

MJF 3D 프린팅 기반 폴리아미드-12 소재의 건축적 활용을 위한 기계적 특성 실험에 관한 연구 - 출력 방향에 따른 인장 특성 변화를 중심으로 -

박상재¹ · 유승규² · 김문환³ · 김재준^{4*}

¹한양대학교 건축공학과 석사과정 · ²HS하이테크 건설3D프린팅연구소 연구소장 · ³한양대학교 건축공학과 박사과정 · ⁴한양대학교 건축공학과 교수

A Study on the Mechanical Properties Experiment for Architectural Application of Polyamide-12 MJF 3D Printing Material - Focusing on the Change in Tensile Properties According to the 3D Printing Orientation -

Park, Sangjae¹, Yoo, Seungkyu², Kim, Munhwan³, Kim, Jaejun^{4*}

¹Graduate Student, Department of Architectural Engineering, Hanyang University

²Chief Technology Officer, Construction 3D Printing Laboratory, HS HI-TECH

³Graduate Student, Department of Architectural Engineering, Hanyang University

⁴Professor, Department of Architectural Engineering, Hanyang University

Abstract : The number of use cases in machinery, aviation, and other industries that manufacture precise parts is increasing, and the construction industry is also increasingly using 3D printing technology. Although various materials for 3D printing are currently being developed and utilized, 3D printing manufacturing has a problem that the mechanical properties of the product may change when compared with conventional manufacturing methods such as injection and molding. This paper verifies the effect of the printing orientation on the mechanical properties of the product in the manufacture of PA12 material and providing basic data on the practical use of the materials as building subsidiary materials and structural materials. The results of the experiment showed that the product printed in the orientation of 0° showed the lowest overall strength and elongation rate, and the product printed in the orientation of 45° showed the highest figure. Overall, tensile strength and yield strength increased between 0° and 45°, and tended to decrease somewhat at 45° to 90°.

Keywords : Architecture, 3D Printing, Printing orientation, Multi Jet Fusion, PA12

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

최근 4차 산업 혁명의 도래로 주목 받고 있는 3D 프린팅 기술은 기계, 항공, 의료, 바이오, 국방 등 다양한 산업에 적극적으로 활용되고 있다(Song & Yoo, 2018). 건설 산업에서는 주로 비정형 건축물 파사드, 내장재, 구조물, 저층 건축물 등 분야에서 3D 프린팅 기술을 활용하고 있는데 대표적으로 접착제 분사(Binder Jetting; BJ), 고에너지 직접 조사(Direct

Energy Deposition; DED), 분말 소결(Powder Bed Fusion; PBF), 액층광중합(Vat Photopolymerization; VP) 방식을 활용하고 있다(Yoo, 2020). 특히 이 중에서도 BJ방식은 주로 규사 또는 폴리메탈 메타크릴레이트(PMMA)와 같은 재료를 사용하여 몰드를 만들거나 제품을 직접 생산 후 보강을 하는 방식으로 사용되고 있다. 하지만 BJ방식에 사용되는 소재는 사형주조용 몰드 및 정밀주조용 마스터패턴을 위해 개발되었기 때문에 건설 산업에 활용하기에는 소재의 기계적 특성이 충분하다고 볼 수 없다.

3D 프린팅에 사용되는 재료는 위에서 언급한 것 외에도 티타늄, 알루미늄, 스테인레스 스틸과 같은 금속 소재 또는 PLA (Poly Lactic Acid), ABS (Acrylonitrile, Butadiene, Styrene) 등의 플라스틱 소재가 주를 이루며 이 외에도 세라믹, 콘크리트 등의 다양한 소재를 활용하고 있다. 이 중에서

* **Corresponding author:** Kim, Jaejun, Department of Architectural Engineering, Hanyang University, Seoul 04763, Korea

E-mail: jkim@hanyang.ac.kr

Received September 14, 2020: **revised** -

accepted October 5, 2020

도 폴리아미드 12 (Polyamide 12; PA12)는 가장 높은 빈도로 사용되는 3D프린팅용 엔지니어링 플라스틱 소재 중 하나이며, 주로 PBF 방식 중 멀티젯퓨전(Multi Jet Fusion; MJF) 방식과 선택적레이저소결(Selective Laser Sintering; SLS) 방식의 3D 프린팅 메커니즘을 활용하여 제품화된다.

PA12는 높은 기계적 특성을 요구하는 다양한 산업 군에 활용되고 있으며, 앞서 언급한 기존의 출력 방식과는 다른 재료, 소결 및 고화 프로세스를 가지고 있다. MJF 방식은 재료 분말 위에 바인더를 도포하는 BJ 방식과 다르게 재료 분말의 화학적 반응을 촉진시키는 에이전트(Fusing and Detailing Agent)를 도포한다. 이후, 재료 분말 평면에 적외선램프를 통과시켜 도포된 에이전트들이 에너지 흡수를 증진시키고 이를 열에너지로 변환하여 분말의 소결 및 융합이 일어나게 된다. 이 프로세스는 동일시간 대비 소결되는 면적이 매우 크다는 것을 의미하며 SLS방식의 생산성과 큰 대비를 보인다. 더하여 MJF 방식은 제품 출력 시 재료 분말이 출력 중인 형상을 받쳐주어 추가적인 지지대를 필요로 하지 않으며 중공이나 복잡 구조를 포함한 형상 제작에 용이하다. 위와 같은 장점은 제품의 설계와 생산에서 설계 자유도 향상, 제작 효율성 향상 등의 이점을 가져온다.

