

## 적층조형 폴리머 재료의 기계적 물성 연구

김동범\* · 이인환\* · 조해용\*†

\* 충북대학교 기계공학부

### A Study on the Mechanical Properties of Additive Manufactured Polymer Materials

Dongbum Kim\*, In Hwan Lee\* and Hae Yong Cho\*†

\* Dept. of Mechanical Engineering, Chungbuk Nat'l Univ.

(Received February 12, 2015 ; Revised April 8, 2015 ; Accepted May 7, 2015)

**Key Words:** Additive Manufacturing(AM 적층조형), Rapid Prototyping(RP 쾌속조형), 3D Printing, Fused Deposition Modeling(FDM), PolyJet, Stereolithography Apparatus(SLA), Tensile Testing(인장시험)

**초록:** 적층조형(additive manufacturing, AM)은 액체, 고체 상태인 폴리머, 금속 등의 재료를 층층이 쌓아서 3 차원 형상을 제조하는 기술이다. AM 기술은 제품 개발 초기단계에서 시제품 제작에 주로 사용되었으나, 최근 들어 이를 실제 제품제작에 적용하는 것에 대한 관심이 높아지고 있다. 한편 AM 기술에서 적층방향은 최종성형품의 기계적 물성에 영향을 줄 수 있다. 따라서 본 연구에서는 폴리머 재료를 사용하는 대표적인 AM 기술인 FDM, PolyJet 그리고 SLA 방식으로 제작되는 재료의 기계적 물성을 실험을 통해 파악하여 보았다. 이때 시험편의 형상은 ASTM D 638 을 참고하였고 적층방향을 달리하여 성형하였다. 시험편의 인장시험으로부터 얻은 응력-변형률 선도를 바탕으로 기계적 물성을 조사하였다. 또한 시험편의 파단부를 SEM 촬영하여 물성차이의 결과를 분석하였다.

**Abstract:** Traditionally, additive manufacturing (AM) technology has been used to fabricate prototypes in the early development phase of a product. This technology is being applied to release manufacturing of a product because of its low cost and fast fabrication. AM technology is a process of joining materials to fabricate a product from the 3D CAD data in a layer-by-layer manner. The orientation of a layer during manufacturing can affect the mechanical properties of the product because of its anisotropy. In this paper, tensile testing of polymer-based specimens were built with a typical AM process (FDM, PolyJet and SLA) to study the mechanical properties of the AM materials. The ASTM D 638 tensile testing standard was followed for building the specimens. The mechanical properties of the specimens were determined on the basis of stress-strain curves formed by tensile tests. In addition, the fracture surfaces of the specimens were observed by SEM to analyze the results.

#### 1. 서 론

적층조형(Additive Manufacturing, AM)은 액체 또는 고체 상태인 폴리머, 금속 등의 재료를 층층이 쌓아서 3 차원 형상을 제조하는 기술이다.<sup>(1)</sup> AM 의 일반적인 공정은 3 단계로 구분되며 순서는 다음과 같다.<sup>(2-4)</sup>

- ① CAD 를 이용한 모델링

- ② 적층조건 계획 및 적층조형
- ③ 서포트 제거, 연마, 염색 등의 후처리

AM 은 절삭가공과 달리 재료의 손실이 적고, 사출성형, 프레스 가공에서 요구되는 금형이 불필요한 이점이 있다.<sup>(5)</sup> 한편 기존에는 제작기간과 비용, 작업공간 효율성 그리고 편의성 등의 장점으로 시제품 제작이 요구되는 산업분야에서 AM 기술이 널리 활용되어 왔다. 그러한 가운데 이를 직접 제품생산에 적용하려는 시도들이 이루어지고 있다.<sup>(5-9)</sup>

† Corresponding Author, [hycho@cbnu.ac.kr](mailto:hycho@cbnu.ac.kr)

© 2015 The Korean Society of Mechanical Engineers

특히 이들 중에서 기계요소와 구조물은 인장, 압축, 굽힘 하중을 받을 수 있다. 이러한 제품들의 설계 시에는 허용응력 또는 안전율을 고려해야 되며, 이때 재료의 기계적 물성인 탄성계수, 인장강도, 변형률 등이 요구된다. 여기서 적층조형으로 성형된 구조물은 재료 성질에서 적층방향에 따라 이방성이 발생한다.<sup>(10)</sup> 이와 관련되어 적층방법과 적층방향 및 재료의 기계적 물성 관계를 찾기 위한 연구가 진행되고 있다. 대표적으로 FDM,<sup>(10,11)</sup> PolyJet,<sup>(12)</sup> SLA 방식을 이용하여 폴리머 시험편을 제작하고 인장시험을 통하여 적층방향이 고려된 재료의 기계적 물성을 조사한 연구가 있다.<sup>(13,14)</sup> 하지만 기존 연구는 시험편의 하중방향이 시험편의 적층방향과 평행하거나 수직방향인 것이 대부분이다. 3차원 직교좌표계에서 적층조형 재료의 기계적 물성을 파악하기 위해서는 적층방향 및 하중 방향에 따른 복합적인 기계적 물성에 대한 연구가 필수적이다.

