

## 3D 프린팅 출력 조건에 따른 PLA+와 ABS 재료의 인장강도에 대한 연구

나두현<sup>1,\*</sup>, 김성기<sup>2</sup>

### A Study on Tensile Strength of PLA+ and ABS Materials by 3D Printing Output Conditions

D. H. Na, S. G. Kim

(Received October 29, 2021 / Revised November 22, 2021 / Accepted November 29, 2021)

#### Abstract

Manufacturing using a 3D printer has recently increased in many fields and the material extrusion method, which is a lamination method, is commonly used. Since it uses a plastic material, the strength of the output of 3D printing is lower than that of steel material. For this reason, research on improving the mechanical properties of the output of 3D printing is continuously being conducted. In this study, tensile strength was compared with changes in the material type (PLA+, ABS) and density (60, 80, and 100%), layer height (0.1, 0.2, and 0.3 mm), layer direction (transverse and lengthwise), and fill pattern (zigzag, honeycomb, and concentric) among 3D printing output conditions. Tensile tests according to 3D printing output conditions were performed using a Universal Testing Machine. The results showed that tensile strength ranged from 21.10 MPa to 43.65 MPa according to the 3D printing output conditions.

**Keywords :** 3D printer, Tensile test, Tensile Strength, Yield Strength, Elongation, Material, PLA+, ABS, Density, Layer height, Layer direction, Fill pattern

## 1. 서 론

3D 프린팅(3D printing)은 3D 프린터로 3차원 형상의 제품 또는 부품을 출력하는 기술이다. 적층 방식에 따라 재료 압출(material extrusion) 방식, 재료 분사(material jetting) 방식, 선택적 레이저 소결(selective laser sintering) 방식, 광경화(lithography apparatus) 방식 등으로 분류된다. 이 중 재료 압출 방식은 노즐이 X, Y축으로 이동하며 필라멘트 소재를 압출하여 한 층을 쌓게 된다. 한 층이 쌓인 후 베드는 Z축으로 내려가면서 또 다른 층을 적층하는 공정이다. 이 방식은 다른 3D 프린터에 비해 구조와 프로그램이 단순하고 다양한 재료를 사용할 수 있는 장점이 있다.

그러나 플라스틱 소재를 사용하기 때문에 철강 소재보다 강도가 낮은 문제가 있다.

이러한 문제를 해결하기 위해 재료 압출 방식에서의 기계적 물성 향상 연구는 계속해서 수행되어 왔다. 우인영 등[1]은 적층 각도가 기계적 성질에 미치는 영향을 분석한 연구를 수행하였다. 그들은 적층 각도의 경우 적층 방향에 평행한 0° 에서 인장강도가 높게 나타났으며, 적층 방향에 수직인 90° 에서 인장강도가 낮게 나타나는 연구 결과를 발표하였다. 우인영 등[2]은 또한 3D 프린팅에서 적층 경로를 선정하여 시편을 제작 후 적층 경로별 인장강도를 측정하고 비교하는 연구를 수행하였다. 실험 결과, 대칭 적층 경로 시편은 적층 각도에 따라 큰 차이를 보이며 높은 강도를 보였다. 그러나 비대칭 경로 시편은 적층 각도에 따라 큰 편차가 없이 균

1. 대림대학교 기계과, 조교수

2. 대림대학교 기계과, 대학원생

# Corresponding Author : Daelim University College

E-mail: dhna@daelim.ac.kr ORCID : 0000-0003-1995-021X

일한 강도를 보이는 결과가 나타났다.

김범준 등[3]은 적층 속도를 15, 100, 200mm/s로 하여 시편 출력 후 인장강도를 측정하는 연구를 수행하였다. 실험 결과 적층 속도가 인장강도와 연신율에 큰 영향을 미치는 중요 인자인 것으로 나타났다. 또한 적층 속도가 빠를수록 레이어 간의 결합력을 강화하는데 충분한 시간 확보의 부족 및 경계층에서 발생할 수 있는 기공(void) 등을 발생시켜 강도 저하와 연신율이 감소한다고 하였다. 김범준 등[4]은 또한 적층 방향을 X, Y방향으로 하고 레이어 높이를 0.2, 0.4mm로 하여 인장강도의 변화를 연구하였다. 적층 레이어 높이가 감소할수록 인장강도가 증가하였고 적층 방향이 인장하중에 대하여 수직인 X방향보다 평행인 Y방향에서 인장강도가 증가하는 결과를 제시하였다.

