[논문] 한국소성가공학회지, 제 31 권 제 2 호, 2022
Transactions of Materials Processing, Vol.31, No.2, 2022
http://data.doi.or.kr/10.5228/KSTP.2022.31.2.89

3D 프린팅을 이용한 PLA+ 소재의 다양한 출력 조건에 따른 인장강도에 대한 연구

나두현[1,#] · 김성기[2]

A Study on Tensile Strength According to Various Output Conditions of PLA+ Materials Using 3D Printing

D. H. Na, S. G. Kim
(Received February 28, 2022 / Revised March 8, 2022 / Accepted March 10, 2022)

Abstract

3D printing products manufactured by material extrusion are used in many industrial fields recently. However, these products are difficult to use in the field due to their low tensile strengths. In order to solve this problem, research on improving the tensile strength of the output using a 3D printer has been continuously conducted. In this study, we performed a tensile test using Universal Testing Machine according to infill pattern, nozzle temperature, bed temperature, and printing speed conditions. Results revealed that tensile specimen of concentric shape had the highest tensile strength in infill pattern condition and that the tensile strength increased linearly with increasing nozzle and bed temperatures. However, the tensile strength decreased with increasing printing speed. Consequently, we confirmed that tensile strength could be increased and decreased depending on output conditions of 3D printing.

Keywords : 3D printer, PLA+, Tensile test, Tensile strength, Infill pattern, Nozzle temperature, Bed temperature, Printing speed

1. 서 론

3D 프린팅(3D printing) 기술은 최근에 다양한 재료를 사용하여 많은 분야에서 사용되고 있다. 3D 프린팅 출력 방법에는 여러 가지 적층 방식이 있는데 그중 가장 대표적이고 많이 사용되는 방식은 재료 압출(material extrusion) 방식이다. 재료 압출 방식은 재료와 장비 가격이 다른 방식보다 저렴하고 접근성이 좋아 다양한 재료를 사용할 수 있는 장점이 있다. 하지만 레이어 층이 접합될 때 결합제나 레이저 등을 사용하지 않고 재료의 상변화만으로 레이어 층이 접합되기 때문에 출력물의 인장강도가 다른 방식에 비해 떨어지는 단점이 있다[1]. 이러한 단점을 해결하기 위해 최근 재료 압출 방식의 인장강도 향상에 대한 연구가 계속해서 수행되고 있다.

김기대[1]는 인장 시편의 내부 적층 각도(0°, 45°, 90°)에 따라 인장강도(tensile strength)의 변화를 분석하였다. 실험 결과 적층 각도가 0°에서 인장강도가 가장 높게 나타났으며, 90°에서 인장강도가 가장 낮게 나타나는 결과를 보였다. 이는 인장 방향으로 주사되는 외곽선(contour)의 총 누적 길이 차이 때문에 인장강도 차이가 나타난다고 제시하였다.

우인영 등[2]은 인장 시편의 내부 적층 각도를 대칭 적층 경로 0/0, 15/-15, 30/-30, 45/-45, 60/-60, 75/-75, 90/-90°와 비대칭 적층 경로 15/0, 30/0, 45/0, 60/0, 75/0, 90/0°에 따라 인장강도의 변화를 분석하였다. 실험 결과 15/-15°에서 90/-90°로 적층 각도가 변할 때 즉, 적층 경로가 인장 하중 방향과 평행에서 수직으로 변할 때 인장강도가 선형적으로 감소하는 결과를 제시하였다.

1. 대림대학교 기계과, 조교수
2. 대림대학교 메카트로닉스공학과, 학부생
Corresponding Author : Daelim University College
E-mail : dhna@daelim.ac.kr
ORCID : 0000-0003-1995-021X

박성제 등[3]은 노즐 온도(nozzle temperature)의 변수를 200, 220, 240℃로 두어 인장강도의 변화를 분석하였다. 실험 결과 노즐 온도가 올라갈수록 인장강도 또한 높아지는 결과를 보였다. 이는 온도가 높을수록 필라멘트 간 접착이 유리하고 레이어의 사슬 관계 형성이 좋아진다고 언급하였다.

