



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](#)

공학석사학위논문

Powder Bed Fusion 공정으로 제조된
AlSi10Mg 합금 및 Inconel 718의
미세조직 및 경도 특성

Microstructure and Hardness Properties of
AlSi10Mg Alloy and Inconel 718 Fabricated by
Powder Bed Fusion Process

울산대학교 대학원

첨단소재공학부

유 승 민

Powder Bed Fusion 공정으로 제조된
AlSi10Mg 합금 및 Inconel 718의
미세조직 및 경도 특성

지도교수 김 진 천

이 논문을 공학석사학위 논문으로 제출함

2020년 2월

울산대학교 대학원

첨단소재공학부

유 승 민

유승민의 공학석사학위 논문을 인준함

심사위원장 신 상 용


(인)

심사위원 신 건 철


(인)

심사위원 김 진 천


(인)

울산대학교 대학원

2020년 2월

국문 초록

최근 3D Printing은 ASTM 규정으로 인해 영어로는 AM(Additive Manufacturing)하고, 한글로는 적층 제조라고 알려지고 있다. AM에는 총 7가지의 방식이 있는데 차례대로 Vat Photopolymerization, Material Jetting, Material Extrusion, Powder Bed Fusion, Binder Jetting, Sheet Lamination, Directed Energy Deposition이 있다. 이 중에서 산업 현장에서 널리 쓰이는 방식이 바로 Powder Bed Fusion이다. Powder Bed Fusion 방식은 간단하게 분말을 한층 얇게 도포한 후 고출력의 레이저를 가하여 용융 및 응고를 통해 적층하며 제품을 제조하는 방식이다.

현재 PBF 방식으로 제조된 부품들은 항공우주, 자동차, 생체의학, 화학공업 등 다양한 핵심산업에서 많이 사용되고 있다. 대표적으로 사용되는 재료는 강도는 높으면서 밀도는 낮고 우수한 내식성을 가지는 티타늄 합금, 우수한 전도율과 내식성을 가지는 알루미늄 합금, 강도와 연성이 높으면서 내산화성이 우수한 Ni 합금, 그리고 가장 보편적으로 널리 사용되고 있는 철 합금 등이 있다.

하지만 좀 더 다양한 산업에서 활용되기 위해서는 PBF에 사용되는 재료에 대한 다양한 공정변수 데이터 확보와 미세조직과 기계적 특성이 가지는 연관성에 관한 연구가 활발히 진행될 필요가 있다. 이번 연구에서는 앞서 말한 합금 중 널리 사용되고 있는 AlSi10Mg, Inconel 718을 선정하여 PBF AM 공정으로 시편을 제조하였으며, 미세조직 분석과 기계적 특성 분석을 함께 진행하였다.

목차

1. 서론	11
1. 1. 개요.....	11
2. 이론적 배경	13
2. 1. Additive Manufacturing.....	13
2. 1. 1. Additive Manufacturing 개요.....	13
2. 1. 2. Additive Manufacturing 기술.....	14
2. 2. 분말 적층 용융	23
2. 2. 1. 분말 적층 용융 개요.....	23
2. 2. 2. 분말 적층 용융 원리.....	24
2. 2. 3. 분말 적층 용융 연구 및 분석	25
2. 3. AM 적용 합금.....	28
2. 3. 1. AM 금속 분말	28
2. 3. 2. AlSi10Mg	28
2. 3. 3. Inconel 718.....	29
2. 4. Powder Manufacturing	34
2. 4. 1. 급속 응고 현상	34
2. 4. 2. 가스 분무법(Gas Atomization).....	35

3. 실험 방법	38
3. 1. 실험 재료	38
3. 2. 실험 장비	38
3. 3. 공정 설정	39
3. 4. 분말 분석	40
3. 5. 출력물 분석	41
3. 6. 미세조직 분석	42
3. 7. 기계적 특성 분석	42
4. 결과 및 고찰	50
4. 1. AlSi10Mg 및 Inconel 718 분말 분석.....	50
4. 1. 1. Hall flowmeter.....	50
4. 1. 2. Optical Microscope (OM).....	52
4. 1. 3. Scanning Electron Microscope (SEM).....	55
4. 1. 4. Laser Particle Size Distribution (LPSD).....	62
4. 1. 5. X-Ray Diffraction (XRD)	65
4. 2. AlSi10Mg 시편 분석	69
4. 2. 1. Density.....	69
4. 2. 2. Optical Microscope (OM).....	71

4. 2. 3. Scanning Electron Microscope (SEM).....	99
4. 2. 4. Hardness.....	101
4. 3. Inconel 718 시편 분석.....	103
4. 3. 1. Density.....	103
4. 3. 2. Optical Microscope (OM).....	105
4. 3. 3. Scanning Electron Microscope (SEM).....	120
4. 3. 4. Hardness.....	124
5. 결론	127
6. 참고 문헌	128
7. Abstract	133

그림 목차

그림 1. Schematic Diagram of Vat Photopolymerization.....	19
그림 2. Schematic Diagram of Material Extrusion.....	19
그림 3. Schematic Diagram of Material Jetting.....	20
그림 4. Schematic Diagram of Binder Jetting.....	20
그림 5. Schematic Diagram of Powder Bed Fusion	21
그림 6. Schematic Diagram of Directed Energy Deposition	21
그림 7. Schematic Diagram of Sheet Lamination.....	22
그림 8. Schematic Diagram of Powder Bed Fusion System.....	26
그림 9. Showing a Schematic Diagram of the SLM Process.....	27
그림 10. Features of Powder Bed Fusion.....	27
그림 11. Al-Si Phase Diagram and the Position of AlSi10Mg Alloy.....	33
그림 12. Phase Diagram of Inconel 718 Alloy Calculated on the Basis of Thermo-Calc....	33
그림 13. Schematic Diagram of Gas Atomization.....	37
그림 14. Hall Flowmeter	47
그림 15. Metalysis 150	47
그림 16. Schematic Diagram of Main Parameters of PBF.....	48

그림 17. AlSi10Mg Alloy from PBF Process.....	48
그림 18. Inconel 718 Alloy from PBF Process.....	49
그림 19. (a) Low Magnification (b) High Magnification Photos of AlSi10Mg from OM.....	53
그림 20. (a) Low Magnification (b) High Magnification Photos of Inconel 718 from OM.....	54
그림 21. (a) Low Magnification (b) High Magnification Photos of AlSi10Mg from SEM	58
그림 22. Result of AlSi10Mg from EDS	59
그림 23. (a) Low Magnification, (b) High Magnification Photos of Inconel 718 from SEM.....	60
그림 24. Result of Inconel 718 from EDS.....	61
그림 25. Particle Size Distribution of AlSi10Mg Powder	63
그림 26. Particle Size Distribution of Inconel 718 Powder.....	64
그림 27. Result of AlSi10Mg Powder from XRD.....	67
그림 28. Result of AlSi10Mg powder from XRD	67
그림 29. Result of Inconel 718 powder from XRD.....	68
그림 30. Analysis Surface	71
그림 31. Microstructure of AlSi10Mg No.1 in the Z Plane.....	74
그림 32. Microstructure of AlSi10Mg No.2 in the Z Plane.....	75
그림 33. Microstructure of AlSi10Mg No.3 in the Z Plane.....	76

그림 34. Microstructure of AlSi10Mg No.4 in the Z Plane	79
그림 35. Microstructure of AlSi10Mg No.5 in the Z Plane	80
그림 36. Microstructure of AlSi10Mg No.6 in the Z Plane	81
그림 37. Microstructure of AlSi10Mg No.7 in the Z Plane	84
그림 38. Microstructure of AlSi10Mg No.8 in the Z Plane	85
그림 39. Microstructure of AlSi10Mg No.9 in the Z Plane	86
그림 40. Microstructure of AlSi10Mg No.1 in the X Plane	88
그림 41. Microstructure of AlSi10Mg No.2 in the X Plane	89
그림 42. Microstructure of AlSi10Mg No.3 in the X Plane	90
그림 43. Microstructure of AlSi10Mg No.4 in the X Plane	91
그림 44. Microstructure of AlSi10Mg No.5 in the X Plane	92
그림 45. Microstructure of AlSi10Mg No.6 in the X Plane	93
그림 46. Microstructure of AlSi10Mg No.7 in the X Plane	94
그림 47. Microstructure of AlSi10Mg No.8 in the X Plane	95
그림 48. Microstructure of AlSi10Mg No.9 in the X Plane	96
그림 49. Microstructures of (a) AM, (b) Powder Metallurgy, (c) Sand casting.....	98

그림 50. Results of AlSi10Mg 's Microstructure from SEM.....	100
그림 51. Inconel 718 Cross Section Surface.....	105
그림 52. Microstructure of Inconel 718 No.1 in the X Plane.....	108
그림 53. Microstructure of Inconel 718 No.2 in the X Plane.....	109
그림 54. Microstructure of Inconel 718 No.3 in the X Plane.....	112
그림 55. Microstructure of Inconel 718 No.4 in the X Plane.....	113
그림 56. Microstructure of Inconel 718 No.5 in the X Plane.....	116
그림 57. Microstructure of Inconel 718 No.6 in the X Plane.....	117
그림 58. Microstructures of (a) AM, (b) Powder Metallurgy, (c) Sand casting.....	119
그림 59. Results of Inconel 718 No.4's Microstructure from SEM.....	122
그림 60. Results of Inconel 718 No.5's Microstructure from SEM.....	123

표 목차

표 1. Classification and Characterization of AM Processes.....	18
표 2. Measurement Methods and Requirement for Additive Manufacturing Metal Powder	30
표 3. Metal Powder and Applications for Additive Manufacturing.....	30
표 4. Mechanical Properties of Metal Materials for Additive Manufacturing.....	31
표 5. Composition of the AlSi10Mg Alloy	32
표 6. Composition of the Inconel 718 Alloy.....	32
표 7. Mechanical Properties of Inconel 718 Alloy.....	32
표 8. Information of Metalysis 150 PBF Machine.....	43
표 9. PBF Processing Parameters	44
표 10. Process Parameter of AlSi10Mg Sample.....	44
표 11. Process Parameter of Inconel 718 Sample	45
표 12. Energy Density of Inconel 718	45
표 13. Energy Density of AlSi10Mg.....	46
표 14. Results of Flow Rate from Hall Flowmeter	51
표 15. Results of Apparent Density and Tap Density from Hall Flowmeter	51
표 16. Results of AlSi10Mg's Density.....	70

丑 17. Results of AlSi10Mg's Hardness.....	102
丑 18. Results of Inconel 718's Density	104
丑 19. Results of Inconel 718's Hardness	125
丑 20. Result of Inconel 718's Hardness with Same Laser Power(100W).....	125
丑 21. Result of Inconel 718's Hardness with Same Laser Power(150W).....	126
丑 22. Result of Inconel 718's Hardness with Same Laser Power(200W).....	126

1. 서론

1. 개요

최근 미국, 유럽, 일본 등 제조산업 선진국을 중심으로 제조업 혁신을 위한 3D프린팅 기반기술 및 응용기술 연구가 활발히 이루어지고 있다. 3D프린팅 기술은 3차원 스캔이나 3차원 모델링을 통하여 획득된 디지털 데이터를 적층 가공 방식으로 제작하는 가공기술이다 [1]. 3D 프린팅 기술은 단번에 맞춤형 제품을 생산할 수 있으며, 생산 비용과 소재 낭비를 크게 줄이는 동시에 사용자 만족도와 기업 이윤을 크게 향상할 수 있다 [2].

최근에는 ASTM 규정에 의해 3D 프린팅은 AM(Additive Manufacturing)공정으로 새롭게 명명됐다 [3]. ASTM에 의해 AM은 크게 7가지 방식으로 구분이 되는데 Vat Photo polymerization, Material Jetting, Material Extrusion, Powder Bed Fusion, Binder Jetting, Sheet Lamination, Directed Energy Deposition으로 나누어진다 [4]. AM 공정 중 특히 PBF(Powder Bed Fusion)공정은 항공우주 산업이나 자동차 산업, 원자력발전 산업 등의 분야에서 널리 적용되고 있다. PBF 공정은 고분자 또는 금속 소재 등 다양한 분말 소재를 일정한 높이로 적층한 후 고출력 레이저를 주사하여 소결하는 방법으로 타 공정보다 강도 및 경도가 우수하고 고온에서 사용 가능한 기능성 부품을 제작할 수 있는 특징을 가지고 있다. 항공우주 및 원자력 연구 분야 등의 주요 산업 분야에서 내부 구조가 기하학적인 제품이나 엄격한 치수 정확성을 가진 부품 등 복잡한 부품이 많이 사용되고 있는데, PBF 공정은 이러한 부품들을 제조하는데 굉장히 적합하다. 하지만 PBF 공정은 고온 분위기에서 레이저를 사용함으로써 발생하는 낮은 치수 정밀도와 열변형 등 다양한 문제점을 안고 있다. 또한, 넓은 분야에 사용되는 점과 달리 사용되는 소재는

특정 금속 등으로 한정되어 있다 [5]. 이는 PBF에 사용되는 금속 분말 제조 기술의 난도가 높은 편이며, 합금마다 PBF에 적용되는 공정 조건이 다르기 때문이다. 이러한 문제점이나 어려움을 극복하기 위해 분말의 제조 및 특성에 관한 연구부터 시작하여 PBF에 사용되는 소재들의 공정조건에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 현재 대표적으로 사용되는 PBF용 분말 소재로는 타이타늄 (Titanium), 니켈 (Nickel), 코발트(Cobalt), 알루미늄 (Aluminum) 등의 비철 합금 금속과 마레이징강 (Maraging Steel), 스테인리스스틸(Stainless Steel) 등의 철 합금 금속이 있다 [6-10]. 앞서 말한 소재 중 AlSi10Mg와 Inconel 718은 3D 프린팅 산업에서 주요 소재로 여겨진다. AlSi10Mg는 Al을 Base로 하는 합금 계로 낮은 용점을 가지고 연성이 우수하다[11]. 이러한 장점은 AM 공정에서 높은 Laser Energy를 요구하지 않아서 생산비용을 절감할 수 있으며, 연성이 높아 열변형에 대한 문제점을 어느 정도 해결할 수 있다. [12]. Inconel 718은 Ni를 Base로 한 합금 계이며, Ni에 첨가되는 Cr, Mo 등과의 합금화를 통한 고용체 강화로 우수한 특성을 가진다. 특히 느린 석출 경화 속도로 인해 우수한 용접성을 가져 제품의 균열이 상대적으로 적게 발생하여 AM 공정에 주로 활용되고 있다[13, 14].

이번 연구에서는 Powder Bed Fusion 방식으로 AlSi10Mg와 Inconel 718 시편을 제조하였으며, 각 시편의 Laser Power 및 Laser Speed는 다르게 하여 설정하여 제조하였다. 다르게 설정된 Laser Condition이 시편의 미세조직 및 기계적 특성에 어떠한 영향을 주는지에 대해 분석해보고, 가장 우수한 특성을 가지는 시편의 Laser Condition을 선정하여 추후 완성된 부품에 적용해 제품의 특성 향상의 가능성에 대해 살펴보고자 한다.

2. 이론적 배경

2. 1. Additive Manufacturing

2. 1. 1. Additive Manufacturing 개요

플라스틱 소재를 이용하여 제품 모형을 제조하는 Rapid Prototyping 기술로 출발한 3D 프린팅 기술은 3D 프린팅용 금속 분말의 공급이 가능해지면서 급기야 분말 사출성형과 같은 기존의 실형 상 PM 기술과 경쟁기술로 대두되고 있다. 국내에서 3D 프린팅 기술로 통용되는 이 기술은 국제적으로 Additive manufacturing(적층 제조)으로 표준화되고 있다 [3]. AM(Additive Manufacturing)은 입체의 재료를 기계 가공 및 레이저를 이용하여 자르거나 깎는 방식으로 제품을 생산하는 절삭가공(Subtractive Manufacturing)과 반대되는 개념으로서 레이어마다 재료를 추가하여 제품을 제조하는 공정을 통칭한다 [15]. AM 은 모델과 프로토타입의 제품 제조에 제한되어 사용되는 RP(Rapid Prototyping)에서 이어졌으며 이는 수년 동안 모든 Layer Additive Manufacturing 공정을 지칭하는 용어였다. 하지만 재료, 프로세스 및 장비의 발전으로 인해 충분한 기계적 특성을 가진 부품을 생산할 수 있게 되었으며, 이처럼 최종 부품에 사용되는 적층 제조 공정을 RM (Rapid Manufacture)이라 칭하였다. RM 은 이전에 프로토타입의 제조에 사용되는 RP 와 완전히 구분되어 사용되었으나, 이제는 AM 이 일반적인 용어이고 RP 와 RM 은 AM 기술의 각각의 응용을 설명하는 데 사용된다 [16].

2. 1. 2. Additive Manufacturing 기술

ASTM 위원회 F42는 AM 공정을 표준으로 하였고, 크게 광중합(Vat photopolymerization), 재료 압출(Material Extrusion), 재료 분사(Material Jetting), 접착제 분사(Binder Jetting), 분말 적층 용융(Powder Bed Fusion), 고에너지 직접 조사(Direct Energy Deposition), 판재 적층(Sheet Lamination)의 7가지 기술로 분류하였다 [17]. 이는 재료의 종류와 적층 방식 및 에너지 소스 등에 따라 다양하게 기술유형을 분류한 것이다. 아래 7가지 AM 공정 기술을 나열하였다 [15, 18-21].

○ 광중합 방식

Vat photopolymerization은 크게 SLA (Stereo Lithography Apparatus)와 DLP (Digital Lighting Process)로 나눌 수 있다. SLA는 액상 수지의 재료를 레이저를 사용하여 경화하는 방식이다. 최초의 3D 프린팅 기술이며, 전 세계적으로 가장 많이 사용되었던 방식이기도 하다. 별도의 서포트 재료를 사용하지 않고 미세 형상의 기둥이 서포트 역할을 한다. 미세한 형상의 구현이 매우 좋으며, Sharp Edge의 형상 구현이 매우 좋다. DLP는 광경화성 액상 수지를 사용하며, 백만 개 이상의 작은 거울이 반사하는 빛으로 광경화성 수지를 고형화 하는 방식이다. 뛰어난 미세형상 능력을 자랑하나, 파트가 커질수록 해상도가 떨어지면서 치수정밀도는 떨어진다 [15].

○ 재료 압출 방식

필라멘트 타입의 폴리머 재료를 용융 헤드를 통하여 압출하여 적층 하는 방식으로 일반적으로 FDM(Fused Deposition Modeling)로 알려져 있다. 가는 실(필라멘트) 형태의 열가소성 물질을 노즐 안에서 녹여 얇은 필름 형태로 출력하여 적층 하는 방식이다.

노즐은 플라스틱을 녹일 수 있을 정도의 고열을 발산하며 플라스틱은 상온에서 경화된다. 다양한 폴리머 소재 적용이 가능하며 단순한 구조로 인해 대형화에 용이하고 다양한 산업 분야에 적용할 수 있다. 하지만 제작 속도가 느리며 경화 시 소재의 흘러내림을 방지하기 위한 서포터가 필요하여 산업용으로 쓰이기보다는 개인용 혹은 가정용으로 활용이 국한되어 있다. 하지만 리니어 모션 컨트롤의 정밀도에 따라 표면 조도의 개선은 가능하다 [19].

○ 재료 분사 방식

이 방식은 실제 형상을 이루는 재료를 일반 2차원 종이 인쇄처럼 분사함으로써 단면을 제작하는 방식이다. 이 분사 기술의 핵심은 액적(Droplet)을 형성하는 방법이며, 이는 크게 가열을 통한 버블제트(Bubble-jet) 방식과 피에조 액추에이터를 이용하는 방식이 있다. 이 기술의 장점은 2차원 종이 인쇄에서 여러 개의 잉크를 동시에 사용하는 것처럼 여러 종류의 폴리머를 동시에 사용하여 다양한 소재 및 이들의 복합재료를 프린팅 할 수 있다는 것이다. 젤 형태의 광경화성 수지를 프린팅한 다음 곧바로 자외선을 이용하여 최종 경화한다. 복잡한 형상을 제작하기 위해서 서포트 재료가 동시에 프린팅이 되며, 형상 제작이 완료된 다음에 Water jet과 같은 방식으로 이 재료들을 제거한다 [18].

