

선택적 레이저 소결 제작 폴리아미드 12 시편의 온도별 굴곡 특성 연구

김무선

한국철도기술연구원 도시철도연구팀

Study on Flexural Properties of Polyamide 12 according to Temperature produced by Selective Laser Sintering

Moosun Kim

Urban Transit Research Team, Korea Railroad Research Institute

요 약 3D 프린팅 (적층 공정) 기술은 소재와 공정기술의 지속적인 연구개발을 토대로 초기 모형 제작 활용으로부터 현재는 산업현장의 양산형 부품 제작까지 그 쓰임새가 확대되고 있다. 3D 프린팅의 대표적인 고분자 소재로서 고강도 엔지니어링 플라스틱의 하나인 polyamide (폴리아미드) 계열의 소재는 제품의 경량화 및 내구성의 장점으로 자동차용 부품 제작에 주로 활용된다. 이번 연구에서는 적층기법 중 제작품의 물성이 우수한 선택적 레이저 소결 기법 (Selective Laser Sintering)을 적용하여 polyamide 12 (PA12) 및 글라스 비드 (glass bead) 보강 PA12 소재 2가지를 대상으로 시편을 제작하고 온도에 따른 굴곡특성을 분석하였다. 작업 플랫폼 기준으로 0°, 45°, 90° 방향으로 각 시편을 제작 후, -25 °C, 25 °C, 60 °C 등 3개 시험 온도 환경에서 굴곡 테스트를 진행하였다. 그 결과로, PA12는 -25 °C에서 90° 제작 방향이, 25 °C와 60 °C에서는 0° 제작방향이 최대 굴곡강도를 가졌다. 글라스비드 보강 PA12는 제작방향이 0°인 경우 모든 시험온도에서 최대 굴곡강도 값을 보였다. 두 소재의 서로 다른 굴곡강도 변화 경향은 굴곡시험시 발생하는 응력 종류에 따라 적층 레이저 평면 방향에 의한 영향이 서로 다르기 때문으로 판단된다.

Abstract The use of 3D printing (Additive Manufacturing) technology has expanded from initial model production to the mass production of parts in the industrial field based on the continuous research and development of materials and process technology. As a representative polymer material for 3D printing, the polyamide-based material, which is one of the high-strength engineering plastics, is used mainly for manufacturing parts for automobiles because of its light weight and durability. In this study, the specimens were fabricated using Selective Laser Sintering, which has excellent mechanical properties, and the flexural characteristics were analyzed according to the temperature of the two types of polyamide 12 and glass bead reinforced PA12 materials. The test specimens were prepared in the directions of 0°, 45°, and 90° based on the work platform, and then subjected to a flexural test in three test temperature environments of -25 °C, 25 °C, and 60 °C. As a result, PA12 had the maximum flexural strength in the direction of 90° at -25 °C and 0° at 25 °C and 60 °C. The glass bead-reinforced PA12 exhibited maximum flexural strength values at all test temperatures in the 0° fabrication direction. The tendency of the flexural strength changes of the two materials was different due to the influence of the plane direction of the lamination layer depending on the type of stress generated in the bending test.

Keywords : Building orientation, Flexural property, Polyamide 12, Selective laser sintering, Temperature

본 연구는 한국철도기술연구원 주요사업의 연구비 지원으로 수행되었음

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

Tel: +82-31-460-5546 email: mskim@krri.re.kr

Received July 30, 2018

Revised (1st August 31, 2018, 2nd September 19, 2018)

