

FDM 방식 3D 프린팅에서 제작 조건에 따른 기계적물성치와 형상정밀도의 실험적 비교

김기대*.#

*대구가톨릭대학교 기계자동차공학부

Comparison of Mechanical Properties and Form Accuracy in FDM 3D Printing Based on Building Conditions

Gi-Dae Kim*.#

*Faculty of Mechanical and Automotive Engineering, Daegu Catholic Univ.

(Received 01 May 2021; received in revised form 28 June 2021; accepted 11 July 2021)

ABSTRACT

In this study, we experimentally evaluated the mechanical properties and geometric form accuracy in FDM 3D printing processes based on the printing direction, building direction, and layer thickness. The specimen test results showed that the tensile strength increased by over 33% in the printing direction compared to the direction perpendicular to printing and the tensile strength becomes larger as the layer thickness decreased. Furthermore, the tensile and impact strengths in the building direction were significantly reduced due to the difference in the interlayer joining and bonding strengths of the fused material. Additionally, shrinkage of the material due to phase change induced curl distortion especially in thin and long 3D-printed products, which increased as the layer thickness increased.

Key Words : FDM(용착 적층 모델링), Mechanical Property(기계적 물성치), Curl Distortion(곡률변형), Building Condition(적층조건)

1. 서 론

최초로 개발된 3D 프린팅 방식인 SLA(Stereo Lithography Apparatus) 방식은 광경화성 액상수지 재료(photo-polymer)를 사용하여 사용환경이 나쁘고 장비 가격이 고가이며 적층 후 세척과 후경화(postcuring) 등 복잡한 후처리 공정이 필요하였다. 이러한 문제점들을 극복하기 위하여 FDM(Fused

Deposition Modeling) - 학술적으로 FFF(Fused Filament Fabrication) 또는 ME(Material Extrusion)으로도 불림 - 방식의 3D 프린팅 공정이 새롭게 개발되었다. 얇고 긴 필라멘트 형태의 열가소성(thermoplastic) 고체 재료를 응고점 바로 위 온도까지 높여 액상으로 만들고 이를 노즐로 압출시킨 직후 곧바로 냉각시켜 고체로 굳히는 원리를 이용한다. 이 방식은 재료비가 상대적으로 저렴하고 재료 교환이 쉬워서 다양한 성질을 가진 재료를 사용할 수 있다. 특히 장비 구조와 공정이 상대적으로 간단하고 재료 취급의 편의성 등을 고려하여 현재 판

Corresponding Author : gidkim@cu.ac.kr

Tel: +82-53-850-2724, Fax: +82-53-359-6620

매되고 있는 저가형 3D 프린터는 거의 모두 이 방식을 사용하고 있다. 과학기술정보통신부 조사에 따르면 2020년 기준으로 FDM 방식의 점유율은 37.8%로 2위인 SLA(20.7%) 방식에 비해 월등히 앞서는 것으로 나타났다^[1]. 하지만 기계식 리니어모터로 노즐을 이동시켜가면서 재료를 압출하기 때문에 단면 제작 속도가 느리고 적층 두께가 두꺼워서 제품 표면이 거친 문제점을 가지고 있다.

저가형 FDM 방식 3D 프린터의 경우 적층 전에 적층 방향과 지지대의 범위 설정 등 단순한 기능만을 사용할 수 있지만 고가 장비의 경우 보통 소프트웨어 고급기능을 활용하여 지지대의 모양과 분포 형태, 적층 방향, 적층 두께, 노즐의 출력 방향, 그리고 출력 속도 및 출력 간격 등 여러 가지 공정 변수를 변경할 수 있고 그에 따라 3D 프린팅 제작물의 성능이 달라진다.

시제품으로 가장 많이 활용되는 3D 프린팅 제작물은 제품의 형상 정밀도와 기계적 물성치가 대단히 중요한 요구 조건이다. 본 연구에서는 FDM 방식에서 적층 방향과 적층 두께, 그리고 노즐의 출력 방향 등 공정 변수가 달라지면 제작물의 인장강도와 충격강도가 어떻게 달라지는지, 특히 공정 변수의 변화에 따라 제품의 형상 정밀도가 어떻게 달라지는지 관찰하고 FDM 3D 프린팅 제품 정밀도와 기계적 물성치를 향상시키기 위한 제작 조건을 파악하고자 한다.

