



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공 학 석 사 학 위 논 문

공정변수에 따른 Selective Laser Sintering
공정으로 제조된 Cu 복합소재의 미세조직 변화와
기계적 특성

Microstructures and Mechanical Properties of Cu
Composites Manufactured by Selective Laser
Sintering with Process Variables

울 산 대 학 교 대 학 원
첨 단 소 재 공 학 부
김 진 형

공정변수에 따른 Selective Laser Sintering
공정으로 제조된 Cu 복합소재의 미세조직 변화와
기계적 특성

Microstructures and Mechanical Properties of Cu
Composites Manufactured by Selective Laser
Sintering with Process Variables

지도교수 김 진 천

이 논문을 재료공학 석사학위 논문으로 제출함

2019 년 2 월

울 산 대 학 교 대 학 원
첨 단 소 재 공 학 과
김 진 형

김진형의 공학석사학위 논문을 인준함

심사위원

신상용 교수



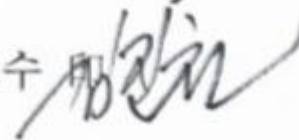
심사위원

고원석 교수



심사위원

김진천 교수



울 산 대 학 교 대 학 원

2019 년 2 월

차 례

국문 요약	①
표 목차	③
그림 목차	④
1. 서론 (Introduction)	1
2. 이론적 배경 (Theoretical Background)	3
2.1 3D 프린팅 기술	3
2.2 레이저	11
2.2.1. 이터븀 레이저	11
2.2.2. 레이저 빔 크기와 에너지 분포	11
2.3 스테인리스 스틸(Stainless Steel : STS)	17
2.3.1 STS316L	19
2.4. Cu	19
2.5. Al ₂ O ₃	19
2.6 Selective laser sintering 분말소재의 변수	20
2.6.1. 레이저의 흡수율	20
2.4.2. 분말형상 및 크기	20
2.4.3. 분말의 입도분포	20
3. 실험 방법 (Experimental Procedures)	
3.1. 재료선정	23
3.2. 적층 패턴	23
3.3. 3D 프린터 장비 및 출력물 선정	24
3.4. 밀도 측정	24
3.5. 미세조직 관찰	24
3.6. 경도 실험	25
4. 결과 및 고찰 (Results and Discussion)	
4.1.STS316L-Cu 분석	40
4.1.1 출력 후 시편 표면 분석 및 평가	40
4.1.2 연마 후 표면 분석	44
4.1.3 에칭 후 미세구조 분석	47
4.1.4 밀도 분석과 경도분석	50
4.2.Cu-Al ₂ O ₃ 분석	54

4.2.1 출력 후 시편 표면 분석 및 평가	54
4.2.2 에칭 후 미세구조 분석	58
4.2.3 경도분석	61
5. 결론 (Conclusions)	63
참고문헌 (References)	64
Abstract	68

국 문 요 약

선택적 레이저소결(SLS)은 CO₂ 레이저를 사용하여 금속, 폴리머 및 세라믹 파우더에서 3D 대상물을 생산하는 적층제조(AM) 기술이다. 매우 복잡한 제품들을 제조할 수 있고, 생산 시간을 줄이며, 제품에 양호한 거시적 특성을 제공할 수 있다는 점 등의 장점으로 인해 전통적인 방법에 비해 매우 유망한 제조 공정이다. 따라서 SLS는 우주 항공, 의료 및 임플란트 제조와 같은 많은 분야에 적용되고 있다.

오스테나이트 계 스테인리스강은 일반 탄소강에 비해 우수한 내식성, 내마모성 및 기계적 특성으로 구조재나 판재로 많이 사용되어 왔다. 이 중 STS316L(용융점 1375-1400°C)이 가장 많이 사용되고 있고, 특히 고온 Creep 강도가 우수하고, 입계 부식에 대한 저항성과 용접성이 우수하여, 기계적인 강도를 요하는 부품보다는 복잡 형상을 갖는 내식성 부품에 많이 응용되고 있다.

Cu(용융점 1084.62°C)는 두 번째로 높은 열전도율과 대기, 해수, 산업 화학물의 다양한 외부 환경에 대해 높은 내부식성을 갖는다.

Al₂O₃(용융점 2050°C)는 다이아몬드 다음가는 경도를 가졌고, 절연체이다. 내열성, 내약품성, 강도 등 세라믹스에 요구되는 일반적인 성질을 거의 만족시키는 데다 값이 싸므로 세계적으로 가장 많이 이용되고 있다.

본 연구에서는 STS316-Cu, Cu-Al₂O₃이 2가지 복합소재를 사용하여 연구를 진행하였다. STS316L-Cu 사용된 분말은 위성 분말이 없는 평균입도 35 μ m STS316L 구형 분말과 순수 Cu 구형분말을 단순혼합으로 95:5(무게비)의 복합분말을 사용하였다. 이 두 개의 재료를 선택한 이유는 서로 고용되지 않는 불고용성을 가지고 있기 때문에 서로 합금화되지 않는 복합 분말을 이용하여 3D프린팅을 하였을 때 어떠한 결과가 나타날지 관찰하기 위함이다.

Cu-Al₂O₃의 Al₂O₃ 분말은 100nm 단위의 분말을 사용하였고 95:5(부피비)로 단순혼합 하였다. 이 Cu와 Al₂O₃ 이 두 개의 분말을 혼합한 이유는 금속과-세라믹 이 두가지 분말을 혼합하였을 때의 결과를 알아보기 위함이고, 또한 Cu와 Al₂O₃는 Cu의 낮은 표면 기계적 특성을 Al₂O₃를 첨가함으로써 보완하는 연구가 진행중이므로 SLS공정을 활용하였을 때의 결과를 관찰하기 위함이다.

본 연구에서 SLS공정에서 가장 중요한 레이저의 출력과 적층패턴에 따른 소결체의 미세조직과 밀도변화를 분석하였고, 레이저의 패턴은 기본적으로 STS316L-Cu에서는 Offset-filling, Meander로 2가지 패턴을 Cu-Al₂O₃에서는 Meander(90⁰rotation)와 Meander(69⁰rotation)설정하여 진행하였고, 레이저 출력량(180W, 130W, 120W,

100W), 레이저 속도(600mm/s, 700mm/s, 800mm/s, 1000mm/s, 1400mm/s)로 진행하였다. 패턴과 레이저 속도, 레이저 출력량의 영향에 따라 밀도의 변화와 미세조직의 변화 그리고 기계적 특성평가를 통하여 밀도의 최적화와 출력물의 특성에 대하여 연구하였고, 130W-1400mm/s, 100W-700mm/s 조건에서는 밀도 최적화 조건에 만족하지 않았으며, 미세조직에서 많은 기공을 확인 할 수 있었다. 120W-800mm/s Meander 패턴 조건에서는 밀도 최적화를 하였으며, STS316L-Cu의 시편에서 불고용성으로 인한 용출(melt-out) 현상을 관찰할 수 있었다. 또한 SLS 시편의 특징인 레이저 용융대(melt pool)을 확인하였고, Offset-filling 패턴에서는 공통적으로 시편 중앙에 에너지 집중으로 인한 손상이 관찰 되었다.

표 목차

Table 1. Processes of the 3D printer ASTM F42	7
Table 2. Classification of the stainless steel	18
Table 3. Specification of SLS machine	30
Table 4. Flow rate of Cu powder and STS316 powder	36
Table 5. Process parameter of STS316L+Cu	37
Table 6. Density and Vickers hardness of STS316l+Cu	38
Table 7. Process parameter of Cu+Al ₂ O ₃	39
Table 8. Vickers hardness of STS316l+Cu	52
Table 9. Density and Vickers hardness of STS316l+Cu	53
Table 10. Process parameter of Cu and Cu-Al ₂ O ₃	55

그림 목차

Fig 1. Process of 3D Printing	2
Fig 2. Schematic diagram of Selective Laser Melting	8
Fig 3. Schematic diagram of Polyjet	8
Fig 4. Schematic diagram of Stereo Lithography Apparatus	9
Fig 5. Schematic diagram of 3D Dimensional Printing	9
Fig 6. Schematic diagram of Fused Deposition Modeling	10
Fig 7. Schematic diagram of Digital Light Processing	10
Fig 8. Cross section of germanosilicate ytterbium's emission and absorption	14
Fig 9. Energy level of the Ytterbium	14
Fig 10. Effective beam spot size	15
Fig 11. Schematic diagram of f-theta lens	15
Fig 12 Schematic diagram of 3-axis dynamic scanner	16
Fig 13. Density of the 2 kinds mix powder	22
Fig 14. The fraction density with surface roughness of the powder and the stacking density according to the powder L / D	26
Fig 15. Sketch of laser pattern of STS316L+Cu	27
Fig 16. Sketch of laser pattern of Cu-Al ₂ O ₃	28

Fig 17. Selective laser sintering process principle	29
Fig 18. FE-SEM images of the Cu powder	31
Fig 19. FE-SEM images of the STS316L powder	31
Fig 20. Results of laser particle size analysis of STS 316L + Cu powder	32
Fig 21. FE-SEM images of the Al ₂ O ₃ powder	33
Fig 22. FE-SEM images of the STS316L + Cu powder	34
Fig 23. FE-SEM images of the Cu + Al ₂ O ₃ powder	35
Fig 24. Sample images of the STS316L + Cu powder	42
Fig 25. Broken Sample images of the STS316L + Cu powder	42
Fig 26. OM Image of surface STS316L+Cu sample	43
Fig 27. Sample images of the STS316L + Cu powder before eching (1)	45
Fig 28. Sample images of the STS316L + Cu powder before eching (2)	46
Fig 29. OM images of the STS316L + Cu powder After eching (1)	48
Fig 30. OM images of the STS316L + Cu powder After eching (2)	49
Fig 31. Vickers hardness pressure marks of the STS 316L-Cu powder products	51
Fig 32. OM Sample images of the Cu powder	56
Fig 33. Cu-Al ₂ O ₃ Sample	57
Fig 34. OM images of the Cu-Al ₂ O ₃ powder After eching (1)	59

Fig 35. OM images of the Cu-Al₂O₃ powder After etching (2) 60

Fig 36. OM images of the STS316L + Cu powder After etching 62

I. 서론 (Introduction)

선택적 레이저소결(SLS)은 CO₂ 레이저를 사용하여 금속, 폴리머 및 세라믹 파우더에서 3D 대상물을 생산하는 적층제조(AM) 기술이다. 예를 들어 높은 용점 온도에서 매우 복잡한 구성 요소를 생산할 수 있고, 생산 시간을 줄이며, 제품에 양호한 거시적 특성을 제공할 수 있다는 점 등의 장점으로 인해 전통적인 방법에 비해 매우 유망한 제조 공정이다. 따라서 SLS는 우주 항공, 의료 및 임플란트 제조와 같은 많은 분야에 적용되어 왔다. [1]

오스테나이트 계 스테인리스강은 일반 탄소강에 비하여 우수한 내식성, 내마모성 및 기계적 특성으로 주조재나 판재로 많이 사용되어 왔다. 그러나 오스테나이트 스테인리스강은 탄소강에 비하여 가공성이 열악하여 정형제조가 가능한 압축 소결법에 의한 2차원 형상의 부품으로 응용이 되어 왔으며, 고 밀도 및 3차원 형상 제품의 경우 PIM에 의한 제품의 응용이 확대되고 있다. 이 중 STS316L이 가장 많이 사용되고 있으나 기계적인 강도를 요하는 부품보다는 복잡형상을 갖는 내식성 부품에 많이 응용되고 있다. 동(Cu, Copper)은 다른 금속을 함유한 합금상태로서만 아니라 합금되지 않은 상태로도 광범위하게 사용되고 있으므로, 공업적으로 Al과 더불어 비철금속재료 중 가장 중요한 금속중의 하나이다. 합금되지 않은 형태로 전기공업의 기본재료가 되 게끔 특출한 여러 성질을 가지고 있다. 그 중 몇 가지 성질을 보면 전기전도도와 내식성이 우수하며, 가공성이 좋고, 인장강도도 적당히 높고 어닐링 성질을 조절할 수 있다.

이 두 개의 재료는 고용되지 않는 불용성을 가지고 있기 때문에 서로 섞이지 않는 복합 분말을 이용하여 3D프린팅을 하였을 때 어떠한 결과가 나타날지 관찰하기 위함이다.

임의형상제조시스템에는 수많은 공정변수가 있으며 공정변수에 따라 최종 출력제품의 형상과 밀도가 결정된다. 현재 사용되는 대부분의 3차원 형상을 제조하는 기술은 레이저 출력량, 레이저 스피드, Hatch spot, 분말의 형상, 분말의 크기, 적층두께, 레이저 직경 등의 변수를 포함하고 있으며, 이들의 상관관계에 대한 연구가 진행 중이다. STS316L-Cu와 Cu-Al₂O₃ 두 가지 재료를 사용하여 실험을 진행하였고, 기본적으로 레이저의 패턴은 STS316L-Cu에서는 Offset-filling, Meander로 2가지 패턴을 Cu-Al₂O₃에서는 Meander(90°rotation)와 Meander(69°rotation)설정하여 진행하였고, 레이저 출력량(180W, 130W, 120W, 100W), 레이저 속도(600mm/s, 700mm/s, 800mm/s, 1000mm/s, 1400mm/s) 패턴과 레이저 속도, 레이저 출력량의 영향에 따라 밀도의 변화와 미세조직의 변화 그리고 기계적 특성평가를 진행 하였다.

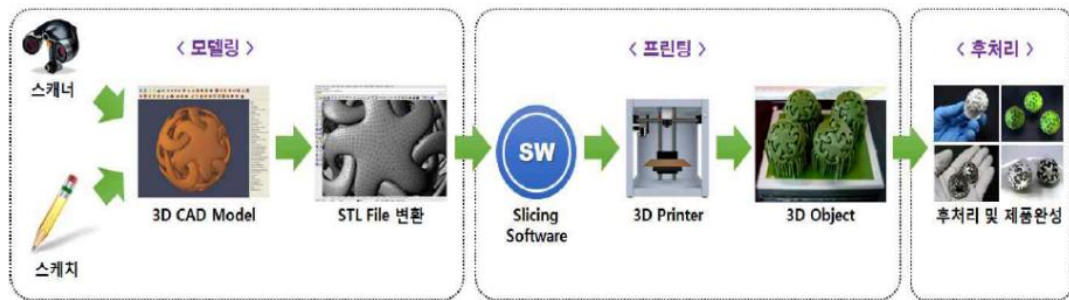


Fig 1. Process of 3D Printing

2. 이론적 배경

2.1.2 3D프린팅 기술

3D 프린팅 기술은 재료의 종류와 적층하는 방식 및 에너지 소스 등에 따라 다양한 기술유형이 존재한다. 특히 ASTM에서는 광중합 (Vat Photopolymerization), 재료분사 (Material Jetting), 재료압출 (Material Extrusion), 분말적층용융 (Powder Bed Fusion), 접착제분사 (Binder Jetting), 고에너지직접조사 (Directed Energy Deposition), 판재적층 (Sheet lamination)의 7가지 방식으로 나누고 있으며 각각의 방식에서 에너지 소스에 따라 여러 기술들을 분류하고 있다.[8] 이 중 대표적인 3D 프린팅 기술에 관한 내용을 다음에 나열하였다.[9-12]

○ Fused Deposition Modeling (FDM)

가는 실(필라멘트) 형태의 열가소성 물질을 노즐 안에서 녹여 얇은 필름 형태로 출력하여 적층하는 방식이다. 노즐은 플라스틱을 녹일 수 있을 정도의 고열을 발산하며 플라스틱은 상온에서 결화한다. FDM은 타 방식에 비해 장치의 구조와 프로그램이 간단하기 때문에 장비 가격과 유지보수 비용이 낮으며 오픈소스 형태로 개발되어 3D 프린팅 기술의 대중화를 주도하고 있다. 다양한 소재 적용이 가능하며 단순한 구조로 인해 대형화에 용이하고 다양한 산업 분야에 적용 가능하다. 하지만 굵은 선들을 쌓아 올리는 방식이다 보니 표면조도가 비교적 뒤떨어져 세부 형상 구현이 미흡하다는 단점이 있다. 또한 제작 속도가 느리며 경화 시 소재의 흘러내림을 방지하기 위한 서포터가 필요하여 산업용으로 쓰이기 보다는 개인용 혹은 가정용으로 활용이 국한되어 있다. 다만 리니어 모션 컨트롤의 정밀도에 따라 표면 조도의 개선은 가능하다.[10]

○ Multi Jetting Modeling (MJM)

프린터 헤드에서 광경화성 수지와 왁스 (Wax)를 동시 분사 후, UV Light로 고형화하는 방식으로 적층하는 시스템이다. 광경화성 수지는 해당 타입의 재료이며, 왁스는 지지대로 사용된다. MJM의 장점으로서는 정밀도가 가장 높은 기술로 뛰어난 곡선 처리와 우수한 표면 조도로 후처리가 필요 없으며 광경화성 수지의 특성 때문에 투명한 조형물을 제작 가능하다. 하지만 출력물의 강도가 약한 편이며 65°C 이상의 온도에서는 변형이 발생할 수 있다.[12]

○ Polyjet

광경화와 잉크젯 방식의 혼합 프린트 헤드의 수 백개의 미세 노즐에서 재료를 분사함과 동시에 자외선으로 경화시키는 방식으로 최초 이스라엘의 Objet사에서 개발되었으며 현재는 Stratasys사에서 생산 중에 있다. Polyjet은 조형물의 품질이 매우 좋으며

제거가 어려웠던 서포터를 워터젯 방식으로 녹여서 제거가 가능하다. 또한 재료 신축성 조절이 가능하여 다양한 조형물의 산출이 가능하다는 장점이 있다. 다만 가격적인 측면에서는 비용이 높은 편이다.[11]

○ Binder 3DP

노즐에서 액체 상태의 컬러 잉크와 경화물질을 분말원료에 분사하여 적층하는 방식으로 컬러 잉크를 사용할 수 있어서 조형물에 다양한 색감을 입힐 수 있다는 특징이 있다. 제조 시간은 비교적 짧은 편이나 출력 후 별도의 분말 제거와 표면처리가 필요하여 후 공정 작업 시간이 소요된다.[12]

