

압출적층조형 공정 기반 3D 프린팅 제품 기계적 특성의 지배적 공정인자 도출 및 최적화에 관한 연구

김정섭* · 조난현** · 남정수* · 이상원*†

* 성균관대학교 기계공학과, ** 성균관대학교 서비스융합디자인협동과정

Identification and Optimization of Dominant Process Parameters Affecting Mechanical Properties of FDM 3D Printed Parts

Jung Sub Kim*, Nanhyeon Jo**, Jung Soo Nam* and Sang Won Lee*†

* Dept. of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan Univ.,

** Service Design Institute, Sungkyunkwan Univ.

(Received October 11, 2016 ; Revised February 13, 2017 ; Accepted February 16, 2017)

Key Words: Additive Manufacturing(적층 가공), Fused Deposition Modeling(압출 적층 조형), Mechanical Property(기계적 성질), Dominant Process Parameter(지배공정인자)

초록: 최근 다양한 분야에 적용되고 있는 적층 가공 기술(AM)은 복잡한 형상 제조 및 재료 비용 절감으로 인해 혁신적인 제품 생산 방법으로 각광을 받고 있다. 그 중에서도 압출적층조형(Fused Deposition Modeling, FDM) 공정을 통한 친환경 부품 제조는 의료 분야산업에서 많은 주목을 받고 있다. 따라서, 본 논문에서는 친환경 생분해성 재료인 Poly Lactic Acid(PLA)를 사용한 FDM 공정 실험을 수행하고 제작된 적층 시편에 대한 인장 시험을 적용하여 주요 FDM 공정 변수인 적층 두께, 적층 방향, 적층 충전량이 인장 시편의 기계적 성질에 미치는 영향을 정량적 및 정성적으로 분석하고 이를 극대화하는 각 공정 변수의 최적값을 도출하였다.

Abstract: Recently, additive manufacturing (AM) technology, also known as 3D printing technology, has attracted attention as an innovative production method to fabricate functional components having complex shapes with saving materials. In particular, a fabrication of poly lactic acid (PLA) parts through a fused deposition modeling (FDM) technique has attracted much attention in the medical field. In this paper, an experimental study on the identification of dominant process parameters influencing mechanical properties of PLA parts fabricated by the FDM process is conducted, and their optimal values for maximizing the mechanical properties are obtained. Three process parameters are considered in this research, namely, layer thickness, a part orientation and in-fill. It is known that thin layer thickness, part orientation diagonal to the tension direction, and full in-fill are optimal conditions to maximize the mechanical properties.

1. 서론

적층가공은(Additive manufacturing, AM)은 3D CAD 모형 등을 기반으로 한 3차원 제품 설계 결과물을 2차원 단면으로 연속적으로 재구성하여 고체 또는 액체 상태의 금속, 폴리머 등의 재료를 쌓아서 3차원 출력물로 제조하는 기술이다.⁽¹⁾ 적층가

공은 소재를 제거하는 절삭가공과 달리 재료의 손실이 적으며, 프레스 및 사출성형에서 요구되는 금형이 불필요한 이점이 있다. 적층가공은 크게 FDM (Fused deposition modeling), SLA(Stereo lithography apparatus), SLS(Selective laser sintering), PSL(Plastic sheet lamination) 등으로 구분된다.⁽²⁾

이 중 압출적층공정으로도 불리는 FDM 공정은 열가소성 필라멘트를 열로 용융시킨 후 이를 노즐을 통해 압출하여 적층하는 방식을 지칭한다. 즉, 입력 받은 3D CAD 데이터를 기반으로 x축, y축, z

† Corresponding Author, sangwonl@skku.edu

© 2017 The Korean Society of Mechanical Engineers

축의 각 방향으로 노즐을 이송시켜 재료를 쌓는 방식으로 출력물을 제작한다. 최근 기술 특허가 만료됨에 따라 이전보다 저렴한 가격으로 대중에게 보급되고 있으며, 짧은 시간 내에 다양한 형상을 가진 부품의 출력이 가능하다.⁽³⁾ 이러한 장점을 바탕으로 기계분야뿐만 아니라 우주항공, 건축, 의료 등 여러 분야에서 그 사용이 증가하고 있다.⁽⁴⁾

