

3D 프린팅을 이용한 PLA+ 소재의 채움 패턴 및 밀도 변화에 따른 인장강도 연구

나두현^{1,*}, 김현준²

A Study on Tensile Strength Dependent on Variation of Infill Pattern and Density of PLA+ Material Using 3D Printing

D. H. Na, H. J. Kim

(Received August 5, 2022 / Revised August 31, 2022 / Accepted September 1, 2022)

Abstract

Presently, 3D printers manufactured by material extrusion are economical and easy to use, so they are being used in various fields. However, this study conducted a tensile test on the infill pattern and density of the PLA+ material, due to the limitations of long printing time as well as low mechanical strength. The infill area for the infill density change was measured, using a vision-measuring machine for four infill patterns (concentric, zigzag, honeycomb, and cross) in which the nozzle path was the same for each layer. The tensile strength/weight[MPa/g] and tensile strength/printing time[MPa/min] of the tensile specimens were analyzed. In this study, efficient infill density and patterns are suggested, for cost reduction and productivity improvement. Consequently, it was confirmed that the infill area and infill percentage of the four patterns, were not constant according to the infill pattern. And the tensile strength of the infill density 40% of the honeycomb pattern and infill density 20% of the cross pattern, tended to highly consider the weight and printing time. Honeycomb and cross patterns could reduce the weight of the tensile specimen by 19.11%, 28.07%, as well as the printing time by 29.56%, 52.25%. Tensile strength was high in the order of concentric, zigzag, honeycomb, and cross patterns, considering the weight and printing time.

Keywords: 3D printer, Tensile test, Tensile strength, Infill pattern, Infill density, Infill area, PLA+

1. 서론

3D 프린팅 기술은 소재를 절삭하며 가공하는 기존의 절삭가공과 달리 소재를 한 층씩 쌓아가며 3차원 형상을 출력하기에 적층 가공(AM, Additive Manufacturing)이라고 불린다[1]. 재료 압출 방식은 타 방식에 비해 조작이 비교적 간단하고 경제적이어서 보편적으로 사용되고 있다. 하지만 출력시간이 길고 수지 재료를 이용하기 때문에 강도의 한계가

있다. 이러한 3D 프린팅 기술의 기계적 물성을 보완하기 위한 연구가 지속적으로 수행되고 있다.

김정섭 등[2]은 PLA(Poly Lactic Acid) 소재를 사용하여 적층 두께(0.06, 0.10, 0.15mm), 적층 방향(0, 23, 45°) 채움 밀도(10, 55, 100%)의 공정 변수를 두고 인장강도와 인장변형률을 분석하였다. 인장강도는 적층 두께 0.06mm, 적층 방향 0°, 채움 밀도 100%일 때 가장 높았고 인장 변형률은 0.15mm, 0°, 55%일 때 가장 높았다. 이를 토대로 제작된 시편을 사출성형 시편과 비교하였을 때 기계적 특성이 89.4% 유사함을 확인하였다.

강용구 등[3]은 적층 방향(0, 45, 90°), 채움 밀도(10, 30, 50, 70, 90, 100%) 및 적층 두께(0.1, 0.15, 0.2, 0.25,

1. 대림대학교 기계과, 조교수

2. 대림대학교 기계과, 학부생

Corresponding Author: Daelim University College

E-mail: dhna@daelim.ac.kr

ORCID: 0000-0003-1995-021X

0.3mm)가 인장강도와 품질에 미치는 영향을 조사하는 연구를 수행하였다. 적층 방향 0°일 때의 인장강도가 90°일 때보다 약 2배 높음을 확인하였다. 채움 밀도 변화에 따라 인장강도가 선형적으로 증가하는 것은 채움 밀도가 증가할수록 단면적이 증가하여 저항력이 높아졌다고 판단하였다. ABS(Acrylonitrile-Butadiene-Styrene) 소재는 적층 두께가 증가할수록 레이어 간의 접촉면적이 작아져서 인장강도가 감소하고 PLA 소재는 고강도 취성재 특성을 나타내어 접촉면적보다 결합면적이 감소해 인장강도가 증가한 것으로 판단하였다.

설경수 등[4]은 채움 패턴(line, lattice, concentric, crystal I, crystal II)과 채움 밀도(25, 50, 75, 100%)에 따른 인장강도를 비교하였다. 채움 밀도가 75%에서 100%로 변화함에 따라 인장강도가 28.72MPa에서 50.07MPa로 급격히 증가하였다. 채움 패턴에 따른 인장강도는 concentric 패턴이 44.20MPa로 가장 높고, crystal II 패턴이 19.79MPa로 가장 낮았다. 적층 방향과 응력 방향이 동일한 concentric 패턴은 채움 면적의 분리가 낮아 인장강도가 높게 나타나고 crystal II 패턴은 적층 방향이 응력 방향에 수직이기 때문에 채움 면적의 분리가 쉽기 때문이라고 언급하였다.