○ Stereo Lithography Apparatus (SLA)

액체 광경화성 수지가 담긴 수조 안에 저전력, 고밀도 UV 레이저를 투사하여 경화시켜 적층하는 방식으로 조형판 위에 서포터를 조성하고 조형하고자 하는 모델의 아랫부분부터 경화, 적층한다. 1단계 적층이 완성될 때마다 조형 모델을 아래로 조금씩 하강시키며 수평을 유지하고 리코터 (Recoater)의 수평 날을 이용하여 수지의 표면 평탄화와 재료 코팅 처리를 한다. 레이저를 사용하여 정밀도가 높으며 표면 조도가 우수하고 조형 속도도 빠른 편이어서 가장 널리 쓰이는 방식이다. 하지만 SLA 역시 강도가 약하며 60°C 이상의 온도에서 변형이 발생할 수 있으며 출력 후 서포터 제거 작업이 필요하다. 또한 사용 가능한 원료와 색상이 제한적이라는 단점이 있다.[10]

○ Digital Light Processing (DLP)

액체 상태의 광경화성 수지에 조형하고자 하는 모양의 빛을 DLP에 투사하여 적층하는 방식으로 프로젝터에서 나온 이미지를 마스크 단위(2차원)로 투사하게 된다. 때문에 서포터와 같은 별도의 부재료 없이도 출력이 가능하며 표면조도가 우수하고 소음 발생이 적다. 또한 사진과 같은 면 단위 조형방식이기 때문에 작업속도가 균일하며 비교적 빠른 조형 속도를 보인다. 하지만 조형물의 사이즈가 작고 DLP 전용 수지 재료를 필요로 하기 때문에 원료 선택이 제한적이다.[11]

○ Selective Laser Sintering (SLS)

베드에 도포된 분말 (Powder)에 선택적으로 레이저를 조사, 소결하고 분말을 도포하는 공정을 반복하여 적층하는 방식으로 소결되지 않은 주변의 원재료 분말이 서포터 역할을 동시에 하기 때문에 따로 서포터 제작이 필요 없으며, 조형 속도가 빠르고 다양한 응용 분야 및 활용 가능 재료가 광범위하기 때문에 재료 강도 고려 시 파급효과가 클 것으로 예상된다. 하지만 레이저와 같은 고가의 부품이 사용되며 금속 재료 활용 시 후표면 처리 공정이 필요하고 사용 재료에 따라 가열 온도와 레이저 변수를 조절해야하기 때문에 셋터 작업이 어려운 단점이 있다.[9]

○ Selective Heat Sintering (SHS)

Thermal Printer Head를 이용하여 챔버 (Chamber)에 얇게 도포된 파우더를 녹여 경화시키는 방식으로 적층한다. SLS 방식과 유사하나 레이저 대신 Thermal printer head를 사용하는 것이 차이점이다. SHS는 복잡하거나 1mm 두께의 얇은 벽과 같은 형상을 제작할 수 있으며, 다수의 제품을 동시에 출력 가능하다는 것이 특징이다. 남은 분말들은 재활용이 가능하며, SLS에 비해 비교적 저렴하다. 하지만 제작 속도가 느리며 사용 가능한 원료가 제한적이다.[12]

○ Selective Laser Melting (SLM)

도포된 금속 분말에 선택적으로 고출력 Ytterbium-Fiber 레이저를 조사하여 용융시켜 적층하는 방식으로 리코터를 이용하여 금속 분말 표면 평탄화 작업을 진행하고 금속 분말이 용융되는 동안 상화 방지를 위해 아르곤이나 질소 같은 불활성 가스를 챔버 내에 공급한다. 장점은 복잡한 형상의 금속 제품 생산에 용이하며 순수 금속 재질의 제품 제작이 가능하다. 또한 열처리에 있어서 후공정이 필요 없다. 하지만 정밀도와 표면 조도가 다소 미흡하며 재질 특성상 후처리가 제한적이고 금속을 가공하는 레이저 장비이기 때문에 SLS방식 보다 가격이 조금 높다.[9]

○ Electron Beam Melting (EBM)

고진공 상태에서 전자 빔을 활용하여 금속 분말을 용해하는 방식으로 적층하는 공정이다. 고진공 상태에서 작업이 이뤄지다 보니 조형물의 공극률이 낮고 밀도가 높아 강도가 매우 우수하며 티타늄과 같은 산소와 반응성이 높은 재료를 사용하는데 적합하다. SLM, DMLS와 같이 기계적 성질 확보를 위한 추가 열처리 공정이 불필요하며 순수 금속 재질의 제품 제작이 가능하고 제작 속도가 빠르며 고진공, 고온 제작 공정으로 출력물의 잔류응력을 최소화 할 수 있다. 하지만 전자빔 및 진공 챔버 등 고가의 부품이 사용된다.[10]

○ Direct Metal Deposition (DMD)

고출력의 레이저 빔을 이용하여 금속 분말을 녹여 붙이는 방식으로 적층한다. 먼저 서포터 역할을 하는 금속 표면에 고출력 레이저 빔을 조사하여 일시적으로 용융 풀 (Melting pool)을 생성하고, 여기에 금속 분말을 공급하여 클래딩 층을 형성하게 된다. ASTM International에서 기술적으로 가장 앞선 공정으로 평가 받고 있으며, 사용 재료의 제한 없이 일반산업용 금속 분말 사용이 가능하다. 레이저 빔을 이용한 금속의 완전 용융과 응고로 인해 뛰어난 제품 강성을 보이지만 표면 조도가 미흡하며 단가가 높은 편이다.[11]

○ Electron Beam Freeform Fabrication (EBF)

무중력 환경에서 사용할 수 있는 시스템 개발을 목적으로 NASA의 Langley Research Center에서 연구 개발을 주도하였다. 와이어 (Wire)형태의 원료에 전자빔을 조사하여 경화시켜 적층하는 방식으로 이뤄진다. 진공상태에서 작동이 가능한 원리로 설계되어 무중력 환경에서 사용하기 적합하지만 진공 챔버의 크기 및 사용 가능한 와이어 원료의 양이 제한적이기 때문에 소형의 조형기만 제조가 가능하다.[12]

○ Laminated Object Manufacturing (LOM)

모델의 단면 형상대로 절단된 점착성 종이, 플라스틱, 금속 라미네이트 층 등을 접착제로 접합하여 조형하는 방식이다. LOM을 사용하게 되면 제조 비용을 큰 폭으로 감소시킬 수 있으며 목재 재질의 조형물과 대형 제품 제작이 가능하다. 하지만 내구성이 약하며 정밀도 및 표면조도가 미흡하고 색상 재료, 투명 재질, 유연성 재료의 선택이 불가능 하다.[10]

Table 1. Processes of the 3D printer ASTM F42 [8]

Categories	Technologies	Materials	Power source
Material Extrusion	Fused Deposition Modeling (FDM)	Thermoplastics/ Ceramic slurries/ Metal pastes	Thermal Energy
	Contour Crafting		
Powder Bed Fusion	Selective Laser Sintering (SLS)	Polyamides/ Polymer	High-powered Laser Beam
	Direct Metal Laser Sintering (DMLS)	Atomized metal powder/ Ceramic powder	
	Selective Laser Melting (SLM)		
	Electron Beam Melting (EBM)		Electron Beam
Vat Photo polymerization	Stereo Lithography Apparatus (SLA)	Photopolymer/ Ceramics	Ultraviolet Laser
Material Jetting	Polyjet/ Inkjet Printing	Photopolymer/ Wax	Thermal Energy/ Photocuring
Binder Jetting	3D Dimensional Printing (3DP)/ Inkjet Printing	Polymer powder/ Ceramic powder/ Metal powder	Thermal Energy
Sheet Lamination	Laminated Object Manufacturing (LOM)	Plastic film/ Metallic sheet/ Ceramic tape	Laser Beam
Directed Energy Deposition	Laser Engineered Net Shaping (LENS)/ Electronic Beam Welding (EBW)	Molten metal powder	Laser Beam

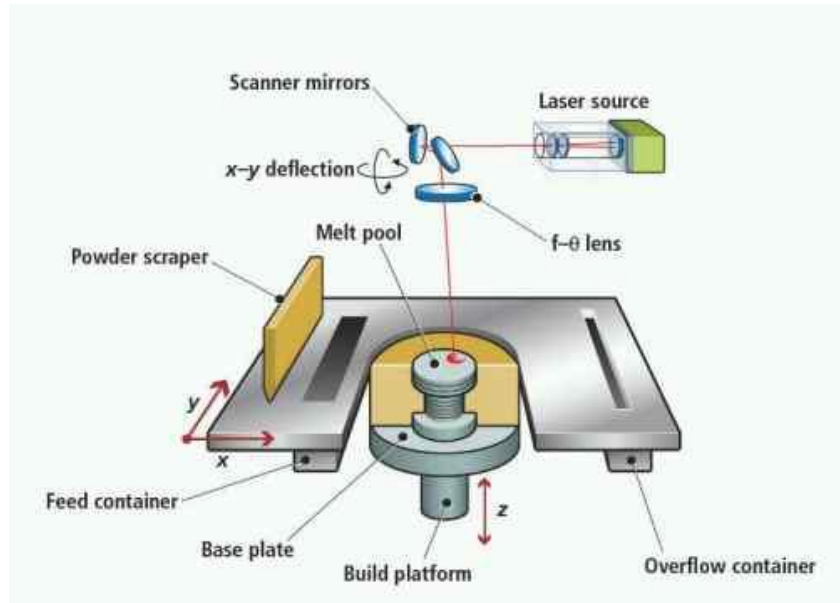


Fig 2. Schematic diagram of Selective Laser Melting [12]

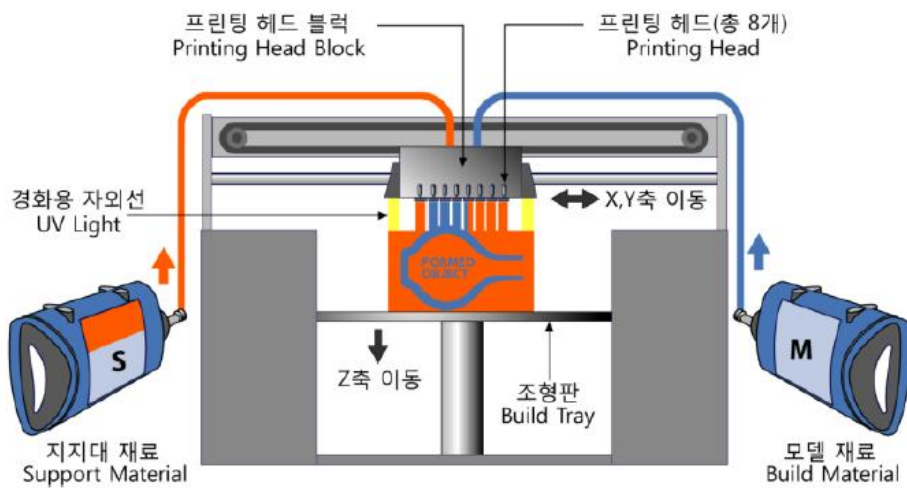


Fig 3. Schematic diagram of Polyjet [14]

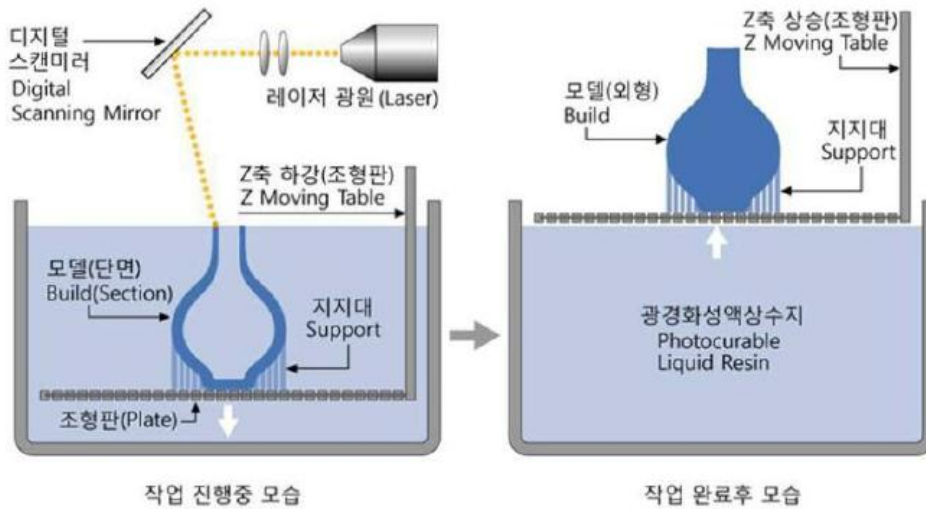


Fig 4. Schematic diagram of Stereo Lithography Apparatus [14]

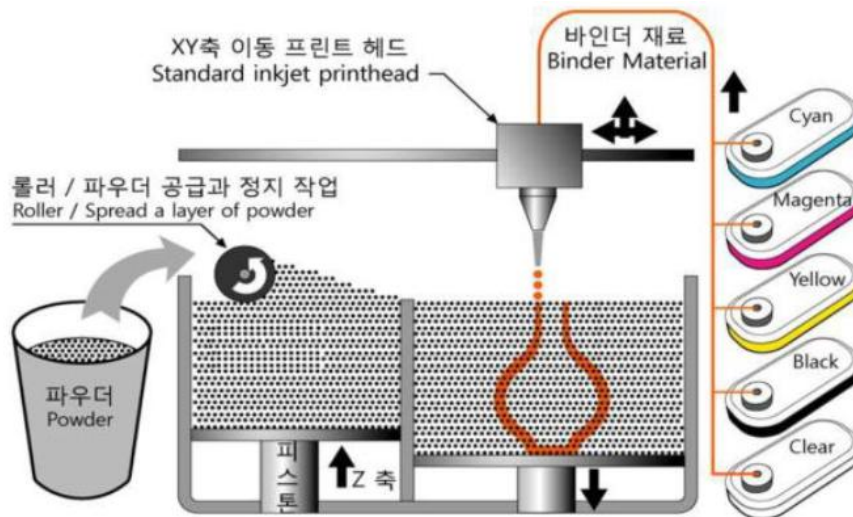


Fig 5. Schematic diagram of 3D Dimensional Printing [14]

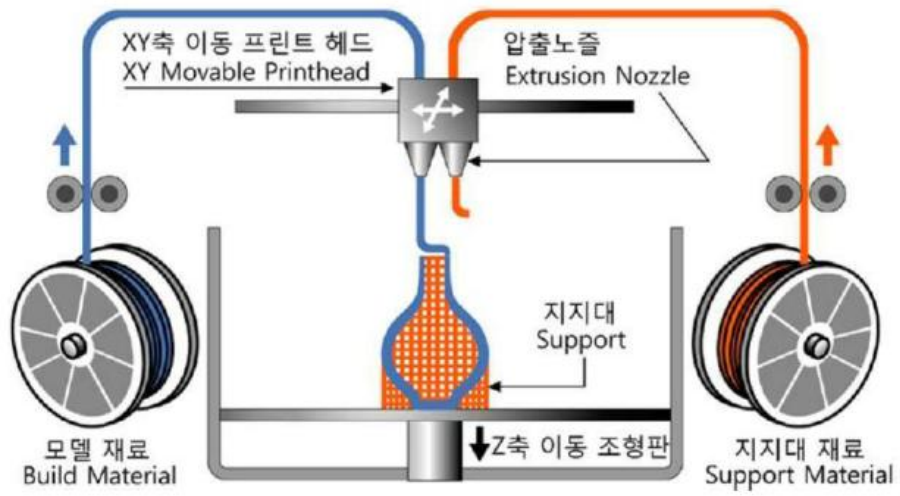


Fig 6. Schematic diagram of Fused Deposition Modeling [14]

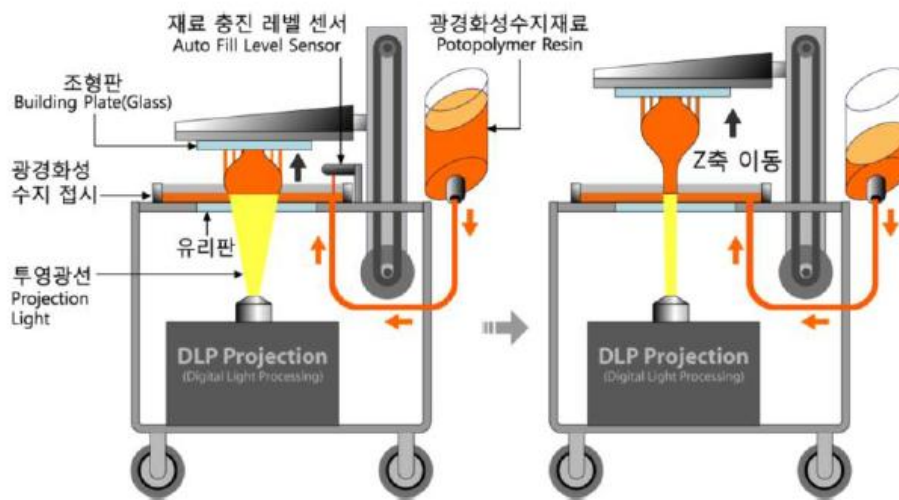


Fig 7. Schematic diagram of Digital Light Processing [14]

