

선택적 레이저 소결 공정 적용 폴리아미드 12의 온도별 충격 특성에 관한 연구

김무선

한국철도기술연구원 도시철도연구팀

Study on Impact Properties of Polyamide 12 depending on Temperature by Selective Laser Sintering Process

Moosun Kim

Urban Transit Research Team, Korea Railroad Research Institute

요약 3D 프린팅 공법으로 알려진 적층 공정 기술은 지속적인 소재 개발을 바탕으로 모형 제작부터 상용화 부품 제작까지 활용도를 확장하고 있다. 최근 들어 고강도 엔지니어링 플라스틱 소재 중의 하나인 polyamide (폴리아미드) 계열의 고분자를 활용하여 경량화 및 고강도의 부품을 제작하는 연구 개발이 활발히 진행되고 있다. 이번 연구에서는 polyamide 12 (PA12) 소재를 대상으로 Izod 충격 특성을 분석하였다. 시편 제작을 위해 기계적 특성이 우수한 선택적 레이저 소결 (Selective Laser Sintering) 공정 방식을 적용하였으며, PA12 및 글라스 비드 (glass bead) 보강 PA12 소재로 구분하여 제작하였다. 시편은 제작 플랫폼 상의 제작방향 별로 구분하였으며, 각 시험편을 -25 °C, 25 °C, 60 °C의 시험온도 환경에서 Izod 테스트를 진행하였다. 그 결과로, 각 PA12 및 글라스 비드 보강 PA12의 충격강도 값은, 25 °C 시험온도에서 제작방향이 수직인 경우 평행 시편 대비하여 48.8% 및 16.3%의 충격강도 값 저하를, 시험 온도에 따른 영향으로는 평행 시편을 기준으로 60 °C의 충격강도 값이 -25 °C 대비하여 46.5% 및 20.4% 향상됨을 확인할 수 있었다.

Abstract Additive manufacturing process technology, known as the 3D printing process, is expanding its utilization from simple model realization to commercialized part production based on continuous material development. Recently, research and development have been actively carried out to fabricate lightweight and high-strength parts using polymers, such as polyamide (polyamide), which is a high-strength engineering plastic material. In this study, the Izod impact characteristics were analyzed for polyamide 12 (PA12) materials. For the specimen production, selective laser sintering process technology, which has excellent mechanical properties of finished products, was applied. In addition, PA12 and glass bead reinforced PA12 materials were produced. The specimens were classified according to the production direction on the production platform, and each specimen was subjected to an Izod test at test temperatures of -25 °C, 25 °C, and 60 °C. As a result, the impact strength of PA12 and glass bead-reinforced PA12 of vertical direction specimens were 48.8% and 16.3% lower than those of the parallel specimens at a 25 °C test temperature and the impact strength of parallel specimens was improved by 46.5% and 20.4% at a test temperature of 60 °C compared to that at -25 °C.

Keywords : Building orientation, Impact 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@krii.re.kr

Received July 17, 2018

Revised (1st August 16, 2018, 2nd September 4, 2018)

Accepted October 5, 2018

Published October 31, 2018

1. 서론

3D 프린팅 기술(적층 공정 기술, Additive manufacturing process)은 개발 초기에는 설계 모형 제작을 위한 쓰임새가 대부분이었지만, 지속적인 소재 기술 및 공정 기술의 개발에 힘입어 현재는 정밀한 상용 부품 제작에 적용되는 등, 그 활용 범위가 확대되고 있다. 3D 프린팅 제작 기술은 고전적인 제작 방식으로는 제작이 어렵거나 또는 여러 조립 단계를 거쳐야 하는 복잡한 형상의 제품을 단일공정으로 제작할 수 있는 장점이 있으며, 또한 개별 기능을 담당하는 각 부품들을 단일화하여, 복합 기능형 부품을 일체형으로 구현할 수 있는 장점이 있다. 그리고 경량화를 위한 방안으로, 기존에 컨셉 설계 용도로 사용되던 위상최적설계 기법 등을 적극적으로 활용하여 얻어지는 설계안 그대로 제품을 구현할 수 있는 제작 특성을 가지고 있다. 그러나, 제작방식의 특수성 때문에 아직까지 대량 생산을 위한 목적으로 활용하기에는 어려움이 있으며, 또한 얇은 레이어의 반복적인 적층 방식으로 인해 제품 방향에 따른 물성 차이가 발생한다.