○ 접착제 분사 방식

노즐에서 액체 상태의 컬러 잉크와 경화 물질을 분말 원료에 분사하여 적층 하는 방식으로 컬러 잉크를 사용할 수 있어서 조형물에 다양한 색감을 입힐 수 있는 특징이 있다. 제조 시간은 비교적 짧은 편이나 출력 후 별도의 분말 제거와 표면처리가 필요하여 후공정 작업 시간이 소요된다 [21]. 후공정 작업에서 분말을 경화하여 제품의

형상을 만들기 위해 분사한 Binder를 제거해야 하며, 이후 일반적인 분말공정 중 하나의 과정인 소결 공정을 거쳐 기계적 특성을 가지게 된다.

○ 분말 적층 용융 방식

금속이나 폴리머 분말이 들어가 있는 체임버 내에서 높은 열 에너지원(레이저)을 이용하여 선택적으로 소결 및 용융하여 형상을 제조하는 방식으로 SLS나 SLM으로 많이 알려져 있다. PBF는 베드에 얇게 적층된 분말에 원하는 형상에 맞게 선택적으로 레이저를 조사, 소결하고 다시 분말을 도포하는 공정을 반복하여 적층 하는 방식이다. 소결되지 않은 주변의 분말이 적층 시 제품을 지지해주는 서포터 역할을 동시에 하여 따로 서포터 제작이 필요 없으며, 조형 속도가 빠르고 다양한 응용 분야 및 활용 가능한 장점이 있다. 하지만 레이저와 같은 고가의 부품이 사용되며 금속 재료 활용 시 표면 처리 공정이 필요하고 사용 재료에 따라 가열 온도와 레이저 변수를 조절해야 하므로 세팅 공정 최적화 작업이 어려운 단점이 있다 [18].

○ 고에너지 직접 조사 방식

이 방식은 금속 분말을 노즐을 통해서 특정 위치로 분사를 시키고 이를 레이저 빔으로 용융하여 적층 하는 방식이다. Powder Bed 방식보다 노즐 및 레이저의 위치 이동의 수월성 때문에 가공의 자유도가 뛰어나다. 예를 들면, Powder Bed 방식에서 기존 부품을 보수하기가 쉽지 않았지만, 이 방식에서는 기존 부품의 크랙 및 손상이 있는 부분을 쉽게 수리할 수 있다 [18]. DED는 분말소재를 가스와 함께 일정하게 주입시키고 재료가 접합부에 닿는 지점에 높은 에너지의 레이저 빔을 쬐서 완전히 녹여 접합을 하기 때문에 기공이 거의 없고 강도 또한 우수한 편이다. 용융 접합이 되는 동안 산화를 막고

접합성을 높이기 위해 차폐가스가 노즐 주변에서 유로를 형성하는데 주로 아르곤 가스를 사용한다.

○ 판재 적층 방식

모델의 단면 형상대로 절단된 점착성 종이, 플라스틱, 금속 라미네이트 층 등을 접착제로 접하여 조형하는 방식이다. SL을 사용하게 되면 제조 비용을 큰 폭으로 감소시킬 수 있으며 목재 재질의 조형물과 대형 제품 제작이 가능하다. 하지만 내구성이 약하며 정밀도 및 표면 조도가 미흡하고 색상 재료, 투명 재질, 유연성 재료의 선택이 불가능하다는 단점이 있다.

Table 1. Classification and Characterization of AM Processes [22]

Process category	Material	Application	Technologies
Vat Photopolymerization	<ul style="list-style-type: none"> • Polymer • Ceraminc 	<ul style="list-style-type: none"> • Prototyping • Functional testing • Tooling patterns • Detailed parts • Presentation model 	<ul style="list-style-type: none"> • Stereolithography • Digital light processing • Paste polymerization
Material extrusion	<ul style="list-style-type: none"> • Polymer • Ceraminc • Metal • Composite 	<ul style="list-style-type: none"> • Prototyping • Functional testing • Tooling patterns • Personal use 	<ul style="list-style-type: none"> • Fused deposition modeling • Cold spray
Material jetting	<ul style="list-style-type: none"> • Polymer • Ceraminc • Metal • Composite 	<ul style="list-style-type: none"> • Concept model • Limited functional testing • Colored design models 	<ul style="list-style-type: none"> • Multi-jet modeling • Nano particle jetting
Binder Jetting	<ul style="list-style-type: none"> • Polymer • Ceraminc • Metal 	<ul style="list-style-type: none"> • Prototyping • End use parts • Casting/forming 	<ul style="list-style-type: none"> • 3D printing • Metal / Ceramic based binder jetting
Powder Bed Fusion	<ul style="list-style-type: none"> • Polymer • Ceraminc • Metal 	<ul style="list-style-type: none"> • End use parts • Functional testing • Rapid tooling • High-temperature applications 	<ul style="list-style-type: none"> • Seletive laser sintering / melting • Electron beam melting
Direct energy deposition	<ul style="list-style-type: none"> • Metal 	<ul style="list-style-type: none"> • End use parts • Functional testing • Rapid repair / overhaul • High-temperature applications 	<ul style="list-style-type: none"> • Laser welding • Electron beam welding
Sheet Lamination	<ul style="list-style-type: none"> • Polymer • Ceraminc • Metal • Composite • Paper 	<ul style="list-style-type: none"> • Form testing • Tooling patterns • Less detailed parts 	<ul style="list-style-type: none"> • Selective deposition lamination • Laminated object manufacturing

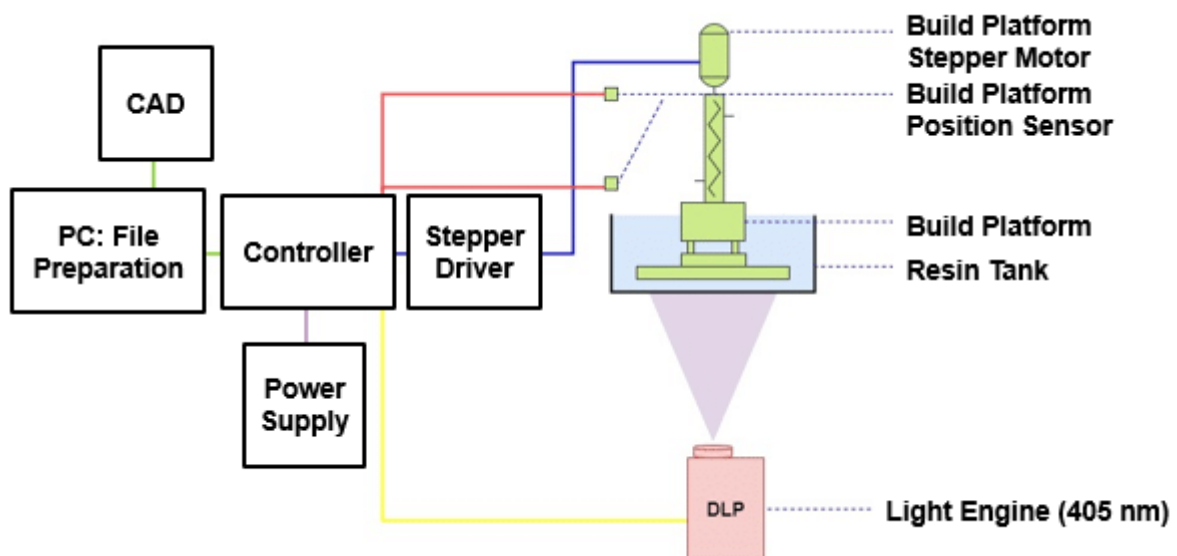


Fig 1. Schematic Diagram of Vat Photopolymerization [23]

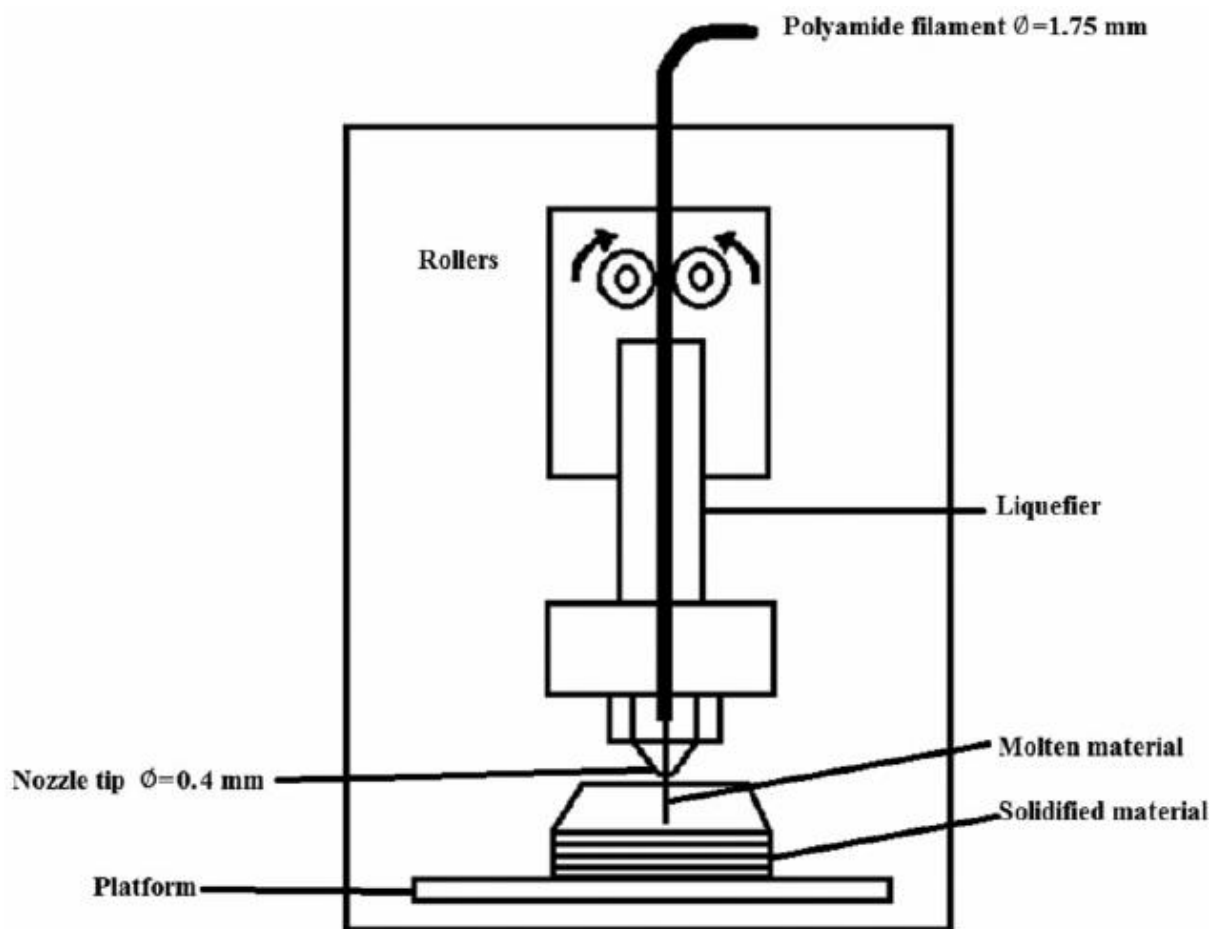


Fig 2. Schematic Diagram of Material Extrusion [24]

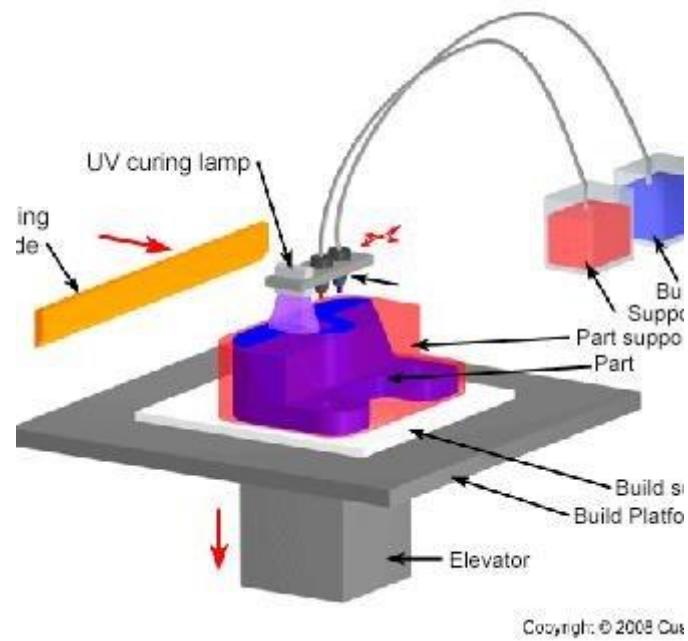


Fig 3. Schematic Diagram of Material Jetting [25]

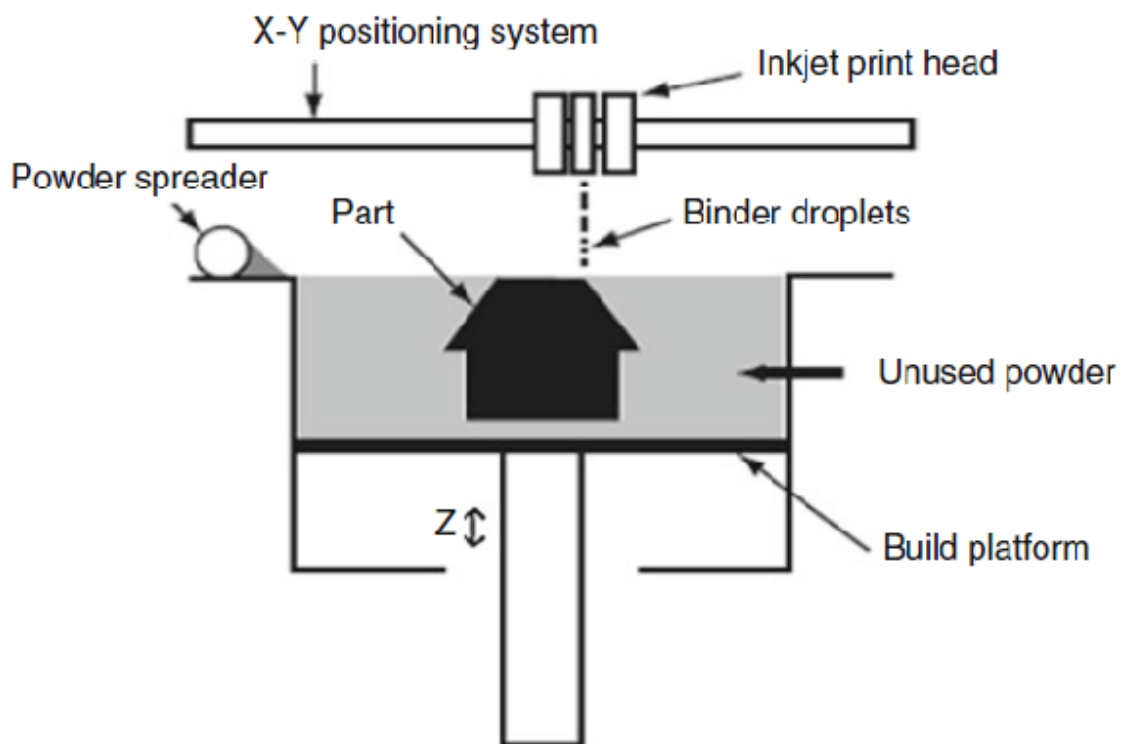


Fig 4. Schematic Diagram of Binder Jetting [26]

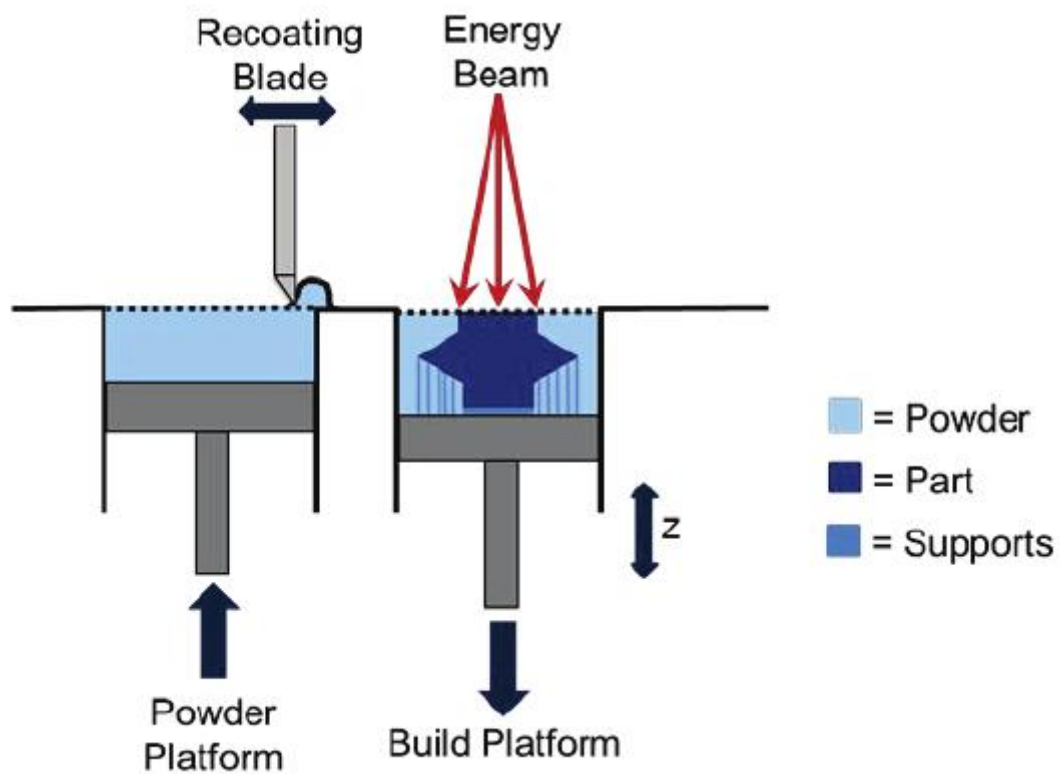


Fig 5. Schematic Diagram of Powder Bed Fusion [27]

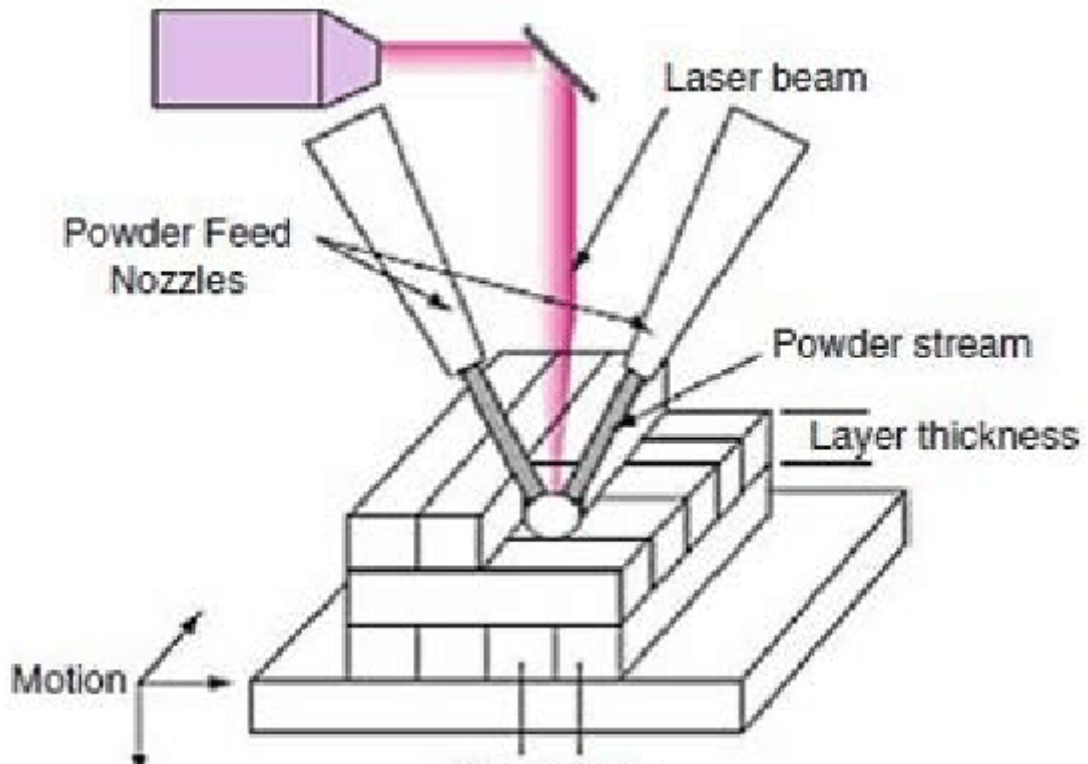


Fig 6. Schematic Diagram of Directed Energy Deposition [28]