2.2. 레이저

레이저 (Laser; Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (유도 방사에 의한 광의 증폭기))란 전자 빔과 같은 정도의 매우 강력한 에너지를 갖는 광선이다. 이 레이저 빔은 Energy density가 대단히 높다. 열원으로서 이용되는 레이저에는 고체 레이저 (루비, Nd 글라스, Nd-YAG)와 기체 레이저 (탄산가스 등)가 있다. 고체 레이저는 주로 펄스발생 형식이며 효율은 수% 이하로 낮으나 탄산가스 레이저는 전자빔에 필적하는 출력의 연속발진이 가능하며 효율도 10~20% 높아 일반적인 작업에는 이 형식이 주목되고 있다. 위에서도 언급한 바와 같이 레이저 빔은 고 Energy density의 집중열원이기 때문에 재료에 주는 열 영향이 작고 열변형도 작다. 이 때문에 정밀한 공정에 이용된다. 소결작업은 대기 중에서도 행할 수 있고 또한 레이저 발생장치로부터 상당히 떨어진 장소에까지 빔을 간단히 유도할 수 있으므로 조작성이 매우 좋다. 또한 빔의 방향제어도 거울에 의해 간단히 조절될 수 있는 이점을 갖고 있다. 더욱이 전자 빔 소결에서 나타나는 가공에 따른 X선의 발생도 없다. 또한 비금속이 가공이 될 수 있다는 특징이 있다. 유일한 결점은 에너지의 변환효율이 낮다는 점이다.[15]

2.2.1 이터븀 레이저

광섬유 코어에 첨가하는 희토류 원소는 파장에 따라 여러 가지가 있지만 가장 많이 사용되는 원소는 Nd, Yb, Er 등이 있다. 1962 년 Yb³⁺ 이 첨가된 유리에서 레이저 발진을 성공한 이후 Yb은 현재까지 많이 사용되는 레이저 활성 이온이며 특히, 고출력 광섬유 레이저에 적합하고 가장 각광받고 있는 원소이다.[16] Yb은 3준위계 또는 준 3-준위계이지만 4 준위계의 장점을 가지고 있는 Nd 보다 많은 이점을 가지고 있다. Fig 8은 Yb 의 에너지 준위 구조를 나타낸다. Fig 8에서 보이는 것처럼 Yb 은 흡수 파장과 발진 파장의 차이가 크지 않아 양자 결합 효율이 높고 에너지 준위 구조가 두 개의 manifold 로 구성되어 있어 구조가 매우 간단하다. 따라서 높은 에너지 준위에 있는 원자가 펌프 레이저 또는 시그널 레이저를 흡수하여 더 높은 에너지 준위로 천이하는 excited-state absorption (ESA)현상이 없다. ESA 는 레이저의 효율 저하의 원인 중 하나이다. 또한 두 에너지 준위 $^2F_{5/2}$, $^2F_{7/2}$ 사이의 간격이 커서 silica 와 같이 높은 포논 에너지를 가지는 호스트 매질에서도 다중 포논에 의한 비방사 천이와 농도 소강이 제한된다. 이와 같은 특징으로 Yb 첨가 레이저는 펌프 레이저 파장과 시그널 레이저 파장의 비율인 양자 결합 효율에 근접한 높은 효율을 가지며 이러한 펌프 레이저 파장과 시그널 레이저 파장의 차이의 에너지는 호스트 물질에서 열로 방출되는데 Yb:YAG 가 Nd:YAG 에 비해 약 3 배가량 작다. 따라서 열 문제에 있어 Nd 보다 Yb 이 훨씬 좋은 특성을 가지고 있다.

Fig 8는 germanosilicate 호스트 물질에 첨가된 Yb 의 흡수와 방출 단면적을 보여 준다. Yb 은 흡수와 방출 대역이 상당히 넓다 [17]. 따라서 펌프 레이저의 파장 선택에 있어서 크게 영향 받지 않으며 Yb 광섬유 레이저의 경우 긴 길이에 걸쳐 흡수가

일어나므로 비교적 흡수 단면적이 작은 800nm 나 1000 nm 파장의 펄스 레이저를 사용하여도 펄핑이 가능하다는 장점이 있다. 마찬가지로 방출 대역도 넓어서 fiber Bragg grating 과 같은 파장 조절 20 소자를 사용하여 시그널 레이저의 파장을 975 nm 에서 1200 nm 까지 선택할 수 있다.[16]

2.2.2 레이저 빔 크기와 에너지 분포

레이저소결 공정으로 제작된 부품의 치수 정밀도에 영향을 미치는 인자는 여러 가지가 있지만 그 중에서 레이저 광의 사이즈는 매우 중요한 역할을 한다. 도포된 폴리머 분말 층에 레이저 광이 주사되어 소결이 일어나는 경우에 레이저 광의 사이즈와 소결된 선폭이 일치하지 않는다. 그 이유는 레이저 광의 에너지 분포가 Fig 10.에서 보는 바와 같이 Gaussian 형태이기 때문이다.

즉 레이저 광의 에너지가 광의 반지름 방향으로 비선형 변화를 보이기 때문에 소결이 일어나기 시작하는 임계 에너지 값이 존재하게 된다. 이때의 레이저 빔 크기를 유효 빔 사이즈(d_{eff} , Effective beam spot size)라. 정의하고, 유효 빔 사이즈는 레이저 출력, 분말 재료의 물성치, 레이저 광의 흡수율, 분말 층의 겉보기 밀도(apparent density), 분말 입자의 분포 등에 의해 결정되고, 치수, 정밀도, 소결 속도 등에 밀접한 관계를 가지게 된다. 따라서 SLS 공정을 위한 광학계 설계 시, 레이저빔의 사이즈는 항상 균일하게 유지되어야 한다. 일반적인 SLS공정에 많이 사용되고 있는 f-theta렌즈는 레이저광을 이용하여 문자 또는 이미지를 읽거나 쓰기 위한 목적으로 각인(Engraving), 이미지 전사(Image transfer), 재료 가공(Materials processing)등에 주로 사용되고 있다. f-theta렌즈를 이용한 스캐닝 방법은 Fig 11과 같이 레이저 광의 집속은 대물렌즈(Objective lens)를 레이저광의 편향은 2축의 반사경을 가진 갈바 미러(Galvano mirror)를 이용한다.

일반적으로 렌즈는 피사체(Object)와 기하학적으로 유사한 이미지를 얻기 위해서 왜곡수차(distortion)가 없도록 만들어야 하고, 이미지의 높이 y' 이 피사체의 높이에 비례하여 피사체각도 θ 에 대해 $y' = f \times \tan\theta$ 의 관계가 성립해야한다. 만약 f-theta렌즈가 $y' = f \times \theta$ 의 관계식을 만족하기 위해서는 술통 형(barrel-shaped) 왜곡수차를 가져야 하는데 f-theta렌즈는 이러한 조건을 만족시킬 수 없고 레이저주사면적이 커질수록 레이저빔의 사이즈가 커져 제작된 형상의 치수정밀도를 얻기 어려워진다. 때문에 f-theta렌즈는 주로 레이저 마킹(marking)에 응용되고 있으며 주사면적도 50mm×50mm 이하에서 주로 사용되고 있다.

3축 다이내믹 포커싱 스캐너(3-axis dynamic focusing scanner)의 경우에 f-theta 렌즈를 사용할 경우와 마찬가지로 2축의 갈바 미러를 사용하고 Fig12과 같이 추가적으로 갈바 미러앞에 레이저빔의 사이즈를 조절하기 위한 직선 운동을 하는 다이내믹 포커싱렌즈(Dynamic focusing lens)가 사용된다. 레이저광의 주사 시, 직선 이송렌즈가 대물렌즈(objective lens)와 동축상에서 전후로 이송하면서 초점거리를 조절하게 되므로 초점거리(f)가 고정되기 때문에 초점의 궤적이 3차원 곡면이 된다. 또한 레이

저광이 주사되는 위치에 따라 이 렌즈를 앞뒤로 이송시켜 주면 2차원평면에 항상 레이저광의 초점이 위치하게 된다. 3축 다이나믹 포커싱 스캐너는 f-theta 렌즈를 이용한 스캐너에 비해 구동축이 하나 많기 때문에 주사 속도가 상대적으로 느리다. 반면 넓은 면적에 걸쳐 레이저광을 주사하는 경우에 f-theta 렌즈는 주사면적의 크기에 따라 렌즈의 크기가 커져야 하므로 렌즈 가공이 어려운 문제점이 있지만 3축 다이나믹 포커싱 스캐너를 쓰는 경우에는 초점거리가 길어 질 경우에도 다이나믹 포커싱 스캐너를 이용하면 넓은 주사면적에서도 레이저빔의 사이즈를 정밀하게 제어할 수 있다.[19]

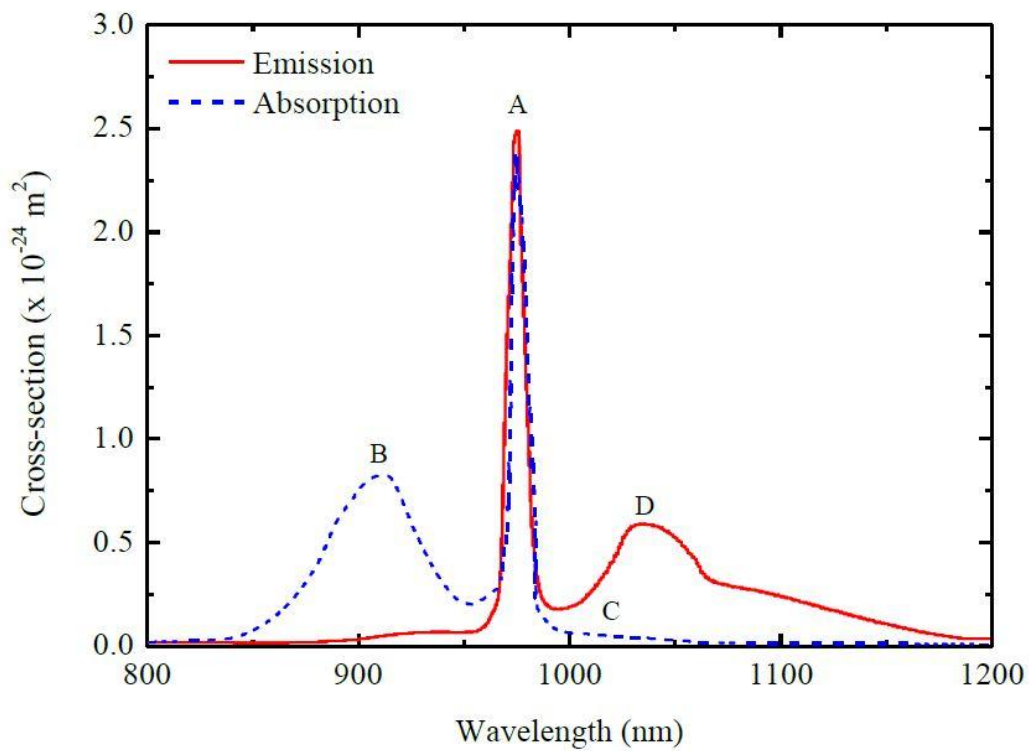


Fig 8. Cross section of germanosilicate ytterbium's emission and absorption[16]

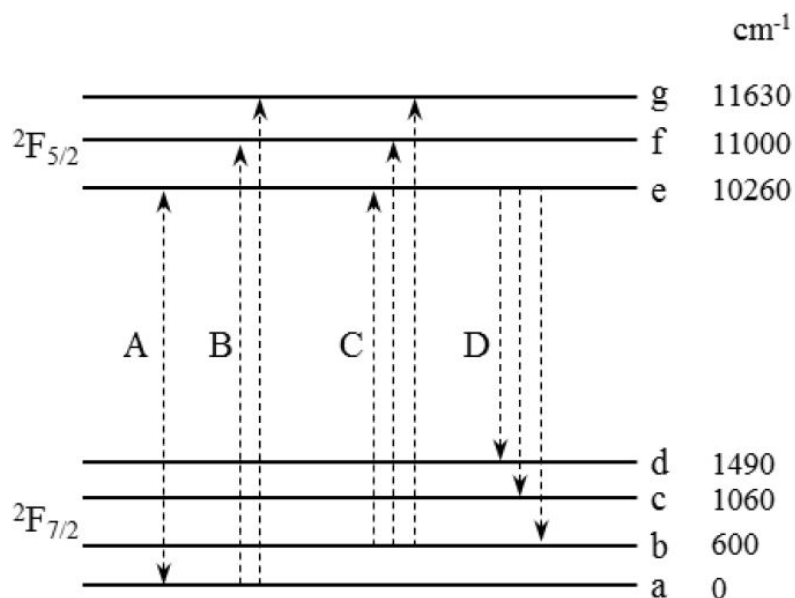


Fig 9. Energy level of the Ytterbium[16]

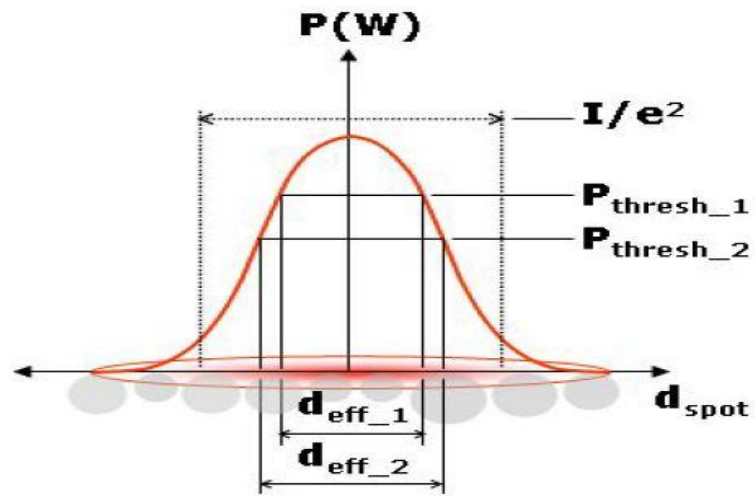


Fig 10. Effective beam spot size[18]

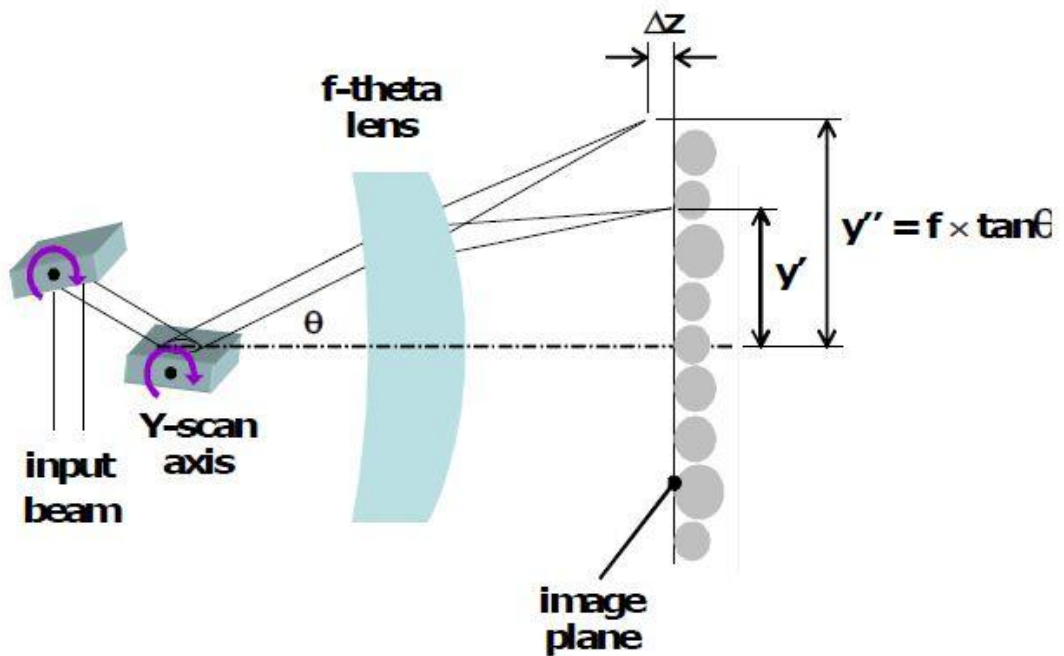


Fig 11. Schematic diagram of f-theta lens[18]

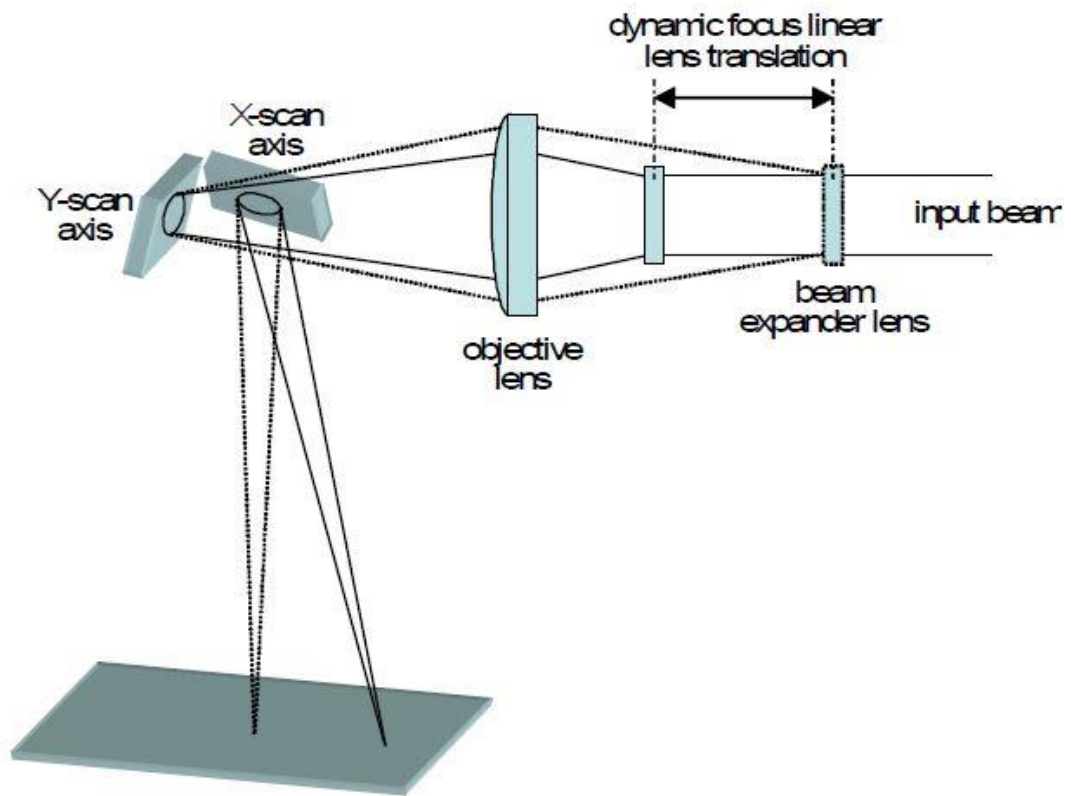


Fig 12. Schematic diagram of 3-axis dynamic scanner[18]

2.3. 스테인리스 스틸 (Stainless Steel : STS)

스테인리스강은 대표적인 공업재료로 크롬(Cr), 니켈(Ni), 몰리브덴(Mo) 등의 합금원소를 첨가하여 내식성을 증가시킨 강이다. Cr은 내부의 금속을 부식으로부터 보호하는 표면산화피막을 형성하여 철의 표면을 부동태화(passive)하여 강의 내식성을 높인다. Ni은 원자재 가격이 고가이나 중성 또는 약산성 매체에서의 내식성이 향상되며, 열처리단계에서 오스테나이트 조직(FCC)이 상온까지 잔류되게 할 수 있어 연성과 성형성이 향상된다. Mo은 Cr이온이 존재하는 곳에서의 내식성을 증가시킨다. 일부 스테인리스강의 경우 Al을 첨가하는데 이는 고온 내산화성을 향상시킨다. 이러한 스테인리스강은 조직의 조성차이에 기초를 두고 오스테나이트, 페라이트, 마르텐사이트 3종류로 분류한다.[20] Table 2는 각각 스테인리스강의 비교한 것이다.

