

압출 적층 방식의 3D 프린팅 조형물에서 적층강도에 대한 고찰

박성제 · 박정현 · 이권형 · 류민영[†]

서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과

(2016년 3월 1일 접수, 2016년 4월 22일 수정, 2016년 6월 10일 채택)

Deposition Strength of Specimens Manufactured Using Fused Deposition Modeling Type 3D Printer

Seong Je Park, Jung Hyun Park, Kwon Haeng Lee, and Min-Young Lyu[†]

Department of Mechanical System Design Engineering, Seoul National University of Science and Technology,
232 Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul 01811, Korea

(Received March 1, 2016; Revised April 22, 2016; Accepted June 10, 2016)

초록: 최근에 들어 3D 프린팅의 유용성은 크게 증가하고 있으며 이의 기술 또한 빠르게 증가하고 있다. FDM (fused deposition modeling) 방식의 3D 프린팅은 조각이 매우 용이하고 다양한 열가소성 재료의 적용이 가능하여 매우 대중적이다. FDM 방식의 3D 프린팅은 비연속적 적층 방식으로 인하여 매우 낮은 적층강도를 보이는 단점이 있다. 본 연구에서는 세 가지의 재료, 즉 PLA(polylactic acid), ABS(acrylonitrile butadiene styrene), 그리고 PA6 (polyamide 6)를 사용하여 여러 온도에서 적층 방향과 적층 직각 방향의 적층강도를 비교하였다. 적층 방향의 적층 강도의 경우 적층온도의 증가에 따라 적층강도와 파단 시 연신율의 변화가 없었다. 그러나 적층 직각 방향의 적층 강도의 경우 적층온도의 증가에 따라 적층강도와 파단 시 연신율이 비례적으로 증가하였다. 적층 방향 대비 적층 직각 방향의 평균 적층강도 비율은 PLA, ABS 그리고 PA6가 각각 57.72%, 41.16% 그리고 45.99%로 나타났다.

Abstract: The 3D printing market is growing fast, and related manufacturing techniques are being developed rapidly. Fused deposition modeling (FDM) type 3D printing is simple and inexpensive, and hence is popular. Moreover, it can be used for printing various thermoplastic materials. However, its deposition strength is low because stacking melted filaments is a non-continuous process. In this study, deposition strengths along directions parallel and orthogonal to the deposition direction at three temperatures and on three materials, poly lactic acid (PLA), acrylonitrile butadiene styrene (ABS), and polyamide6 (PA6) were compared and analyzed. Parallel to the deposition direction, deposition strength did not depend on temperature, whereas along the orthogonal direction, deposition strength increased with the process temperature. For PLA, ABS, and PA6, the average deposition strengths along the orthogonal direction were 55.72%, 41.46%, and 45.99%, respectively, of the average deposition strength along the deposition direction.

Keywords: fused deposition modeling (FDM), 3D printing, deposition strength, deposition direction, orthogonal to deposition direction.

서 론

소재의 가공방법은 절삭가공, 소성가공, 캐스팅, 몰딩, 열성형 등이 있다. 최근 들어서는 적층 성형(additive manufacturing, AM)이 출현하면서 그 유용성과 장래의 전개성에 큰 관심이 집중되고 있다. 적층 성형은 rapid prototyping, rapid tooling, rapid manufacturing, 그리고 additive fabrication

technologies 등 여러 가지 다양한 용어들로 사용되는데 일반적으로 3D 프린팅이라 일컫는다.¹ 3D 프린팅은 형상 아이디어를 단기간에 3차원 형상으로 구현해 내는 기술로 시제품의 제작 과정에서 소요되는 경제적, 시간적 비용을 절약하게 해준다. 또한 복잡한 형상의 제작을 용이하게 하는 큰 장점을 가지고 있다. 이러한 장점을 바탕으로 미래에는 3D 프린팅의 주요 활동 분야가 각 산업 분야에서의 시제품 생산을 넘어 완제품 생산까지 넓어질 것으로 예측된다. 3D 프린팅 방식은 크게 fused deposition modeling(FDM), stereo lithography apparatus(SLA), selective laser sintering(SLS), plastic sheet lamination(PSL) 등으로 구분된다.^{2,3,5} 이 중 FDM 방식은 열

[†]To whom correspondence should be addressed.
E-mail: mylyu@seoultech.ac.kr
©2016 The Polymer Society of Korea. All rights reserved.

