

# 레이저 적층제조기술로 제작한 폴리아미드 12 시편의 인장특성 연구

김무선

한국철도기술연구원 도시철도연구팀

## Study on Tensile Properties of Polyamide 12 produced by Laser-based Additive Manufacturing Process

Moosun Kim

Urban Transit Research Team, Korea Railroad Research Institute

**요약** 복합 형상 부품 제작 및 제작 공정의 일체화 장점으로 3D 프린팅 기술의 적용 분야가 확대되고 있으며, 지속적인 연구 개발에 의해 다양한 기술방안들이 등장하고 있다. 대표적인 기술로는 파우더 형태의 소재 위에 레이저를 조사함으로써 원하는 영역을 소결 및 적층 제작하는 방식의 SLS 기술이 있으며, 고성능의 엔지니어링 플라스틱을 활용하여 실제 사용할 수 있는 부품을 제작하는 사례가 늘어나고 있다. 본 연구에서는 활용도가 높은 고분자 소재인 폴리아미드 12 소재 및 글라스 비드가 보강된 폴리아미드 12 소재를 대상으로 인장시편을 제작하여 시편 제작 방향 및 인장 시험 온도에 따른 특성 결과를 비교 분석하였다. 시편 제작방향은 작업 평면 기준으로 0°, 45°, 90° 로 구분하였으며, 인장시험온도는 -25°C, 25°C, 60°C로 조건을 구분하였다. 시험 결과로부터 제작 방향이 90°에 가까울수록 두 소재 모두 탄성률의 미세한 감소를 보였으며, 인장강도는 PA12보다 글라스 비드 보강 PA12가 제작방향에 대한 의존성을 명확하게 보였다. 또한 시험 온도 증가에 따라 탄성률 및 인장강도의 저하를 확인할 수 있었다.

**Abstract** The application of 3D printing technology is expanding due to the production of the complex-shape parts and the one-step manufacturing process. Moreover, various technical solutions in 3D printing are emerging through continuous research and development. Representative technologies include SLS technology, in which a desired area is sintered and laminated by irradiating a powder-type material with a laser. In addition, high-performance engineering plastic parts are being manufactured in increasing numbers. In this study, tensile specimens were fabricated from polyamide 12, a widely available polymer, and the glass bead-reinforced polyamide 12. The specimen-build orientation was divided into 0°, 45°, and 90° on the fabrication platform, and the tensile test temperature was -25°C, 25°C, and 60°C. The test results showed that the tensile modulus of both materials decreases as the build orientation becomes closer to 90°. In addition, the tensile strength of glass bead-reinforced PA12 showed more dependence on the build orientation than PA12. In addition, the tensile modulus and tensile strength decreased with increasing test temperature.

**Keywords** : Build Orientation, Glass Bead, Polyamide 12, Selective Laser Sintering, Tensile Property

---

이 논문은 2019년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2018R1D1A1B07044505)

\*Corresponding Author : Moosun Kim(Korea Railroad Research Institute)

email: mskim@krii.re.kr

Received September 3, 2019

Revised October 21, 2019

Accepted November 1, 2019

Published November 30, 2019

## 1. 서론

최근 들어, 제품을 제작하는 성형공정 기술인 3D 프린팅 기술이 4차산업의 주요 핵심 기술로서 주목을 받고 있다. 일반적인 3D 프린팅 기술은 평면상의 2차원 구조물을 높이 방향으로 반복하여 적층함으로써 3차원의 최종 제품을 제작 완성하는 기술이다. 이 때 각 층을 이루는 2차원 구조물의 성형과 층간 접합을 위한 용융기술로서 레이저 또는 전자빔을 활용한다. 소재는 파우더 형태로 평면 위에 공급되거나 분사되고 열에너지에 의해 멜팅풀을 형성하게 되며 이미 제작된 아래층의 구조물에 용착하게 된다.