페라이트 스테인리스강

11~30% Cr, 0.12% C 이하의 조성을 가진다. 다른 합금원소도 내식성 또는 절삭성 같은 특수한 성질을 향상시키기 위하여 비교적 적은 양을 첨가한다. 페라이트 스테인리스강은 탄소함량이 적기 때문에 일반적으로 오스테나이트-페라이트변태가 일어나지 않으며 따라서 열처리를 할 수 없다고 생각되나, 많은 페라이트스테인리스강에는 소량의 탄소가 함유되어 있어 이것이 강을 높은 온도에서 퀴칭할 때, 어느 정도의 경화를 일으킨다. 따라서 C 및 N의 함량을 극도로 낮게 유지하여 좋은 용접성, 연성 및 내식성을 가지게 한다.

마르텐사이트 스테인리스강

12~17%Cr, 0.1~1% C의 조성을 가진다. 보통 탄소강의 경우와 같이 열처리에 의해서 마르텐사이트를 만들어 경화시킬 수 있다. C 함량이 약 1%이므로 적당한 열처리 시대단히 높은 경도를 얻을 수 있다. 다른 합금원소도 내식성, 강도 및 인성을 향상시키기 위하여 소량을 첨가한다.

오스테나이트 스테인리스강

6~22%Ni을 함유하는 Fe-Cr-Ni 3원 합금이다. 페라이트 스테인리스강과 같이 이 강은 열처리에 의하여 경화시킬 수 없으나, 보통 상온에서도 오스테나이트 조직이 남아 있어 더욱 연성이 크며 일반적으로 페라이트 스테인리스강을 특별히 열처리 하거나 또는 화학조성을 개선시키는 경우가 많다.

Table 2. Classification of the Stainless Steel

구 분		기존조직		
		오스테나이트	마르텐사이트	페라이트
대표강종		STS304	STS410	STS430
대표성분		18%Cr-8%Ni	18%Cr	13%Cr
열처리		고용화 열처리	풀림 후 급냉	풀림
경화성		가공경화	급냉 경화	비 급냉 경화
품 질 특 성	내식성	높음	보통	높음
	강도	높음	높음	보통
	가공	높음	낮음	보통
	자성	상자성	상자성	상자성
	용접성	높음	낮음	보통

2.3.1 STS 316L

오스테나이트계 스테인리스강은 일반 탄소강에 비하여 우수한 내식성, 내마모성 및 기계적 특성으로 주조재나 판재로 많이 사용되어 왔다. 그러나 오스테나이트 스테인리스강은 탄소강에 비하여 가공성이 열악하여 정형 여 제조가 가능한 압축 소결법에 의한 2차원 형상의 부품으로 응용이 되어 왔으며, 고 밀도 및 3차원 형상 제품의 경우 PIM에 의한 제품의 응용이 확대되고 있다. 이 중 STS316L이 가장 많이 사용되고 있으나 기계적인 강도를 요하는 부품보다는 복잡형상을 갖는 내식성 부품에 많이 응용되고 있다.[21-24] STS316L은 18%Cr, 12%Ni, 0.03%C, 2.0%Mo으로 이루어진 오스테나이트계 스테인리스강이다. 이 재료는 500~850°C로 사용하면 Cr 탄화물이 석출해서 입계부식이 발생하고 Cl을 포함하는 환경에서 응력부식균열을 발생하는 전형적인 316 강종으로 결점을 보완하기 위해 몰리브덴(Mo)을 2~3% 함유하여 내식성, 특히 공식저항성과 고온강도가 특히 우수하다. 316L 스테인리스강은 몰리브덴첨가로 내공식성을 크게 향상시켜 해안지방이나 화학 플랜트등 부식저항성이 크게 요구되는 용도에 많이 사용된다. 저탄소의 316L스테인리스강은 용접열영향부의 입계부식에 대한 저항성도 뛰어나 내입계부식성 또한 우수하다.[25]

2.4 Cu

동(Cu, Copper)은 다른 금속을 함유한 합금상태로서만 아니라 합금되지 않은 상태로도 광범위하게 사용되고 있으므로, 공업적으로 Al과 더불어 비철금속재료 중 가장 중요한 금속종의 하나이다. 합금되지 않은 형태로 전기공업의 기본재료가 되게끔 특출한 여러 성질을 가지고 있다.

그 중 몇 가지 성질을 보면 전기전도도와 내식성이 우수하며, 가공성이 좋고, 인장강도도 적당히 높고 어닐링 성질을 조절할 수 있다. 그러나 다른 금속을 첨가하여 만든 수많은 종류의 청동 및 황동도 우수한 성질을 지니고 있어 공업적인 용도에 없어서는 안 되게끔 되었다. [27]

2.5 Al₂O₃

알루미나(Al₂O₃, alumina)는 Al과 O의 강한 이온결합으로 산화물 중에서 경도가 가장 높고 화학적으로 안정하여 산 및 알칼리에 대한 우수한 내식성과 전기절연성을 가진다. Al₂O₃는 이와 같은 우수한 물성과 고밀도 소결체의 제조가 용이하기 때문에 항공우주분야 및 자동차 부품 등의 구조재료용으로 응용이 기대되어 이에 대한 고강도화, 고인성화에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. [42-44]

2.6 Selective laser sintering 분말 소재의 변수

2.6.1 레이저 흡수율

낮은 에너지 준위와 높은 에너지 준위의 차이가 $h\nu_{21}$ 인 원자계에 주파수 ν_{21} 인 빛이 입사하게 되면 낮은 에너지 준위의 원자는 빛 에너지를 흡수하여 높은 에너지 준위로 천이하게 되는데 이러한 과정을 흡수라 한다. 흡수가 일어나면 낮은 에너지 준위의 원자 수는 감소하게 되는데 이때 감소되는 비율은 낮은 에너지 준위에 있는 원자의 수 N_1 과 입사하는 빛의 단위 주파수당 에너지 밀도에 비례하게 된다.[28]

$$\frac{\partial N_1}{\partial t} = -B_{12}\rho(\nu)N_1$$

여기서 B_{12} 는 흡수에 대한 비례 상수이며 단위는 cm^3/s^2 이다. $B_{12}\rho(\nu)$ 은 입사하는 광자에 의해 유도되는 흡수의 단위 주파수당 확률로 이해할 수 있다.

2.6.2 분말형상 및 크기

SLS를 포함한 분말을 사용하는 모든 공정에서, 분말은 최종제품의 품질과 밀도의 핵심요소이다. 분말의 형상에 관한 내용은 적층에 관한 내용으로 설명을 할 수 있다. 특히 SLS공정에서 적층두께와 표면 거칠기에 큰 영향을 준다. 분말형상은 크기와 모양에 관련이 있는데, 일반적으로 제조공정에서 큰 영향을 받는다. 예로 들어 기계적 합금화와 밀링은 불규칙한 형상의 분말을 제작할 수 있으며[30], 가스분무법은 구형의 분말을 제작 할 수 있다[31]. 구형의 분말은 유동성을 증가시키고, 유동성이 증가됨에 따라 최종 제품의 품질에 큰 영향을 준다[32]. 가스분무법으로 제조된 분말은 금속분말을 이용하는 모든 임의형상제조시스템에 넓게 사용되고 있다. 하지만 이러한 형상은 매우 제한적으로 작용을 하는데, 불규칙형상의 경우 SLS공정을 이용시, 최종제품의 기공도와 밀도에 좋지 않은 영향을 미친다.[29]

2.6.3 분말의 입도분포

충진 밀도를 높이기 위해서 입자크기 분포를 조절 하는 것이 중요하다. 2가지 다른 입자크기를 섞는 것이 한 가지 크기 입자보다 충진 밀도가 크다. 충진을 향상시키기 위한 실마리는 입자크기 비율이다. 작은 입자들은 큰 입자들을 밀어내지 않고도 큰 입자들 사이의 간극을 채운다. 연이어 더 작은 입자들은 남은 공간을 채우는데, 이렇게 하면 훨씬 향상된 충진 밀도를 갖게 된다. 기본 형태가 Fig13에 있다. 부분 밀도는 크고 작은 구형이 섞인 배합으로 나타난다. 최고 충진 배합은 작은 입자들보다 큰 입자들의 부피가 더 많다. 충진 밀도의 상대적인 향상은 큰 입자와 작은 입자들의 크

기 비율에 달려 있다. 큰 입자로 시작해서, 작은 입자들을 더해감에 따라 큰 입자들 사이에 있는 공간에 채워지면서 충전 밀도는 초기에 증가한다. SLS공정에서 재료의 레이저 흡수율에 따라 밀도에 영향을 주며, 입자의 크기분포도가 다양할수록 입자에 열에너지의 전달이 더 빠르는데, 작은 입자일수록 크기가 큰 분말로의 열전달이 더 효율적이기 때문에 분말의 분포도는 더 넓을수록 좋다.[33]

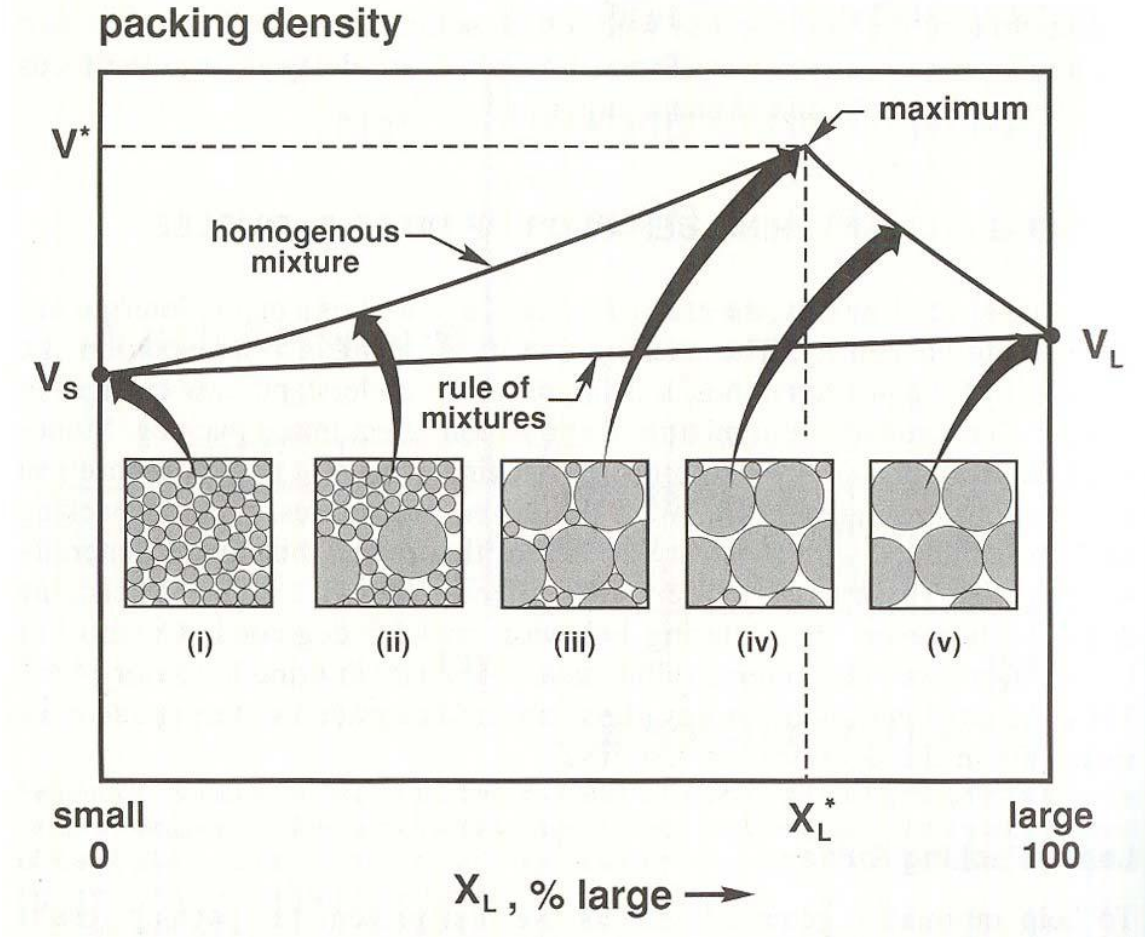


Fig 13. Density of the 2 kinds mix powder[34]

3. 실험방법

3.1 재료선정

Selective Laser Sintering은 분말의 특성에 의해 최종제품이 결정이 되며, 특히 분말의 형상은 가장 중요한 요소이다. Fig14 분말 형상과 분말 L/D비에 따른 적층밀도의 변화를 보여주며, 일반적인 금속 3D 프린터에서는 레이저 소결을 하기 전에 우선적으로 원료 금속 분말이 균일한 두께와 균일한 분포로 고밀도적층이 되어야 한다. 만약 적층의 두께와 분포가 균일하지 않는다면 고밀도의 제품을 제조할 수 없게 되고 형상오차나 조직의 불균질이 발생하게 되며, 적층되었을 때 밀도가 낮다면 저밀도의 시편이 만들어지게 된다.

또한 분말의 형상이 상당히 중요한데 Selective Laser Sintering 공정에서는 금속분말을 도포한 후에 레이저를 조사하는데, 분말도포시 분말이 균일하게 도포되지 않는다면 분말제품의 가장 중요한 기계적특성 중 하나인 충분한 밀도를 가질 수 없다.

이러한 유동도에 결정적으로 관련된 분말의 특성은 분말의 구형도라고 할 수 있다. 본 연구에서는 STS 316L로 제조된 분말과 Cu분말, Al_2O_3 분말을 선택하여 실험을 진행하였다. 분말은 LPW에서 제조한 구형분말과 TLS Technik에서 제조한 Cu 구형분말을 이용하였으며, Cu와 STS316L 분말은 평균입도 $35\mu m$ (구형), 매우 유사한 입도 크기와 형상을 가지는 분말을 사용하였고, Al_2O_3 분말은 100nm(플레이크)의 분말을 사용하였다. [Fig 21-22]

3.2 혼합

STS316L 분말과 Cu의 혼합을 진행 하였다. 금속 3D프린팅은 분말의 형상이 시편에 미치는 영향이 크기 때문에 형상이 손상되지 않는 방식으로 실험을 진행해야 하였고, 볼밀링을 사용할 수 없었고, STS316L Cu의 95:5 무게비로 볼밀링에서 볼을 제거한 방식인 단순 혼합으로 실험을 진행 하였다.

혼합된 분말은 입도에서나 형상에서나 커다란 차이가 없다는 것을 확인 할 수 있다. [Fig 22-23]

Cu 분말과 Al_2O_3 의 혼합도 마찬가지로 물을 제거한 방식으로 단순 혼합으로 실험을 진행 하였다.

3.3 적층패턴

STS316L-Cu 복합 소재의 적층패턴은 Offset-filling, Chessboard, stripe, Meander 패턴이 있지만, Chessboard, Stripe는 상대적으로 밀도가 낮게 오기 때문에 연구에 사용한 적층패턴은 총 2가지 패턴을 이용하였다. Offset-filling, Meander의 패턴을 이용하였으며 패턴의 형태는 Fig 15 나타나 있다. 적층 패턴은 레이저가 움직이는 방향에 따라 분말이 용융이 되어서 적층이 되어간다. 이 경우에는

크게 2가지 실험오차가 발생하는데, 출력물의 정밀도와 용융이 제대로 되지 않은 분말이다. 연구를 진행 시, 출력물의 오차가 발생하는 이유는 열팽창과 수축에 의한 요인으로 설명 할 수 있다. Fig 17은 Selective Laser Sintering의 공정을 간략하게 나타낸다. 레이저가 움직이면서 분말을 용융 또는 소결을 진행하는데, 이 과정에서 레이저가 움직이면서 빠른 냉각과 용융이 동시에 진행된다. 이로 인해 열팽창과 열수축이 동시에 발생을 하여 출력물의 오차에 큰 요인을 미친다. 따라서 본 실험에서는 용융의 정도와 적층패턴의 상관관계를 알기위해 2가지의 패턴을 가지고 연구를 진행하였다.

Cu-Al₂O₃의 적층패턴은 Meander(90°rotation), Meander(69°rotation) 두 개의 패턴을 이용하였다.[Fig 15-16]

Meander 패턴은 적층할 때 일반적으로 레이저 방향을 90°도 축을 회전하며 주사한다. 이것은 레이저를 적층할 때 주사지점을 중첩시키지 않고 균일하게 레이저를 통해 주사하기 위함이다. 하지만 이 방법도 결국 4번마다 결국 같은 곳을 주사하게 된다. 따라서 개발된 방법은 69°rotation 방법이다. 69°도로 회전하게 된다면 여러번 회전하더라도 중첩되는 부분이 최소화할 수 있다. 따라서 이 두 패턴을 비교하였다.

