

## FDM 3D프린팅 윤활유에 따른 내부응력 완화에 관한 연구

이선곤\*, 김용래\*, 김수현\*, 강선호\*, 김주형\*,#

\*인하대학교 기계공학과

### Investigation of the Internal Stress Relaxation in FDM 3D Printing : vegetable lubricating oil

Sun Kon Lee\*, Yong Rae Kim\*, Su Hyun Kim\*, Sun Ho Kang\*, Joo Hyung Kim\*#

\*Department of Mechanical Engineering, Inha University

(Received 13 September 2018; received in revised form 31 September 2018; accepted 4 January 2019)

#### ABSTRACT

In this paper, the effects of different 3D printing conditions including oil lubrication and annealing are observed for their effects on tensile testing. In 3D printing, a press-out extrude filament is rapidly heated and cooled to create internal stress in the printed part. The 3D printing internal stress can be removed using oil-coated filament and annealing. During the oven cooling at an annealing temperature of 106°C, the stress of the specimens with laminated angle 0° tends to increase by 12.6%, and that of the oil-coated filament printing specimens is increased by 17%. At the annealing temperature of 106°C, the stress of the oil-coated filament printing specimens tends to increase by 35%. In this study, we have found that the oil lubrication and annealing remove the internal stresses and increase the strength of the printed specimens. The oil lubrication and annealing reform the crystalline structures to even out the areas of high and low stress, which creates fewer fragile areas. These results are very useful for the manufacture of 3D printing products with a suitable mechanical strength for applications.

**Key Words** : Additive Manufacturing(적층가공), 3D Printing Laminated Angle(3D프린팅 적층 각도), 3D Printing Annealing(3D프린팅 어닐링), 3D프린팅 윤활(3D Printing Lubrication)

#### 1. 서 론

3D프린터(3D Printer)는 3차원 형상제작 있어서 절삭가공(Subtractive Manufacturing) 방식이 아닌 적층가공방식(Additive Manufacturing)으로 재료를 한 층씩(layer-by-layer) 쌓아 가면서 형상을 제작하는 장치이다. 그리고 3D프린팅(3D Printing)은 적층공정(layer-by-layer deposition)으로 3차원 형상을 제작

하는 기술이다. 이러한 3D프린팅 기술은 쾌속 조형(Rapid Prototyping)에서 시작되었으나, 기술의 발전으로 적용분야가 시제품(prototype)을 벗어나 다양한 용도의 제품 제작에 활용되어지고 있다<sup>[1-3]</sup>.

다양한 적층방식 및 재료별로 분류되어지는 3D프린터 종류에서 활용범위가 넓고 대중적으로 보급되어지고 있는 FDM(Fused Deposition Modeling) 3D프린터는 플라스틱 필라멘트(filament)가 고온의 프린팅 노즐을 지나면서 용융압출(press out extrude)과 동시에 급랭(rapid cooling)되는 적층공정의 반복으로 3차원 형상을 제작하는 장치이다<sup>[4-6]</sup>.

# Corresponding Author : joohyung.kim@inha.ac.kr

Tel: +82-32-860-7320, Fax: +82-32-868-6430

FDM 3D프린팅 재료로 사용되는 플라스틱 소재의 필라멘트는 열전도성(heat conduction quality)이 좋지 않은 플라스틱 특징으로 프린팅 시 고온노즐에서의 압출과 급랭으로 잔류응력(residual stress) 및 결정화도(degree of crystallinity)등의 차이를 발생시켜 비 이상적인 층간 결합과 기계적 강도를 저하시키는 원인을 제공하게 된다.

3D프린팅 적층물의 강도저하는 3D프린팅의 산업적 활용화 확대에 악영향을 미치고 있으므로 이를 보완하고 개선하고자 프린팅 적층각도 별, 속도 별, 내부 채움(fill density) 별, 프린팅 노즐 사이즈 별 강도 연구 등 프린팅 조건에 따른 적층물의 강도 향상을 위한 연구와 프린팅 후 적층물 표면 샌딩(sanding) 후 에폭시 코팅(epoxy coating), 적층물의 표면을 얇게 녹이는 훈증(fumigation) 방법으로 층간 결합력을 강화시키 다양한 후처리 기법들이 시도되어지고 있으나, 이는 FDM 3D프린팅 시 발생하는 강도저하의 구조적 결함을 해결하고자 하는 접근법이 아니라 한계점을 지니고 있다. 따라서 본 연구는 FDM 3D프린팅의 구조적 결함으로 인한 적층물의 기계적 특성 저하를 보완할 수 있는 3D프린팅 윤활(lubrication)과 어닐링(annealing)에 대하여 연구를 진행하여 산업용으로 적합한 기계적 강도를 얻을 수 있는 최적의 프린팅 조건을 제시하고 3D프린팅 활용 범위 확대에 기여하고자 한다.