고분자를 대상으로 하는 대표적인 3D 프린팅 기술로는 FDM(Fused Deposition Modeling), SLA(Stereolithography Apparatus), SLS(Selective Laser Sintering) 방식 등이 있다. 그 중, SLS 기법에 관한 연구로, Gornet[1]은 SLS 기법의 특성인 반복적인 열하중으로 인한 물성 저하에 대하여 연구하였으며, Choren[2]은 고분자 파우더의 사용 연한에 관하여 연구를 진행하였다. 공정 조건에 따른 물성 변화에 관한 연구로는 Beal[3] 및 Yun[4] 이 레이저 강도 및 스피드 등 레이저 조건에 따른 기계적 물성에 관한 분석을 진행하였다. Caulfield[5]는 적층 각도에 따른 물성 변화를 연구하였고, Ho[6]는 에너지 강도에 따른 제품 표면 특성에 관하여 연구하였다. 이와 같이 소재 및 공정 조건에 따른 물성 연구와 더불어, 대부분의 3D 프린팅 기술의 물성 특성인 이방성을 고려하는 제품 설계 기술 개발도 또 하나의 중요한 연구 분야이다. Lee[7]는 발전소 부품에 관한 구조최적화 및 공정기술에 관한 연구를 수행하였으며, Jung[8]은 정밀 스테이지를 3D 프린팅 기법으로 제작에 관한 연구를 진행하였다.

PA12 계열 소재는 자동차 내구 부품에 주로 쓰이는 고분자 소재로, 이번 연구에서는 SLS 기법 기반 엔지니어링 플라스틱을 사용하여 철도차량의 압력밸브를 설계 및 제작할 때, 제작품의 이방성 물성을 고려하고 또한 다

양한 온도 환경에서 작동 안정성을 확보하기 위해, PA12 및 글라스 비드가 보강된 PA12를 대상으로 제작 각도 및 온도별 Izod 충격강도에 관하여 시험을 통해 결과를 분석하였다.

2. 본론

2.1 선택적 레이저 소결 공정

앞서 언급한 고분자 소재를 적층하여 프린팅하는 기법 중 SLS 기법은 CO₂ 레이저를 사용하여 고분자 파우더를 선택적으로 용융 후 응고하는 방식을 기본 원리로 한다. Fig. 1에서 보는 바와 같이, 이전 소결 공정이 완료되면, 제품이 제작되는 플레이트는 레이어 두께만큼 낮아지며, 파우더 베드에 저장되어 있는 적정량의 파우더가 리코터의 움직임에 의해, 제품 소결 플레이트 위로 옮겨지면서 다시 얇은 파우더 레이어가 형성된다. 그 후 앞선 공정과 마찬가지로 레이저 소결 공정이 반복되면서 제품의 형상이 완료될 때까지 그 과정을 반복하게 된다. SLS 공정을 통해 제작된 제품의 최종 품질은 파우더의 사이즈, 레이저 파워, 레이저의 스캔 간격 및 스캔 스피드에 의해 좌우된다. SLS 기법은 SLA나 FDM 기법과는 달리 파우더 베드 내부에 구조물이 위치하므로 구조물을 지지하는 썬포트의 설치를 생략할 수 있는 장점이 있다.