특히, FDM공정을 이용하여 제작한 인체 골 모형을 수술에 활용하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 정형외과에서는 환자에 대한 위험성과 고통감소 및 수술 오류에 대한 재수술 최소화를 위하여 FDM공정을 이용한 새로운 수술기법들이 개발되고 있다.⁽⁵⁾ 또한, 인체 골 모형을 제작하여 수술에 활용하는 연구가 많이 진행되어 그 유용성이 증명되었다. 하지만 FDM공정의 출력물의 기계적 특성에 대한 문제점 때문에 의료분야의 직접적인 활용은 다소 어려움을 가지고 있다.⁽⁶⁾

FDM공정으로 제작한 출력물은 인장, 압축, 굽힘 하중을 받게 되며 이 출력물이 다양한 분야에서 사용되기 위해서는 적절한 인장강도 및 변형률 특성을 가져야 한다. 또한, FDM 공정의 출력물 설계 시 허용응력, 안전율 등을 고려해야 한다. FDM공정으로 제작된 출력물은 재료의 특성뿐만 아니라 적층 속도, 히팅 베드 온도, 적층 방향, 적층 충전량 등에 따라 적층된 층이 분리되는 이방성이 발생할 수 있다. 그러므로 이와 관련된 FDM공정의 적층 방법에 따른 기계적 특성 분석을 위한 연구가 진행되고 있다.⁽⁷⁻¹⁰⁾

김동범 등^(11,12)은 FDM, Polyjet, SLA방식으로 ASTM D 638 규정을 참고하여 적층방향을 달리한 시편을 제작하였다. 인장시험과 파단부의 SEM분석을 통해 각 방식에 따른 물성차이를 비교 및 분석하였다. 또한, Polyjet방식으로 시편을 제작하고 인장시험과 전단시험을 수행하여 기계적 물성을 분석하였으며, 시뮬레이션 결과와 비교하였다.

Ogden 등⁽¹³⁾은 출력물의 기계적 특성 향상에 영향을 미치는 지배인자 분석을 위해 적층 방향을 공정 변수로 선정하여 인장시험을 수행하였다. 인장시험 시편과 평행한 방향으로 적층하였을 때 인장 강도가 증가하였으며, 이를 유한요소법을 이용하여 증명하였다.

Michael 등⁽¹⁴⁾은 적층 방향 및 적층 레이아웃이 인장강도에 미치는 영향을 분석하기 위해 적층 시편을 제작하여 인장시험을 수행하였다. 그 결과, 적층 방향이 적층 레이아웃보다 인장강도 증가에 더 많은 영향을 미치는 요인인 것을 확인하였다.

또한, 최적의 공정조건을 도출하였다.

선행연구에서 알 수 있듯이, FDM 공정은 비연속적 적층 방식의 특징으로 인해 내부를 이루는 적층의 조건이 출력물의 기계적 특성에 중요한 영향을 미친다는 것을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 의료분야에 적용되는 소재를 선정하고 적층 두께, 적층 방향, 적층 충전량 등 FDM의 주요 공정 변수가 출력물의 기계적 특성에 미치는 영향을 분석하였다. 이를 위해 ASTM D 638 규정에 따라 FDM공정으로 제작한 인장시험 시편을 제작하여 핵심 기계적 특성인 인장 거동 분석을 수행하였고 사출 성형으로 제작한 인장시험 시편의 인장 거동과의 비교 분석을 수행하였다.

2. FDM공정용 재료의 선정

최근 FDM공정은 금속이나 심지어 음식을 사용한 출력물을 선보인바 있으나 대표적인 주요 재료로는 ABS(Acrylonitrile butadiene styrene)나 PLA (Poly lactic acid)가 사용되고 있다.