위와 같은 원리로 제작되는 구조물은 내부 형상이 복잡한 경우에도 별도의 조립 및 용접 절차 없이 일체형으로 제작할 수 있으며, 따라서 설계자가 기능성 및 경량화 중심으로 제품을 설계할 수 있는 자유도가 증가하는 장점이 있다.

현재 3D 프린팅으로 제품을 제작할 수 있는 소재로는 엔지니어링 플라스틱과 티타늄, 스테인레스 스틸, 알루미늄 등의 금속소재가 대표적이다.

그 중 엔지니어링 플라스틱 제품은 대량 생산 제품이 아닌 경우 일반적 제작방법인 사출이나 압축 공정 없이 제작이 가능하며, 금형제작의 시간과 비용 등을 절감할 수 있다. 또한 제품 시험 후 설계 변경이 용이하기 때문에 부품 개발에 있어 유리하다. 따라서 3D 프린팅 공정으로 제작한 엔지니어링 플라스틱 제품을 현장에 실제 적용하는 사례가 증가하고 있다.

대표적인 엔지니어링 플라스틱으로 폴리아미드 12(PA12) 소재를 들 수 있다. 현재 대부분의 3D 프린팅용 엔지니어링 플라스틱은 PA12 기반으로 공급되고 있는데, PA12 기본 소재에 용도에 따라 세부적인 조성이 달라진다.

고분자를 주요 소재로 다루는 3D 프린팅 기법으로는 자외선에 의한 레진의 경화 특성을 활용한 SLA(Stereolithography Apparatus) 기법과 소재를 와이어 형태로 투입하여 헤드에서 멜팅하여 압출하는 방식의 FDM(Fused Deposition Modeling) 기법, 프린트 헤드에서 퓨징 에이전트를 분사하고 적외선으로 소재 파우더를 용융하는 방식의 MJF(Multi Jet Fusion) 기법, 그리고 레이저로 소재를 용융하여 용착하는 SLS(Selective Laser Sintering) 기법이 있다[1].

각 방식에 관한 연구가 활발히 진행 중에 있는 가운데, 이번 연구의 고려 대상인 SLS 기법 관련한 연구로는 소재 용융과 관련된 레이저 공정조건에 따른 소재의 물성

연구[2-5] 등이 진행되었다.

또한 SLS 기법 적용시 글라스 비드 보강 유무 별로 시험 온도 및 제작 방향에 따른 PA12 시편의 굴곡 특성 분석에 관하여 기본 연구[6]가 진행되었다.

이상의 연구에서 적층기법으로 구조물을 제작할 때 기본적인 물성의 비등방성을 확인할 수 있었는데, 본 연구에서는 글라스 비드 보강에 따른 PA12 소재의 인장 특성에 관하여 다양한 시험 온도와 시편의 제작 방향에 따라 인장 시험을 진행한 후 그 결과를 비교 분석하였다.

## 2. 공정 특성 및 시편 제작

### 2.1 선택적 레이저 소결 공정 기술

앞서 언급한 바와 같이 고분자를 대상으로 하는 3D 프린팅 기술 중에서 레이저를 활용한 선택적 레이저 소결(SLS) 공정기술은 엔지니어링 플라스틱 적용과 빠른 공정 시간, 우수한 물성 등으로 인하여 양산형 적층기술에 가장 가까운 기술로 고려되고 있다.

SLS 공정은 리코터를 사용하여 평면 플레이트에 얇은 층의 소재 파우더를 펼친 후, CO<sub>2</sub> 레이저를 사용하여 대상 영역의 파우더를 하단 층에 용착하게 된다. 이와 같은 공정은 3차원 형상의 최종 제품이 완료될 때까지 반복하게 된다. SLS 공정 개념을 Fig. 1[6]에 나타내었다.