일반적으로 3D 프린팅과 같은 적층 제조 방식은 기존의 제조 방식에 비해 재료적 특성이 감소하는 경우가 있다 (Garrett Craft et al., 2018). FDM 방식의 경우 동일소재를 기반으로 일반사출성형 제품과 출력제품의 강도가 큰 차이(사출 대비 65%~72%)를 보이기도 한다(Michael Montero et al., 2001). 뿐만 아니라 동일한 3D 프린팅 방식 내에서도 적층 및 소결 메커니즘이 상이하여 재료적 특성이 변할 수 있다. 서로 다른 적층 및 소결 메커니즘을 이용한 3D 프린팅 장비에서 PA12의 기계적 특성을 비교한 연구에서는 SLS 방식이 MJF 방식에 비하여 입자의 용융 정도가 높게 나타나며 출력된 제품이 상대적으로 낮은 밀도를 보이기 때문에 기계적 특성이 낮다는 결론에 도달하였다(Zhiyao Xu et al., 2019).

앞서 언급한 것과 같이 3D 프린팅 소재는 출력 방식, 출력 방향, 소결 메커니즘 등에 영향을 받아 기계적 특성이 변화될 수 있다. 더하여 특정 방식의 3D 프린팅 프로세스 내에서도 소결과정에서의 온도 분포, 출력 후 냉각 속도 등에 의해 출력물의 기계적 특성이 달라질 수 있으며 출력방향, 위치와 연계하여 설명될 수 있다.

예를 들어 MJF 방식은 적외선 흡수를 돕는 촉매 에이전트가 액체 상태로 도포되기 때문에 재료 분말 평면의 단일 레이어(Layer) 내에서도 에이전트의 분포 상태가 상이해진다. 이렇게 에이전트의 분포 상태가 달라진다면 단일 레이어 내에서도 소결에 의한 소재의 특성이 서로 다른 부분이 존

재하게 되고, 출력 방향에 따라 단면상의 에이전트 도포 상태가 달라지며 최종 출력물의 강도 등에 영향을 줄 수 있다.

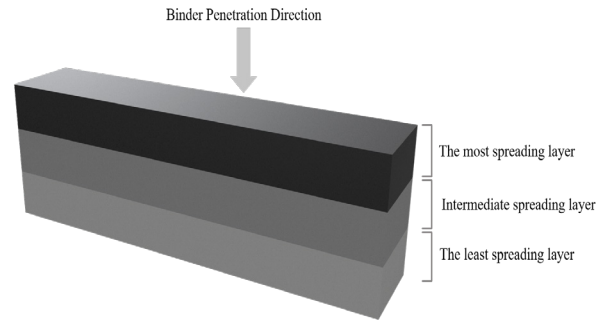


Fig. 1. Agent penetration direction and layer separation

〈Fig. 1〉은 약 80 μ m 두께의 단일 적층 레이어에서의 에이전트의 수직 분포를 의미하는데, 적외선램프 통과 시 재료 분말이 흡수하는 에너지가 분말 평면의 단일 적층 레이어 내에서 높이에 따라 다르게 되어 최종 강도에 영향을 미칠 가능성이 있다. 또한, 새로 도포되는 분말이 이미 소결이 진행된 분말 평면 위에 적층될 때, 서로 간의 온도 차이로 인해 소결시간이 부족해 질 수 있다. 더하여, 〈Fig. 2〉는 출력 방향에 따라 단일 적층 레이어 상의 에이전트 분포 양상이 달라지는 것을 의미한다. 0°제품은 빌드룸 바닥면의 수평 방향으로 제품이 출력되고, 90°제품은 바닥면의 수직 방향으로 제품이 출력되게 된다. 이렇게 제품의 출력 방향이 달라지면 동일 형상일지라도 단면 형상 내에서 소결된 면적의 차이를 발생시킬 수 있으므로 출력 방향에 따른 재료의 기계적 특성에 차이가 존재할 수 있음을 합리적으로 추론할 수 있다.

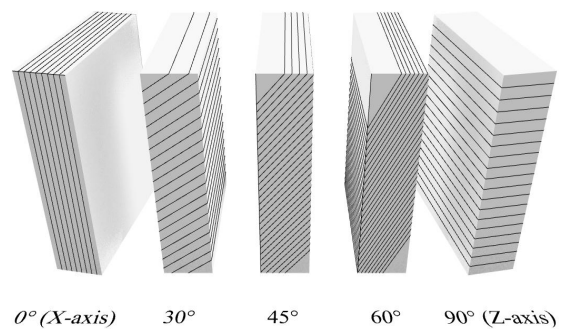


Fig. 2. Agent application amount per cross-sectional area according to printing orientation

따라서 본 연구는 앞서 제기된 출력 방향에 따른 인장 특성 변화를 분석함으로써 출력 방향이 소재의 기계적 특성에 미치는 영향이 존재하는지를 실험을 통해 검증하고자 한다. 본 연구의 실험을 통해 검증된 결과는 PA12 소재에 대한 이

해를 확장시키며, 이 소재를 건축 부자재 및 구조재로서 활용할 때, 기계적 특성을 향상 또는 보완시키는 출력방향을 도출할 수 있다. 더하여 3D 프린팅 제품의 설계, 제품 성능의 향상을 위한 출력방향 설정 등 실무적인 활용에 중요한 기초자료로 활용될 수 있다.

