

FDM 프린팅으로 제작된 ABS 소재의 기계적 특성 및 직교이방성 연구

윤주일*.#

*한성대학교 기계시스템공학과

Study of the Mechanical Properties and Orthotropy of ABS Materials Fabricated by FDM Printing

Juil Yoon*.#

*Department of Mechanical System Engineering, Hansung University

(Received 22 August 2018; received in revised form 27 August 2018; accepted 6 September 2018)

ABSTRACT

3D printing has been expanding beyond the bio/nano field to the automobile and aviation industries. 3D-printing technology has to overcome real problems to have economic value compared to its unlimited usability. Typically, the difference in mechanical strength along the lamination direction requires sufficient research to ensure reliability. In this paper, we study the anisotropic properties of ABS based on the stacking method of FDM 3D printing. Specifically, the mechanical properties of ABS material are determined through a tensile test and 3-point bending test, and the in-plane orthotropic properties are ascertained.

Key Words : FDM(FDM), 3D Printing(3D 프린팅), Orthotropy(직교이방성), Mechanical Property(기계적 성질), ABS(ABS)

1. 서 론

3D 프린팅이란 3D 컴퓨터 기반 설계(Computer Aided Design: CAD) 정보를 바탕으로 직접적으로 제품을 제조하는 기술을 일컫는다. 대부분의 3D 프린팅은 3차원 CAD 모델을 2차원 층(layer)으로 분절화 시키고 이를 적층기법으로 제작해내는 방식이다. 3D 프린팅의 장점은 소량생산에 특화되어 있으며, 맞춤형 제작, 금형 없는 제품 생산이 가능하다는 점 등을 들 수 있다. 현재까지 개발되어 사용되

고 있는 3D 프린팅의 종류에는 FDM (fused deposition modeling), SLS (selective laser sintering), DLP(digital light processing), SLA (stereolithography apparatus) 등이 있다.

이 중 대표적인 3D 프린팅 기술인 FDM^[1]은 재료에 해당하는 필라멘트를 가열된 노즐에서 용융시키고 이를 빌드 플랫폼에 분사하여 형상을 제작하는 방식이다. FDM 기술은 폴리머 부품의 신속한 프로토타입 제작에 주로 사용되며^[2,3], 재료의 선택은 제조물의 유형이나 특성에 따라 다양하다. 현재 일반적으로 사용되는 재료로는 튼튼하고 친환경적인 폴리락트산(PLA), 부드러운 제품용인 나일론, 고밀도 폴리에틸렌(HDPE) 및 일반적인 강도가 있는 부품

Corresponding Author : juilyoon@hansung.ac.kr
Tel: +82-02-760-8008, Fax: +82-02-760-4329

에 대한 솔루션인 아크릴로 니트릴 부타디엔 스티렌(ABS)이 있다.

다양한 장점에 힘입어 3D 프린팅은 바이오, 항공/우주 분야 등 폭넓은 산업분야로 사용분야가 확대되고 있다. 하지만 3D 프린팅의 단점으로 사출제품에 비하여 기계적 성질이 부족하다는 사실이 알려져 있다.^[1,4,6] 이는 3D 프린팅 시 내부 채움, 적층 두께, 형상패턴, 적층 방향 등에 따라 출력물의 기계적 성질에 편차가 크기 때문인 것으로 보인다. 예를 들어 기존 연구에 따르면 출력각도와 에어 갭과 같은 프린팅 파라미터에 의하여 인장 강도에 변화가 있다고 알려지기도 하였다.^[1,5,8] Sood^[7]는 래스터 각도를 증가시킴으로써 인장 강도가 향상된다는 것을 관찰했다. 한편 Vega^[9]은 인장 하중에 대해 길이 방향과 폭 방향으로 래스터 각도를 0°와 90°로 교차적층을 한 경우 최대 인장 강도를 보고했다. 분명한 것은 3D 프린팅을 통하여 제작된 시편의 적층제조 방향에 따라 비등방성 성질을 가진다는 사실이다.