가소성 필라멘트를 열에 의해 용융시키고 노즐을 통해 압출하여 적층하는 방식이다. 이 방식은 운전이 간단하고 다양한 고분자 소재를 사용할 수 있어 가장 활발히 사용되고 있다.^{4,5}

FDM 방식 3D 프린팅의 연구 분야는 필라멘트의 공급 및 용융, 노즐부에서 용융 필라멘트의 압출 현상, 적층 궤도, 그리고 적층물의 품질 등으로 요약된다.^{6,7} 적층물의 품질은 적층물의 강도, 표면정도 즉 표면정밀도 및 표면거칠기, 그리고 전체적인 형상으로 나뉜다. 이 중에서 적층물의 강도는 단순히 형상 확인으로의 용도를 넘어서 향후 다양한 용도로의 전개를 위해서는 크게 향상되어야 할 항목이다. 적층물의 강도는 FDM 방식 적층의 특성 때문에 적층 방향과 적층 직각 방향으로의 강도가 다르다. 이러한 강도의 차이는 용융물의 접착강도가 bulk 소재의 강도보다 낮기 때문이다.^{8,9}

FDM 방식 3D 프린팅은 Figure 1과 같이 road의 적층 방식이라는 특징으로 인하여 기존 플라스틱 공정의 대부분을 차지하는 사출에 비해 낮은 강도를 보인다. FDM 방식에서 제작한 시편의 인장강도는 내부를 이루는 road들의 방향에 따라 큰 차이가 있다. 내부 road가 적층 방향(deposition direction)일 때 인장강도가 가장 높고 적층 직각 방향(orthogonal to deposition direction)일 때 인장강도가 가장 낮다. 또한 열로 용융된 필라멘트가 적층되는 방식이므로 공정 온도가 강도에 큰 영향을 줄 것으로 보인다. 적층 방향과 적층 직각 방향의 강도에 대한 연구는 많이 찾을 수 있다.⁹⁻¹¹ PLA 소재를 이용한 적층물의 변형에 관한 연구가 있고,¹² ABS 소재를 이용한 인장강도 및 충격강도 등의 기계적 물성에 관한 연구가 있다.^{8-11,13-15} PA 소재를 이용한 적층물의 연구는 기계적 물성과 치수정밀도에 관한 연구가 있다.^{14,15} 적층강도는 적층 공정 조건에 따라 다르게 나타나는데 그 중에서도 압출부의 온도에 크게 좌우된다. 3D 프린팅의 조형물의 다양한 응용을 위해서는 다양한 소재에서 다양한 적층온도에 따른 강도의 연구가 필요하다.^{2,16-18}

본 연구는 FDM 방식 3D 프린팅에서 가장 많이 사용되는 3가지 재료, 즉 PLA, ABS, 그리고 PA6에 대하여 적층하는 방향과 공정 온도를 달리하여 적층강도(deposition strength)를 비교 분석하였다. 이를 통하여 적층강도의 수준을 파악하고 적층강도 향상 방법을 모색하고자 하였다. 기존연구는 각각의 연구에서 사용하는 재료가 다르고, 또한 사용하는 3D 프린터 및 운전조건이 달라서 여러 소재의 적층물성을 객관

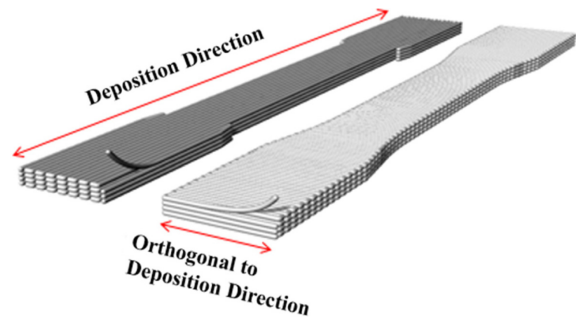


Figure 1. Tensile test specimen for deposition direction and orthogonal to deposition direction in FDM type 3D printing.