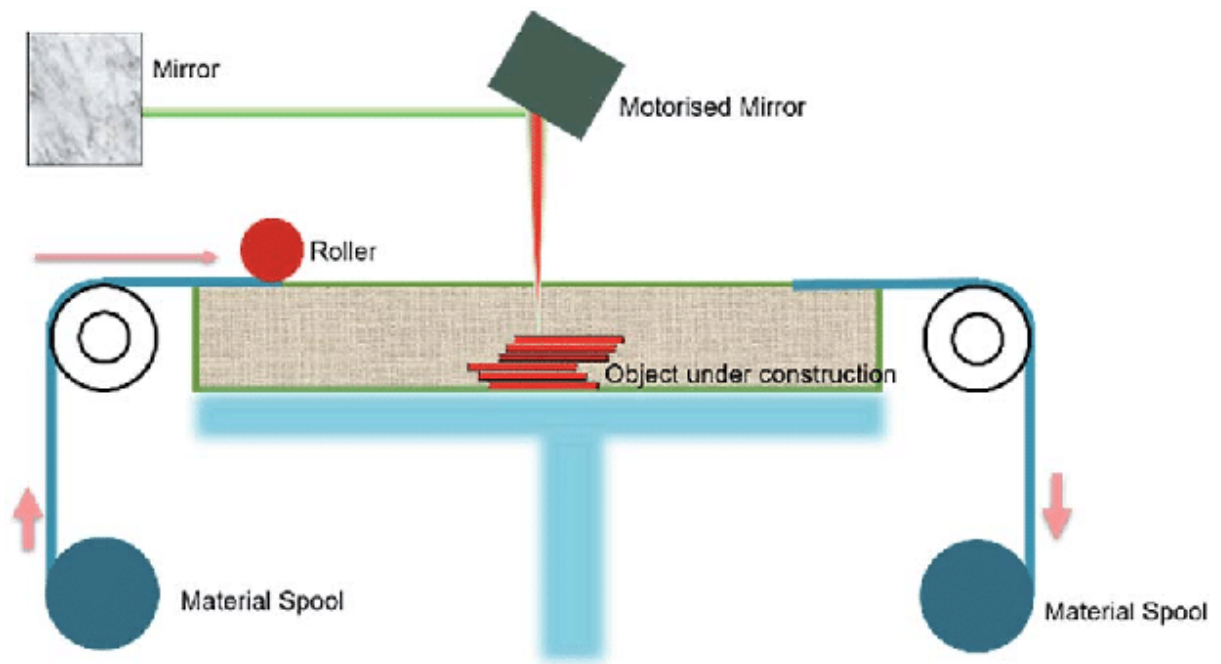


Fig 7. Schematic Diagram of Sheet Lamination [29]

2. 2. 분말 적층 용융

2. 2. 1. 분말 적층 용융 개요

PBF(Powder Bed Fusion)공정은 금속 AM 부품의 직접 생산을 위한 가장 일반적인 공정이다. 일반적으로 SLM(Selective Laser Melting) SLS(Selective Laser Sintering)로 많이 알려졌지만 최근 ASTM 위원회 F42 에 의해 규정된 AM 의 7 가지의 기술 중 Powder Bed Fusion 이라고 통합해서 칭하고 있다 [17]. PBF 는 광섬유 레이저 기술이 보급된 이후 SLS 에서 발전하였으며, 기업과 연구소에서 활발한 연구를 통해 지속해서 발전하고 있다. 그래서 이제는 분말 입자를 완전히 녹여서 이전 SLS 와 같이 성능이 떨어지는 소결 부품이 아닌 밀도가 높은 부품을 제조할 수 있다. 또한, 활발한 연구를 통해 스테인리스강, AISi10Mg, Ti64 등의 재료들이 PBF 에 사용되어 산업적으로 허용되는 기계적 특성을 가진 최종 부품에 사용될 수 있음을 확인하고 증명하였다. 현재 재료, 하드웨어, 기술 지식 및 PBF build 기술의 발전 이후 많은 산업체와 업계는 PBF 를 사용하여 완전한 기능을 갖춘 부품을 제조할 수 있다는 인식을 가지고 있다. 대표적인 예로 Dental crowns 와 같이 PBF 부품 생산에만 의존하는 몇몇 스피어아웃 회사들이 설립되기도 한다. PBF 를 활용하면 구성 요소 설계를 최적화하여 이전 제품의 기능을 넘어선 기능성을 창출해 낼 수도 있다고 생각된다. 그러나 PBF 기술이 RM 기술 범주에 포함되고 그 과정이 산업계에서 더 좋은 인식과 인정을 받기 위해서는 공정 변수에 관한 연구와 개발이 지속해서 이루어져야 한다. 또한, 연구 내용이 실제 산업 현장에서 적용이 가능하고 신뢰할 수 있어야 함은 물론이고 비용적으로도 효율적인 제조 기술이라는 것 역시 입증해야 할 필요가 있다 [16].

2. 2. 2. Powder Bed Fusion 원리

먼저 PBF(Powder Bed Fusion) 구조는 일반적으로 빌드룸(Build room)에 레이저를 주사하기 위한 레이저 제어부(Laser control part), 분말의 공급 및 이송을 위한 적층부(Lamination part), 분말 예열 및 워크룸(Work room)의 온도 분위기 제어를 위한 히팅부(Heating part), 워크룸의 소결 분위기 제어부(Sintering condition control part), 전체 시스템을 제어하기 위한 PC 기반의 통합 제어부(integration control pad) 등으로 구성된다 [5].

PBF 공정 역시 AM 공정에서 흔히 사용하는 .stl 파일이나 .amf 등의 부품을 설명하는 설계 파일을 디지털 방식을 통해 개별 Layer 로 분리하는 작업, 슬라이싱 (Slicing)이 필요하다. 슬라이싱한 설계 파일을 토대로 PBF 가 인식하여 공정을 진행하게 되는데 간단하게 분말을 적층부에 얇게 도포한 후 설계 파일에서 설계된 형상에 맞게 레이저 제어부에서 레이저를 분말의 상단 표면에 조사한다. 이렇게 한 층 (Layer)가 완료된 후, 적층부는 설정한 층두께 (Layer thickness)만큼 낮아지고, 새로운 분말을 적층부 위로 다시 도포하여 앞선 과정을 반복한다. 이렇게 부품을 직접 생산하는 동안 에너지 빔(레이저 빔 또는 전자빔)은 분말 입자를 녹이고 이 입자는 빔이 영역을 지나고 금속이 냉각되면 이전 층과 함께 융합된다. 이 과정이 반복되면 분말이 Layer 가 층층이 쌓여 거의 100%의 밀도를 가진 부품을 얻을 수가 있다.

가장 기본적인 수준에서 PBF 공정은 용해와 냉각에 관한 방식이다. 적층부에 어느 부분이 국소화된 가열과 용해에 의해 노출됐는지 아는 것은 결국 파트의 모양을 알 수 있게 해준다. 따라서 파트 내의 개별 지점의 온도에 대한 이력을 알면 그 지점과 주변의 미세구조, 잔류응력 및 기타 특성에 대해 알 수 있을 것이며 이러한 특성은 제품이

요구하는 조건에서 부품의 성능을 좌우할 것이다. 이처럼 PBF 공정에서 온도를 측정하는 것은 매우 중요하다 [27].

2. 2. 3. 분말 적층 용융 연구 및 분석

PBF 는 여전히 신기술로 여겨지고 있으며, 재료와 제품의 기계적 특성 및 공정 발전에 대한 연구로 인해 끊임없이 발전하고 있다. 그래서 대부분의 연구는 대학과 협력하여 PBF 공정을 개발하는 동안 발표되었는데, 이를 통해 결과적으로 상업용의 PBF 장비를 출시할 수 있었다. 대학 기반의 연구 외에도 생물/의학, 항공/우주 등의 여러 산업에서도 이미 사용되고 티타늄, 알루미늄 및 다양한 철 합금 등의 소재를 PBF 공정을 통해 복잡한 부품을 직접 제조할 수 있다는 장점을 토대로 PBF 는 해당 산업에서 실행 가능한 공정으로 인식되고 있다. 하지만 PBF 장비 공급업체들은 잠재적으로 가치가 있는 지적 재산을 보호하고 있기 때문에 사내 연구는 보통 기밀이며 다른 연구 분야보다 출판된 문헌이 제한되어 있다.

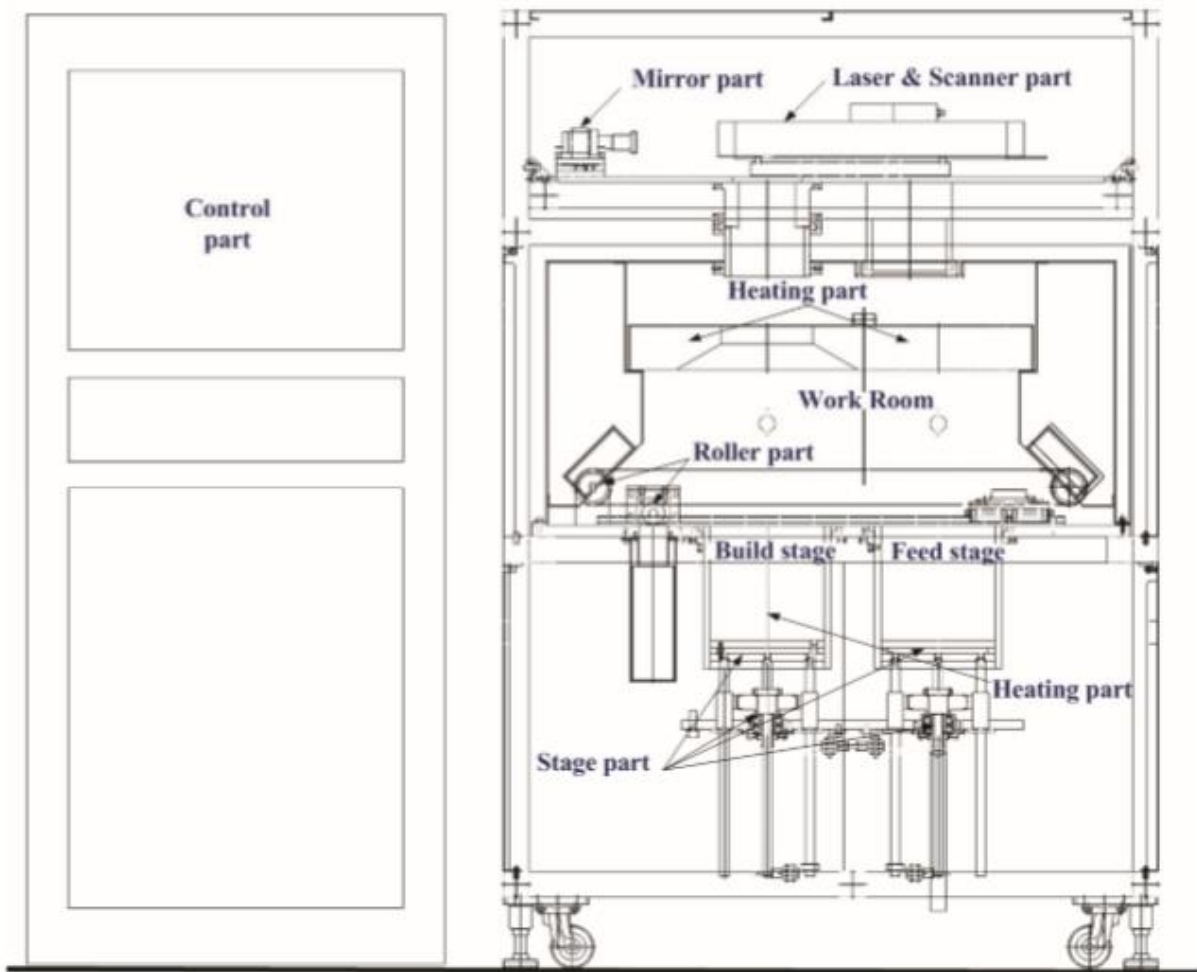


Fig 8. Schematic Diagram of Powder Bed Fusion System [5]

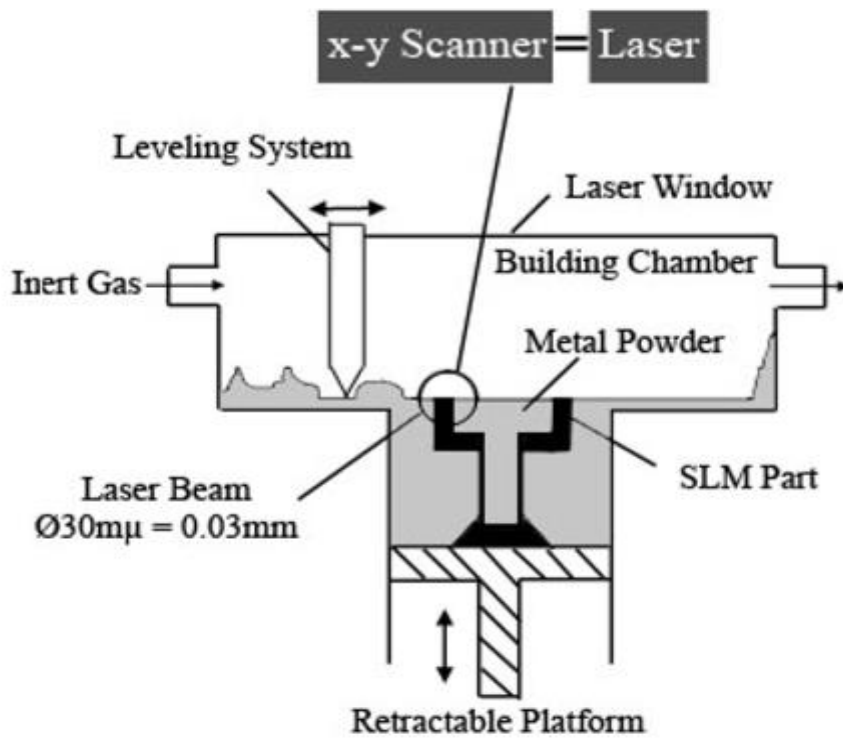


Fig 9. Schematic Diagram of the SLM Process [16]

CRITERIA	POWDER BED FUSION
Schematic Diagram	<p>The 3D schematic shows a 'Laser' and 'Scanner' positioned above a 'Coater' that deposits 'Powder supply' onto a 'Melting area'. 'Powder overflow' is shown on the right side of the build area.</p>
Build speed	5-20 cm^3/h (~40-160 g/h)
Accuracy	+/- 0.02-0.05 mm/25 mm
Detail capability	0.04-0.2 mm
Surface quality	Ra 4-10 μm
Max. part size	800 mm \times 400 mm \times 500 mm
Materials	Steel, Al,Ti, CoCr, Ni base alloy, bronze
Typical application	Molds and die(tool inserts), Implants All types of component

Fig 10. Characteristics of Powder Bed Fusion Process [30]

2. 3. AM 적용 합금

2. 3. 1. AM 금속 분말

PBF 용 금속 분말은 구형을 사용하며 제조방식은 Gas Atomization 으로 제조하는데 고주파로 봉재의 금속을 가열 후 가스를 분사하는 EIGA(Electrode Induction Melting Gas Atomization), 와이어를 공급하여 플라즈마로 가열하여 분사하는 방식, 봉재를 고속으로 회전하며 플라즈마를 가열하는 방식 등이 구형화 분말제조에 유리하여 주로 사용된다. 생산되는 구형 분말의 크기는 제조회사마다 차이가 있으나 Conceptlaser 및 EOS 의 경우 25~555 μm 를 사용하는 것으로 알려져 있다. 분말에 대한 요구 조건은 구형화의 정도, 유동도, Tap Density, 산소 및 질소 농도 등 매우 까다로운 편이다.

또한 PBF에 사용될 수 있는 금속은 많지 않고, 잉곳 등 원소재에 비해 20~30 배로 가격 또한 비싸다. 그 이유는 분말 제조 기술의 난이도가 높고 합금마다 적층 조건이 달라 현재 시장확대가 되지 않았기 때문이다. 현재 사용되는 금속은 순수 Ti 및 그 합금, 스테인리스 합금류, 알루미늄 합금, Fe-Cr-Ni 강, 마르에이징강, Inconel 초내열합금, 귀금속 등에 제한적으로 사용되고 있다 [30].

2. 3. 2. AlSi10Mg

Al-Si 계 합금은 유동성이 우수하고 열 전도성이 높고 열팽창 계수가 낮아 주조성이 우수하다는 특징이 있으며, 이러한 특징 때문에 최근 PBF 에 사용하는 알루미늄 합금 중 대다수가 Al-Si 계 합금이다 [31]. 또한 알루미늄이 가지고 있는 경량화 금속이라는 특징과 앞서 언급한 특징들의 매력적인 조합으로 인해 Al-Si 계 합금은 자동차, 항공우주 및 다양한 산업에서 많은 용도로 사용되고 있다 [32]. 이 중에서 특히 AlSi10Mg 합금은

AM 공정에 가장 일반적으로 사용되는 합금으로 소량의 Si 와 Mg 를 첨가하여 강도 및 기계적 특성을 증가시킨 알루미늄합금이다. AlSi10Mg 는 Al-Si-Mg 계 나타나는 아공정 합금(Hypoeutectic alloy)으로 가공의 용이성이 좋으며 좁은 고용도 범위 때문에 AM 에 적합하다고 판단된다. AlSi10Mg 합금은 기계 부품, 로커 암, 타이밍 기어, 컴프레서 케이스, 연료 펌프, 에어 컴프레서 피스톤, 항공우주 부품, 고속 회전 부품, 크랭크 케이스 및 엔진 냉각 팬의 제작 등에 사용된다 [33]. AlSi10Mg 는 6,000 계에 속하는 알루미늄 합금으로 일반적으로 조성비는 9.96% Si, 0.15% Fe, <0.005% Cu, <0.005% Mn, 0.35% Mg, <0.005% Zn, <0.05% Pb, <0.004% Ti 로 알려져 있다 [34].

2. 3. 3. Inconel 718

Inconel 718 은 상온에서 높은 강도, 우수한 내식성 및 내산화성, 그리고 높은 크리프 및 피로 저항을 가지는 Ni 계 초합금이다. Inconel 718 은 Ni 계 초합금 중에서 가장 활용도가 높은 합금이며, 일반적인 산업현장에서 용접을 하고 열처리를 하여 사용된다. Inconel 718 의 또 다른 특징 중 하나가 바로 용접 후 내부에 남아 있는 잔류 응력에 의해 발생하는 균열에 대한 저항성이 높으며 용접성 또한 우수하다 [35]. Inconel 718 은 앞서 말한 높은 고온 강도와 우수한 내식성이라는 장점이 있어 항공우주 산업, 가스 터빈 엔진의 고온 파트, 컴버스터, 터보차저 로터 등 다양한 부식환경 및 700°C 까지의 구조물이나 부품 등에 사용되고 있다 [36, 37].