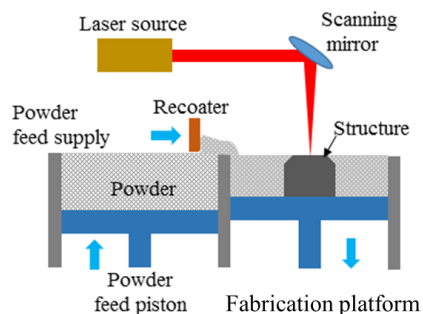


Fig. 1. Schematic diagram of SLS [9]

따라서 상대적으로 복잡한 형상 부품 제작의 장점을 가진다. 또한 이전 단계의 레이어와 파우더를 함께 멜팅하여 바인딩하게 되므로 물성면에서 우수한 특성을 보인다. 하지만 표면 거칠기 특성에 있어서는 SLA 기법의 특성을 따라가기는 쉽지 않다.

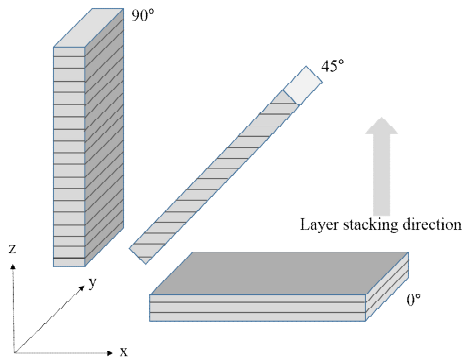


Fig. 2. Building orientation of test specimen and layer formation in SLS process

또 하나의 특징으로, 위에서 언급한 고분자를 대상으로 하는 3D 프린팅 기법들은 공통적으로 적층 원리를 적용하기 때문에, Fig. 2와 같이 구조물의 제작방향에 따라 최종 물성이 방향성을 가지게 된다.

2.2 Izod 충격시험

고분자 소재의 충격 특성을 분석하기 위해 시험방법 및 시편 제작규격은 Izod 충격 테스트 시험 규격인 ASTM D256 [10]을 따랐다.

시편 크기는 64×12.7×6.4 mm이며 2.5 mm 깊이로 v 노치를 생성한다. 테스트는 pendulum형 충격 시험기를 통해 진행하며 이 때 pendulum은 22 J의 에너지 용량을 가진다.

시험 결과를 이용하여 Izod 충격강도는 다음과 같이 식(1) 으로부터 계산할 수 있다.

$$E_i = \frac{E \times 10^3}{(h \times b_N)} \quad (1)$$

이 때 E_i 는 충격강도 (kJ/m^2)를, E 는 충격에너지(J)를, h 는 시편 두께 (mm), b_N 은 노치까지의 시편 폭 (mm)을 의미한다. 충격에너지는 Fig. 3과 같이 충돌 이전 높이(H_S) 및 이후 높이(H_E)의 진자 위치에너지 차로부터 계산한다.

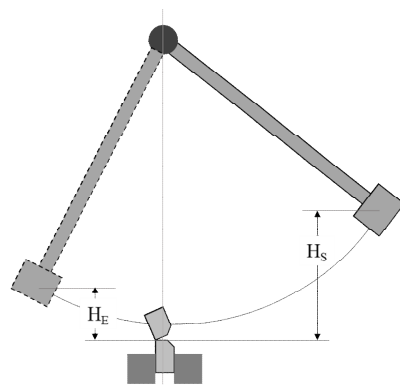


Fig. 3. Izod impact test diagram

2.3 시편 제작

충격시험용 시편 제작은 SLS 기법을 활용하여 두 가지 종류의 소재를 바탕으로 각 시험조건 당 5개씩의 시편을 제작하였다.

시편 제작을 위한 3D 프린팅 장비는 독일 EOS 社의 P 396 모델 (레이저 최대출력 70W, 최대 적층 속도 32 mm/h, 레이어 두께 0.06~0.18 mm)을 활용하였으며, 제작 소재는 EOS 社에서 개발한 polyamide 12 기반의 PA2200과 글라스 비드로 보강된 polyamide 12 기반 PA3200GF 두 가지 소재를 적용하였다. PA2200의 평균 입자크기는 56 μm 이며 밀도는 0.93 g/cm^3 이다. PA3200GF의 경우 60 μm 의 평균 입자크기와 1.22 g/cm^3 의 밀도를 갖는다.