Accepted November 2, 2018

Published November 30, 2018

1. 서론

3D 프린팅 기술은 3차원의 모델 데이터를 이용하여, 다양하고 복잡한 형상의 제품을 적층방식으로 제작하는 최첨단 공정기술이다. 현재까지 소재 및 공정기술의 지속적인 연구개발을 기반으로 제품 프로토타입 제작에 주로 집중되었던 초기 활용도에서 항공, 자동차, 바이오, 건설 분야 등 여러 산업 분야로 그 적용 분야가 확대되고 있다. 3D 프린팅 기술은 기존 제작방식에 비해 복합형상의 단일체 제작이 수월하며 이와 더불어 추가적인 경량화 구현과 여러 기능의 복합화 등 기존 제작방식으로는 구현이 어려웠던 부품의 제작 장점을 가능하게 한다. 또한 부품 유지보수의 측면에서 미래의 수요발생을 대비하여, 유지보수 부품을 미리 제작하거나 제작 금형을 보존해야 하는 현재의 유지보수 방식에서 탈피하여, 수요발생시 즉시 제품을 생산할 수 있는 공정 특성으로 인해 유지보수 비용을 줄일 수 있는 효과도 거둘 수 있게 되었다. 하지만 소재의 다양화 및 공정기술의 고도화와 안정화에 관한 연구가 여전히 진행 중이어서, 공정조건에 따른 소재별 물성의 영향을 분석하거나, 적층기법의 특성인 구조물 내부에 존재하는 물성의 비등방성을 고려하는 설계 기법 등의 지속적인 연구가 병행되어야 한다.

3D 프린팅 기술은 주로 고분자와 금속 소재를 대상으로 하여 공정기술 개발이 진행되었는데, 이 중 고분자를 주 소재로 하는 3D 프린팅 기술로는 SLA(Stereolithography Apparatus) 기법과 함께, FDM(Fused Deposition Modeling), SLS(Selective Laser Sintering) 기법 등이 있다. 그 중, SLS 기법은 레이저를 활용하여 소재를 용융하고 적층하는 원리로 다른 공정 기술 대비 우수한 기계적 물성을 확보할 수 있다. 이에 관한 연구로, Gornet[1]은 SLS 기법의 특성인 반복 열하중에 따른 물성 변화 연구를, Jain[2]은 SLS 공정 기반의 물성 차이를 분석하였다. Gibson[3], Ajoku[4], Saleh[5] 및 Caulfield[6]는 polyamide 계열 고분자 소재를 적용한 SLS 기법의 비등방성 기계적 특성에 관한 연구를 진행하였다. 그리고 Ho[7]는 에너지 강도가 제품 표면 특성에 미치는 영향을 연구하였고, Dupin[8]은 고분자의 기계적 물성에 영향을 미치는 에너지 밀도에 관한 연구를 하였다. 3D 프린팅 관련 연구에는, 공정기술에 관한 연구 이외에도, 3D 프린팅 공정 특성과 구조물의 물성을 고려한 제품의 최적 설계 기

술 또한 중요한 연구 주제이다. 이와 관련하여 Lee[9]는 발전소 부품 최적설계에 관한 연구를, Kim[10]은 3D 프린팅 기법을 적용한 열교환기의 최적설계에 관한 연구를 진행하였다.

Polyamide 12 (PA12) 계열 소재는 열가소성 수지의 한 종류로, 비결정질과 결정질 모두를 함유하는 반결정질 고분자이며, 주요 적용 분야는 자동차 내구 부품 등이 있다. 일반적으로 PA12 소재 제품 성형은 사출공정으로 제작을 하는데, 이번 연구에서는 SLS 기법을 적용하여 철도 차량용 압력밸브 구조물을 제작시 발생할 수 있는 제작방향별 소재의 물성 변화 및 온도에 따른 물성 변화의 분석을 목적으로 한다. 분석 대상 소재는 PA12 및 물성 보강을 위해 글라스 비드가 함유된 PA12로 정의하였으며, SLS 공정조건에 주요 인자인 시편의 제작 방향과 시험온도에 따른 굴곡특성에 관하여 시험 진행 및 그 결과를 분석하였다.

2. 공정 특성 및 시편 제작

2.1 선택적 레이저 소결 공정

선택적 레이저 소결(이하 SLS) 기법은 CO₂ 레이저를 적용된 고분자 파우더 위에 조사함으로써 구조물 단면에 해당하는 적층 영역의 파우더를 용융하고 응고하는 방식을 반복하여 제품 성형을 진행한다. SLS 공정 원리를 Fig. 1에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이, 적층 파우더 레이어의 소결 공정이 완료되면, 구조물이 설치되어 있는 작업 플레이트는 낮아지고 리코터의 움직임에 의해 베드에 저장되어 있는 파우더가 작업 플레이트 위