1.2 연구의 범위 및 방법

본 연구는 3D프린팅용 PA12 소재의 출력 방향이 기계적 특성에 미치는 영향을 인장 특성 중심으로 분석하였다. 2장의 이론적 배경에서 MJF 방식의 작동 원리 및 다른 출력 방식과의 차이점을 분석하였고 선행 연구 고찰을 통해 PA12 소재의 출력 방식, 출력 방향, 시험 온도, 소재 보강이 기계적 특성에 미치는 영향에 대하여 고찰하였다. 3장에서는 2장의 고찰 내용을 바탕으로 제품 출력 방향을 다양하게 구분하여 설정하였고 인장 강도 시험 결과를 인장 강도, 항복 강도, 연신율을 중심으로 분석하였다. 4장에서는 3장의 실험 결과 값을 통해 파악한 출력 방향에 따른 인장 특성의 변화를 정리하고 이를 통하여 PA12 소재의 건설 분야 활용 가능성에 대하여 논하였다.

2. 이론적 배경 및 선행 연구 고찰

2.1 다중 소결 파우더 출력 방식

고분자를 다루는 3D 프린팅 기술 중 SLS 출력 방식은 높은 정밀도와 지지대가 필요하지 않다는 장점을 기반으로 널리 활용되었지만 한 번에 하나의 제품만 출력 가능하여 생산 속도가 떨어진다는 단점이 존재한다. 이러한 단점을 보완한 출력 방식이 MJF 방식이다(Fig. 3).

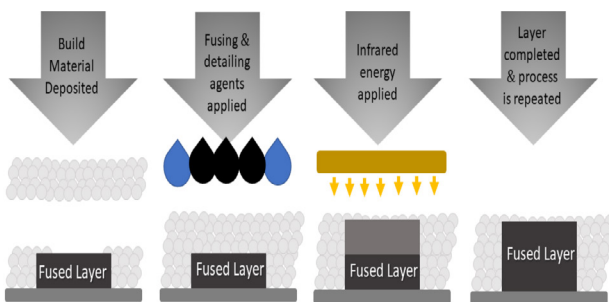


Fig. 3. Schematic diagram of the MJF Process (Heather O' Connor et al., 2018)

MJF 방식은 먼저 재료 분말을 빌드룸 내에 위치시킨 후, 적외선 광선 통과 시 일어나는 소결을 돕고 변형을 방지하는 에이전트를 도포한다. 이 후, 에이전트 도포면 위로 적외선램프가 지나가며 소결이 일어나고 같은 과정을 반복하여 3차원 형상을 출력해낸다. SLS 방식과 MJF 방식은 분말 형

태의 재료를 소결시켜 제품을 출력한다는 점에서 유사성을 띠고 있지만 두 출력 방식의 열원에 차이가 존재한다. 레이저를 이용하여 재료 분말을 소결시키는 SLS 방식은 광원의 숫자가 늘어나지 않는 이상 동시에 여러 지점을 소결시킬 수 없어 여러 제품을 한 번에 출력할 수 없다. 이에 반하여 MJF 방식은 재료 분말 위에 적외선 흡수를 촉진하는 에이전트를 분사하고 그 위를 적외선램프가 지나가며 분말을 소결시키는 방식이다. 적외선은 레이저와 다르게 분말 표면에 적용되기 때문에 형상이 다른 여러 개의 제품을 동시에 출력할 수 있다.

2.2 선행 연구 고찰

PA12 소재 기반 SLS 3D 프린팅 장비는 MJF 3D 프린팅 장비에 비하여 일찍 개발되었으며, 높은 빈도를 활용된 소재 인 만큼 기계적 특성에 관한 연구가 다수 진행되어왔다. 하지만 MJF 3D 프린팅 방식을 이용한 PA12 소재의 기계적 특성 평가는 상대적으로 선행연구가 부족하며, 특히 출력 방향에 따른 기계적 특성 실험은 소수에 불과하다.

먼저 Kim (2019)은 SLS 3D 프린팅 장비를 기반으로 일반 PA12 소재와 글라스비드로 보강된 PA12 소재에 대한 인장시험을 진행하여 출력 방향 및 분위기 온도에 따른 기계적 특성의 변화를 분석하였다. 연구 결과, 출력 방향이 90°에 가까울수록 두 소재 모두 탄성률이 감소하는 것을 확인하였으며, 글라스비드 보강 PA12가 일반 PA12에 비하여 출력 방향에 대한 의존성이 더 명확하다고 밝혔다. 그 이유는 글라스 비드가 보강되면서, 고분자 소재와 글라스 비드 간의 접합이 영향을 주었을 것이라는 주장이 있다. 또한 인장시험 시 분위기 온도가 증가함에 따라 두 소재 모두 탄성률 및 인장강도가 감소하는 것을 확인하였다. 이 연구는 SLS 방식을 이용한 연구결과에 한정되어 MJF 방식을 비롯한 다른 출력 방식들의 특성을 파악하기에는 한계가 존재한다.