2. 선행연구 고찰

FDM 공정에서 제작 조건의 변화에 따른 시편의 강도 등 기계적 물성치의 변화를 연구한 사례는 많이 찾아볼 수 있으나, 제작 조건이 시편의 변형 등 형상 정밀도에 미치는 연구는 미흡하다.

2차원 단면을 한층 씩 적층하는 3D 프린팅 공정에서 재료가 액체에서 고체로 상변화가 일어나면서 수축이 발생하고 이러한 순차적인 단면 수축 현상은 Fig. 1과 같이 적층 방향의 수직 방향으로 곡률 변형(curl distortion)을 필연적으로 발생시킨다^[2]. 이러한 곡률 변형은 특히 액상수지 재료를 레이저로 고화시키는 SLA 공정에서 가장 크게 발생한다. 하지만 FDM 방식 역시 노즐 압출 전후에서 순간적인

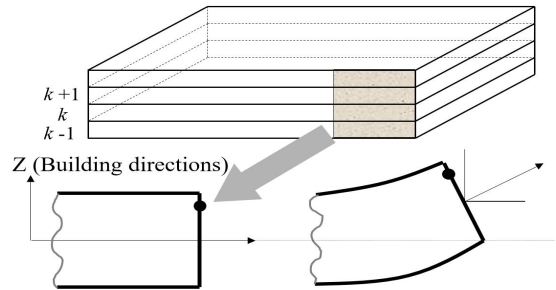


Fig. 1 Curl distortion in 3D printing^[2]

재료의 상변화가 진행되기에, 특히 제작물이 적층 방향으로 얇고 출력 방향으로 긴 형상이라면 이러한 곡률 변형으로 인한 형상 정밀도의 저하가 심각해질 수 있기 때문에 곡률 변형을 최소화시킬 수 있는 공정 조건을 찾아야 한다.

FDM 공정에서 공정 변수가 출력 제품의 이방성(anisotropy)에 미치는 영향에 관한 연구를 살펴보면 인장시험과 굽힘시험을 통해 적층 방향에 따라 출력물에 비등방성이 존재함을 확인하였으며^[3], 여러 제작 변수 중 필라멘트 재료 사이의 간격, 출력 방향, 그리고 적층 방향이 제작물의 기계적 물성치에 영향을 크게 주는 반면 노즐과 플랫폼의 온도, 그리고 출력 속도 등의 영향은 상대적으로 작은 것으로 확인되었다^[4]. 다양한 3D 프린팅 제품의 기계적 물성치를 측정된 결과 적층 방향의 영향은 압축강도보다 인장강도가 훨씬 더 컸으며, 단면 방향보다 적층 방향의 인장강도가 감소하였고, FDM과 PJP(PolyJet Printing) 방식은 적층 방향의 영향이 매우 크고 SLS(Selective Laser Sintering) 방식은 영향이 미미하였으며 SLA 방식의 경우에는 오히려 단면 방향보다 적층 방향의 인장강도가 더 큰 것으로 나타났다^[5]. 제작물의 형상 정밀도를 비교한 연구에서는 FDM 방식이 SLA 방식에 비해서는 조금 낮지만 SLS 방식과 대등하거나^[5], 오히려 FDM 방식이 치수 정확도 오차가 가장 작게 나타난 연구 결과도 찾아볼 수 있다^[6].

여러 연구 결과를 통해 서로 유사한 방법으로 시험을 하였더라도 그 결과가 장비의 사용환경과 재료의 상태, 그리고 장비 파라미터 설정에 따라 일부 상이하게 나타나는 것을 확인하였다. 따라서 각 공정 변수의 영향 혹은 3D 프린팅 방식 자체의 특

성을 규정 짓기 위해서는 각각의 연구에서 실험 방법 및 시험 조건과 결과 해석을 면밀히 비교 검토해야 한다.