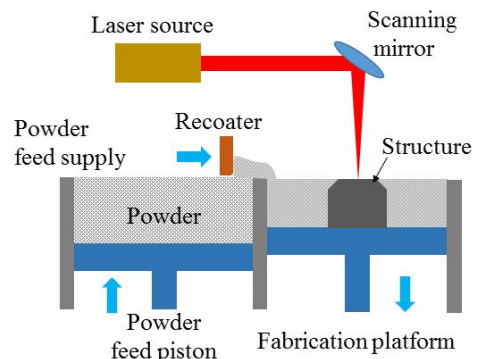


Fig. 1. Schematic diagram of SLS [10]

로 옮겨져 다시 얇은 레이어를 형성한다. 이와 같은 공정은 제품 제작이 완료될 때까지 반복된다. SLS 공정 적용 제품의 물성 및 표면 품질은 파우더 형태 소재의 사이즈와 레이저 파워, 스캔 간격 및 속도 등 레이저의 주요 조사 조건에 의해 다양해진다[10].

SLS 기법으로 제작시 구조물은 파우더 베드 안에 위치하여 파우더가 구조물을 지지하기 때문에, 일반적인 3D 프린팅 기법의 잉여물인 써포트 설치가 불필요하다. 이러한 특성으로 인해 제품 내부의 써포트 제거 필요성이 없으므로 복잡한 형상의 일체형 부품 제작이 가능해진다. 또한 레이어간의 결합력이 상대적으로 높아 우수한 물성을 가진다.

현재 SLS 기법을 포함한 대부분의 3D 프린팅 기법은 적층기법의 원리를 적용하는데, 이는 Fig. 2에서 볼 수 있는 바와 같이, 구조물의 소결 층이 적층되는 평면인 x-y 평면과 평행인 방향으로는 등방성의 기계적 물성을 보이지만, 그 이외의 방향에서는 구조물의 제작방향에 따라 이방성의 특성을 보이게 된다[3-6].

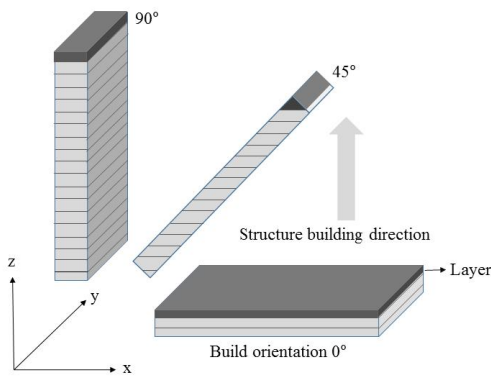


Fig. 2. Orientation of layers

2.2 굴곡시험

PA12 소재의 굴곡특성을 분석하기 위한 시험방법 및 시편 제작은 비강화 및 강화 플라스틱의 굴곡성능 테스트 규격인 ASTM D790[11]을 따랐다.

시편 크기는 127×12.7×6.4 mm이며 3점 굽힘 시험을 위한 지지점 간격은 시편 두께의 16배인 102.4 mm로, 그리고 크로스헤드의 하강 속도는 2 mm/min으로 지정하였다.

굴곡시험을 통한 굴곡강도 계산은 다음과 같이 식(1)으로부터 계산할 수 있다.

$$\sigma_f = 3PL/2bd^2 \tag{1}$$

이 때 σ_f 는 굴곡강도(MPa)를, P 는 굴곡시험을 위한 시편 중간점의 하중(N)을, L 은 지지대 간격(mm), b 는 시편의 폭(mm)을, 그리고 d 는 시편의 두께(mm)를 의미한다. Fig. 3에 굴곡시험 방법 및 시편 크기를 정의하였다.

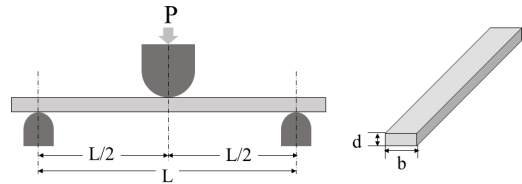


Fig. 3. Flexural property test diagram and test specimen definition

2.3 시편 제작

굴곡특성 시험용 시편을 제작하기 위해, PA12 기반의 두 가지 소재를 사용하여 SLS 기법으로 각 시험조건당 5개 시편을 제작하였다.