소순권 등[5]은 3D 프린팅으로 시험편을 출력 후 열풍열처리 전과 후의 인장강도를 비교한 연구를 수행하였다. 열풍열처리 온도가 250°가 넘어가면 시험편의 형상이 변형되는 결과를 초래하였다. 따라서 연구 결과는 200°의 열풍열처리 전과 후의 인장강도의 값을 비교하였으며 열풍열처리 후 인장강도가 향상되는 결과를 보여주었다.

박성제 등[6]은 노즐 온도와 적층 방향을 다르게 하여 연구를 수행하였다. 실험 결과 적층 방향을 수평으로 하였을 때 수직 방향보다 인장강도가 더 높은 결과를 보였으며 노즐의 온도가 높아짐에 따라 인장강도는 큰 변화가 없었지만 연신율이 증가하는 결과를 보였다.

심형섭 등[7]은 3D 프린팅으로 시험편의 두께(thickness), 밀도(density), 소재(material)를 변경하여 이에 따른 인장강도와 항복강도의 경향을 분석하였다. 시험편의 밀도가 50%에서 100%가 되었을 때 강도는 약 52.5% 증가하였으며 PLA 소재의 강도는 공구강(SKD11)의 인장강도에 9.1% 밖에 되지 않기 때문에 기존 금속 제품을 3D 프린터 출력물로 대체하기는 불가능하다는 결과를 발표하였다.

3D 프린터로 출력된 출력물에 대한 기계적 물성 향상은 재료 압출 방식이 다양한 분야에 활용되기 위해서는 필수적이다. 재료 압출 방식으로 출력한 재료는 강도가 약한 단점이 있기 때문에 어떠한 조건으로 출력하였을 때 그 재료의 강도를 높일 수 있는지에 대한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 다양한 3D 프린팅 출력 조건의 변수를 두고 연구를 진행하였다. 출력 조건은 1) 소재(PLA+, ABS) 2) 채움 밀도(60, 80, 100%) 3) 레이어 높이(0.1, 0.2, 0.3mm) 4) 레이어 방향(가로, 세로 방향) 5) 채움 패턴(zigzag, honeycomb, concentric) 총 5가지 변수에 대해 재료의 항복강도와 인장강도의 변화를 확인하였다. 그리고 5가지 변수에 대해 인장강도를 가장 높일 수 있는 최적의 조건을 제시하였다.

## 2. 시편 제작

### 2.1 시편 설계

인장 시편은 ASTM D638 규격에 맞춰 시편을 제작하였다. 인장 시편의 형상은 Fig. 1과 같다. 3D 프린터 출력을 위해 큐비크레이터(Cubicreator) 프로그램으로 모델링 파일을 G-코드(G-code)로 변환하여 출력하였다.

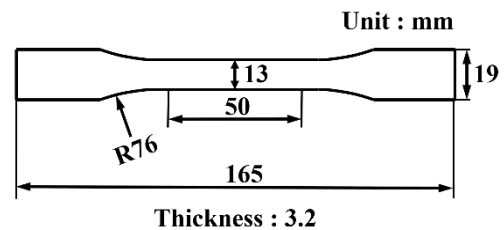


Fig. 1 Tensile specimen(ASTM D638, Type No.1)[8]

