

# FDM 3D프린팅 어닐링 조건에 따른 내부응력 완화에 관한 연구

이선곤\*, 김용래\*, 김수현\*, 김주형\*<sup>#</sup>

\*인하대학교 기계공학과

## Investigation of the Internal Stress Relaxation in FDM 3D Printing : Annealing Conditions

Sun Kon Lee\*, Yong Rae Kim\*, Su Hyun Kim\*, Joo Hyung Kim\*<sup>#</sup>

\*Department of Mechanical Engineering, Inha University

(Received 26 April 2018; received in revised form 12 May 2018; accepted 19 May 2018)

### ABSTRACT

In this paper, the effects of different 3D printing parameters including laminated angle and annealing temperature, were observed for their effects on tensile testing. In 3D printing, a filament is heated quickly, extruded, and then cooled rapidly. Because plastic is a poor heat conductor, it heats and cools unevenly causing the rapid heating and cooling to create internal stress within the printed part. Therefore, internal stress can be removed using annealing and to increase tensile strength and strain. During air cooling at annealing temperature 140°C, the strain of laminated angle 45° specimens tended to increase by 46% while the tensile stress tended to increase by 7.4%. During oven cooling at annealing temperature 140°C, the strain of laminated angle 45° specimens tended to increase by 34% while the tensile stress tended to increase by 22.2%. In this study, we found "3D printing with annealing" eliminates internal stress and increases the strength and stiffness of a printed piece. On the microstructural level, annealing reforms the crystalline structures to even out the areas of high and low stress, which created fewer weak areas. These results are very useful for making 3D printed products with a mechanical strength that is suitable for applications.

**Key Words :** Additive Manufacturing(적층가공), Poly Carbonate Annealing(폴리 카보네이트 어닐링), 3D Printing Laminated Angle(3D프린팅 적층 각도), 3D Printing Annealing(3D프린팅 어닐링)

### 1. 서 론

3D프린터(3D Printer)는 재료를 자르거나 깎아서 3차원형상을 제작하는 절삭가공(Subtractive Manufacturing)이 아니라 재료를 한 층씩(layer-by-layer)

쌓아 가면서 제작하는 적층가공(Additive Manufacturing : AM) 장치이다. 그리고 3D프린팅(3D Printing)은 적층공정(layer-by-layer deposition)으로 3차원 형상을 제작하는 기술을 의미한다. 이러한 기술은 쾌속 조형(Rapid Prototyping ; RP)에서 유래하였으나, 최근 적용분야가 시제품(prototype)을 벗어나 다양한 용도의 제품 제작에 활용되고 있다<sup>[1,2]</sup>.

널리 활용되어지고 있는 FDM(Fused Deposition

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

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

Modeling) 3D프린터는 플라스틱 필라멘트가 고온상태의 노즐을 지나면서 용융압출과 동시에 급랭되는 적층 과정의 반복으로 3차원 형상을 적층 제작하는 기계이다.

일반적으로 열전도성이 좋지 않은 플라스틱은 고온 압출과 급랭으로 인한 적층 시 내부응력(internal stress) 및 결정화도(degree of crystallinity)의 차이 등으로 비 이상적인 층간 결합을 발생시켜 기계적 강도를 저하시키는 원인을 제공하게 된다. 이에 FDM 3D프린팅의 불규칙적인 급랭 등으로 발생하는 구조적 결함을 보완할 수 있는 어닐링(annealing)에 대하여 연구를 진행하여 산업용으로 적합한 기계적 강도를 얻을 수 있는 최적의 프린팅 조건을 제시하고 활용 범위 확대에 기여하고자 한다.