3. 연구 내용 및 실험 방법

3.1 기계적 물성치 변화 측정

기존의 3D 프린팅 출력물은 설계 부품을 시각화 하기 위한 시제품으로서 많이 사용되었으나, 최근 들어서는 사용자가 직접 사용하기 위해 소량으로 제작하는 최종사용품(end-use part)으로서의 용도가 더욱 증가하고 있다. 따라서 3D 프린팅 제작물의 기계적 물성치, 그중에서도 특히 외부 하중과 충격을 견디기 위한 강도(strength)와 인성(toughness), 즉 충격강도가 커야 하며 본 연구에서는 이를 정량적으로 측정하고 평가하기 위하여 Fig. 2와 Fig. 3과 같이 ASTM(American Society for Testing and Materials) 기준에 의거한 강화 플라스틱 강도 측정용 시편을 제작하였다. 자세한 시험 조건은 Table 1에 나타나 있다.

3D 프린팅 공정 변수(제작 조건)에 따른 시편의 기계적 물성치를 확인하기 위하여 공정 변수를 다양하게 변화시켜가면서 시편을 제작하였다. 우선, 2차원 단면 내부를 채우기 위한 노즐의 이동방향(출력 방향, printing direction)을 Fig. 4와 같이 (a) 시편 길이 방향(0°) (b) 길이 방향에 대해 수직한 방향(90°) (c) 0°와 90°로 한 층씩 번갈아 가면서 출력 (d) FDM 공정의 일반적인 조건인 45°와 -45°로 한

Table 1 Experimental conditions

Apparatus	3D Printing	Fortus 380MC		
	Strength-test	Instron 5982		
	Impact-test	Tinius Olsen model 892		
	CMM	Hexagon Metrology CROMA 8.10.6.		
	Material	ABS M30		
Building conditions	Layer thickness[mm]	0.178	0.254	0.33
	Raster width[mm]	0.356	0.508	0.66
	Number of contours	2 line		

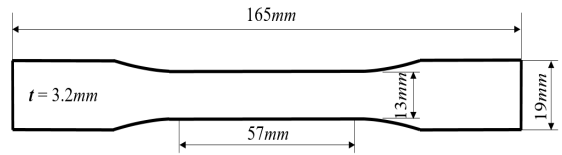


Fig. 2 Tensile-strength test specimen (by ASTM D 638-14, Test speed: 50mm/min)

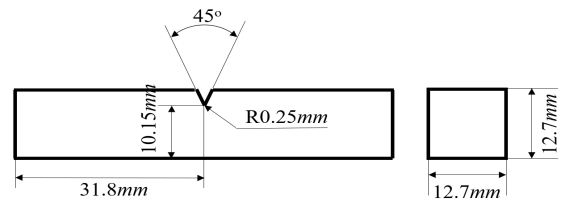
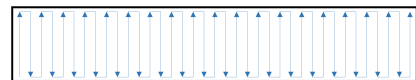


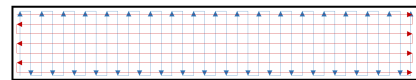
Fig. 3 Impact-strength(Izod) test specimen (by ASTM D 256-10(2018))



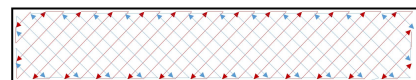
(a) 0° printing direction



(b) 90° printing direction



(c) 0° and 90° alternate printing direction



(d) 45° and -45° alternate printing direction

Fig. 4 Printing directions for 2D layer formation

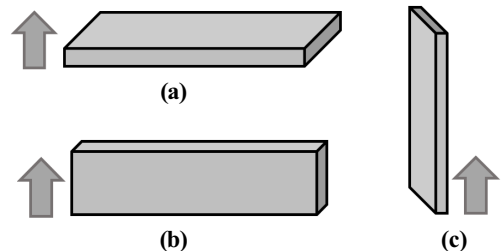


Fig. 5 Building direction of (a) thickness (b) width (c) length for tensile-strength test specimen