ABS는 상온에서 경화된 후 매우 견고하며 후가공이 용이하다는 장점이 있으나, 설계 형태에 따라 휘거나 갈라지는 단점을 가지고 있다. 또한, 인체에 유해한 플라스틱 증기를 발생시키기 때문에 의료 분야에는 적합하지 못한 재료이다.⁽¹⁵⁾ 반면에 환경에 대한 이슈가 부각되면서 식물로부터 원료를 취합하여 합성한 PLA는 친환경 재료로서 열에 의한 변형이 적어 적층에 용이하다. 하지만 후가공이 용이하지 못하다는 단점이 있어서 기계 분야에 사용하기에는 부적합한 재료이다.⁽¹⁶⁾

따라서 본 논문의 연구는 의료분야에 FDM공정을 적용하기 위함으므로 의료분야에 적합한 친환경 소재인 PLA를 적층재료로 선정하였다.

3. 인장 시편 제작 및 인장 시험

본 실험에서는 FDM공정으로 제작한 시편에 대하여 인장시험을 수행하여 그 기계적 특성을 사출 성형으로 제작한 시편과 비교하였다. 인장시험 시편은 Cura 2. 1. 2. 소프트웨어를 이용하여 Fig. 1과 같이 ASTM 규정에 따라 모델링 하였다. 적층 시편의 인장 거동 기계적 특성을 분석하기 위해 적층 두께, 적층 방향, 적층 충전량을 공정 변수로 선택하였고 Table 1에 주어져 있듯이 적층 시편을 제작하였다.

ASTM D 638 TYPE 규정을 따른 인장시험 시편

Table 1 Experimental design

Run	Layer Thickness	Part Orientation	In Fill
0	Injection molding specimen		
1	0.06 mm	45°	10 %
2	0.06 mm	45°	55 %
3	0.06 mm	45°	100 %
4	0.06 mm	23°	10 %
5	0.06 mm	23°	55 %
6	0.06 mm	23°	100 %
7	0.06 mm	0°	10 %
8	0.06 mm	0°	55 %
9	0.06 mm	0°	100 %
10	0.10 mm	45°	10 %
11	0.10 mm	45°	55 %
12	0.10 mm	45°	100 %
13	0.10 mm	23°	10 %
14	0.10 mm	23°	55 %
15	0.10 mm	23°	100 %
16	0.10 mm	0°	10 %
17	0.10 mm	0°	55 %
18	0.10 mm	0°	100 %
19	0.15 mm	45°	10 %
20	0.15 mm	45°	55 %
21	0.15 mm	45°	100 %
22	0.15 mm	23°	10 %
23	0.15 mm	23°	55 %
24	0.15 mm	23°	100 %
25	0.15 mm	0°	10 %
26	0.15 mm	0°	55 %
27	0.15 mm	0°	100 %

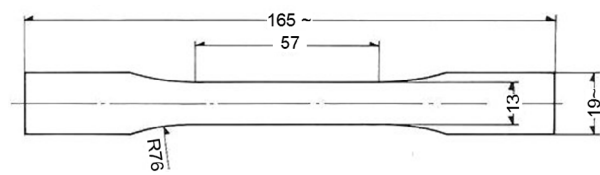


Fig. 1 Tensile test specimen of ASTM D 638 TYPE I

의 형상은 다섯 가지의 유형이 있지만 본 연구에서는 FDM을 통해 출력한 PLA 인장시험 시편이 비교적 깨끗한 형상을 가지므로 TYPE I의 형상과 치수를 참고하였다.⁽¹⁷⁾ 이 때 TYPE I의 허용 두께는 4 mm 이하이다. 따라서, Fig. 1에 주어진 인장시험 시편의 폭과 두께는 각각 13 mm, 3 mm로 설계되었다.

인장시험 시편 제작을 위한 FDM 공정 장비는 Ultimaker사의 Ultimaker 2+를 사용하였으며 Fig. 2

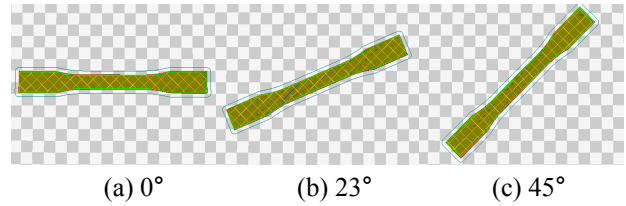


Fig. 2 CAD models of tensile test specimens according to different part orientations



Fig. 3 INSTRON tensile testing machine (INSTRON 5967)