## 2. 실험 및 고찰

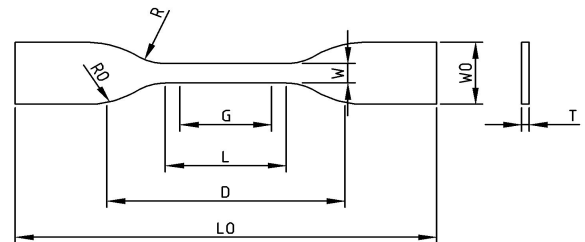
본 연구를 위하여 산업용으로 높은 인장강도와 내열성을 지니고 있어 자동차, 우주항공, 전기·전자, 의료등 다양한 분야에 널리 사용되고 있는 폴리카보네이트(Poly Carbonate)를 FDM 3D프린팅 인장시편재료로 선정하여 Fig. 1과 같이 ASTM-D638 type IV<sup>B</sup>으로 디자인 하였다. Table 1은 인장시편 3D프린팅을 위한 설정이다. 인장실험은 Fig. 2의 만능시험기를 사용하여 0.1mm/min 속도로 시편 당 각각 5회의 인장실험을 실시하여 평균값을 채택하였다.

FDM 3D프린팅 시 무정형(amorphous)의 조직이 없는 필라멘트는 고온 노즐의 압출과 급랭을 거치면서 큰 결정(grain)으로 재구성이 이루어지게 되고, 이때 커진 결정체의 결정 사이 선은 쉽게 분리될 수 있다. 또한 프린팅 구조물이 냉각될 때 표면과 내부의 냉각속도 차이, 적층방향에 의한 분자배향(molecular orientation)으로 발생하는 내부응력 등 다양한 이유가 기계적 강도를 저하시키는 원인으로 예측되어진다. 이러한 FDM 3D프린팅 출력물의 구조적 단점을 보완하기 위한 어닐링에 대하여 연구를 진행하고자 한다<sup>[3,4]</sup>.

폴리카보네이트 인장시편을 필라멘트의 유리전이온도(glass transition temperature, T<sub>g</sub>)이상, 용융 온

도 이하로 어닐링 하여 기계적 강도 변화를 측정하기 위하여 먼저 시차주사열계량법(differential Scanning Calorimeter, DSC)을 이용하여 유리전이온도 측정 하였다. 측정 장비는 NETZSCH 에서 제작한 모델명 DSC200F3이다. 폴리카보네이트 필라멘트 유리전이온도 측정결과는 Fig. 3에 나타난 바와 같이 약 105℃이며, 필라멘트 제조사에서 제공하는 필라멘트 녹는 온도는 235~260℃이다. 그리고 시편을 140℃이상의 온도로 항온오븐에서 열을 가할 시 비틀림과 들뜸이 발생하는 것을 확인하여 시편이 녹거나 형상이 변형되지 않는 120, 130, 140℃를 어닐링 온도로 설정하였다.

3D프린팅으로 적층각도별 시편을 제작하고 각각의 시편을 항온오븐에 넣고 설정된 열을 가한 후 공랭(air cooling)과 노냉(oven cooling, 항온오븐에서 상온으로 냉각)으로 어닐링 한 시편과 어닐링 이전 시편과의 기계적 특성을 비교하고자 한다.



	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	2

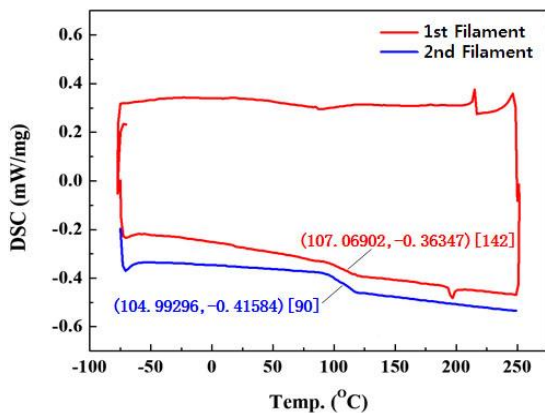
Fig. 1 Specimen Dimension of ASTM-D638 type IV<sup>B</sup>

**Table 1 3D printer conditions**

PC Condition	Value
Filament Diameter	1.75 (mm)
Nozzle Size	0.8 (mm)
Layer height	0.25 (mm)
Wall Thickness	0.8 (mm)
Bottom/Top Thickness	0.8 (mm)
Fill Density	50 (%)
Print Speed	20 (mm/s)
Printing Temperature	260 (°C)
Bed Temperature	90 (°C)