이에 본 연구에서는 폴리머 재료를 이용한 적층조형의 적층방향이 재료의 기계적 물성 변화에 끼치는 영향을 파악하고자 하였다. 즉, 다양한 적층조형 방식을 이용하여 3차원 직교좌표계에 따른 적층방향을 갖도록 제작된 폴리머 재료를 각각 3축 방향의 인장시험을 통하여 재료의 기계적 물성을 파악하고자 하였다. 그리고 이에 따른 파단부를 주사 전자현미경 관찰을 통하여 분석하고자 하였다. 또한 각 적층조형 방식에서 적층방향과 공극률 등의 공정계획, 방법 등을 제시하고자 한다.

## 2. 연구내용

본 연구에서는 적층가공에서 성형된 재료의 강도를 평가하기 위해 폴리머 재료를 이용하는 대표적인 AM 기술인 FDM, PolyJet 그리고 SLA 방식<sup>(2-4)</sup>을 선택하였다. 시험편은 Pro/ENGINEER 소프트웨어

이용하여 모델링하고 3D 프린터로 성형하였다. 이 방식 시험편의 성형을 위해 적층 면과 적층 방향을 달리하였다. 또한 인장시험기는 적층 가공된 시험편의 기계적 물성 연구에 사용되었다. 시험편은 성형이 완료되면 서포트 제거 후에 치수와 노치 여부를 판단하고 인장시험에 적용하였다. 인장시험기로부터 출력된 응력-변형률 선도를 참고하여 재료의 기계적 물성을 조사하였다. 또한 기계적 물성의 결과에 대한 원인분석을 위하여 주사 전자현미경으로 시험편 표면을 관찰하였다.

## 3. 시험편 성형 및 인장시험

### 3.1 시험편 성형

본 연구에서의 인장 시험편은 폴리머 재료이므로 ASTM D 638<sup>(15)</sup>을 따랐다. 인장시험편의 형상은 다섯 가지의 유형이 있으나 본 연구에서는 다양한 적층조형 기술과 폴리머 재료로 인하여 시험편의 강도와 경도가 일정하지 못하므로 TYPE 4 시험편의 형상과 치수를 참고하였다. 이때 TYPE 4의 허용두께는 4 mm이하 이다. Fig. 1과 같이 설계된 판재 시험편의 주요 치수에서 표점거리는 25 mm, 평행부 단면의 폭, 두께는 각각 6 mm, 1 mm이다.

본 연구에서 판재 시험편 제작에 사용된 3D 프린터<sup>(1)</sup>는 FDM 방식인 Stratasys<sup>®</sup>의 Dimension<sup>®</sup> SST

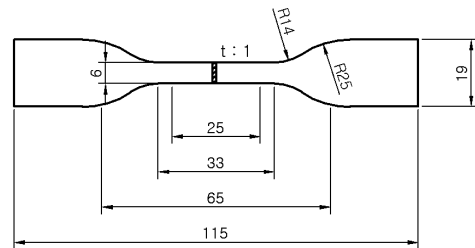


Fig. 1 Tensile test specimen of ASTM D 638 TYPE 4<sup>(15)</sup>

Table 1 Basic technical parameters of Stratasys<sup>®</sup> Dimension<sup>®</sup> SST 1200es, Stratasys<sup>®</sup> Eden250<sup>™</sup> and 3D Systems<sup>®</sup> ProJet<sup>®</sup> 6000HD<sup>(16-18)</sup>

3D printers	Dimension <sup>®</sup> SST 1200es	Eden250 <sup>™</sup>	ProJet <sup>®</sup> 6000HD
Production space [mm] (X × Y × Z)	254 × 254 × 305	250 × 250 × 200	250 × 250 × 250
Layer thickness [μm]	254 330	High Quality : 16 High Speed : 30	HD : 125 UHD : 100 XHD : 50
Resolution	-	X-axis : 600 dpi Y-axis : 300 dpi Z-axis : 1600 dpi	HD : 125 μm UHD : 125 μm XHD : 75 μm
Build material	ABSplus <sup>™</sup>	FullCure <sup>®</sup> 835	VisiJet <sup>®</sup> SL
File format		STL and SLC	

1200es, PolyJet방식인 Stratasys®의 Eden250™ 그리고 SLA방식인 3D Systems®의 ProJet® 6000HD 이다. 시험편의 성형에 사용된 3D프린터의 제원과 소재를 Table 1에 나타내었다. FDM 기술의 Dimension SST 1200es를 이용한 시험편 성형에서 적용된 챔버 내부와 노즐의 온도는 각각 70 °C, 300 °C이다. 재료의 적층두께는 254 μm로 설정하였고, 수용성 재질의 서포트는 알칼리성 혼합용액으로 제거하였다. PolyJet 방식인 Eden250을 이용하여 16 μm 적층두께로 시험편을 제작하였다. 시험편을 수직으로 세워 적층하며 성형할 때에는 휨 현상이 발생할 수 있으므로 서포트를 이용하였다. SLA방식인 ProJet 6000HD의 레이저 성형조건으로써, 원형 빔의 직경은 100 μm, 출력은 1 W, 이송속도는 3.81 m/s이며 챔버 온도는 30 °C이다.

이방성 시험편을 성형하기 위해 적층방향 조건을 계획하고 이를 Fig. 2에 나타내었다. x, y, z 축을 기준으로 적층면은 x, y 평면이 되고, z 축 방향으로 적층하여 시험편이 성형된다. 여기서 시험편의 정면과 평행한 면은 i, 인장하중 방향과 동일한 방향은 j 로 지정하면 ij 같은 꼴로 적층방향 조건에 대한 표현이 용이하다.