적으로 비교하기 어려웠다. 또한 필라멘트 제조사나 그레이드가 다르면 같은 소재라도 다른 물성을 보인다.¹³⁻¹⁸ 본 연구에서는 여러 재료(PLA, ABS, PA6)에서 공정조건들이 같은 상태에서 두 가지 극단적인 적층상태 즉 인장하는 방향으로 적층된 경우와 인장의 직각으로 적층된 경우의 적층강도를 적층온도에 따라 비교하였다. 소재에 따라 이 두 방향의 적층강도를 살펴보고 비교함으로써 적층물의 상대적인 적층강도를 판단할 수 있다. 본 연구는 3D 프린팅의 활용에서 소재 선택의 가이드를 해 줄 것으로 기대된다. 새로이 개발되는 3D 프린팅용 소재는 산업용으로 그의 응용을 확대하기 위해서는 적층강도를 증가시키는 것이 매우 중요하다.

실 험

실험재료. 본 연구에서는 Natural Works사의 PLA(Ingeo™ Biopolymer4032D), CHIMEI사의 ABS(General ABS POLYLAC® PA-757), PURUI사의 PA6를 사용하여 실험을 진행하였다. 이러한 소재는 3D 프린팅을 할 수 있도록 필라멘트 형상으로 보빈에 감아서 제공된다. 필라멘트의 직경은 1.75 mm이며 소재의 물성은 Table 1에 나타나 있다.

PLA는 옥수수의 전분을 이용하여 만든 친환경적 수지이며 유해요소가 없고 수축이 매우 적다는 장점을 가지고 있어 FDM의 필라멘트로 가장 널리 쓰인다. ABS는 3가지 성분, acrylonitrile, butadiene 그리고 styrene으로 구성된 copolymer로 비결정성 수지이며 성분의 비율을 조절하여 물성을 조절할 수 있다. 고온에서 점착성이 뛰어나다는 장점을 가지고 있

Table 1. Filament Used in FDM Type 3D Printing

	PLA	ABS	PA6
Filament supplier	Natural works (USA)	CHIMEI (China)	PURUI (China)
Grade	Ingeo™ biopolymer 4032D	General ABS POLYLAC® PA-757	-
Test method	ASTM D882	ASTM D638	ASTM D638
Tensile strength (MPa)	103.4	46.1	73.5
Elongation at break (%)	180	25	200

으나 적층 시 냄새가 나는 단점이 있다. PA6는 인성이 크고 충격 강도와 내구성이 우수하나 흡습성과 수축이 매우 큰 편이다.

실험장비. 본 연구에서 시편을 제작하기 위해 FDM 방식의 3D 프린터는 Rokit사(한국)의 Edison Multi2를 사용했다. Multi2의 경우 제작할 수 있는 출력물의 최대 크기는 270×148×150 mm이고 정밀도(resolution)는 x, y 방향이 11 μ m, z 방향이 2.5 μ m이다. 또한 출력 속도는 40~300 mm/s이며 최대 사용 가능한 노즐온도는 300 °C이다. 적층강도 실험을 위한 인장시험기로는 INSTRUMENTS사(영국)의 EZ20을 사용하였다. EZ20의 허용 하중은 20 kN이고 인장속도는 0.001~508 mm/min이다. 또한 최소 하중 분해능은 0.0001 N이고 로드 셀 정밀도는 0.5% 이하이다.

실험방법. 시편제작을 위해 3차원 형상의 modeling 파일을 STL파일로 슬라이싱(slicing)하여 Rokit사에서 제공하는 Creator K 프로그램을 통해 시편을 제작하였다. 인장 시편의 형상은 Figure 2와 같다.