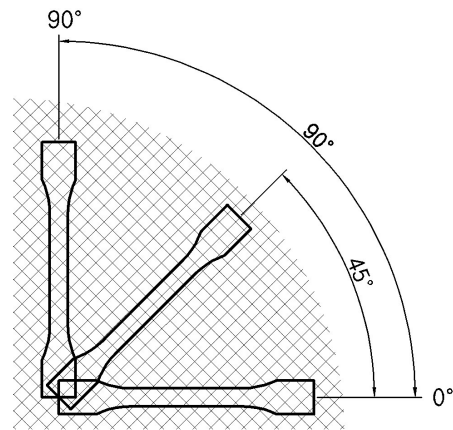
**Fig. 2 Experimental setup for the tensile test**



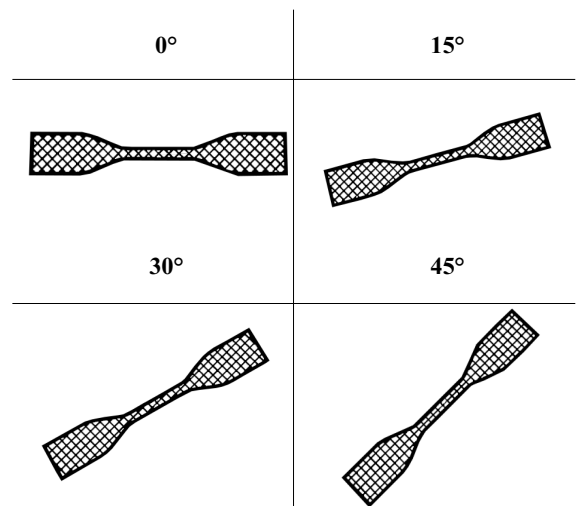
**Fig. 3 Glass transition temperature of PC filament**

## 2.1 3D프린팅 각도 변화에 따른 인장시편의 기계적 특성 비교

3D프린팅 시 각도 변화에 따른 시편의 기계적 특성을 비교하기 위하여 Fig. 1의 시편을 Fig. 4와 같이 XY-각도 0, 15, 30, 45°로 각각 5개씩 프린팅하여 인장실험을 수행하였다. 이는 XY-각도가 시편에 미치는 기계적 특성을 연구하기 위해서이다 [5].



**(a) XY-Angle**



**(b) Lamination XY-Angle**

**Fig. 4 Lamination XY-Lamination Angle of the tensile test specimens**

Fig. 5는 폴리카보네이트 인장시편의 XY-각도별 인장강도와 변형률을 나타낸 그래프이다.

3D프린팅에서의 배향은 프린팅 시 고온으로 용융된 필라멘트가 적층방향에 따라 긴 사슬구조(chain structure)로 늘어나면서 생기는 고분자 배열(polymer arrangement)으로 고온상태의 노즐과 필라멘트가 접하는 부분은 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 배향이 없는 비배향 층(non-oriented layer)이 형성될 것이다. 이와 같이 배향 층과 비배향 층이 발생하는 이중구조는 배향 방향으로 수축이 더 크게 발생하여 내부응력이 많이 남아있게 된다.

XY-0°프린팅은 배향 길이가 상대적으로 적으므로 수축에 의한 내부응력의 발생이 적게 일어나며 기하학적으로는 파이버(fibers)들이 마름모꼴을 형성하면서 적층되어 파괴 시 마름모 형상 파이버들의 반복적인 파단으로 파괴가 일어나기 때문에 인장강도와 변형률이 크게 나타나는 것으로 판단된다. 그리고 XY-45°시편은 적층 시 배향 길이가 가장 크게 나타나는 방향으로 수축에 의한 내부응력이 크며 기하학적으로는 파이버들이 일직선 방향으로 배열되어 입자간의 결합력이 낮고 탄성계수(modulus of elasticity)가 커서 인장강도와 변형률이 적게 나타나는 것이다. 따라서 XY-각도에 따른 적층이 기계적 강도에 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