### 2.2 재료

인장 시편을 제작하기 위해 사용된 소재는 큐비콘(Cubicon)사에서 생산된 PLA+(Poly Lactic Acid-Plus)와 ABS(Acrylonitrile-Butadiene-Styrene) 필라멘트를 사용하였다. PLA+ 소재는 옥수수 전분이 주원료로 가장 많이 사용되는 필라멘트로 ABS 소재에 비해 충격 강도는 낮으나 수축 발생이 거의 없고, 샌딩(sanding) 특성이 우수한 특징을 가지고 있다. 출력 조건은 노즐 온도(nozzle temperature) 200~225°C, 베드 온도(baseplate temperature) 60~80°C, 소재 직경(filament diameter) 1.75mm, 인장강도(tensile strength)는 65MPa이다.[9] ABS 소재는 점착성이 우수하고 용점(melting point)이 균일한 장점을 가지고 있고, 단점은 단단하면서도 수축성이 있어 형상 차이에 따라 프린팅 시 균열(crack)이나 휨(bending) 현상이 발생할 수 있다. 출력 조건은 노즐 온도 220~260°C, 베드

온도 100~115℃, 소재 직경 1.75mm, 인장강도는 43MPa이다.[10]

### 2.3 장비

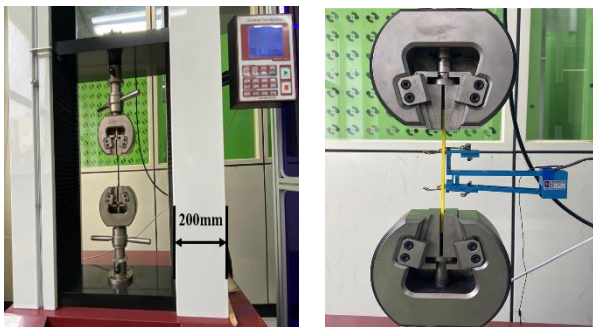
인장 시편을 제작하기 위해 사용한 3D 프린터는 Fig. 2와 같이 큐비콘(Cubicon)사의 Single Plus - 320C 모델[11]을 사용하였으며, PLA+ 소재는 노즐 온도 220℃, 베드 온도 65℃로 설정 후 출력을 진행하였고, ABS 소재는 노즐 온도 240℃, 베드 온도 115℃로 설정 후 출력을 진행하였다.



Fig. 2 3D printer(Cubicon Single Plus - 320C)[11]

### 3. 인장시험기

본 연구에서는 인장시험을 위해 Fig. 3과 같이 테스트원(Test one)사의 만능재료시험기(Universal Testing Machine) TO-102 모델을 사용하였다. 최대 하중 용량은 5,000kgf, 크로스헤드(cross head) 속도는 1~500mm/min 범위이다. 본 연구에서 크로스헤드 속도는 5mm/min이고 신율계(extensometer)를 장착하여 시험을 수행하였다.



(a) Tensile testing machine (b) Extensometer

Fig. 3 Universal Testing Machine(Test one, TO-102)

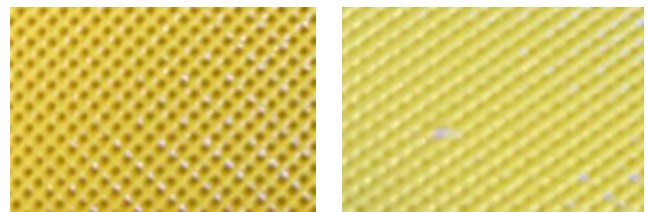
### 4. 실험 조건

본 연구에서의 출력 조건 변수는 Table 1과 같다. 첫 번째로 소재에 따른 출력 조건은 밀도 100%, 레이어 높이 0.2mm, 레이어 방향 가로(transverse), 채움 패턴 지그재그(zigzag)로 하고 소재는 PLA+와 ABS를 비교하였다. 이후 실험 조건에서는 PLA+ 소재만 사용하였다.

Table 1 3D printing condition

Material	PLA+		ABS
	Density[%]	60	80
Layer height[mm]	0.1	0.2	0.3
Layer direction	Transverse		Lengthwise
Fill pattern	Zigzag	Honey comb	Concen-tric

두 번째로 채움 밀도(density)에 따른 출력 조건은 60, 80, 100% 세 가지 변수로 시편을 출력하였다. Fig. 4는 채움 밀도에 따른 시편 형상을 보여준다.