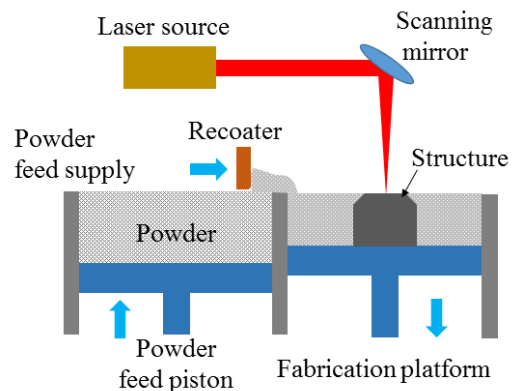


Fig. 1. Schematic diagram of SLS[6]

기본적으로 SLS 공정 기술은 소재 용융에 직접적인 영향을 주는 레이저의 공정 조건, 즉 레이저 파워, 스캔 속도 및 간격과 적층 레이어의 두께 등에 의해 물성 품질이 다양해진다. 공정 변수와 파우더에 공급되는 에너지의 관계는 대표적으로 아래의 한가지 파라미터로 정의할 수

있다[7].

$$E = \frac{P}{udh} \quad (1)$$

이 때, E는 에너지 밀도( $J/mm^3$ )를, P는 레이저 파워(W)를, u는 스캔 스피드( $mm/s$ ), h는 스캔 간격( $mm$ )을, 그리고 d는 레이어 두께( $mm$ )를 의미한다.

또한 레이저로 소재의 멜팅풀(melting-pool)이 형성될 때, 주변 파우더로의 열전달 현상에 의해 최종 제품의 표면 품질이 달라지므로, 고품질의 최종 물성을 위해서 공정조건 최적화가 필수적으로 이루어져야 한다.

## 2.2 시편 제작

SLS 공정에 따른 고분자 소재의 인장 시험을 진행하기 위해 Fig. 2에서 보이는 바와 같이, 제작 평면을 기준으로, 시편 길이 방향으로 시편과 제작 평면이 이루는 각도를 0도, 45도, 90도로 구분하여 시편 제작을 진행하였다. 인장 시편 제작 규격은 플라스틱의 인장 특성 시험 규격인 ASTM D638[8]을 인용하였다.

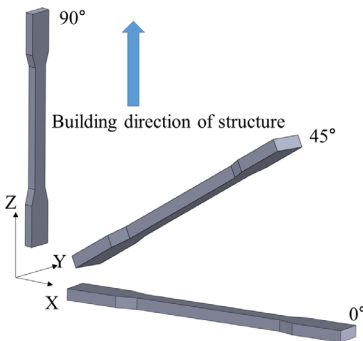


Fig. 2. Build-up angle of specimen

인장 시편을 제작하기 위해 사용한 소재로는 PA12 기반의 두 가지 소재이며 EOS社에서 생산하는 PA2200 및 글라스 비드가 함유된 PA3200GF를 사용하였다. 각 소재 파우더의 평균 입자크기와 밀도는  $56 \mu m$ ,  $0.93 g/cm^3$ 와  $60 \mu m$ ,  $1.22 g/cm^3$ 이다. 그리고 인장 시편 제작에 사용한 SLS 기술 3D 프린팅 장비로는 독일 EOS社의 P396 모델(레이저 최대출력 70 W, 최대 적층 속도 32 mm/h, 레이어 두께 0.06~0.18 mm)을 활용하였다.

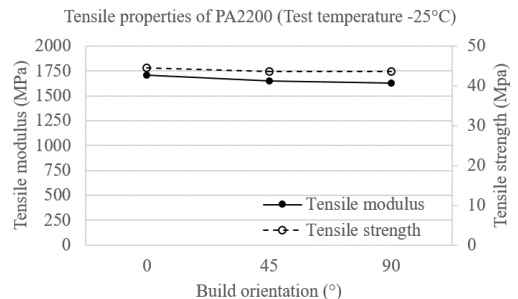
시편 제작을 위한 레이저 조건으로 레이저 파워는 50

W, 스캔속도는 590 mm/sec로 지정하였으며, 레이어 두께는 PA2200 및 PA3200GF 각각  $100 \mu m$  및  $120 \mu m$ 으로 지정하였다.