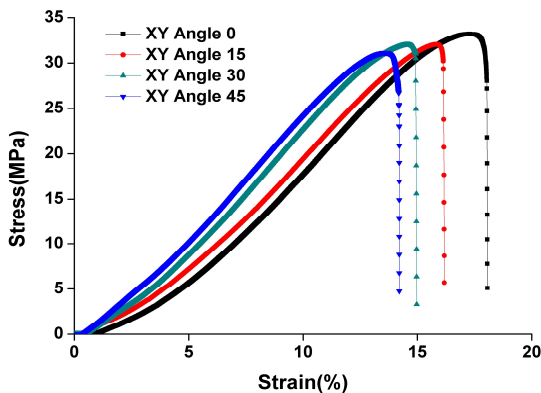


Fig. 5 Tensile stress-strain curve for Lamination of XY-Angle

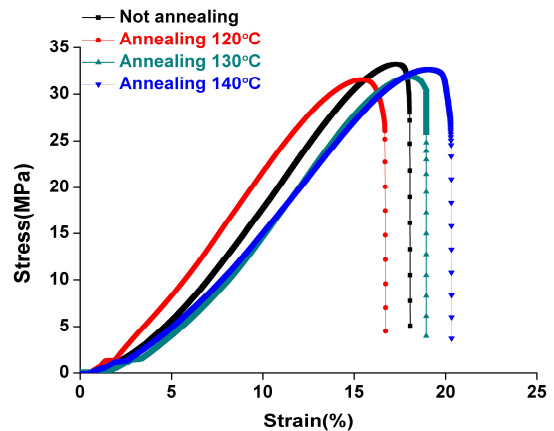
## 2.2 어닐링 공랭(air cooling)의 적층 각도별 기계적 특성 비교

시편이 열에너지를 흡수하여 폴리머 체인을 움직이고 재배치하여 내부 매트릭스(matrix)를 다시 형성할 수 있는 온도와 시간 설정을 위하여 항온오븐 온도를 120, 130, 140°C로 설정하고 2시간에 동안 시편에 열을 가한 후 공기 중에서 상온으로 냉각하였다.

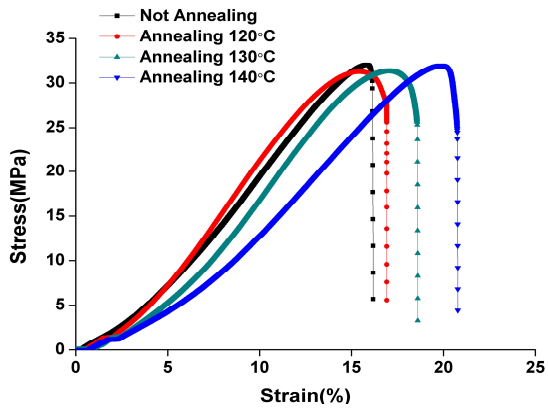
Fig. 6는 XY-각도별 시편을 120, 130, 140°C 항온오븐으로 2시간씩 가열 후 공기 중에서 상온으로 냉각 후 인장실험 결과를 나타낸 것이다. 적층 각도 XY-0°에서 어닐링 온도 120°C를 제외하고 나머지 시편의 변형률은 어닐링 전 시편보다 증가하였음을 알 수 있다. 이는 130, 140°C 어닐링으로 비정질(amorphous)의 필라멘트가 프린팅으로 인한 내부응력을 방출하고 결정립의 미세화가 이루어져 재질이 연화되었음을 나타내는 것이다.

XY-45°가 XY-0°와 비교 시 어닐링으로 인한 효과가 상대적으로 크게 나타나는 이유는 XY-45°적층이 적층방향에 따른 배향으로 발생하는 수축이 크기 때문에 내부응력이 커서 어닐링 효과가 크게 나타나는 것으로 판단된다.