Adi Pandzic 등[5]은 PLA 소재 시편에 13가지 채움 패턴(grid, lines, triangles, tri-hexagon, cubic, cubic subdivision, octet, quarter cubic, concentric, zigzag, cross, cross 3d, gyroid)과 채움 밀도(10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90%)에 따른 인장시험을 진행하였다. 채움 밀도가 증가할수록 중량, 출력시간, 항복강도, 인장강도도 증가하는 경향을 보였다. 하지만 저자는 결과만 나열하고 분석하진 않았다.

본 저자[6]는 10가지 채움 패턴과 노즐 온도(200, 205, 210, 215, 220, 225°C), 출력 속도(30, 60, 90, 120, 150mm/sec), 베드 온도(60, 65, 70, 75, 80°C)에 따른 인장강도의 영향을 분석하였다. 인장강도는 채움 패턴에 따라 25.34% 차이를 보였다. 그리고 인장강도는 패턴 형상에 따라 채움 면적이 아닌 적층 방향과 단면에 포함되는 레이어 길이에 영향을 미친다고 언급하였다.

3D 프린팅 기술을 산업 전반에 확대하기 위해서는 타 재료에 비해 떨어지는 기계적 물성의 보완은 필수적이다. 채움 밀도를 상승시키면 출력물의 인장강도는 증가하지만 재료 소모량과 출력시간에 영향을 준다. 이는 원가 증가와 생산 효율 감소로 이어

지기 때문에 재료 압출 방식 출력물의 채움 패턴과 채움 밀도에 대한 연구가 매우 중요하다.

기존 연구자들은 여러 공정 변수(채움 패턴, 채움 밀도, 적층 두께, 적층 방향, 노즐 온도, 베드 온도, 소재, 출력속도 등)에 따라 기계적 물성 변화에 대한 연구를 수행하였지만 채움 밀도와 채움 면적 비교 및 재료 소모와 출력시간을 고려한 인장강도 연구는 미진한 상태이다. 따라서 본 연구에서는 재료 압출 방식의 3D 프린팅 시편에 대해 노즐 경로가 레이어 층마다 동일한 4가지 채움 패턴(concentric, zigzag, honeycomb, cross)을 분석하였다. 비전 장비로 채움 면적을 확인하고 채움 밀도에 따른 실제 출력된 채움 면적의 퍼센트를 비교하였다. 그리고 채움 패턴을 5가지 채움 밀도(20, 40, 60, 80, 100%)로 인장강도/중량[MPa/g]과 인장강도/출력시간[MPa/min]으로 분석하여 원가 절감과 생산성 향상에 이점이 있는 채움 밀도와 효율적인 채움 패턴을 제시하였다.

2. 실험

2.1 재료 및 시편 제작

Fig. 1은 ASTM D638 Type I 규격으로 설계된 인장 시편을 보여준다. 인장시편 재료는 옥수수 전분이 주원료인 PLA+(Poly Lactic Acid-Plus) 소재가 사용되었다. PLA+는 수축 발생이 거의 없고 PLA 소재에 비해 흘러내림 현상이 적은 장점을 가지고 있다[7].

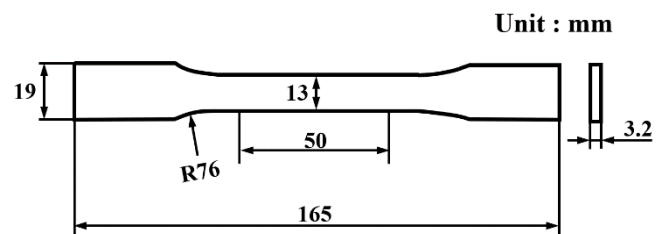


Fig. 1 Tensile test specimen (ASTM D638 Type I)

Table 1 3D printing condition

Material	PLA+				
Print temperature[°C]	220				
Bed temperature[°C]	65				
Printing speed[mm/s]	180				
Movement speed[mm/s]	60				
Layer height[mm]	0.2				
Infill density[%]	20	40	60	80	100

인장시편을 모델링한 후 Table 1의 출력 조건과 Fig. 2의 채움 패턴 형상으로 Cubicreator4 프로그램[8]을 사용하여 STL 파일로 변환하였다. 변환된 파일로 인장시편을 3D 프린터로 출력하였다.

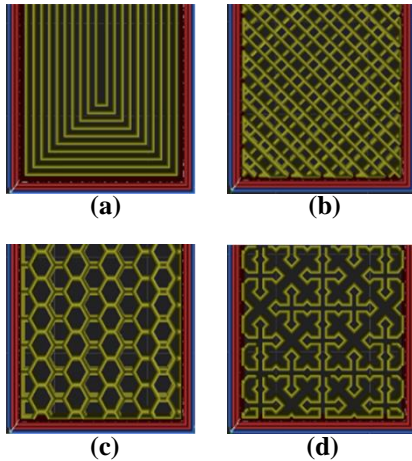


Fig. 2 Infill pattern shape(infill density 50%) (a) Concentric (b) Zigzag (c) Honeycomb (d) Cross[6]

2.2 실험 장비

인장시편 출력은 Cubicon사의 Style NEO-A31 3D 프린터를 사용하였다(Fig. 3 (a)). Style NEO-A31은 310 mm³ 크기로 산업용 로드 셀(load cell)을 사용하여 10 μ m 이내의 오차 정밀도를 구현하며 열효율을 개선한 베드로 고품질 출력물을 얻을 수 있다[9]. 인장 시험기는 Testone사의 TO-102 만능재료시험기이며, 크로스헤드(cross head) 속도를 5mm/min로 설정하여 신율계(extensometer) 장착 후 인장시험을 진행하였다[6]. 그리고 4가지 채움 패턴의 채움 면적을 분석하기 위해 3D 프린터로 출력 후 MIRACLE-V2512M 비전 장비로 시편 내부를 관찰하였다(Fig. 3 (b)).