SLS 기법 3D 프린팅 장비는 독일 EOS 社の의 P 396 모델(레이저 최대출력 70 W, 최대 적층 속도 32 mm/h, 레이어 두께 0.06~0.18 mm)을 활용하였다. 소재는 EOS 社の의 polyamide 12 소재인 PA2200와 글라스 비드가 함유된 PA3200GF를 적용하였다. PA2200 및 PA3200GF의 평균 입자크기와 밀도는 각각 56 μm , 0.93 g/cm^3 와 60 μm , 1.22 g/cm^3 이다.

굴곡특성 시편 제작을 위한 SLS 기법 공정의 레이저 조사 조건으로 50 W의 레이저 파워와 590 mm/sec의 스캔속도로 지정하였으며, 레이어 두께는 PA2200, PA3200GF 각각 100 μm 및 120 μm 으로 지정하였다.

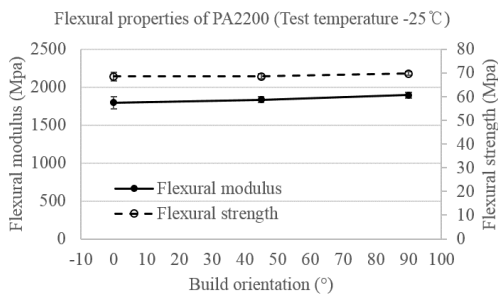
Fig. 2에서 보는 바와 같이 SLS 기반 3D 프린팅의 제작 방향에 따른 PA12의 굴곡특성 영향을 분석하기 위해서, 제작 플랫폼 기준으로 0° (x-y 평면), 45°, 90° (z축) 등 세 개 방향으로 시편 제작 방향을 정의하고 시편 길이 축의 방향이 각 방향과 일치하도록 굴곡특성 시편을 제작하였다.

3. 결과 및 고찰

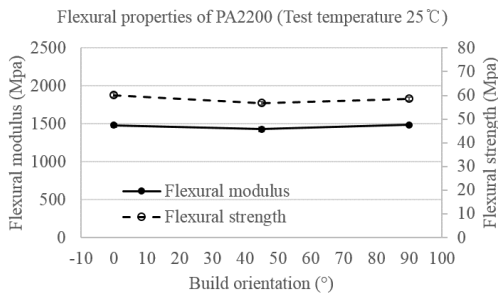
소재 및 제작 방향별로 구분한 굴곡특성 시편을 시험

온도별로 구분하여 Shimadzu 사의 AGS-10kNX (최대 하중 : 10 kN, 정밀도 : 0.1% 또는 ± 0.01 mm) 시험기를 이용하여 시험을 진행하였다. 시험온도는 해당 소재로 개발 진행 중인 부품의 작동 온도 범위(-25 °C ~ 60 °C)를 고려하기 위하여 -25 °C, 25 °C, 60 °C 등 세 가지 경우로 구분하였다.

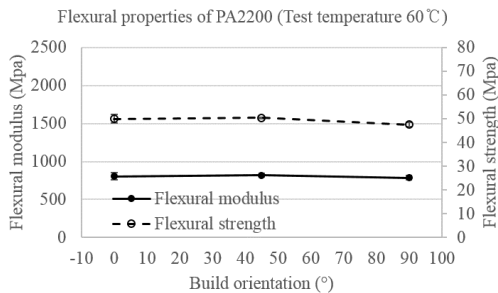
먼저 Fig. 4에 PA2200 소재 시편의 각 시험온도별로 제작 각도에 따른 굴곡탄성률과 굴곡강도를 나타내었다. 각 결과값은 시험조건별 5개의 시편 테스트 결과로부터 평균값 및 표준편차를 표시하였다.