본 연구에서는 적층 방향에 따른 인장 강도에 주로 한정된 연구에서 탈피하여 3절 굽힘 시험을 기반으로 적층 방향에 따른 굽힘 강도에 미치는 영향까지 연구를 수행하였다. 특히나 3D 프린팅 된 소재의 비등방성 성질을 정량화하기 위하여 면내 적교이방성 모델을 사용하여 수치화된 결과를 얻었다.

2. 실험방법

2.1 실험시편 제작

ABS의 기계적 특성을 연구하기 위하여 인장시험과 굽힘시험용 시편을 제작하였다. 3D 프린팅에 적용된 노즐의 직경은 0.4mm 이며 출력된 필라멘트는 100°C도로 가열된 알루미늄 조형판에 조건에 따른 패턴으로 적층을 수행하였다. 대표적인 출력 조건은 표 1과 같다. 출력물의 적층방향에 따른 3D 프린팅된 시험편의 비등방성 성질을 연구하기 위하여 4가지 시편을 Fig 1과 같이 제작하였다. 아래의 실험에서 지칭되는 적층방향과 적층면의 명명은 다음과 같다. 조형판에 평행한 상태로 두께방향으로 적층한 면내(in plane) 출력과 조형판에서 벗어나 적층하는 면외(out of plane) 출력이다.

Table 1 3D printing parameter

Parameter	Value
Nozzle diameter	0.4mm
Layer height	0.2mm
Printing speed	40mm/s
Bed temperature	100°C±2.5
Nozzle temperature	230°C

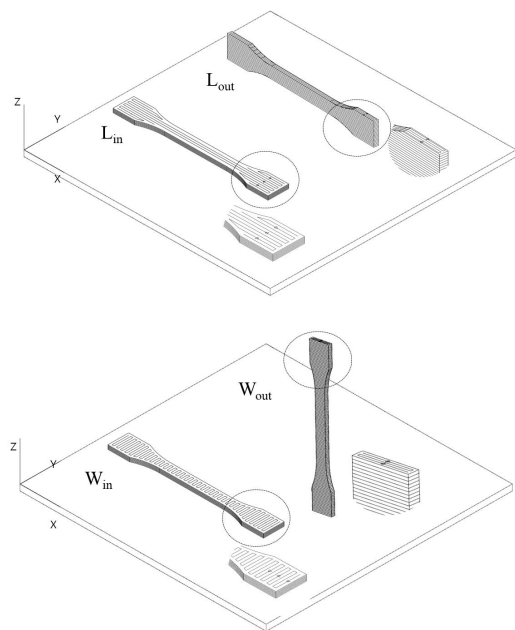
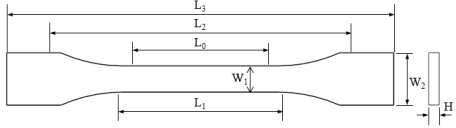
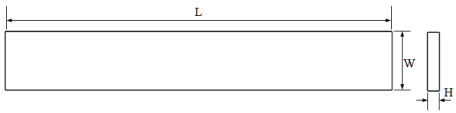


Fig. 1 Test specimen with various deposition path: Top) Longitudinal printing with raster angle 0°(L_{in} and L_{out}), Bottom) lateral printing with raster angle 90°(W_{in} and W_{out})

2종류의 면내 출력은 적층방향이 시편의 길이방향과 동일한 (즉 raster angle 90도) “길이방향 면내 출력(Length-direction in plane: L_{in})”과 적층방향이 시편의 길이방향과 수직인 “폭방향 면내 출력(width-direction in plane: W_{in})”으로 구분된다. 동일한 방식으로 2종류의 면외 출력은 적층방향이 시편의 길이방향과 동일한 “길이방향 면외 출력(L_{out})”과 적층방향이 시편의 길이방향과 수직인 “폭방향 면외 출력(W_{out})”이다.

Table 2 Dimensions of tensile, and bending specimens

Tensile Specimens	
	
Gauge length L_0	50mm
Length of Parallel section L_1	60mm
Length of shoulders L_2	120mm
Total Length L_3	150mm
Width of the test section W_1	10mm
Total width W_2	20mm
Thickness H	4mm
Bending Specimens	
	
Overall length L	80mm
Width B	10mm
Thickness H	4mm

인장 시험편은 인장강도 측정시험편 규격 중 플라스틱의 인장성 측정 방법 ASTM 790-03에 따라 제작하였고, 굽힘 시험편은 ASTM D 790-03을 적용하였다. 자세한 시험편 정보는 표2에 정리되어 있다.