Heather O' Connor et al. (2018)은 MJF 방식으로 제작한 PA12 제품의 인장 및 탄성 특성에 출력 방향이 미치는 영향에 대하여 연구하였다. 연구 결과에 따르면 MJF 방식은 90° > 0°(Y) > 0°(X) 순서의 인장강도를 보였으며 탄성 강도 역시 동일한 순서로 높게 나타났다. 본 연구는 출력방향 이 축 방향으로 한정되어 있는데 출력하고자 하는 결과물의 형태와 크기에 따라 출력 방향이 변화하는 3D 프린팅의 특성 상 출력 방향에 따른 강도 변화의 추이를 파악하기에는 한계가 있으며 단일 레이어가 반복 적층되는 MJF 방식은 출력 방향에 따라 레이어의 적층 형상 역시 변화하기 때문에 보다 다양한 출력 방향에 대한 연구 결과가 필요하다.

3. 실험 조건 및 결과

3.1 실험 조건

본 절에서는 출력방향에 따른 PA12 소재의 기계적 특성 변화를 파악하기 위한 실험 조건을 설명하였다. 먼저 실험에 사용된 장비는 아래 <Fig. 4>와 같은 Jet Fusion 4200이다. 이 장비는 3D 프린터와 냉각 및 분말회수를 위한 후처리 스테이션으로 구성되어있다.



Fig. 4. Jet Fusion 4200 3D printer (HP MJF website, 2017)

자세한 기기의 사양은 <Table 1>과 같다. 출력 최대 규격은 380x284x380mm로 약 41,009,600mm³의 체적을 갖는다. PA12의 적층 두께는 약 80μm이며, 에이전트는 1200 DPI의 해상도를 갖는 잉크젯 헤드에서 분사된다.

Table 1. Technical specification of HP Jet Fusion 4200

Printer performance	Technology	HP Multi Jet Fusion technology
	Effective building volume	380 x 284 x 380 mm
	Building speed	4115 cm ³ /hr
	Layer thickness	0.08 mm
	Print resolution (x, y)	1200 dpi

(HP Co., 2017)

용된 소재는 HP사에서 공급하는 PA12와 퓨징 에이전트를 사용하였다. HP사가 배포한 PA12 소재의 기계적 특성은 <Table 2>와 같다. 각 특성의 수치는 출력 방향에 따라 구분되어 있으며 대체로 X, Y, Z축 방향 모두 값이 큰 차이를 보이지 않는다. HP社は PA12의 기계적 특성 측정을 위해 ASTM D638 Type I 또는 Type V 규격의 시편을 사용하였는데 인장 특성은 모두 Type V로 진행하였다. <Table 3>은 해당 인장시편의 치수를 나타내며 <Fig. 5>은 시편에서 해당 치수의 의미를 나타낸다.

실험에 활용된 시편은 각각 0°(X), 0°(Y), 90°(Z)와 30°, 45°, 60°로 총 6개의 출력 방향을 기준으로 하였으며, 각 출력 방향별로 5개의 시편을 제작하여 총 30개의 인장실험 시편을 검증에 활용하였다. 아래 <Fig. 6>은 빌드룸 내 인장시편의 배치를 간략히 나타낸다.

Table 2. Mechanical properties of PA12

Category	Measurement	Value	Method
General Properties	Powder melting point (DSC)	187°C	ASTM D3418
	Particle size	60μm	ASTM D3451
	Bulk density of powder	0.425 g/cm ³	ASTM D1895
	Density of parts	1.01 g/cm ³	ASTM D792
Mechanical properties	Tensile strength, max load, XY	48 MPa	ASTM D638
	Tensile strength, max load, Z	48 MPa	ASTM D638
	Tensile modulus, XY	1700 MPa	ASTM D638
	Tensile modulus, Z	1800 MPa	ASTM D638
	Elongation at break, XY	20%	ASTM D638
	Elongation at break, Z	15%	ASTM D638
	Flexural strength (@ 5%) ₁₀ , XY	65 MPa	ASTM D790
	Flexural strength (@ 5%) ₁₀ , Z	70 MPa	ASTM D790
	Flexural modulus ₁₀ , XY	1730 MPa	ASTM D790
	Flexural modulus ₁₀ , Z	1730 MPa	ASTM D790
	Izod impact notched (@ 3.2 mm, 23°C), XYZ	3.5 kJ/m ²	ASTM D256 Test Method A

(HP Co., 2017)

Table 3. Dimension of ASTM D638 Type V

(Unit : mm)

W	L	WO	LO	G	D	R
3.18	9.53	9.53	63.5	7.62	25.4	12.7

(ASTM, 2017)

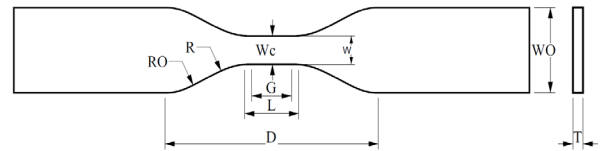


Fig. 5. Drawing of ASTM D638 type V (ASTM, 2017)