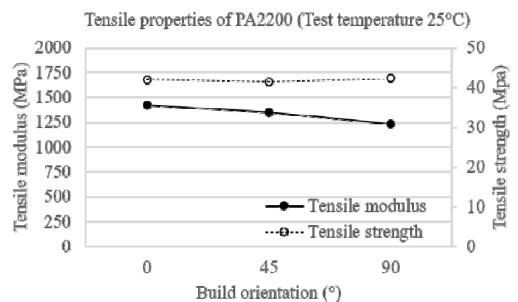
## 3. 결과 및 고찰

두 가지 소재 및 3가지 제작 방향별로 제작된 인장시편을 대상으로 Shimadzu社의 AGS-X 10kNX (최대하중 : 10kN, 정밀도 : 0.1%) 시험기를 이용하여 인장 시험을 진행하였다. 시험온도는 적용대상인 철도차량 부품의 작동온도 한계를 참조하여  $-25^\circ C$ ,  $25^\circ C$ ,  $60^\circ C$  등 3개 조건으로 구분하였으며, 인장속도는 5 mm/min 기준으로 시험 조건당 5개의 시편을 대상으로 한 시험결과에서 최대 및 최소값을 제외한 평균값을 비교하였다. 인장탄성률을 계산하기 위해 시험에서 얻어지는 하중-변형 곡선으로부터 선형에 가까운 하중 300N과 600N 구간의 선형기울기를 계산하였으며 이 값을 시편의 최초 평균 단면적으로 나누어 최종 인장탄성률 값을 계산하였다.

Fig. 3에 PA2200 소재시편을 대상으로 하여 각 시험 온도에서 시편 제작 방향에 따른 인장탄성률과 인장강도 시험 결과를 비교하였다.



(a)



(b)

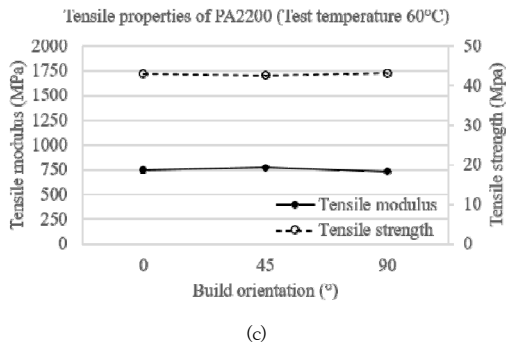


Fig. 3. Comparison of tensile modulus and tensile strength of PA2200 according to build orientation at test temperature of (a) -25°C (b) 25°C and (c) 60°C

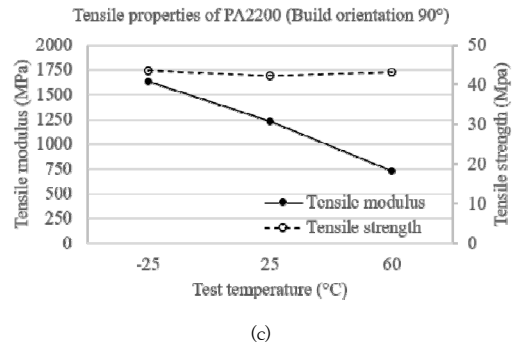
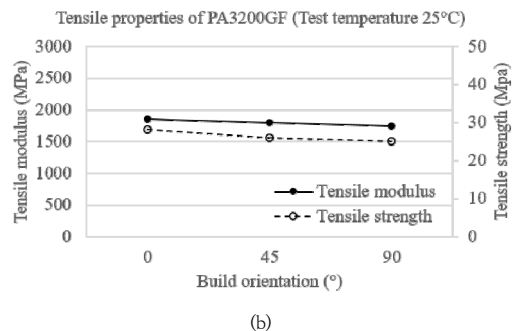
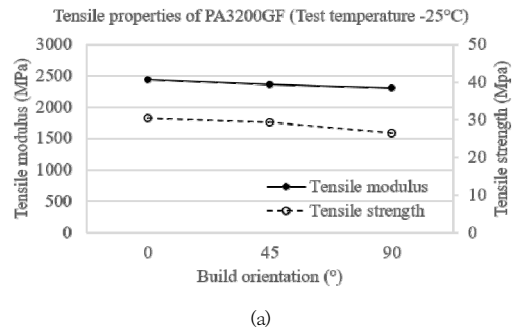
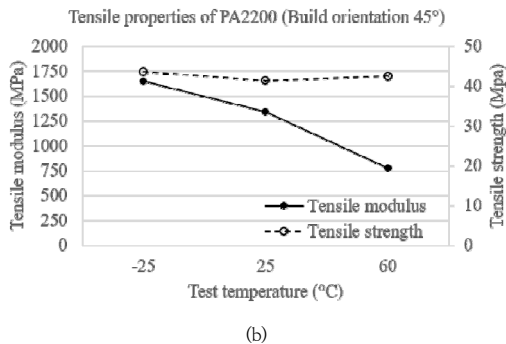
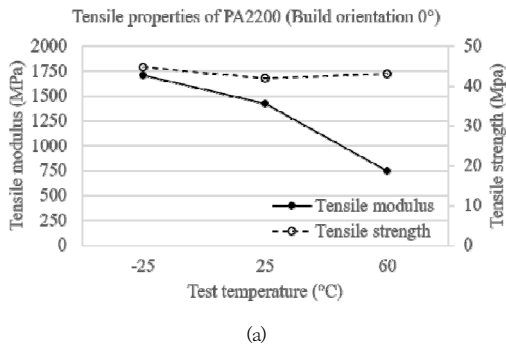