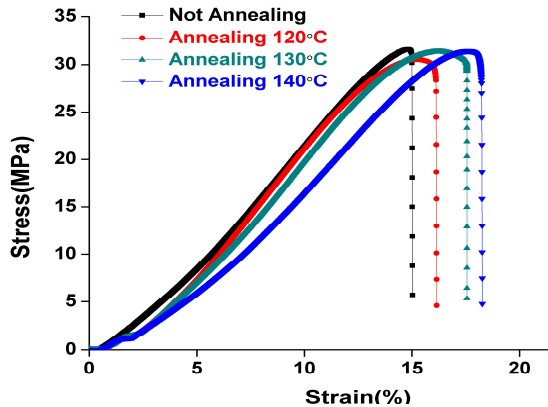
실험결과 공랭은 XY-0°의 경우 130°C 이상이 어닐링에 적합하다는 것을 알 수 있었고 XY-45°와 같이 내부응력이 많을수록 어닐링 효과가 크게 나타남을 알 수 있었다.



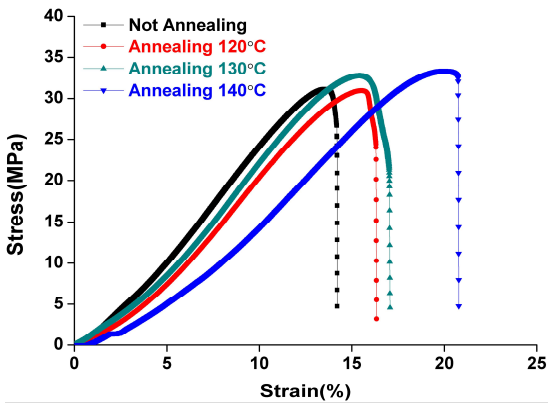
(a) XY-0° Air cooling



(b) XY-15° Air cooling



(c) XY-30° Air cooling



(d) XY-45° Air cooling

Fig. 6 Tensile stress-strain curve for Lamination of XY-Angle using air cooling

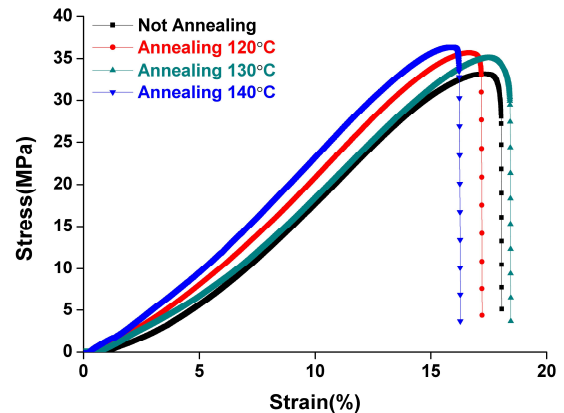
## 2.3 어닐링 노냉(oven cooling)의 적층 각도별 기계적 특성 비교

Fig. 7은 XY-0, 15, 30, 45°프린팅 시편을 항온오븐에서 각각 120, 130, 140°C로 2시간씩 열을 가한 후 오븐에서 상온까지 서서히 냉각시킨 다음 인장 테스트 한 결과를 나타낸 것이다.

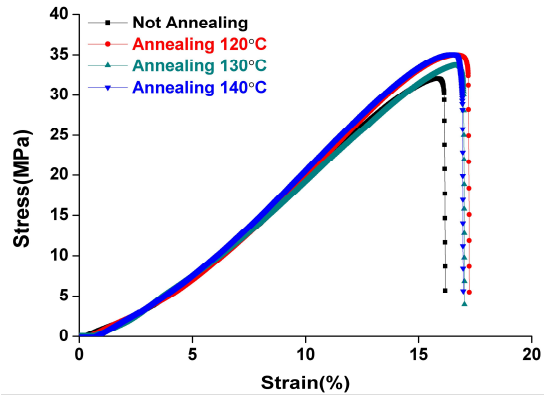
실험 결과 인장강도는 모든 시편에서 증가 되었으며 변형률은 XY-0°이외의 나머지 시편에서 증가되었음을 알 수 있다. 이는 프린팅 시 급냉으로 인한 내부응력의 발생이 상대적으로 적은 XY-0°시편은 어닐링 노냉의 효과가 미미하다는 것을 나타내는 것으로 어닐링 공랭에서 나타난 현상과 동일하다.