## 2. 실험 및 고찰

본 연구는 3D프린팅 적층물의 기계적 특성 향상을 위한 연구로 다양한 FDM 3D프린팅 재료 중 가장 널리 사용되어지고 있는 PLA(Poly Lactic Acid) 필라멘트를 프린팅 재료로 선정 하였다. PLA는 옥수수수와 사탕수수로 만들어지는 생분해성 수지로, 제조과정에서 해로운 유기용매를 사용하지 않아 3D프린팅 시 유해물질의 발생이 거의 없으며, 열수축이나 균열이 상대적으로 적은 장점을 가지고 있어 프린팅 재료로 가장 널리 사용되고 있으나 약 58°C의 유리전이온도(Glass transition temperature, Tg)를 가지는 부서지기 쉬운 고분자 이다. 이를 산업용 어플리케이션으로 도입하려면 높은 유연성과 기계적강도의 향상이 필요하다. PLA의 분자구조는

일부 결정질조직과 유리와 같은 무정형(amorphous) 형태인 반결정(semi-crystalline) 구조를 가지고 있다<sup>[7]</sup>. 따라서 조직이 없는 PLA 필라멘트는 3D프린팅 시 고온노즐의 압출과 급랭을 거치면서 큰 결정(grain)으로 재구성이 이루어져 결정 사이 선은 쉽게 분리될 수 있다. 그리고 프린팅 적층물이 냉각될 때 표면과 내부의 냉각속도 차이, 적층방향에 의한 분자배향(molecular orientation)으로 발생하는 내부응력 등 다양한 이유가 기계적 강도를 저하시키는 원인으로 예측되어진다<sup>[8]</sup>.

본 연구는 FDM 3D프린팅 재료로 사용되고 있는 PLA 필라멘트를 Fig. 1의 자체 디자인 한 윤활 공급 장치를 이용하여 오일을 필라멘트 표면에 코팅 후 프린팅 한 시편과 오일 코팅 없이 프린팅 한 시편의 기계적 강도를 비교 측정하였고 어닐링이 각각의 시편에 미치는 인장강도 변화를 측정하였다. 이는 오일 코팅된 필라멘트가 3D프린팅 적층물에 미치는 영향을 연구하기 위해서이다.

오일 코팅 시스템의 공정은 자체 개발한 오일 하우징(oil housing)내부에 다공성 스폰지를 삽입하여 오일 저장소(oil storage)에 있는 오일을 링거 튜브(ringer oil tube)를 이용하여 스폰지로 공급하는 시스템이다. 필라멘트 오일 코팅은 3D프린터 필라멘트 공급 장치인 익스트루더 기어(extruder gear) 상단에 오일 하우징을 장착하여 30 mm/sec의 속도로 필라멘트를 통과시키면서 필라멘트 표면을 오일 코팅하였다.

인장시편은 Fig. 2와 같이 ASTM-D638 type IV<sup>B</sup>로 디자인 하였고, Fig. 3은 프린팅 적층각도를 나타낸 것이다. Table 1은 인장시편 3D프린팅을 위한 설정이다.

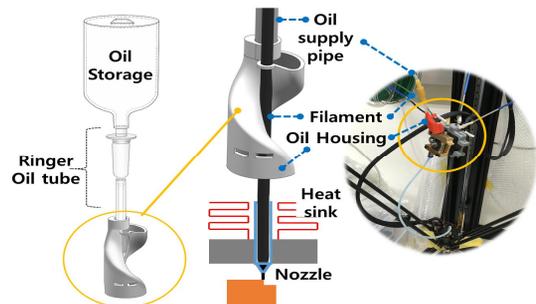
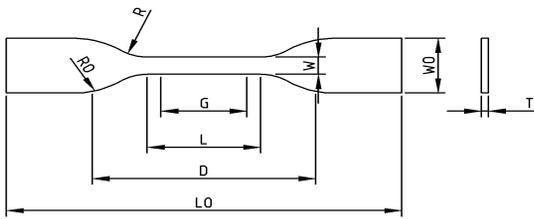


Fig. 1 Oil supply equipment



	Geometry	Dimensions(mm)
W	Width of narrow section <sup>E,F</sup>	6
L	Length of narrow section	33
W0	Width overall, min <sup>G</sup>	19
L0	Length overall, min <sup>H</sup>	115
G	Gage length	25
D	Distance between grips	65
R	Radius of fillet	14
R0	Outer radius (Type IV)	25
T	Thickness	3.6