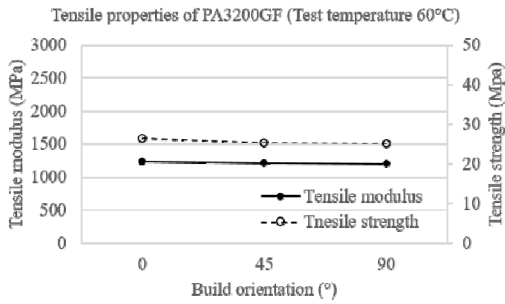
Fig. 4. Comparison of tensile modulus and tensile strength of PA2200 according to test temperature with build orientation of (a) 0° (b) 45° and (c) 90°

먼저 시험온도 -25°C 와 25°C 조건에서 시편 제작방향이 0°에서 90°로 증가할수록 인장탄성률은 점차적으로 감소함을 보인다. -25°C의 경우 90°의 인장탄성률이 0°의 인장탄성률 값 대비하여 4.5% 감소하였으며, 25°C 에서는 13.4%로 감소폭이 커졌다. 하지만 60°C 시험온도에서는 0°에서 90°로 시편 제작방향의 증가에 대한 인장탄성률의 일정한 변화 패턴을 확인하기가 어려웠다.

다음으로 PA2200의 인장강도는 3개의 제작방향 조건에서 거의 동일한 크기를 보이며, 제작방향에 따른 영향이 적음을 확인할 수 있었다.

Fig. 4에서는 PA2200 시편의 인장시험 결과값을 각 제작방향 기준으로 하여 시험온도별로 비교하여 표시하였다. 저온특성이 우수한 PA12의 특성상, 모든 시편 제작방향 기준으로 -25°C에서 가장 높은 인장탄성률 값을 보인다. 시험온도가 증가할수록 그 값은 감소하는데, -25°C 대비하여 60°C에서 인장탄성률이 제작방향 0°, 45°, 90° 시편 대상으로 각 56.4%, 53%, 55% 감소하였다. 하지만 인장강도 기준으로 비교한 결과에서는 -25°C에서 25°C로는 인장강도가 약간 감소하였지만, 60°C에서는 25°C의 결과와 유사하거나 증가한 값을 가지며 인장탄성률과는 다른 변화 양상을 보인다.