Fig. 6 Photograph of test specimens in platform

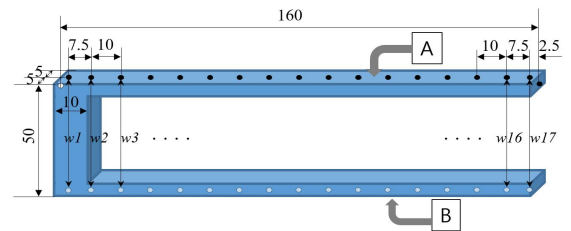
층씩 번갈아 가면서 출력하면서 시편을 제작하였다. 또한 Fig. 5와 같이 적층 방향을 (a) 두께 방향, (b) 너비 방향, 그리고 (c) 길이 방향으로 하여 제작하여 각 시편의 강도를 비교하였다. 마지막으로 적층 두께를 FDM 공정에서 가장 일반적으로 설정하는 0.254mm(0.01 inch)뿐만 아니라 0.178mm, 그리고 0.33mm 이렇게 3가지로 바꾸어가면서 제품을 제작하고 적층 두께에 따른 강도의 변화를 살펴보았다. Fig. 6과 같이 모든 시편은 각각 동일한 조건으로 3개씩 제작하였고, 이들의 평균값을 구해 시험 결과를 비교, 해석하였다.

3.2 형상 정밀도 변화 측정

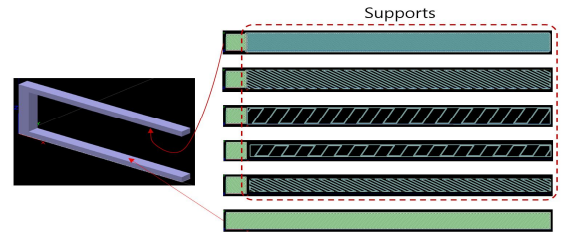
본 연구에서는 3D 프린팅 공정에서 곡률변형에 의한 형상 정밀도 변화를 측정하기 위하여 Fig. 7과 같이 길이 160mm, 폭 50mm, 두께 10mm인 “ㄷ”자 모양의 시편을 모델링하고 적층 방향과 적층 두께를 변화시켜가면서 제작하였다. 3D 프린팅 제작 시 각 공정 변수의 변화가 곡률변형에 어떠한 영향을 미치는지, 그리고 이로 인해 시편의 폭(50mm)이 길이 방향에 따라 어떻게 변화하는지 살펴보았다. 강도 측정용 시편 제작과 마찬가지로 적층 방향을 폭 방향, 두께 방향, 그리고 길이 방향으로 변화시키고, 적층 두께를 0.178mm, 0.254mm, 0.33mm로 변화시켜가면서 시편을 제작하였다.

Fig. 7(a)와 같이 길이 방향 양쪽 면(A면, B면)에 10mm 간격(양 끝에 위치한 지점에서는 2.5mm 내부로 이동)으로 각각 17개씩 총 34개 포인트를

CMM으로 측정하여 적층 방향과 적층 두께가 변화함에 따라 곡률변형에 따른 형상 정밀도 변화를 측정하였다. Fig. 7(b)는 높이에 따라 아래면부터 지지대 단면 형상의 변화를 보여주고 있고, Fig. 7(c)는 시편 적층이 완료된 후 지지대를 제거하기 전 사진이며, Fig. 7(d)는 예상되는 곡률변형 형태를 시각적으로 보여주고 있다.