와 같이 인장시험 시편 내부의 필라멘트 적층 방향을 달리하기 위해 적층 베드와 수평방향 대비 적층각도가 0°, 23°, 45°가 되도록 각각 CAD 모델을 입력하여 시편을 출력하였다. 시편 제작에 사용된 적층 재료는 2.85 mm의 두께를 갖는 PLA 필라멘트이다. 또한, 직경 0.4 mm의 노즐을 사용하였고, 필라멘트 압출 속도는 60 mm/s, 필라멘트 압출 온도는 210°C, 히팅 베드 온도는 60°C로 각각 고정하였다. 공정 변수는 3 수준의 적층 두께(0.06 mm, 0.10 mm, 0.15 mm), 적층 방향(0°, 23°, 45°), 적층 충전량(10%, 55%, 100%)을 선정하여 Table 1과 같이 총 27가지의 실험 경우를 도출하였다. 또한 각 실험 경우 별로 3개씩 총 81개의 시편을 제작하였다.

인장시험은 역시 ASTM D 638 TYPE I에 근거하여 수행되었으며 Fig. 3에 주어져 있듯이 INSTRON사의 INSTRON 5967장비를 이용하였다. 또한, 인장 속도는 5 mm/min으로 고정하였다.

4. 실험결과 및 분석

4.1 인장 응력-변형률 선도

인장시험을 통해 얻은 응력-변형률 선도를 Fig. 4에 나타내었다. 응력-변형률 선도로부터 최대하중, 인장강도, 인장변형률을 각각 측정하였고, 주효과 선도를 기반으로 분석을 수행하였다. Fig. 5와

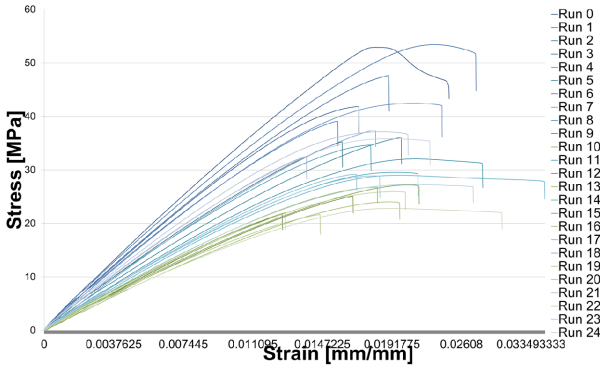


Fig. 4 Stress-strain curves of tensile test specimens

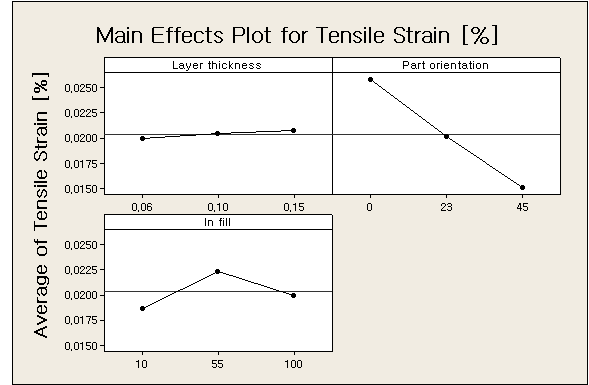


Fig. 7 Main effect plots of tensile strain versus layer thickness, part orientation and in fill

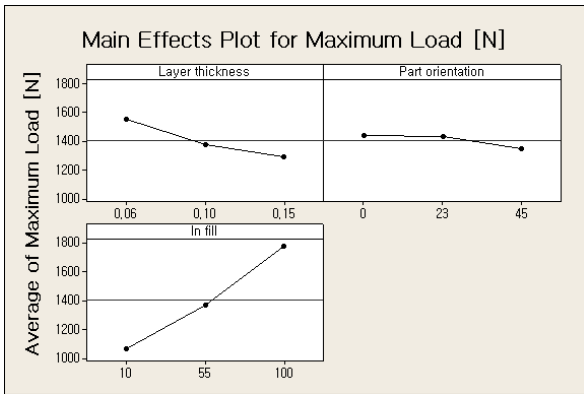


Fig. 5 Main effect plots of maximum load versus layer thickness, part orientation and in-fill

