mm/sec일 때, infill density

10%에서는 출력상태가 '보통'이거나 '나쁨', infill density 50%에서는 출력상태가 '우수'하거나 '보통', infill density 100%에서는 출력상태가 '우수'하게 나타났다.

또한 전 출력온도에 걸쳐 출력속도 70mm/sec일 때, infill density 10%에서는 출력상태가 '나쁨', infill density 50%에서는 출력상태가 '보통'이거나 '나쁨', infill density 100%에서는 출력상태가 '보통'으로 나타났다.

결론적으로 전 출력온도에 걸쳐 출력속도가 느릴 때에는 출력상태가 '우수', 출력속도가 빠를 때에는 출력상태가 '나쁨'으로 나타났다.

3.3.2.3 Infill density에 따른 출력상태 분석

표 6~10으로부터, infill density를 10~100%로 설정하였다. 표로부터 출력온도 195 $^{\circ}$ C에서 infill density 10%일 때는 출력상태가 '나쁨', 출력온도 200~215 $^{\circ}$ C, infill density 10%에서 출력속도 10mm/sec일 때는 출력상태가 '보통', 출력속도 40~70mm/sec일 때는 출력상태가 '보통'이거나 '나쁨'으로 나타났다.

전 출력온도에 걸쳐 infill density 50%일 때, 출력속도 10mm/sec에서는 출력상태가 '우수', 출력속도 40mm/sec에서는 출력상태가 '우수'하거나 '보통', 출력속도 70mm/sec에서는 출력상태가 '보통'이거나 '나쁨'으로 나타났다.

전 출력온도에 걸쳐 infill density 100%일 때, 출력속도 10~40mm/sec에서는 출력상태가 '우수', 출력속도 70mm/sec에서는 출력상태가 '보통'으로 나타났다.

결론적으로 전 출력온도에 걸쳐 infill density가 높을 때에는 출력상태가 '우수', infill density가 낮을 때에는 출력상태가 '나쁨'으로 나타났다.

표 6 PLA 필라멘트 출력상태(출력온도 : 195 $^{\circ}$ C)

Table 6 Printing status of PLA filament(printing temp. : 195 $^{\circ}$ C)

Infill Density (%) 속도(mm/sec)	10	50	100
	10		
출력상태	×	◎	◎
40			
출력상태	×	◎	◎
70			
출력상태	×	○	○

표 7 PLA 필라멘트 출력상태(출력온도 : 200℃)

Table 7 Printing status of PLA filament(printing temp. : 200℃)

Infill Density (%) 속도(mm/sec)	10	50	100
10			
출력상태	○	◎	◎
40			
출력상태	×	○	◎
70			
출력상태	×	×	○

표 9 PLA 필라멘트 출력상태(출력온도 : 210℃)

Table 9 Printing status of PLA filament(printing temp. : 210℃)

Infill Density (%) 속도(mm/sec)	10	50	100
10			
출력상태	○	◎	◎
40			
출력상태	×	○	◎
70			
출력상태	×	○	○

표 8 PLA 필라멘트 출력상태(출력온도 : 205℃)

Table 8 Printing status of PLA filament(printing temp. : 205℃)

Infill Density (%) 속도(mm/sec)	10	50	100
10			
출력상태	○	◎	◎
40			
출력상태	×	○	◎
70			
출력상태	×	×	○

표 10 PLA 필라멘트 출력상태(출력온도 : 215℃)

Table 10 Printing status of PLA filament(printing temp. : 215℃)

Infill Density (%) 속도(mm/sec)	10	50	100
10			
출력상태	○	◎	◎
40			
출력상태	○	○	◎
70			
출력상태	×	×	○

4. 결 론

본 논문에서는 FDM 방식의 델타봇 3D 프린터에 PLA 필라멘트를 사용하여 출력하였으며, 출력 시 도출된 최적의 출력조건은 아래와 같다.

1. 표면 거칠기 분석결과로부터, 출력속도 10mm/sec, infill density 100%(출력상태 '우수')일 때의 평균 표면 거칠기는 2.28 μ mRa인 반면, 출력속도 70mm/sec, infill density 10%(출력상태 '나쁨')의 평균 표면 거칠기는 5.93 μ mRa로 나타났다. 위의 결과로부터, 출력속도가 느리고 infill density가 높을수록 표면 거칠기는 낮아지고, 출력속도가 빠르고 infill density가 낮을수록 표면 거칠기가 높아지는 것을 알 수 있다.
2. 출력온도 분석결과로부터, 전 출력온도에 걸쳐 거의 동일한 출력상태를 보이고 있다.
3. 출력속도 분석결과로부터, 전 출력속도에 걸쳐 출력속도가 느릴 때에는 출력상태가 '우수', 출력속도가 빠를 때에는 출력상태가 '나쁨'으로 나타났다.
4. Infill density 분석결과로부터, 전 infill density에 걸쳐 infill density가 높을 때에는 출력상태가 '우수', infill density가 낮을 때에는 출력상태가 '나쁨'으로 나타났다.
5. 베드온도 분석결과로부터, PLA 필라멘트는 베드온도를 높이지 않고 실온에서 출력하여도 수축이 일어나지 않고 출력물도 베드에 잘 붙어 있는 것으로 나타났다.

References

[1] C. H. Ahn, "3D Printer", Codmedia, pp.14~15, 2014.
 [2] S. H. Roh, "3D Printer Practical Use Guide Book", Mechapia, pp. 1~10, 2014.
 [3] IRS Global, "3D Printing(Printer, Material) Market, Technology Forecast and Business Strategy of Domestic and Foreign Participating Enterprise", IRS Global, pp. 1~10. 2013.
 [4] M. S. Song, "Preparation and Characteristics of PLA/Chitosan Composites and Nanofibers", Dankook Univ., Master's Thesis, pp. 1~5, 2003.

저 자 소 개



유 도 현 (Do-Hyun You)

1965년 10월 20일생. 1990년 인하대학교 공과대학 전기공학과 졸업(공학사). 1992년 인하대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 1996년 인하대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1991, 1992년 일본 Akita 대학 객원연구원. 1995년~현재 신안산대학교 전기과 부교수. 2015년 7월~현재 신안산대학교 AM산업단지캠퍼스 인포메이션 센터장
 Tel. : 031-490-6056
 Fax. : 031-490-6055
 E-Mail : dhyou@sau.ac.kr