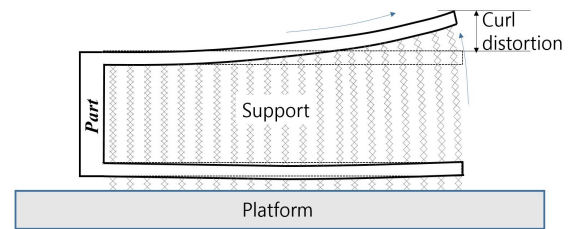
(a) Shape of specimen



(b) Variation of supports according to layers



(c) photograph with supports in platform



(d) Expecting curl distortion

Fig. 7 Specimen for measuring geometric form accuracy

4. 실험 결과

4.1 기계적 물성치 비교 결과

Fig. 8은 노즐의 출력 방향에 따른 인장강도의 변화를 측정된 결과이다. 시험 결과 Fig. 4(b)처럼 출력 방향에 수직인 방향으로의 인장강도(28.7Mpa)는 Fig. 4(a)처럼 출력 방향으로의 인장강도(38.2Mpa)에 비해 약 24.9% 감소하였으며, 이는 기존의 연구결과^[7]와 경향이 일치한다. FDM 방식 기본 출력 경로인 45°와 -45°로 한 층씩 번갈아가면서 출력하며 제작한 시편의 인장강도(30.5Mpa)는 인장 방향과 동일한 방향으로만 출력하여 제작한 시편의 강도(38.2Mpa)에 비해 약 20.2%나 낮은 것으로 나타났으며, 출력 경로 방향을 0°와 90°로 교차하여 제작하였을 경우(30.6MPa)와도 거의 비슷한 결과를 얻었다.

Fig. 9는 노즐의 출력 방향을 45°와 -45°로 한 층씩 교차하는 기본 조건을 적용하고 그림과 같이 적층 방향을 다르게 하여 제작하였을 경우 시편의 인장강도의 변화를 보여주고 있다. 시험 결과 시

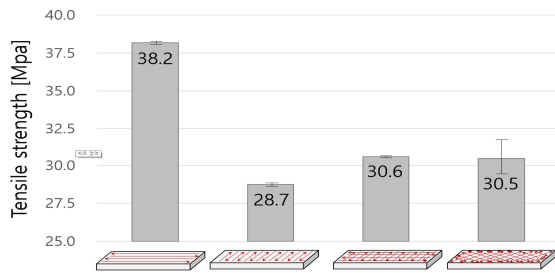


Fig. 8 Variation of tensile strength according to printing direction

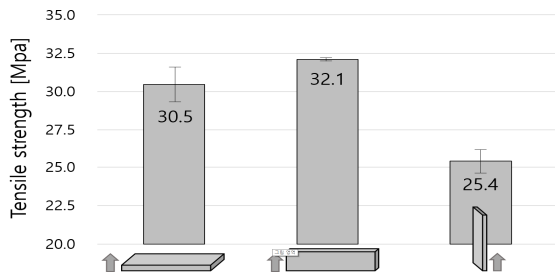


Fig. 9 Variation of tensile strength according to building direction

편을 길이 방향으로 세워서 제작하였을 경우 강도가 25.4MPa로 가장 낮았다.

3D 프린팅 공정은 2차원 단면상에서 재료가 고화되면서 수지 분자가 결합되고, 또한 단면 층간에 연속적으로 접합이 되면서 3차원 형상이 생성된다. 선행연구^[5]에 의하면 SLA 방식에서는 층간의 접합 강도가 수지 분자 간의 결합 강도보다 더 커서 단면 방향보다 적층 방향으로의 강도가 더 크지만, FDM, SLS 방식 등에서는 적층 방향의 강도가 감소한다. 특히 FDM 방식의 경우 층간 접합을 위해 레이저나 결합제 등을 사용하지 않고 오로지 재료의 상변화에 의해서 아래층과 접합되는 구조이기 때문에 다른 방식에 비해서 적층 방향에 따라 제작물의 기계적 물성치의 차이가 크게 날 수밖에 없다.

한편 각 단면의 외곽선(contour)이 인장을 가하는 방향으로 향할 때, 외곽선의 주사 횟수를 증가시키면 시편의 강도와 강성이 증가한다^[8]. 본 연구에서는 단면 내부를 둘러싸는 외곽선을 2줄 주사하는 기본 조건으로 모든 시편을 제작하였다. Fig. 9에서 시편을 폭 방향으로 세워서 적층(32.1MPa)하면 시편을 넓혀서 두께 방향으로 적층(30.5MPa)는 경우에 비해 인장강도가 약간 증가하는데 이는 인장방향으로 주사되는 외곽선의 총 누적 길이 차이 때문으로 판단되며, 이러한 시험 결과는 기존의 연구 결과^[6]와도 일치한다.

