

적층 기법으로 제작한 polyamide 12 소재 적용 구조물 표면 특성 분석 연구

김무선

한국철도기술연구원 도시철도연구팀

Study on the Surface Characterization of Structure made of Polyamide 12 manufactured by Additive Manufacturing Process

Moosun Kim

Urban Transit Research Team, Korea Railroad Research Institute

요약 적층 기법 (Additive manufacturing)은 플라스틱, 세라믹, 금속 등 다양한 소재를 활용하여 구조물의 2차원 단면을 반복적으로 적층함으로써 3차원 구조물을 제작하는 최신 제조 공정기술이다. 적층 기법은 높은 디자인 자유도의 장점에 반해, 적층 기법의 특성상 최종 제품의 표면 특성(거칠기)은 공정 조건에 따라 다양하게 나타나므로, 대부분 제품 제작 후 후가공이 필수적으로 진행되어야 한다. 이번 연구에서는 polyamide 12 소재를 대상으로 플라스틱 제품의 대표적인 적층 공정 방식인 SLS (Selective Laser Sintering) 및 MJF (Multi Jet Fusion) 공정 기술로 시편 제작 후 표면 거칠기를 비교 분석하였다. 시편은 분석 표면이 제작 플랫폼의 수평면과 이루는 기울기를 기준으로 0도, 45도, 90도로 제작 조건을 구분하였으며, 또한 1 mm에서 10 mm까지 다양한 사이즈의 홀(hole)이 있는 구조물을 제작하여 최종 시편의 홀 특성(홀 직경 대비 홀 깊이 비율) 결과를 비교하였다. 표면 특성 분석 결과 SLS 및 MJF 두 방식 모두 45도 기울기를 갖는 시편에서 표면 거칠기 값이 상대적으로 가장 높았으며 홀 성형은 5mm 및 10mm 직경 홀의 경우 제작방향에 상관없이 관통된 홀 형상을 유지되나, 그 이하 직경의 홀에 대해서는 두 공정 기술 모두 관통된 홀 성형이 어려움을 확인하였다.

Abstract Additive manufacturing is a state-of-the-art manufacturing process technology in which three-dimensional structures are fabricated by laminating two-dimensional sections of a structure using various materials such as plastic, ceramics, and metals. The additive manufacturing technology has the advantage of high design freedom, while the surface property (roughness) of the finished product varies depending on the process conditions, which necessitates performing a post-process after the products are manufactured. In this study, the surface roughness of a structure made of polyamide 12, which was manufactured by SLS (Selective Laser Sintering) and MJF (Multi Jet Fusion) process was compared. The processing condition was classified by the building orientation of structure as 0, 45, and 90 degrees, which is the angle between the analytical surface and the horizontal plane of the fabrication platform. Structures with a hole of various diameters ranging from 1mm to 10mm were manufactured and the hole characteristics (ratio of hole depth to diameter) and results of the specimens were compared. As a result of the surface characteristics analysis, the surface roughness value of the specimens manufactured with a building orientation of 45° was the highest in both technologies. In the case of the through-hole structure fabrication, the shape was maintained with 5mm and 10mm diameter holes regardless of the building orientation, although the hole forming was difficult for the smaller holes.

Keywords : Additive Manufacturing, MJF, Polyamide 12, SLS, Surface Roughness

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 July 11, 2019

Revised August 27, 2019

Accepted September 6, 2019

Published September 30, 2019

1. 서론

적층공정 (additive manufacturing process) 기술의 대표적인 기술인 PBF (Powder Bed Fusion) 방식은 고분자, 금속 등 다양한 소재를 파우더 형태로 적용하여 2차원의 평면에 얇게 적층한 후 다양한 방식으로 열원을 가하여 기존 적층 단면에 융착하는 방식으로서 3차원의 구조물을 제작하는 원리를 기본으로 한다. 이와 같은 방식으로 구조물을 제작하면, 복잡한 형상의 구조물을 기계 가공과 같은 별도의 과정을 필요로 하지 않고 일체형으로 제작할 수 있는 장점이 있다. 따라서 기존의 전통적인 제작 방식에 비해 제품 설계시 설계 자유도가 상대적으로 높으며, 복합적인 기능을 목표로 하는 구조물을 비교적 쉽게 제작할 수 있다.