3.3 3D 프린터 장비 및 출력물 선정

본 연구에서 사용한 3D 프린터 장비는 Selective Laser Sintering 공정을 적용한 Winforsys사의 Metalsys 150제품을 이용하였다[Table 3]. 공통적으로 실험내부는 질소가스 분위기를 이용하여서 산소농도 1%, Layer 30μm, 해칭간격 70μm으로 설정하였고, 레이저 출력량 100W, 120W, 130W, 레이저 속도 700mm/s, 800mm/s, 1000mm/s, 1400mm/s 에너지 밀도44J/mm³~71J/mm³ 사이의 값을 선정하였다. 실험에서 제작한 출력물은 가로×세로×높이 1cm의 정육면체 출력물을 사용하여 미세조직과 밀도측정 하였다. [Table 5]

3.4 밀도측정

제작한 출력물의 기공도를 측정하기 위해 크기 측정법과 아르키메데스법을 이용한 밀도측정법을 이용하였으며, STS316L의 밀도 7.89g/cm³ 와 Cu 8.94g/cm³의 밀도 95:5의 혼합 분말인 혼합분말 밀도 $\frac{7.89g/cm^3 \times (0.95) + 8.94g/cm^3 \times (0.05)}{0.95 + 0.05} = 7.9366g/cm^3$ 와 비교하여 비밀도를 구하였다. 측정방법은 다음과 같이 진행하였다.

- (1) 시편의 무게를 공기 중에서 측정한다.
- (2) 아르키메데스 법을 이용하여 시편의 진부피를 측정한다.
- (3) 시편의 너비와 높이를 측정하여 시편의 겉보기 부피를 측정한다.
- (4) 실험에서 구한 각 데이터를 이용하여, 위식에서 시편의 밀도를 구한다.

3.5 미세조직 관찰

본 연구에서 사용한 STS316L+Cu의 미세조직 관찰을 위해 시편연마를 진행하였다.

연마면을 확인 할 시편은 연마기를 이용하여, 최종적으로 알루미나 0.05 μ m까지 연마하여 준비하였다. 미세조직을 관찰하기 위해 에칭을 진행 하였으며, 에칭용액은 다음과 같이 조합하여 사용하였다.

Ferric chloride (27.5g) +Copper ammonium chloride (4g) +hydrochloric acid (100ml) + distilled water (100ml)

에칭 후 미세조직을 광학현미경을 이용하여 관찰하였으며, 레이저 출력량 100W, 120W, 130W, 레이저 속도 700mm/s, 800mm/s, 1000mm/s, 1400mm/s 의 공정 변수로 진행 한 시편의 경우 각각 25, 50, 100배의 비율로 관찰하였다. 연마제나 기타 이물질 제거하기 위해, 초음파 세척기로 5분씩 5회 세척 후 수분 제거 및 산화 방지를 위해 25 $^{\circ}$ C진공분위기 건조로에서 12시간 이상 건조를 하였다.

3.6 경도 실험

출력물의 기계적 특성 중 경도를 측정하기 위해 비커스경도기를 사용하였다. 비커스 경도기의 측정방법은 사각뿔 형상의 다이아몬드 압입자를 이용하여 소결체에 하중을 가해 압흔을 만들고 대각선 길이의 평균값으로 구하는 방법이다. 사용된 규격은 KS B 0811 금속 재료의 비커스 경도 시험방법이다. 제조된 소결체를 알루미나 0.05 μ m 까지 연마하여 Vacuum Desiccator에 -76cm Hg 만큼 진공상태에서 보관하였다. 압입자의 가해진 하중은 0.05kg 압입 시간 10초, 실험 횟수는 각 10회씩이다. 측정된 경도값을 평균값, 표준편차로 나타내어 계산하였다.

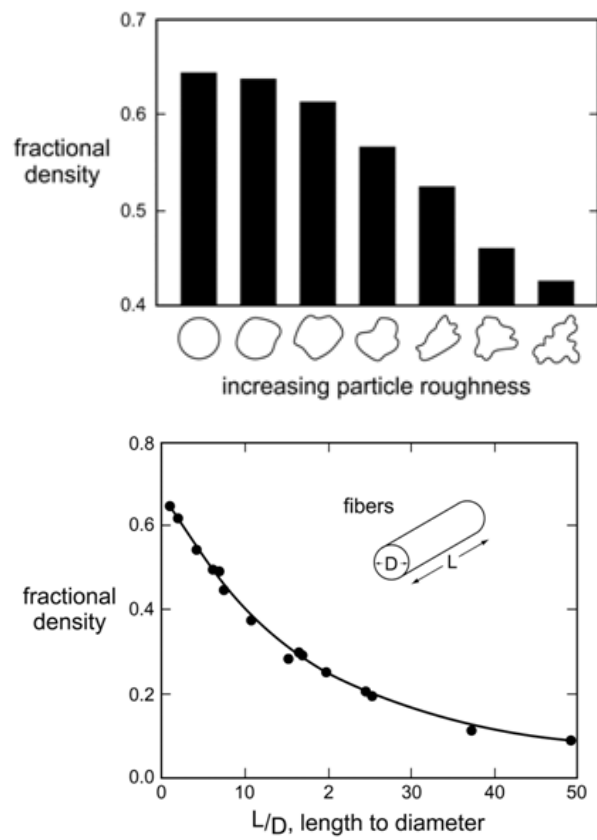
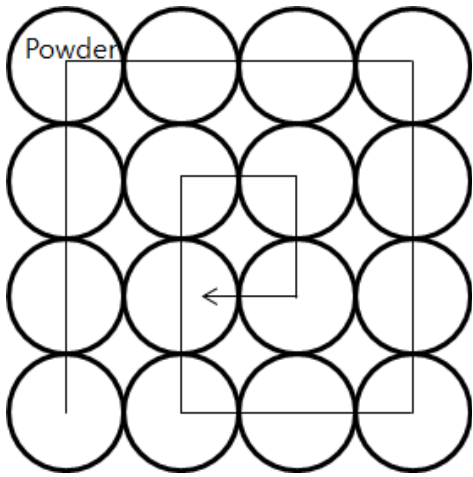
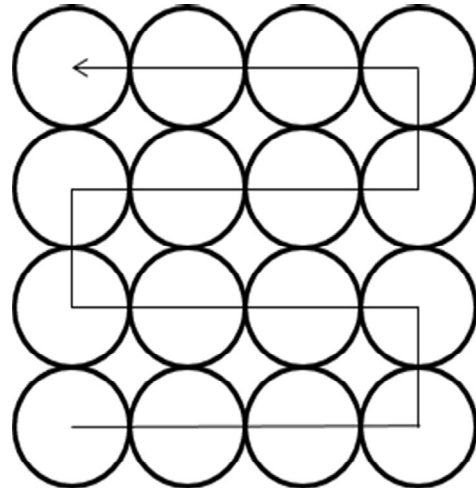


Fig 14. The fraction density with surface roughness of the powder and the stacking density according to the powder L / D ratio[34]



(a) Offset-filling



(b) Meander

Fig 15. Sketch of laser pattern of STS316L

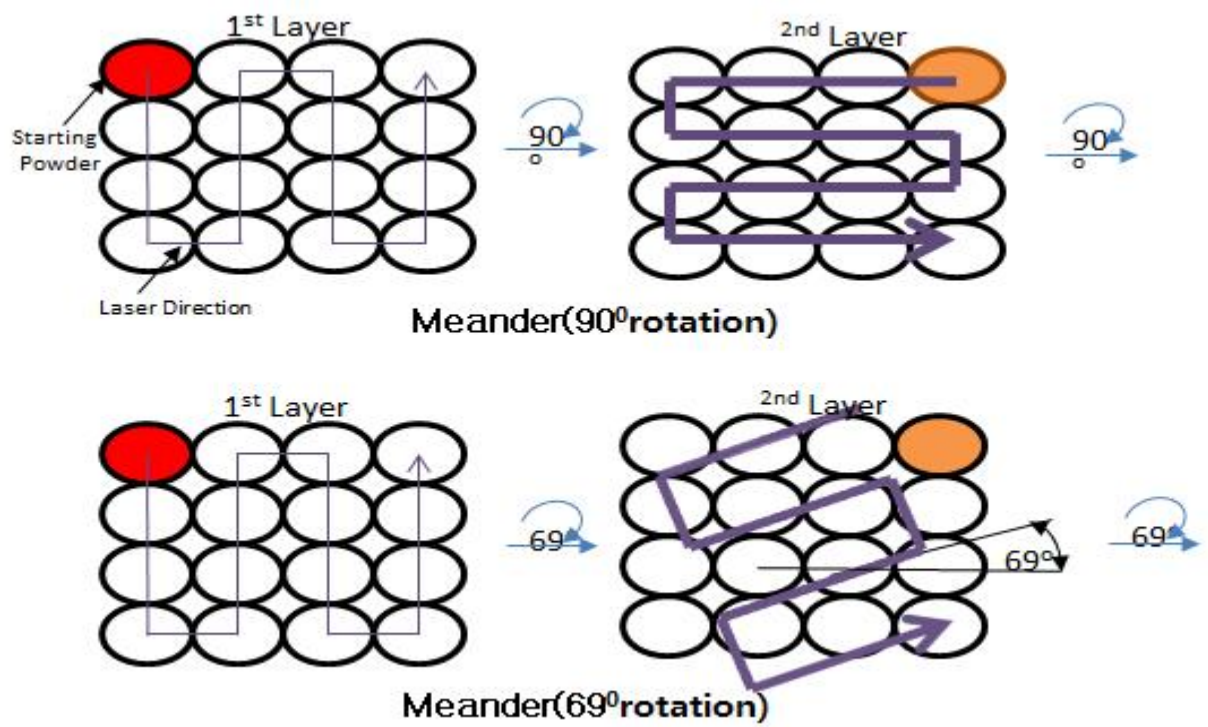


Fig 16. Sketch of laser pattern of Cu-Al₂O₃

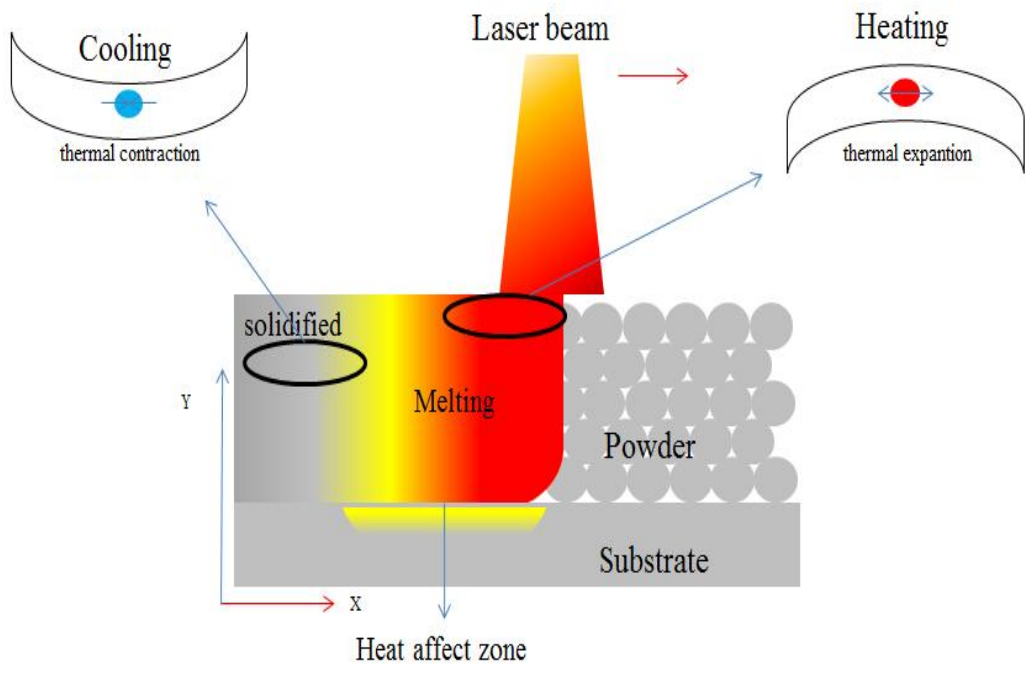
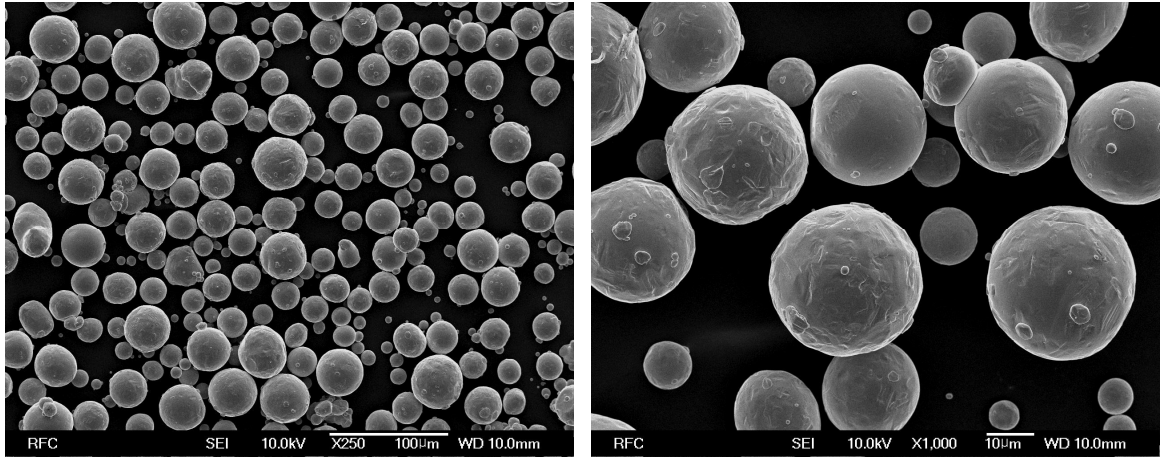


Fig 17. Selective laser sintering process principle

Table 3. Specification of SLS machine

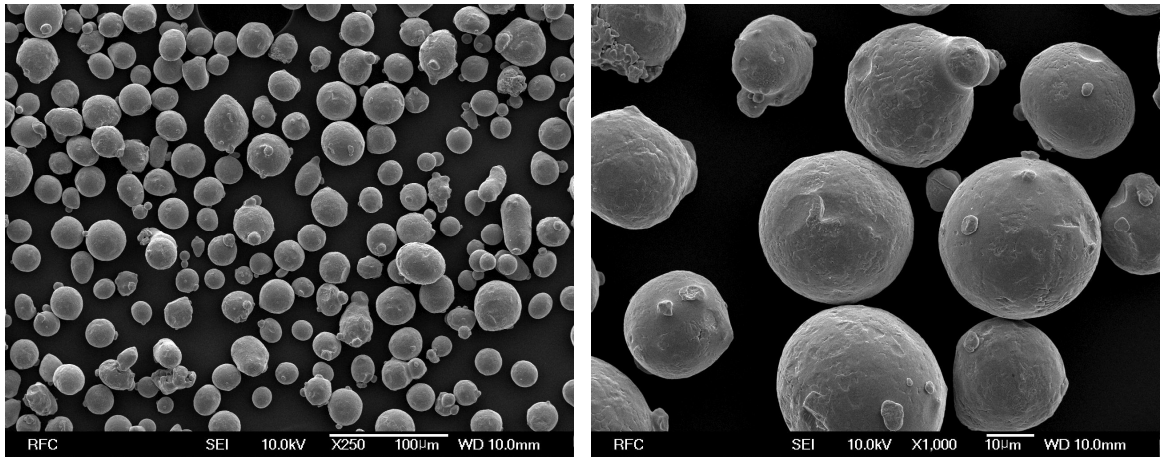
항목	규격
Z Resolution	Over 20um
Laser power	100~200W
Laser type	Yb fiber laser
Laser wavelength	1070nm
Print Volume	150x150x200mm



(a)

(b)

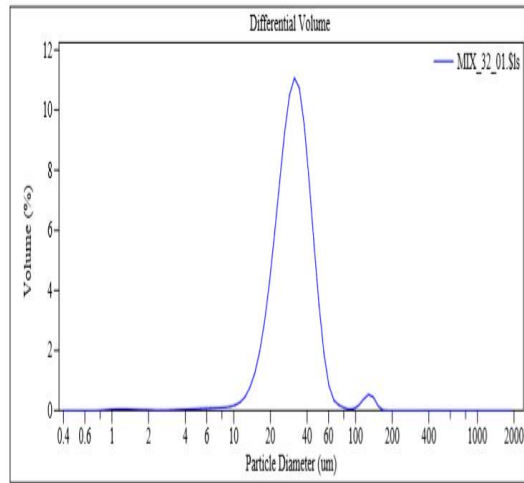
Fig 18. FE-SEM images of the Cu powder



(a)

(b)

Fig 19. FE-SEM images of the STS316L powder



(a)