(a) 60%

(b) 80%



(c) 100%

Fig. 4 Density of specimen printed by 3D Printer

세 번째로 레이어 높이(layer height)는 0.1, 0.2, 0.3mm 세 가지 변수로 시편을 출력하였다. 출력된 레이어 높이를 확인하기 위해 MIRACLE- V2515M 비전 장비를 사용하여 적층된 레이어의 층간 거리

를 관찰하였다. 출력물의 층간 거리는 Fig. 5와 같이 적층 레이어 높이에 맞게 제작되었음을 확인하였다.

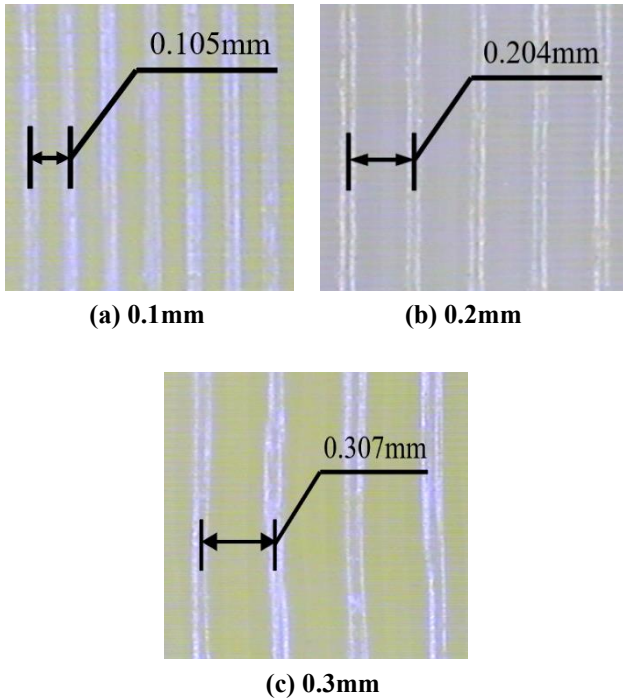


Fig. 5 Layer height of specimen printed by 3D Printer

네 번째로 레이어 방향(layer direction)에 따른 출력 조건의 변수는 Fig. 6과 같이 가로(transverse), 세로(lengthwise) 두 가지 변수로 시편을 출력하였다.

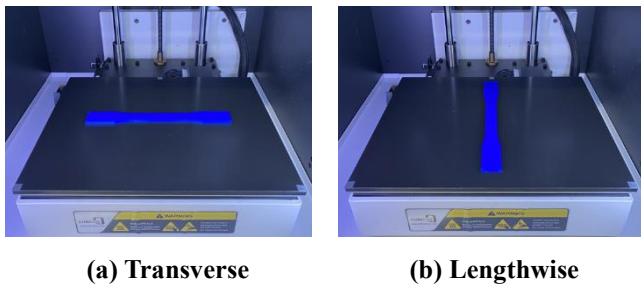


Fig. 6 Layer direction of specimen

다섯 번째로 채움 패턴(fill pattern)에 따른 출력 조건의 변수는 지그재그(zigzag), 벌집(honeycomb), 동심원(concentric) 세 가지 변수로 시편을 출력하였다. Fig. 7은 각각의 채움 패턴 변수에 대한 시편 형상을 보여준다.