PLA, ABS, PA6를 이용한 시편 제작 시 layer height, nozzle 직경, nozzle 속도, bed 온도를 Table 2와 같이 설정하였다. 그리고 공정온도는 변수로 하여 적층 방향과 적층 직각 방향의 시편을 5개씩 제작하였다. 수지에 따른 노즐 온도(적층 온도)는 Table 3에 나타나 있다.

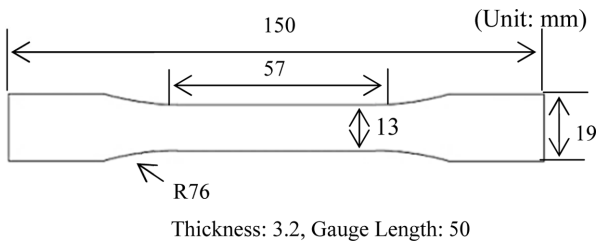


Figure 2. Tensile specimen (ASTM D638, Type No.1).

Table 2. Operation Condition of FDM Type 3D Printer

Item	Value
Layer height (mm)	0.2
Nozzle diameter (mm)	0.4
Nozzle speed (mm/s)	80
Bed temperature (°C)	90

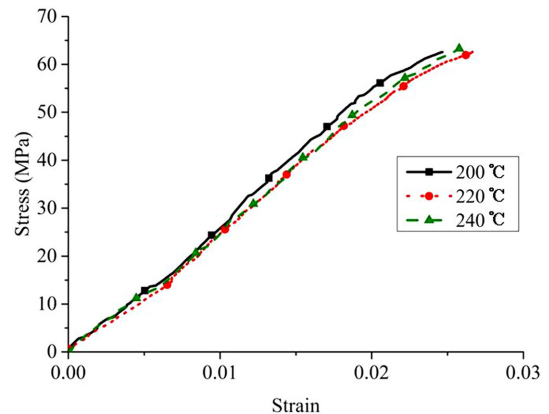
Table 3. Deposition Temperature of FDM Type 3D Printer (unit: °C)

PLA	ABS	PA6
200	210	245
220	230	255
240	250	265

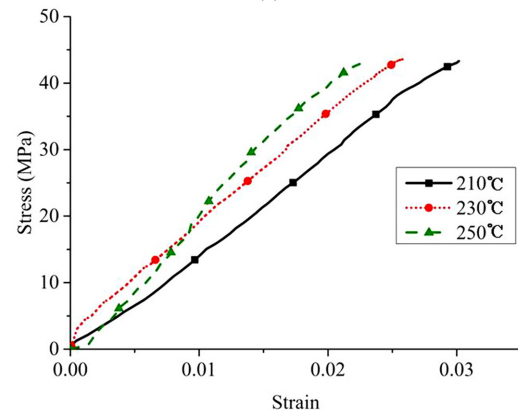
인장시험 시 인장속도는 최대한 정적 하중을 부여하기 위하여 1 mm/min로 하여 gauge length 내의 파단을 유도하였다.

결과 및 토론

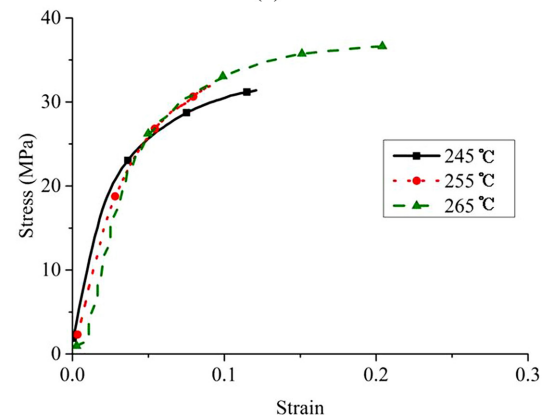
적층 방향의 강도. 서론에서 언급한 바와 같이 3D 프린팅 조형물은 적층 방향과 적층 직각 방향에서 물성이 다르게 나



(a) PLA



(b) ABS



(c) PA6

Figure 3. Tensile behaviors of the specimens by deposition direction.