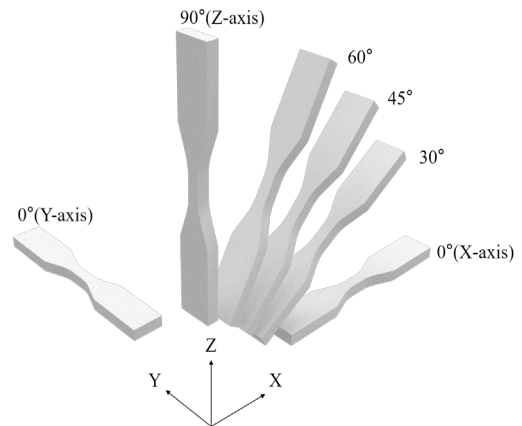


Fig. 6. Printing orientation of specimens

HP 社の PA12 분말로 제작된 6가지 방향의 인장시편을 대상으로 대진엔지니어링 社の DJU-100-20KNX(최대하중: 20kN) 시험기를 사용하여 인장강도 시험을 진행하였다. 시험 환경은 시험온도, 시험습도 그리고 인장속도를 제어하였다.

시험온도는 건축물 또는 구조물이 위치하는 보편적인 외부환경과 동일 시 하기 위하여 24°C로 통일하였으며, 시험습도는 30%로 통일하여 진행하였다. 인장 시험 진행속도는 10mm/min로 진행하였으며 각 방향 당 5개의 시편에 대하여 실험한 후 최댓값과 최솟값을 제외한 나머지 3개 실험값의 평균을 비교하였다.



Fig. 7. ASTM D638 Type V Specimens

3.2 실험 결과

3.2.1 인장 강도

인장 강도는 45° 시편에서 61.90Mpa로 가장 높은 값이 나타났으며 0°(X) 시편에서 47.66Mpa로 가장 낮은 값이 나타났다. 평균 인장 강도는 45° > 30° > 60° > 90(Z) > 0(Y) > 0(X) 순서로 나타났으며, 각 출력 방향 별 5개 시편의 인장 강도와 극단치를 제외한 나머지 3개 시편의 평균 인장 강도는 아래 <Table 4>와 같다. <Fig. 8>은 각 시편 별 평균 인장 강도의 변화 추이를 타낸다.

평균 인장 강도는 출력 방향에 따라 0°(X)부터 45°까지는 점차 증가하는 추세를 보였으며 45° 이상부터는 점차 감소하는 추세를 보였다. 가장 낮은 평균 인장 강도를 보인 0°(X) 시편과 가장 높은 평균 인장 강도를 보인 45° 시편은 약 9.22Mpa의 차이가 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 0°(X) 시편과 0°(Y) 시편은 동일한 각도로 출력되었지만 약 2.49Mpa의 강도 차이가 발생하는 것을 확인할 수 있었다.

Table 4. Tensile Strength and trimmed average tensile strength of all specimens

Category	Specimen Number	Tensile Strength (Mpa)	Trimmed Average Tensile Strength (Mpa)
0°(X)	#1	50.29	49.75
0°(X)	#2	47.66	
0°(X)	#3	48.24	
0°(X)	#4	50.71	
0°(X)	#5	54.64	
30°	#1	58.93	57.84
30°	#2	54.37	
30°	#3	57.45	
30°	#4	57.15	
30°	#5	60.27	
45°	#1	61.90	58.97
45°	#2	61.83	
45°	#3	59.72	
45°	#4	51.29	
45°	#5	55.37	
60°	#1	58.91	55.57
60°	#2	56.00	
60°	#3	56.62	
60°	#4	50.42	
60°	#5	54.09	
90°(Z)	#1	55.94	55.09
90°(Z)	#2	60.10	
90°(Z)	#3	54.63	
90°(Z)	#4	53.09	
90°(Z)	#5	54.71	
0°(Y)	#1	52.43	52.24
0°(Y)	#2	52.28	
0°(Y)	#3	52.02	
0°(Y)	#4	55.45	
0°(Y)	#5	51.77	

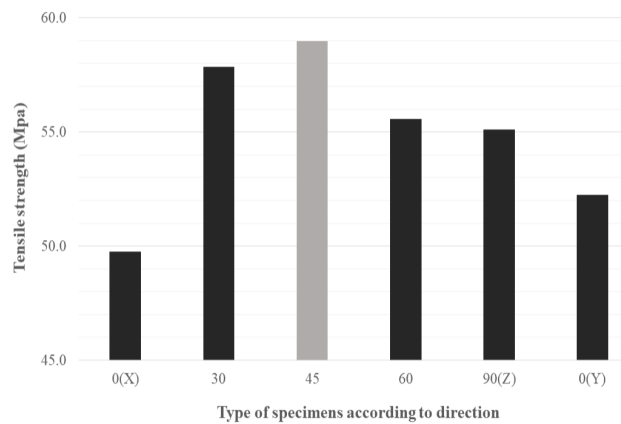


Fig. 8. Trimmed average tensile strength of specimens according to orientation

3.2.2 항복 강도

항복 강도는 45° 시편에서 441.13Mpa로 가장 높은 값이 나타났으며 0°(X) 시편에서 335.18Mpa로 가장 낮은 값이 나타났다. 평균 항복 강도는 45° > 30° > 60° > 90°(Z) > 0°(Y) > 0°(X) 순서로 크게 나타났으며, 각 출력 방향 별 5개 시편의 인장 강도와 극단치를 제외한 평균 인장 강도는 아래 <Table 5>와 같다. 아래의 <Fig. 8>은 각 시편 별 평균 항복 강도의 변화 추이를 타낸다.