고분자 소재를 대상으로 하는 대표적인 PBF 기술로 SLS (Selective Laser Sintering) 방식과 MJF (Multi Jet Fusion) 방식이 있다.

두 공정 방식은 소재 파우더를 융착하는 열원의 방식에 따라 구분된다.

SLS 공정기술은 레이저를 활용하여 고분자 파우더를 용융하고 적층하는 원리이며, MJF 공정기술은 적층된 파우더 소재에 퓨징 에이전트 (fusing agent)를 분사하고 그 위에 적외선을 조사함으로써 해당 영역의 파우더를 융착하는 원리를 이용한다.

SLS 기술은 현재까지 레이저 용량, 스캔 속도, 해칭 간격 등 각 공정 조건의 변화에 따른 제작특성을 주제로 한 연구가 많이 진행되었다. 관련된 주요 연구로는 공정 조건에 따른 물성 차이 및 비등방성에 관한 연구[1-4] 등이 있으며, 또한 적층 기법의 장점인 설계자유도와 관련한 최적 설계 연구도 주요 관심 주제이다.

다음으로 MJF 기술은 HP사에서 원천기술을 개발하여 비교적 최근에 등장한 적층제조 기술로, 최근에 관련 연구가 진행되기 시작하였다. 현재까지 관련 연구[5-8]는 MJF 기술을 활용하여 polyamide 12 소재를 대상으로 한 기계적 물성에 관한 분석내용이 대부분이다.

앞서 언급한 바와 같이 적층 공정 기술은 복합형상 부품을 제작하는 데 장점이 있다. 한 예로 내부에 복잡한 형상의 유로를 가지는 밸브류와 같은 구조물을 일체형으로 제작할 때 유용하다.

일반적으로 적층 기법으로 제품 제작 후 에어 블로우 방법으로 구조물 내부에 쌓여 있는 잔여 파우더를 제거하고 샌드 블라스트, 물리적 또는 화학적 표면 처리 방법으로 후처리를 진행하여 최종 제품을 완성한다.

하지만 형상이 복잡한 구조물의 내부 표면처리는 상대적으로 어려우며, 일반 기계가공 만큼의 정밀도를 구현하기는 힘들다.

또한 제작품이 내부유동과 관련된 부품인 경우, 내부 표면 특성이 유동 특성에 영향을 주기 때문에, 적층 기법 특성에 따른 구조물의 표면 특성 분석이 중요하다.

따라서, 이번 연구에서는 SLS 및 MJF 기술 방식을 적용하여 polyamide 12 소재로 구조물을 제작할 때, 파우더 제거 후 표면 후처리 없이 나타나는 시편의 표면 특성과 구조물 내부의 홀 형상의 유지 특성에 관하여 시험 및 그 결과를 분석하였다.

2. SLS 및 MJF 공정 특성 및 시편 제작

2.1 SLS 및 MJF 공정 기술 특성

SLS 및 MJF 기법의 원리를 살펴보기 위해, 먼저 SLS 공정 원리를 Fig. 1 [9]에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이, 소재 파우더를 레이어로 적층한 후 레이저로 소결하게 된다. 그 후 구조물이 설치되어 있는 플랫폼은 일정 높이만큼 낮아지고 리코터는 파우더 베드로부터 다음 공정을 위해 일정량의 파우더를 가지고 와 다시 얇은 레이어를 형성한다. 구조물 제작 완성을 위해 이 과정을 반복하게 된다.

다음으로 Fig. 2에서는 MJF 공정의 원리를 나타낸다. SLS 공정과 마찬가지로 파우더 적층은 같은 원리로 이루어지지만, 소재를 기존 레이어에 융착하는 방식의 차이를 보인다. 소재 파우더를 레이어 형태로 적층한 후, 프린트 잉크 헤드를 통해 퓨징 에이전트와 디테일링 에이전트를 분사하게 되며, 그 위에 적외선을 조사하게 되면 퓨징 에이전트가 함침된 파우더 영역은 적외선 조사에 따른 열에너지의 흡수량이 많아지면서 해당 영역의 파우더를 녹이게 되고, 디테일링 에이전트가 함침된 영역은 열에너지 흡수량을 줄이게 되어 근접한 용융 영역과의 경계를 분명하게 해주는 역할을 수행한다[8].