어닐링 노냉은 필라멘트가 3D프린팅으로 인한 용융 적층 시 급랭으로 결정화작용을 거치지 않은 채 고상화(solidification) 되어 비정질 구조를 지니게 되는데 이때, 오븐에서의 열처리로 발생한 내부응력 일부를 방출하고 결정구조를 미세화 시킨 후 고온상태가 일정시간 유지되는 서냉으로 결정립 성장(grain growth)을 지속시켜 시편의 인장강도를 증가시킨 것이다.

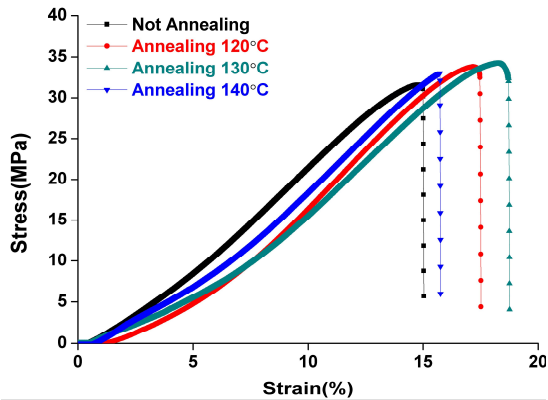
인장실험 결과 어닐링 온도 140°C, 적층각도 XY-45°시편의 인장강도와 변형률 모두 큰 폭으로 증가되었음을 알 수 있다. 이는 프린팅 시 발생하는 내부응력이 가장 크기 때문에 결정립의 미세화로 연화되는 변형률도 크고 결정립성장으로 인한 인장강도의 증가 폭도 큰 것이다.



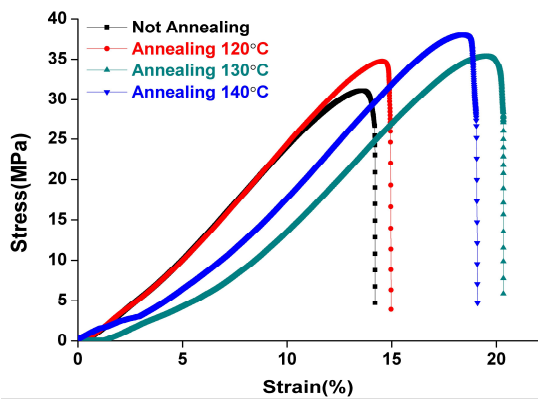
(a) XY-Angle 0° oven cooling



(b) XY-Angle 15° oven cooling



(c) XY-Angle 30° oven cooling



(d) XY-Angle 45° oven cooling

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

### 3. 고찰 및 비교

3D프린팅 적층물에 발생하는 잔류응력의 발생 원인은 크게 (1) 3D프린팅 시 용융된 필라멘트의 배열은 고분자 사슬로 안정된 상태로 정렬하려 하지만 안정화되기 전 고형화가 이루어지면서 프린팅 구조물에 잔류응력이 발생하게 되는데 이는 용융 필라멘트가 노즐에서 압출되면서 바로 급랭되어 나타는 현상이다. 그리고 (2) 고온 프린팅 노즐에 의한 압출 시 노즐 벽면에는 마찰과 냉각으로 인한 전단류가 발생하여 전단의 영향을 받지 않는 노즐의 중앙부보다 압출 속도가 느리게 된다. 따라서 프린팅 시 용융 필라멘트 외부는 내부에 비해서 높은 전단변형률에 의한 큰 전단응력을 가지게 되면서 잔류응력이 발생하게 된다. 이러한 잔류응력의 원인을 줄이기 위하여 어닐링을 수행하였다. 어닐링 수행결과 Fig. 8에 나타난 것과 같이 공랭은 불균일한 급랭으로 인하여 발생된 내부응력주로 선형결함(linear defects)을 제거하여 시편을 연화시켜 변형률을 증가시켰으며 노냉은 결정화(crystallization)를 증가시켜 재료의 인장강도를 증가시켰음을 알 수 있었다. 또한 XY-45°시편의 어닐링 효과가 크게 나타나는 것은 적층방향에 따른 내부응력이 더 많이 남아있기 때문에 어닐링 후 결정구조 미세화 및 결정립 성장으로 인한 어닐링 효과가 크게 나타나는 것이다.