Table 2. Measurement Methods and Requirement for Additive Manufacturing Metal Powder [30]

Requirement	Why	Measurement
Spherical Shape	How packing Layer, Surface area and Low porosity	SEM, BET analysis
Flwoability		Hall Test : ASTM 8214 MPIF 03 Carney Test : ASTM B964
Low porosity	Sound Microstructure	SEM
Particle Size	Uniform Melting	SEM, Laser Diffraction
Purity	Low Oxygen and Nitrogen Contents	ON Analyzer
Tap to Apparent Density Ratio	Powder Packing	Hausner or carr, Tapped density tester
Chemical Composition	Uniform Mecahnical properties	ICP-OES, XRD

Table 3. Metal Powder and Applications for Additive Manufacturing [30]

Requriment	Why	Measurement
MaraingSteel MS1	18 Mar 300/1.2709	Injection moliding series tooling; Engineering parts
StainlesSteel GP1	Stainless steel 17-4/1.4542	Functional prototypes and series parts; Engineering and medical
StainlessSteel PH1	Hardenable stainless 15-5/1.4540	Functional prototypes and series parts; Engineering and medical
NickelAlloy IN718	Inconel TM 718, UNS N07718, AMS 5662, W.Nr 2.4668 etc.	Functional prototypes and series parts; Engineering and medical
NickelAlloy IN625	Inconel TM 625, UNS N06625, AMS 5666F, W.Nr 2.4856 etc.	Functional prototypes and series parts; High Temperature turbine parts etc.
CobaltChrome MP1	CoCrMo superalloy, UNS R31538, ASTM F75 etc.	Functional prototypes and series parts; Engineering and medical
CobaltChrome SP2	CoCrMo superalloy	Dental restorations
Titanium Ti64	Ti6Al4V, TiAl6V4 ELI	Functional prototypes and series parts; Aerospace, motor sport etc.
Aluminium	AlSi10Mg, AlSi12	Functional prototypes and series parts; Engineering and automative etc.
ETC	CI 80Cu(Bronze), Tellow gold(18 carat), Silver alloy(930 sterling)	Arts and Jewelry

Table 4. Mechanical Properties of Metal Materials for Additive Manufacturing [30]

Materials	Condition	T.S [Mpa]	Y.S [Mpa]	Elong.[%]
Aluminium AlSi10Mg	As built	280-355	235-250	1-3
Aluminium AlSi12	As built	310-325	170-220	2-3
Tool steel 1.2709	Heat-treater	1900	1800	2-3
Tool steel 1.2083 (stainless)	Heat-treater	1700	1600	>2
Stainless steel 1.4404	As built	570	470	>15
Titanium TiAl6V4	Heat-treater	1060-1120	980-1040	10-18
Cobalt-Chrome ASTM F75	As built	1100-1350	910-1010	8-13
Nickel-base alloy Inconel 718	As built, at 20°C	1400	1100	10

Table 5. Composition of the AlSi10Mg Alloy [34]

Element	Weight Percentage
Si	9.96
Fe	0.15
Cu	<0.005
Mn	<0.005
Mg	0.35
Zn	<0.005
Pb	<0.05
Ti	<0.004

Table 6. Composition of the Inconel 718 Alloy [38]

Element	C	Mn	Si	Ti	Al	Co	Mb	Cb	Fe	Cr	Ni
Percentage	0.08	0.35	0.35	0.6	0.8	1.0	3.0	5.0	17.0	19.0	52.82

Table 7. Mechanical properties of Inconel 718 Alloy [38]

Ultimate Strength (Mpa)	Yield Point (Mpa)	Elongation (%)	Hardness (HRC)
1260-1390	1041-1160	14-19	40-45

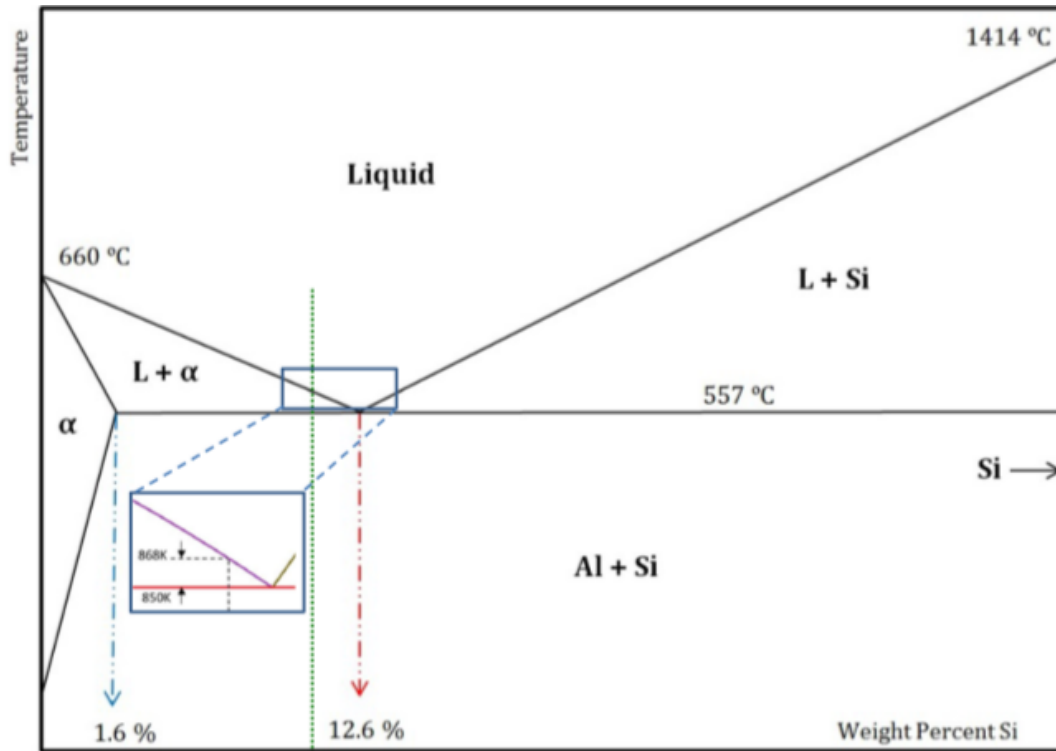


Fig 11. Al-Si Phase Diagram and the Position of AlSi10Mg Alloy [33]

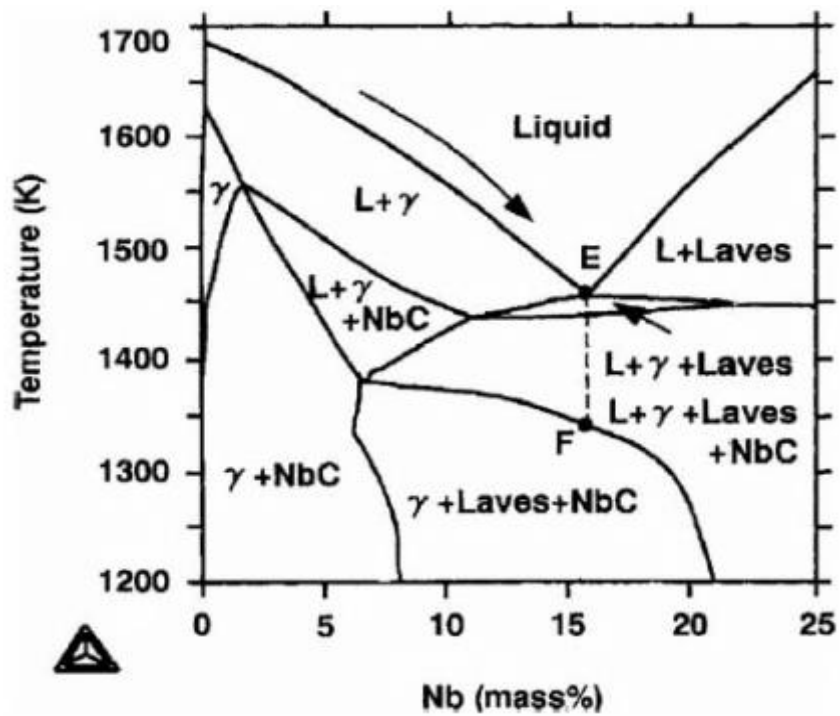


Fig 12. Phase Diagram of Inconel 718 Alloy Calculated on the Basis of Thermo-Calc [39]

2. 4. Powder Manufacturing

2. 4. 1. 급속 응고 현상

일반적으로 금속재료의 성질은 응고 조직에 따라 크게 변화한다. 즉, 응고 시에 형성된 결정립의 크기나 석출물의 종류와 크기 및 분포 등은 주조제품은 물론, 단조나 압연 등의 2 차 가공 후까지 영향을 미치게 되어 최종제품의 성질을 지배하게 된다. 따라서 기존 합금계에서는 용융 및 응고 과정을 거치는 공정에서 발생할 수 있는 편석이나 조대한 금속 간 화합물의 형성을 피하도록 합금을 설계하여 왔으나, 요즘에는 이를 해결하기 위한 수단으로 하나로 금속 응고법이 연구되고 있다.

급속응고 현상에 대한 연구는 1960년대 초 P.Duwz 에 의해 시작되었고, 또한 멜트 스피닝법 등으로 급속응고 소재를 대량생산할 수 있게 됨에 따라 급속 응고법은 학문적으로나 공업적으로 새로운 장르를 형성하게 되었다.

급속 응고된 재료는 서냉 응고된 재료와 비교할 때 다음과 같은 특성을 보이게 된다.

- ① 결정립 미세화: 액상에서의 냉각속도가 커지면 핵이 생성될 때까지의 과냉도가 증가하여 핵의 생성 속도는 증가하는 반면, 결정립의 성장 속도가 감소하게 되므로 극히 미세한 결정립을 얻게 된다.
- ② 편석의 감소: Fleming 등에 의해 연구된 바에 따르면 서냉 응고될 때 2 차 수지상 간의 간격은 용질 확산과 고상-액상 간의 계면 에너지에 의해 응고 시간이 지연됨에 따라 점차 조대해지며, 이러한 현상에 의해 수지상 간의 미세편석의 정도가 결정된다고 한다. 따라서 냉각속도가 빠르면 응고 시간도 단축되므로 수지 상간의 간격이 조밀히 되어 편석이 감소한다.

③ 고용도의 증가: 급속응고 시에는 고상-액상 계면의 전진 속도가 상당히 크기 때문에 용질포획(Solute Trapping) 현상에 의하여 고상에 용질 원자가 평행고용도 이상으로 고용된다. 이와 같은 과포화 고용체는 시효처리에 의해 미세한 석출상을 균일하게 분포시킬 수 있을 뿐 아니라, 석출상의 부피 분율이 증가하기 때문에 석출경화 효과가 매우 커지게 된다.

현재까지 개발된 급속 응고법에는 여러 가지가 있으나, 금속냉각 매체를 이용하는 멜트스피닝법과 기체나 액체 등의 냉각 매체를 사용하는 분무법이 주로 이용되고 있다. 멜트스피닝법으로 제조한 리본 재료는 가스 분무법으로 제조한 분말 재료보다 냉각속도가 월등히 높아서 급속응고 특성이 우수한 것으로 판명되고 있다. 그러나 급속응고재를 실용화하기 위해서는 급속응고재를 성형하여야 하는데, 리본이나 판상의 급속응고재는 파쇄과정을 거쳐야 미세한 분말로 제조하여야 하는 번거로움이 뒤따르고, 또한 파쇄과정에서 재료가 오염되거나, 파쇄된 분말의 형상이나 입도가 성형에 적합하지 못하다는 등의 단점이 있다.

2. 4. 2. 가스 분무법(Gas atomization)

가스 분무법은 용융 금속을 고속으로 분무 되는 가스를 이용하여 고속 분무하여 작은 크기의 액적으로 만든 다음 액적을 그대로 응고시키는 방법이다. 가스 분무법의 원리는 다음과 같다. 노즐에서 방출되는 고속 가스는 용융 금속을 가스 팽창 영역으로 밀어내면서 흡입영역을 만든다. 높은 가스 분사 속도는 금속을 분쇄하여 미세한 용탕 액적으로 만들어낸다. 회수 챔버에서 비행하는 동안 액적은 열을 손실하고 응고하게 된다. 고온의 금속에 대해서는 밀폐되고, 산화를 방지하기 위해 불활성가스로 채워진

챔버가 사용된다. 설계에 있어서 가스제트는 용탕 줄기 주위로 등글게 배열된 여러 개의 노즐에 의해서 분사된다. 분무에서 사용된 가스의 부피로 인해 역압(Back Pressure)을 피하고자 가스를 배출시키는 것과 수직형 불활성 가스 분무기와 같은 제한된 챔버에서 사이클론 분리기를 설치하는 것은 중요한데, 이는 가스를 배출시키고 미세한 분말은 남게 하는 역할을 한다. 챔버 크기의 경우 가장 큰 입자가 벽에 충돌하기 전에 응고시키기 위해서 충분히 커야 한다.

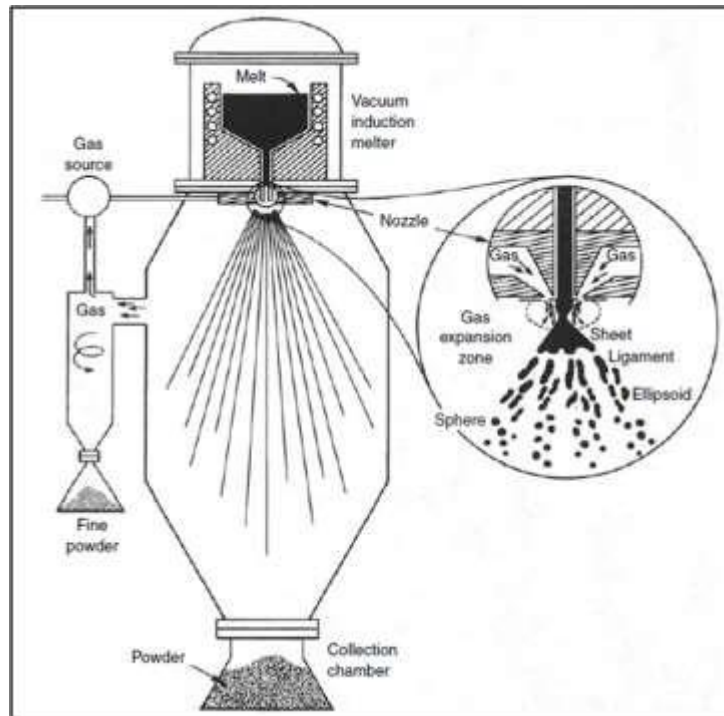


Fig 13. Schematic Diagram of Gas Atomization [38]

3. 실험방법

3.1 원료분말

본 연구에서는 질소 분위기에서 가스 분사법(Gas Atomization)을 이용하여 제조된 AlSi10Mg 분말과 Inconel 718 분말을 사용하였다. PBF 공정에 사용이 적합한 분말인지 알아보기 위해 분말의 크기 및 형상, 단면 미세조직, 위성 분말의 유무, 겉보기/탭 밀도, 유동도 등을 추가분석 하였다. 또한 소재에 대한 정보를 분석하기 위해 XRD, DSC 등의 분석도 하였다. 분말의 형상 및 위성 분말의 유무는 주사전자현미경(Scanning Electron Microscope, SEM) 장비를 통해 관찰하였으며, 분말의 단면은 광학현미경(Optical Microscope, OM) 장비를 통해 관찰하였다. 분말의 크기 및 입도 분석은 Laser Scattering Particle Size Distribution Analyzer LA-960 장비로 시험 규격은 ASTM B822에 따라 분석하였다. 겉보기/탭 밀도와 유동도는 각각 ASTM B212-99와 ASTM B213-97에 따라 분석을 진행하였다. 밀도와 유동도는 동일한 Hall flowmeter 장비를 사용하였으며, 외부 요인이나 진동에 민감한 장비이기 때문에 충격이 전혀 없는 안전한 곳에서 실험을 하였다.

3.2 실험장비

본 연구에서는 Winforsis 사의 Metalysis 150E 장비를 사용하였다. 사용 장비는 Powder Bed Fusion 방식의 AM 장비이며 CO₂ Laser를 사용하고, Laser Wavelength는 1,075nm, Laser power는 200W이다. Output power의 경우 10~100%까지 조절이 가능하며, Beam Spot의 경우 70~150 μ m의 범위내에 있다. Scanner Positioning speed는 7m/s이며, 챔버의 온도는 40~80 $^{\circ}$ C까지 조절이 가능한 장비이다. 공정분위기는 질소와 아르곤 분위기를

선택해서 사용할 수 있으며 완성품의 크기는 150x150x150mm이다. 결과적으로 Fast Beam Positioning과 고속도, 고정밀, 고자유도 시스템을 구현할 수 있어 레이저 빔의 이동 시 고속이동을 통한 빔 이동 손실시간을 최소화하여 공정시간을 단축할 수 있다.

3.3 공정 설정

PBF 공정에서 제작 구조물 특성에 영향을 미치는 주요 공정조건을 Table 9에 요약하였다 [28]. PBF 공정에서 상대적으로 특성에 미치는 영향이 큰 Laser power, Laser speed, Thickness of layer, Hatching size, Point size는 Fig 15에 도식화해서 나타냈다. 앞에서 열거한 공정변수와 파우더에 공급되는 에너지 밀도와의 관계는 아래의 한가지 parameter로 정의할 수 있다 [40].

$$E = \frac{P}{udh} \quad (1)$$

이때 E는 에너지 밀도(J/mm³)를, P는 레이저 파워(W)를, u는 레이저 스피드(mm/s)를, d는 레이어의 두께를(mm)를, h는 해칭 사이즈(mm)를 의미한다. 식(1)과 같이, 에너지 밀도는 금속 파우더의 용융 상태를 예측하기 위한 가장 중요하면서도 간단한 형태의 식으로 정의할 수 있지만, 실제 공정의 복잡한 현상을 이해하기에는 충분하지 않다. 각 파라미터가 용융 현상에 미치는 영향이 다양하므로 파라미터의 조건에 따른 물성 특성을 시험적으로 접근하여 분석하는 방안이 병행되어야 한다 [41].

본 연구에서는 Laser Power와 Laser Speed가 가장 중요라 생각하고 공정변수라고 생각하여 다양한 조건을 설정하여 시편을 제조하였다. Layer Thickness, Hatching Size,

Spot size 변수는 일반적으로 장비마다 설정된 고유의 고정변수이다. 시편 제작에 사용한 Metalysis 150 장비의 Layer Thickness는 $30\mu\text{m}$, Hatching size는 $70\mu\text{m}$, Spot size는 $0.0021\mu\text{m}^2$ 로 설정되어 있으며, AlSi10Mg와 Inconel 718의 Laser Power와 Laser Speed 공정 변수는 Table 10와 Table 11에 설명하였다. Table 12와 Table 13에는 AlSi10Mg와 Inconel 718의 에너지 밀도를 정리해 두었다.

3. 4 분말 분석

PBF 공정은 DED와 까다로운 조건을 가진 분말이 사용된다. 기본적으로 분말의 형상은 구형이어야 하며 분말의 크기는 일반적으로 $15\sim 60\mu\text{m}$ 의 범위의 것을 사용한다. 분말의 형상과 단면 조직을 확인하기 위해 광학현미경과 주사전자현미경을 사용하였으며, 분말의 크기를 분석하기 위해 LPSD를 사용하였다. 이외에도 Hall Flowmeter를 이용하여 걸보기 밀도와 탭 밀도 및 유동도 측정을 하였다. 이때 분석한 탭 밀도를 걸보기 밀도로 나눈 값을 구할 수 있는데 이는 Hausner Ratio라 하며, 해당 분말이 PBF에 적합한지 구분할 수 있는 척도가 된다. 분말을 구성하는 원소들을 파악하고 해당 원소가 가지고 있는 상을 확인하기 위해 XRD 분석을 실시하였다. XRD 분석은 X선을 결정에 부딪히게 하면 그중 일부는 회절을 일으키는데 그 회절각과 강도는 물질 구조상 고유한 것으로서 이 회절 X선을 이용하여 시료에 함유된 결정성 물질의 종류와 양에 관계되는 정보를 알 수 있다. 이처럼 결정성 물질의 구조에 관한 정보를 얻기 위한 분석 방법이 X선 회절법이다.

3. 5 출력물 분석

PBF 공정으로 제조한 AlSi10Mg 시편은 Fig 16과 같다. (a) 는 시편의 전체적인 사진이며, (b)는 시편 중 하나를 폴리싱 및 그라인딩을 하기 위해 콜드 마운팅으로 마운트를 한 사진이다. Inconel 718 시편은 Fig 17에 나타내었다. 앞선 AlSi10Mg의 시편과 다르게 해당 시편의 형상은 일반적인 큐브 형상이 아닌 ㄱ자 형상의 시편을 분석에 사용하였다. 시편을 제작한 후 아르키메데스의 밀도 측정법을 이용하여 Inconel 718과 AlSi10Mg의 밀도를 측정하였다. 밀도 측정 후 AlSi10Mg의 시편의 경우 Z축의 면(Laser가 주사되는 면)과 X축의 면(제품 출력 시 마주하는 면)의 미세조직 및 기공분석을 하였으며, Inconel 718의 경우 X축의 면 중 특징이 다른 세 지점의 미세조직 및 기공분석을 하였다.