2.2 실험방법 (인장 및 굽힘 시험)

각각의 주어진 제조 조건(W_{in} , W_{out} , L_{in} , L_{out})에 대하여 5개의 시험편에 대한 시험을 수행하였다. 제작된 인장시험편의 인장강도를 측정하기 위해 사용된 계측 장비는 MTS사의 858 Mini(Figure 2)이며 주요 규격은 10 kN/max이다. 적용 하중은 1kN 용량의 로드셀을 통하여 측정하였으며, 시험편의 길이 방향 연신길이는 MTS사의 접촉식 extensometer를 이용하여 정밀 측정하였다. 인장시험시의 변형률 속도는 1mm/min으로 설정하였다.

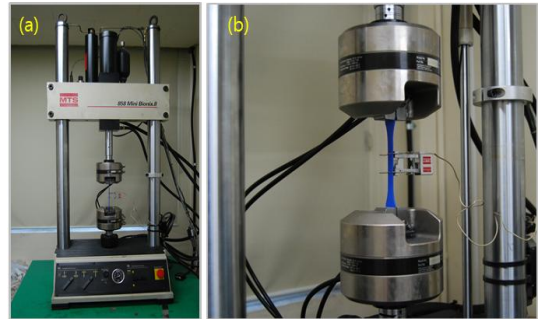


Fig. 2 Overall view of tensile testing machine equipped with extensometer (MTs mini 858)

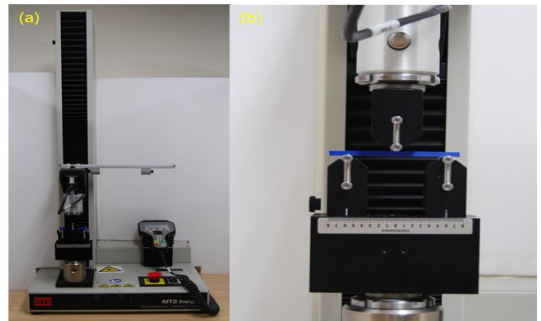


Fig. 3 Overall view of 3 point bending test for measuring flexural strength (MTs insight 1)

3점 굽힘시험은 시험대상물이 취성특성이 있을 때 보다 정확한 기계적 성질을 파악할 수 있는 시험방법이다. 제작된 굽힘 시험편의 굽힘 강도를 측정하기 위해 ASTM D 790-03규격에 따라 실험이 수행되었다. 이 때 사용된 계측 장비는 MTS사의 insight 1 (Figure 3)이며 주요 규격으로 최대하중은 1 kN/max이다. 적용 하중은 250N 용량의 로드셀을 통하여 측정하였다. 굽힘시험은 MTS사의 3점 굽힘 시험 지그(형방향 Max길이: 100mm)를 이용하여 실험을 수행하였다. 굽힘시험시의 변형률 속도는 1mm/min으로 설정하였다. 조건별로 제작된 인장시험편은 5개씩 준비하여 각각의 굽힘강도(flexural strength)를 측정하였다. 이 때 굽힘 시험에 의한 최대 수직 응력은 식 (1)과 같다.

$$\sigma_f = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (1)$$

여기서 P는 하중, L은 3점 굽힘 시험기의 두 힌지 사이의 거리이며, b는 시편의 폭, d는 시편의 두께이다. 또한 시편의 중심부에서의 최대 변형률은 다음의 식으로 주어진다.

$$\epsilon_f = \frac{6\delta d}{L^2} \quad (2)$$

여기서 δ 는 시편의 중심부에서의 처짐이다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 인장 시험

그림 4는 적층방향에 따른 인장강도의 변화를 보여주고 있다. 길이방향으로 적층을 한 L_{in} , L_{out} 두 경우 40MPa에 근접한 값을 보이며 횡방향 적층을 한 W_{in} , W_{out} 경우에 비하여 큰 인장강도를 보였다. 이 사실은 기존의 연구결과와 일치한다^[7,9,10]. 이는 파이버(fiber) 복합재의 강성 메카니즘과 마찬가지로 적층방향 단면층간의 접합강도(interfacial strength)가 연속적으로 연결된 길이 방향 적층 단면내 결합력에 비하여 작기 때문이다