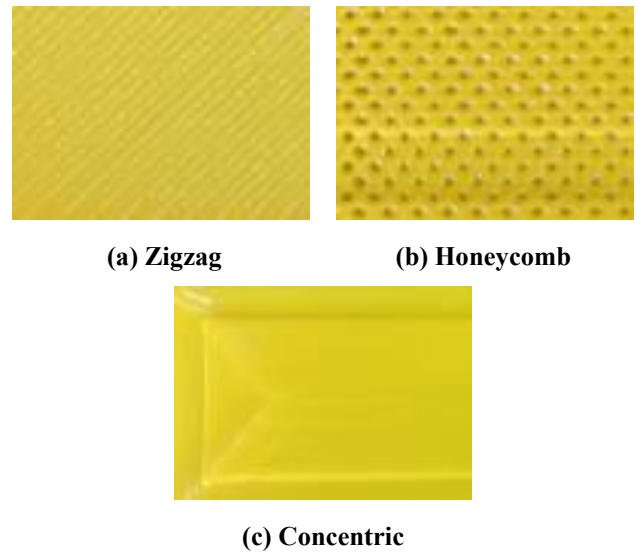


Fig. 7 Fill pattern of specimen printed by 3D Printer

## 5. 결과

3D 프린팅 출력물은 각 변수에 따라 인장강도가 다르게 나타난다. Fig. 8은 PLA+와 ABS 소재를 변수로 두고, 밀도는 100%, 레이어 높이는 0.2mm, 레이어 방향은 가로, 채움 패턴은 지그재그(zigzag)로 고정 후 제작된 인장 시편의 응력-변형률 선도(stress-strain curve)를 보여준다. 인장강도는 PLA+ 소재 34.16MPa, ABS 소재 26.40MPa로 PLA+ 소재가 ABS 소재에 비해 인장강도가 1.29배 높게 나타났다. 연신율 또한 PLA+ 소재가 1.13%, ABS 소재가 1.04%로 PLA+ 소재가 1.10배 높은 결과를 보였다. 따라서 PLA+ 소재 강도가 ABS 소재보다 상대적으로 높으면서 연성 재질인 것을 확인하였다.

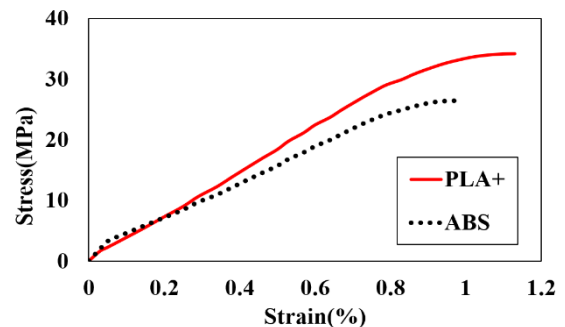


Fig. 8 Tensile behaviors of the specimens by material(PLA+ and ABS)

Fig. 9는 채움 밀도를 60, 80, 100%로 변수를 두고, 소재는 PLA+, 레이어 높이는 0.2mm, 레이어 방향은 가로, 채움 패턴은 지그재그(zigzag)로 고정 후 제작된 인장 시편의 응력-변형률 선도를 보여준다. 인장강도는 채움 밀도 60%일 때 24.44MPa, 80%일 때 28.02MPa, 100%일 때 34.16MPa로 나타났다. 채움 밀도 100%와 80%의 인장강도를 비교했을 때 100%의 인장강도가 1.38배 높게 나타났고, 100%와 60%의 인장강도를 비교했을 때 100%의 인장강도가 1.62배 높게 나타났다. 채움 밀도가 높아질수록 인장강도가 증가하는 결과가 나왔으며, 이는 채움 밀도가 높아질수록 Fig. 4와 같이 인장 시편의 내부의 빈 공간이 줄어들어 기공이 줄어드는 효과와 동일하기 때문에 강도가 증가하였다.

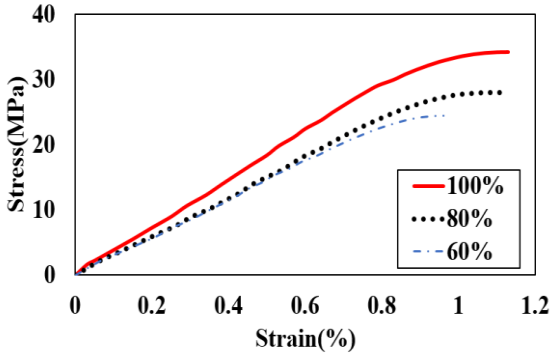


Fig. 9 Tensile behaviors of the specimens by layer density(60, 80 and 100%)