Fig 20. Results of laser particle size analysis of STS 316L + Cu powder

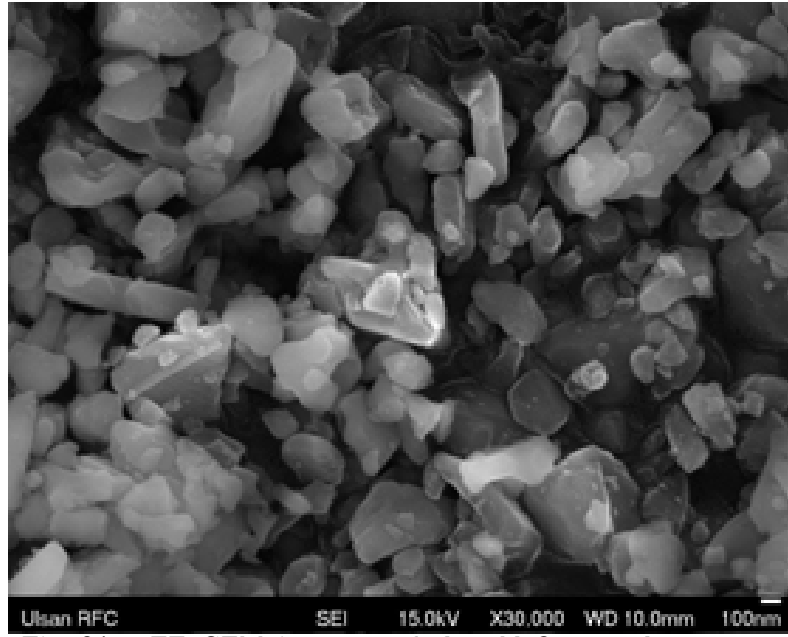
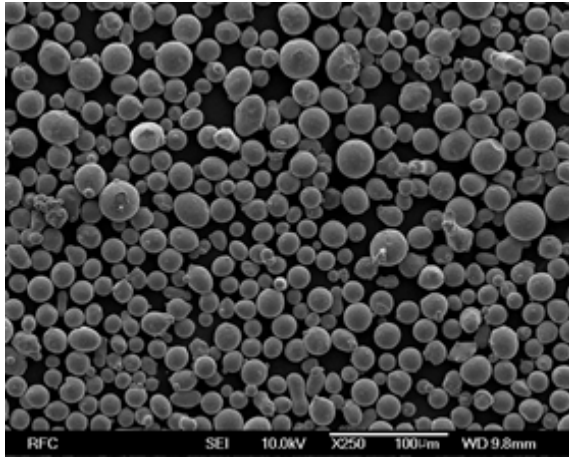
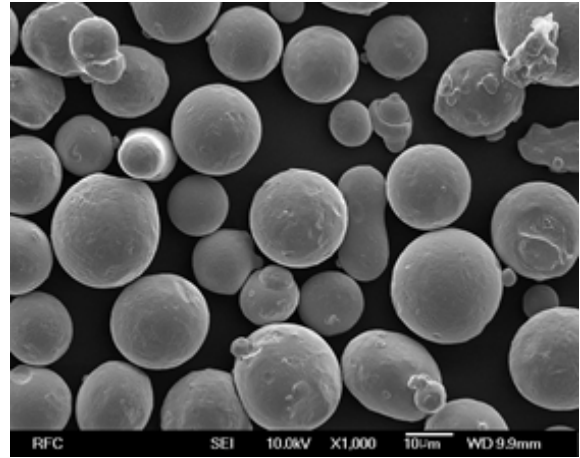


Fig 21 . FE-SEM images of the Al₂O₃ powder



(a)



(b)

Fig 22. FE-SEM images of the STS316L + Cu powder

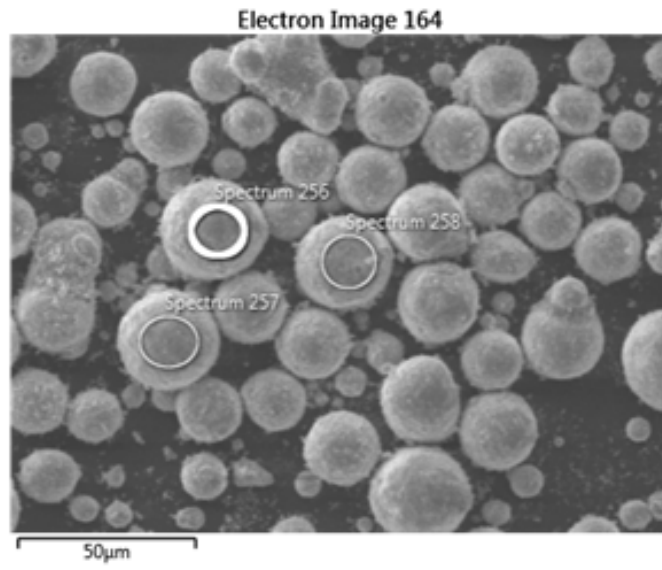


Fig 23. FE-SEM images of the Cu + Al₂O₃ powder

Table 4. Flow rate of Cu powder and STS316 powder

	Cu powder	STS316L powder
Flow rate	13.04 초	18.03 초
Appearance density	4.08g·cm ⁻³	4.24g·cm ⁻³
Tap density	4.60g·cm ⁻³	4.58g·cm ⁻³
Hausner rate (T.D./A.D.)	1.080	1.127

Table 5. Flow rate of Cu + Al₂O₃ powder and STS316L + Cu powder

	STS316L + Cu powder	Cu + Al ₂ O ₃ powder
Flow rate	17.80 초	13.63 초
Appearance density	4.21g·cm ⁻³	4.08g·cm ⁻³
Tap density	4.59g·cm ⁻³	4.48g·cm ⁻³
Hausner rate (T.D./A.D.)	1.127	1.098

Table 6. Process parameter of STS316L+Cu

Process parameter (W, mm/s)	Patten	Sample number	Energy density
130W-1400mm/s	Offset-filling	1-1	44.218J/mm ³
	Meander	1-2	
130W-1000mm/s	Offset-filling	2-1	61.905J/mm
	Meander	2-2	
120W-800mm/s	Offset-filling	3-1	71.429J/mm
	Meander	3-2	
100W-700mm/s	Offset-filling	4-1	68.027J/mm
	Meander	4-2	

Table 7. Process parameter of Cu+Al₂O₃

Process parameter (W, mm/s)	Patten	Sample number	Energy density
100W-800mm/s	Meander(90 ⁰ rotation)	1	59.52J/mm ³
	Meander(69 ⁰ rotation)	5	
100W-1000mm/s	Meander(90 ⁰ rotation)	2	47.61J/mm
	Meander(69 ⁰ rotation)	6	
180W-600mm/s	Meander(90 ⁰ rotation)	3	142.85J/mm
	Meander(69 ⁰ rotation)	7	
180W-1000mm/s	Meander(90 ⁰ rotation)	4	85.71J/mm
	Meander(69 ⁰ rotation)	8	

4. 결과 및 고찰 (Results and Discussion)

4.1 STS316L 분석

4.1.1 STS316L-Cu 출력 후 시편 표면 분석 및 평가

Fig 21은 혼합분말의 SLS공정으로 출력된 시편의 사진이다. 구리 5w% 함유하였지만, 시편이 함유량에 비해 구리의 색상이 짙게 나타났다.

STS316L의 주성분인 Fe은 Cu와 서로 고용되지 않는 전형적인 불고용성 재료이다.

Fig 25는 100W-700mm/s - Offset-filling 의 1-4의 마운팅된 샘플을 밀도 측정을 위해서 충력을 주어 레진부분을 제거하였는데, 그 과정에서 샘플의 겉 표면이 벗겨지게 되었음. 뿐만 아니라 표면의 색상과 내부의 색상이 명확히 차이가 나타남. 이런 경우는 겉표면과 내부가 다르기 때문에 일어나는 현상임. 철과 구리는 서로 섞이지 않는 대표적 비고용 원소인데, 프린팅 직후 고온 상태에서 재결정이 이루어져 구리가 내부에서 표면으로 이동하여 표면과 내부의 특징이 다르다고 판단됨.

Fig 23은 출력된 시편을 아무런 처리 하지 않은 상태에서 광학현미경 관찰한 사진이다.

광학현미경 사진 또한 표면시편이 함유량에 비해 구리의 색상이 짙게 나타났다는 것을 확인 할 수 있다

공통적으로 수직방향의 Laser Direction을 확인 할 수 있었는데. Offset-filling과 Meader 2가지 패턴을 설정하여 진행했음에도 표면의 Laser Direction이 같은 이유는 시편 마무리되는 마지막 Layer에서 레이저 패턴과 관계없이 수평방향으로 마무리 되는 까닭이다.

130W-1400mm/s 조건에서는 다른 조건에 비해서 눈에 띄게 공공이 많다는 것을 예상할 수 있었다. 130W-1400mm/s 조건에서 공공이 많은 이유는 Volumetric Energy Density(VED)의 차이 때문이라고 설명할 수 있다.

선행연구결과는 Volumetric Energy Density(VED)를 다음과 같은 식으로 정의하였다. [35]

$$VED = \frac{P}{v\sigma t} \left[\frac{J}{mm^3} \right]$$

레이저 출력량P, 레이저 속도 v, 레이저 직경 σ , 적층두께 t(분말의 적층)는, 에너지를 전달하는데 크게 작용하는 요소로 정의한다.

분말이 적층되는 구간에 에너지가 부족할 시, 조대한 크기의 기공이 발생 할 수 있으며, 이는 최종 출력물의 기계적 특성에 영향을 미친다.[37-38]

Table 5 따라서 다른 조건에 비해 130W-1400mm/s의 VED값인 44.218J/mm³은 조대한 기공이 발생할 수 있는 에너지 값이라 할 수 있다.

반대로 Energy density가 너무 높을 시, 'keyhole mode' 에 다다른다. 이는 Energy density가 너무 높아 이미 용융이 발생한 구간에 재용융이 발생하는 현상을 말한다. Energy density가 높으면, 끓는점과 증발하는 구간에 다다르게 된다. 게다가 출력량이 높을 경우, 기화가 발생하여, 거품이 발생하고 거품은 기공도를 증가시키는 요인으로 된다. [36]

Energy density외에도 선행연구 결과에서는 Layer의 두께를 증가시키면 다공성이 감소한다고 하는데 높은 층의 두께를 가지고 있으면 좋은 입자 패킹이 일어날 가능성이 더 높다. 결과적으로 접촉 면적이 넓어지며, 그 결과 보다 효과 높은 열전도율, 보다 완전한 밀도화, 그리고 마침내 성공적인 모공 제거 또는 수축이 일어난다고 설명한다.



(a) offset-filling



(b) meander

Fig 24. Sample images of the STS316L + Cu powder



Fig 25. Broken Sample images of the STS316L + Cu powder

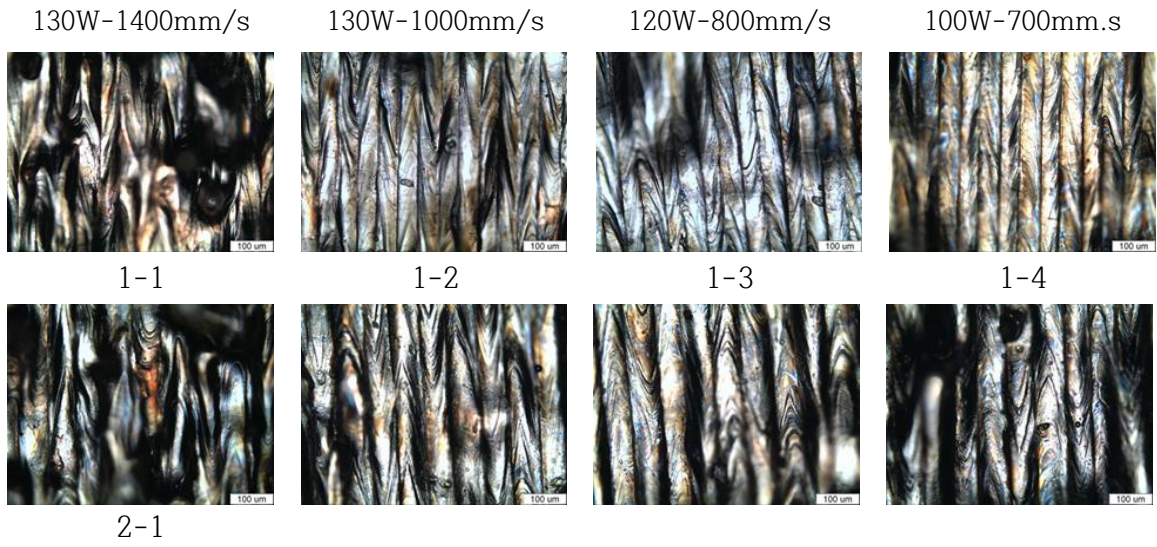


Fig 26. OM Image of surface STS316L+Cu sample

4.1.2 연마 후 표면 분석

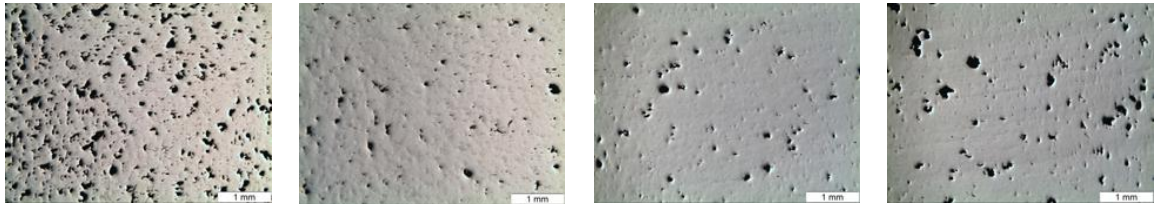
Fig 27는 시편을 연마 후 광학 현미경으로 촬영한 사진이다. 시편 기공의 양을 명확히 구분 할 수 있다. 또 확인 할 수 있는 부분은 패턴에 따른 기공의 양이다. Offset-filling 패턴의 경우 Meander 패턴에 비하여 기공이 많다는 것을 확인 할 수 있다. 기공의 양 뿐만 아니라 기공 크기도 Meander 패턴에 비하여 더 크다는 것을 확인 할 수 있다.

또한 1-4, 2-4의 공정 조건인 100W-700mm/s에서 충분한 VED 값인 68.027/mm 임에도 불구하고, 130W-1000mm/s, 120W-800mm/s 에 비하여 기공이 많다는 것을 확인할 수 있는데 이는 선행연구 [40]에서 확인할 수 있다. 선행연구 결과에 따르면 스캔 속도가 낮을 때 기공의 평균 크기가 눈에 띄게 41.17% 증가했다고 말한다. 낮은 스캔고온을 한 번에 오랫동안 유지한다면, 기공이 성장 하여 기공이 증가하는 결과가 나타난다는 것을 설명한다. 따라서 충분한 에너지 값임에도 많은 기공이 있는 이유는 700mm/s의 스캔 속도가 너무 낮다는 것을 알 수 있다.

Fig 10의 사진은 STS316L과 Cu가 잘 용융되었다는 것을 알 수 있는 사진이다.

STS316L의 주성분인 Fe는 Cu의 용해성이 매우 낮지만[40], 농도는 온도에 따라서 크게 달라지는 것으로 나타난다.[41] 따라서 레이저를 통한 고온 에너지를 얻어 용융되는 현상을 확인 할 수 있다.

Fig 28을 보면 STS316L 뿐만 아니라 Cu도 균일하게 용융 되었다는 것을 확인 할 수 있다.

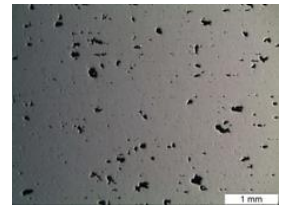
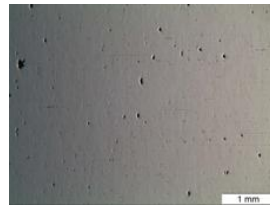
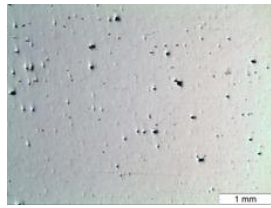
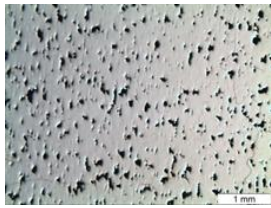


1-1

1-2

1-3

1-4



2-1

2-2

2-3

2-4

Fig 27. Sample images of the STS316L + Cu powder before etching

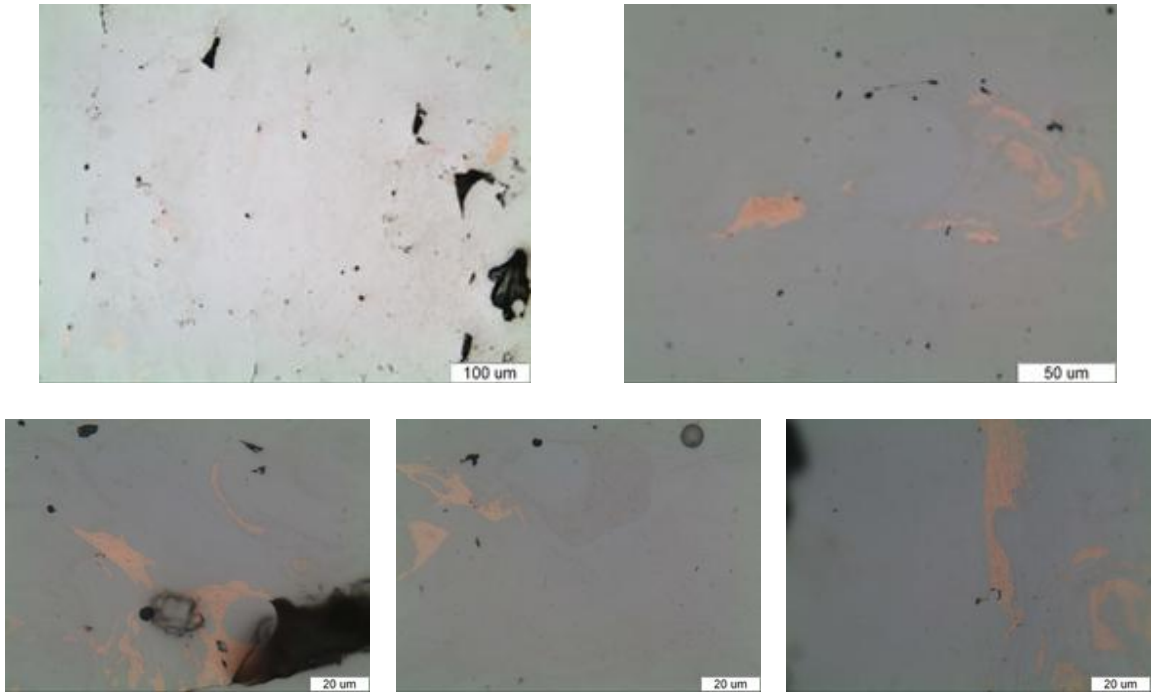


Fig 28. Sample images of the STS316L + Cu powder before etching

4.1.3. STS316L-Cu의 에칭 후 미세구조 분석

Fig4-5는 에칭 후 광학 현미경으로 촬영한 미세구조 사진이다. Offset-filling의 경우 레이저의 방향으로 조직이 성장하는 모습을 선명하게 확인 할 수 있다. Meander 또한 레이저의 방향과 조직이 성장하는 방향이 동일함을 확인 할 수 있었다.