시편 제작을 위한 적층 공정변수로 레이저 파워는 50 W, 레이저 속도는 590 mm/sec로, 레이어 두께로는 PA2200인 경우 100 μm , PA3200GF의 경우 120 μm 으로 지정하였다.

앞서 언급한 바와 같이 3D 프린팅은 적층의 원리로 제품을 제작하기 때문에 물성 방향성을 가지므로, 제조 방향에 의한 충격특성의 영향을 검토하기 위해서, 제작 플랫폼 기준 0° (x-y 평면), 45°, 90° (z축) 등 세 개의 방향으로 시편 길이축이 평행하도록 충격 시편을 제작하였다.

2.4 시험 결과 분석

소재 및 적층 방향 별로 구분 제작된 Izod 충격 시편을 시험 온도별로 재구분하여, Tinius Olsen 사의 Model IT504 (측정오차 : pendulum 용량의 0.03% 이내) 테스트기를 이용하여 충격시험을 진행하였다.

시험온도는 -25 °C, 25 °C, 60 °C로 구분하였으며, 이는 시험 대상 소재를 적용할 부품(철도차량용 압력 밸브)의 작동온도(-25 °C ~ 60 °C) 한계를 고려하기 위함이다.

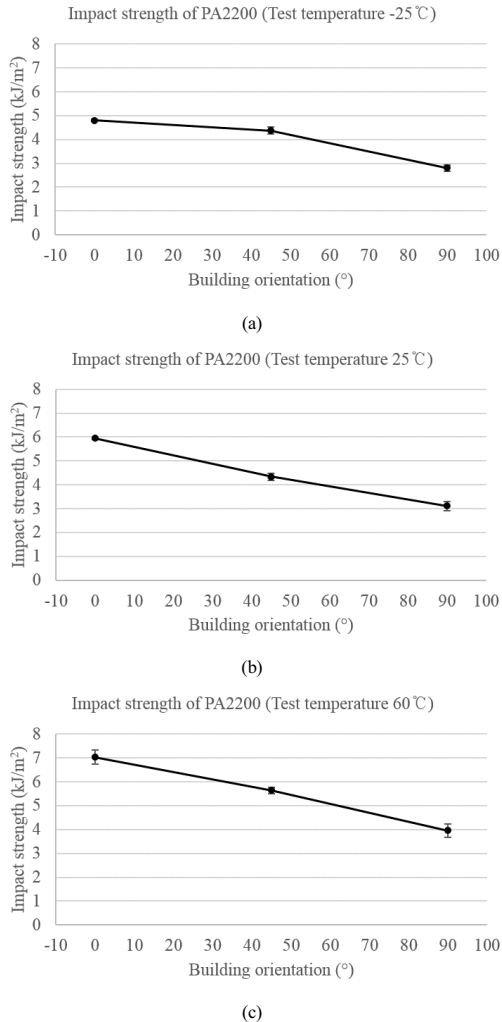


Fig. 4. Mean value and standard deviation of impact strength of PA2200 at test temperature of (a) -25 °C (b) 25 °C and (c) 60 °C

먼저 PA2200 소재의 시험 온도별 충격강도를 Fig. 4에 나타내었다. 각 결과 값은 시험조건별 5개의 시편 테스트 결과로부터 최대값과 최소값을 제외한 3개 시편 결과의 평균값과 함께 표준편차를 표시하였다. 그림에서 보는 바와 같이, PA2200 소재의 충격강도는 각 시험 온도에서, 제조 방향에 따라 충격강도 값이 달라진다. 모든 시험 온도에서, 충격강도 값은 제작 플랫폼과 평행한 방

향으로 시편 길이 축이 놓일 때 가장 높은 값을 가짐을 알 수 있다.

그리고 시편 길이 축이 제작평면의 수직에 가까워질수록 충격강도 값은 낮아지는데, 그 값이 제작방향이 90° 인 경우 0° 방향에 비해 시험온도 -25 °C 에서는 42.3%, 25 °C 에서는 48.8%, 60 °C 에서는 43.7% 수준으로 각각 감소함을 확인 할 수 있다.