(c)

Fig. 5. Comparison of tensile modulus and tensile strength of PA3200GF according to build orientation at test temperature of (a) -25°C (b) 25°C and (c) 60°C

다음으로 글라스비드가 함유된 PA3200GF 소재를 대상으로 한 인장시험 결과를 Fig. 5와 Fig. 6에 도시하였다. 글라스 비드는 일반적으로 인장특성 특히 인장탄성률을 향상하기 위한 용도로 쓰이는 보강재이다.

먼저 시험온도 기준으로 시편 제작방향에 따른 인장특성을 살펴보면, Fig. 5에서 보는 바와 같이, 모든 시험온도 환경에서 시편 제작방향이 90°에 가까울수록 인장탄성률은 점차 감소함을 보인다. 0° 제작방향 대비 90°에서의 인장탄성률은 -25°C, 25°C, 60°C의 시험조건에서 각각 5.9%, 5.1%, 3.3% 감소하였다.

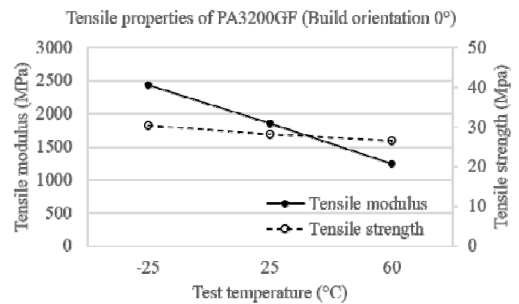
인장강도는 인장탄성률과 마찬가지로 모든 시험온도 환경에서 제작방향이 증가할수록 감소함을 보이는데 인장탄성률보다 제작방향에 따른 영향을 명확하게 보인다. 0° 제작방향 대비 90°에서의 인장강도 값은 -25°C, 25°C, 60°C의 시험조건에서 각각 13.5%, 11.1%, 4.6% 감소하였다.

글라스비드로 보강된 PA3200GF는 PA2200 소재 대비하여 인장탄성률은 향상된 값을 보여주는 반면, 인장강도 값은 오히려 감소하였다. 다음으로 Fig. 6에서 보이는 바와 같이, PA3200GF 시편의 제작방향 기준으로 시험온도에 따른 인장특성 결과를 살펴보면, PA2200과 유사하게 인장탄성률은 시험온도가 증가함에 따라 감소함을 보인다. 인장탄성률 값은 -25°C 대비하여 60°C에서 제작방향 0°, 45°, 90° 시편 대상으로 각각 49%, 48.6%, 48% 감소하였다.

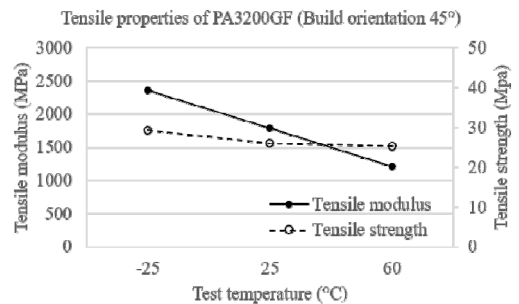
인장강도는 90° 방향 제작시편의 25°C 및 60°C 시험환경의 유사한 결과값을 제외하면, 시험 온도 증가에 따라 그 값이 점차적으로 감소함을 확인할 수 있다.

앞선 시험 결과값의 비교분석으로부터, PA2200 소재

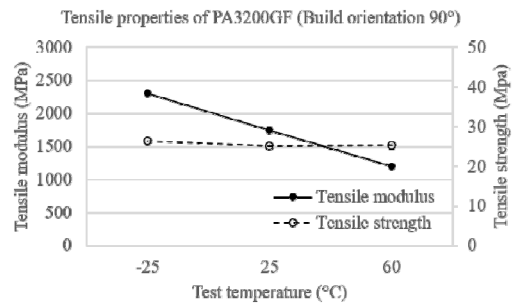
의 경우 제작방향 및 시험온도에 대하여, 인장 탄성률은 비교적 뚜렷한 변화 양상을 보여 주는 반면, 인장강도는 상대적으로 그 영향을 짐작하기 어려웠다. PA3200GF 소재의 경우 제작방향 및 시험온도에 대한 인장특성의 변화가 인장탄성률 및 인장강도 모두에서 상대적으로 명확한 변화를 보인다. 먼저 제작방향에 따른 인장탄성률의 결과는 소재와 관계없이 대부분의 경우에 적층레이어의 평면 방향과 일치하는 0°의 제작방향 시편에서 가장 높은 값을 보이고 제작방향이 증가할수록 그 값이 감소함을 보인다. 이는 적층 레이어 사이의 경계면에서 레이저 용융에 따른 물성의 저하가 발생하기 때문으로 보인다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 6. Comparison of tensile modulus and tensile strength of PA2200 according to test temperature with build orientation of (a) 0° (b) 45° and (c) 90°