SLS 및 MJF 공정 기술 모두, 구조물이 파우더 베드 안에 위치하고 파우더가 지지하기 때문에 FDM이나 SLA 기술과 같은 3D 프린팅 기법에서 구조물 지지를 위해 필수인 썬포트가 불필요하다. 이러한 특성으로 제품 내부에 형상이 있는 경우 썬포트를 생성할 필요가 없기 때문에, 썬포트 제거 공정이 불필요하다. 따라서 상대적으로 복잡한 내부 형상의 일체형 부품 제작이 가능하다.

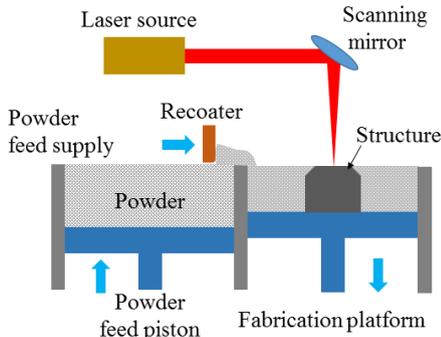


Fig. 1. Schematic diagram of SLS [9]

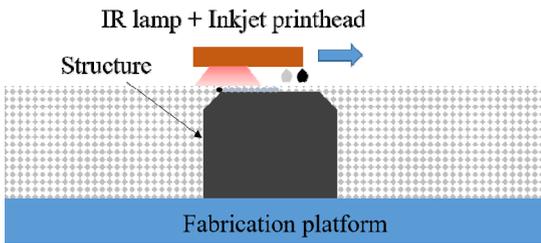


Fig. 2. Schematic diagram of MJF [8]

2.2 시편 제작

표면 특성 시험을 진행하기 위해, polyamide 12 소재를 기반으로 하여 SLS 및 MJF 각 공정에서 표면 특성 평가용 시편을 시험조건당 5개씩 제작하였다.

시편 제작을 위한 공정 조건은 두 공정기술의 장비 제작사에서 제공하는 가이드 라인을 참조하였다.

SLS 기법으로 제작하는 3D 프린팅 장비는 독일 EOS 社の P396 모델을 활용하였으며, 소재는 같은 회사의 polyamide 12 소재인 상품명 PA2200을 적용하였다.

먼저 SLS 공정기술의 조건은 레이저 파워 50 W, 레이저 스캔속도 590mm/sec 및 레이어 두께 100 μ m으로 지정하였다.

MJF 기법 적용은 HP 社の Jet Fusion 3D 4200 모델을 활용하였으며, 적용 소재는 polyamide 12를 기본으로 하는 상품명 HP 3D High Reusability PA 12를 적용하였다. 공정조건은 기기 제조사에서 제공하는 기본 세팅 공정조건을 활용하였다. 표면 특성 분석 시편은 적층 각도에 따른 표면 특성 차이를 고려하기 위해 Fig. 3 (a) 과 같이 제작 플랫폼 기준으로 0° (x-y 평면), 45°, 90° (z축) 등 세 개 방향으로 시편 제작 방향을 정의하였다. 그리고 시편 길이 축의 방향이 각 방향과 일치하도록 시

편을 제작하였다. 시편은 50mm(길이) × 20mm(폭) × 10mm(높이)의 직육면체 형태를 가진다. 표면 특성 분석과 함께 구조물 내부의 홀 형상 유지 특성을 분석하기 위해 길이 방향으로 시편 중심을 관통하는 다양한 직경의 홀을 가지는 50mm(길이) × 20mm(폭) × 20mm(높이) 크기의 직육면체 시편을 Fig. 3 (b)와 같이 0°, 45°, 90°의 제작방향 별로 제작하였다.