타난다. 두 방향의 인장강도를 비교하기 위해 PLA, ABS, 그리고 PA6로 적층하는 방향을 달리 하여 시편을 제작하였다. Figure 3에는 적층 방향으로 제작된 인장시편의 응력-변형률 곡선이 나타나 있다. 각 소재별 적층온도 영역에서 온도를 달리하여 제작한 시편의 인장시험 결과이다. Figure 3(a)는 PLA를 200, 220, 그리고 240 °C에서 제작한 인장시편의 응력-변형률 곡선을 보여주고 있다. 모든 온도에서 유사한 크기의 인장강도를 보였다. 파단 시 연신률은 온도가 높은 경우에 높게 나타났는데 이는 적층 시 온도가 높을수록 필라멘트간 접착이 강하여 연신율이 높게 나온 것으로 판단된다. 적층온도가 높으면 각 층의 접합에 유리하다. 온도가 높을수록 두 road가 접합되는 neck radius가 증가되어 접촉면적이 넓어질 뿐만 아니라 diffusion과 healing이 좋아지고, 사슬의 entanglement가 증가되기 때문이다.¹³⁻¹⁷ 이와 유사한 경우로 사출성형에서 성형온도의 증가에 따라 weldline의 강도가 향상된다. 온도가 높을수록 표면간 diffusion이 잘되어 접합이 향상되는 것이다. Figure 3(b)는 210, 230, 그리고 250 °C에서 적층한 ABS의 인장시험 결과이다. 각 온도에서 인장강도 크기는 유사하게 나타났고, 파단 시 변형률은 온도가 가장 낮은 210 °C에서 가장 높게 나타났다. 이 경우 인장시험 중에 적층 bead 층들이 분리되면서 인장되는 현상이 나타났는데, 이때 bead들에서 배향이 일어나면서 나타난 현상이라고 사료된다. Figure 3(c)는 PA6 시편의 적층 온도에 따른 인장 특성을 보여주고 있다. 245와 265 °C의 시편에서는 파단이 일어난 후 일부 재료가 실처럼 붙어 있는 부분 때문에 응력과 변형률이 동시에 감소하는 커브를 보이고 있다. 적층 온도가 가장 높은 265 °C에서 가장 높은 응력을 보였다. 255 °C에서 적층한 시편에서 최대 응력점의 변형률이 가장 작게 나타났다. 그러나 파단 후 파단면에 붙어있는 필라멘트 밀부분이 실처럼 연신되면서 응

력이 떨어지면서 변형률이 크게 증가하였다. Table 4에는 각 소재별 인장강도(최대 응력)와 파단 시 변형률(파단이 일어나지 않은 경우는 최대 응력점의 변형률)을 나타내었다.