Fig. 2와 같이 방향(orientation) 1은 xy-x로서 시험편의 정면이 xy 평면상에 위치하고 x 축 방향이 인장하중 방향이다. 또한 방향 2는 xz-x로서 시험편의 정면이 xz 평면상에 위치하고 인장방향에 평행하게 적층 된다. 동일한 방법으로 방향 3, 4는 각각 xz-z, xz-xz 로 정하였다. 이와 같은 4 종류의 적층방향을 달리하여 FDM, PolyJet, SLA 기술로 제작된 시험편은 각각 5 개씩, 총 60 개이다.

3.2 인장시험 방법

인장시험법은 ASTM D 638 을 이용하여 폴리머

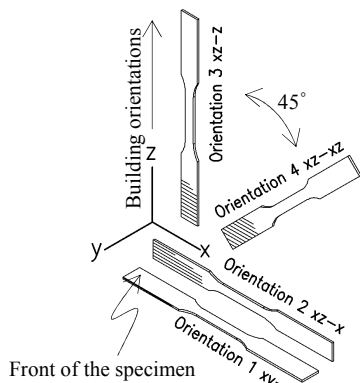


Fig. 2 Four orientations of specimens devised for tensile testing

재료의 성질에 맞는 조건으로 시험하였다. 시험에 사용된 장비는 INSTRON® 사의 8801 이다. 연신율계는 표점거리가 25 mm 인 INSTRON® 2620 Series 를 사용하였으며, 인장시험 동안 시험편의 연신율을 측정하였다. 폴리머와 같이 경도가 낮은 시험편은 연신율계 장착부에 노치가 발생할 수 있다. 노치의 발생을 방지하기 위하여 연신이 큰 고무줄을 이용하여 연신율계를 시험편에 장착하였다. 인장시험 조건을 제어하고 데이터를 수집하기 위하여 Bluehill® 2 소프트웨어를 이용하였다. Bluehill® 2 소프트웨어에서 시험편 장착 시에 발생하는 압축력을 제거하기 위해 시편보호와 preload 기능을 적용하였다. 또한 연신율이 큰 폴리머는 연신율계의 측정 한계 이상으로 인장변형되므로 연신율계를 시험 중에 탈착할 수 있는 기능을 선택하였다. 인장 속도는 5 mm/min<sup>(15)</sup>으로 시험하였으며 시험장 실내의 온도는 약 20 °C로 유지시켰다.

4. 인장시험 결과 및 고찰

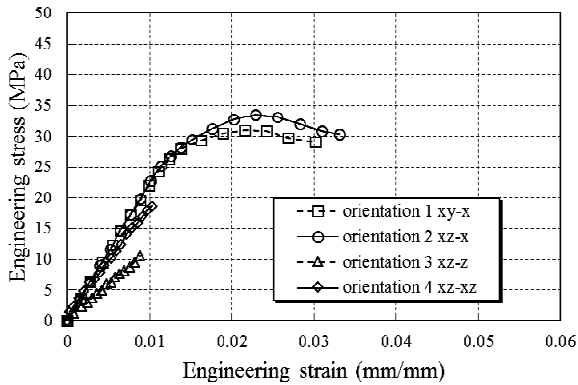
4.1 응력-변형률 선도 및 기계적 물성

각각의 적층조형 기술에 따라 적층방향이 달리 제작된 시험편들을 인장시험하여 응력-변형률 선도를 Fig. 3에 나타내었다.

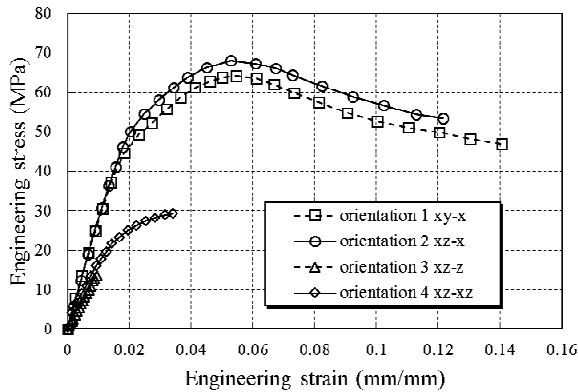
Fig. 3(a)는 FDM 방식을 이용하여 성형된 시험편의 응력-변형률 선도이다. 방향 2 인 xy-x 시험편의 최대 인장강도는 33.9 MPa, 항복강도는 31.0 MPa, 탄성계수는 2209.75 MPa 그리고 파단 시 변형률은 0.033 이다. 또한 인장하중과 평행하게 성형된 방향 1, 2 시험편의 응력-변형률 선도는 비슷한 경향이며 강도와 연신율이 가장 높았다. 반면에 인장하중과 수직하게 성형된 방향 3, 4의 시험편은 강도와 연신율이 낮은 것을 알 수 있었다. 이는 폴리머가 노즐로부터 압출되고 굳는 공정의 특징으로 인하여 인장하중과 수직한 방향으로 성형된 시험편에서 필라멘트 간의 계면이 쉽게 파단되었다고 생각된다.