김범준[4]은 3D 프린터 출력 속도(printing speed)의 변수를 15, 100, 200mm/sec 로 두어 인장강도의 변화를 분석하였다. 실험 결과 출력 속도가 높아질수록 인장강도는 낮아지는 결과를 보였다. 이는 적층 속도가 빠를수록 레이어 간 결합력을 강화하는데 시간이 부족하고 기공(void)을 발생시켜 인장강도가 낮아진다고 제시하였다.

설경수 등[5]은 내부 채움 밀도 25, 50, 75, 100%와 내부 채움 패턴 concentric, line, lattice, crystal 의 변수를 두어 인장강도의 변화를 분석하였다. 내부 채움 밀도가 높아질수록 인장강도가 증가하였고 동심원(concentric) 패턴이 가장 높은 인장강도를 보였다. 이는 동심원 패턴이 인장 시험의 응력 방향과 평행하게 적층되기 때문이라고 발표하였다. 하지만 다른 채움 패턴과 비교하였을 때 왜 인장강도가 패턴 별로 다른지에 대해서는 분석하지 않았다.

본 연구자[6]는 채움 밀도(60, 80, 100%), 레이어 높이(0.1, 0.2, 0.3mm), 채움 패턴(zigzag, honeycomb, concentric)에 따른 인장강도의 변화를 연구하였다. 채움 밀도가 높아질수록 인장강도는 높아지는 경향이 나타났다. 이는 밀도가 높아질수록 시편 내부의 기공(void)이 줄어드는 효과와 같기 때문이라 제시하였으며, 레이어 높이는 작을수록 더 많은 층을 쌓기 때문에 인장강도가 높게 나온다고 제시하였다.

재료 압출 방식으로 출력된 출력물이 다양한 분야에서 활용되기 위해서는 인장강도 향상은 필수적이다. 3D 프린팅에서 출력 조건은 인장강도에 큰 영향을 미치는 인자로써 재료 압출 방식의 단점을 보완하기 위해 3D 프린팅의 출력 조건에 대한 연구가 반드시 필요하다.

본 연구에서는 기존 연구에서 자세히 언급되지 않은 내부 채움 패턴(infill pattern)의 변화에 따른 인장강도 변화를 세부적으로 분석하였다. 또한 3D 프린팅 출력 조건 중 노즐 온도(nozzle temperature)와 출력 속도(printing speed)에 대한 구간을 세분화하고 베드 온도(bed temperature)가 인장강도에 미치는 영향에 대한 연구도 진행하였다.

2. 실 험

2.1 시편 제작

인장 시편을 제작하는 데 사용된 재료는 PLA+ (Poly Lactic Acid-Plus) 필라멘트 재료이다. PLA+ 소재는 옥수수 전분이 주원료인 생분해성 친환경 필라멘트로 샌딩(sanding) 특성이 우수한 성질을 갖고 있다. Table 1 은 PLA+ 소재의 물성을 나타낸다[7].

본 연구에 사용된 인장 시편은 Fig. 1 과 같이 ASTM D638 규격에 의거하여 판(plate) 형태로 설계하였다. STL 파일 변환 및 출력 조건 변경을 위해 전용 슬라이싱 프로그램인 큐비크레이터(Cubicreator4 V4.4.0)를 사용하였다[8].

Table 1 PLA+ filament used in 3D Printing[7]

Print temperature	200 - 225℃
Bed temperature	60 - 80℃
Tensile strength	65MPa
Elongation at break	12%
Filament diameter	1.75mm

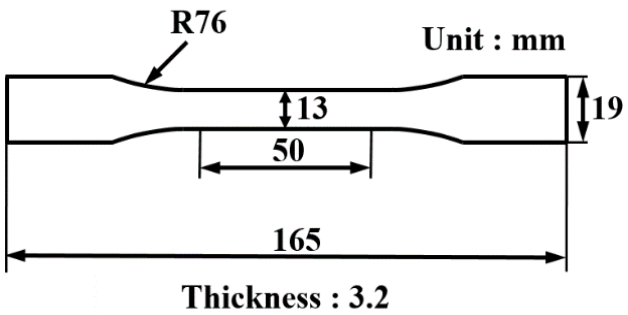


Fig. 1 Tensile specimen(ASTM D638 Type No.1)

2.2 실험 장비

본 연구에서는 큐비콘(Cubicon)사의 Style NEO-A31C 모델을 사용하여 인장 시편을 출력하였다(Fig. 2). 또한 인장 시험은 Test one 사의 만능재료시험기(Universal Testing Machine) TO-102 모델을 사용하여 실험하였다(Fig. 3). 만능재료시험기의 최대 하중 용량은 5,000kgf 이고 시험 속도는 1-500mm/min 이다. 본 연구에서는 인장 시편의 표점 거리(gauge length) 내 파단을 유도하기 위해 시험 속도를 5mm/min 으로 설정하였고 신율계(extensometer)를 장착하여 실험을 진행하였다[6].