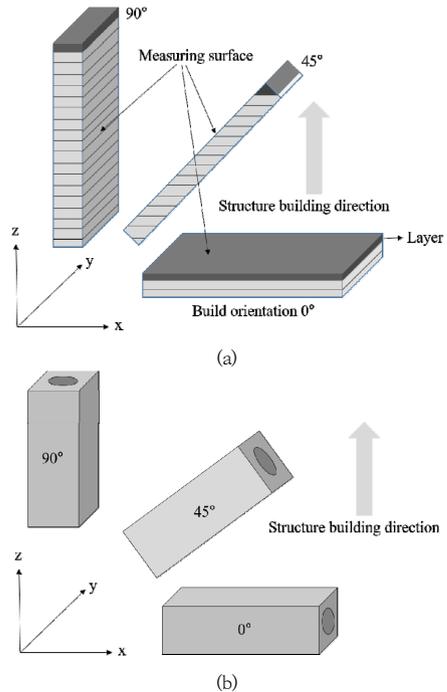


Fig. 3. Building orientation of specimen of (a) surface roughness [9] and (b) through-hole shape

3. 결과 및 고찰

SLS 및 MJF 공정 기술로 제작한 각 시편의 표면 특성 분석을 위해 공초점 분석방식으로 진행하였다. 분석 장비는 ZEISS 社の LSM700 모델을 활용하였다. 공초점 방식은 광원이 되는 레이저에서 시료의 초점과 정확하게 일치하는 빛만을 측정하는 방식이다. 이번 시편에서 분석 평면은 Fig. 3에 표시한 바와 같이 직육면체 중 길이와 폭 방향의 평면을 측정 면으로 하여 길이 방향으로 표면 거칠기를 측정하였다.

Fig. 4에 시편 제작 방향과 공정 기술별로 각 조건별 5개 시편의 표면 거칠기 (Ra) 평균치를 보여주는 분석

결과를 도시하였다. 이때 표면 거칠기 (Ra)는 측정 라인에서 평균 높이 기준으로 모든 높이의 절대값을 합한 후 라인 길이로 나눈 값이며, 이번 분석에서는 300 μ m를 측정 라인의 길이로 설정하였다.

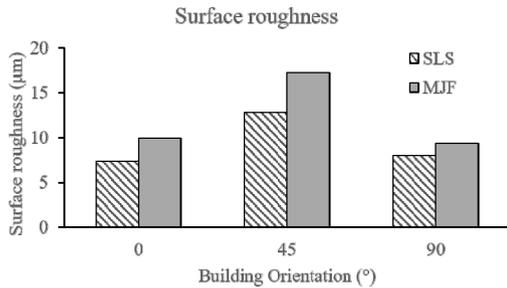


Fig. 4. Surface roughness of specimen by SLS and MJF

Fig. 4로부터 알 수 있듯이, 표면 거칠기 값은 MJF 방식이 SLS 방식 대비 모든 시편 제작 방향에서 상대적으로 높은 값을 보인다.

제작 방향 0°의 경우 SLS 방식은 표면거칠기 값으로 7.3 μ m의 값을 보인 반면, MJF 방식은 SLS 방식 대비 약 36% 증가하였다. 45° 및 90° 제작방향으로는 MJF 방식이 각각 34% 및 18%로 SLS 방식의 표면 거칠기 값 대비 증가하였다.

제작 방향 관련하여 두 공정기술 모두 45° 제작 방향에서의 표면 거칠기가 나머지 제작 방향들의 표면 거칠기 대비하여 높은 값을 보이는데, 이는 소재의 적층 특성 영향으로 판단된다. 즉, 0° 및 90°의 제작 방향 기준으로는 측정 평면이 동일층의 평면 및 적층되는 수직 단면으로 구성된 연속 평면인 반면 45°의 경우 계단 형태의 파우더 적층 특성으로 인한 영향때문에 표면 거칠기가 높아진 것으로 판단된다.

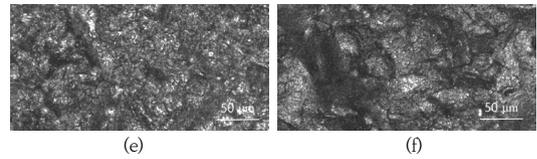
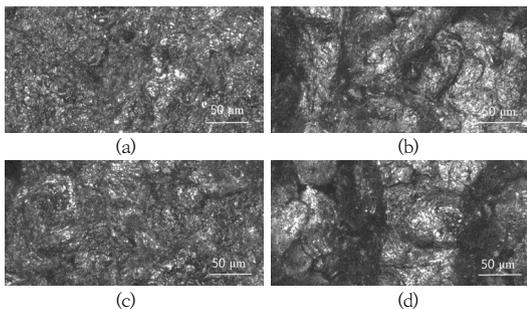


Fig. 5. Comparison of surface image of specimen manufactured by SLS (a,c,e) vs MJF (b,d,f) in order of the building orientation 0°, 45° and 90°

다음으로 SLS 방식 및 MJF 방식으로 출력한 시편 표면의 공초점 분석 이미지를 Fig. 5에 나타내었다.