Fig. 2 Specimen dimension of ASTM-D638 typeIV<sup>B</sup>

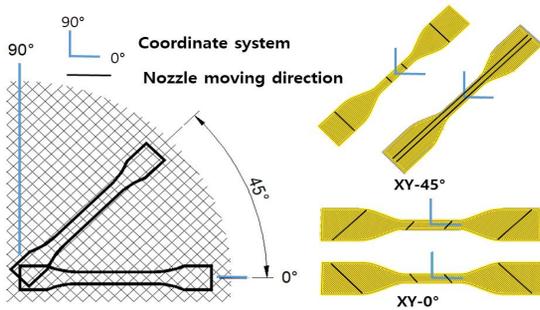


Fig. 3 Lamination XY-Lamination angle of the tensile test specimens

Table 1 3D printer conditions

PC Condition	Value
Filament Diameter	1.75 (mm)
Nozzle Size	0.8 (mm)
Layer height	0.3 (mm)
Wall Thickness	0.8 (mm)
Bottom/Top Thickness	0.3 (mm)
Fill Density	100 (%)
Print Speed	30 (mm/s)
Printing Temperature	210 (°C)
Bed Temperature	30 (°C)

인장실험은 만능시험기를 사용하여 0.1mm/min 속도로 시편 당 각각 5회의 인장실험을 실시하여 평균값을 채택하였다.

## 2.1 윤활유를 사용한 인장시편의 기계적 특성 비교

긴 사슬(chain)형태의 분자가 모인 플라스틱은 분자사이에 서로 끌어당기는 힘의 작용이 강할수록 더욱 더 딱딱한(brittle) 구조를 지니게 된다.

가소화(plasticization)는 고분자 구조인 플라스틱에 열을 가하면 분자사슬의 열운동에 의해 분자간의 간격이 넓어지게 되는데 이때, 넓어진 분자사이로 가소제(plasticizers)를 침투시켜 분자사이에 서로 직접 끌어당기는 힘을 약화시켜 브라운 운동(brownian motion)을 활발하게 하여 유연성을 향상시키는 과정이다. 그리고 역가소화(Antiplasticization)는 소량의 가소제가 첨가될 경우 가소제 분자가 결정화를 높이고 오히려 자유체적(free volume)을 감소시켜 사슬운동을 방해하여 인장강도를 증가시키고 연신율을 감소시켜 딱딱해지는 경질효과가 나타나는 현상이다<sup>[9-10]</sup>.

3D프린팅에서 발생하는 잔류응력 중 하나는 유동에 의한 잔류응력(flow induced residual stress)이다. 이는 Fig. 4와 같이 프린팅 노즐에 의한 압출시 필라멘트와 노즐사이의 마찰로 전단의 영향이 상대적으로 큰 노즐벽면에서의 용융된 필라멘트의 유동속도가 노즐의 중앙부 보다 느리기 때문에 발생하는 것이다. 이러한 FDM 3D프린팅의 구조적인 결함으로 발생하는 잔류응력을 줄이기 위하여 식물성 오일을 윤활유로 사용하여 노즐에서의 마찰을 줄이는 실험을 진행하였다.

식 ①와 같이 뉴턴의 점성법칙(Newton's law of viscosity)은 전단응력(shear stress)은 속도기울기(velocity gradient)에 비례하고 이 속도기울기를 작게 하는 방향으로 전단응력이 작용하는 것이다. 따라서 3D프린터의 고온 압출노즐과 필라멘트가 접하는 부분에서는 유동(flow)에 의한 전단류(shear flow) 발생으로 전단력(shearing force)이 많이 발생하여 배향 층(orientation layer)이 나타날 것이고, 노즐의 중앙 부분에서는 유동저항이 없기 때문에 배

향이 없는 비배향 층(non oriented layer)이 형성될 것이다. 이와 같이 배향 층과 비배향 층이 발생하는 이중구조는 배향 방향으로 수축이 더 크게 발생하여 잔류응력이 많이 남아있게 되는 구조적 단점을 가지고 있다<sup>8)</sup>. 따라서 전단류 발생을 줄이기 위한 방법으로 필라멘트 표면을 오일로 코팅하여 필라멘트와 노즐이 접하는 부위의 마찰을 감소시켜 프린팅 하였다.

포화 탄화수소(saturated hydrocarbon) 형태의 동물성 오일은 고체화(Solidification) 되기가 쉬워 3D프린팅 노즐의 막힘을 발생시키므로 식물성 오일을 사용하여 프린팅을 진행하였다.

실험에 사용된 오일은 필라멘트가 고온 압출노즐에서 용융되어지는 온도에서도 윤활을 위하여 액체 상태의 분자구조를 유지할 수 있어야하기 때문에, 필라멘트의 용융점 보다 끓는점이 높은 아보카도(avocado), 카놀라유(canola), 포도씨유(grape seed) 오일을 사용하였다. 각각의 끓는점은 271, 240, 220°C이다.