Fig. 10은 레이어 높이를 0.1, 0.2, 0.3mm로 변수를 두고, 소재는 PLA+, 밀도는 100%, 레이어 방향은 가로, 채움 패턴은 지그재그(zigzag)로 고정 후 제작된 인장 시편의 응력-변형률 선도를 보여준다. 인장강도는 레이어 높이가 0.3mm일 때 29.07MPa, 0.2mm일 때 34.16MPa, 0.1mm일 때 38.13MPa로 레이어 높이가 작아질수록 인장강도는 증가하는 결과가 나타났다. 레이어 높이가 0.1mm와 0.2mm를 비교하였을 때 0.1mm의 인장강도가 1.12배 더 높게 나타났고, 0.1mm와 0.3mm를 비교하였을 때 0.1mm의 인장강도가 1.31배 더 높게 나타났다. 레이어 높이가 작아질수록 레이어 층간의 간격이 좁아지고 더 많은 레이어 층을 쌓기 때문에 인장강도가 증가하는 것으로 판단된다. 이 결과는 김범준 등[5]의 연구 결과와도 일치하는 경향을 보였다.

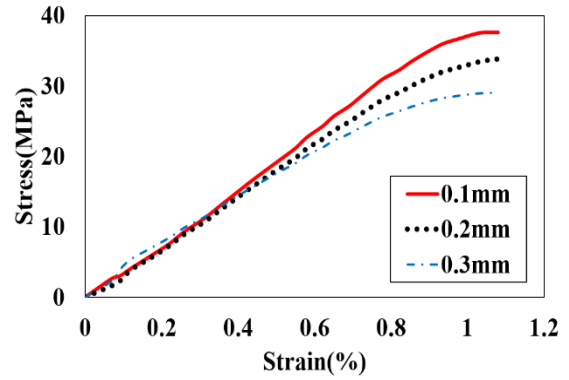


Fig. 10 Tensile behaviors of the specimens by layer height(0.1, 0.2 and 0.3mm)

본 연구자는 채움 밀도와 레이어 높이 변수에 대해 식 (1)을 제안하여 인장강도를 구하였다.

$$\sigma = 0.24x - 36.20y + 16.10 \quad (1)$$

$\sigma$ 는 인장강도,  $x$ 는 밀도(60, 80, 100%),  $y$ 는 레이어 높이(0.1, 0.2, 0.3mm)이다. 식 (1)로 계산한 인장강도와 실험 결과를 Table 2에서 보여준다. 실험과 수식의 인장강도 오차는  $\pm 8\%$  이내로 밀도와 레이어 높이 변수에 대한 인장강도를 수식으로 예측할 수 있다는 것을 확인하였다.

Table 2 Comparison of experimental and mathematical model for tensile strength

Density [%]	Layer height [mm]	Experimental [MPa]	Mathematical [MPa]	Error [%]
60	0.1	26.54	24.61	-2.0
	0.2	24.44	23.44	4.1
	0.3	21.22	19.82	6.6
80	0.1	30.25	31.92	-5.5
	0.2	28.02	28.30	-1.0
	0.3	22.91	24.68	-7.7
100	0.1	38.13	36.78	3.5
	0.2	34.16	33.16	2.9
	0.3	29.07	29.54	-1.6

Fig. 11은 레이어 방향을 가로, 세로로 변수로 두고, 소재는 PLA+, 밀도는 100%, 레이어 높이는 0.2mm, 채움 패턴은 지그재그(zigzag)로 고정 후 제작된 인장 시편의 응력-변형률 선도를 보여준다. 인장강도는 가로(transverse) 방향 34.16MPa, 세로(lengthwise) 방향은 32.63MPa로 가로 방향과 세로 방향의 인장강도를 비교했을 때 가로 방향이 1.05배 높게 나타났다. 연신을 또한 가로 방향 1.13%, 세로 방향 1.08%로 가로 방향이 1.05배 높게 나타났다. 출력 방향을 다르게 할 경우 적층 과정 방향이 달라져 인장강도의 차이를 보일 것이라 예상을 했지만, 실제로 적층 과정을 확인한 결과 가로 방향과 세로 방향의 적층 과정이 동일해 인장강도의 차이를 보이지 않았다.