Fig. 7에서 보이는 바와 같이 레이저 용융에 따른 경계면은 xy평면에서 레이저 스캔 트랙에 따른 경계면이 있으며, 또한 z축 방향으로 레이저의 적층에 따른 경계면이 존재한다. 이 때 z축 방향으로의 레이저간 경계층은 매번 새로운 레이어를 적층할 때마다 생성되며, 또한 경계면 사이의 거리도 xy평면 방향으로의 레이저 스캔 트랙 간의 경계면보다 짧다. 따라서 상대적으로 동일 방향으로 많은 수의 경계면이 존재하며, 이는 레이어 마다 방향이 달라지는 xy평면상의 레이저 스캔 트랙보다 더 많은 물성저하가 발생할 수 있음을 예상할 수 있다.

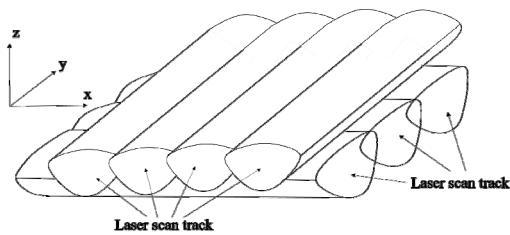


Fig. 7. Laser tracks to compose layers

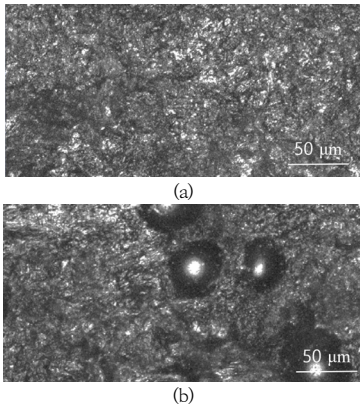


Fig. 8. Comparison of surface image of specimen made by (a) PA2200 and (b) PA3200GF

다음으로 Fig. 8에서 PA2200과 PA3200GF의 시편 단면을 보여준다.

그림에서 보이는 바와 같이, PA2200은 PA12 고분자 로만 이루어진 표면인 반면, PA3200GF에서는 직경이 약 50 $\mu$ m에서 100 $\mu$ m 사이의 글라스 비드가 혼합되어 있다.

이는 PA3200GF의 경우 PA12보다 인장탄성률이 높은 글라스 비드의 보강효과에 의해 전체적인 인장탄성률은 증가하지만, 반면에 인장강도는 순수한 PA12의 인장강도나 글라스 비드의 인장강도보다 낮은 값에서 글라스

비드와 PA12 고분자 사이의 경계면에 균열이 발생하게 되므로 상대적인 인장강도는 PA2200보다 낮은 값을 보이는 걸로 판단할 수 있다.

## 4. 결론

본 연구에서는 선택적 레이저 소결 기술을 적용하였을 때, PA12 기반 소재 및 글라스 비드가 보강된 경우의 인장특성에 관하여 시편의 제작방향 및 시험온도를 구분하여 조건별로 인장특성의 결과를 비교분석하였다.

시험 대상 소재는 PA2200 및 PA3200GF로 구분하였으며, 시편 제작방향은 시편이 제작되는 플랫폼 평면을 기준으로 하여 시편 길이 축과 이루는 방향을 0°, 45°, 90°로 구분하였다.