(a)



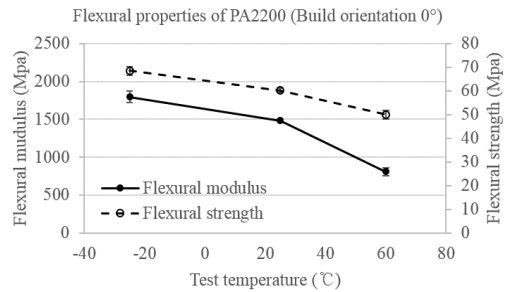
(b)



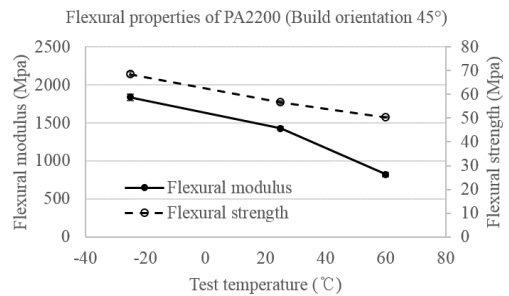
(c)

Fig. 4. Mean value and standard deviation of flexural modulus and flexural strength of PA2200 at test temperature of (a) -25 °C (b) 25 °C and (c) 60 °C

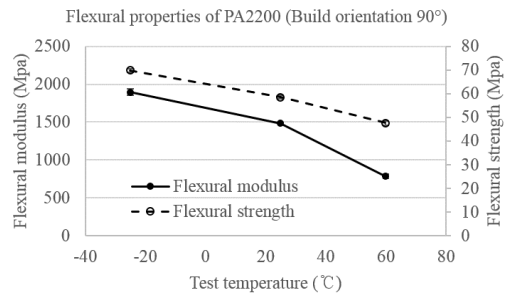
-25 °C 시험온도에서 결과를 살펴보면, 모든 제작방향으로 굴곡강도는 유사한 값을 보이며, 그 중 90° 의 결과값이 다른 2개의 제작방향 대비 1.8% 상승된 값을 보인다. 하지만, 25 °C 시험온도 조건에서는 제작방향 0° 에서 최대값을 가지는데, 45° 에 비하여 5.7%, 90° 제작방향 대비 2.6%의 향상된 값을 보인다. 다음으로 시험온도 60 °C 에서는 0° 와 45° 제작방향의 결과값이 90° 의 결과값에 비해 4.8% 향상된 값을 보인다. 굴곡탄성률은 굴곡강도와 유사한 경향으로 결과값의 변화를 보인다.



(a)



(b)



(c)

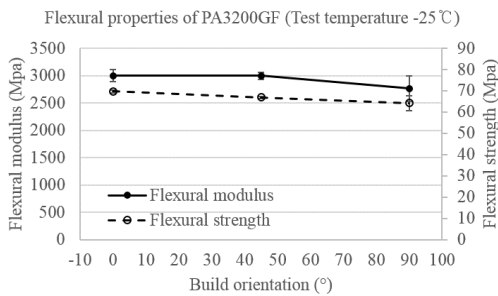
Fig. 5. Mean value and standard deviation of flexural modulus and flexural strength of PA2200 with building orientation of (a) 0° (b) 45° and (c) 90°

Fig. 5에서는 PA2200 소재 시편의 각 제작방향별로 시험온도에 따른 굴곡특성 결과값을 나열하여 표시하였다. 저온특성이 우수한 PA12의 특성상, 모든 제작 방향으로 -25 °C 시험 온도에서 굴곡특성이 가장 우수하며 시험온도가 상승할수록 굴곡특성 값이 저하된다. 굴곡강도의 경우 온도 상승에 따라 선형적인 반비례 관계를 확인할 수 있는데, 제작방향 조건으로 0° 및 45°의 경우 60 °C의 결과값이 -25 °C 대비 각 27% 및 26.5% 만큼 낮아졌으며, 90°의 경우 31.9 %의 굴곡강도 저하가 나타났다.