Fig. 5의 왼쪽 3개의 이미지는 0°, 45°, 90° 각각의 제작 방향을 기준으로 하여 SLS 기법으로 제작한 시편의 공초점 분석 이미지이며, 오른쪽 3개의 이미지는 MJF 기법으로 제작한 시편의 이미지이다. 결과로부터, SLS 기법으로 제작한 구조물의 표면이 MJF 기법의 시편 표면보다 균일한 표면 특성을 보임을 확인할 수 있다. 제작 방향에 따른 표면 특성을 비교하면 MJF 방식에서 45° 제작 방향의 시편 표면이 다른 두 각도의 제작 시편보다 상대적으로 표면 특성의 불균일성이 커짐을 볼 수 있는데, 이는 표면 거칠기의 수치적인 결과를 나타낸 Fig. 4에서 보이는 양상과 동일하다.

표면 특성 시험에 이어, 구조물 내부에 일정 크기의 홀 (직경 각 1, 2, 3, 5, 10mm)이 관통하는 직육면체 구조물을 두 적층 기법으로 제작하였다. 제작된 홀 직경에 대한 측정 치수를 Table 1에 정리하였다. Fig. 6은 제작 시편을 보여준다. MJF 기법으로 제작한 시편은 퓨징 에이전트 사용 영향으로 SLS 시편에 비해 상대적으로 어두운 색상을 띤다.

Fig. 7에는 직경 3, 5, 10mm 홀을 가지는 시편을 대상으로 SLS 및 MJF 방식으로 제작한 홀 형상의 결과물을 보여준다. 그림에서 알 수 있듯이 5mm 및 10mm 직경의 홀은 50mm 길이의 구조물을 관통하면서 홀 형상을 유지하며 적층 기법 및 파우더 제거만으로 제작이 가능하였다.

Table 1. Measure of hole diameter manufactured by SLS and MJF

design dimension	1mm	2mm	3mm	5mm	10mm	
SLS	0°	0.80	1.85	2.85	4.85	9.90
	45°	0.80	1.80	2.85	4.85	9.85
	90°	0.80	1.85	2.80	4.85	9.85
MJF	0°	0.80	1.85	2.90	4.85	9.90
	45°	0.80	1.80	2.85	4.9	9.90
	90°	0.80	1.85	2.85	4.85	9.90

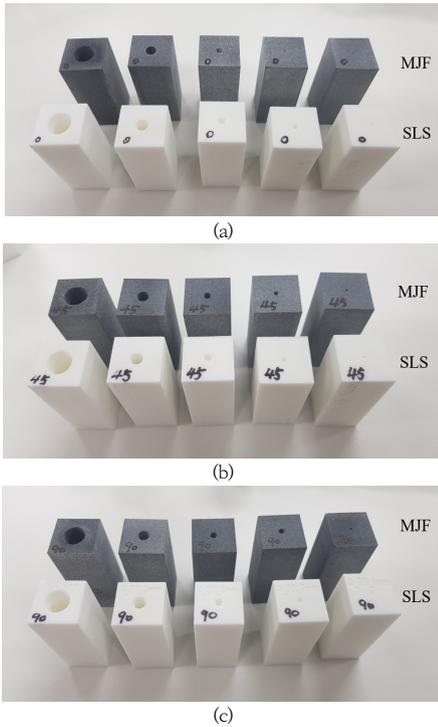


Fig. 6. Specimen with different size holes manufactured by SLS and MJF with building orientation (a) 0°, (b) 45° and (c) 90°

이와 반대로 직경 3mm 홀은 구조물의 끝단에서 홀 형상을 유지하였지만, 홀 안쪽으로 갈수록 파우더가 홀 주변 벽에 응착하여 제거가 어려웠으며, 결과적으로 적층 기법만으로는 홀 형상 제작이 불가능하였다. 직경 1mm 및 2mm 홀을 가지는 구조물에서도 유사한 결과를 보였다. 구조물 관통 형상 제작이 어려운 직경 1mm, 2mm 및 3mm의 홀을 대상으로 홀 형상이 유지되는 깊이까지, 홀 직경에 대한 깊이의 비율로 aspect ratio 값을 계산한 결과 값을 Fig. 8에 도시하였다.