각 시험조건별 결과는 다음과 같이 정리할 수 있다.

- (1) PA2200 소재에 대한 시험에서, 시편 제작방향에 대한 인장탄성률 결과는 -25 $^{\circ}$ C와 25 $^{\circ}$ C 온도 조건에서 0 $^{\circ}$ 에서 90 $^{\circ}$ 로 증가할수록 감소하였으며, 60 $^{\circ}$ C 조건에서는 제작방향의 영향을 확인하기 어려웠으며, 인장강도 결과도 제작방향에 따른 영향이 적었다.
- (2) PA3200GF 소재 대상으로, 모든 시험 온도에서 제작방향의 증가에 따른 인장탄성률의 감소를 확인할 수 있었으며, 인장강도도 마찬가지로 제작방향에 따른 일정한 변화 패턴을 보였다.
- (3) 글라스비드가 보강된 PA3200GF는 PA2200 대비 제작방향에 따른 인장특성의 차이를 명확히 보이는데, 인장탄성률은 PA2200 대비 높은 반면, 인장강도는 상대적으로 낮은 값을 보였다. 이는 글라스 비드가 보강되면서 고분자 소재와 글라스 비드의 접합에 따른 영향으로 생각할 수 있다.

이상과 같이 레이저 소결방식을 활용한 플라스틱의 이방성 인장특성에 의해 부품의 최적 설계시 이를 활용한 설계 방식을 고려해야 할 필요가 있다.

## References

- [1] F. Sillani, R. G. Kleijn, M. Vetterli, M. Schmid, K. Wegener, "Selective laser sintering and multi jet fusion: Process-included modification of the raw materials and analyses of parts performance", *Additive Manufacturing*, vol. 27, pp. 32-41, 2019.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.02.004>

- [2] P. K. Jain, P. M. Pandey, P. V. M. Rao, "Experimental investigations for improving part strength in selective laser sintering", *Virtual and Physical Prototyping*, vol. 3, pp. 177-188, 2008.  
DOI: <https://doi.org/10.1080/17452750802065893>
- [3] I. Gibson, D. Shi, "Material properties and fabrication parameters in selective laser sintering process", *Rapid Prototyping Journal*, vol. 3, no. 4, pp. 129-136, 1997.  
DOI: <https://doi.org/10.1108/13552549710191836>
- [4] U. Ajoku, N. Saleh, N. Hopkinson, R. Hague, P. Erasenthiran, "Investigating mechanical anisotropy and end-of-vector effect in laser-sintered nylon parts", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, vol. 220, pp. 1077-1086, 2006.  
DOI: <https://doi.org/10.1243/09544054jem537>
- [5] B. Caulfield, P. E. Mchugh, S. Lohfeld, "Dependence of mechanical properties of polyamide components on build parameters in the SLS process", *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 182, pp. 477-488, 2007.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.imatprotec.2006.09.007>
- [6] M. Kim, "Study on Flexural Properties of Polyamide 12 according to Temperature produced by Selective Laser Sintering", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, vol. 19, no. 11, pp. 319-325, 2018.  
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2018.19.11.319>
- [7] K. Prashanth, S. Scudino, T. Maity, J. Das, J. Eckert, "Is the energy density a reliable parameter for materials synthesis by selective laser melting?", *Materials Research Letters*, vol. 5, pp. 386-390, 2017.  
DOI: <https://doi.org/10.1080/21663831.2017.1299808>
- [8] ASTM D638, Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics., ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014.  
DOI: <https://doi.org/10.1520/D0638-14>

김 무 선(Moosun Kim)

[정회원]



- 2002년 2월 : 서울대학교 공과대학 기계항공공학부(공학석사)
- 2008년 2월 : 서울대학교 공과대학 기계항공공학부(공학박사)
- 2008년 7월 ~ 2012년 8월 : 현대자동차 남양연구소 책임연구원
- 2012년 8월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 선임연구원

<관심분야>

적층기법, 최적화, 열유동 및 구조 해석