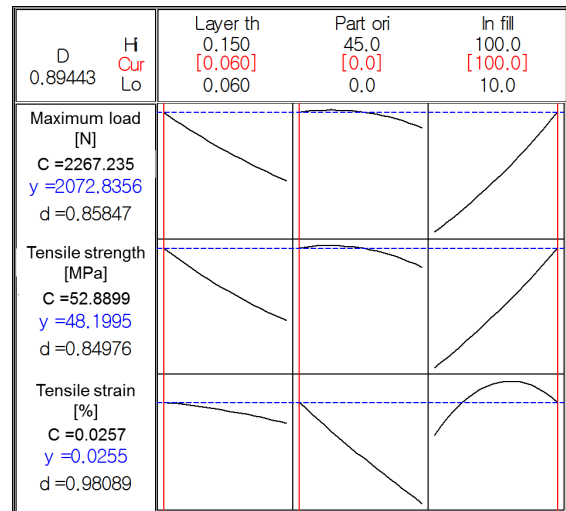


Fig. 8 Multiple factor analysis for mechanical properties of FDM 3D printed specimen

하중 및 인장강도의 경우와는 상이한 결과이다.

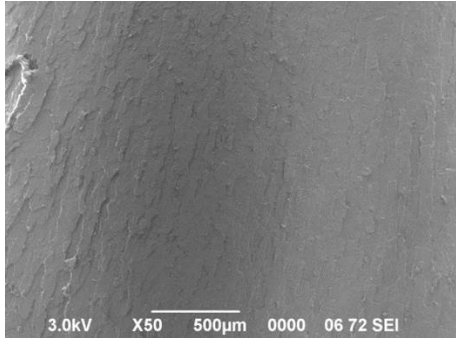
4.2 다중인자 분석 및 최적화

인장시험을 통해 측정된 적층 시편의 기계적 특성이 사출 성형 공정으로 제작된 시편의 기계적 특성과 유사하도록 MINITAB을 이용한 다중 목적 최적화 분석을 수행하였다. 즉, 최적화 분석에 있어서 목적 함수의 목표값은 사출성형으로 제작한 인장시험 시편인 Run 0의 최대하중, 인장강도, 인장변형률로 선정하였다. 공정 변수에 따른 다중인자 분석 및 최적화의 결과는 Fig. 8과 같다.

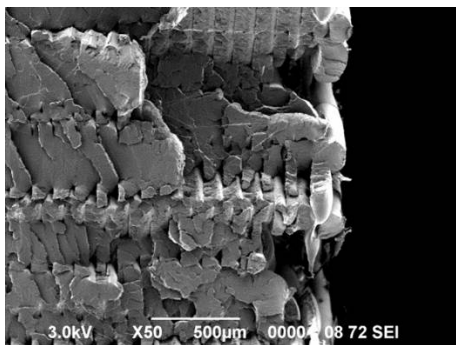
Fig. 8에 주어진 결과를 분석할 때 적층 두께가 0.06 mm, 적층 방향이 0°, 적층 충진량이 100%인 Run 9의 기계적 특성이 사출성형 시편의 경우와 가장 유사하였다. 즉, Run 9에서 FDM 공정으로 제작된 적층 시편이 최대 하중의 경우는 85.8%, 인장강도의 경우는 85.0%, 인장변형률의 경우는

Fig. 6에 주어진 최대하중과 인장강도의 주 효과 선도로부터 적층 두께 0.06 mm, 적층 방향 0°, 적층 충진량 100%일 때 최대하중 및 인장강도가 증가하는 경향성이 있음을 알 수 있다.

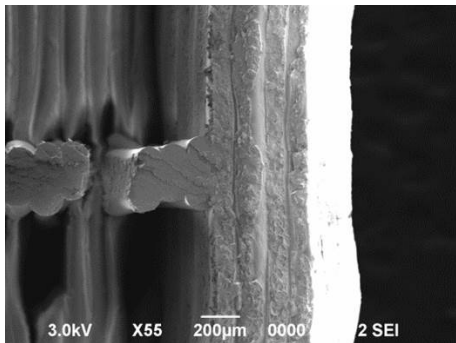
또한, Fig. 7에는 인장변형률 주효과 선도가 주어져 있다. Fig. 7로부터 적층 두께, 적층 방향 및 적층 충진량이 각각 0.15 mm, 0°, 55%일 때 인장변형률이 커짐을 알 수 있으며 이는 앞서 설명한 최대