Offset-filling 패턴의 모든 시편은 중앙부분에 에너지 집중으로 인해 크랙이 발생했다는 것을 알 수 있다.

R. Casati et al[38]의 실험결과에도 다음과 같은 조직이 발생하였는데, 그의 선행연구에 따르면 일반적으로 이런 구조는 레이저 접합 비드나 공정의 냉각속도가 일반적으로 $10^3 \sim 10^8 \text{K/s}$ 로 빠르게 발생하는 급냉공정, 또는 과냉각인 응고공정에서 확인 할 수 있다고 설명한다.[39] Selective laser sintering 공정을 진행하는 동안, 재료는 온도변화가 급격하게 변하는 용융과 응고를 겪는다. 그리고 최근 선행연구 결과에서는 이 공정에서는 온도의 변화는 약 10^6K/m 라고 발표했다.[40] 이러한 경향은 레이저의 출력량이 높기 때문에, 열 영향을 받는 부분이 깊으므로 조직이 생성될 수 있다고 판단된다.

연마 후 표면에 확인 할 수 있었던 Offset-filling 패턴의 공공이 크랙으로 인해 더 발생 했다는 것을 확인 할 수 있다. 또한 Meander의 밀도가 더 높은 밀도를 가질 것으로 예상된다.

특히 1-1의 경우 빈 공간이 많이 드러남을 확인할 수 있다. 중앙부에는

Fig4-6는 에칭 후 광학 현미경으로 촬영한 미세구조 사진이다(100배율)

레이저 방향에 따른 Melt pool을 확인 할 수 있으며 Cu조직을 관찰 할 수 있으며 균질한 상을 나타낸다는 것을 알 수 있다.

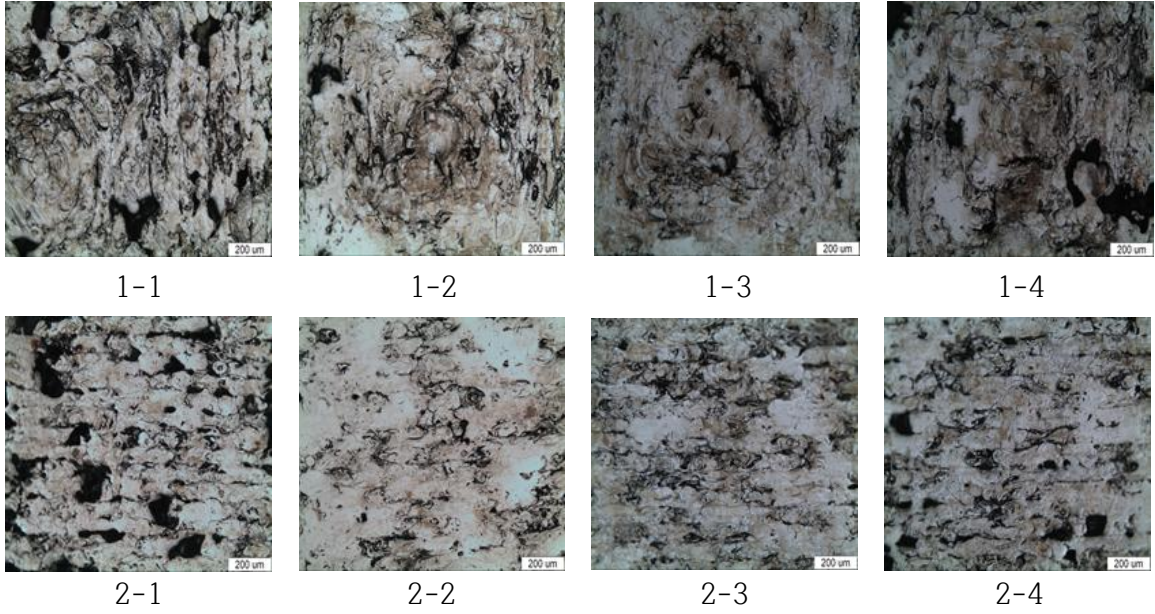


Fig 29. OM images of the STS316L + Cu powder After etching (1)

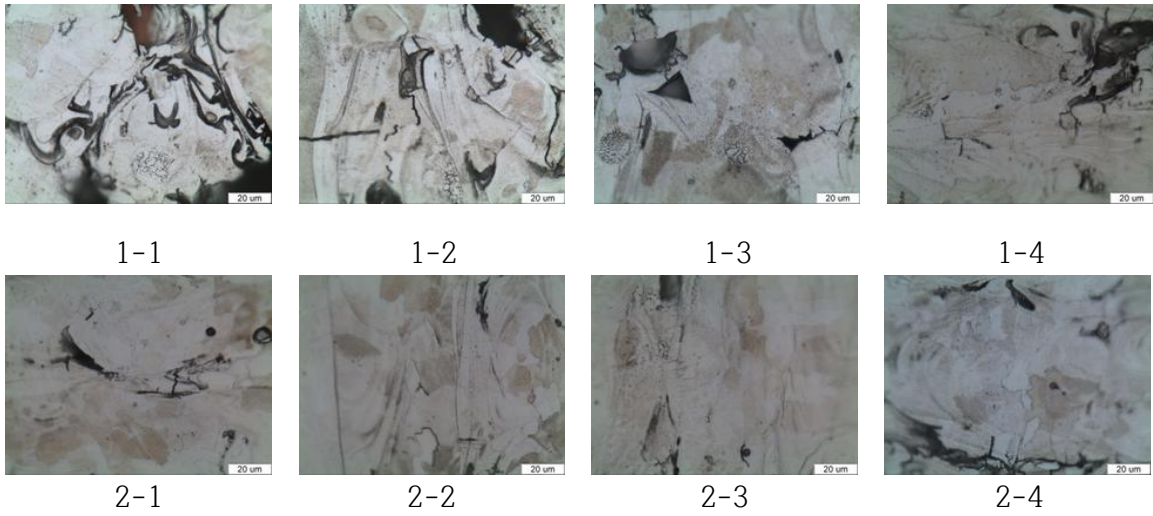


Fig 30. OM images of the STS316L + Cu powder After etching (2)

4.1.4 밀도 분석과 경도분석

Fig 31.을 통해 시편의 밀도는 2-2, 2-3의 시편이 가장 높은 밀도를 가졌다는 것을 확인 할 수 있었으며 2-3의 밀도는 99.6%의 높은 비밀도를 가졌다는 것을 확인하였다.

2-3의 조건이 가장 최적의 조건임을 확인 하였다.

또한 Offset-filling 과 Meander 패턴의 경우 Meander 패턴이 밀도나 경도부분에서 더 높은 기계적 특성을 가진 것을 확인 할 수 있었으며, 이는 Offset-filling의 중앙 에너지 집중으로 인한 크랙이 원인임을 예상 할 수 있었다.

모든 시편이 열처리 된 STS316L의 평균 경도인 215-225HV보다 높은 값을 가진다. SLS공정으로 제조된 시편은 레이저를 통해서 급속으로 에너지를 받고 용융되어 급격하게 냉각되기 때문에 경도가 높게 나타난다.

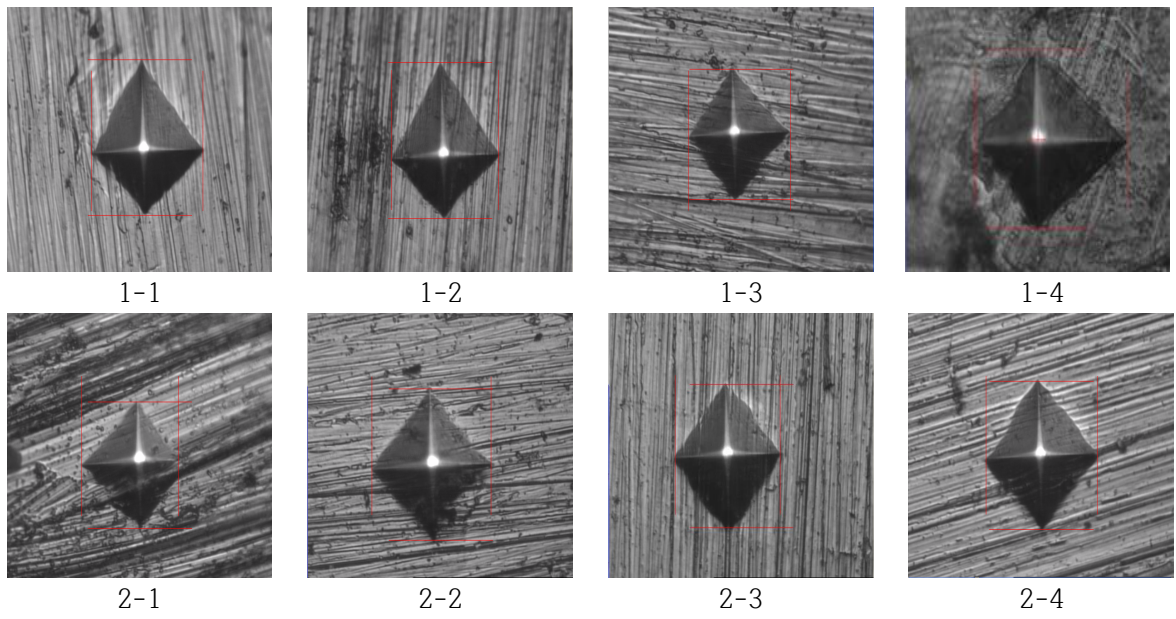


Fig 31. Vickers hardness pressure marks of the STS 316L-Cu powder products

Table 8. Vickers hardness of STS316L+Cu

STS316L+Cu Vickers hardness								
시편번호	1-1	2-1	1-2	2-2	1-3	2-3	1-4	2-4
패턴	Offset-filling	meander	Offset-filling	meander	Offset-filling	meander	Offset-filling	meander
Vickers hardness (HV)	233.33	262.64	247.00	250.23	275.40	354.23	228.16	259.71

Table 9. Density and Vickers hardness of STS316l+Cu

Process parameter	Pattern	Vickers hardness (HV)	Density (g/cm ³)	Related Density(%)
130W-1400mm/s	Offset-filling	233.33	7.168	90.3
	Meander	262.64	7.432	93.6
130W-1000mm/s	Offset-filling	247.00	7.609	95.8
	Meander	250.23	7.822	98.6
120W-800mm/s	Offset-filling	275.40	7.729	97.4
	Meander	354.23	7.905	99.6
100W-700mm/s	Offset-filling	228.16	7.422	93.5
	Meander	259.71	7.778	98.0

4.2 Cu-Al₂O₃ 분석

4.2.2 순수 Cu와 Cu-Al₂O₃ 출력 후 시편 표면 분석 및 평가

Cu-Al₂O₃출력 전에 순수 Cu로 시편을 출력을 진행 하였다.

순수 Cu의 공정변수는 120W-600mm/s, 130W-600mm/s, 180W-600mm/s, 180W-800mm/s로 STS316-Cu보다는 비교적 높은 에너지밀도를 주어 출력을 진행 하였다. 이것은 Cu의 레이저반사율이 STS316L에 비하여 높은 레이저 반사율을 가지고 있기 때문에 Cu이 STS316L에 비해 낮은 용점을 가지고 있다하더라도, Cu 소결시키려면 더 높은 단위에너지를 주어야 한다.

출력된 순수 Cu의 OM사진을 보면 [Fig 32.] 순수 구리의 미세구조가 금속 3D 프린터 시편의 특징 중 하나인 Melting pool을 확인 할 수 없다는 것을 알 수 있다. 이것은 Cu가 용융되지 않았다는 것을 알 수 있는데, 마치 고상소결의 미세구조처럼 형성되었다는 것을 확인할 수 있다.

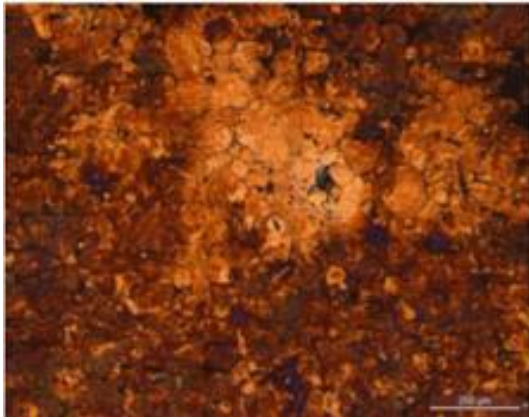
STS316L-Cu의 미세구조에서는 Cu가 완전히 용융되었던 것으로 확인 되었는데[] 그것은 STS316L-Cu에서 높은 반사율을 가진 구리가 낮은 에너지 밀도임에도 불구하고 온도 전이를 통해서 용융된다는 것을 알 수 있었다.

Cu-Al₂O₃ 시편은 100W-800mm/s, 100W-1000mm/s, 180W-600mm/s, 180W-1000mm/s의 공정변수를 두어 진행 하였다.

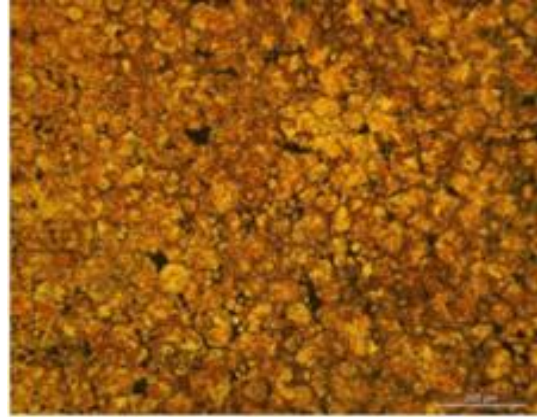
시편을 출력 하였을 때 확인 할 수 있었던 점은 높은 단위에너지 밀도를 주었던 시편의 색상이 구리 고유의 색을 나타낸다는 것을 확인할 수 있었다. [Fig 33.]

Table 10. Process parameter and hardness of Cu and Cu-Al₂O₃

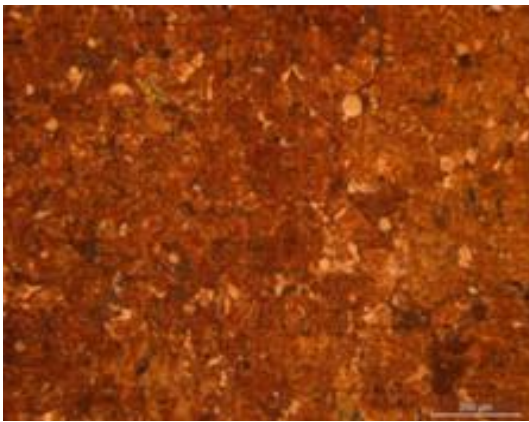
Cu-Al ₂ O ₃				
시편번호	1,5	2,6	3,7	4,8
공정변수	100W-800mm/s	100W-1000mm/s	180W-600mm/s	180W-1000mm/s
가입 에너지 밀도 (VED)	59.52J/mm ³	47.61J/mm ³	142.85J/mm ³	85.71J/mm ³
Vickers Hardness (HV)	X	X	74.43/84.40	45.93/ X
Pure Cu				
시편번호	1	2	3	4
공정변수	120W-600mm/s	130W-600mm/s	180W-600mm/s	180W-800mm/s
가입 에너지 밀도 (VED)	95.23J/mm ³	103.17J/mm ³	142.85J/mm ³	107.14J/mm ³
Vickers Hardness (HV)	31.25	32.92	45.35	29.10



1



2



3



4

Fig 32. Sample images of the Cu powder

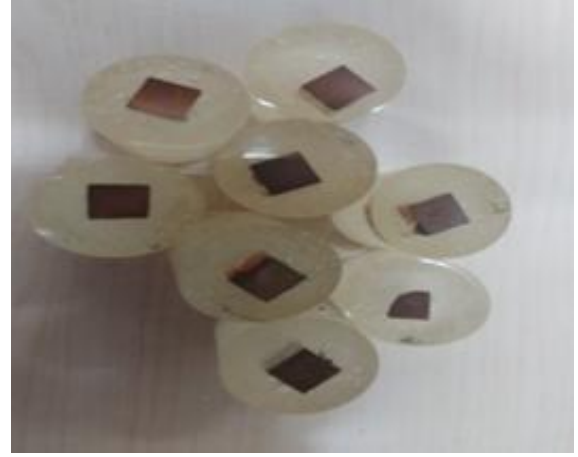
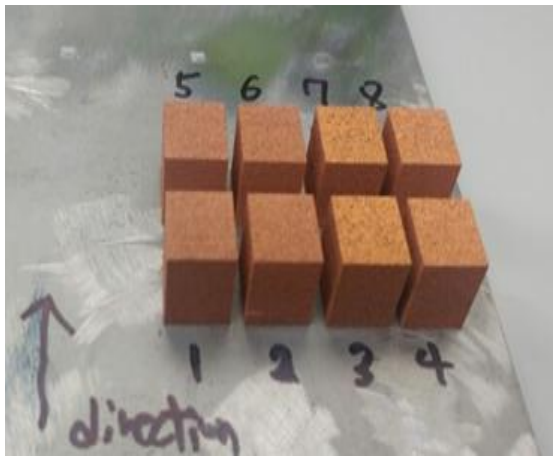


Fig 33. Cu-Al₂O₃ Sample

4.2.2 Cu-Al₂O₃의 에칭 후 미세구조 분석

Fig. 34는 에칭후 미세구조 사진이다.

고에너지(180W)의 레이저를 사용한 시편의 미세구조가 더 높은 밀도를 가진다는 것을 알 수 있음. 구리의 미세조직만이 관찰되며, 또한 구리가 용융되지 않았다는 것을 알 수 있다. 같은 불고용성 복합분말 시편인 STS316L-Cu와 비교해 보았을 때, STS316L-Cu는 잘 용융 되었다는 것을 확인 할 수 있었으나, Cu-Al₂O₃는 다른 결과가 나타났다.