적층 직각 방향의 강도. Figure 4에는 적층의 직각 방향으로 제작된 시편의 인장시험 결과를 보여 주고 있다. Figure

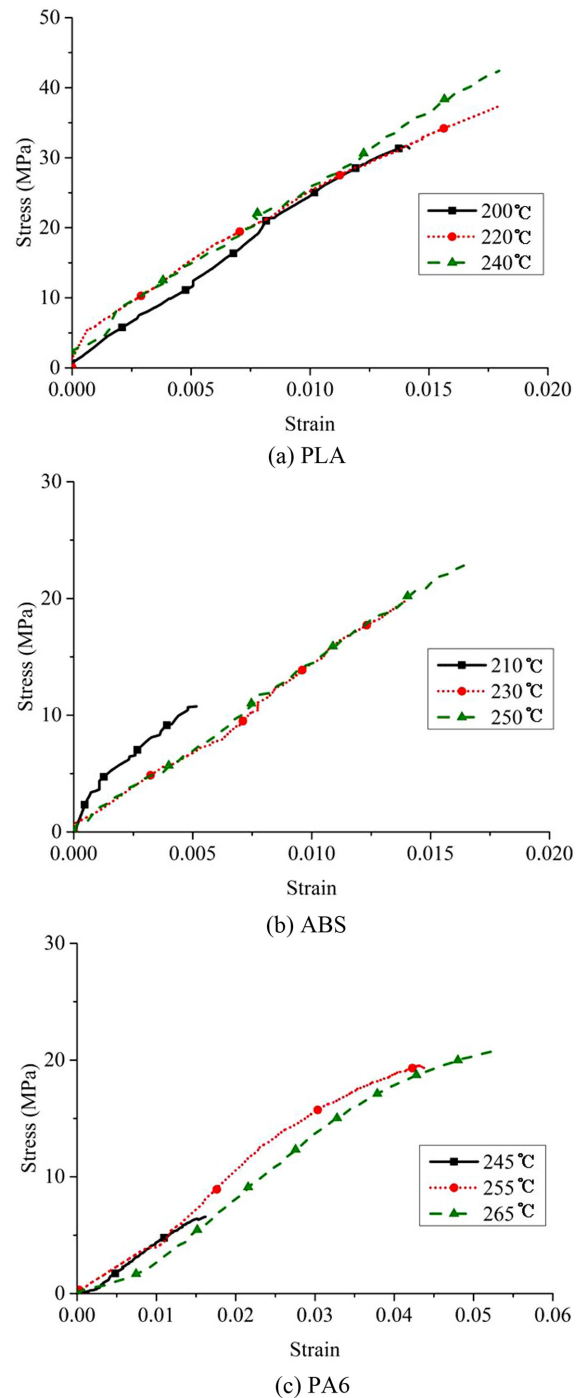


Figure 4. Tensile behaviors of the specimens by orthogonal to deposition direction.

Table 4. Tensile Strength (Maximum Stress) and Elongation at Break (or Elongation at Maximum Stress) of the Specimens by Deposition Direction

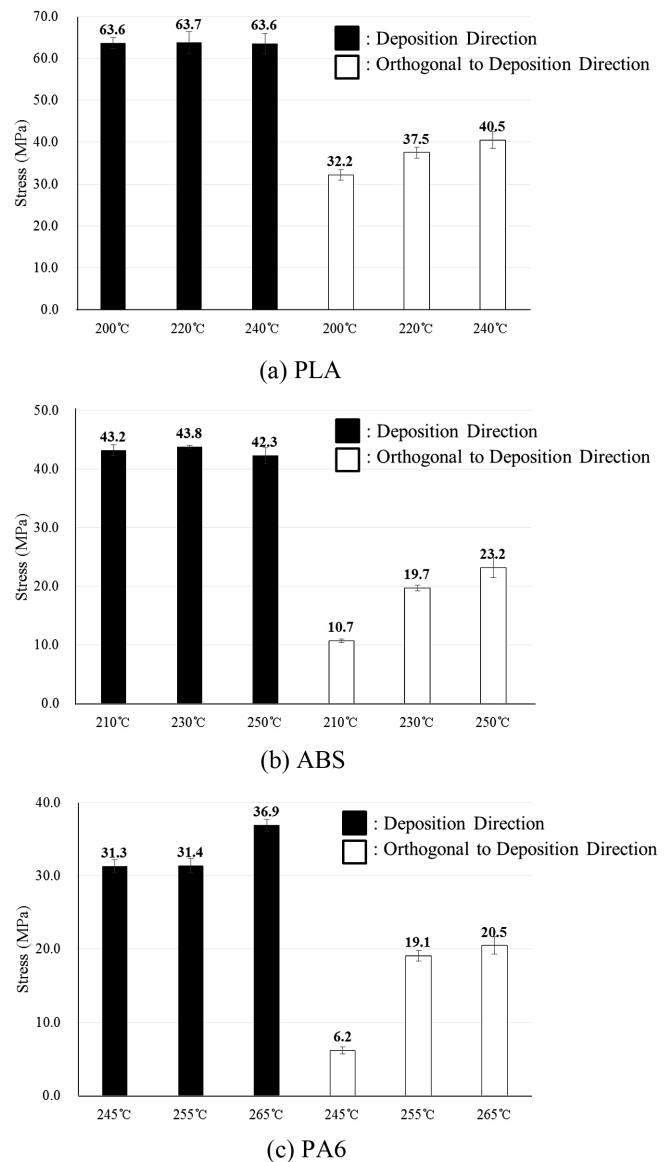
(Average/Standard Deviation)				
	Nozzle temperature (°C)	Tensile strength or maximum stress (MPa)	Elongation at break (%)	Elongation at maximum stress (%)
PLA	200	63.6/1.3	2.47/0.12	-
	220	63.7/2.6	2.64/0.28	-
	240	63.6/2.4	2.62/0.19	-
ABS	210	43.2/0.9	-	3.18/0.27
	230	43.8/0.3	2.67/0.20	-
	250	42.3/1.3	2.43/0.15	-
PA6	245	31.3/0.9	-	12.38/3.08
	255	31.4/1.0	9.20/14.84	-
	265	36.9/ 0.8	-	20.81/5.34