3. 6 미세조직 분석

Inconel 718과 AlSi10Mg 시편의 미세조직을 관찰하기 위해 광학현미경 및 주사전자현미경을 사용하였다. Inconel 718과 AlSi10Mg 두 시편 모두 SiC 연마지 및 9~1 μ m Diamond suspension으로 미세 연마를 하였다. Inconel 718의 Etchant는 Kalling's No.2 용액 200 ml를 사용하였으며 해당 용액의 구성비는 CuCl₂ 5 grams + Hydrochloric acid 100 ml + Ethanol 100 ml이다. AlSi10Mg의 Etchant는 Kellers Etchant 용액 200 ml를 사용하였으며 해당 용액의 구성비는 Distilled water 190 ml, Nitric acid 5 ml + Hydrochloric acid 3 ml + Hydrofluoric acid 2 ml이다. 분석에 사용한 광학현미경은 OLYMPUS사의 BX 51M이었으며, 배율은 50배부터 1,000배의 범위에서 분석을 하였다. 1,000배율 이상의 분석은 주사전자현미경을 통해 실시하였으며, JEOL 사의 IT 200 SEM을 사용하였다.

3. 7 기계적 특성 분석

기계적 특성의 경우는 마이크로 비커스 경도기를 사용하여 경도측정을 하였다. AlSi10Mg의 경우 하중은 1.961 N, Loading Time은 5초로 하였으며 X축 면과 Z축 면의 경도를 총 5차례 측정한 뒤 평균값을 도출하였다. Inconel 718의 경우 하중은 1.961 N, Loading Time은 5초로 하였으며 X축 면의 세 지점을 각각 5차례씩 측정하여 평균값을 도출하였다.

Table 8. Information of Metalysis 150 PBF Machine

Laser Wavelength	1,075nm
Laser Output power	200W
Plus Repetition	CW
Output Power Tunability	10~100%
Beam Quality	M2 < 1.1
Scanner Positioning Speed	7m/s
Building Volume	150x150x150mm
Beam Spot	70~150 μ m
Build Room Z-axis Trave	200mm
Z-axis Travel Accuracy	\pm 3 μ m
Z-axis Speed	100mm/s
Build Chamber Temperature	40~80°C Control
Process Gas	Nitrogen / Argon
Powder feeder Stroke	500mm
Weight	600Kg
Powder	Co-Cr, Titanium64계열, Titanium Cp 계열, SUS316, M300, H13, Fe 합금계열, Al계열, Inconel 계열
Blade	Silicon
Software	CAD -> CAM File converting
System Control	PC Base (Windows)
System Max. Size (DxLxH)	850X1200X2000mm
Requirement Utility	Electricity: Single Phase, 220V, 10A

Table 9. PBF Processing Parameters [43]

PBF processing parameters	
•	Laser power
•	Laser speed
•	Atmospheric control
•	Gas flow
•	Heaters (bes temperature)
•	Laser type
•	Scan radius (=point size)
•	Scan vector length
•	Scan spacing (=Hatching size)
•	Thickness of layers

Table 10. Process Parameter of AlSi10Mg Sample

Sample	Laser Power	Laser Speed
1	170W	2100mm/s
2	180W	2100mm/s
3	190W	2100mm/s
4	170W	2800mm/s
5	180W	2800mm/s
6	190W	2800mm/s
7	170W	3500mm/s
8	180W	3500mm/s
9	190W	3500mm/s

Table 11. Process Parameter of Inconel 718 Sample

Sample	Laser Power	Laser Speed
1	100W	400mm/s
2	100W	700mm/s
3	150W	300mm/s
4	150W	600mm/s
5	200W	400mm/s
6	200W	700mm/s

Table 12. Energy Density of Inconel 718s

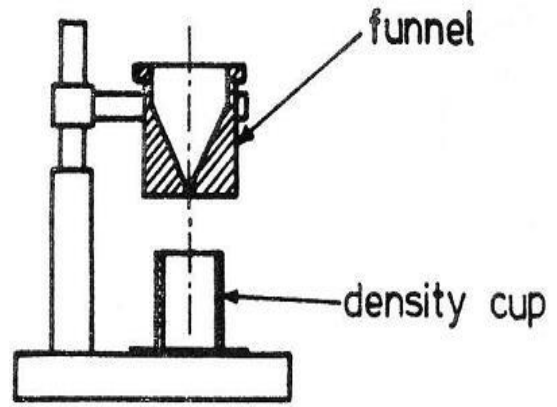
Sample	Energy density (J/mm ³)
1	83.3
2	39.7
3	166.7
4	69.4
5	208.3
6	95.2

Table 13. Energy density of AlSi10Mg s

Sample	Energy density (J/mm³)
1	38.6
2	40.8
3	43.1
4	28.9
5	30.6
6	32.3
7	23.1
8	24.5
9	25.9



(a)



Hall

(b)

Fig 14. Hall Flowmeter



Fig 15. Metalysis 150

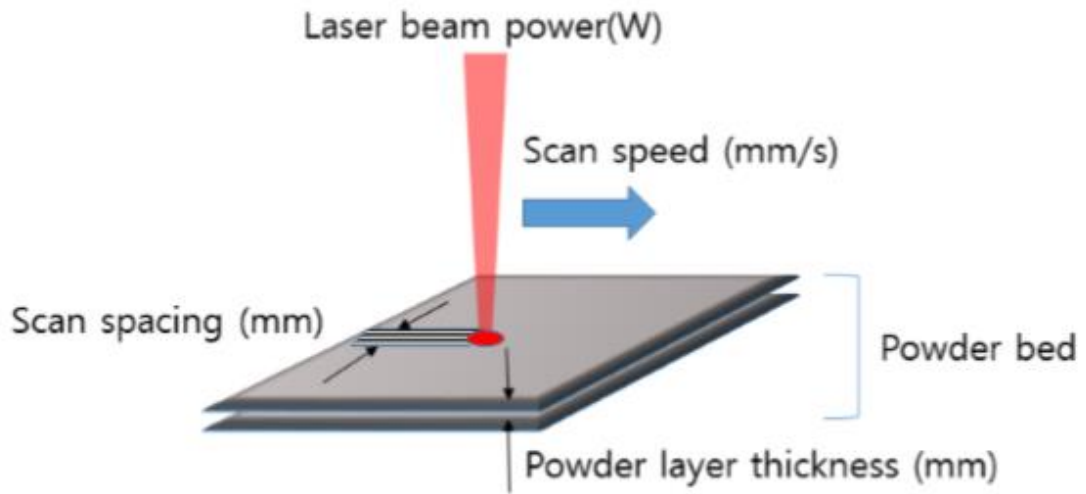
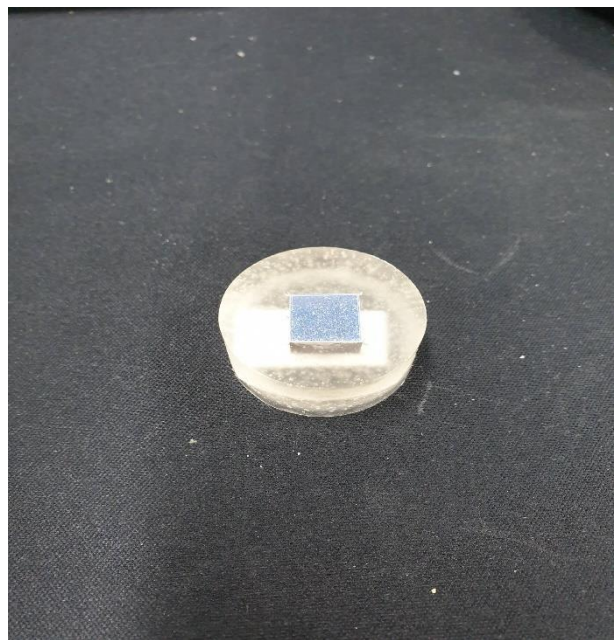


Fig 16. Schematic Diagram of Main Parameters of PBF

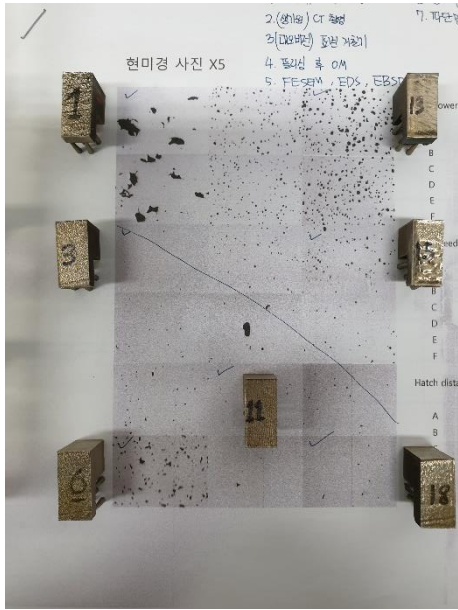


(a)

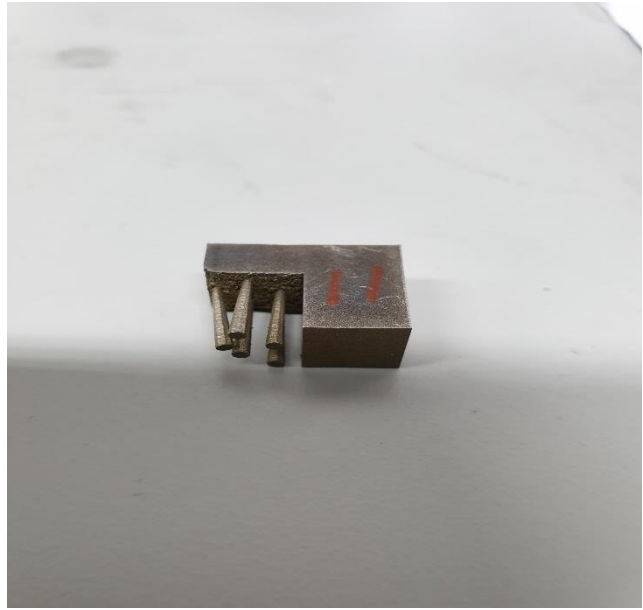


(b)

Fig 17. AlSi10Mg Alloy from PBF Process



(a)



(b)

Fig 18. Inconel 718 Alloy from PBF Process

4. 결과 및 고찰

4. 1. AlSi10Mg 및 Inconel 718 분말 분석

4. 1. 1. Hall Flowmeter

유동도는 일정량의 분말이 대기압(1atm)의 조건에서 Funnel 를 흐르며 통과하는 데 소모되는 시간으로 정의된다. 일반적으로 단위는 s/50g 으로 표기한다. 유동도 측정은 일반적으로 Hall flowmeter 라는 장비가 사용된다. Hall Flowmeter 윗부분인 Funnel 부분에 AlSi10Mg 를 흘려주어 아래의 25cc density cup 에 담기는 시간을 측정하였다. 유동도를 측정할 때는 인위적인 조작 없이 오직 중력만이 작용하는 상태로 측정을 하여야만 한다. Fig 18 에 Hall flowmeter 장비 사진과 단면도 사진을 나타냈다.

AlSi10Mg 와 Inconel 718 분말의 유동도 측정은 각각 5 차례씩 실시하였으며, Table 14 에 나타냈다. 유동도 측정을 한 결과 AlSi10Mg 의 평균 유동도는 12.29s/50g, Inconel 718 의 평균 유동도는 16.89s/50g 을 구할 수 있었다.

겉보기 밀도는 분말을 어느 규정된 방법으로 일정한 용기에 담았을 때 중량을 그 용기의 내용적으로 나눈 값을 말한다. 단위는 일반적인 밀도 단위인 g/cm^3 으로 나타낸다. 겉보기 밀도 역시 유동도와 마찬가지로 힘이나 진동 없이 오직 중력만이 작용하는 상태로 측정을 한다. 탭 밀도의 경우 충전밀도 라고도 하며 어느 일정 조건으로 용기에 진동을 가하여 채워진 분말의 단위 체적 중량을 나타낸다. 겉보기 밀도와 탭 밀도 둘 다 Hall Flowmeter 장비를 이용하여 측정을 진행한다. Hall Flowmeter 를 이용하여 겉보기 밀도와 탭 밀도를 구한 경우 Hausner Ratio 를 구할 수 있다. Hausner Ratio 란 AM 공정 중 특히 PBF 에 적합한지를 판단할 수 있는 수치로 이 값이 1.0~1.25 사이에 있으면 PBF 공정에 적합한 분말로 정의한다.

Hall Flowmeter 장비를 이용하여 각각의 밀도를 구한 결과 AlSi10Mg 의 겉보기 밀도는 1.35g/cm³, 탭 밀도는 1.49 g/cm³을 구할 수 있었다. Inconel 718 의 경우 겉보기 밀도는 4.55 g/cm³, 탭 밀도는 5.05 g/cm³ 값을 측정할 수 있었다. 둘의 Hausner Ratio 값은 각각 1.10, 1.11 이었으며 AlSi10Mg 와 Inconel 718 분말 둘 다 PBF 공정에 적합한 것을 확인할 수 있었다. Hall Flowmeter 로 구한 밀도 값과 유동도에 측정값은 Table 15 에 나타냈다.

Table 14. Results of flow rate from hall flowmeter

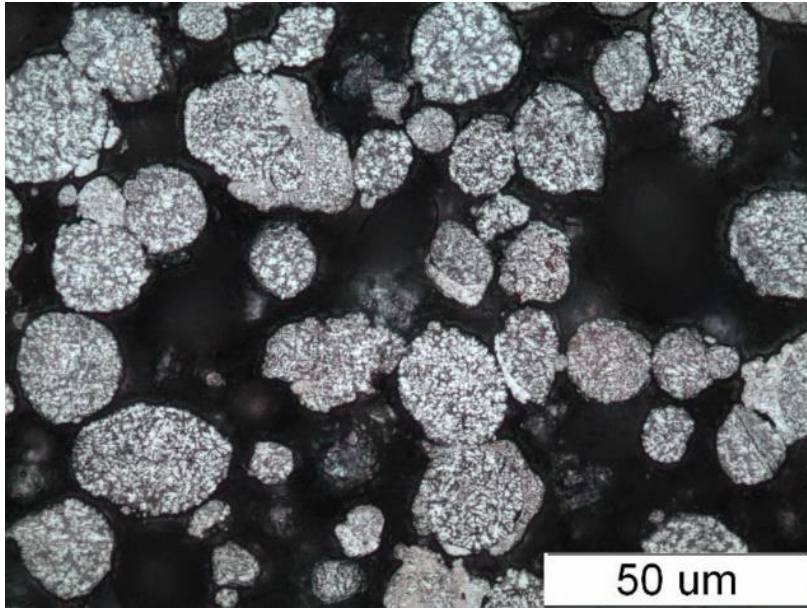
Materials	Average (s/50g)	Max (s/50g)	Min (s/50g)	Range (s/50g)
AlSi10Mg	12.29	17.23	16.37	0.86
Inconel 718	16.89	12.75	11.89	0.86

Table 15. Results of apparent density and tap density from hall flowmeter

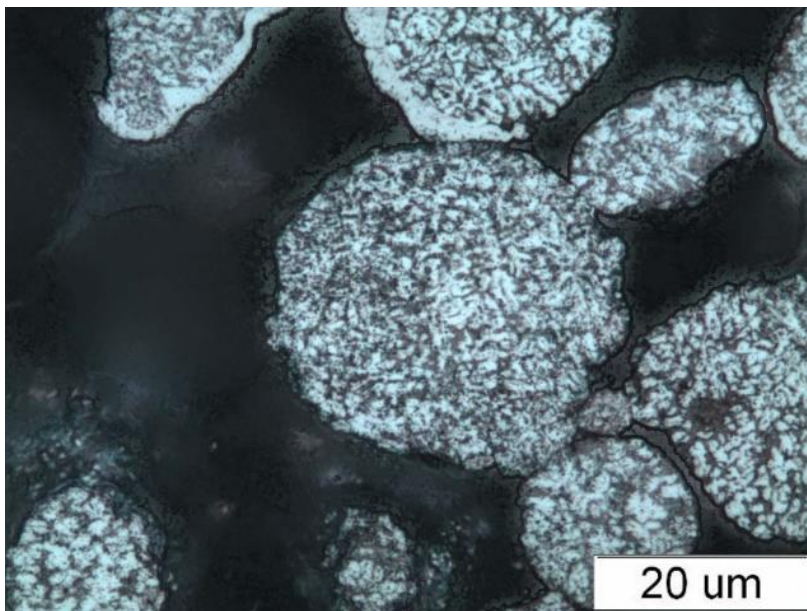
Materials	Apparent Density (g/cm³)	Tap Density (g/cm³)	Hausner Ratio	Range (s/50g)
AlSi10Mg	1.35	1.49	1.10	0.14
Inconel 718	4.55	5.05	1.11	0.50

4. 1. 2. Optical Microscope (OM)

본 연구에서는 가스 분무법(Gas Atomization)으로 제조한 AlSi10Mg 분말과 Inconel 718 분말을 사용하였다. 가스 분무법은 금속을 녹인 후 가스를 빠른 속도로 분사하여 작은 크기의 금속 액체 방울로 만든 다음 빠른 속도로 냉각 및 응고시키는 방법이다. 일반적으로 주조처럼 급속 냉각 및 응고가 일어나는 공정은 수지상을 가지게 되며 수지상 가지의 간격은 국부 응고 속도에 반비례한다. 이는 응고 시에 수지상간 영역에서 고/액상계면이 이동될 때 액상 내부의 용질 농도 차에 따른 조성적 과냉이 존재하고 이를 최소화하려는 경향 때문에 발생한다 [42]. Fig 19 와 Fig 20 은 AlSi10Mg 와 Inconel 718 의 분말 단면을 OM 으로 분석한 사진이며, 가스 분무법에서도 급속 냉각 및 응고가 발생하므로 주조에서 나타나는 수지상을 관찰할 수 있었다.