반면 조형판에 수평하게 적층하여 제조하는 방식인 면내(in plane)제조와 조형판에 수직하게 적층하여 면외(out of plane)제조한 경우를 비교하면 약간의 차이로 면외 적층의 경우가 면내 적층보다 인장강도가 크다. 예를 들어 면내 길이방향 적층 경우(L_{in})의 인장강도는 36.1MPa 인 반면, 면외 길이방향 적층인 경우(L_{out})의 인장강도는 39.5MPa로 면외 적층이 우수하였다. 아마도 면외 적층의 경우 적층이 되면서 적층면내에 존재할 수 있는 결함이 수직하중에 의하여 제거되는 효과가 어느 정도 있었을 것으로 추정한다. 또한 L_{in} 과 L_{out} 의 경우 인장강도의 분산값이 비교적 큰 것을 확인할 수 있다. Figure 4(하)는 대표적인 4가지 시편에 대한 응력 변형률 관계를 보여주고 있다. 횡방향 적층경우(W_{in} , W_{out}) 시편이 최대 응력 후 변형 없이 파단되는 취성 파괴 거동을 보이며, 이는 인장강도의 큰 분산값의 원인이다. 이에 반하여 L_{out} 의 상대적으로 매우 큰 연신을 보이면서 파단이 일어났다.

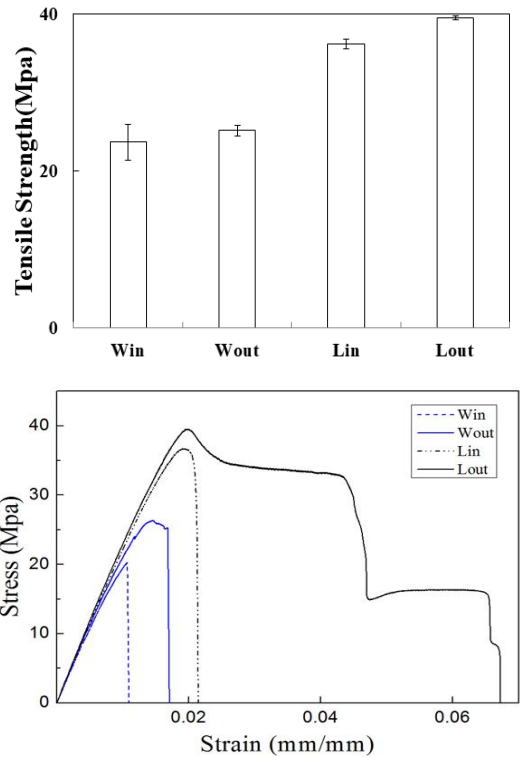


Fig. 4 (Top) Average tensile strength of 3D printed specimens, (Bottom) Typical stress-strain behaviour of 4 different specimens L_{in} , L_{out} , W_{in} and W_{out}

3.2 굽힘 시험

적층방향이 굽힘 특성에 미치는 영향을 연구하기 위하여 3점 굽힘 시험을 수행하였다. 4가지 시편에 대한 특성은 인장시험과 유사성을 보였으며, 가장 낮은 굽힘 강성은 W_{in} 의 경우로 32.5 MPa이었으며, 가장 큰 굽힘 강성은 L_{out} 의 경우로 69.1 MPa이었다. 동일한 적층방향의 경우(예: W_{in} 과 W_{out}), 인장강도의 차이는 크지 않았지만, 굽힘 시험의 경우 그 값의 차이가 유의미하게 발생하였다. 이는 L_{in} 과 L_{out} 의 경우에도 마찬가지였다. 이는 인장시험과 달리 측면에서 하중을 가하는 굽힘 시험의 경우는 측면의 적층방향도 굽힘 강성에 영향을 끼치는 것으로 판단된다. Figure 5(하)는 전형적인 3점 굽힘 시험에서의 응력 변형률 관계를 보여주고 있다. 인장시험과 유사하게 W_{in} 과 W_{out} 은 급격히 파단되는 취성 특성을 보여주고 있다.