Table 5. Tensile Strength (Maximum Stress) and Elongation at Break of the Specimens by Orthogonal to Deposition Direction

(Average/Standard Deviation)			
	Nozzle temperature (°C)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)
PLA	200	32.2/1.2	1.469/0.176
	220	37.5/1.3	1.754/0.228
	240	40.5/2.0	1.802/0.535
ABS	210	10.7/0.3	0.526/0.076
	230	19.7/0.5	1.384/0.360
	250	23.2/1.7	1.521/0.208
PA6	245	6.2/0.5	1.634/0.054
	255	19.1/0.7	4.613/0.551
	265	20.5/1.2	5.699/0.330

4(a)는 200, 220, 240 °C에서 적층한 PLA의 결과인데 가장 높은 온도인 240 °C에서 적층한 시편에서 가장 큰 인장강도를 나타내고 있다. 적층온도와 인장강도는 비례적으로 나타났다. 파단 시 변형률 역시 적층온도와 비례하여 온도가 높을수록 높게 나타났다. Figure 4(b)는 ABS 시편의 결과이다. PLA 시편과 같이 적층온도가 높을수록 인장강도와 파단 시 연신율이 높게 나타났다. 210 °C에서 적층한 시편은 작은 연신율을 보이며 낮은 응력에서 파단되었다. Figure 4(c)는 PA6의 인장 시험 결과이다. PLA, ABS 시편과 마찬가지로 적층온도가 높을수록 인장강도와 파단 시 연신율이 높게 나타났다. Table 5는 적층 직각 방향의 인장시험 결과가 나타나 있다.

적층 방향과 적층 직각 방향의 인장특성 비교. 각 재료별 적층 방향과 적층 직각 방향의 인장강도(파단이 명확히 일어나지 않을 경우 최대 응력)를 Figure 5에 비교하였다. PLA의 경우 적층 방향의 평균 인장강도는 63.63 MPa이고 적층 직각 방향의 인장강도는 36.73 MPa이다. 적층 직각 방향이 적층 방향에 비해 약 57.72%의 인장강도를 보였다. ABS의 경우 적층 방향과 적층 직각 방향의 평균 인장강도가 각각 43.27, 17.87 MPa로 나타났다. 적층 직각 방향이 적층 방향에 비해 약 41.46%의 강도를 보였다. PA6의 경우는 적층 방향으로 평균 33.20 MPa, 적층 직각 방향으로 평균 15.27 MPa의 강도를 보였다. 적층 직각 방향의 강도는 적층 방향의 강도에 비해 약 45.99%를 보였다. 전체적으로 보면 적층 방향의 강도는 적층 온도에 크게 의존하지 않았으나 적층 직각 방향의 인장강도는 적층온도에 크게 의존되었다. 즉, 적층온도가 높을수록 적층강도는 증가하였다. PLA, ABS, 그리고 PA6의 bulk 소재의 인장강도는 각각 103.4, 46.1 MPa, 그리고 73.5 MPa이므로 각 소재의 적층 방향의 인장강도는 bulk 소재에 비해 각각 61.54, 93.49%, 그리고 45.17%를 보였다.

**Figure 5. Comparison of tensile strength for deposition direction.**

Bulk 소재의 인장강도에 비해 적층 직각 방향의 강도는 PLA, ABS, 그리고 PA6에서 각각 35.52, 38.76%, 그리고 20.77%를 보였다.