대표적으로 순수 Cu의 3번 조건의 미세구조와 Cu-Al₂O₃의 3번 미세구조를 비교하면 같은 조건임에도 불구하고 용융이 더 안 되었다는 것을 확인 할 수 있었다. 이것은 Al₂O₃가 Cu의 용융을 방해하는 작용을 한다는 추측할 수 있었다.

Fig 35는 에칭후 미세구조 사진이다.

1번 시편과 2번 시편은 100W의 비교적 저출력으로 소결 하여서 공공이 많은 미세구조를 타나낸다. 공통적으로 3D프린터에서 나타나는 레이저 패턴이 보이지 않는 것이 특징이다. 본 연구의 3D프린팅 공정에서는 충분한 Cu의 용융이 발생하지 않았고, 많은 기공이 발생되었다. 또한 Cu와 복합화 된 Al₂O₃ 분말 때문일 것이라고 추측할 수 있다.

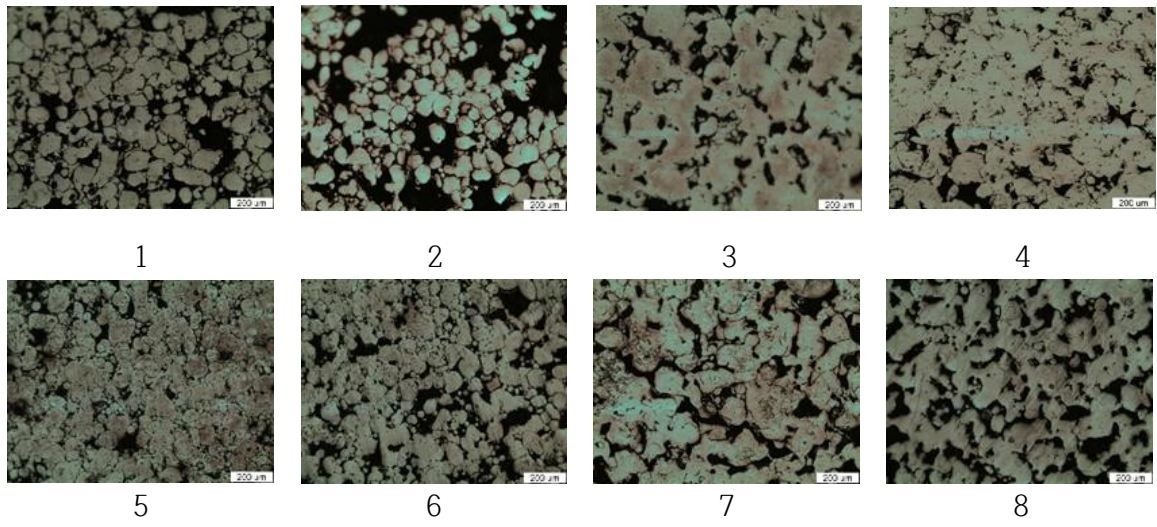


Fig 34. OM images of the Cu-Al₂O₃ powder After etching (1)

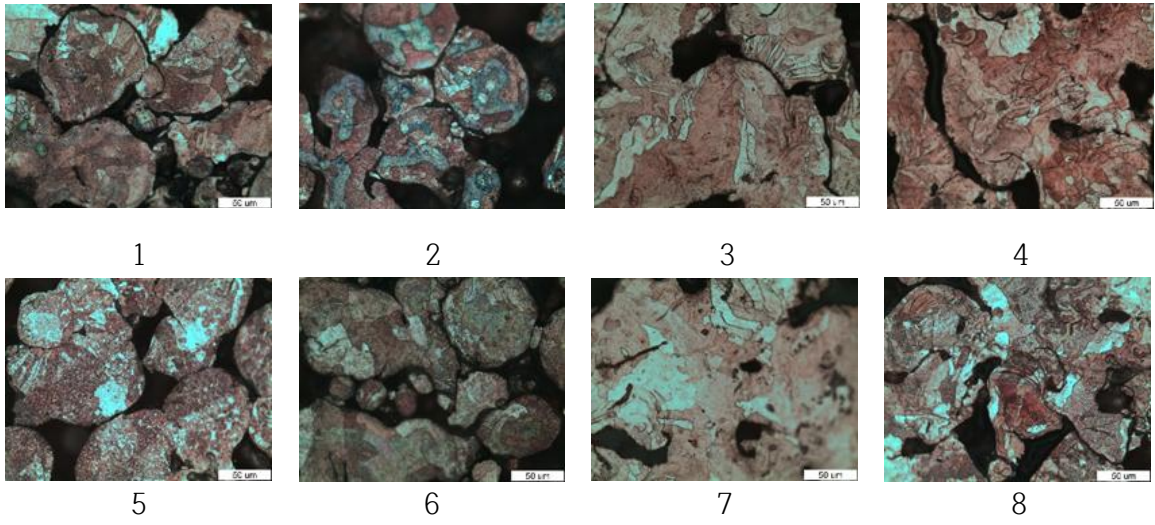


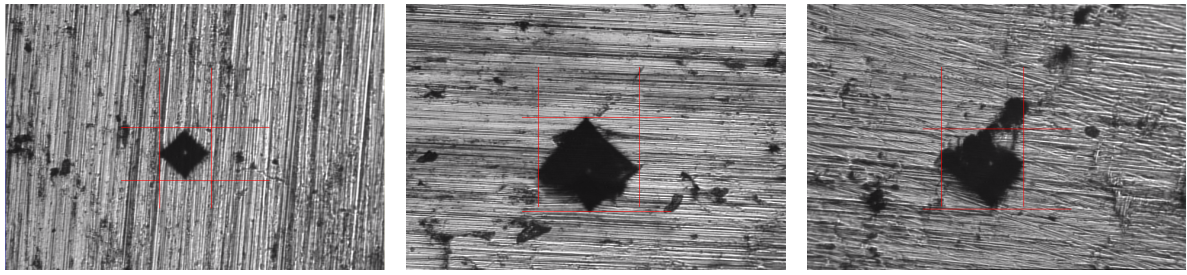
Fig 35. OM images of the Cu-Al₂O₃ powder After etching (2)

4.2.3 Cu-Al₂O₃의 에칭 후 미세구조 분석

Cu와 Al₂O₃ 모두 용융이 잘 이루어지지 않아 높은 경도값을 기대 할 수 없었다. 또한 3번 7번 8번을 제외하고는 경도측정을 할 수 없었다.

Table 10.을 확인해 보면 3번과 7번을 비교하였을 때 같은 공정변수를 가지고 있지만 69°rotation 패턴으로 설정했던 시편이 더 높은 경도 값을 가진 것을 확인 할 수 있었다. 이것은 레이저가 중복된 곳을 주사되지 않아서 에너지가 더 균일하게 전달되어서 이러한 결과가 나타났다는 것을 예상할 수 있었다.

Pure Cu의 4개의 시편 중 가장 높은 경도 값은 3번 시편의 45.3HV로 Cu-Al₂O₃의 3번 7번 시편과 같은 공정변수를 가졌다. Al₂O₃를 첨가 하였을 때 더 높은 경도 값을 가진다는 것을 확인할 수 있었다.



3번

7번

8번

Fig 36 Vickers hardness pressure marks of the Cu-Al₂O₃ powder products

5. 결론

구형 분말 및 SLS과정에 대한 다른 종류의 공정변수를 사용하고, 연구를 통한 다음과 같은 결론을 제시합니다.

1. STS316L-Cu은 서로 불고용성 특성을 가지지만 SLS 공정을 사용하여 혼합 분말로부터 제조 될 수 있으며 120W-800mm/s-Meander 패턴으로 했을때 99.6%의 높은 비밀도의 시편을 제작하였음.
2. 제작 된 시료의 미세 구조는 각 melt pool에서 Cu 및 STS316L 물질의 균질 상을 보여줌. STS316L-Cu에서 높은 반사율을 가진 구리가 낮은 에너지 밀도임에도 불구하고 온도 전이를 통해서 용융된다는 것을 확인함.
3. 제작 된 시편은 SLS 공정의 스캐닝 층과 관련된 응고 트랙과, melt pool을 보여 주었으며, 불고용성의 구리가 밖으로 용출되는 현상이 나타나 시편이 꺾질처럼 벗겨짐.
4. Offset-filling 패턴은 모든 시편이 중앙의 에너지 집중으로 인해 Crack이 발생하였고, Meander패턴에 비하여 밀도가 떨어진 것을 확인함.
5. Cu와 Cu-Al₂O₃는 STS316-Cu에 비하여 높은 에너지를 주었음에도 낮은 레이저 흡수율로 인하여 용융이 이루어 지지 않았다는 것을 확인 할 수 있었고, 특히 Cu-Al₂O₃는 첨가된 Al₂O₃로 인하여 Cu보다 더 많은 기공을 가진다는 것을 예상 할 수 있음.
6. Cu-Al₂O₃는 같은 공정 변수를 주었을 때, 69°rotation 패턴이 더 높은 경도 값을 가진다는 것을 확인함.
7. Cu와 Cu-Al₂O₃를 비교 하였을때, Al₂O₃를 첨가하면 더 높은 경도 값을 가질 수 있다는 것을 확인함.

참고문헌 (References)

- [1] Jung-Woo Rho, Joo-han Kim, Chul-ku Lee, Journal of KWJS, Vol. 26, No. 4, August, 2008.
- [2] ICT와 3D 프린팅에 의한 제3차 산업혁명, KT 경제경영연구소, (2013), P3-4
- [3] 3D프린팅 전략기술 로드맵, 한국생산기술연구원, (2014), P6
- [4] 글로벌 3D 프린터 산업기술 동향 분석, 한국기계연구원, (2013), P1-7
- [5] 3D프린팅 산업 발전전략, 미래창조과학부, (2014)
- [6] 3D프린터의 개념 및 원리, 대림아이앤에스, (2014)
- [7] 3D 프린팅 기술 동향, 한국콘텐츠진흥원, (2013), P4-9
- [8] ASTM International Committee F42 on Additive Manufacturing Technology defines AM as the process of joining materials to make objects from 3D model data, usually layer upon layer, as opposed to subtractive manufacturing methods.
- [9] 3D 프린팅 기술 동향, 한국콘텐츠진흥원, (2013), P4-8
- [10] ICT와 3D 프린팅에 의한 제3차 산업혁명, KT 경제경영연구소, (2013), P3-4
- [11] 3D프린팅 전략기술 로드맵, 한국생산기술연구원, (2014), P6
- [12] 글로벌 3D 프린터 산업기술 동향 분석, 한국기계연구원, (2013), P1-7
- [13] 3D프린팅 산업 발전전략, 미래창조과학부, (2014)
- [14] 3D프린터의 개념 및 원리, 대림아이앤에스, (2014)
- [15] 김영식, “최신용접공학”, 영설출판사, 1990..
- [16] H. W. Etzel, H. W. Gandy, and R. J. Ginther, “Stimulated emission of

infrared radiation from ytterbium-activated silicate glass,” Appl. Opt., Vol. 1, 534 (1962).

- [17] A.B. Spierings, N. Herres, G. Levy, Influence of the particle size distribution on surface quality and mechanical properties in AM steel parts, Rapid Prototyp. J. 17 (2011) 195-.202.
- [18] 안영진, 조선대학교 (2013) 박사학위논문
- [19] C. Suryanarayana, Prog. Mater. Sci. 46 (2001) 1-84.
- [20] 한봉희, 조직과 성질을 주로 한 금속재료, (주)교보문고 (2011. 9. 5), pp. 299-300
- [21] 김승환, 영남대학교 석사학위논문(2006)
- [22] Y.Kato, K. Nakabayashi and T. Shimura: *MPR*, **48** (1993) 32
- [23] H.Suzuki and H.Ohtsubo: *MPR*, **49** (1994) 28
- [24] A.Bose: *MPR*, **48** (1993) 18
- [25] H.Cohrt, M. Enders, and L. Kramer: *PIM Symposium*, MPIF, Princeton, NJ (1992) 471
- [26] L.Wang, Q.S.Wei, Y.S. Shi, J.H. Liu,W.T. He, Experimental investigation into the single-track of selective laser melting of IN625, 2011. Adv. Mater. Res. 233-.235 2844-.2848,
- [27] 동과동합금의 이해, 한국철강신문, P76 ,(2008)
- [28]K. C. Kao and G. A. Hockham, “Dielectric-fiber surface waveguides for optical frequencies,” Proc. Inst. Elect. Eng. 113, 1151 (1966)
- [29]J. Mazumder, D. Dutta, N. Kikuchi, A. Ghosh, Opt. Lasers Eng. 34
- [30] C. Suryanarayana, Prog. Mater. Sci. 46 (2001) 1-84.
- [31] J. Sheasby, Powder Metall. Powder Technol. 15 (1979) 301-05.

- [32] H. Niu, I. Chang, Scripta Mater. 41 (1999) 25-0.
- [33] J.P. Kruth, P. Mercelis, J.V. Vaerenbergh, L. Froyen, M. Rombouts, Binding mechanisms in selective laser sintering and selective laser melting, Rapid Prototyping Journal, 11(1), 2005, pp.26-36
- [34] 김득중, 분말재료 및 공정 [POWDER METALLURGY & Particulate Material Process], 사단법인 한국분말야금학회 (2010. 2.28)
- [35] J. Ciurana, L. Hernandez, J. Delgado, Energy density analysis on single tracks formed by selective laser melting with CoCrMo powder material, 2013. Int. J. Adv. Manuf. Technol. 68 1103-1110
- [36] W.E. King, H.D. Barth, V.M. Castillo, G.F. Gallegos, J.W. Gibbs, D.E. Hahn, C. Kamath, A.M. Rubenchik, Observation of keyhole-mode laser melting in laser powder-bed fusion additive manufacturing, 2014. J. Mater. Process. Technol. 214 2915-2925
- [37] H. Gong, K. Rafi, H. Gu, G.D. Janaki Ram, T. Starr, B. Stucker, Influence of defects on mechanical properties of Ti-6Al-4V components produced by selective laser melting and electron beam melting, 2015. Mater. Des. 86 545-554,
- [38] H. Gong, K. Rafi, H. Gu, T. Starr, B. Stucker, Analysis of defect generation in Ti-6Al-4V parts made using powder bed fusion additive manufacturing processes, 2014. Addit. Manuf. 1-4 87-98,
- [39] A. Morley, G. Sha, S. Hirosawa, A. Cerezo, G.D.W. Smith, Determining the composition of small features in atom probe: bcc Cu-rich precipitates in an Fe-rich matrix, Ultramicroscopy 109 (2009) 535--540,
- [40] K. Monroya, J. Delgadoa, J. Ciuranaa, Procedia Engineering 63 , 361-369 (2013)
- [41] G. Salje, M. Feller-Kniepmeier, The diffusion and solubility of copper in iron, J. Appl. Phys. 48 (1977) 1833--1839

[42] 임현진 조덕호, 김무경, 상상미, M. Iwasa, "알루미나 세라믹스의 기계적 특성 평가 한국세라믹스학회지, 33(3), 339-347 (1996)

[43] 이홍림, 이규형, 박성은, "알루미나 세라믹스의 동적피로거동", 한국세라믹스학회지,34(10),1053-1059 (1997)

[44] 정우찬, 한봉석, 이홍림, 이형직, "알루미나 세라믹스의 열피로 거동" 한국세라믹스학회지,35(10) 1094-1100(1998)

Abstract

Selective Laser Sintering (SLS) is an Additive manufacturing(AM) technology using CO₂ laser to produce 3D objects in metal, polymer and ceramic powders. It is a highly promising manufacturing process compared to traditional methods, for example, due to the advantages of producing highly complex components, reducing production time, and providing good macro-specific features for the product. Therefore, SLS has been applied in many areas such as aerospace flight, medical and implant manufacturing.

Austenite stainless steel having very excellent corrosion resistance, abrasion resistance and mechanical properties compared to the carbon steel have been widely used in the various industrial fields. Among them, STS316L(melting point 1375°-1400°c) is the most commonly used and also used at the high temperatures because it has very good inter-granular corrosion resistance and excellent creep strength and weld-ability.

Cu(melting point 1084.62°C) has the second highest thermal conductivity and also have good corrosion resistance properties under various external environments of air, sea and industrial conditions.

Al₂O₃(melting point 2050°C) is the next hardness after the diamond and is an insulator. It has also superior properties such as heat resistance, pharmaceutical resistance, and high strength and cheap properties.

In this study, two composite materials, STS316-Cu and Cu-Al₂O₃ were studied to get some results using SLS process. STS316L-Cu powders used was prepared as a simple compound after mixing STS316L (35µm) and pure Cu powders. The reason for choosing these two materials is to observe what the results would get using 3D printing because these two materials are not soluble each other.

Al₂O₃ powder(100nm) was used to get also simple mixed Cu-Al₂O₃ powders. The reason for this combination of Cu and Al₂O₃ is to identify the results of the mixture of metal and ceramics, and also to observe the results when the SLS process used.

In this study, we analyzed the microstructure and density changes of sintered(SLSed) bodies according to the laser output and lamination(laser) pattern which are most important in the SLS process. In the STS316L-Cu, the patterns of the laser are basically two different patterns, Offset filling and Meander patterns. But in the Cu-Al₂O₃ two different Meander patterns was used after changing the rotation angle, 90° and 69°.

Laser power (180W, 130W, 120W, 100W) and laser speed (600mm/s, 700mm/s, 800mm/s, 1000mm/s, 1400mm/s) were used in this study. The optimization of the density and the characteristics of the SLSed samples were studied through the change of the densities, the change of the microstructures according to the patterns, the laser speeds and the laser powers.

In the condition of 130W-1400mm/s and 100W-700mm/s, we could not get the optimized high density samples. The samples had many pores in the microstructures.

The highest density could get under 120W-800mm/s Meander pattern conditions. The melt-out phenomenon due to the insolubility of STS316L-Cu elements was observed. In addition, the laser melt pool, which is a characteristic of the SLS specimens, was confirmed. In the Offset-filling pattern, due to energy concentration, several large cracks were observed in the center of the specimens.