Fig. 5는 오일 코팅 전과 코팅 후의 각도별 인장 실험 결과이다. 실험결과 아보카도, 카놀라유, 포도씨유 오일 코팅 후에 인장강도는 적층각도 0° 시편의 경우는 각각 11, 15, 17% 증가하였으며 45° 인장시편의 경우에도 각각 7, 10, 13% 증가하였음을 알 수 있었다. 적층각도별 인장강도가 다르게 나타나는 것은 적층각도 0° 프린팅의 배향 길이가 45° 프린팅 보다 상대적으로 적으므로 수축에 의한 내부응력의 발생이 적게 일어나며 기하학적으로는 파이버(fibers)들이 마름모꼴을 형성 하면서 적층되어 파괴 시 마름모 형상 파이버들의 반복적인 파단으로 파괴가 일어나기 때문에 인장강도가 크게 나타나는 것으로 판단된다.

오일 코팅 후 시편의 인장강도와 연신율의 변화는 노즐의 고온 압출과정에서 고온으로 용융되면서 넓어진 필라멘트 분자 간격사이로 오일 분자가 침투하여 필라멘트 고분자사이의 직접 끌어당기는 힘을 약화시켜 연신율을 증가시키고, 일부는 필라멘트 고분자간의 자유체적을 감소시키고 결정화도를 증가시켜 인장강도가 증가된 것으로 판단된다. 실험결과 윤활의 효과는 불포화지방산이 상대적으로 적은 포도씨유에서 크게 나타남을 알 수 있었

다. 그리고 적층각도에 따라 기계적 특성이 다른 이유는 압출과정에서 나타나는 내부응력의 차이 때문이다.

오일이 프린팅 노즐내부에서 우수한 윤활상태를 유지하기 위해서는 낮은 점도가 필요하다. 식 ②의 안드레이드 방정식(Andrade's equation)에 의하면 유체의 점성은 온도의 함수이다.

유체는 근접한 분자간의 상호작용에 의해서 운동량이 이동되기 때문에 온도가 증가하면 분자 간 서로의 움직이기 쉽게 되며, 상호작용은 반대로 감소하여 점성이 감소하게 된다. 따라서 오일의 끓는점이 프린팅 노즐의 설정 온도와 차이가 상대적으로 적은 포도씨유 오일에서 윤활 효과가 크게 나타난 것이다.

필라멘트 오일코팅은 노즐벽면 부위의 마찰을 감소시켜 프린팅 적층물의 인장강도를 향상시킬 수 있음을 실험을 통하여 알 수 있었다. 이는 전단류 발생을 억제시켜 적층물의 내부응력을 감소시켰기 때문이다.

$$\mu = \frac{\tau}{\gamma} = \frac{\tau}{du/dy} \dots\dots\dots ①$$

$\frac{du}{dy}(\gamma)$  : gradient(rate of shear deformation)