Table 5. Yield strength and trimmed average yield strength of all specimens

Category	Specimen Number	Yield Strength (Mpa)	Trimmed Average Yield Strength (Mpa)
0°(X)	#1	355.55	351.80
0°(X)	#2	335.18	
0°(X)	#3	339.12	
0°(X)	#4	360.74	
0°(X)	#5	387.87	
30°	#1	411.44	411.76
30°	#2	388.78	
30°	#3	414.30	
30°	#4	409.55	
30°	#5	435.07	
45°	#1	441.13	422.18
45°	#2	435.87	
45°	#3	429.18	
45°	#4	368.88	
45°	#5	401.48	
60°	#1	423.88	398.10
60°	#2	392.04	
60°	#3	405.80	
60°	#4	363.30	
60°	#5	396.47	
90°(Z)	#1	397.17	396.62
90°(Z)	#2	435.60	
90°(Z)	#3	391.35	
90°(Z)	#4	388.61	
90°(Z)	#5	401.33	
0°(Y)	#1	371.30	368.84
0°(Y)	#2	367.01	
0°(Y)	#3	366.57	
0°(Y)	#4	392.88	
0°(Y)	#5	368.20	

평균 항복 강도 역시 평균 인장 강도와 같이 0°(X)부터 45°까지는 점차 증가하였으며 45° 이상부터는 다시 감소하는 추세를 보였다. 가장 낮은 평균 항복 강도를 보인 0°(X) 시편과 가장 높은 45° 시편은 약 70.38Mpa의 차이가 나타나

는 것을 확인할 수 있었다. 평균 항복 강도 역시 0°(X) 시편과 0°(Y) 시편 사이에 약 17.04Mpa의 차이가 발생하는 것을 확인하였다.

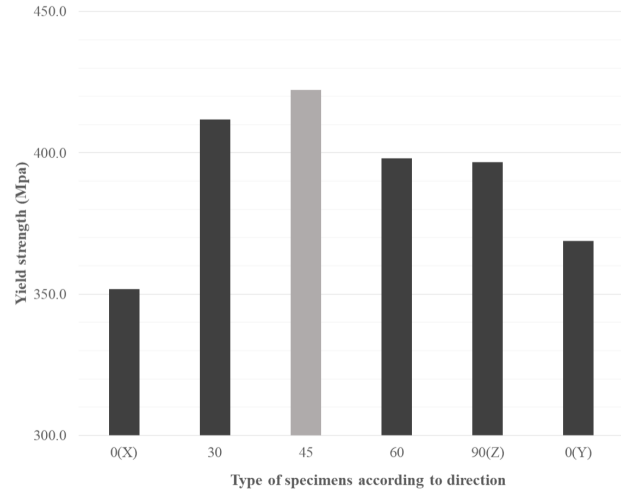


Fig. 9. Trimmed average yield strength of specimens according to orientation

3.2.3 연신율

연신율은 실험 결과 90°(Z) 시편의 연신율이 가장 높은 것으로 측정되었다. 연신율은 90°(Z) 시편에서 26.52%로 가장 높게 나타났으며 45° 시편에서 14.29%로 가장 낮게 나타났다. 평균 연신율은 90°(Z) > 0°(Y) > 0°(X) > 30° > 45° 순서로 크게 나타났으며, 각 출력 방향 별 5개 시편의 연신율과 극단치를 제외한 평균 연신율은 아래 <Table 6>과 같다. <Fig. 10>은 각 시편의 출력 방향에 따른 평균 연신율의 변화 추이를 나타낸다.

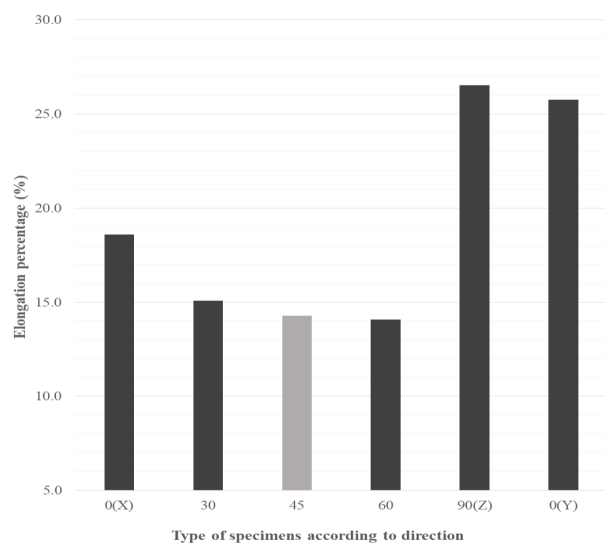


Fig. 10. Trimmed average elongation percentage of specimens according to orientation