PolyJet으로 제작된 시험편의 응력-변형률 선도를 Fig. 3(b)에 나타내었다. PolyJet 기술로 성형된 시험편들의 인장시험 결과는 FDM 기술의 시험결과와 비슷한 경향이며, 이 두 가지 기술로 제작된 시험편들은 적층방향에 따라 기계적 물성에 차이가 있음을 알 수 있다.

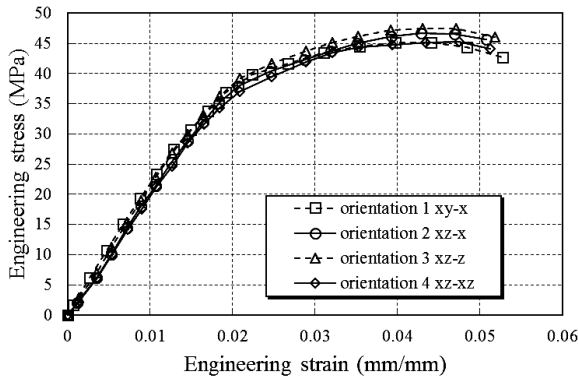
PolyJet의 방향 1 시험편의 인장강도는 방향 2의 시험편보다 높은 것을 알 수 있다. 이는 3D 프린터의 x, y, z방향의 해상도<sup>(17)</sup> 차이에서 발생된 것으로 판단된다. 또한 방향 3, 4 시험편에서 모델



(a) Engineering stress–strain curves of the AM material ABSplus™ used in the FDM technology.



(b) Engineering stress–strain curves of the AM material FullCure®835 used in the PolyJet technology



(c) Engineering stress–strain curves of the AM material VisiJet® SL used in the SLA technology.

**Fig. 3** Results of tensile test of AM materials for different AM processes and orientations

주변에 서포트가 형성됨에 따라 노치 또는 연속적이지 못한 표면이 발생되었고 이러한 성형결과로 인해 인장강도와 연신율이 낮아진 것으로 생각된다.

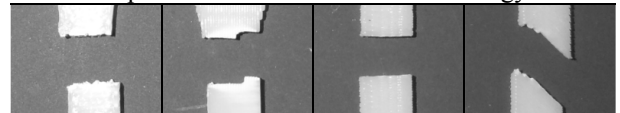
Fig. 3 (c)는 SLA 기술로 제작된 시편의 인장시험 결과를 나타낸 것으로써 총 네 가지의 적층방향으로 제작된 시편의 응력-변형률 선도가 비슷한 경향임을 알 수 있다. 이는 어떠한 방향의 적층가

**Table 2** Mechanical properties of three AM materials for different orientations

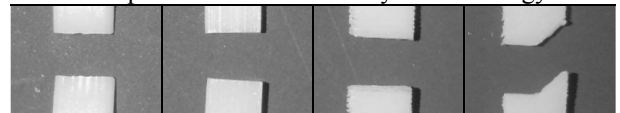
AM processes	Built orientations	Young's modulus [MPa]	Tensile strength [MPa]	Strain at break [%]
FDM	xy-x	2122.6	31.3	3.1
	xz-x	2209.7	33.9	3.3
	xz-z	1193.9	10.5	1.4
ABSplus™	xz-xz	1784.9	18.6	2.4
	Official specification <sup>(19)</sup>	2200.0	33.0	6.0
PolyJet	xy-x	2431.3	64.6	14.0
	xz-x	2665.3	68.2	12.1
	xz-z	1433.9	13.6	0.9
FullCure®835	xz-xz	1434.3	29.4	3.4
	Official specification <sup>(20)</sup>	2450.0	58.5	14
SLA	xy-x	2221.5	45.3	5.2
	xz-x	2210.9	48.8	5.6
	xz-z	2225.8	49.6	5.7
VisiJet® SL	xz-xz	2214.8	46.7	5.6
	Official specification <sup>(18)</sup>	2560.0	52.0	6.0

Orientation 1	Orientation 2	Orientation 3	Orientation 4
xy-x	xz-x	xz-z	xz-xz

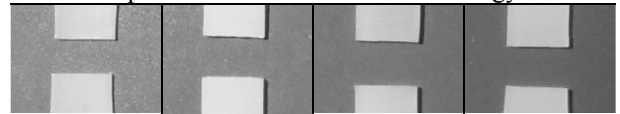
Front of specimens built with FDM technology.



Front of specimens built with PolyJet technology.



Front of specimens built with SLA technology.



**Fig. 4** Fractured zone of specimens after tensile tests

공도 기계적 물성에 큰 차이가 없음을 의미한다. 종탄성계수, 인장강도, 파단시 변형률을 Table 2에 정리하였다.

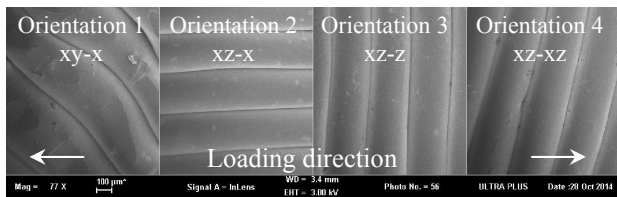
Fig. 4는 인장시험 후의 시험편 파단부를 나타낸 것이다. 대부분 파단형상은 단면감소가 적고 인장하중 방향에 수직하게 파단되었다. SLA시험편에서 비슷한 파단형상의 경향이 나타나는 것을 볼 수 있으며, 이를 통해 적층방향과 기계적 물성이 서로 관계되지 않음을 다시 한 번 확인하였다. 한편 FDM과 PolyJet 기술로 성형된 xz-xz 시험편에서 인장하중 방향에 45°로 파단된 것을 볼 수 있으며, 시험편의 적층방향과 파단방향이 일치한다. 이는

FDM과 PolyJet 기술에서 적층방향이 재료의 파단에 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.