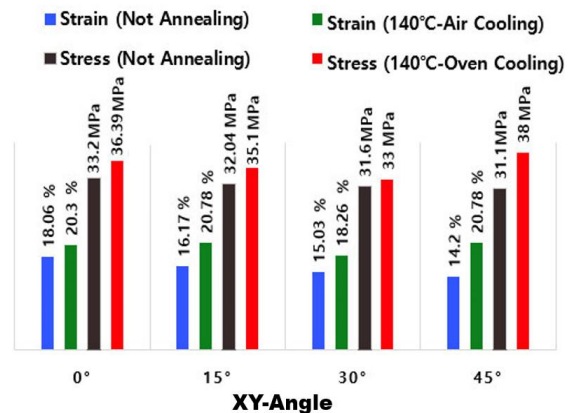


Fig. 8 Tensile stress-strain graph for lamination of XY-Angle and cooling condition

#### 4. 결론

본 연구결과 폴리머구조인 FDM 3D프린팅 적층물은 어닐링으로 분자사슬이 이동, 신축 등이 가능한 에너지를 가지게 되며, 이 에너지는 불균일한 급랭으로 인한 내부응력을 완화시키고 결정화를 증가시켜 기계적 특성을 향상 시키는 것을 알 수 있었다.

Fig. 8에 나타난 바와 같이 적층각도 0°프린팅 시편의 변형률은 18.06%이다. 그리고 적층각도를 15, 30, 45°로 변경하여 프린팅하면 내부응력으로 인하여 변형률은 16.17, 15.03, 14.2%로 줄어드나 140℃ 어닐링 공랭으로 열처리 하면 적층각도 0°어닐링 이전 시편의 변형률보다 증가되었음을 알 수 있었다. 그리고 적층각도 0°시편의 인장강도는 33.2MPa 이다. 이를 적층각도 15, 30, 45°로 변경하여 프린팅하면 인장강도는 32.04, 31.6, 31.1MPa로 줄어들었으나 140℃ 어닐링 노냉으로 열처리하면 적층각도 0°어닐링 이전의 인장강도보다 큰 값으로 증가되었음을 알 수 있었다.

3D프린팅 어닐링은 적층 시 형성된 큰 결정을 보다 작은 결정으로 변화시키고, 결정 구조의 응력을 균등하게 만들어 취약한 부분을 제거하여 기계적 특성을 향상시켰음을 알 수 있었다. 또한 이러한 연구결과를 적층각도별로 다르게 나타나는 프린팅 적층물의 기계적 특성을 어닐링을 이용하여 조정할 수 있다는 것으로 이는 3D프린팅 활성화를 위한 주요한 인자로 유용하게 사용될 것이다.

#### 후 기

이 논문은 2017년도 정부 (과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기술진흥센터의 지원 (No.2016-0-00452, 작업자 및 사회적약자 맞춤형 근골격 안전시스템 구현을 위한 복합 3D 프린팅 활용 창의기술 개발)과 2017년도 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단 바이오의료기술개발사업의 지원을 받아 수행된 연구임 (NRF-2017M3A9E2063256).

#### 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. Seol, Kyoung-Su., Shin, Byoung-Chul., Zhang, Sung-Uk., "Fatigue Test of 3D-printed ABS Parts Fabricated by Fused Deposition Modeling," Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 17, No. 3, pp. 93~101, 2018.