Table 6. Elongation percentage and trimmed average elongation percentage of all specimens

Category	Specimen Number	Elongation Percentage (Mpa)	Trimmed Average Elongation Percentage (Mpa)
0°(X)	#1	30.33	18.60
0°(X)	#2	17.54	
0°(X)	#3	20.48	
0°(X)	#4	17.38	
0°(X)	#5	17.79	
30°	#1	14.86	15.08
30°	#2	15.06	
30°	#3	15.35	
30°	#4	11.50	
30°	#5	17.33	
45°	#1	17.38	14.29
45°	#2	20.77	
45°	#3	10.39	
45°	#4	9.15	
45°	#5	15.10	
60°	#1	18.74	14.06
60°	#2	13.24	
60°	#3	12.25	
60°	#4	16.55	
60°	#5	12.41	
90°(Z)	#1	26.10	25.52
90°(Z)	#2	23.09	
90°(Z)	#3	29.86	
90°(Z)	#4	25.20	
90°(Z)	#5	28.26	
0°(Y)	#1	28.26	25.76
0°(Y)	#2	27.09	
0°(Y)	#3	25.44	
0°(Y)	#4	24.74	
0°(Y)	#5	21.43	

90°(Z) 시편의 연신율과 0°(Y) 시편의 연신율은 약 25% 근처인 것으로 나타났지만 나머지 시편들은 약 15~18%에 걸쳐 나타나며 7~10% 가량의 격차를 보였다.

3.2.4 실험결과 종합

본 연구는 인장 강도 실험을 통해 PA12 소재의 출력 방향에 따른 인장 특성 변화를 분석하고 출력 방향이 PA12 소재의 기계적 특성에 미치는 영향이 존재하는지 검증하고자 하였다. 인장 시험 결과 중 인장 강도, 항복 강도, 연신율을 통해 출력 방향에 따른 기계적 특성 변화를 파악하였다. 30개의 시편 중 0°(X) 시편 한 개(47.66Mpa)를 제외하고 모든 시편이 HP社가 제시한 기준 사양을 만족하는 수치를 보였다.

인장 강도의 경우, 45° 시편의 평균 인장 강도가 가장 높게 나타났으며 0°(Y) 시편과 0°(X) 시편의 평균 인장 강도

가 가장 낮았다. 전체적으로 인장 강도는 출력 방향에 따라 0°에서 45° 사이에서는 증가하는 경향을 보였으며, 45° 이상부터 소폭 감소하는 경향을 보였다. 평균 항복 강도 역시 45° 시편에서 가장 높은 값을 보였으며 두 종류의 0°(X, Y) 시편에서 가장 낮은 값을 보였다. 평균 항복 강도는 출력 방향에 따라 0°부터 45°까지 증가하는 경향을 보였으며 45° 이후로 소폭 감소하며 출력 방향에 따른 값의 변화가 평균 인장 강도와 거의 유사한 것을 확인하였다. 평균 연신율은 90°(Z) 시편에서 가장 높게 나타났으며 60° 시편에서 가장 낮게 나타났다. 0° 시편의 경우 X축 방향 시편과 Y축 방향 시편이 약 7.1%의 차이로 비교적 큰 차이를 보였으며 0°(X) 부터 60°까지는 값이 줄어들다가 90°(Z)에서 크게 증가하는 양상을 보였다.

4. 결론 및 시사점

본 연구결과 MJF 방식으로 제작한 PA12 소재는 출력 방향에 따라 기계적 특성에 차이가 존재할 수 있음을 확인하였다. 이와 같은 결과는 다음과 같은 시사점을 갖는다.

먼저, 제품 내에서 구조적 성능이 요구되는 부위 또는 방향이 특정되면, 이를 기반으로 3D 프린팅 단계에서 출력 방향을 조절하여 기계적 특성을 향상시키는 조치가 가능하다. 특히 다른 곳에 비하여 높은 인장강도를 요구하는 경우 해당부위가 장비 내 출력각도에 45°로 평행하게 배치할 경우 강도가 향상되는 결과를 보일 수 있다. 또한 높은 연신율을 요구하는 탄성 부위는 출력각도를 낮추어 0°에 가깝게 배치함으로써 제품의 탄성을 확보하는 것이 가능하다. 위와 같은 내용은 3D 프린팅 공정 설계기술의 차별화를 의미하며, 제품의 경쟁력을 향상시키는 결과를 가져올 수 있음을 의미한다.

지금까지는 높은 설계 자유도를 보장하고 다양한 재료를 사용할 수 있는 MJF 출력방식의 장점에도 불구하고 FDM 출력 방식이 3D 프린팅의 건축적 활용의 주를 이루어 왔지만 출력 방향의 조절에 따라 기동 부재, 비정형 외장 파사드 부재 등 복잡한 응력을 받는 건축 부재를 보다 용이하게 제작할 수 있기 때문에 본 연구 결과는 MJF 방식의 건축적 활용 확장에 대한 기초 자료로 사용될 수 있을 것으로 사료된다.