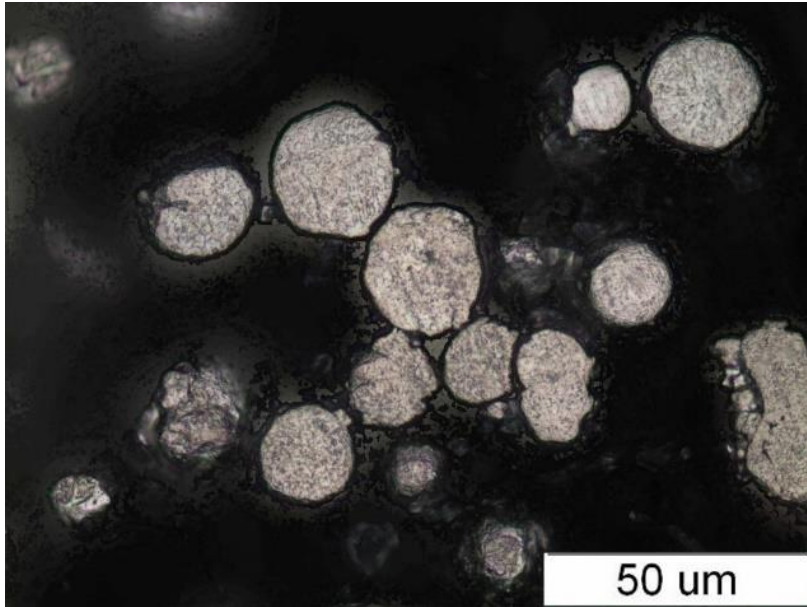


(a)

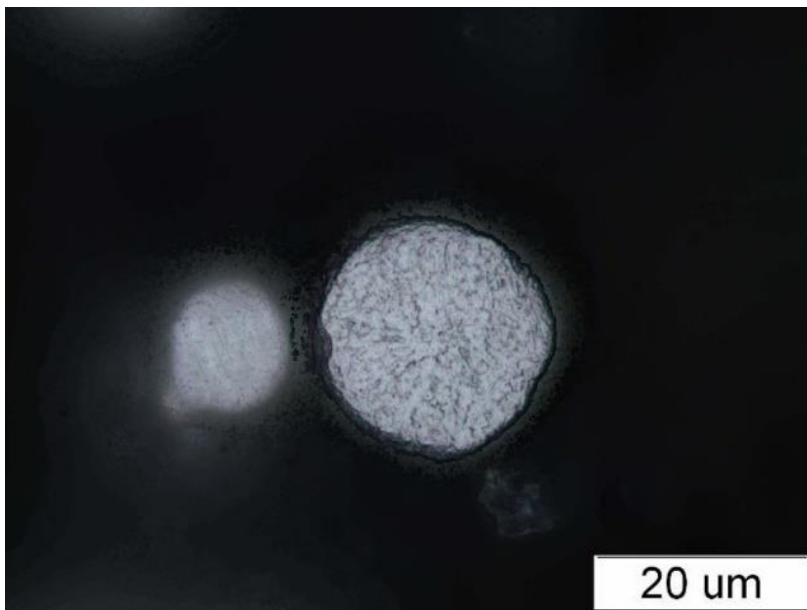


(b)

Fig 19. (a) Low Magnification (b) High Magnification Photos of AlSi10Mg from OM



(a)



(b)

Fig 20. (a) Low Magnification (b) High Magnification Photos of Inconel 718 from OM

4. 1. 3. Scanning Electron Microscope (SEM)

광학현미경(OM)으로 AlSi10Mg 분말과 Inconel 718 분말의 단면 미세조직을 분석한 후 분말의 형상과 위성분말의 유무를 알아보기 위해 주사전자현미경(SEM)으로 분석을 하였다. 앞서 2가지 요인은 PBF 이외에도 금속분말을 사용하는 어떠한 AM 공정에서도 중요하게 작용한다. 분말 형상의 경우 분말 간의 마찰에 영향을 끼친다. 분말의 표면이 거칠고 불규칙할수록 분말 간의 마찰은 심해지고 이는 분말의 흐름 즉, 유동성에도 악영향을 끼친다. 분말의 유동성이 저하되게 되면 Powder Bed에 쌓이는 분말 역시 일정하게 깔리지 않게 되어 기계적 특성 저하는 물론 심하면 제조 과정 자체에서 문제가 발생할 수 있다. 분말의 형상은 분말 간의 마찰만이 아니라 충전율에도 영향을 끼친다. 분말의 형상이 불규칙한 분말은 Powder Bed에 적층 할 때 분말들 사이의 기공이 증가하게 되면 이는 기계적 특성 저하를 발생시킬 수 있다. 이론적으로 분말의 충전율은 74%일 때가 가장 높는데 이는 분말이 구형일 때 얻을 수 있는 수치이며, 이때의 배위수(Coordination number)는 6~7이다.

위성 분말(Satellite Powder)이란 노즐 근처의 와류상에 의해 형성된 분말을 나타내며 이는 평균 크기를 가지는 분말들보다 크기가 현저히 작은 분말을 뜻한다. 위성 분말은 유동성과 충전 특성을 해치므로 적을수록 좋다 [43].

Fig 21은 AlSi10Mg 분말의 SEM 분석 사진이다. (a) 는 저 배율로 분석을 한 사진이며 위성 분말이 다소 존재하는 것을 확인할 수 있었으며, 형상이 불규칙한 분말도 존재하는 것을 확인하였다. 하지만 대부분은 구형의 형상을 가진 분말임을 확인하였다. (b) 는 고배율로 $45.36\mu\text{m}$ 의 크기를 가진 구형 분말을 분석한 사진이다. 분말의 표면이 완전하게 매끄럽지 않은 것을 확인할 수 있는데, 이는 가스 분무법으로 제조하였기에 나타나는

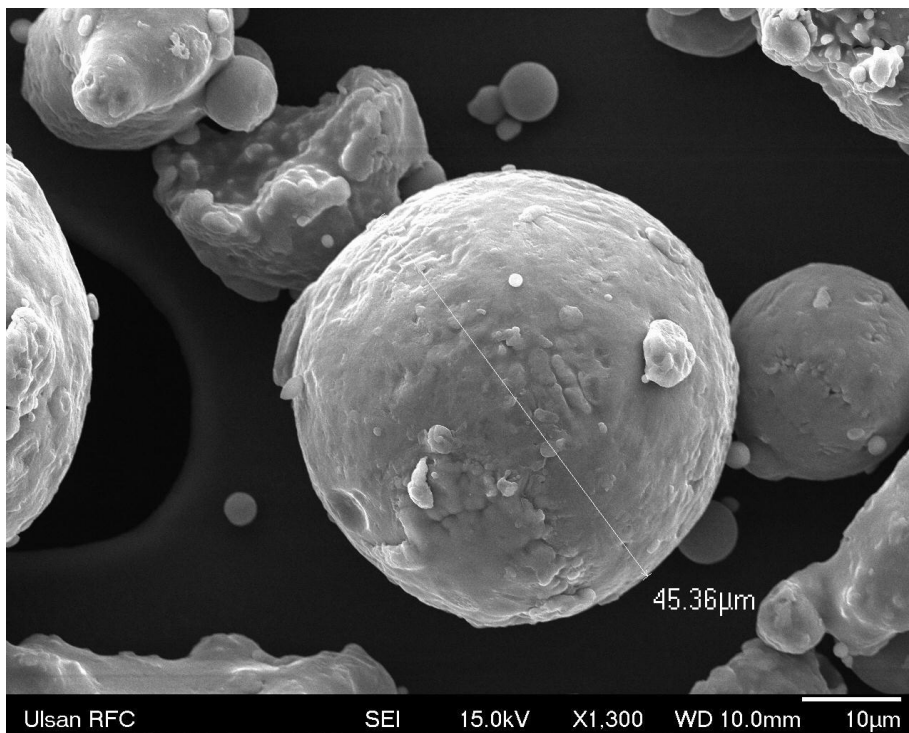
특징이다. 응축기상법으로 제조한 분말의 경우 표면이 매끄러운 반면 가스 분무법은 표면에 강한 압력의 가스가 분사되기에 표면이 완전히 매끄럽게 형성되지 않을 수 있다. 또한 앞서 저 배율 사진에서 확인한 것처럼 불규칙하고 크기가 훨씬 작은 위성분말을 확인할 수 있었다. Fig 22는 AlSi10Mg 분말의 EDS 분석 데이터이다. AlSi10Mg의 이론적 조성은 주요원소인 Si가 9.96, Mg가 0.35포함되며, Fe, Cu, Mn 등의 다른 원소들이 포함되어 있다. EDS 분석 결과에선 합금 원소들의 정확한 함유량을 판단할 수 없지만, Peak가 가지는 intensity값을 통해 원소들의 상대적인 양을 확인할 수 있으며 Al, Si, Mg 순으로 함유량이 많은 것을 확인하였다.

Fig 23은 Inconel 분말의 SEM 분석 사진이다. (a)는 저 배율로 분석을 한 사진이다. 앞서 확인한 AlSi10Mg의 분말보다 위성 분말과 불규칙한 분말의 양이 훨씬 적다는 사실을 확인할 수 있었으며, 구형의 형상을 가지는 분말의 크기들을 확인할 수 있었다. (b)는 고배율로 분석을 한 사진이며, AlSi10Mg보다 분말의 표면에 갈라짐 현상이나 주름이 훨씬 많이 존재하는 사실을 확인할 수가 있다. 이는 AlSi10Mg처럼 가스 분무법으로 인해 형성되는 응고조직이다. 가스 분무법은 용융 금속을 강한 압력을 가지는 가스를 분사하여 분말을 제조하는데 이 과정에서 급속 냉각 및 응고가 발생하게 된다. 이 때 발생하는 온도구배가 굉장히 크기 때문에 사진에서 보이는 것처럼 표면에 미세한 응고조직이 형성된다. Fig 24는 Inconel 718 분말의 EDS 분석 데이터이다. Inconel 718의 이론적 조성은 Ni에 Cr는 19.0%, Fe는 17%이 주요 합금 원소로 첨가되어 있으며 Cb, Nb, Co 등의 기타 원소들도 소량 첨가되어 있다. AlSi10Mg와는 다르게 Inconel 718에서는 다양한 합금 원소의 peak들을 확인할 수 있는데 이 peak들은 같은 원소지만 다른 상을 가지는 원소들을 나타낸다. 하지만 앞서 설명한 Cr, Fe가 Ni다음으로 높게 peak를

형성하는 것을 확인할 수 있었으며, 그 외의 Nb, Ti, Co 등의 합금원소도 나타나는 것을 확인할 수가 있었다.



(a)



(b)

Fig 21. (a) Low Magnification (b) High Magnification Photos of AlSi10Mg from SEM

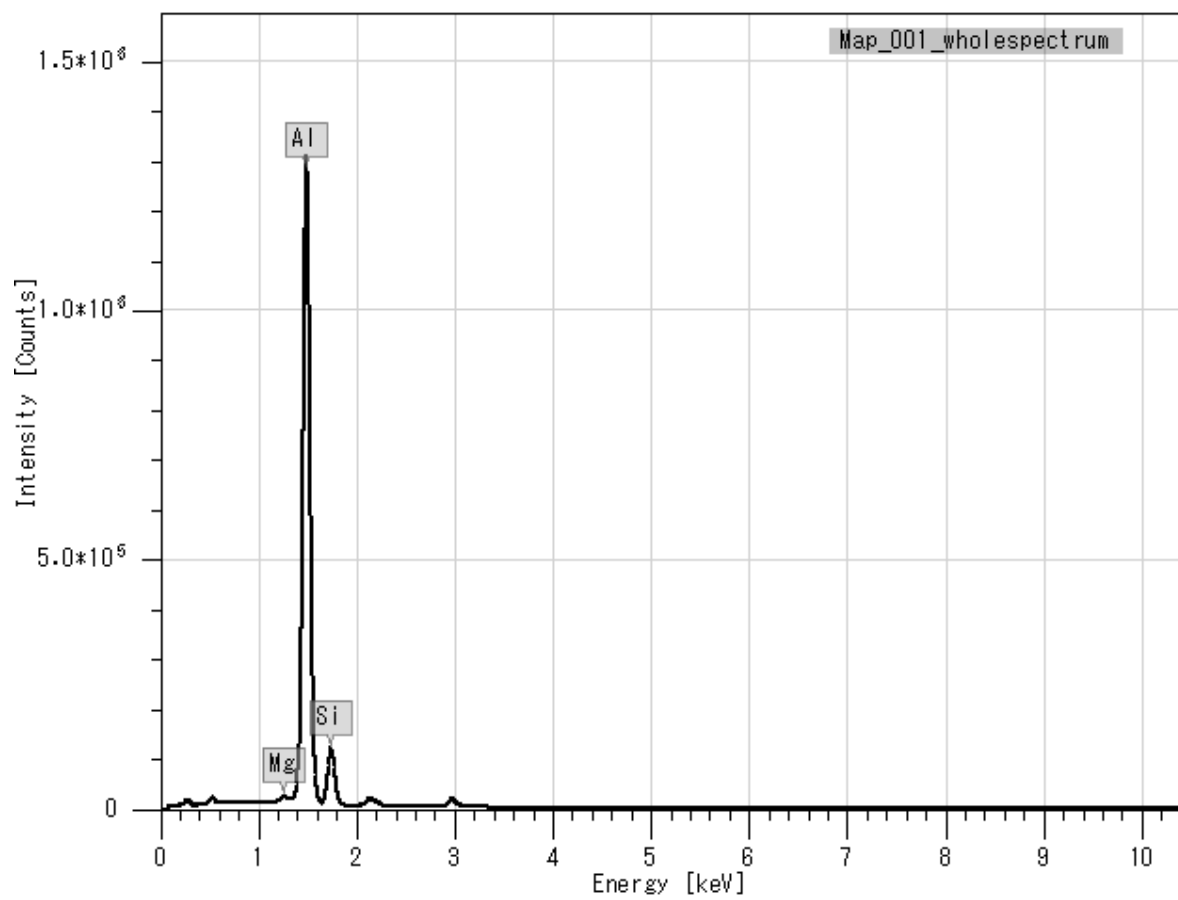
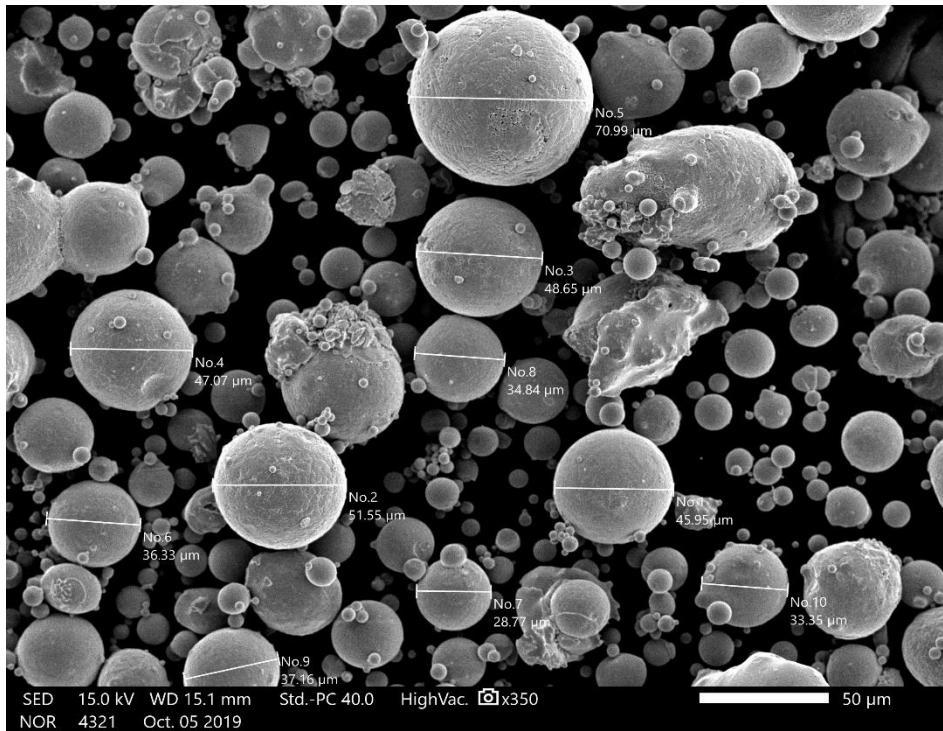
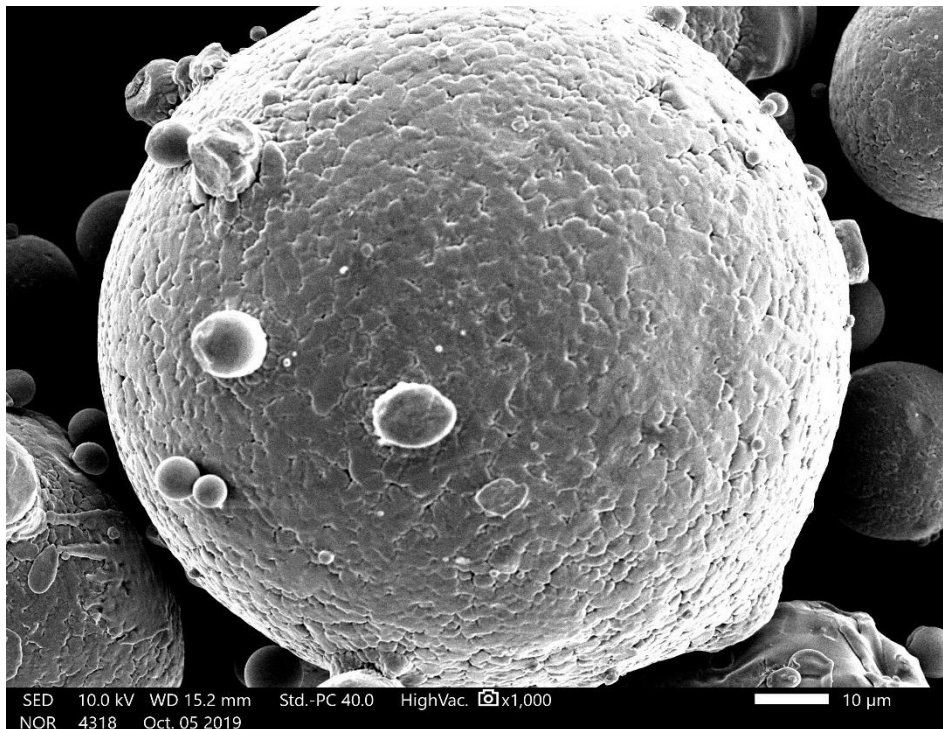


Fig 22. Result of AlSi10Mg from EDS



(a)



(b)

Fig 23. (a) Low Magnification (b) High Magnification Photos of Inconel 718 from SEM

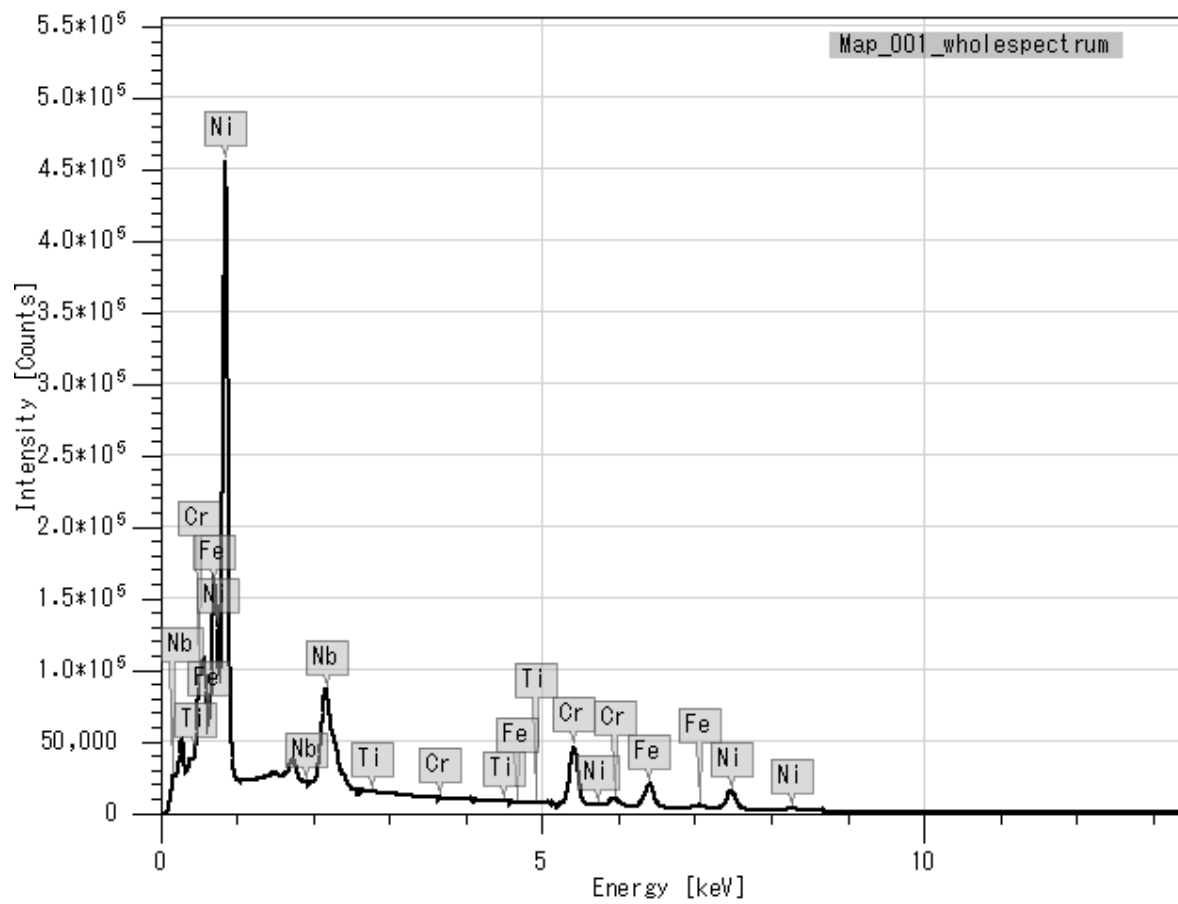


Fig 24. Result of Inconel 718 from EDS

4. 1. 4. Laser Particle Size Distribution (LPSD)

광학현미경(OM)으로 AlSi10Mg 분말과 Inconel 718 분말의 단면 미세조직을 분석한 후 LPSD를 이용하여 분말의 입도를 분석하였다. 앞서 말한 형상과 위성 분말의 유무 외에도 분말의 크기는 PBF에서 굉장히 중요하게 작용하는 인자이다. 일반적으로 PBF 공정에 사용하는 분말의 입도 범위는 15~60 μm 이다. 입도가 큰 분말의 경우 낮은 충전율을 형성하는 주요 원인이 되며 충전율이 낮아지면 베드에 쌓이는 layer 밀도 역시 감소하게 되어 기계적 특성을 떨어뜨리게 된다. 입도가 작은 분말의 경우에는 분말들끼리 응집하여 충전율 및 특성을 저하시킨다. 모든 물질은 각자가 가진 반데르발스 힘이 존재하는데 볼륨이 큰 물질들의 경우 거의 영향을 받거나 끼치지 못한다. 하지만 분말처럼 볼륨이 작은 물질들의 경우 반데르발스의 힘이 끼치는 영향이 커지게 되며 20 μm 이하의 분말들의 경우 서로 간에 작용하는 인력 때문에 응집이 발생하게 된다. 따라서 분말의 입도는 위의 범위 내에서 존재하는 것이 가장 좋으며 실제 산업 현장에서도 범위 내에 존재하는 분말을 사용하고 있다.