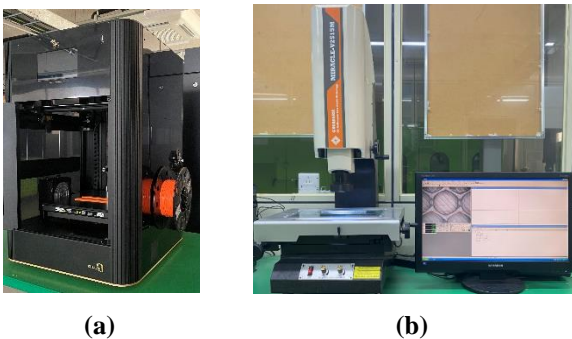


Fig. 3 3D printer and vision measuring machine (a) Style NEO-A31 (b) MIRACLE-V2512M

3. 분석 내용

3.1 채움 밀도에 따른 채움 면적 변화

3D 프린터는 레이어 층마다 지정된 경로로 용융된 필라멘트를 압출하여 조형한다. 따라서 노즐 경로가 레이어 층마다 다를 경우 출력물을 수직 방향으로 보았을 때 레이어 층이 겹쳐 보여 형상 식별이 어렵다. 그리고 레이어 층마다 적층된 면적의 크기가 다를 수 있다. 하지만 본 연구에서 분석한 4가지 채움 패턴(concentric, zigzag, honeycomb, cross)은 노즐 경로가 홀수, 짝수 레이어 층끼리 동일하여 채움 패턴 형상을 뚜렷하게 확인할 수 있다. 본 연구자는 출력물을 고정하기 위해 바닥면의 레이어 한 개 층을 출력하여 비전 장비로 관찰한 사진은 Image J 프로그램[10]을 이용하여 채움 밀도에 따른 채움 면적(infill area)을 확인하였다. 그리고 채움 밀도(infill density)와 실제 출력된 채움 퍼센트(infill percentage)가 동일한지 비교하였다. 여기서 채움 면적은 인장시편 내부에 적층된 채움 패턴 형상 면적을 의미한다. 채움 퍼센트는 채움 면적과 채움 밀도의 차이를 확인하기 위해 나타낸 것으로 채움 면적을 비전 장비로 관찰하여 측정하고 전체 면적(75mm²)으로 나누어 백분율로 나타낸 값을 의미한다.

3.2 채움 패턴, 밀도에 따른 인장강도와 중량, 출력시간의 관계

3D 프린팅 출력물의 채움 밀도가 높아질수록 인장강도는 증가하지만 재료 원가가 증가하고 생산성은 떨어지게 된다. 따라서 본 연구에서는 4가지 채움 패턴과 5가지 채움 밀도(20, 40, 60, 80, 100%)에 대해 인장시험을 두 번씩 진행하여 평균 실험 결과를 인장강도/중량[MPa/g]과 인장강도/출력시간[MPa/min]으로 분석하였다. 그리고 중량과 출력시간을 줄이고 인장강도를 높일 수 있는 채움 밀도를 제시하였다.

3.3 중량과 출력시간을 고려한 채움 패턴의 인장강도 비교

채움 패턴 형상과 채움 밀도 변화에 따라 적은 소재를 사용하고 출력시간이 짧은 경우 원가 절감과 생산성 향상의 이점을 얻을 수 있다. 따라서 본 연구자는 4가지 채움 패턴에 대해 인장강도, 중량과 출력시간을 고려하여 어떠한 패턴이 효율적인지 제시하였다.

4. 결과 및 분석

4.1 채움 밀도에 따른 채움 면적 분석

본 연구자는 비전 장비를 이용하여 4가지 채움 패턴(concentric, zigzag, honeycomb, cross)의 채움 밀도(infill density)에 따른 형상(가로10mm*세로7.5mm 크기) 및 채움 면적(infill area)과 채움 퍼센트(infill percentage, $\text{infill area}/75\text{mm}^2 \times 100 [\%]$)를 분석하였다.

Fig. 4는 concentric 패턴의 채움 패턴 형상과 직선 하나의 두께를 보여준다. 그리고 Table 2는 concentric 패턴의 채움 밀도 변화에 따른 채움 면적과 채움 퍼센트를 보여준다. Concentric 패턴은 4가지 채움 패턴 중 채움 밀도와 채움 퍼센트가 가장 일치하는 경향을 보였다. 이는 내부 채움 형상이 직선 형태이기 때문에 상대적으로 빈 공간이 일정하여 일치하는 것으로 판단된다. 그리고 채움 밀도에 따라 최대 0.22mm(0.46 ~ 0.68mm)의 직선 두께 차이가 있으며 채움 밀도가 높아질수록 직선 두께는 감소하는 경향을 보였다.