결과로부터 MJF 방식이 SLS 방식보다 동일 조건(시편 제작 방향, 홀 직경)의 제작 조건에서 높은 aspect ratio 값을 보임을 알 수 있다. 또한 제작 방향 0°의 경우를 제외하고 홀 사이즈가 커질수록 깊이의 비율이 커짐을 확인할 수 있다. 제작 방향 기준으로는, 제작 방향이 90°에 가까워질수록 aspect ratio는 작아진다.

이상으로 SLS 및 MJF 기술 적용에 따른 표면 특성과 홀 형상 유지 특성에 관하여 살펴보았다.

결과적으로 SLS 방식이 상대적으로 낮은 표면 거칠기 값을 가지는 반면, 미세 홀 제작에 있어서는 MJF 방식이

SLS 방식 대비 동일 직경 홀에 대해 더 큰 깊이 값을 가지는 것으로 판단된다.

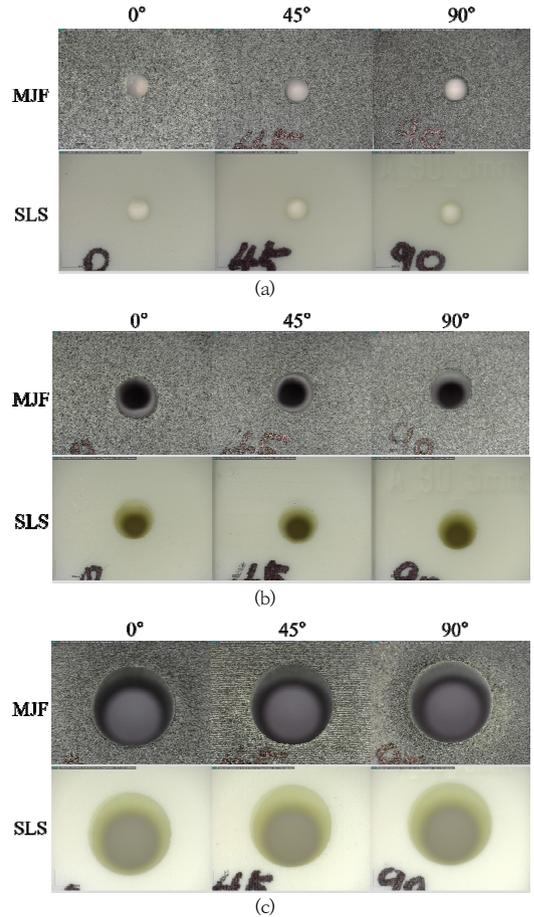


Fig. 7. Results of hole shape manufactured by SLS and MJF with different diameter of (a) 3mm, (b) 5mm and (c) 10mm and building orientation

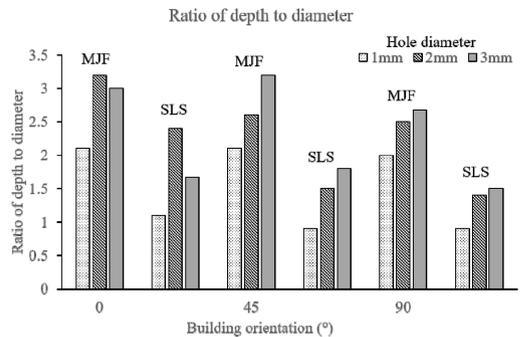


Fig. 8. Comparison of depth ratio to diameter of holes (1mm, 2mm and 3mm) manufactured by SLS and MJF with different building orientation

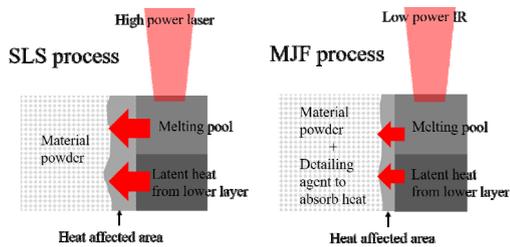


Fig. 9. Comparison of heat transfer in SLS and MJF processes

이러한 특성 차이는 원형 파우더 소재의 용융 방식의 차이에 따라 발생하는 것으로 생각할 수 있다.