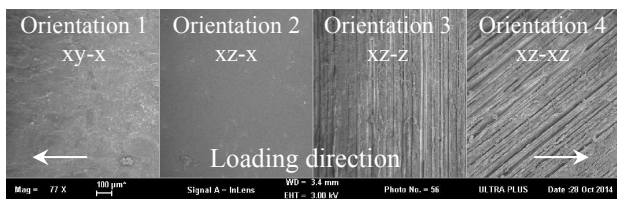
4.2 FE-SEM 을 이용한 시험편 관찰

적층방향이 고려되어 제작된 시험편의 기계적 물성 차이가 있다는 사실을 인장시험 결과로부터 알 수 있었다. 그 원인을 조사하기 위해 Fig. 4와 같이 시험편 파단부의 정면을 주사 전자현미경으로 관찰하였다. 촬영을 위해 시험편에서 관찰부분을 채취하고 백금이 온 피막을 입혔다. 촬영은 가속전압을 3 kV로 적용하고 77 배 상의 조건에서 진행되었다. 사용된 장비는 FE-SEM으로써 Carl Zeiss사의 Ultra Plus이다.

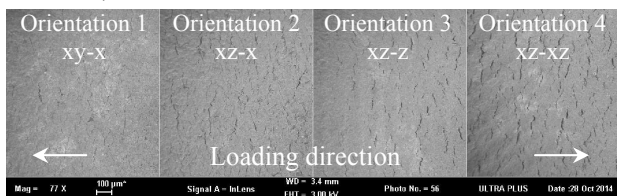
Fig. 5(a)는 FDM방식으로 성형된 시험편의 SEM 사진이다. 가장 왼쪽의 사진이 방향 1 xy-x 시험편이다. 촬영결과에서 알 수 있듯이 필라멘트들은 인장하중 방향으로부터 사선으로 교차되며 성형된 것이다. 그러므로 필라멘트들이 인장하중 방향으로 평행하게 적층된 xz-x 시험편 보다 강도가 작은 것을 알 수 있었다. 다음 PolyJet으로 성형된 시험편의 사진을 Fig. 5(b)에 나타내었다. xz-z와



(a) Front of built specimens with FDM technology. From left to right: orientation 1 xy-x, orientation 2 xz-x, orientation 3 xz-z and orientation 4 xz-xz



(b) Front of built specimens with PolyJet technology. From left to right: orientation 1 xy-x, orientation 2 xz-x, orientation 3 xz-z and orientation 4 xz-xz



(c) Front of built specimens with SLA technology. From left to right: orientation 1 xy-x, orientation 2 xz-x, orientation 3 xz-z and orientation 4 xz-xz

Fig. 5 Scanning electron micrographs showing the front of specimens built by AM processes after tensile testing. Loading direction is represented by arrows in photographs

xz-xz 시험편에서 거친 표면이 관찰되었다. 이는 시험편 제작 과정에서 모델 주변에 서포트가 형성됨에 따른 것이다. 이러한 노치 또는 연속적이지 못한 표면은 기계적 물성의 측정실험에서 이론적 계산값보다 작을 수 있으며 응력을 증폭시키므로 응력 상승자라고 볼 수 있다.<sup>(23)</sup> Fig. 5(c)는 SLA 기술로 제작된 시험편 표면의 SEM 촬영결과이며 네 방향으로 적층된 시험편모두 동일한 형태의 균열이 관찰되었다. 균열 형상은 인장하중 방향으로부터 수직하게 전파되고 있으며, 시험편 표면에서 균열이 고르게 분포하고 있음을 볼 수 있다. 이러한 사실들은 적층방향이 달랐지만 기계적 물성이 서로 비슷한 경향을 보였던 인장시험 결과의 원인이라고 생각된다.

4.3 FDM 시험편의 파단면 관찰 및 공극률 계산

AM 프로세스 중에서 FDM은 노즐을 이용한 재료를 압출하는 방식이기 때문에 시험편의 필라멘트 간에 공간이 발생할 수 있다. 공간은 응력집중 발생과 같이 부피에 대한 비강도 측면에서 불리한 인자이다. FDM 기술에서는 성형물을 열간 정수압 프레스로 압축한 방식과 성형 시에 적층간격을 줄이며 토출시킴으로써 이러한 공간을 줄일 수 있다.<sup>(22,23)</sup> 따라서 본 연구에서는 다른 적층기술보다 큰 공간이 존재하는 FDM 방식의 시험편에서 파단면을 FE-SEM으로 관찰하였다.