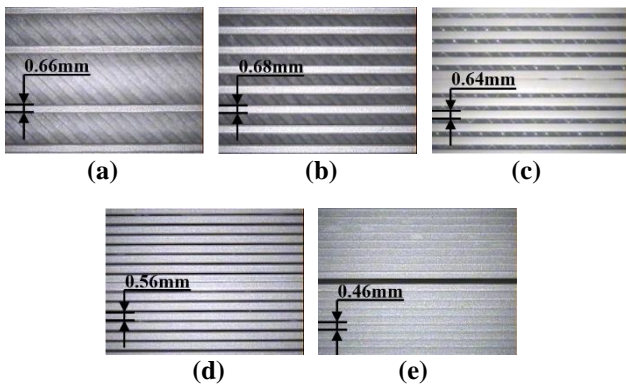


Fig. 4 Concentric infill shape according to infill density (a) 20% (b) 40% (c) 60% (d) 80% (e) 100%

Table 2 Concentric infill percentage and infill area according to infill density

Infill density [%]	Infill percentage [%]	Infill area [mm ²]
20	20.28	15.21
40	40.40	30.30
60	65.52	49.14
80	86.18	64.64
100	96.09	72.07

Fig. 5는 zigzag 패턴의 채움 패턴 형상을 나타내고 Table 3은 zigzag 패턴의 채움 밀도 변화에 따른 채움 면적과 채움 퍼센트를 보여준다. Zigzag 패턴은 4가지 패턴 중 채움 면적이 가장 넓은 경향을 보였다. 이러한 이유는 사선 방향으로 적층되기 때문에 채움 밀도가 높아질수록 마름모 형태의 빈 공간이 가장 많이 줄일 수 있어 채움 면적이 넓은 것으로 판단된다. 하지만 채움 퍼센트는 cross 패턴 다음으로 일치하지 않는 경향을 보였다.

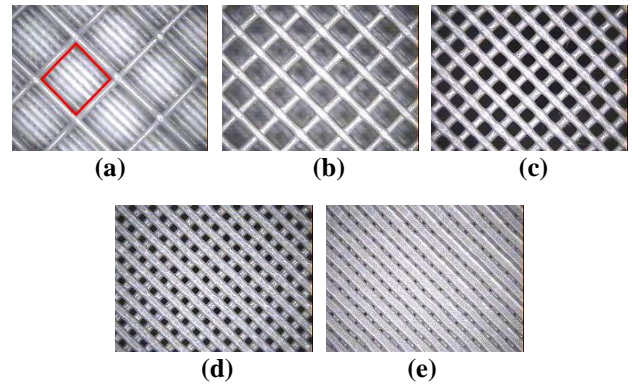


Fig. 5 Zigzag infill shape according to infill density (a) 20% (b) 40% (c) 60% (d) 80% (e) 100%

Table 3 Zigzag infill percentage and infill area according to infill density

Infill density [%]	Infill percentage [%]	Infill area [mm ²]
20	30.69	23.02
40	50.99	38.24
60	75.00	56.25
80	92.25	69.19
100	98.32	73.74

Fig. 6은 honeycomb 패턴의 채움 패턴 형상을 나타내고 Table 4는 honeycomb 패턴의 채움 밀도 변화에 따른 채움 면적과 채움 퍼센트를 보여준다. Honeycomb 패턴은 적층 시 육각형 형태를 유지하면서 적층되기 때문에 채움 밀도가 높아져도 기공 형태의 빈 공간이 발생한다. 따라서 채움 밀도가 높아도 육각형 형태의 기공이 존재하여 concentric, zigzag 패턴에 비해 채움 면적이 비교적 작은 것으로 판단된다. 하지만 채움 밀도와 채움 퍼센트가 일치하는 정도를 비교하였을 때 honeycomb 패턴이 zigzag 패턴보다 상대적으로 유사한 경향을 보였다.

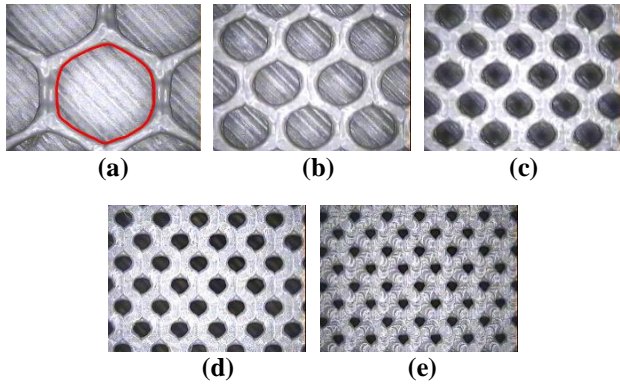


Fig. 6 Honeycomb infill shape according to infill density
(a) 20% (b) 40% (c) 60% (d) 80% (e) 100%