본 연구결과는 기계적 특성 중 인장강도, 항복강도, 연신율에 대한 실험 결과로 한정하였기 때문에 압축강도, 굽힘 강도 등 부가적인 물성 평가에 대한 해석에 어려움이 있다. 추후 실험연계를 통해 보다 종합적인 관점에서 기계적 특성 변화에 대한 실험데이터를 수집 및 보완한 3D 프린팅 설계 프로세스 개발이 필요하다.

본 연구결과는 기계적 특성 중 인장강도, 항복강도, 연신율에 대한 실험 결과로 한정하였기 때문에 압축강도, 굽힘강도 등 부가적인 물성 평가에 대한 해석에 어려움이 있다. 추후 실험연계를 통해 보다 종합적인 관점에서 기계적 특성 변화에 대한 실험데이터를 수집 및 보완한 3D 프린팅 설계 프로세스 개발이 필요하다.

더하여, 한정된 실험방법으로 인해 연구 배경에서 제기된 소결과정에서의 미세한 온도 분포, 출력된 레이어와 새로 도포된 레이어간의 온도 차이로 인한 과소 냉각 등의 부가효과들을 명확하게 나누어 설명할 수 없었다. 향후 3D 프린팅 장비 및 소재에 대한 미세한 열에너지 측정 및 분산된 실험 시편 배치를 통해 보다 구체적인 영향관계 도출이 필요하다고 볼 수 있다.

References

- ASTM D638-14 (2014). "Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics, ASTM International." West Conshohocken, PA, Retrieved from www.astm.org.
- Garrett Craft, Justin Nussbaum, Nathan Crane, J.P. Harmon (2018). "Impact of extended sintering times on mechanical properties in PA-12 parts produced by powderbed fusion processes." *Additive Manufacturing*, 22, pp. 800-806.
- HP Co. (2017). "HP 3D High Reusability PA12" Retrieved from <https://www8.hp.com/h20195/v2/GetPDF.aspx/c06331783.pdf>.
- HP MJF Website. [cited 2020.09.03]; © Copyright 2017 HP Development Company, L.P.
- Kim, M.S. (2019). "Study on Tensile Properties of Polyamide 12 produced by Laser-based Additive Manufacturing Process." *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, 20(11), pp. 217-223.
- Masood, S.H., Mau, K., and Song, W.Q. (2010). "Tensile Properties of Processed FDM Polycarbonate Material." *Materials Science Forum*, pp. 654 - 656, 2556 - 2559.
- Montero, M., Roundy, S., Odell, D., Ahn, S.H., and Wright, P.K. (2001). "Material characterization of fused deposition modeling (FDM) ABS by designed experiments." *Society of Manufacturing Engineers*, 10 (13552540210441166), pp. 1-21.
- O' Connor, H., Dickson, A., and Dowling, D. (2018). Evaluation of the mechanical performance of polymer parts fabricated using a production scale multi jet fusion printing process. *Additive Manufacturing*. 22. 10.1016/j.addma.2018.05.035.
- Song, J.Y., and Yoo, H.Y. (2018). "A Case Study of International Architecture Using 3D Printer." *Proceedings of the Korean Institute of Architecture Conference*, 38(2), pp. 601-604.
- Yoo, S.K. (2020). "Case Study on Freeform Structure by Using 3D Printing Technologies." *Korean Journal of Concrete*, 32(4), pp. 56-60.
- Zhiyao Xu, Yue Wang, Dingdi Wu, K. Prem Ananth, Jiaming Bai (2019). "The process and performance comparison of polyamide 12 manufactured by multi jet fusion and selective laser sintering." *Journal of Manufacturing Processes*, 47, pp. 419-426.

요약 : 3D 프린팅 기술은 4차 산업 혁명의 도래와 함께 다양한 산업 분야에서 주목받고 있다. 특히 정밀한 부품을 제작하는 기계, 항공 등의 산업에서 그 활용 사례가 증가하고 있으며 건축 산업 역시 3D 프린팅 기술을 활용한 사례가 늘어나고 있는 추세이다. 현재 다양한 3D 프린팅용 소재가 개발 및 활용되고 있지만, 3D 프린팅 제조는 사출 및 성형과 같은 기존 제조 방법과 비교하였을 때 제품의 기계적 특성이 달라질 가능성이 있다는 문제점이 있다. 본 논문은 3D 프린팅용 플라스틱 소재 중 널리 활용되고 있는 PA12 소재의 제품 제작 시 출력 방향이 제품의 기계적 특성에 미치는 영향을 검증하고 소재에 대한 이해를 확장시켜 건축 부자재 및 구조재료로서의 활용 등의 실무적인 활용에 대한 기초 자료를 제공한다. 실험은 출력 방향의 영향을 확인하기 위해 0°, 30°, 45°, 60°, 90° 방향의 제품을 출력하였으며 인장 강도 실험을 통하여 인장 강도, 항복 강도, 연신율을 비교하였다. 실험 결과, 0° 방향으로 출력한 제품이 전반적으로 가장 낮은 강도와 연신율을 보였으며 45° 방향으로 출력한 제품이 가장 높은 수치를 보였다. 또한 전반적으로 0°부터 45° 사이에서는 인장강도와 항복 강도가 상승하였으며, 45°부터 90°에서는 다소 감소하는 경향을 보였다.

키워드 : 건축, 3D 프린팅, 출력 방향, 멀티젯퓨전, PA12