Fig. 6은 주사 전자현미경으로 관찰한 시험편의 파단면이다. FDM으로 성형된 시험편은 방향 2 xz-x이다. 사진에서 밝은 회색 부분이 필라멘트이며,

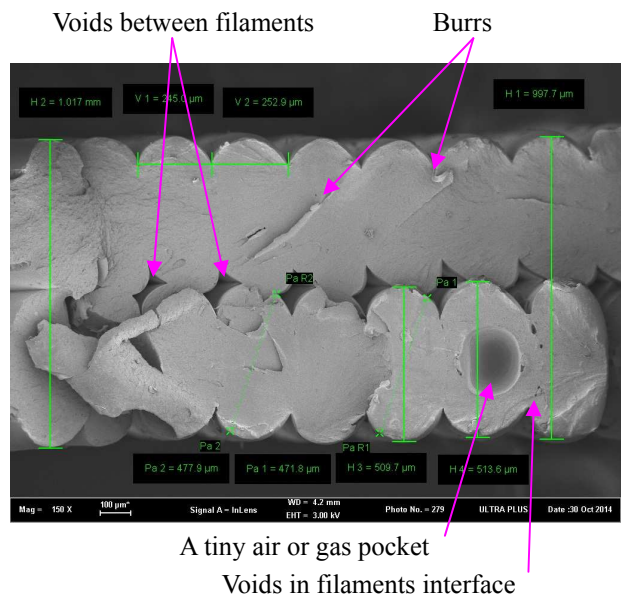


Fig. 6 Scanning electron fractograph showing a cross section of specimen with orientation 2 xz-x. There are voids between filaments as well as burrs and a tiny air or gas pocket

필라멘트 간에 어두운 회색의 공간을 볼 수 있다. 필라멘트 내에 동그란 구멍은 공기나 가스 등의 기공 또는 미소한 보이드로 추측된다. 인장하중을 받는 영역에서 미소한 보이드가 발생하고 그것들이 서로 합체되어 잔금이 형성되는 과정은 열가소성 폴리머의 파단 유형으로 알려져 있다.<sup>(21)</sup>

그러나 구멍의 표면이 파단면보다 매끄럽고, 미소보이드로 부터 발전한 잔금의 두께는 5 μm 이하인데 반하여 그 크기가 훨씬 크기 때문에 기공으로 판단된다. 또한 인장하중방향으로 수직인 단면적은 감소되는 것이 일반적이지만 기공이 존재하는 필라멘트는 다른 필라멘트 보다 큰 것을 알 수 있다. 한편 기공이 있는 필라멘트와 근접한 다른 필라멘트의 계면에서 보이드를 볼 수 있다. 그 외에 기공이 없는 주변 필라멘트의 경계면에서는 보이드가 관찰되지 않았다. 이는 기포 내에 있었던 기체와 폴리머의 열팽창계수가 다르기 때문에 발생한 것으로 추측된다. 이러한 기포 결함으로 인한 보이드 발생은 재료가 보다 쉽게 파괴될 수 있는 요인이 될 수 있다.

Fig. 6 과 같이 필라멘트 간의 보이드는 시험편의 전체 단면적과의 비로써 공극률로 정의되며 이를 고려하지 않는다면 기계적 물성 연구에 오차가 발생할 수 있다. 따라서 공극률이 고려된 단면적으로 기계적 물성을 계산하고, 기존에 계산된 기계적 물성과 비교하였다.

공극률을 계산하기 위해 필라멘트의 단면은 Fig. 7의 캡슐 형상과 같이 가정하고, 그 치수는 SEM의 측정결과를 참고하였다. 또한 시험편의 표점거리 내에서 필라멘트의 배열은 일정하기 때문에 단면적으로도 공극률을 계산할 수 있었다. Fig. 7(a)와 같이 h는 필라멘트의 높이, b는 필라멘트의 폭으로 놓고 필라멘트 곡선부의 반지름 R은 b/2이다. SEM의 측정결과인 Fig. 6에서 필라멘트의 높이는 510 μm이며 필라멘트 두 개의 높이 즉, 전체 높

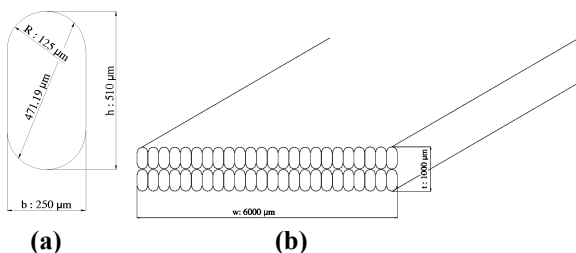


Fig. 7 (a) The geometry of cross section of filaments for calculating porosity. (b) Schematic diagram showing the cross section of a specimen with orientation 2 xz-x, which has voids between filaments

이가 1000 μm로 적층된 것을 알 수 있다. 이때 필라멘트가 높이방향으로 일직선상에 놓여있지 않고 약간 엇갈리게 배열된 것을 SEM사진에서 볼 수 있다. 그러므로 필라멘트 면적의 합과 Fig. 7(b)의 직사각형 면적의 비로 공극률을 계산하였다. 시험편의 단면적을 직사각형으로 계산하면 6 mm<sup>2</sup>이며, 공간을 고려한 단면적은 5.476 mm<sup>2</sup>이다. FDM으로 성형된 방향 2 xz-x 시험편의 공극률은 8.73 %로 계산되었다. 따라서 공극을 제외하고 실제 폴리머 면적만을 고려한 인장강도는 33.9 MPa에서 37.2 MPa로 높아짐을 알 수 있다. 이를 통하여 동일한 재료와 체적으로 이루어진 구조물일지라도 공극률로 인하여 인장강도 차이가 발생하는 것을 알 수 있었다. 이때 FDM으로 제작된 재료의 기계적 물성 변화에서는 공극률이 주요 인자라고 생각된다.