Table 4 Honeycomb infill percentage and infill area according to infill density

Infill density [%]	Infill percentage [%]	Infill area [mm ²]
20	28.89	21.67
40	53.43	40.07
60	68.68	51.51
80	84.45	63.34
100	93.04	69.78

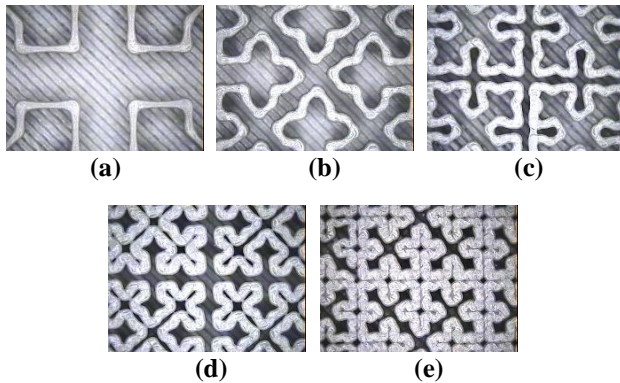


Fig. 7 Cross infill shape according to infill density
(a) 20% (b) 40% (c) 60% (d) 80% (e) 100%

Table 5 Cross infill percentage and infill area according to infill density

Infill density [%]	Infill percentage [%]	Infill area [mm ²]
20	16.29	12.22
40	29.44	22.08
60	51.53	38.65
80	70.37	52.78
100	81.55	61.16

Fig. 7은 cross 패턴의 채움 패턴 형상을 나타내고 Table 5는 cross 패턴의 채움 밀도 변화에 따른 채움 면적과 채움 퍼센트를 보여준다. Cross 패턴은 채움 밀도와 채움 퍼센트가 가장 일치하지 않았다. 그 이유는 채움 패턴이 십자 형태이기 때문에 다른 패턴보다 상대적으로 빈 공간이 많다. 채움 밀도가 높아져도 빈 공간이 많기 때문에 채움 면적이 작아 채움 밀도와 채움 퍼센트가 일치하지 않는 것으로 판단된다.

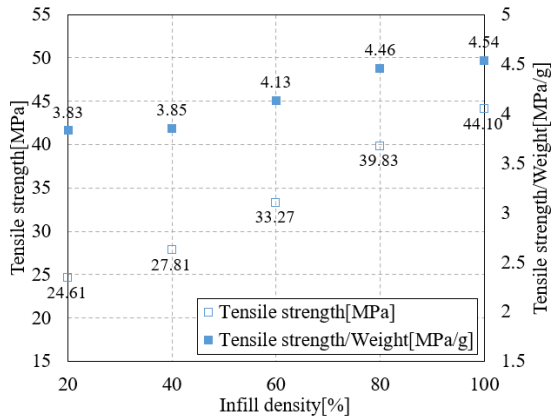
결과적으로 채움 패턴에 따라 채움 면적(infill area)이 달랐으며 채움 밀도(infill density)와 채움 퍼센트(infill percentage)는 일치하지 않았다. 채움 면적의 평균 크기는 zigzag > honeycomb > concentric > cross 패턴 순으로 나타났으며 채움 밀도와 채움 퍼센트가 일치하는 정도는 concentric > honeycomb > zigzag > cross 패턴 순으로 나타났다.

4.2 채움 패턴, 밀도에 따른 인장강도와 중량, 출력시간의 관계 분석

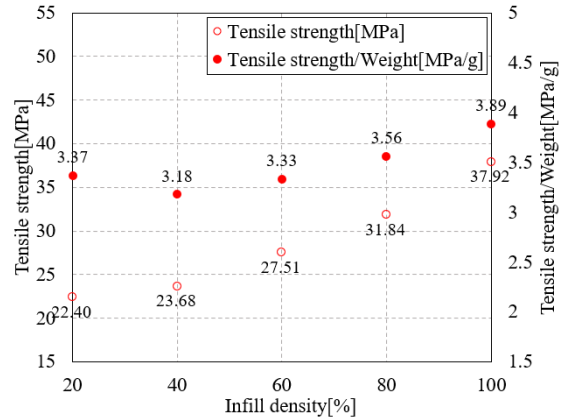
본 연구자는 시편 중량(weight)과 출력시간(printing time)을 줄이고 높은 인장강도를 보이는 채움 밀도를 확인하기 위해서 인장강도/중량[MPa/g]과 인장강도/출력시간[MPa/min]을 분석하였다. Fig. 8은 concentric 패턴의 인장강도/중량과 인장강도/출력시간 결과를 보여준다. Concentric 패턴의 채움 밀도 별 인장시편 중량은 각각 6.43, 7.23, 8.06, 8.94, 9.71g이다. 채움 밀도가 높아질수록 인장강도/중량과 인장강도/출력시간이 선형적으로 증가하는 경향을 보였다. 따라서 concentric 패턴은 채움 밀도 100%가 가장 효율적인 밀도임을 확인하였다.