따라서, 시편의 파손단면이 적층 레이어 방향과 동일한 시편 제작 방향 90°인 경우에 가장 적은 충격강도 값을 보임을 알 수 있다.

다음으로 Fig. 5에 PA2200 소재 시편의 충격강도 값을 시험 온도별로 재배열하여 나타내었다.

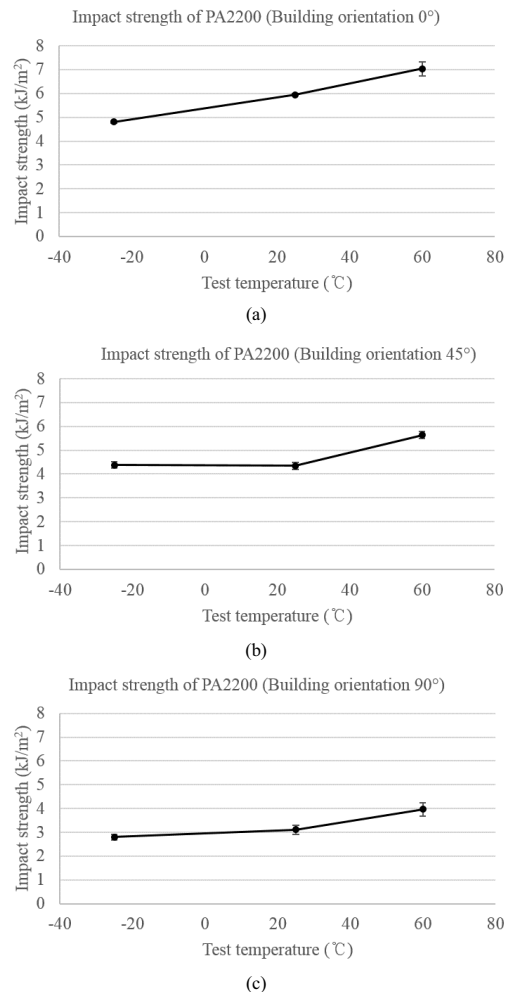


Fig. 5. Mean value and standard deviation of impact strength of PA2200 with building orientation of (a) 0° (b) 45° and (c) 90°

고분자는 특성상 저온의 취성이 다른 온도에 비해 상대적으로 낮다. 따라서 0°, 45°, 90° 방향의 시험편 모두, 시험 온도 상승에 따라 충격강도 값이 점차적으로 향상됨을 보인다. 제작 방향 0°, 45°, 90° 순서로, 60 °C 에서의 충격강도 값이 -25 °C에서의 값보다 각 46.5 %, 28.8%, 41.4% 향상된 값을 보인다.

다음으로 글라스 비드가 포함된 PA3200GF의 충격강도 값을 Fig. 6에 표시하였다. 그림으로부터, PA2200의 경우와 마찬가지로, 제작 방향에 따른 충격강도 값의 변화가 같은 경향을 가짐을 확인 할 수 있다. 하지만, PA2200 결과 대비하여, 제작방향에 따른 충격강도 값의 차이는 감소하였다.