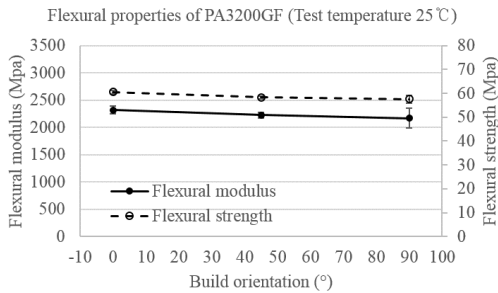
다음으로 글라스 비드가 포함된 PA3200GF의 굴곡특성 시험 결과를 Fig. 6에 도시하였다. 먼저 Fig. 4의 PA2200 결과값과 비교하면, 굴곡탄성률 값은 전반적으로 향상되었다. 결과의 예로, 25 °C 시험 온도에서 0° 제작방향의 경우 PA3200GF의 시편이 PA2200 시편 대비 56.7% 향상된 굴곡탄성률 값을 가진다. 이는 보강제로 함유되어 있는 글라스 비드가 PA12 소재에 비해 상대적으로 높은 탄성률 특성을 가지기 때문이다.

시험온도별로 구분하여 제작방향에 따른 굴곡특성을 살펴보면, -25 °C 와 25 °C 의 시험 온도환경에서 0° 제작조건이 가장 높은 굴곡강도 값을 가지며, 제작 방향이 높아질수록 굴곡강도 값은 줄어들게 된다. -25 °C 와 25 °C 온도조건에서 0°의 결과값은 90°와 비교하여 각 7.9% 및 4.9% 더 높은 값을 보인다. 60 °C 온도조건에서는, 0° 및 45° 결과값은 유사하며 90° 조건과 비교했을 때 1.8%만큼 높은 값을 보인다.

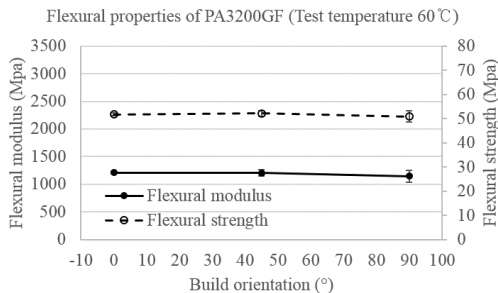
결과적으로, 글라스비드의 영향으로 PA3200GF의 경우 높은 굴곡 탄성률을 보이지만, 앞선 PA2200 의 결과와 비교해서 굴곡강도 값은 비슷한 수준을 유지했다.



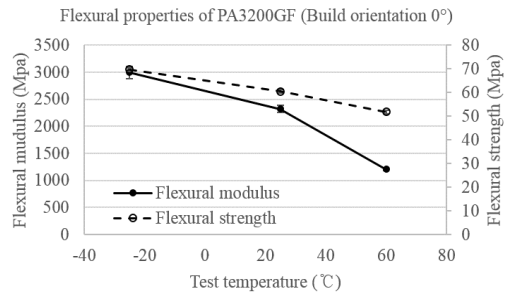
(a)



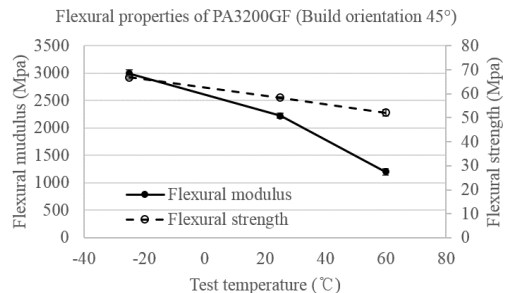
(b)



(c)



(a)



(b)

Fig. 6. Mean value and standard deviation of flexural modulus and flexural strength of PA3200 GF at test temperature of (a) -25 °C (b) 25 °C and (c) 60 °C

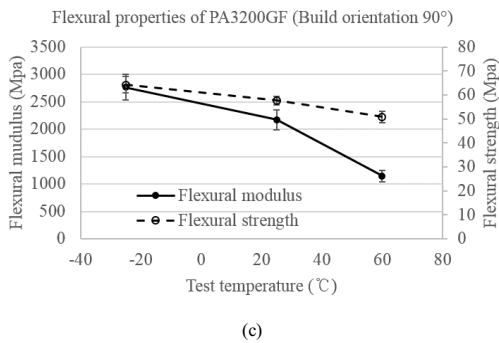


Fig. 7. Mean value and standard deviation of flexural modulus and flexural strength of PA3200 GF with building orientation of (a) 0° (b) 45° and (c) 90°

Fig. 7에는 PA3200GF 소재 시편의 굴곡특성 값을 시험온도별로 구분하여 표시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 PA2200와 마찬가지로 굴곡강도 값은 온도에 따라 선형 반비례의 특성을 보인다. 0°, 45°, 90°의 제작방향 기준으로 -25 °C 대비하여 60 °C 온도조건에서 각각 25.7%, 22.1%, 20.5%의 굴곡강도 값 저하를 보여준다.