Fig. 2 3D printer(Cubicon – Style NEO A31C)

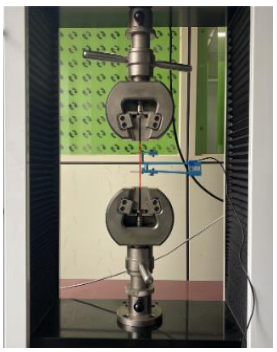


Fig. 3 Tensile testing machine(Test one – TO-102)

3. 실험 조건

본 연구에서는 내부 채움 패턴(infill pattern), 노즐 온도(nozzle temperature), 베드 온도(bed temperature), 출력 속도(printing speed) 총 4가지 조건에 대한 실험을 진행하였다. 채움 밀도(density)는 50%, 레이어 높이(layer height)는 0.2mm, 레이어 방향(layer direction)은 가로(transverse) 방향으로 실험이 진행되었다.

3.1 내부 채움 패턴

내부 채움 패턴 조건은 cross, cross 3D, octet, triangles, cubic subdivision, zigzag, quarter cubic, cubic, honeycomb, concentric 으로 10 가지 내부 채움 패턴에 대한 인장강도를 분석하였으며 노즐 온도 220℃, 베드 온도 65℃, 출력 속도 60mm/sec 로 설정하여 실험을 진행하였다. 내부 채움 패턴 형상은 큐비크레이터(Cubicreator4 V4.4.0)를 사용하여 확인하였고 이 패턴 형상으로 인장 시편을 출력하였다[8].

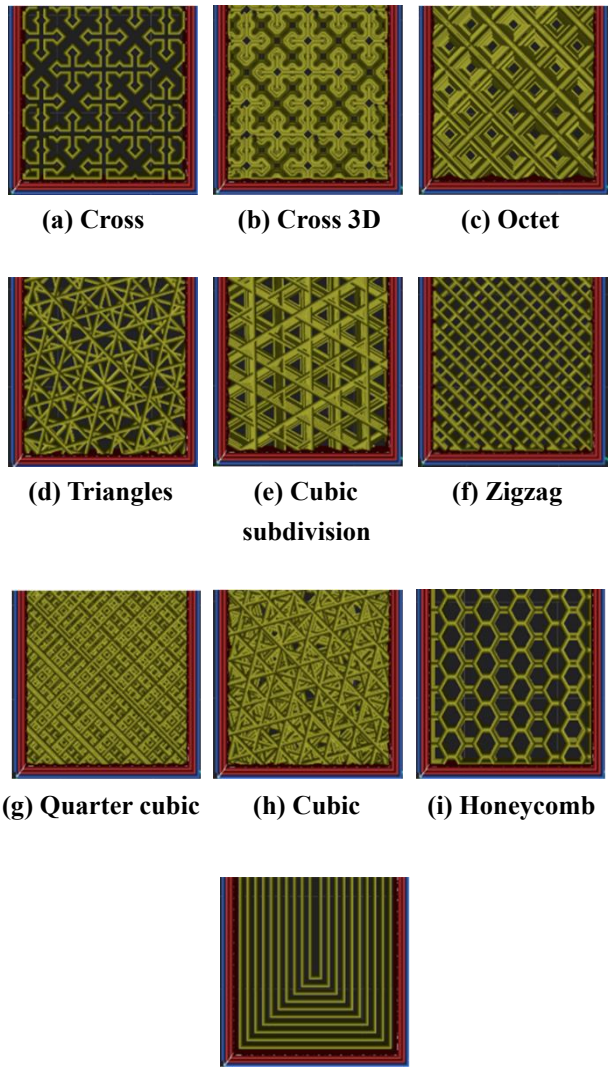


Fig. 4 The shape of infill pattern(Density 50%)[8]

3.2 노즐 온도

노즐 온도 조건은 Table 1 의 PLA+ 재료의 출력 온도 조건에 따라 200, 205, 210, 215, 220, 225℃로 총 6 가지 조건을 비교 분석하였다. 내부 채움 패턴은 3D 프린팅 출력 시 일반적으로 가장 많이 사용되는 honeycomb, 베드 온도 65℃, 출력 속도 60mm/sec 로 설정하였다.