$\tau$  : shear stress,  $\mu$  : viscosity

$$\mu = Ae^{BT} \dots\dots\dots ②$$

$A, B$  : Parameter,  $T$  : Temperature,  $\mu$  : viscosity

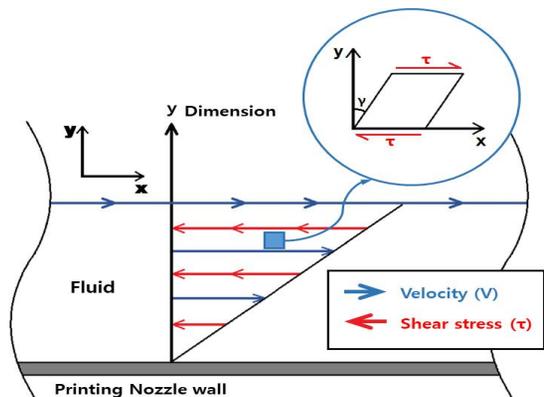


Fig. 4 Simplified schematic drawing of flow induced residual stress

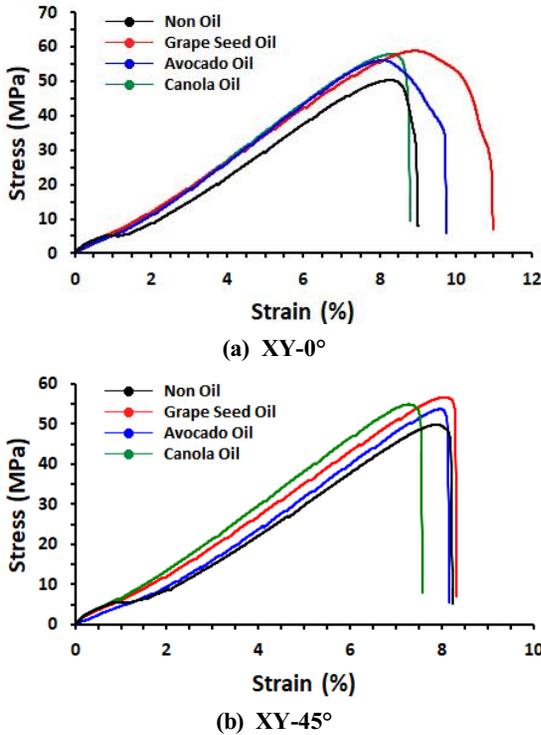


Fig. 5 Tensile stress-strain curve for Lamination of XY-Angle

## 2.2 윤활유 시편의 어닐링에 따른 인장시편의 기계적 특성 비교

긴 분자사슬들로 이루어져 있는 고분자는 3D프린팅 고온압축노즐에서 용융되면서 불규칙적이고 엉킨 코일 형태를 가지며, 프린팅 후 냉각되는 과정에서 일부 불규칙적인 구조를 유지하여 무정형 고체를 포함하게 된다. 이러한 불규칙한 구조의 결정화도를 증가시키는 방법이 플라스틱 어닐링이다. 이는 시편의 내부응력을 완화시켜 결정화도를 높이고 인장강도를 증가시켜 준다<sup>[11]</sup>.

인장시편의 어닐링 온도 설정을 위한 결정화 온도(crystallization temperature,  $T_c$ )를 시차주사열계량법(differential Scanning Calorimeter, DSC)을 이용하여 측정 하였다. 측정 장비는 NETZSCH 에서 제작한 모델명 DSC200F3이다<sup>[12]</sup>.

PLA 필라멘트 결정화온도는 Fig. 6에 나타난 바와 같이 106°C이다. 따라서 어닐링 온도를 결정화

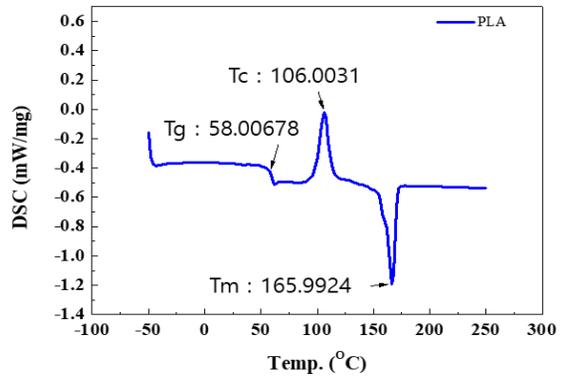


Fig. 6 Crystallization temperature of PLA filament ( $T_m$ : Melting temperature)

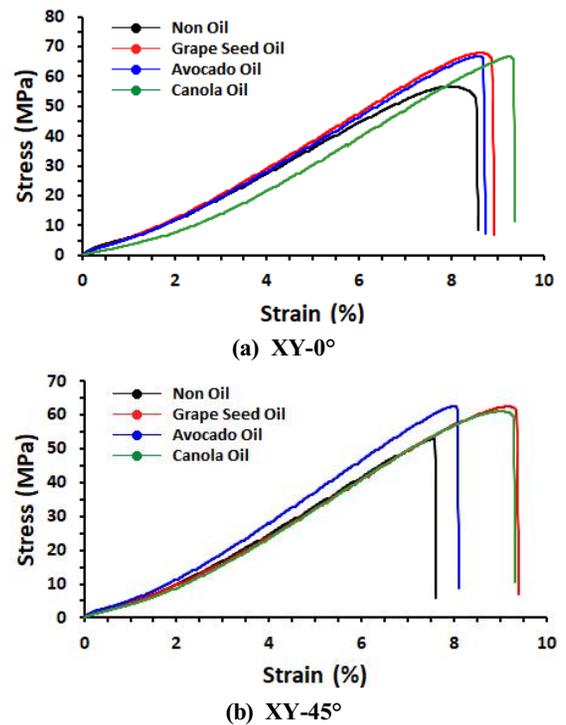


Fig. 7 Tensile stress-strain curve for Lamination of XY-Angle using oven cooling

온도인 106°C로 설정하였다.

인장시편이 충분한 열에너지를 흡수하여 폴리머 체인을 움직이고 재배치하여 내부 매트릭스(matrix)를 다시 형성할 수 있는 온도와 시간 설정을 위하여

여 향온오븐 온도를 106℃로 설정하고 2시간에 동안 시편에 열을 가한 후 노냉(oven cooling, 향온오븐에서 상온으로 냉각)하여 어닐링 전 시편과의 기계적 특성을 비교하였다. 이는 어닐링에 오일 코팅 필라멘트가 미치는 영향을 연구하기 위해서이다.