적층 방향이 충격강도에 미치는 영향도 인장강도와 동일한 경향을 보였지만 그 영향력은 더 큰 것으로 나타났다. Fig. 10에서와 같이 시편을 길이 방향으로 세워서 노치 생성 방향이 단면 방향과 일치하도록 제작하면 충격강도가 42.0J/m에 불과하였지만, 시편을 넓혀서 노치를 윗면에 생성하였을 경우 111.7J/m로 증가하였고, 시편을 옆으로 세워서 노치를 수직 방향으로 생성하였을 경우 노치 방향과 수직 방향으로 중첩되어 출력된 외곽선들이 시편의 강도를 증가시켜서 121.7J/m로 더욱 증가하였다. 결국 FDM 방식에서는 상변화로 인한 수지의 결합 강도에 비해 단면 층간 접합 강도가 약해서 적층 방향의 강도는 단면 방향에 비해 인장강도는 약 19% 감소하고, 충격강도는 약 64%나 감소하는 것으로 나타났다.

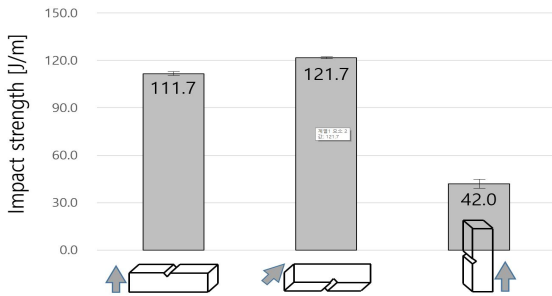


Fig. 10 Variation of impact strength according to building direction

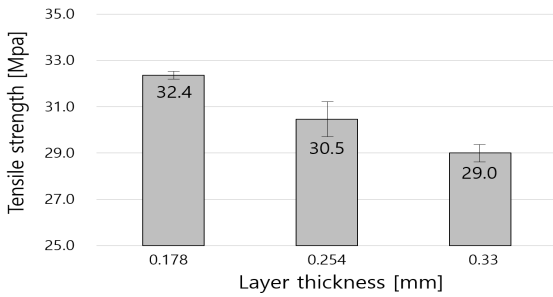


Fig. 11 Variation of tensile strength according to layer thickness

일반적으로 다른 3D 프린팅 방식에서는 단면의 두께를 보통 0.05~0.1mm로 하는데 비해 FDM 방식은 용해된 점성이 높은 재료를 노즐의 구멍을 통해 압출시켜야 하기에 보통 0.254mm의 상대적으로 두꺼운 두께로 적층한다. 또한 크기가 다른 노즐을 사용하여 적층 두께를 조절하는데 Table 1과 같이 적층 두께가 작으면 동일한 부피를 제작하기 위해 주사 너비(raster width)에 해당하는 주사 간격을 줄이고 주사 횟수를 증가시켜 결과적으로 제작물의 강도가 증가하게 된다. Fig. 11은 적층 두께가 변화할 때 인장강도 크기 변화를 측정된 결과인데, 적층 두께를 얇게 할수록 인장강도가 증가한다는 것을 확인할 수 있으며, 이는 기존의 연구 결과와도 일치한다^{9,10}.

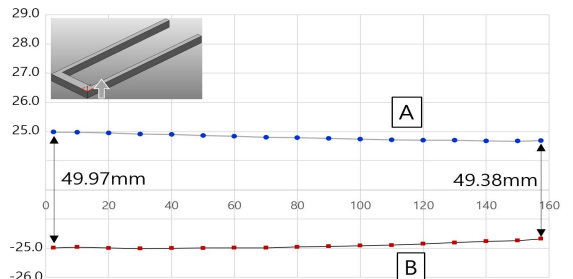
4.2 형상 정밀도 비교

4.2.1 적층 방향에 따른 형상 오차

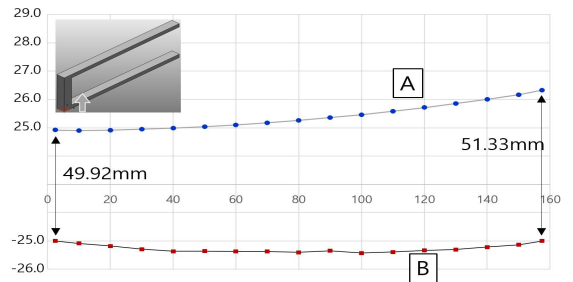
Fig. 7의 형상 정밀도 측정용 시편을 적층 방향을 변화시켜가면서 제작하고 각각의 경우 형상 정밀도