Fig. 9는 zigzag 패턴의 인장강도/중량과 인장강도/출력시간 결과를 보여준다. Zigzag 패턴의 채움 밀도 별 인장시편 중량은 6.66, 7.46, 8.26, 8.96, 9.77g이다. Zigzag 패턴은 채움 밀도가 높아질수록 인장강도/중량과 인장강도/출력시간이 선형적으로 증가하는 경향이 나타난다. 채움 밀도 20%에서 인장강도/중량이 세 번째로 높게 나타나지만 인장강도/출력시간은 가장 낮았다. 원가 절감 차원에서 채움 밀도 60%와 비교하였을 때 중량을 19.37%(8.26→6.66g) 줄일 수 있지만 인장강도/출력시간 관점(0.60→0.54 MPa/min)에서는 비효율적인 것으로 확인되었다.

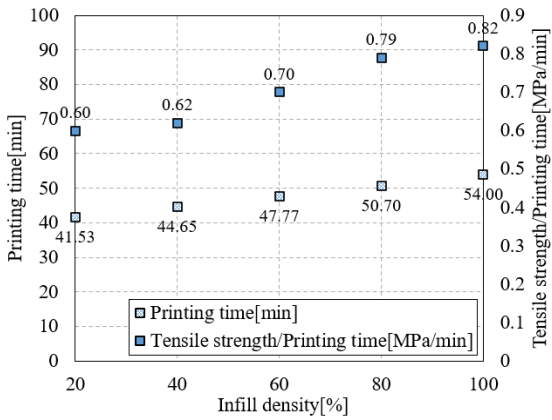
Fig. 10은 honeycomb 패턴의 인장강도/중량과 인장강도/출력시간 결과를 보여준다. Honeycomb 패턴의 채움 밀도 별 인장시편 중량은 6.70, 7.28, 8.07, 8.62,



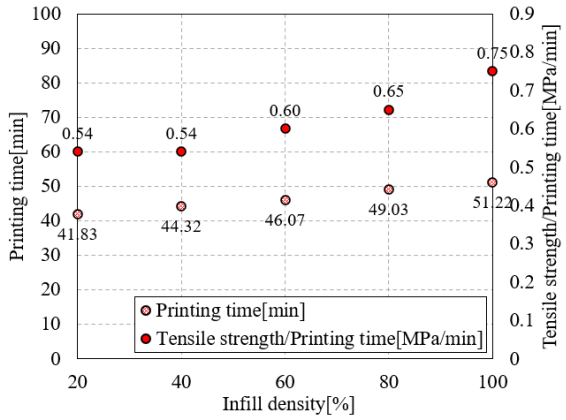
(a)



(a)



(b)



(b)

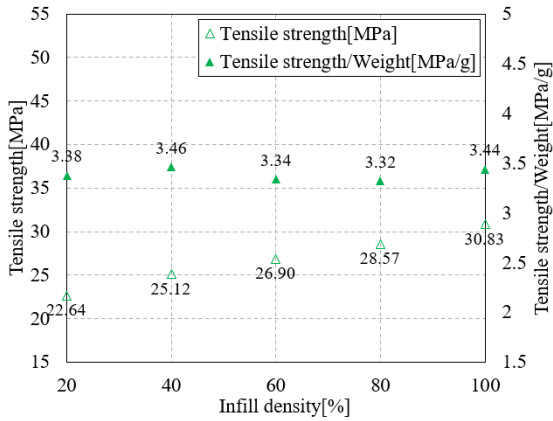
Fig. 8 The results of tensile test for concentric pattern (a) Tensile strength and tensile strength/weight (b) Printing time and tensile strength/printing time

Fig. 9 The results of tensile test for zigzag pattern (a) Tensile strength and tensile strength/weight (b) Printing time and tensile strength/printing time

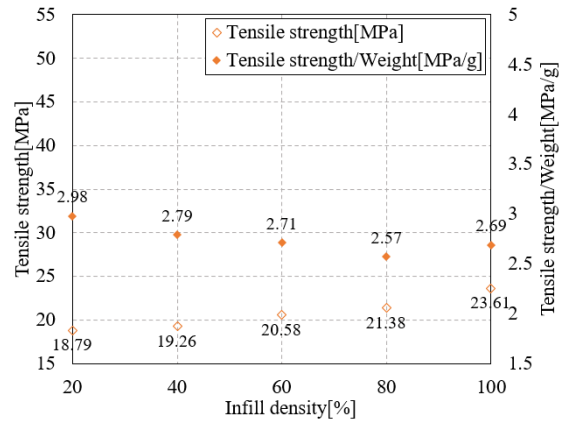
9.00g이다. Honeycomb 패턴의 인장강도/중량은 채움 밀도 40%에서 가장 높았고 인장강도/출력시간이 두 번째로 우수하였다. 채움 밀도가 높아질수록 인장강도/출력시간이 감소하는 경향을 보였다. 따라서 채움 밀도 40%를 사용하면 100%와 비교하여 중량을 19.11%(9.00→7.28g), 출력시간을 29.56%(145.65→102.60min) 줄일 수 있다. 이는 중량과 출력시간을 고려하였을 때 채움 밀도를 100%까지 높이지 않고 효율적으로 사용할 수 있음을 보여준다.