LPSD(Laser Particle Size Distribution)는 레이저 빔이 분산된 파워 샘플을 통과하면서 산란하는 빛의 강도에 따른 각도 변화를 측정함으로써 입도 분포를 측정하는 장치이며, 특정 각도에서 회절된 빛의 강도는 분말의 수와 연관되어 있다. Fig 25는 LPSD를 이용하여 AlSi10Mg의 분말 입도 분석을 한 결과이며, D10은 24.46 μm , D50은 36.74 μm , D90은 54.02 μm 임을 알 수 있다. Fig 26은 Inconel 718의 분말 입도 분석을 한 결과이며, D10은 25.98 μm , D50은 37.24 μm , D90은 50.94 μm 임을 확인하였다.

Laser Scattering Particle Size Distribution Analyzer LA-960

```

Sample Name      :
ID#             : 201910141744228
Data name       : AlSi10Mg-1
Transmittance (R) : 97.8 (%)
Transmittance (B) : 98.3 (%)
Circulation speed : 5
Agitation speed  : 5
Ultrasound      : 01:00 (7)
Iteration mode   : Auto
Distribution base : Volume
Refractive index (R) : iron oxide
                  : [iron oxide ( 2.900 - 0.000i),ethanol( 1.360)]
Refractive index (B) : iron oxide
                  : [iron oxide ( 2.900 - 0.000i),ethanol( 1.360)]
Material        :
Source          :
Lot Number      :
Median size     : 36.73766 (µm)
Mean size      : 38.23311 (µm)
St. Dev.       : 12.0413 (µm)
Mode size      : 36.6998 (µm)
Diameter on cumulative % : (1)10.00 (%) - 24.4622 (µm)
                  : (2)50.00 (%) - 36.7377 (µm)
                  : (3)90.00 (%) - 54.0174 (µm)
    
```

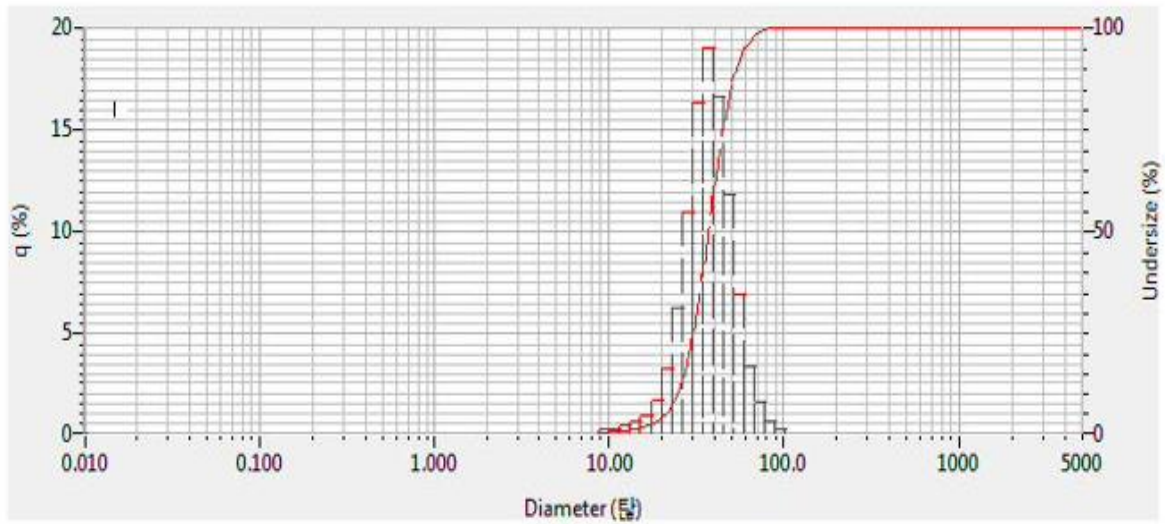


Fig 25. Particle size distribution of AlSi10Mg powder

Laser Scattering Particle Size Distribution Analyzer LA-960

```

Sample Name      :
ID#             : 201910141700221
Data name       : Inconel 718-1
Transmittance (R) : 99.1 (%)
Transmittance (B) : 99.2 (%)
Circulation speed : 5
Agitation speed  : 5
Ultrasound      : 01:00 (7)
Iteration mode   : Auto
Distribution base : Volume
Refractive index (R) : iron oxide
                  : [iron oxide ( 2.900 - 0.000i),ethanol( 1.360)]
Refractive index (B) : iron oxide
                  : [iron oxide ( 2.900 - 0.000i),ethanol( 1.360)]
Material        :
Source         :
Lot Number     :
Median size    : 37.23682 (µm)
Mean size     : 37.89375 (µm)
St. Dev.     : 10.5959 (µm)
Mode size     : 36.9959 (µm)
Diameter on cumulative % : (1)10.00 (%) - 25.9809 (µm)
                  : (2)50.00 (%) - 37.2368 (µm)
                  : (3)90.00 (%) - 50.9437 (µm)
    
```

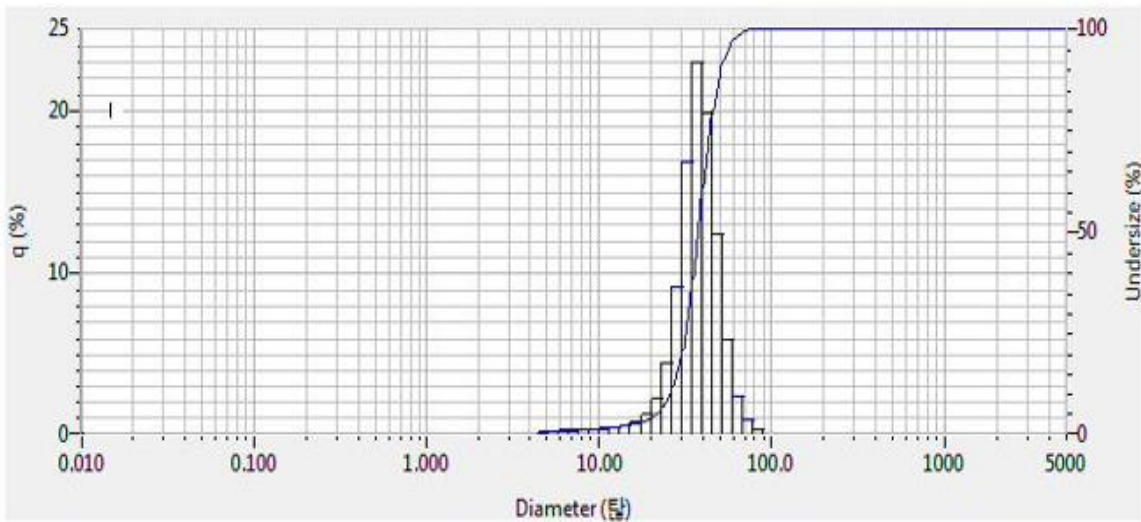


Fig 26. Particle size distribution of Inconel 718 powder

4. 1. 5. X-ray Diffraction (XRD)

Fig 29는 AlSi10Mg 분말의 XRD 분석 그래프를 나타낸 것이다. XRD의 회절각 범위는 20~100으로 설정하고 분석을 진행하였다. Al은 가장 높은 peak을 나타냈는데, 이때의 결정면은 (1 1 1) 면이었으며, 이는 α -알루미늄상을 가지게 된다. Si의 경우 대체로 낮은 Peak을 형성하였는데 그중 가장 높은 peak은 Al과 동일하게 (1 1 1) 결정면이다. Al과 Si 외에도 Al과 Si가 반응하여 형성된 합금을 확인할 수 있었는데, 이는 Mg_2Si 인 것을 확인할 수 있었다. Mg_2Si 는 시편에서 고용체의 역할로 고용강화를 하므로 인장강도와 경도 등의 기계적 특성 향상의 중요한 역할을 한다.

Fig 30은 AlSi10Mg 분말의 RIR 분석 그래프를 나타낸 것이다. RIR(Reference Intensity Ratio) 분석은 Reference 이 없으면 XRD 측정 결과를 이용하여 정량분석을 수행하는 분석법이다. 측정된 data와 reference에 등록된 물질정보의 integrated intensity를 비교하여 해당 물질의 함량을 계산하는 방법으로, 특히 두 종류 이상의 화합물의 상이 존재하는 시료의 개별적인 함량을 계산할 때 사용할 수 있는 장점이 있다. RIR 정량 분석 결과로 AlSi10Mg의 분말에는 Al의 함량이 약 92%, Si의 함량이 약 7%가 존재하는 사실을 확인할 수 있으며, 이론적으로 널리 알려진 AlSi10Mg Si의 조성인 9.96%와는 약간 차이가 있었다

Fig 31는 Inconel 718 분말의 XRD 분석 그래프를 나타낸 것이다. XRD의 회절 각 범위는 20~120으로 설정하고 분석을 진행하였다. Inconel 718에서 Ni의 주된 상은 γ 상이며, 결정면 (1 1 1)에서 가장 높은 Intensity 값을 가지는 것을 확인할 수 있었다. 그 뒤로 (2 0 0), (2 2 0) 등이 높은 Intensity를 나타내는 것을 확인할 수 있었다. RIR 분석 결과의 경우 XRD 데이터베이스에 등록되어 있지 않은 물질이나 합금일 때 얻을 수 있는

데이터이다. AlSi10Mg의 경우 XRD 기기 데이터에 등록 되어있지 않기에 XRD 프로그램에서 Reference에 등록 되어있는 원소들을 이용하여 임의로 RIR 분석을 진행한 것이다. 허나 Inconel 718은 이미 XRD 데이터베이스에 등록되어 있기에 본 연구에서는 RIR 분석 데이터가 나오지 않았다.

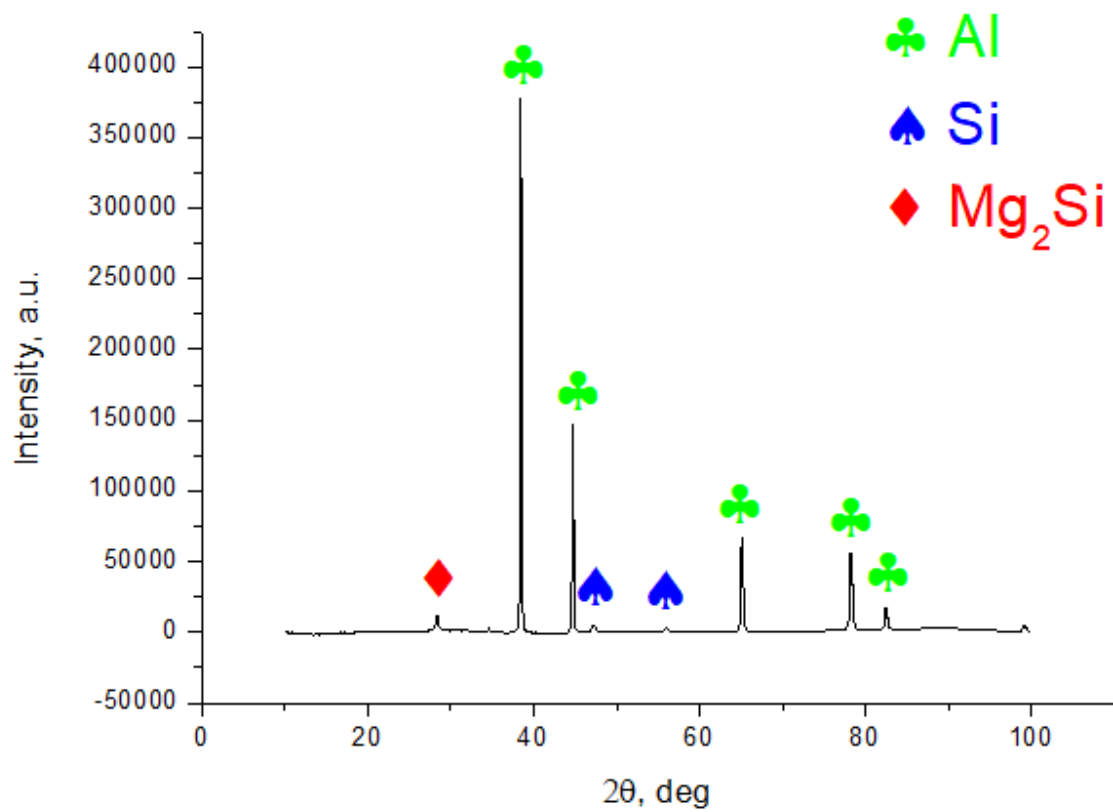


Fig 27. Result of AlSi10Mg Powder from XRD

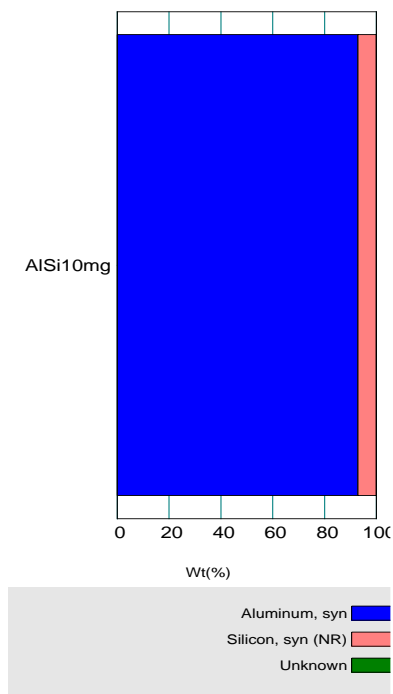


Fig 28. Result of AlSi10Mg powder from XRD

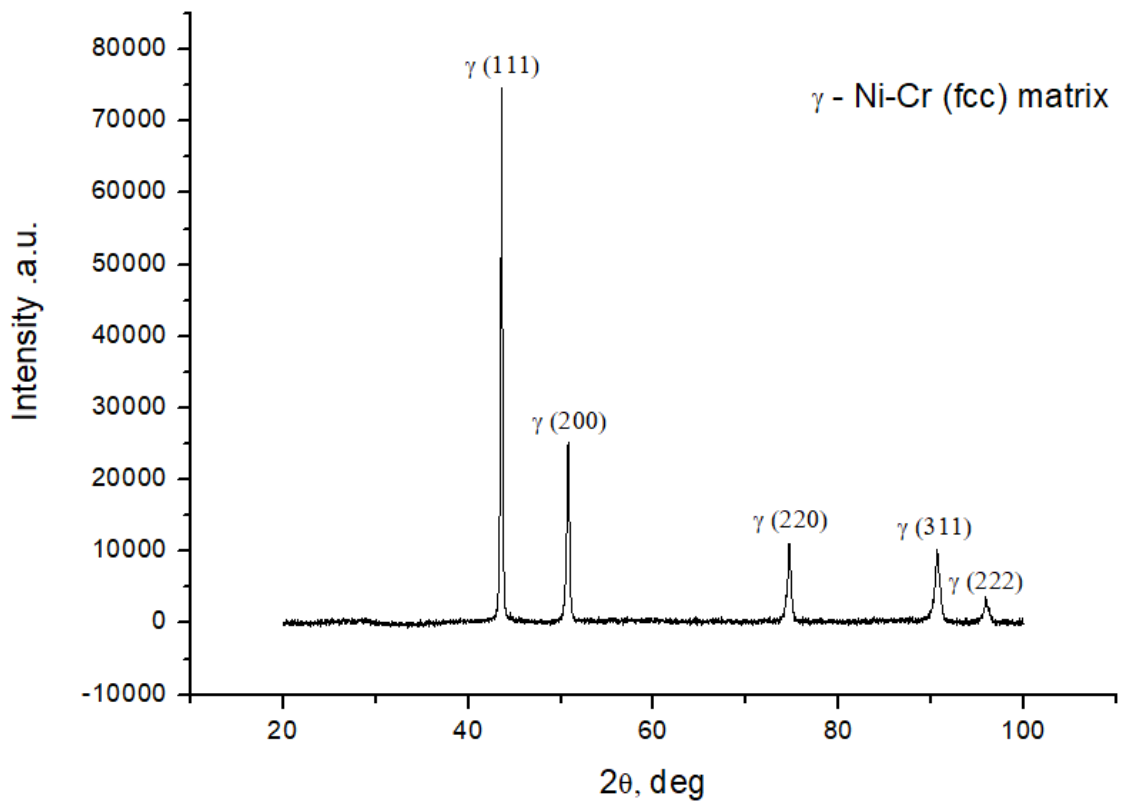


Fig 29. Result of Inconel 718 powder from XRD

4. 2 AlSi10Mg 시편 분석

4. 2 .1 Density

PBF 공정으로 AlSi10Mg 시편을 25개를 제조하였으며, 그중 9개를 선정하여 밀도측정기를 통해 밀도 분석을 하였다. 시편을 제조할 때 Layer 두께는 30 μ m, hatching size는 70 μ m, point는 size는 0.0021mm²으로 고정변수를 두었으며, Laser power와 laser speed에 변화를 주며 진행하였다. Laser power의 범위는 170~190W이며, Laser speed의 범위는 2,100~3,500mm/s로 설정하여 시편을 제조하였으며, Table 9에 정리해 두었다.

밀도 측정은 시편의 건조 질량을 공기 중에서 먼저 측정하고, 물속에 시편을 넣고 시편과 지지 장치의 기포를 제거한 후 물속에서의 질량을 측정하였으며, 둘의 차이를 이용하여 시편의 밀도를 계산하였다. 측정 횟수는 총 5회 진행하였으며, 평균 비밀도를 Table 10에 정리하였다. Laser speed가 2100mm/s인 시편들(1번, 2번, 3번)의 평균 비밀도는 98.2%, Laser speed가 2800mm/s인 시편들(4번, 5번, 6번)의 평균 비밀도는 97.6%, Laser speed가 3500mm/s인 시편들(7번, 8번, 9번)의 평균 비밀도는 97%였다. 비밀도 분석 결과 AlSi10Mg의 경우 Laser speed가 빨라질수록 낮은 비밀도를 가지는 것을 확인할 수 있었다. 이는 Laser speed가 빨라질수록 에너지 전달이 제대로 이루어지지 않아 분말을 용융하는 과정에서 문제가 발생하여 기공이 많이 생성되어 비밀도 값이 낮아지는 것으로 보인다.

Table 16. Result of AlSi10Mg's Hardness

Sample	Apparent Density(%)
1	98.0
2	98.1
3	98.5
4	98.2
5	97.6
6	97.1
7	96.7
8	96.9
9	97.4

4. 2 AlSi10Mg 시편 분석

4. 2 .2 Optical Microscope (OM)

밀도 분석을 마친 후 광학현미경(Optical Microscope)를 이용하여 9개 시편의 미세조직을 분석하였다. Fig 32에는 분석하는 면에 대한 모식도를 첨부하였는데, AlSi10Mg의 경우 레이저를 주사하는 방향을 Z면, 시편이 제조될 때 마주보는 면을 X면이라 지정하고 미세조직 분석을 하였다. 미세조직 분석한 결과를 같은 시편속도끼리 묶어서 아래에 기술하였다.