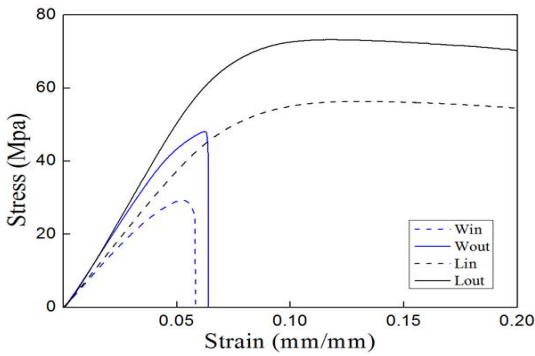
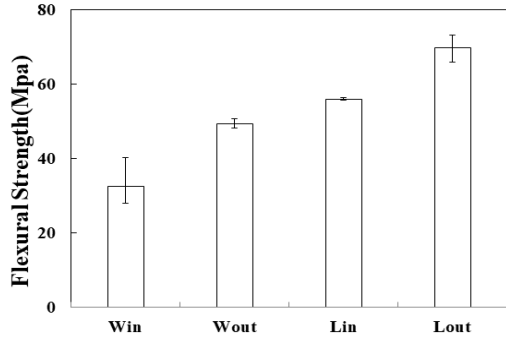


Fig. 5 (Top) Average flexural strength of 3D printed specimens, (Bottom) Typical stress-strain behaviour of L_{in} , L_{out} , W_{in} and W_{out}

4. 직교이방성(orthotropic) 모델

위의 인장실험과 굽힘 실험을 통하여 확인 하였듯이, 3D 프린팅으로 제조된 시편의 기계적 성질은 등방(isotropic)적이지 않고 이방(anisotropic)적이다. 특히나 적층방향과 적층면에 수직적 관계가 있으므로 직교이방성(orthotropic)모델에 의하여 설명될 수 있다. 직교이방성 모델이란 세 개의 상호 수직인 대칭 평면에 의하여 정의되고 연성 행렬에는 단지 9 개의 독립 상수(S_{ijkl})로 구성된다. 본 연구에서는 우선적으로 적층면에서의 물성 변화를 묘사할 수 있는 면내 직교이방성 모델을 수립하고자 한다. 비교적 얇은 플레이트의 경우, 9개의 독립 상수로 정의되는 직교 이방성 모델은 4개의 독립 상수로 정의되는 면내 직교 이방성 모델(in-plane orthotropic model)로 단순화 될 수 있으며 다음 식과 같다.

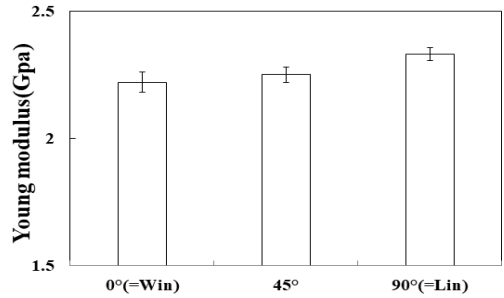


Fig. 6 Tensile strength of 3D printed specimens

Table 3 Coefficient of orthotropy stiff matrix

Isotropy		In-plane orthotropy	
E	2.27GPa	E_x	2.33GPa
		E_y	2.22GPa
		G_{xy}	1.11GPa

$$\begin{pmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{E_x} & -\frac{\nu_{xy}}{E_x} & 0 \\ \frac{1}{E_y} & 0 & 0 \\ sym & & \frac{1}{G_{xy}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{pmatrix} \quad (3)$$

이 때 e_i 는 변형률, g_{ij} 는 전단변형률, s_i 는 수직응력, t_{ij} 는 전단응력이다. 면내 직교 이방성 상수를 결정하기 위하여 적층이 45도로 이루어진 실험이 필요하며 이에 대한 추가적인 인장 실험을 수행하였다(Figure 6). 인장실험을 통하여 E_x , E_y 를 구할 수 있으며, G_{xy} 는 다음의 관계식으로부터 구할 수 있다.^[11]

$$G_{xy} = \frac{E_{45^\circ} \cdot E_x \cdot E_y}{4E_x E_y - E_{45^\circ} (E_x + E_y)} \quad (4)$$

따라서 주어진 실험값으로부터 ABS의 직교 이방성 상수를 구하여 정리하면 표 3과 같다.