앞서 살펴본 바와 같이, PA2200 소재의 경우, 제작방향에 따른 굴곡 특성의 명확한 차이와 경향성을 확인하기가 어려웠다. 반면 PA3200GF 소재의 경우, 제작방향에 따른 굴곡특성의 경향을 비교적 명확하게 보임을 확인하였다. 일반적으로 인장시험과 같은 경우 Fig. 8의 (a)와 같이 시편 파손이 발생하기 전까지, 시편 단면에 동일한 크기와 방향의 인장응력이 작용하는데, 이는 구조물을 구성하고 있는 적층 레이어의 제작방향에 따른 허용 인장응력의 크기 차이를 명확하게 구분할 수 있는 이유가 된다. 즉 0° 제작방향의 적층 레이어 평면은 인장 응력의 작용방향과 같기 때문에, 가장 큰 인장특성을 가지고 90°의 경우 가장 낮은 인장특성을 보이게 된다[6]. 하지만 굴곡 시험의 경우, Fig. 8의 (b)와 같이 시편 파괴 단면의 상하 영역 각각에 압축응력과 인장응력이 작용한다. 또한 시편이 탄성체인 경우 압축응력과 인장응력 크기가 선형적으로 변화하고, 근접한 응력의 크기 차이로 전단력이 발생하게 된다.

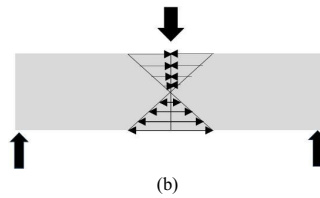
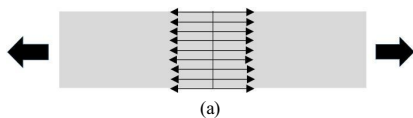


Fig. 8. Stress distribution of (a) tensile load case and (b) flexural load case

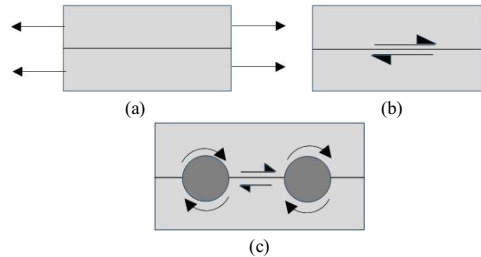


Fig. 9. Orientation of (a) tensile stress, (b) shear stress in PA2200 test specimen and (c) shear stress in PA3200GF test specimen of 0° build orientation

Figure 9에서 보이는 바와 같이, 인장응력과 압축응력은 작용 방향이 레이어 평면 방향에 가까워질수록, 허용 응력이 커지게 되지만, 전단응력은 근접한 레이어간의 박리에 영향을 미치게 되므로 작용방향이 레이어 평면 방향에 가까워질수록 허용 응력은 낮아지게 된다. 따라서, 굴곡시험의 경우 시편구조물의 레이어 평면이 인장 및 압축응력 방향에 가까워질수록 견고해지지만, 레이어 사이에 발생하는 전단응력에 대해서는 취약하게 된다. 결과적으로 응력 종류에 따라서 제작방향의 영향이 상반된 특성을 가지기 때문에, PA2200의 경우 각 시험온도의 제작방향에 따른 굴곡강도 변화의 경향이 동일하지 않다.

PA3200GF의 경우 굴곡강도에 대한 제작방향의 영향이 상대적으로 명확한 경향성을 보이는데, 이는 PA12보다 허용 전단응력이 높은 글라스 비드가 함유됨으로써, 0° 제작방향에서 글라스 비드가 인장 및 압축응력에 대해서는 별다른 영향을 미치지 않는 반면, 전단응력은 Fig. 9의 (c)처럼 반복되는 레이어간의 경계면과 글라스 비드의 표면을 따라 전달됨으로써 레이어 간의 허용 전단응력은 높아지게 된다. 따라서 인장 및 압축응력에 따른 재료 파괴가 먼저 발생하게 되며, 이는 제작방향이 0°에서 90°에 가까워질수록 굴곡강도가 낮아지는 특성을 보이게 된다.