4.4 적층방향과 기계적 물성 관계

시험편의 성형방식에 따른 경향을 알아보기 위해 인장하중 방향과 평행하게 적층된 시험편 xz-x, 수직하게 적층된 시험편 xz-z 그리고 45° 로 적층된 시험편 xz-xz 의 탄성계수와 인장강도를 비교하였다(Fig. 8). 그래프에서 FDM 기술로 성형된 시험편은 적층방향과 하중방향의 상대각도가 0°일 때 탄성계수와 인장강도가 가장 높았고 90°일 때 가장 낮았으며 선형에 가까운 경향을 가지는 것을 볼 수 있다. SLA 방식의 시험편 결과에서 상대각

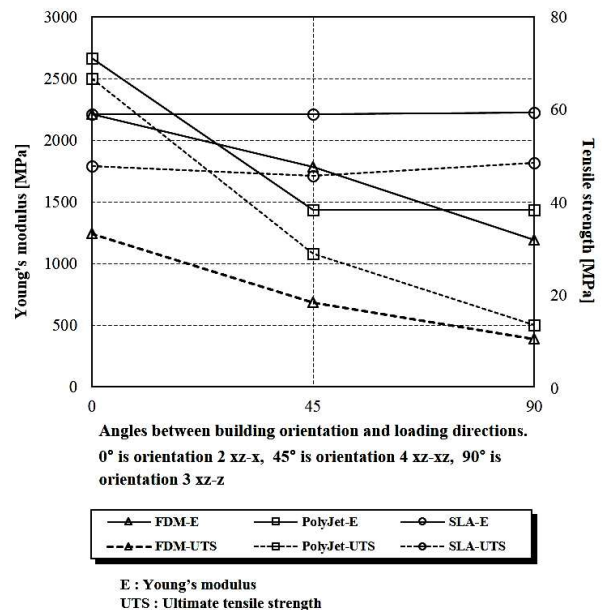


Fig. 8 Plot of young's modulus and tensile strength versus angles between building orientations and loading directions, shown for different AM specimens



도에 따른 탄성계수와 인장강도는 대체적으로 완만한 기울기를 나타내었다. 또한 PolyJet 방식의 시험편에서는 상대각도 0°를 기준으로 45°, 90°의 탄성계수, 인장강도가 큰 차이가 있는 것을 알 수 있다.

따라서 FDM과 PolyJet 기술로 성형된 폴리머 구조물은 적층방향에 따른 이방성이 발생할 것이며, 이것은 구조 설계에 중요한 요인이라고 생각된다. 반면에 SLA 기술로 성형된 폴리머 구조물의 강도는 적층방향과 관계되지 않기 때문에 적층 방향을 고려하지 않고 성형이 가능할 것이다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 AM의 적층 방향에 따른 재료의 기계적 물성을 조사하고 그 결과를 비교, 분석하고자 하였다. 이를 위해 FDM, PolyJet, SLA 방식으로 시험편을 제작하고 인장 시험을 통하여 기계적 물성을 조사하였다. 또한 시험편의 파단부를 SEM 촬영하고 결과를 분석하여 다음과 같은 결론들을 얻었다.

(1) FDM 방식으로 4가지 적층방향을 적용하여 성형된 시험편의 기계적 물성을 조사하였다. 방향 1, 2와 3, 4의 기계적 물성에서 탄성계수 1000 MPa, 인장강도 20 MPa, 변형률 1.5 % 정도의 차이가 발생하였다. 이는 폴리머가 노즐로부터 압출되고 굳는 공정의 특징으로 인해 필라멘트 간의 계면에서 쉽게 파단 되었다고 생각된다. 제품의 강도를 고려한다면 방향 1, 2로 성형하는 것이 바람직하다. 여기서 FDM으로 제작된 재료의 기계적 물성 변화에서는 적층방향과 공극률이 주된 원인이라 생각된다. 따라서 FDM기술로 제품을 성형 시에 적층방향과 공극률이 적용된 성형계획이 필요할 것이다.

(2) PolyJet을 이용하여 제작된 시험편의 기계적 물성을 조사한 결과에서 FDM과 동일한 경향이 나타났다. 방향 1, 2와 3, 4의 기계적 물성에 큰 차이가 발생하였다. 1과 2의 차이는 3D 프린터의 x, y, z방향의 해상도<sup>(17)</sup> 차이에서 발생된 것으로 판단되며, 3과 4의 차이는 기둥과 같이 z축 방향으로 시험편을 세워 성형하는 과정에서 서포트 적용이 발생 원인이라 판단된다. 따라서 동일한 제품을 성형할 때는 3, 4 방향보다는 1, 2 방향으로 적층하는 것이 좋다.

(3) SLA 기법으로 제작된 시험편의 기계적 물성에서 총 네 가지의 적층방향으로 제작된 시험편의 응력-변형률 선도가 비슷한 경향임을 알 수 있다.

따라서 SLA에서 적층방향과 기계적 물성의 관계가 없다고 판단되며 적층방향의 고려 없이 제작 가능하다.

(4) 적층가공 시에 충분한 강도가 요구가 되는 부분은 인장하중 방향에서 평행한 방향으로 적층 조형하는 것이 이롭다.

## 후 기

이 논문은 산업통상자원부의 부품소재 국제협력 사업 지원을 받아 수행된 것임(2012-021063).