(a) Run 0 (Injection molding specimen)



(b) Run 9 (Layer thickness : 0.06 mm, Part orientation : 0°, In-fill : 100%)



(c) Run 19 (Layer thickness : 0.15 mm, Part orientation : 45°, In-fill : 10%)

Fig. 9 SEM images of fractured specimens after tensile test

98.1%의 비율로 목표값인 Run 0에서의 측정값에 가장 근사하다는 것을 알 수 있었다. 종합적으로 Run 9의 FDM 공정조건을 이용하여 제작된 적층 시편의 기계적 특성이 사출성형 공정을 적용한 Run 0에서 제작된 시편 대비 89.4%의 유사성을 가지고 있음을 확인하였다.

4.3 인장시험 시편 파단면 분석

인장 시편의 기계적 특성에 영향을 주는 FDM

공정 인자인 적층 두께, 적층 방향, 적층 충전량의 영향을 정성적으로 분석하기 위해 Fig. 9와 같이 JEOL사의 JSM 6390A를 사용한 전자주사현미경 (Scanning Electron Microscope, SEM) 사진을 통해 인장시험 시편의 파단면을 관찰하였다.

PLA는 부도체이므로 관찰 시 파단면에 SEM의 전자가 축적되어 전자빔을 밀어내는 현상이 나타난다. 이로 인해 이미지가 왜곡되기 때문에 백금 코팅 처리를 수행하였다.

Fig. 9(a)는 사출성형으로 제작된 인장시험 시편의 파단면을 관찰한 사진이다. PLA 소재의 취성으로 인해 비교적 깨끗하게 파단된 것을 확인할 수 있다. Fig. 9(b)와 Fig. 9(c)는 FDM 공정으로 제작된 인장시험 시편의 파단면을 관찰한 사진이다.

Fig. 9(b)의 파단면 SEM 사진으로부터 적층 사이의 공간이 좁고 촘촘함을 확인할 수 있으며 Fig. 9(c)의 경우는 상대적으로 밀집도가 낮음을 알 수 있다. 이러한 적층의 빈공간은 층이 분리되는 이방성의 성질을 크며 상대적으로 촘촘한 적층 공간은 응력집중의 발생을 감소시켜 기계적 성질이 개선되게 된다.

5. 결론

본 논문에서는 대표적인 3D 프린팅 공정인 FDM 공정으로 출력된 부품을 의료분야에 적용하고자 적층재료로서 PLA를 선택하고 주요 공정 변수인 적층 두께, 적층 방향, 적층 충전량이 적층 시편의 기계적 성질에 미치는 영향을 실험적으로 분석하는 연구를 수행하였다. 즉, 사출성형으로 제작된 인장시험 시편과 상기한 공정변수를 변화시키면서 수행한 FDM공정으로 제작된 인장시험 시편을 제작한 후 인장시험을 통하여 기계적 특성의 영향 분석을 수행하고 최적 공정변수값을 도출하였다. 또한, 인장시험 시편의 파단면에 대하여 SEM사진 기반 정성적 분석을 수행하였다.

FDM 적층 시편을 제작하는 실험의 경우는 적층 두께, 적층 방향, 적층 충전량의 수치값을 각각 3수준으로 설정하여 총 27개가 설계되었고 각 경우에 3개씩 총 81개의 적층 시편에 대한 인장 시험을 통해 측정된 최대하중, 인장강도 및 인장변형률은 사출성형 공정으로 제작된 시편의 인장시험 결과와 비교되었다. 또한 사출성형 공정 제작 시편의 인장시험 결과를 목표값으로 설정한 다중 목적 최적화를 통해 적층 두께, 적층 방향 및 적층 충전량이 각각 0.06 mm, 0°, 100%일 때 적층 시편의 기계적 성질이 사출성형 시편의 기계적 성질

에 가장 근사함을 확인하였다. SEM 사진을 이용한 정성적 분석의 결과 상기한 조건에서 적층 공동부가 최소화되고 시편 내부 PLA 소재 적층 방향이 인장 방향과 사선이 되어 기계적 성질이 우수함을 알 수 있다.