Table 6은 Fig. 5와 Fig. 6의 비전 사진을 이용하여 Image J 프로그램으로 인장시편 내부 한 개의 빈 공간 면적 크기를 분석한 결과를 보여준다. Fig. 5 (a)의 빨간색 마름모 형상이 마름모 면적(rhombus area)을 의미하고 Fig. 6(a)의 빨간색 육각형 형상이 육각형

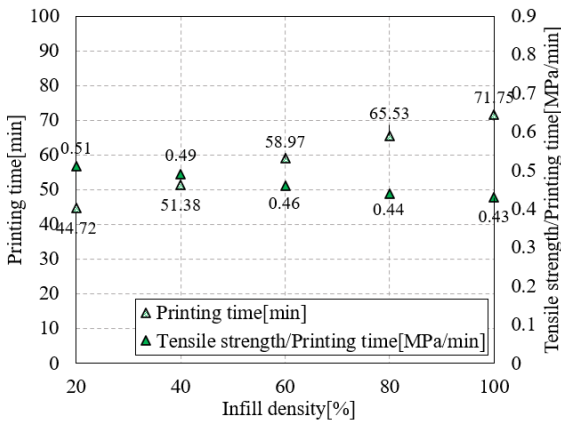
면적(hexagon area)을 의미한다. Zigzag 패턴의 인장강도는 채움 밀도 변화에 따라 22.40→23.68→27.51→31.84→37.92MPa로 증가하고 honeycomb 패턴은 22.64→25.12→26.90→28.57→30.83MPa로 증가한다. 두 패턴은 채움 밀도 60%까지는 인장강도 차이가 크지 않지만 채움 밀도 80%(31.84 vs 28.57MPa)와 100%(37.92 vs 30.83MPa)에서 그 차이가 커지게 된다. 그 이유는 채움 밀도가 높아질수록 zigzag 패턴의 마름모 면적이 honeycomb 패턴의 육각형 형상에 비해 급격하게 작아진다. Table 6의 육각형 면적/마름모 면적(hexagon area/rhombus area) 비율이 채움 밀도 60%까지는 2.79, 2.63, 3.63이다. 하지만 채움 밀도 80, 100%에서 8.89, 17.14로 급격하게 커지는 것을 확인할 수 있다. 따라서 채움 밀도가 증가함에 따라 빈 공간이



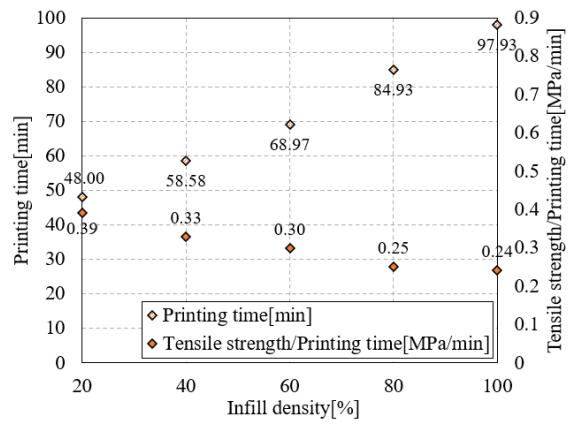
(a)



(a)



(b)



(b)

Fig. 10 The results of tensile test for honeycomb pattern
 (a) Tensile strength and tensile strength/weight
 (b) Printing time and tensile strength/printing time

Fig. 11 The results of tensile test for cross pattern (a)
 Tensile strength and tensile strength/weight (b)
 Printing time and tensile strength/printing time

Table 6 Comparison of one empty area of zigzag and honeycomb patterns

Infill density [%]	Rhombus area [mm ²]	Hexagon area [mm ²]	Hexagon area/Rhombus area
20	6.70	18.72	2.79
40	1.31	3.44	2.63
60	0.32	1.16	3.63
80	0.036	0.34	8.89
100	0.007	0.12	17.14

급격하게 작아지는 zigzag 패턴은 빈 공간의 응력집중(stress concentration)이 줄어들어 honeycomb 패턴에 비해 인장강도가 더 높게 나온 것으로 판단된다.

Fig. 11은 cross 패턴의 인장강도/중량과 인장강도/출력시간 결과를 보여준다. Cross 패턴의 채움 밀도 별 인장시편 중량은 6.32, 6.91, 7.62, 8.32, 8.80g이다. Cross 패턴은 채움 밀도 20%일 때 인장강도/중량과 인장강도/출력시간이 가장 우수하게 나타났다. 따라서 채움 밀도 20%는 100%와 비교하여 중량을 28.07%(8.80→6.33g), 출력시간을 52.25%(205.08→97.92min) 줄일 수 있다. 하지만 채움 밀도가 높아질수록 인장강도/중량, 인장강도/출력시간 모두 감소하는 경향을 보였고 그 값도 가장 작게 나타났다.