3.3 베드 온도

베드 온도 조건은 Table 1 의 PLA+ 재료의 베드 온도 조건에 따라 60, 65, 70, 75, 80℃로 총 5 가지 조건을 비교 분석하였다. 내부 채움 패턴 honeycomb, 노즐 온도 220℃, 출력 속도 60mm/sec 로 설정하였다.

3.4 출력 속도

출력 속도 조건은 큐비크레이터 프로그램에서 최댓값인 150mm/sec 까지 설정하여 30, 60, 90, 120, 150mm/sec 로 총 5 가지 조건을 비교 분석하였다. 내부 채움 패턴 honeycomb, 노즐 온도 220℃, 베드 온도 65℃로 설정 후 실험을 진행하였다.

4. 결 과

4.1 내부 채움 패턴 비교 결과

Fig. 5 는 내부 채움 패턴에 따른 인장강도의 변화를 보여준다. 인장 시험 결과에서 인장강도의 크기는 concentric(33.03MPa) > honeycomb(30.32MPa) > cubic(27.87MPa) > quarter cubic(27.84MPa) > zigzag(27.45MPa) > cubic subdivision(26.81MPa) > triangles(26.45MPa) > octet(25.89MPa) > cross 3D(25.75MPa) > cross(24.63MPa) 순으로 나타났다.

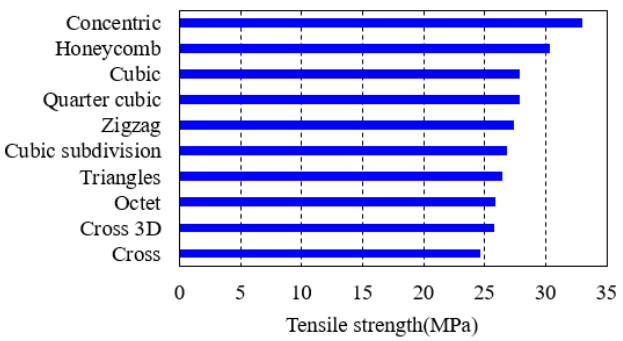
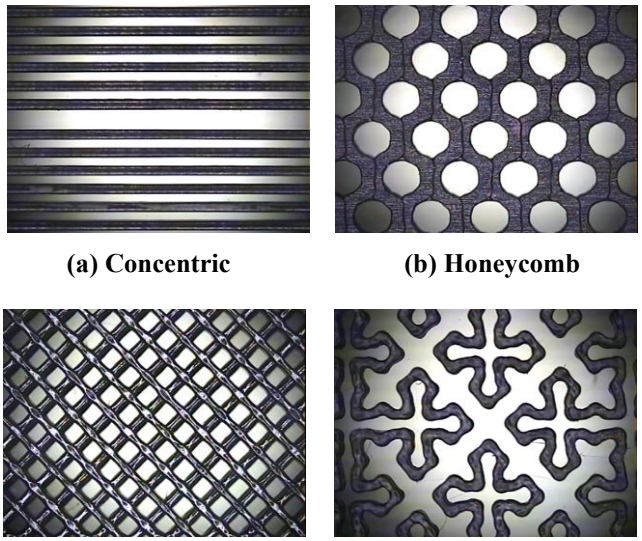


Fig. 5 Tensile behavior of the specimens by infill pattern

본 연구에서는 재료가 적층될 때 적층 방향으로 동일한 위치에 계속 쌓이는 4 가지 패턴에 대해 분석하였다. 분석한 4 가지 패턴은 인장강도가 가장 높은 concentric 패턴, 3D 프린팅 출력 시 가장 많이 사용되는 honeycomb 와 zigzag 패턴, 인장강도가 가장 낮은 cross 패턴이다(Fig. 5). 내부 채움 패턴의 비교분석을 위해 MIRACLE-V2512M 모델의 비전 장비를 사용하여 시편 일부의 내부 패턴을 관찰하였다. Fig. 6 은 비전 장비로 본 내부 패턴의 실제 형상을 보여준다(가로 14mm*세로 10mm). Table 2 는 각 내부 채움 패턴의 중량과 중량 대비 인장강도 값 그리고 각 채움 패턴의 적층 면적을 측정한 결과이다. 면적 측정은 Image J 프로그램[9]을 이용하여 측정하였다.