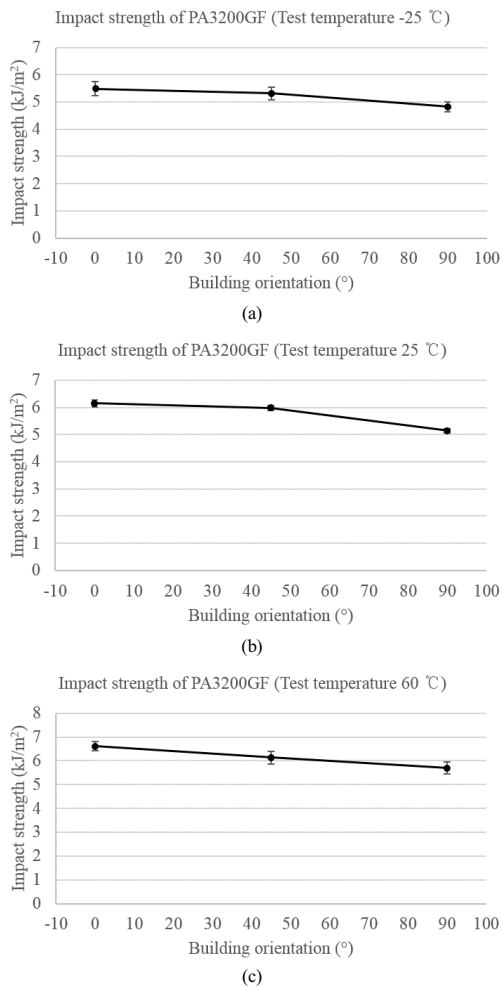


Fig. 6. Mean value and standard deviation of impact strength of PA3200GF at test temperature of (a) -25 °C (b) 25 °C and (c) 60 °C

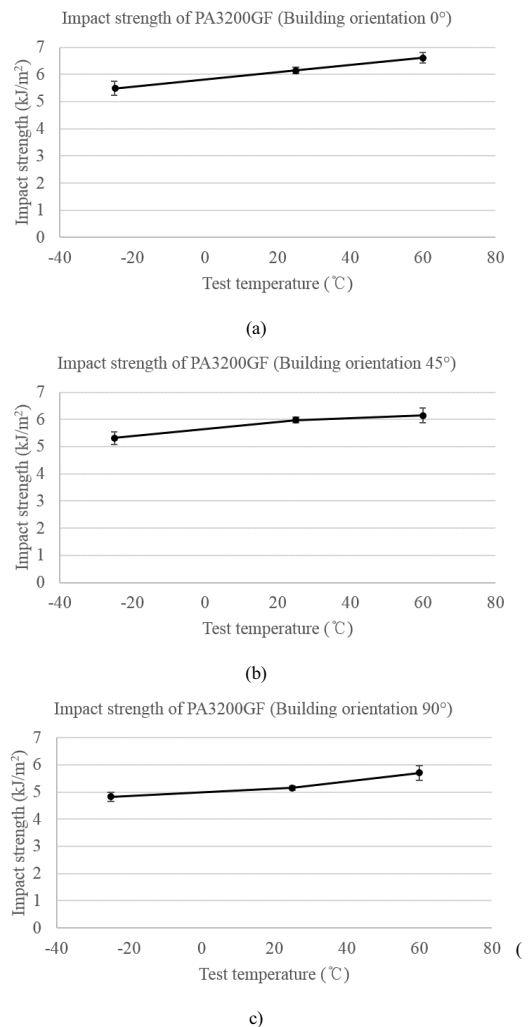


Fig. 7. Mean value and standard deviation of impact strength of PA3200GF with building orientation of (a) 0° (b) 45° and (c) 90°

시험 제작방향 90°의 경우 0°의 충격강도 값에 비해, 시험온도 -25 °C, 25 °C, 60 °C 에서 각 12.0%, 16.3%, 13.6% 만큼 감소함을 확인 할 수 있다.

이는 보강된 글라스 비드의 효과를 고려해 볼 때, 외부충격에 의한 시험파손 시, 실제 파손 단면 대부분은 바인딩역할을 하는 고분자 영역과 함께 고분자와 글라스 비드의 결합 경계면을 따라서 발생한다. 결과적으로, 글라스 비드 주변의 일정치 않은 결합 경계면으로 충격에너지가 분산되면서, 시험 제작 방향의 충격파손 영향은 상대적으로 작아지게 되고, 그로 인해 제작 방향에 따른 충격강도 값의 차이는 줄어들게 된다. 따라서 글라스 비

드로 보강된 PA3200GF 기반 구조물의 충격강도 결과 값은 제작 방향에 따른 영향이 PA2200 대비하여 상대적으로 적다고 할 수 있다.