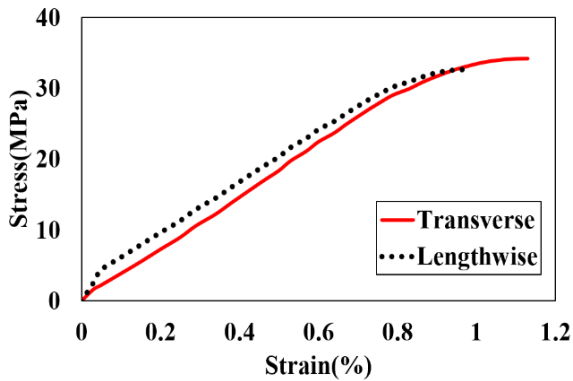


Fig. 11 Tensile behaviors of the specimens by layer direction(transverse and lengthwise)

Fig. 12는 채움 패턴을 zigzag, honeycomb, concentric으로 변수를 두고, 소재는 PLA+, 밀도는 100%, 레이어 높이는 0.2mm, 레이어 방향은 가로로 고정 후 제작된 인장 시편의 응력-변형률 선도를 보여준다. 인장강도는 벌집(honeycomb) 패턴이 31.63MPa, 지그재그(zigzag) 패턴이 34.16MPa, 동심원(concentric) 패턴이 39.46MPa로 동심원 패턴과 벌집 패턴의 인장강도를 비교하였을 때 동심원 패턴이 1.25배 높게 나타났고, 동심원과 지그재그 패턴의 인장강도를 비교했을 때 동심원 패턴이 1.16배 높게 나타났다. 벌집 패턴의 인장강도가 가장 낮은 이유는 다른 패턴들에 비해 인장 시편 내부에 빈 공간이 많기 때문이다. [Fig. 7]

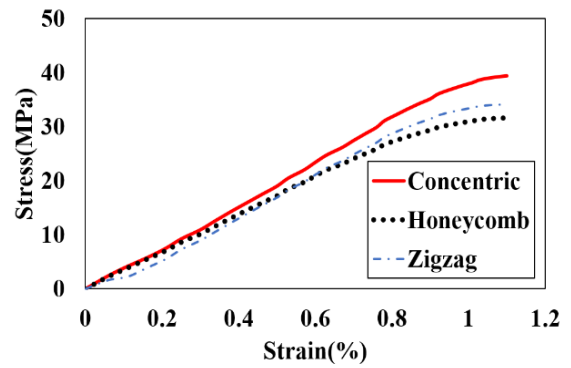


Fig. 12 Tensile behaviors of the specimens by fill pattern(zigzag, honeycomb and concentric)

Table 3은 각각의 실험에서 인장강도가 가장 높게 나온 변수들을 보여준다. Fig. 13은 Table2의 변수로 시편을 출력하여 제작된 인장 시편의 응력-변형률 선도를 보여준다. 실험 결과 인장강도는 43.65MPa로 나타났다. 이 결과는 인장강도가 가장 낮은 변수인 채움 밀도 60%일 때의 인장강도 24.44MPa보다 1.79배 높은 결과를 보여준다. 따라서 출력 조건에 따라 인장강도의 편차가 크다는 것을 확인하였다.

Table 3 Optimum condition

Material	PLA+
Density[%]	100
Layer height[mm]	0.1
Layer direction	Transverse
Fill pattern	Concentric