(a) Concentric **(b) Honeycomb**

(c) Zigzag **(d) Cross**

Fig. 6 The actual shape of infill pattern

Table 2 Comparison of tensile strength, area and weight for infill pattern

Infill pattern	Tensile strength [MPa]	Weight [g]	Strength/ Weight [MPa/g]	Area [mm^2]
Concentric	33.03	7.52	4.41	76.65
Honeycomb	30.32	7.94	3.82	79.03
Zigzag	27.45	7.75	3.54	99.32
Cross	24.63	7.32	3.42	63.90

일반적으로 적층 면적이 클수록 인장강도가 높을 것으로 예상되지만 concentric 패턴과 zigzag 패턴을 비교하였을 때 면적은 zigzag 패턴이 더 넓지만 인장강도는 concentric 패턴이 zigzag 패턴보다 16.89% 높았다. 이는 zigzag 패턴은 인장 방향에 대해 45/-45° 방향으로 적층되고, concentric 패턴은 인장 방향에 대해 0° 방향으로 적층 된다. 즉, concentric 패턴의 적층 방향은 인장 방향과 동일하고 와이어 줄과 같이 여러 가닥의 소재가 합쳐진 형상이기 때문에 인장강도가 높게 나온 것으로 판단된다. 이 결과는 김기대[1]의 연구 결과와도 일치하는 경향을 보여준다.

Zigzag 패턴과 honeycomb 패턴을 비교하였을 때 적층 면적은 zigzag 패턴이 더 넓지만 인장강도는 honeycomb 패턴이 9.47% 더 높다. 내부 패턴 형상을 비교해 보면 zigzag 패턴은 마름모(rhombus) 형상이고 honeycomb 패턴은 원(circle)에 가까운 형상이다(Fig. 6).

즉, 채움 패턴 내부 빈 공간을 기공으로 가정하면 zigzag 패턴이 honeycomb 패턴에 비해 응력 집중(stress concentration)이 더 크게 발생하게 된다. 따라서 zigzag 패턴의 인장강도가 honeycomb 패턴에 비해 더 낮게 나온 것으로 판단된다.

또한 본 연구자는 내부 채움 패턴에 대해 Fig. 7 과 같이 단면 A-A'(인장 응력과 수직 방향)와 B-B'(인장 응력과 동일 방향)로 시편을 잘랐을 때 그 단면에 포함되는 레이어 길이를 Image J 프로그램을 이용해 측정하였다[9].

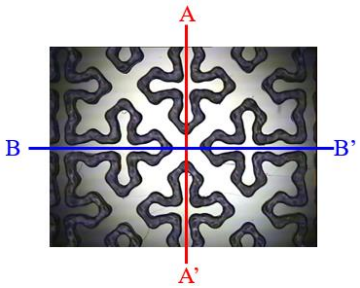
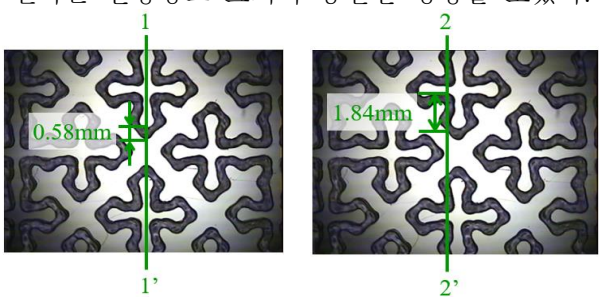


Fig. 7 The cross section of cross pattern(A-A' and B-B')