Fig. 7에는 PA3200GF 소재 시편의 충격강도 값을 시험 온도별로 구분하여 도시하였다. 충격강도 값의 결과는, 제작 방향 0°, 45°, 90° 순서로, 60 °C 에서의 충격강도 값이 -25 °C에서의 값보다 각 20.4 %, 15.5%, 18.2% 향상된 값을 가진다. 결과로부터 알 수 있듯이, 모든 시편 제작 방향에서 시험온도 결과에 따른 충격강도 결과 값의 변화 폭은 PA2200에 대비하여 감소하였다.

3. 결론

선택적 레이저 소결(Selective Laser Sintering) 기법을 적용하여 제작한 polyamide 12 기반 고분자 소재의 Izod 충격 시험 특성을 분석하였다. 적용 소재는 글라스비드 보강 여부로 구분하였다. 또한 시편 제작 방향을 제작 플랫폼 대비 0°, 45°, 90° 로 구분하였으며, 시험 온도 조건은 -25 °C, 25 °C, 60 °C로 구분하여 시험 분석을 진행하였다. 결과로부터, 모든 온도 조건하에서, polyamide 12 기반 소재에서는 제작방향이 제작 플랫폼 대비 수직에 가까울수록 충격강도 값이 저하된다. 결과의 한 예로 제작방향 90°의 경우 0° 에 비해 시험온도 25 °C에서 48.8%의 충격강도 저하가 발생했으며, 글라스비드 보강 소재에서는 같은 조건에서 16.3%의 충격강도 저하를 보였다. 이는 적층 원리의 기법 특성상 충격강도 값이 제작방향에 영향을 받는 동시에, 파손 면이 일정하지 않은 글라스 비드 보강 소재의 경우, 적층의 영향이 줄어든 것으로 판단된다. 온도에 따른 충격시험 결과는, 저온에서의 고분자 취성 특성에 의해, 시험 온도가 증가할수록, 충격강도 값은 커짐을 보였다. 이 경우에도, 글라스 비드 보강 소재의 결과 값 차이가 상대적으로 작음을 알 수 있었다.

연구결과로부터, 적층 원리를 기반으로 한 고분자 소재의 충격강도 값은 비등방성의 특성을 보임을 확인하였다. 이를 통해, 일반적인 공법으로 제작하는 구조물을 설계할 때 물성을 등방성으로 고려하여 진행되는 기존의 경우와 달리, SLS 기법과 같은 적층원리를 적용하는 구조물을 설계할 때 물성의 비등방성 효과를 고려해야 할 필요가 있다.

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] J. Choren, V. Gervasi, T. Herman, S. Kamara, J. Mitchell, "SLS powder life study", *Proceedings of Solid Freeform Fabrication Symposium*, University of Texas at Austin, USA, pp.39-44, 2001.
- [3] V. E. Beal, R. A. Paggi, G. V. Salmoria, A. Lago, "Statistical evaluation of laserenergy density effect on mechanical properties of polyamide parts manufactured by selective laser sintering", *Journal of Applied Polymer Science*, Vol.113, No.5, pp.2910-2919, 2009. DOI: <https://dx.doi.org/10.1002/app.30329>
- [4] E. G. Yun, J. B. Park, J. S. Kim, J. W. Lee, S. Y. Lee, S. H. Lee, "The effect of additive manufacturing process parameters on the mechanical properties of 3D printing material for selective laser sintering", *Proceeding of KSMTE 2015 Spring Conference*, pg.142, 2015.
- [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, No.1-3, pp.477-488, 2007. DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.09.007>
- [6] 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>
- [7] 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>
- [8] H. J. Jung, J. H. Kim, "Fabrication of Piezo-Driven Micropositioning Stage using 3D Printer", *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol.31, No.3, pp.277-283, 2014. DOI: <https://dx.doi.org/10.7736/kspe.2014.31.3.277>
- [9] 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>
- [10] ASTM D256-10, Standard Test Methods for Determining the Izod Pendulum Impact Resistance of Plastics, ASTM International, 100 Barr Harbor Drive Pennsylvania, USA, 2010. DOI: <https://dx.doi.org/10.1520/d0256-10e01>

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