4.3 중량과 출력시간을 고려한 채움 패턴의 인장강도 비교

본 연구자는 적은 소재를 사용하고 출력시간이 짧은 효율적인 패턴을 제시하기 위해 4가지 채움 패턴을 중량과 출력시간을 고려하여 인장강도를 분석하였다. Table 7은 4가지 채움 패턴의 인장강도, 인장강도/중량, 인장강도/출력시간의 평균값을 보여준다. Concentric 패턴이 가장 우수하며 cross 패턴이 가장 비효율적인 결과를 보여준다. Cross 패턴은 4.1절에서 언급하였듯이 십자 형태이기에 다른 패턴보다 상대적으로 빈 공간이 많다. 또한 십자 형태를 만들기 위해 노즐이 여러 방향으로 움직여야 하므로 출력시간이 많이 소요된다. 따라서 중량, 출력시간, 인장강도 측면에서 가장 비효율적인 패턴임을 알 수 있다. Zigzag 패턴과 honeycomb 패턴의 평균 인장강도 차이는 크지 않지만 중량과 출력시간을 고려하였을 때 zigzag 패턴이 honeycomb 패턴보다 효율적임을 알 수 있다. 따라서 3D 프린터 출력물에 대해서는 단순히 인장강도만으로 채움 패턴의 효율성을 판단하는 것이 아니라 중량과 출력시간을 고려하여 효율성을 판단해야 한다. 중량과 출력시간을 고려하였을 때 효율적인 채움 패턴은 concentric > zigzag > honeycomb > cross 순으로 나타났다.

Table 7 Comparison of average tensile strength, tensile strength/weight, tensile strength/printing time

Infill pattern	Tensile strength [MPa]	Tensile strength/Weight [MPa/g]	Tensile strength/Printing time [MPa/min]
Concentric	33.92	4.16	0.71
Zigzag	28.67	3.47	0.62
Honeycomb	26.81	3.39	0.47
Cross	16.00	2.21	0.25

5. 결론

본 연구에서는 3D 프린터를 사용하여 PLA+ 소재의 인장시편을 4가지 채움 패턴과 5가지 채움 밀도에 대해 분석하였으며 결론은 다음과 같다.

(1) 채움 패턴에 따라 채움 면적은 동일하지 않았으며 채움 밀도와 채움 퍼센트는 일치하지 않았다. 채움 면적의 평균 크기는 zigzag > honeycomb >

concentric > cross 패턴 순이며 채움 밀도와 채움 퍼센트 일치 정도는 concentric > honeycomb > zigzag > cross 패턴 순으로 나타났다.

(2) 중량과 출력시간을 고려한 인장강도에서 concentric과 zigzag 패턴은 채움 밀도 증가에 따라 인장강도와 같이 선형적으로 증가하는 경향을 보였다. 하지만 honeycomb 패턴은 채움 밀도 40%, cross 패턴은 채움 밀도 20%에서 100%보다 인장강도/중량, 인장강도/출력시간 결과가 높게 나타났다. honeycomb과 cross 패턴은 효율적인 채움 밀도를 사용하였을 때 중량을 19.11, 28.07%, 출력시간을 29.56, 52.25% 줄여 원가 절감과 생산성 향상의 이점이 있음을 확인하였다.

(3) 4가지 패턴의 중량과 출력시간을 고려하여 인장강도에 효율적인 채움 패턴은 concentric > zigzag > honeycomb > cross 순으로 나타났다.

REFERENCES

- [1] J. W. Choi, and H. C. Kim, 2015, 3D Printing Technologies - A Review, J. Kor. Soc. Manuf. Process. Eng., Vol. 14, No. 3, pp. 1~8.
<http://dx.doi.org/10.14775/ksmpe.2015.14.3.001>
- [2] J. S. Kim, N. H. Jo, J. S. Nam, and S. W. Lee, 2017, Identification and Optimization of Dominant Process Parameters Affecting Mechanical Properties of FDM 3D Printed Parts, J. Kor. Soc. Mech. Eng. A, Vol. 41, No. 7, pp. 607~612.
<https://doi.org/10.3795/KSME-A.2017.41.7.607>
- [3] Y. G. Kang, T. W. Lee, and G. S. Shin, 2017, The Influence of Experiment Variables on 3D Printing using ABS Resin, J. Kor. Soc. Manuf. Process. Eng., Vol. 16, No. 2, pp. 94~101.
<https://doi.org/10.14775/ksmpe.2017.16.2.094>
- [4] 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. Manuf. Process. Eng., Vol. 17, No. 4, pp. 9~16.
<https://doi.org/10.14775/ksmpe.2018.17.4.009>
- [5] A. Pandzic, D. Hodzic, and A. Milovanovic, 2019, Proc. 30th DAAAM Int. Symp. Intell. Manuf. Autom.(ed. B. Katalinic), DAAAM Int. Vienna, Austria, pp. 545~554.

- [6] D. H. Na, and S G. Kim, 2022, A Study on Tensile Strength According to Various Output Conditions of PLA+ Materials Using 3D Printing, Trans. Mater. Process, Vol. 31, No. 2, pp. 89~95. <http://data.doi.or.kr/10.5228/KSTP.2022.31.2.89>
- [7] http://www.3dcubicon.com/shop/item.php?it_id=15954
- [8] http://eng.3dcubicon.com/bbs/board.php?bo_table=datalist&wr_id=53
- [9] https://www.3dcubicon.com/shop/item.php?it_id=1631775559
- [10] <https://imagej.nih.gov/ij/download.html>