단면 A-A'에 대해 Fig. 8 (a)와 같이 1-1' 위치일 때 단면에 포함되는 레이어 길이가 0.58mm 이고 소재 두 군데가 포함되기 때문에 최소 레이어 길이는 0.58*2=1.16mm 이다. 레이어 길이가 최대가 되는 위치는 Fig. 8 (b)와 같이 2-2' 위치일 때 레이어 길이가 1.84mm 이고 소재 네 군데가 포함되기 때문에 최대 레이어 길이는 1.84*4=7.36mm 이다. 이와 동일한 방법으로 다른 패턴들의 최소, 최대 레이어 길이를 측정하였다. Table 3 은 각 패턴의 최소, 최대, 평균 레이어 길이 값을 보여준다. 레이어 길이의 평균값을 비교하였을 때 내부 채움 패턴은 concentric > honeycomb > zigzag > cross 순으로 결과가 나타났으며 이 결과는 인장강도 크기와 동일한 경향을 보였다.



(a) Minimum **(b) Maximum**

Fig. 8 Minimum and maximum layer length for the cross section A-A'

Table 3 Minimum, maximum and average layer length included in the cross section(unit : mm)

Infill pattern	Cross section A-A'			Cross section B-B'		
	Min.	Max.	Avg.	Min.	Max.	Avg.
Concentric	5.46		5.46	14.00		14.00
Honeycomb	3.97	6.15	5.06	5.15	14.00	9.58
Zigzag	4.08	5.35	4.72	5.60	7.75	6.68
Cross	1.16	7.36	4.26	1.16	10.23	5.70

본 연구에서는 내부 채움 패턴을 1) 적층 면적, 2) 적층 방향, 3) 단면에 포함되는 레이어 길이 총 3 가지에 대해 비교 분석하였다. 적층 면적은 각 패턴의 인장강도 크기와 비례적인 관계를 보이지 않았다. 하지만 패턴의 적층 방향은 인장 응력 방향과 동일할 때 인장강도가 높은 결과를 보였다. 또한 단면에 포함되는 레이어 길이의 평균값은 concentric > honeycomb > zigzag > cross 순으로 나타났으며 인장강도 크기와 동일한 경향을 보였다. 이러한 결과를 보았을 때 인장강도에 큰 영향을 미치는 인자는 채움 패턴의 적층 방향과 단면을 잘랐을 때 그 단면에 포함되는 레이어의 길이로 판단된다. 그리고 Table 2 에서 중량 대비 인장강도(Strength/Weight) 값을 비교하였을 때 concentric > honeycomb > zigzag > cross 순으로 나타났으며 concentric 패턴이 가장 높은 결과를 보여준다. 이는 가장 적은 재료로 가장 높은 인장강도를 얻을 수 있기 때문에 인장강도를 가장 높일 수 있는 적층 방법임을 의미한다.

4.2 노즐 온도 변화에 따른 비교 결과

Fig. 9 는 노즐 온도에 따른 인장강도의 변화를 보여준다. 실험 결과 노즐 온도가 높아질수록 인장강도의 크기 또한 선형적으로 증가하였다. 각 변수마다 두 번의 실험을 진행하였으며 평균값은 노즐 온도가 200℃일 때 25.25MPa, 205℃일 때 25.60MPa, 210℃일 때 27.10MPa, 215℃일 때 28.40MPa, 220℃일 때 30.32MPa, 225℃일 때 31.91MPa 로 결과가 나타났다. 노즐 온도 200℃와 225℃의 인장강도 차이는 20.87% 차이를 보였다. 이는 더 높은 온도에서 소재를 압출하기 때문에 레이어 간의 접착력(adhesion)이 좋아지고 또한 노즐 온도가 높아질수록 압출되는 필라멘트의 온도와 상온의 온도 차이가 커지기 때

문에 냉각 효과(cooling effect)가 크기에 인장강도가 높게 나온 것으로 판단된다. 이 결과는 박성제[3] 등의 연구 결과와도 일치하는 경향을 보였다.