5. 결론

본 연구에서는 ABS소재를 사용하여 FDM 3D 프

린팅 제조시 출력물의 비등방성 특성에 대한 연구를 수행하였고 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) 적층에 따른 인장 강도는 길이방향 면의 출력(L_{out})이 가장 우수하였으며, 폭방향 면내 출력(W_{in})이 가장 낮은 값을 보였다. 특히나 폭방향 출력들의 경우 취성 파괴의 특성을 보이고, 인장강도의 큰 분산값의 원인으로 판단된다.

2) 굽힘 강성 특성은 인장시험과 유사성을 보였으며, 결과적으로 가장 낮은 굽힘 강성은 폭방향 면내 출력(W_{in}) 경우다. 동일한 적층방향의 경우(예: W_{in} 과 W_{out}), 굽힘 강성에서 유의미한 차이가 존재한다. 이는 인장시험과 달리 측면에서 하중을 가하는 굽힘 시험의 경우는 측면의 적층방향도 굽힘 강성에 영향을 끼치는 것으로 판단된다.

3) ABS의 면내 직교 이방성 상수를 결정하였으며, 이를 이용하면 3D 프린팅으로 설계하고자 하는 대상물 해석에 유용한 정보가 될 것으로 판단한다.

후 기

“이 논문은 한성대학교 연구비 지원과제로 연구되었음.”

REFERENCES

- Sood, A. K., Ohdar, R. K., Mahapatra, S. S., “Parametric appraisal of mechanical property of fused deposition modelling processed parts,” *Materials & Design*, Vol. 31, pp. 287-295, 2010.
- Pham, D., Gault, R., “A comparison of rapid prototyping technologies,” *International Journal of machine tools and manufacture*, Vol. 38, pp. 1257-1287, 1998.
- Kumar, S., Kruth, J. P., “Composites by rapid prototyping technology”, *Materials & Design*, Vol. 31, pp. 850-856, 2010.
- Seol, K. S., Shin, B. C., Zhang, S. U., “Fatigue Test of 3D-printed ABS Parts Fabricated by Fused Deposition Modeling”, *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 17, pp. 93-101, 2018.
- Kim, D. B., Lee, G. T., Lee, I. H., Cho, H. Y., “Finite Element Analysis for Fracture Criterion of Polyjet Materials”, *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 14, pp. 134-139, 2015.
- Rodriguez, J. F., Thomas, J. P., Renaud, J. E., “Mechanical behavior of acrylonitrilebutadiene styrene fused deposition materials modeling”, *Rapid Prototype*, Vol. 9, pp. 219-230, 2003.
- Sood, A. K., Ohdar, R. K., Mahapatra, S. S., “Experimental investigation and empirical modelling of FDM process for compressive strength improvement,” *Journal of Advanced Research*, Vol. 3, pp. 81-90, 2012.
- Equbal, A., Ohdar, R. K., Mahapatra, S. S., “Prediction of dimensional accuracy in fused deposition modelling: a fuzzy logic approach”, *Int. J. Prod. Quality Manage*, Vol. 7, pp. 22-43, 2011.
- Vega, V., Clements, J., Lam, T., Abad, A., Fritz, B., Ula, N., “The effect of layer orientation on the mechanical properties and microstructure of a polymer,” *Journal of materials engineering and performance*, Vol. 20, pp. 978-988, 2011.
- Park, C., Kim, M. H., Hong, S. M., Go, J. S., Shin, B. S., “A Study on the comparison mechanical properties of 3D printing Prototypes with Laminating direction”, *Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*, Vol. 24, pp. 334-341, 2015.
- Cuartas, V. M., Perrin, M., Pastor, M. L., Weleman, H, Cantarel, A., Karama, M., “Determination of the elastic properties in CFRP composites: comparison of different approaches based on tensile tests and ultrasonic characterization,” *Advances in Aircraft and Spacecraft Science*, Vol. 2, pp. 249-260, 2015.