Fig. 7은 적층각도 0, 45° 어닐링 시편의 인장시험 결과를 나타낸 것으로 아보카도, 카놀라유, 포도씨유 오일 코팅한 필라멘트 0° 프린팅 시편은 어닐링 전보다 인장강도가 각각 17.8, 17.7, 19.8% 증가하였으며 45° 시편의 경우에도 각각 18.5, 18.6, 18.3% 증가하였다. 어닐링으로 비정질(amorphous)의 필라멘트가 프린팅으로 인한 내부응력을 방출하고 결정립의 미세화 및 성장이 이루어져 결정화도를 증가시켜 기계적강도가 증가되었음을 나타내는 것이다.

필라멘트 오일 코팅 프린팅으로 인장강도가 향상된 시편도 내부응력이 존재하며 이는 어닐링으로 결정구조를 더욱더 미세화 및 성장시켜 강도를 향상시킬 수 있음을 실험을 통하여 알 수 있었다.

### 3. 실험결과 토의

Fig. 8은 인장시험에 의한 시편의 파단 사진을 나타낸 것이다. 전체적으로 적층각도 0° 시편의 파단은 Fig. 9와 같이 전단응력  $\tau = \frac{1}{2} \frac{P}{A} \sin 2\theta$  에서 전단응력이 최대 값을 가지는  $\theta = 45^\circ$  방향의 사선 형태를 나타내며 파단되는 경향을 보이고 있으며 적층각도 45° 시편은 하중에 수직인 방향으로 파단되는 모습을 나타내고 있다. 즉, 시편의 파단 모습은 적층각도 0° 시편은 연성파괴(Ductile Fracture), 적층각도 45° 시편은 취성파괴(Brittle Fracture)의 경향을 나타내고 있는 것이다. 연성파괴는 취성파괴보다 많은 에너지를 흡수하기 때문에 적층각도 0° 시편의 인장강도가 상대적으로 크게 나타나는 것이며 적층각도 0° 시편의 프린팅은 파이버(Fibers)들이 마름모꼴을 형성 하면서 적층되어 파괴 시 마름모 형상 파이버들의 반복적인 파단에 의하여 파괴가 일어나기 때문에 상대적으로 인장강도가 높고, 적층각도 45° 시편은 적층 시 파이버들이 일직선 방향으로 배열되어 입자간의 결합력이 낮아 인

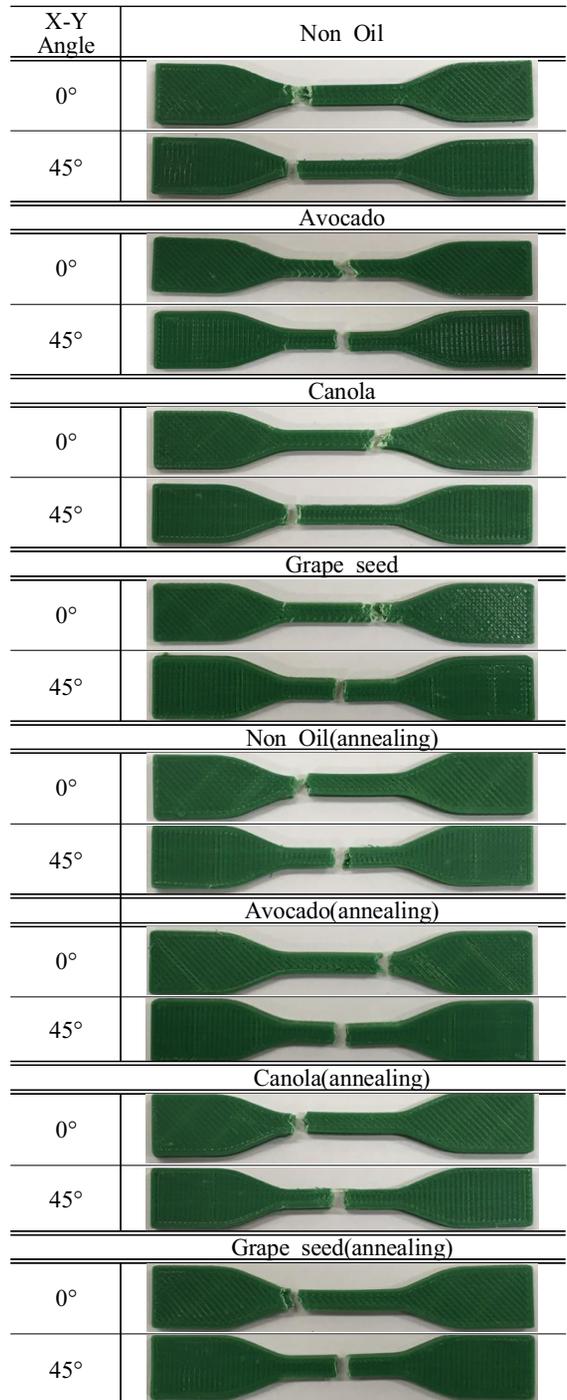
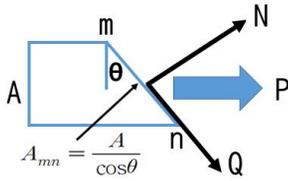