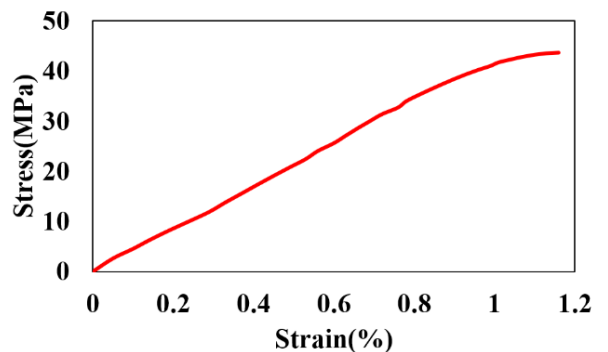


Fig. 13 Tensile behavior of the specimen by optimum condition

## 6. 결론

본 연구에서는 강도가 낮은 플라스틱 소재의 강도를 가장 높일 수 있는 3D 프린팅 출력 조건을 찾기 위해 1) 소재(PLA+, ABS) 2) 채움 밀도(60, 80, 100%) 3) 레이어 높이(0.1, 0.2, 0.3mm) 4) 레이어 방향(가로, 세로 방향) 5) 채움 패턴(zigzag, honeycomb, concentric)에 대한 인장강도의 변화를 비교 분석하였고 결론은 다음과 같다.

(1) 소재의 경우 PLA+가 ABS보다 인장강도와 연신율이 높게 나타났다. 채움 밀도는 밀도 증가에 따라 인장강도도 비례적으로 증가하였다. 레이어 높이는 적층 높이가 낮아질수록 인장강도가 증가하였고, 레이어 방향은 가로 방향이 세로 방향보다 인장강도와 연신율이 높게 나왔다. 채움 패턴은 동심원-지그재그-별집 패턴 순으로 인장강도가 높은 경향을 보였다.

(2) 각 조건에서 인장강도가 가장 높은 변수들만으로 이루어진 최적의 조건으로 출력하였을 때 인장강도가 43.65MPa로 가장 높게 나왔다. 이 결과는 채움 밀도 60%일 때의 인장강도 24.44MPa보다 1.79배 높은 결과를 보였다. 따라서 출력 조건에 따라 인장강도 편차가 크다는 것을 확인하였다.

(3) 본 연구에서 수행된 5가지 출력 변수 이외에 노즐 온도, 베드 온도, 노즐 이동 속도 등의 변수들을 추가적으로 고려한다면 재료의 인장강도를 더 높일 수 있을 것으로 판단된다.

## REFERENCES

[1] I. Y. Woo and M. Y. Lyu, 2020, Variations in the Impact Strength of Material Extrusion-type 3D Printed Specimens Depending on Tool Path and Building Direction, Polym. Kor, Vol. 44, No. 4, pp. 471~478.

<https://doi.org/10.7317/pk.2020.44.4.471>

[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. Korea, Vol. 44, No. 6, pp. 769~775.  
<https://doi.org/10.7317/pk.2020.44.6.769>

[3] B. J. Kim, 2020, Effect of Fused Deposition Conditions on the Fracture Behavior of 3D Printed Tensile Specimens, J. Kor Soc. Precis, Vol. 37, No. 6, pp. 421~428. <http://doi.org/10.7736/JKSPE.020.048>

[4] B. J. Kim, T. H. Lee and I. S. Sohn, 2018, A study of mechanical properties with FDM 3D printing layer conditions, J. Kor Soc of Die & Mold Eng, Vol. 12, No. 3 <http://doi.org/10.22847/ksdme.12.3.201812.003>

[5] S. K. So, 2020, Improvement of surface strength in printed part manufactured by FDM 3D printer.

[6] S. J. Park, H. J. Park, H. K. 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://dx.doi.org/10.7317/pk.2016.40.6.846>

[7] H. S. Shim and D. H. Na, 2020, Evaluation of Tensile Strength for Thickness, Density and Material of 3D Printer Output, Trans. Kor Soc. Mech. Eng, pp. 180~180

[8] <http://www.randb.co.kr/%eb%b3%b4%ec%9c%a0%ec%9e%90%eb%a3%8c/>, ASTM D638 Tensile Properties of Plastics

[9] [http://www.3dcubicon.com/shop/item.php?it\\_id=1595415143](http://www.3dcubicon.com/shop/item.php?it_id=1595415143), PLA+

[10] <http://www.3dcubicon.com/shop/item.php?itid=195410210>, ABS

[11] [http://www.3dcubicon.com/shop/item.php?it\\_id=1592533596](http://www.3dcubicon.com/shop/item.php?it_id=1592533596), 3D printer - 320C