상기한 조건에서 제작된 적층 시편의 경우 내부 공동부의 최소화를 통해 응력 집중이 감소되고 적층 방향이 인장 방향에 사선으로 적층되어 이방성이 방지되고 이로 인해 적층 간 분리가 감소한다. 이러한 현상으로 인해 적층 시편의 최대하중 및 인장강도가 증가되는 등 기계적 성질이 현저히 향상되며 이러한 적층 부품은 의료분야에서 적극적으로 활용될 수 있을 것이라 사료된다.

후 기

이 논문은 2015 년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. NRF-2015R1A2A1A10055948)

참고문헌 (References)

- (1) Kulkarni, P., Marsan, D. and Dutta, D., 2000, "A Review of Process Planning Techniques in Layered Manufacturing," *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 6, pp. 18~35.
- (2) Ahn, S. H., Montero, M., Odell, D., Roundy, S. and Wright, P. K., 2002, "Anisotropic Material Properties of Fused Deposition Modeling ABS," *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 8, No. 4, pp. 248~257.
- (3) Jung, H. B. and Lee, M. K., 2014, "The Factors that Determine the Symbolism of the Future Trendsetter Industrial Designers in 3D Printing Revolution," *Journal of Digital Design*, Vol. 14, No. 1, pp. 663~ 672.
- (4) Kim, K., 2012, "Building a 3D Printer for In-Situ Fault-Tolerant Robots," *Conference of Human Computer Interaction*, pp. 298~300.
- (5) www.3ders.org, 3D Printer and 3D Printing News, <http://www.3ders.org/articles/20141216-print-your-very-own-skull-with-a-desktop-fdm-3d-printer.html>.
- (6) Honiball, J. R., 2010, "The Application of 3D Printing in Reconstructive Surgery," *Thesis (MScEng (Industrial Engineering))*, University of Stellenbosch.
- (7) Gausemeier, G., Echterhoff, N. and Wall, M., 2011, "Thinking Ahead the Future of Additive Manufacturing-Exploring the Research Landscape," *Heinz Nixdorf Institute, Direct Manufacturing Research Center*, University of Paderborn, pp. 34~36.
- (8) The Wall Street Journal, Dow Jones & Company, <http://www.wsj.com/articles/SB10001424127887323372504578469560282127852>.
- (9) Lee, I. H., Oh, S. T., Kin, H. C. and Cho, H. T., 2014, "Development of Hybrid Fused Deposition Modeling System for Three-Dimensional Circuit Device Fabrication," *Trans. Korean Soc. mech. Eng. A*, Vol. 38, No. 8, pp. 869~874.
- (10) Kim, H. C. and Yun, H. Y., 2014, "Application of 3D Printing Technology in Nano/Micro Field," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 54, No. 4, pp. 36~40.
- (11) Kim, D. B., Lee, I. W. and Cho, H. Y., 2015, "A Study on the Mechanical Properties of Additive Manufactured Polymer Materials," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 39, No. 8, pp. 773~780.
- (12) Kim, D. B., Lee, G. T., Lee, I. W. and Cho, H. Y., 2015, "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.
- (13) Ogden, S. and Kessler, S., 2014, "Anisotropic Finite Element Modeling of the Fused Deposition Modeling Process", *Characterization of Minerals, Metals, and Materials*, pp. 235~243.
- (14) Quintana, R., Choi, J. W., Puebla, K. and Wicker, R., "Effects of Build Orientation on Tensile Strength for Stereolithography-Manufactured ASTM D-638 Type I Specimens," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 46, No. 1~4, pp. 201~215.
- (15) Peng, A. and Wang Z. M., 2010, "Researches into Influence of Process Parameters on FDM Parts Precision," *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 34~35, pp. 338~343.
- (16) Auras, R. A., Lim, L. T., Selke, S. E. M. and Tsuji, H., 2010, "Poly (lactic acid): Synthesis, Structures, Properties, Processing, and Applications," *John Wiley & Sons*.
- (17) ASTM D 638, 2014, "Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics," *ASTM International*.