Fig. 8 Failure modes of the specimens with lamination XY-Angle:



$$\tau = \frac{Q}{A_{mn}} = \frac{P \sin\theta}{\frac{A}{\cos\theta}} = \frac{1}{2} \frac{P}{A} \sin 2\theta$$

P : tensile force Q : shear force,  
N : normal force, A : Area, Amn : angular area

Fig. 9 Shear stress in inclined plane with tensile stress

장강도가 적게 나타나는 것이다. 이는 각도에 따른 적층이 기계적 강도에 영향을 미치고 있음을 나타내는 것이다. FDM 3D프린팅으로 적층 물에 발생하는 잔류응력을 크게 두 개로 구분하면 첫 번째는 유동에 의한 잔류응력으로 필라멘트와 고온 압출노즐 벽면에서 발생하는 마찰에 의한 전단류 흐름으로 발생하는 잔류응력이다. 이러한 잔류응력은 Fig. 5에 나타난 것과 같이 윤활목적의 오일 코팅 필라멘트 프린팅으로 억제하여 기계적 강도를 개선할 수 있음을 실험을 통하여 알 수 있었다. 두 번째는 Fig. 10에 나타난 것과 같이 필라멘트가 고온 압출되면서 급랭되어 층(layer)으로 적층되는 과정에서 고온압출 층의 표면부터 냉각이 일어나 층의 표면은 수축하고 층의 중앙부는 체적을 유지하려는 현상이 발생하게 되어 층의 표면은 인장응력, 중앙부에서는 압축응력이 발생하게 된다. 그리고 시간의 경과에 따라 중앙부의 냉각이 완료되면 층의 표면은 중앙부의 수축에 대한 저항이 일어나므로 층의 중앙부는 인장응력, 층의 표면은 압축응력을 받아 잔류응력이 발생하게 된다. 이러한 프린팅 적층물의 불균일한 급랭으로 인하여 발생하는 잔류응력은 어닐링으로 분자사슬이 이동, 신축 등이 가능한 에너지를 가지게 하면 잔류응력을 완화 및 결정화를 증가시켜 기계적 강도를 개선할 수 있음을 Fig. 11의 실험 결과로 알 수 있었다<sup>[9]</sup>. 그리고 오일 코팅 필라멘트로 프린팅 된 시편의 어닐링은 흐름 및 고온 압출 후 냉각에 의한 잔류응력을 보

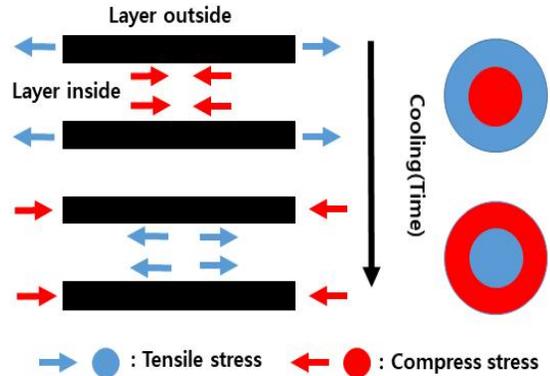
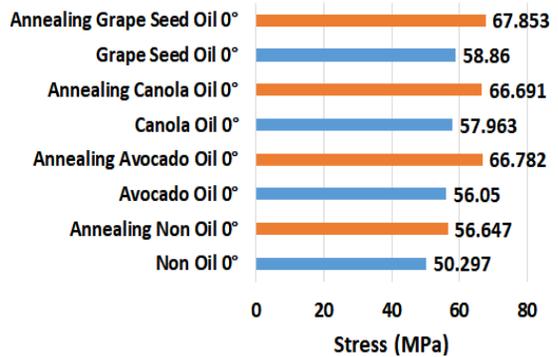
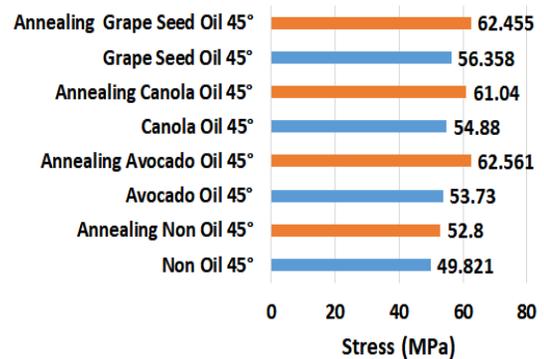


Fig. 10 Simplified schematic drawing of thermally induced residual stress



(a) XY-0°



(b) XY-45°

Fig. 11 Tensile stress-strain graph for lamination of XY-Angle and cooling condition

두 감소시켜 매우 큰 기계적 강도 향상이 일어남을 알 수 있었다.