4. 결론

선택적 레이저 소결(Selective Laser Sintering) 기법을 적용하여 제작한 polyamide12 기반 소재의 굴곡특성에 대하여 시편 제작방향 및 시험온도 조건별로 구분하여 시험 결과를 분석하였다.

적용 소재는 PA12 기반의 PA2200과 글라스 비드가 보강된 PA3200GF로 구분하였다. 3D 프린팅 공정 특성상 시편 제작 방향을 시편 길이 기준으로 제작 플랫폼 대비 0°, 45°, 90° 로 구분하였으며, 시험온도 조건으로 -25 °C, 25 °C, 60 °C로 구분하였다.

각 조건별 시험결과는 다음과 같이 정리할 수 있다.

- (1) PA2200의 경우, 시편 제작방향에 따른 굴곡특성의 변화가 온도별로 동일한 경향을 보이지 않는다. 이는 굴곡시험 특성상 인장 및 압축 응력과 전단응력이 발생하며, 제작방향에 따른 인장, 압축 응력과 전단응력의 영향이 상반되기 때문이다.
- (2) PA3200GF의 굴곡강도값은 시편 제작방향이 0°에서 90°에 가까워질수록 그 크기는 감소하며, 시험온도별로 비슷한 변화의 경향을 보인다. 이는 함유된 글라스 비드의 효과로 허용 전단응력이 높아지기 때문에, 인장 및 압축응력에 우선적으로 재료 강도가 영향을 받기 때문이다.

SLS 기법 적용 소재의 굴곡특성을 보다 정확히 예측하기 위해서는 제작방향 및 시험온도별 전단응력에 관한 시험과 특성 분석이 필요할 것으로 판단된다.

References

[1] T. J. Gornet, K. R. Davis, T. L. Starr, K. M. Mulloy, "Characterization of selective laser sintering materials to determine process stability", *Solid Freeform Fabrication Symposium*, University of Texas in Austin, USA, pp.546-553, 2002.

[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, No.3, pp.177-188, 2008.
DOI: <https://dx.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://dx.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, No.7, pp.1077-1086, 2006.
DOI: <https://dx.doi.org/10.1243/09544054JEM537>

[5] N. Saleh, R. J. Hague, S. Mansour, "Investigation into the mechanical properties of rapid prototyping materials", In: *Proceedings of 13th solid freeform fabrication symposium*, Austin, Texas, USA, pp.10, 2002.

[6] 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, No.1-3, pp.477-488, 2007.
DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.09.007>

[7] H. C. H. Ho, W. L. Cheung, I. Gibson, "Morphology and properties of selective laser sintered bisphenol a polycarbonate", *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Vol.42, No.9, pp.1850-1862, 2003.
DOI: <https://dx.doi.org/10.1021/ie0206352>

[8] S. Dupin, O. Lame, C. Barres, J. Y. Charreau, "Microstructural origin of physical and mechanical properties of polyamide 12 processed by laser sintering", *European Polymer Journal*, Vol.48, No.9, pp.1611-1621, 2012.
DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2012.06.007>

[9] H.J.Lee, "Structure Optimization and 3D Printing Manufacture Technology of Pull Cord Switch Components Applied to Power Plant Coal Yard", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol.17, No.10, pp.319-330, 2016.
DOI: <https://dx.doi.org/10.5762/kais.2016.17.10.319>

[10] M. Kim, "Design and Manufacturing Technology of Heat Exchanger in Air Compressor for Railroad Vehicle by 3D Printing Process", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol.18, No.11, pp.802-809, 2017.
DOI: <https://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2017.18.11.802>

[11] ASTM D790-15e2, Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials, ASTM, International, West Conshohocken, PA, 2015.
DOI: <https://dx.doi.org/10.1520/d0790-15e02>

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