의 변화를 관찰하였다. 먼저 Fig. 12에서 (a) 눕혀서 적층, (b) 폭 방향으로 세워서 적층, 그리고 (c) 길이 방향으로 세워서 적층한 경우 각각 시편의 길이(160mm)를 측정된 결과 평균값은 각각 (a) 159.78mm, (b) 159.82mm, (c) 159.87mm로 적층 방향과 관계없이 거의 일정하게 제작된 것으로 나타났다. 이것은 시편 제작에 사용된 FDM 장비가 각 방향 스케일링 보정량을 잘 설정하였다는 것을 의미한다.

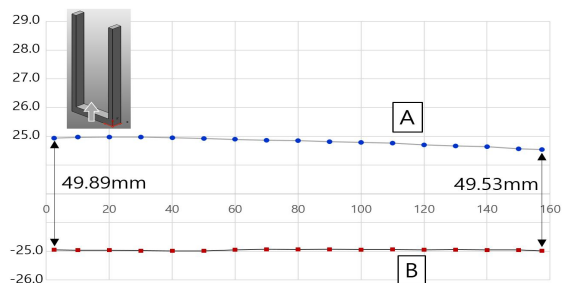
Fig. 12(a)에서처럼 시편을 눕혀거나 Fig. 12(c)에서처럼 길이 방향으로 세워서 제작한 경우에는 시편 양면(A, B)의 제작 조건이 동일하기 때문에 시



(a) Thickness-direction



(b) Width-direction



(c) Length-direction

Fig. 12 Shape distortion according to building direction (layer thickness=0.254mm)

편의 형상은 거의 대칭이었으나 시편의 폭은 길이 방향으로 조금씩 좁아지는 것으로 나타났다.

이에 반하여 Fig. 11(b)처럼 폭 방향으로 세워서 제작한 경우에는 Fig. 7(c)에서 보이는 것과 같이 적층 방향의 수직 방향, 즉 시편의 길이 방향으로 곡률변형이 발생하였음을 확인할 수 있다. 플랫폼과 붙어 있는 아랫면(B면) 보다 플랫폼의 영향에서 벗어난 윗면(A면)의 곡률변형이 훨씬 더 크기 때문에 시편의 폭이 51.33mm까지 벌어졌음을 확인하였다.

4.2.2 적층 두께가 곡률변형에 미치는 영향

형상 정밀도 시편을 폭방향으로 세워서 제작하면 곡률변형이 발생하는데, 이때 적층 두께에 따른 곡률변형의 크기를 비교하였다. 시편 형상이 최대로 벌어진 폭의 변화를 살펴보면 Fig. 13(a)에서 적층 두께를 0.178mm로 제작하였을 경우 50.68mm, Fig. 12(b)에서 적층 두께가 0.254mm일 때 51.33mm, Fig. 13(b)에서 적층 두께를 0.33mm까지 증가시켰을 경우 폭이 53.5mm까지 커져 육안으로도 곡률변형에 의한 시편 형상 변화를 확인할 수 있을 정도로 형상 정밀도가 감소하였다. 시편의 곡률변형은 각

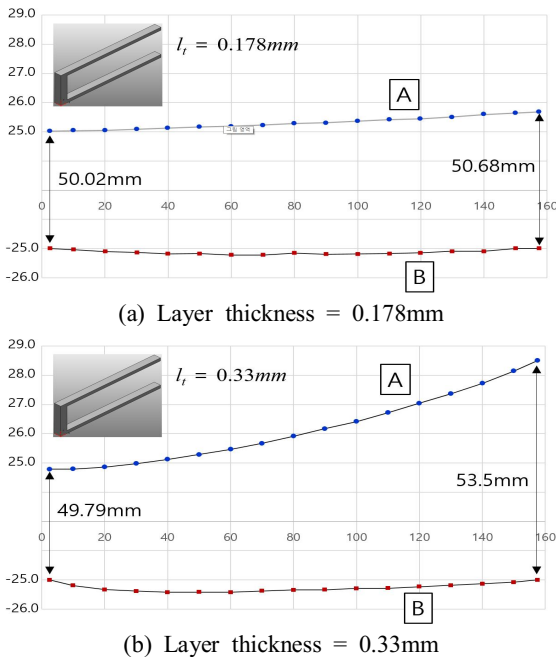


Fig. 13 Curl distortion according to layer thickness

층에서 발생하는 재료 상변화에 의한 수축량의 합으로 발생하는데 적층 두께가 두꺼운 경우 수축 횟수 감소 영향보다는 한 번에 발생하는 수축량의 증가 영향이 더 커서 결과적으로 곡률변형이 더 증가하는 것으로 나타났다.