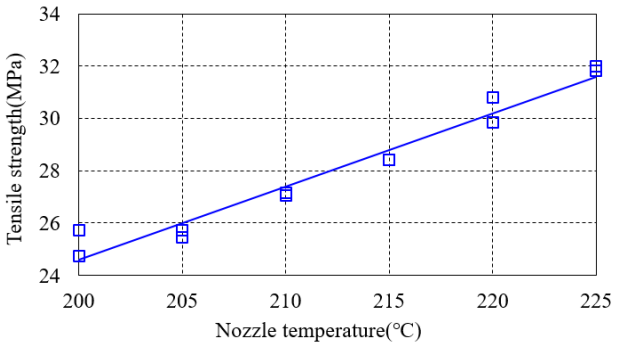


Fig. 9 Tensile behavior of the specimens by nozzle temperature

4.3 베드 온도 변화에 따른 비교 결과

Fig. 10 은 베드 온도에 따른 인장강도의 변화를 보여준다. 실험 결과 인장강도의 변화는 크지는 않지만 베드 온도가 높아짐에 따라 인장강도 또한 증가하는 경향을 보였다. 두 번의 실험 중 평균값은 베드 온도가 60℃일 때 30.26MPa, 65℃일 때 30.32MPa, 70℃일 때 30.72MPa, 75℃일 때 31.19MPa, 80℃일 때 32.46MPa 로 결과가 나타났으며 베드 온도 60℃와 80℃의 인장강도 차이는 6.78%의 차이를 보였다. 다른 변수에 비해 인장강도 차이가 크진 않지만 베드 온도가 높을수록 출력하는 동안 시편 바닥 면의 온도가 높아지면서 레이어 간 결합력을 좋게 하는데 기인하기 때문이라 판단된다.

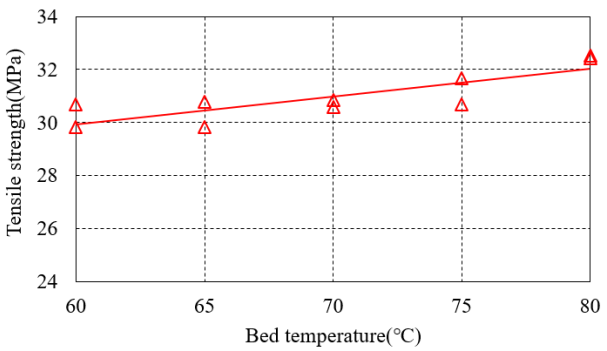


Fig. 10 Tensile behavior of the specimens by bed temperature

4.4 출력 속도 변화에 따른 비교 결과

Fig. 11 은 출력 속도에 따른 인장강도의 변화를 보여준다. 실험 결과 출력 속도가 높아질수록 인장강도는 감소하는 경향을 보였다. 출력 속도 30, 60, 90, 120, 150mm/sec 순으로 두 번의 실험 중 인장강도 평균값은 30.99, 30.32, 28.07, 27.83, 26.23MPa 로 나타났다. 출력 속도 30mm/sec 와 150mm/sec 의 인장강도의 차이는 15.36%의 차이를 보였다. 이는 노즐에서 압출되는 소재의 압출량은 항상 동일한데 출력 속도가 빠르면 레이어가 형성되는데 시간이 충분하지 않고 레이어 간의 접착할 시간도 충분하지 않기 때문에 인장강도가 낮은 것으로 판단된다. 이 결과는 김범준[4]의 연구 결과와도 일치하는 경향을 보였다.

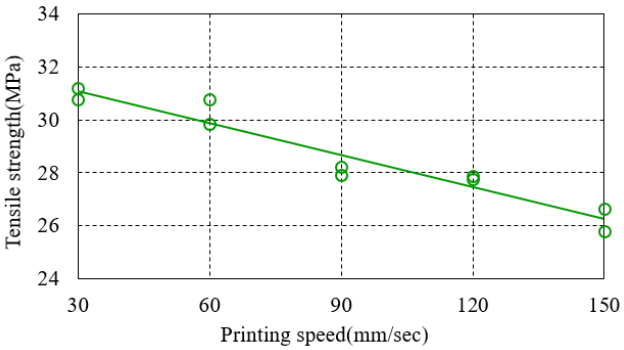


Fig. 11 Tensile behavior of the specimens by printing speed

5. 결 론

본 연구에서는 PLA+ 소재의 3D 프린팅 출력 조건(내부 채움 패턴, 노즐 온도, 베드 온도, 출력 속도)에 따른 인장강도 변화를 비교 분석하였으며 결론은 다음과 같다.