결론

본 연구는 FDM 방식의 3D 프린터에서 PLA, ABS, 그리고 PA6를 이용하여 공정 온도에 따라 적층 방향과 적층 직각 방향에 대하여 적층강도를 비교 분석하였다.

적층 방향의 경우 온도의 증가에 따른 적층강도와 파단 시 연신율의 큰 변화가 없었다. 그러나 적층 직각 방향에서는 온도의 증가에 따라 적층강도와 파단 시 연신율이 비례적으로

증가하였다.

PLA, ABS, 그리고 PA6 소재는 적층 방향 대비 적층 직각 방향으로 인장강도가 각각 57.72, 41.46%, 그리고 45.99%로 나타났다. 3D 적층물은 적층면의 온도가 높을수록 접착력이 강해지는 것을 확인할 수 있었다. 적층 방향의 인장강도는 원 소재의 bulk 소재의 인장강도에 비해 PLA, ABS, 그리고 PA6 에서 61.54, 93.49%, 그리고 45.17%를 보였다. 3D 프린팅 조형물의 강도는 원소재의 bulk 강도에 크게 미치지 못하므로 이의 향상을 위한 다양한 연구가 필요하다.

감사의 글: 본 논문은 산업통상자원부 산업핵심기술개발사업으로 지원된 연구결과입니다(10051680, 3D 프린팅용 친환경 고강도 고분자 소재 개발).

참 고 문 헌

1. D. G. Ahn, S. H. Lee, K. D. Kim, and D. Y. Yang, *Trans. Mater. Process.*, **11**, 323 (2002).
2. G. D. Kim and J. Y. Kim, *Transact. Korea Soc. Machine Tool Eng.*, **15**, 56 (2006).
3. C. Park, M. H. Kim, S. M. Hong, J. S. Go, and B. S. Shin, *J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng.*, **24**, 334 (2015).
4. R. N. Chuk and V. J. Thomson, *Rapid Prototyping J.*, **4**, 185 (1998).
5. S. Kumar and J. P. Kruth, *Mater. Des.*, **31**, 850 (2010).
6. H. S. Ramanath, M. Chandrasekaran, C. K. Chua, K. F. Leong, and K. D. Shah, *Key Eng. Mater.*, **334**, 1241 (2007).
7. W. Ma, W. C. But, and P. He, *Computer-Aided Design*, **36**, 1309 (2004).
8. M. Dawoud, I. Taha, and S. J. Ebeid, *J. Manuf. Processes*, **21**, 39 (2016).
9. S. H. Ahn, M. Montero, D. Odell, S. Roundy, and P. K. Wright, *Rapid Prototyping J.*, **8**, 248 (2002).
10. C. W. Ziemian, D. E. Cipoletti, S. N. Ziemian, M. N. Okwara, and K. V. Haile, *Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium 2014*, 525 (2014).
11. O. S. Es-said, J. Foyos, R. Boorani, M. Mendelson, and R. Marloth, *Mater. Manuf. Processes*, **5**, 107 (2000).
12. X. Liu, S. Li, Z. Liu, X. Zheng, X. Chen, and Z. Wang, *Int. Adv. Manuf. Technol.*, **79**, 1117 (2015).
13. M. Montero, S. Roundy, D. Odell, S. H. Ahn, and P. K. Wright, *Proceedings of Rapid Prototyping and Manufacturing Conference*, 1 (2001).
14. C. M. Haid, Doctoral dissertation, Massachusetts Institute of Technology (2014).
15. G. D. Kim and J. H. Sung, *J. Kor. Soc. Precis. Eng.*, **23**, 187 (2006).
16. Q. Sun, G. M. Rizvi, C. T. Bellehumeur, and P. Gu, *Rapid Prototyping J.*, **14**, 72 (2008).
17. G. D. Kim and Y. T. Oh, *Proc. IMechE, Part B: J. Engineering Manufacture*, **222**, 201 (2008).
18. B. V. Reddy, N. V. Reddy, and A. Ghosh, *Virtual Phys. Prototyp.*, **2**, 51 (2007).