Fig. 9에 나타난 바와 같이 SLS 방식은 파우더 위에 고출력의 레이저를 직접 조사함으로써 소재 용융이 발생하는 원리이며, MJF 방식은 파우더 소재 위에 적외선을 조사하여 퓨징 에이전트가 분사된 소재에 열에너지가 집중적으로 흡수되어 멜팅풀(melting-pool)이 형성된다. 이때 디테일링 에이전트는 용융 영역에 이웃한 영역으로 분사되어 멜팅풀에서 전달되는 열을 흡수하여 주변 소재로의 열전달 현상을 최소화한다[8]. 따라서, SLS 방식의 경우 제작 목표가 되는 영역에 열에너지가 흡수되면 용융상태로 바뀌고, 이때 주변 소재에 열전달이 발생하면서, 상대적으로 작은 직경의 소재 파우더가 같이 용융되면서 불규칙한 용융 표면을 보완하게 된다. 반면, MJF 방식은 목표 지점이 용융되면서 주변으로의 열전달은 디테일링 에이전트에 의해 최소화되고, 이에 따라 주변 파우더를 용융하는 영향은 작아지게 된다. 따라서 표면 거칠기 특성에서는 SLS 방식이 더 좋은 경향을 보이며, 반대로 홀 형상을 유지하는 특성에서는 MJF 방식이 주변으로의 열전달 효과가 작기 때문에, 홀 깊이를 상대적으로 더 많이 유지할 수 있는 것으로 판단된다.

4. 결론

이번 연구에서는 고분자 소재를 대상으로 하는 적층 기법의 대표적인 기술인 SLS 방식과 MJF 방식을 활용하여 polyamide 12 소재를 대상으로 구조물을 제작하였을 때 나타나는 표면 거칠기 특성과 홀 형상 유지 특성에 대하여 다양한 시편 제작 방향을 기준으로 시험 결과를 분석하였다.

시편 제작 방향은 0° (x-y 평면), 45°, 90° 로 구분하였으며, 홀의 직경은 1, 2, 3, 5, 10mm로 각각 구분하였다.

각 조건별로 시험 결과는 다음과 같이 정리할 수 있다.

(1) 표면 거칠기 특성은 SLS 방식이 MJF 방식보다 거칠기 값이 더 작았으며, 제작 방향 기준으로 45°에서 두 방식 모두 가장 높은 표면 거칠기 값을 보였다.

(2) 홀 형상 유지 특성은 직경 5mm 및 10mm의 경우 두 적층 방식 모두 구조물을 관통하는 홀의 형상이 유지되었다. 하지만 미세 직경 홀의 경우, 홀 형상 유지가 어려웠으며, 홀 직경 대비 홀 깊이의 비율에서 MJF 방식이 SLS 방식보다 더 높은 값을 보였다.

이는 각 방식의 소재 용융 원리의 차이에 의해 발생하는 주변 소재로의 열전달 현상 차이로 그 원인을 유추할 수 있다. 보다 정확한 원인을 파악하기 위해 미세조직 분석 및 용융에 따른 열전달 현상 해석의 수행이 필요할 것으로 판단된다.

References

- [1] 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>
- [2] 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>
- [3] 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>
- [4] 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.jimatprotec.2006.09.007>
- [5] F.N.Habib, P.Iovenitti, S.H.Masood, M.Nikzad, "Fabrication of polymeric lattice structures for optimum energy absorption using Multi Jet Fusion technology", *Materials and Design*, vol.155, pp. 86-98, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.05.059>
- [6] J.Riedelbauch, D.Rietzel, G.Witt, "Analysis of material aging and the influence on the mechanical properties of polyamide 12 in the Multi Jet Fusion process", *Additive Manufacturing*, vol.27, pp.259-266, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.03.002>
- [7] H.J.O'Connor, A.N.Dickson, D.P. Dowling, "Evaluation

of the mechanical performance of polymer parts fabricated using a production scale multi jet fusion printing process”, *Additive Manufacturing*, vol.22, pp.381-387, 2018.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.05.035>

- [8] F.Sillani, R.G.Kleijnen, M.Vetterli, M.Schmid, K.Wegener, “Selective laser sintering and multi jet fusion: Process-induced 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>

- [9] 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>

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