(1) 내부 채움 패턴에서 concentric 패턴이 인장강도가 가장 높은 결과가 나왔으며 인장강도가 가장 낮은 cross 패턴과 비교했을 때 33.03MPa 과 24.63MPa 로 25.43%의 차이를 보였다. 내부 채움 패턴에서 인장강도에 영향을 미치는 인자는 적층 면적이 아닌 적층 방향, 단면에 포함되는 레이어 길이로 판단된다. 또한 인장강도의 크기와 재료의 소모 측면에서 봤을 때 concentric 패턴이 가장 효율적인 패턴임을 확인하였다.

(2) 노즐 온도의 경우 온도가 높아짐에 따라 인장강도도 비례적으로 증가하였으며 노즐 온도 200℃와 225℃의 인장강도의 크기를 비교하였을 때 25.25MPa 과 31.91MPa 로 20.87%의 차이를 보였다.

(3) 베드 온도 또한 온도가 높아짐에 따라 차이가 크지는 않지만 인장강도가 증가하는 경향을 보였다. 베드 온도 60℃와 80℃의 인장강도의 크기를 비교하였을 때 30.26MPa 과 32.46MPa 로 6.78%의 차이를 보였다.

(4) 출력 속도의 경우 속도가 빨라질수록 인장강도의 크기는 감소하였으며 출력 속도 30mm/sec 와 150mm/sec 의 인장강도의 크기를 비교하였을 때 30.99MPa 과 26.23MPa 로 15.36% 의 차이를 보였다.

(5) 각각의 출력 조건 중 인장강도의 편차는 내부 채움 패턴이 25.43%로 가장 높았으며 그다음으로 노즐 온도, 출력 속도, 베드 온도 순으로 나타났다. 결과적으로 출력물이 받는 하중 방향을 고려하여 적절한 내부 채움 패턴을 적용하고 높은 노즐 온도, 높은 베드 온도, 낮은 출력 속도를 적용한다면 강도가 높은 출력물을 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

REFERENCES

[1] G. D. Kim, 2021, Comparison of Mechanical Properties and Form Accuracy in FDM 3D Printing Based on Building Conditions, J. Kor. Soc. Manufacturing Process Eng, Vol. 20, No. 8, pp. 52~59, http://data.doi.org/10.14775/ksmpe.2021.20.08.0052.

[2] I. Y. Woo and M. Y. Lyu, 2020, Variations in the Tensile Strength in Material Extrusion-type 3D Printed Specimens for Various Tool Paths, Polym. Kor, Vol. 44, No. 6, pp. 769~775, http://data.doi.org/10.7317/pk.2020.44.6.769.

[3] S. J. Park, J. H. Park, K. H. Lee and M. Y. Lyu, 2016, Deposition Strength of Specimens Manufactured Using Fused Deposition Modeling Type 3D Printer, Polym. Kor, Vol. 40, No. 6, pp. 846~851, http://data.dx.doi.org/10.7317/pk.2016.40.6.846.

[4] B. J. Kim, 2020, Effect of Fused Deposition Conditions on the Fracture Behavior of 3D Printed Tensile Specimens, J. Kor. Soc. Precis. Eng, Vol. 37, No. 6, pp. 421~428, http://data.doi.org/10.7736/JKSPE.02 0.048.

[5] K. S. Seol, P. Zhao, B. C. Shin and S. U. Zhang, 2018, Infill Print Parameters for Mechanical Properties of 3D Printed PLA Parts, J. Kor. Soc. Manufacturing Process Eng, Vol. 17, No. 4, pp. 9~16, http://data.doi.org/10.14775/ksmpe.2018.17.4. 009.

[6] D. H. Na and S. G. Kim, 2021, A study on Tensile Strength of PLA+ and ABS Materials by 3D Printing Output Conditions, Proc. Kor. Soc. Tech. Plast. Conf, Vol. 30, No. 6, pp. 284~290, http://data.dx.doi.org/10.522 8. KSTP.2021.30.6.284.

[7] http://www.3dcubicon.com/shop/item.php?it_id=1595415143

[8] http://www.3dcubicon.com/bbs/board.php?bo_table=datalist&wr_id=124&sfl=wr_subject&stx=cubicreator&sop=and

[9] https://imagej.nih.gov/ij/download.html