## 4. 결론

실험결과 적층각도 0° 프린팅 시편의 인장강도는 50.3MPa 이나 오일 코팅 필라멘트로 프린팅 후 어닐링 과정을 거친 시편의 인장강도는 최대 67.8MPa을 나타내고 있다. 이는 동일 재료, 동일 프린팅 조건에서도 최대 인장강도를 35%증가 시킬 수 있다는 것을 의미하는 것이다. 그리고 적층각도 45° 프린팅 시편의 인장강도도 최대 25% 향상 시킬 수 있었다.

이러한 연구결과로 FDM 3D프린팅에서 식물성 오일은 고온압출노즐에서 프린팅 적층 구조물의 기계적 성능을 향상시킬 수 있는 적합한 기능을 가지고 있으며, 어닐링도 기계적 특성 향상에 기여하고 있음을 알 수 있었다. 이것은 3D프린팅 적층물의 기계적 특성을 오일 윤활과 어닐링으로 조절할 수 있다는 것으로 이는 다양한 분야로 활용범위가 넓어지고 있는 3D프린팅의 강도향상 및 응용범위 확대를 위한 주요한 인자로 유용하게 사용될 것이다.

본 논문을 기반으로 3D프린팅 적층물의 기계적 특성 향상을 위한 다양한 오일을 이용한 윤활 시편의 충격강도와 피로파괴 및 시편의 화학분석을 진행하여 산업용으로 적합한 기계적 특성을 지닌 3D프린팅 적층 구조물 개발에 대한 추가연구를 연구를 진행할 것이다.

## 후 기

이 논문은 2017년도 미래창조과학부의 동북아 R/D허브 기반 구축사업인 해외우수연구기관 유치사업(GDRC, 인하 IST- NASA 심우주탐사 국제공동연구센터)의 지원 및 2018년도 정부 (과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기술진흥센터의 지원 (No.2016-0-00 452, 작업자 및 사회적약자 맞춤형 근골격 안전시스템 구현을 위한 복합 3D 프린팅 활용 창의기술 개발)과 2018년도 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단 바이오의료기술개발사업의 지원을 받아 수행된 연구임 (NRF-2017 M3A9E2063256).

## REFERENCES

1. Choi, J. W., Kim, H. C., "3D Printing Technologies - A

Review," Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 14, No. 3, pp. 1~8, 2015.

2. Jang, J., Cho, D. W., "A Review of the Fabrication of Soft Structures with Three-dimensional Printing Technology," Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 14, No. 6, pp. 142~148, 2015.

3. Lanzotti, A., Grasso, M., Staiano, G., Martorelli, M., "The impact of process parameters on mechanical properties of parts fabricated in PLA with an open-source 3-D printer," Rapid Prototyping Journal, Vol. 21, No. 5, pp. 604~617, 2015.

4. Hashima, K., Nishitsuji, S., Inoue, T., "Structure - properties of super-tough PLA alloy with excellent heat resistance," Polymer, Vol. 51, No. 17, pp. 3934-3939, 2010.

5. 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, No. 4, pp. 134~139, 2015.

6. Feijoo, J. L., Cabedo, L., Giménez, E., Lagaron, J. M., Saura, J. J., "Development of amorphous PLA-montmorillonite nanocomposites," Journal of Materials Science, Vol. 40, No. 7, pp. 1785-1788, 2005.

7. Guevara-Morales, A., Figueroa-López, U., "Residual stresses in injection molded products," Journal of Materials Science, Vol. 49, Issue 13, pp. 4399-4415, 2014.

8. Jackson Jr, W. J., Caldwell, J., R., "Antiplasticization. II. Characteristics of antiplasticizers," Journal of Applied Polymer, Vol 11, Issue 2, pp 211~226, 1967.

9. Jacobsen, S., Fritz, H. G., "Plasticizing polylactide—the effect of different plasticizers on the mechanical properties," Polymer Engineering & Science, Vol. 39, Issue 7, pp. 1303~1310, 1999.

10. Akay, M., Ozden, S., "The influence of residual stresses on the mechanical and thermal properties of injection

moulded ABS copolymer,” Journal of Materials science, Vol. 30, Issue 13, pp 3358~3368, 1995.

11. Lee, S. K., Kim, Y. R., Kim, S. H., Kim, J. H., “Investigation of the Internal Stress Relaxation in FDM 3D Printing : Annealing Conditions”, Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 17, No. 4, pp. 130~136, 2018.