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(2010-0023501).

## 참고문헌 (References)

- (1) ASTM F2792 - 12a, 2012, "Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies," ASTM International.
- (2) Noorani, R. I., 2005, "Rapid Prototyping: Principles and Applications," John Wiley & Sons, inc., Los Angeles.
- (3) Manas, D., Manas, M., Stanek, M. and Danek, A., 2008, "Improvement of Plastic Properties," *Archives of Materials Science and Engineering*, Vol. 32, No. 2, pp. 69~76.
- (4) Mudge, R. P. and Wald, N. R., 2007, "Laser Engineered Net Shaping Advances Additive Manufacturing and Repair," *Welding Journal*, Vol. 86, No. 1, pp. 44~48
- (5) Gausemeier, J., Echterhoff, N. and Wall, M., 2013, "Thinking Ahead the Future of Additive Manufacturing-Exploring the Research Landscape," University of Paderborn. pp. 17~35
- (6) Dickerson, K., 2014, "NASA Is Building the World's First 3D-Printed Space Cameras," SPACE.COM, <http://www.space.com/26769-first-3d-printed-space-cameras.html>
- (7) Boulton, C., 2013, "Printing Out Barbies and Ford Cylinders," The Wass Street Journal, Dow Jones & Company, Inc., <http://www.wsj.com/articles/SB10001424127887323372504578469560282127852>
- (8) Lee, I. H., Oh, S. T., Kim, H. C. and Cho H. Y., 2014, "Development of Hybrid Fused Deposition Modeling System for Three-Dimensional Circuit Device Fabrication," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 38, No. 8, pp. 869~874.
- (9) Kim, H. C. and Yun, H. Y., 2014, "Application of 3D Printing Technology in Nano/Micro Field," *Journal of the KSME*, Vol.54, No.4, pp. 36~40.

- (10) Ogden, S. and Kessler, S., 2014, "Anisotropic Finite Element Modeling of the Fused Deposition Modeling Process," *Characterization of Minerals, Metals, and Materials*, pp. 235~243.
- (11) Novakova-Marcincinova, L. and Novak-Marcincin, J., 2013, "Verification of Mechanical Properties of ABS Materials Used in FDM Rapid Prototyping Technology," *Proceedings in Manufacturing Systems*, Volume 8, Issue 2, ISSN 2067.
- (12) Barclift, M. and Williams, C. B., 2012, "Examining Variability in the Mechanical Properties of Parts Manufactured by Polyjet Direct 3D Printing," in *Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium*, Austin, TX.
- (13) Quintana, R., J-W Choi, K. Puebla, and R. Wicker, 2010, "Effects of Build Orientation on Tensile Strength for Stereolithography-Manufactured ASTM D-638 Type I Specimens," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 46, No. 1~4, pp. 201~215.
- (14) Swetly, T., Stampfl, J., Kempf, G. and Hucke, R.-M., 2014, "Capabilities of Additive Manufacturing Technologies (AMT) in the Validation of the Automotive Cockpit," *Forum für Rapid Technologie RTejournal*, Vol. 2014, Iss. 1.
- (15) ASTM D 638, 2010, "Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics," ASTM International.
- (16) [http://www.stratasys.com/~media/Main/Secure/System\\_Spec\\_SheetsSS/DimensionProductSpecs/Dim1200esSellSheet-INTL-ENG-10-13%20WEB.pdf](http://www.stratasys.com/~media/Main/Secure/System_Spec_SheetsSS/DimensionProductSpecs/Dim1200esSellSheet-INTL-ENG-10-13%20WEB.pdf), Dimension 1200es.
- (17) <http://www.wmboundsltd.com/v/vspfiles/Eden250.pdf>, Eden250I.
- (18) [http://www.ceptech.co.kr/download.php?dnfile=ProJet%206000%207000.pdf&file=../site/files\\_upload/1941914743539004e0ad709.pdf](http://www.ceptech.co.kr/download.php?dnfile=ProJet%206000%207000.pdf&file=../site/files_upload/1941914743539004e0ad709.pdf), ProJet® 6000 & 7000 and SL materials.
- (19) <http://www.stratasys.com/~media/Main/Secure/Material%20Specs%20MS/Fortus-Material-Specs/Fortus-MS-ABSplus-01-13-web.pdf>, Materials of Dimension 1200es.
- (20) <http://www.rapidtech.org/images/pdfs/materials/object-fullcure-835-data-sheet.pdf>, Materials of Eden 250.
- (21) Callister, W. D.. Jr. and Rethwisch, D. G., 2007, *Materials Science and Engineering: An Introduction*, 7th Edition, Wiley, New York, Chapter 6, 8, 14, 15, 16.
- (22) Longmei Li, Q. Sun, C. Bellehumeur1, and P. Gu, 2001, "Composite Modeling and Analysis of FDM Prototypes for Design and Fabrication of Functionally Graded Parts," *Solid Freeform Fabrication Symp.*, Austin, TX, Aug, pp. 1~8.
- (23) West, M., Arbegast, W., Boysen, A. and Parker, E. M., 2010, "Eliminating Voids in FDM Processed Polyphenylsulfone, Polycarbonate, and ULTEM 9085 by Hot Isostatic Pressing," *Minerals, Metals and Materials Society/AIME*, USA, Feb 14~18.