5. 결론

FDM 3D 프린팅 공정에서 제작 조건에 따른 기계적 물성치와 형상 정밀도의 변화를 측정한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 노즐 출력 방향의 인장강도는 이에 수직인 방향에 비해 33% 이상 증가하였다.
2. 한 층씩 교대로 서로 수직인 방향으로 출력하면서 적층한 시편의 인장강도는 한 방향으로만 출력하여 적층한 후 출력 방향으로 측정된 인장강도에 비해 20% 이상 감소하였다.
3. 단면 층간 접합 강도와 용해된 재료의 결합 강도의 차이 때문에 적층 방향으로의 시편의 강도가 크게 감소하였으며, 적층 방향의 인장강도는 단면 방향에 비해 약 19%, 충격강도는 약 64% 감소하였다.
4. 적층 두께를 얇게 할수록 주사횟수가 증가하여 시편 형상을 더 촘촘하게 채워 출력 제품의 인장강도가 증가하였다.
5. 재료의 상변화로 인한 수축 작용으로 적층 방향에 수직인 방향, 즉 단면의 길이 방향으로 곡률변형이 발생한다. 적층 두께가 두꺼울수록 각 층에서 발생하는 수축량이 증가하여 곡률변형이 커지며, 특히 얇고 긴 형상의 제품의 경우 형상 정밀도 향상을 위해 이러한 곡률변형을 최소화시킬 수 있는 방향으로 적층 방향을 결정해야 한다.

REFERENCES

1. 2020 3D Printing Industry Survey, Ministry of Science and ICT & National IT Industry Promotion Agency, 2020.

2. Kim, G. D., Lee, J. K., "Prediction of Curl Distortion using Classical Lamination Theory in Stereolithography", Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 22, No. 11, pp. 210-217, 2005.
3. Yoon, J. I., "Study of the Mechanical Properties and Orthotropy of ABS Materials Fabricated by FDM Printing", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 17, No. 5, pp. 143-148, 2018.
4. Enrique, C. U., Eduardo, B., Viridiana, T. O., Byron P., Ciro, A. R., Armando, R. F., "Characterization of the Mechanical Properties of FFF Structures and Materials: A Review on the Experimental, Computational and Theoretical Approaches", Materials, Vol. 12, Issue 6, 895, 2019.
5. Kim, G. D., Oh, Y. T., "A benchmark study on rapid prototyping processes and machines: quantitative comparisons of mechanical properties, accuracy, roughness, speed, and material cost", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, Vol. 222, No. 2, pp. 201-215, 2008.
6. 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, No. 3, pp. 334-341, 2015.
7. Durgun, I., Ertan, R., "Experimental investigation of FDM process for improvement of mechanical properties and production cost", Rapid Prototyping Journal. Vol. 20, Issue 3, pp. 228-235, 2014.
8. Griffiths, C. A., Howarth, J., Rowbotham, G. D. A., Rees, A., "Effect of Build Parameters on Processing Efficiency and Material Performance in Fused Deposition Modelling", Procedia CIRP Vol. 49, pp. 28-32, 2016.
9. Tymrak, B. M., Kreiger, M., Pearce, J. M., "Mechanical properties of components fabricated with open-source 3-D printers under realistic environmental conditions", Materials & Design Vol. 58, pp. 242-246, 2014.
10. Uddin, M.S., Sidek, M.F.R., Faizal, M.A., Ghomashchi, R., Pramanik, A., "Evaluating Mechanical Properties and Failure Mechanisms of Fused Deposition Modeling Acrylonitrile Butadiene Styrene Parts", Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 139, Issue. 8, pp. 08101, 2017.