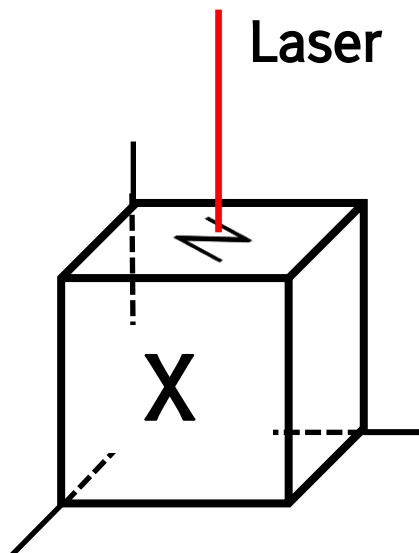


Fig 30. Analysis surface

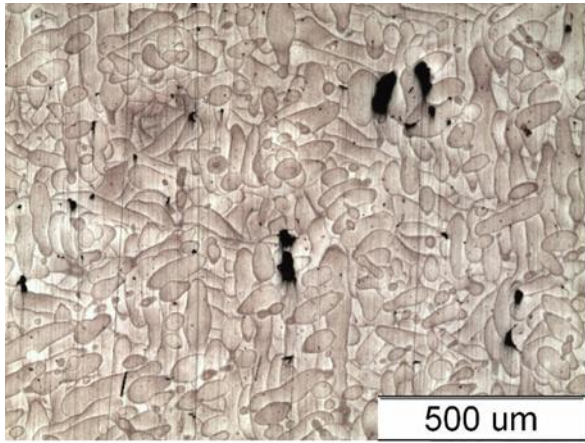
1번, 2번 그리고 3번 시편의 공정 변수 중 Laser speed는 2,100mm/s로 동일하며, Laser power는 차례대로 170W, 180W, 190W이다. Fig 33, Fig 34, Fig 35에는 각각의 광학 현미경으로 시편의 Z면 미세조직을 분석한 것을 나타냈으며 (a)는 50배율, (b)는 100배율, (c)는 200배율, (d)는 500배율의 분석 사진이며 여러 개의 샘플을 구분하기 위해 배율을 기입하였다.

Laser speed가 2,100mm/s의 조건을 가지는 시편들은 2,800mm/s, 3,500mm/s의 Laser speed를 가지는 시편들보다 대체로 기공이 더 적으며 Melt pool 또한 온전하였다. Fig 34와 Fig 35의 (d) 500배율 사진에서는 Melt pool 내부에 존재하는 Submicron cell과 수지상을 확인할 수 있었다. 이러한 조직이 나타나는 이유는 PBF공정이 주조와 비슷한 매커니즘을 가지기 때문이다. 일반적인 주조의 매커니즘은 용융과 냉각이며, PBF 공정 역시 고에너지의 Laser나 전자 빔을 이용하여 금속분말을 짧은 시간 용융한 후 바로 상온에서 급속 냉각이 이루어진다. 그 때문에 주조에서 발생하는 수지상구조를 PBF 공정에서도 확인할 수 있는 이유이다. 이때 수지상 가지의 간격은 국부 응고 시간에 비례한다.

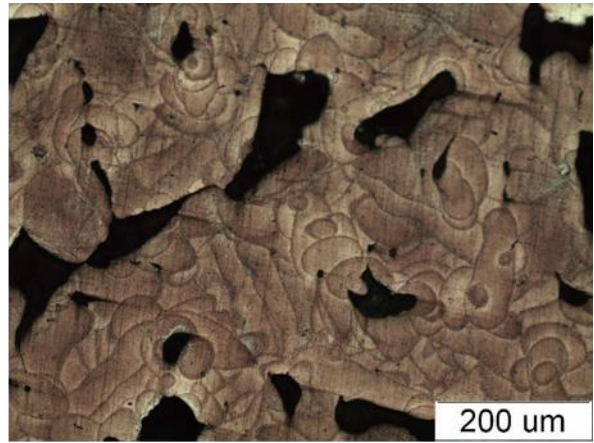
Fig 34에서는 Melt pool이 손상되지 않고 온전하게 나타난 영역을 확인할 수 있었는데, 이는 Laser의 진행 방향을 확인할 수 있는 좋은 지표가 된다. 다른 시편에서는 이처럼 온전한 Melt pool의 사진을 확인하기가 힘든데 이 이유는 Layer의 두께와 시편 연마의 방식에 달려있다. 본 연구에서는 해당 시편의 미세조직 분석을 위해 원형연마 기계를 사용하여 수동으로 연마를 하였다. 이 과정에서 30um씩 적층 되어 있는 Layer를 사람 손으로 한층 한 층 연마하여 애칭 하기가 사실상 힘들어서 Layer에서 나타나는 Melt

pool들이 끊어진 것처럼 보인다. 이는 공정의 문제이기보다는 연마 방식의 문제로 판단하면 된다.

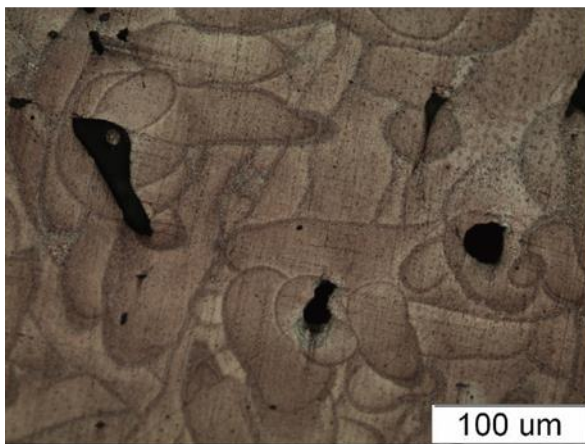
일반적으로 Laser power가 높아질수록 기공이 적고, 두꺼운 melt pool이 형성되는데 이는 각 시편의 (a) 50배율 사진을 비교해 보면 알 수가 있다. Laser power가 170W인 1번 시편보다는 Laser power가 190W인 3번 시편이 기공이 훨씬 적게 존재하는 사실을 확인할 수 있었다. 따라서 Laser speed가 2100mm/s인 시편군중에서는 3번시편의 미세조직이 가장 기공이 적고 온전한 melt pool이 많이 존재하는 최적의 조건을 가지는 시편이라고 할 수 있으며, 3번 시편의 에너지 밀도 값은 $43.1\text{J}/\text{mm}^3$ 이었다. 이는 앞서 분석한 밀도 결과와 어느 정도 연관성이 있다고 판단된다. Laser speed가 2100mm/s인 시편 중 기공이 가장 적고 Melt pool의 상태가 온전해 보이는 3번 시편의 비밀도가 98.5%로 가장 높게 측정되었다. 하지만 밀도의 경우 아르키메데스의 원리를 이용하여 측정한 밀도이기 때문에 가장 간단하게 측정할 수 있지만 오차가 존재할 수 있으며, 이를 절대적인 값으로 판단하기보단 미세조직 분석 사진과 경도 분석 결과를 밀도와 어느정도 연관이 있다는 생각으로 추후의 분석결과에 대해 고민하는 것이 좋을 듯하다.



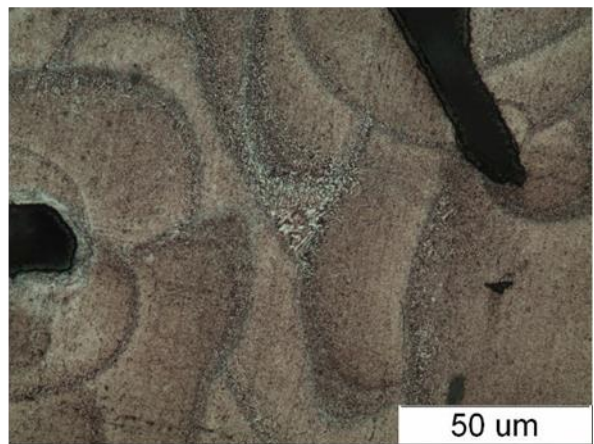
(a)



(b)

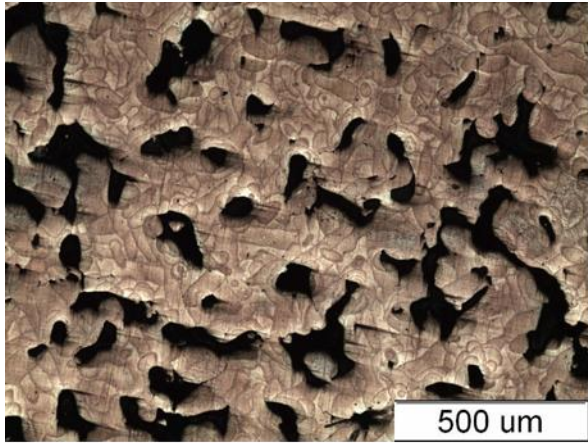


(c)

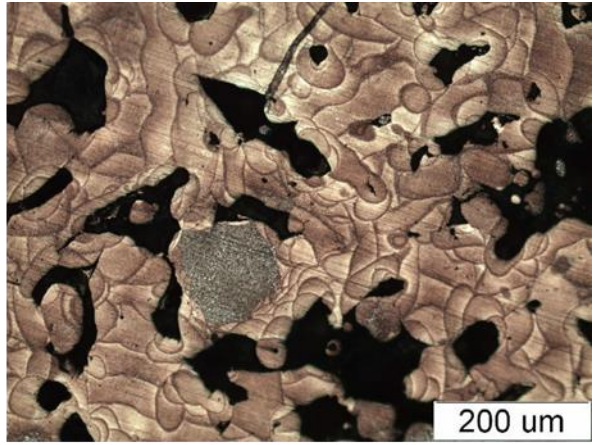


(d)

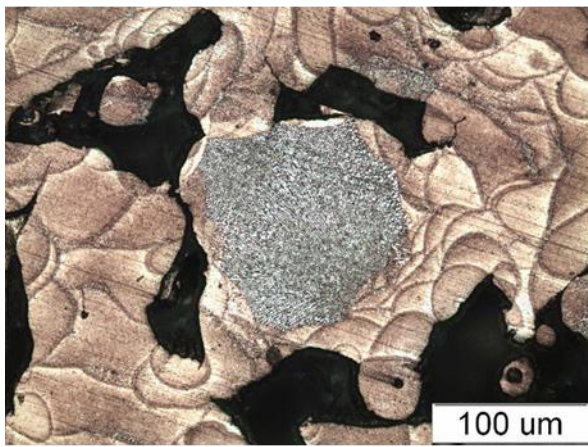
Fig 31. Microstructure of AlSi10Mg No.1 on the Z plane



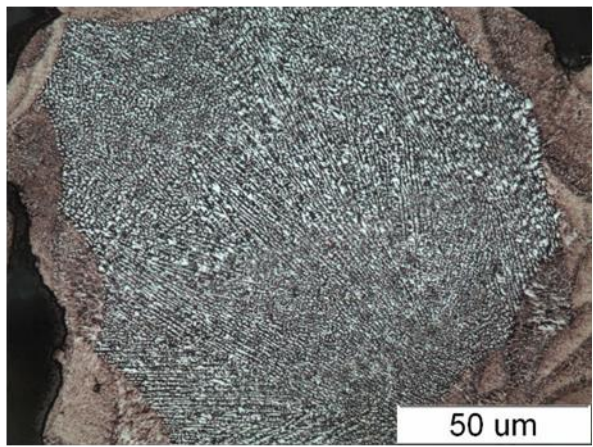
(a)



(b)

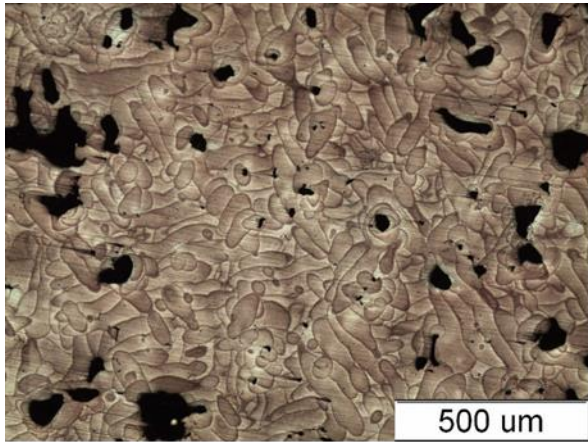


(c)

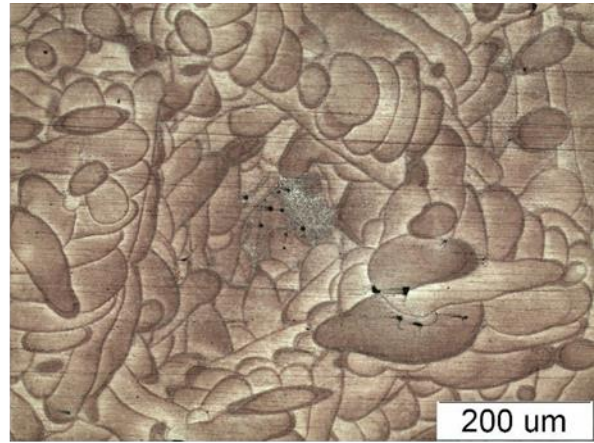


(d)

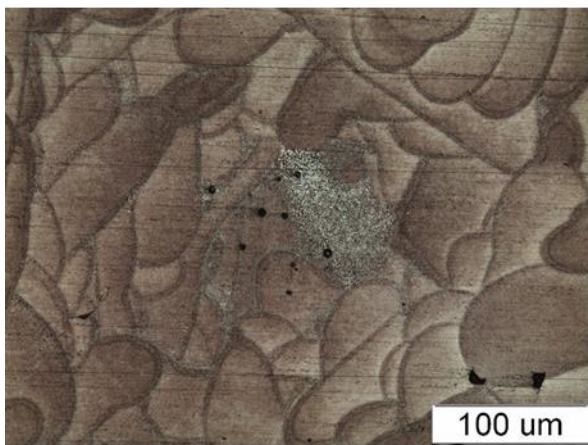
Fig 32. Microstructure of AlSi10Mg No.2 on the Z plane



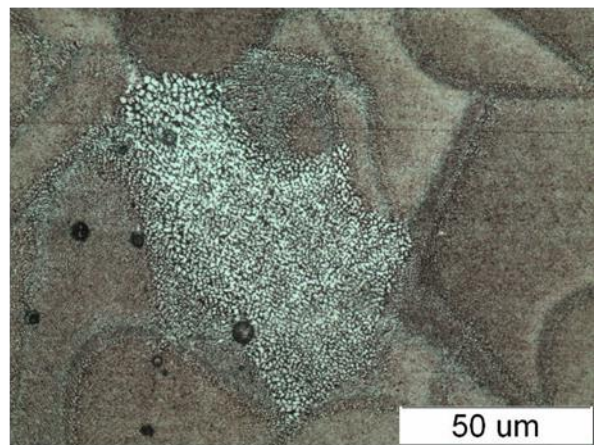
(a)



(b)



(c)



(d)

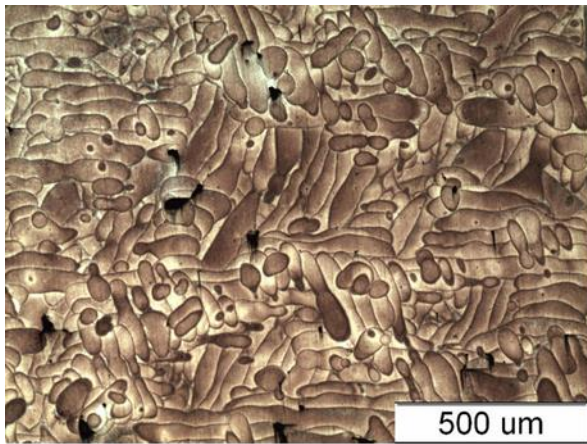
Fig 33. Microstructure of AlSi10Mg No.3 on the Z plane

4번, 5번 그리고 6번 시편의 공정 변수 중 Laser speed는 2,800mm/s로 동일하며, Laser power는 차례대로 170W, 180W, 190W이다. Fig 36, Fig 37, Fig 38 역시 앞서 설명한 사진들과 동일하게 (a)는 50배율, (b)는 100배율, (c)는 200배율, (d)는 500배율의 분석사진이다.

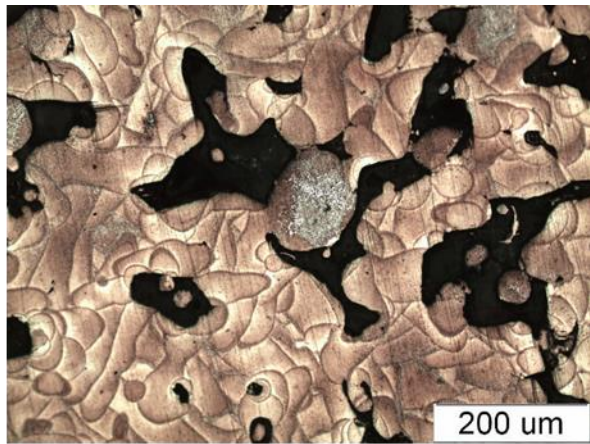
Laser speed가 2,800mm/s인 시편들은 앞서 확인한 Laser speed가 2,100mm/s의 시편들보다 기공이 더 많고, 형성된 기공과 빠른 Laser speed 등의 공정 조건으로 인해 Melt pool이 조금 더 짧고 불균일하게 형성되어 있는 것을 확인할 수 있다. Laser speed가 2800mm/s시편들 중에선 4번 시편이 가장 기공이 적으며 온전한 형태의 melt pool을 가지고 있다. 하지만 2100mm/s의 laser speed를 가지는 1번 시편과 4번 시편을 비교해보았을 때 고배율의 사진에서 보이는 기공이 훨씬 더 큰 것을 확인할 수 있었다. 에너지 밀도의 개념에서 얘기해보면 1번 시편의 에너지밀도는 $38.6\text{J}/\text{mm}^3$ 이며, 4번 시편의 에너지밀도는 $28.9\text{J}/\text{mm}^3$ 인데 Laser power는 170W로 동일하나 4번 시편의 Laser speed가 700mm/s정도 더 빠르게 레이저를 주사하기에 에너지 전달이 온전하게 이루어지지 않을 수 있다. 이 과정에서 용융이 제대로 일어나지 않아서 1번 시편보다 좀더 큰 기공을 형성한 것으로 판단된다. 또한 Laser Speed가 2100mm/s인 시편들의 비밀도는 평균 98.2%이었지만, Laser Speed가 2800mm/s인 시편들의 비밀도는 평균 97.6%로 앞서 분석한 시편들보다 낮은 비밀도를 가지는 것을 확인할 수 있었다.

각 시편의 (d) 500배율 사진을 보면 앞선 시편에서 확인한 조직을 포함하여 다른 조직들을 명확히 확인할 수 있으며, 이 때의 조직 종류는 크게 3가지로 나눌 수가 있다. 가장 첫 번째 조직은 Melt pool 사이에 존재하는 $1\sim 2\mu\text{m}$ 의 Submicron cell이며, 두 번째 조직은 Melt pool 내부에 존재하는 $1\mu\text{m}$ 이하의 Submicron cell, 마지막 세 번째 조직은

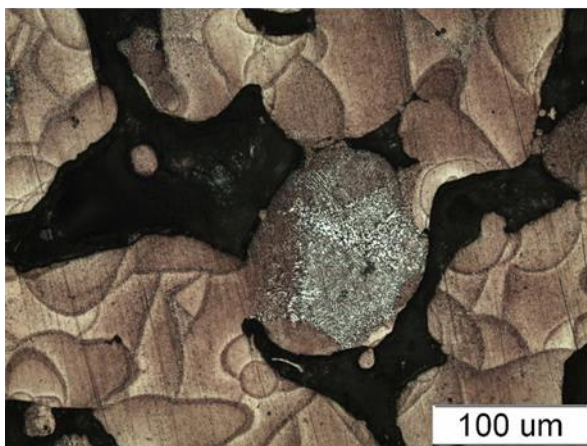
앞선 용융과 냉각에 의해 형성된 수지상이다. 이처럼 여러 개의 조직이 나타나는 이유는 매우 많겠지만, 가장 영향을 많이 끼치는 이유는 melt pool의 중심부와 가장자리의 온도구배라고 판단된다. 제품을 적층 하기 위해서는 분말을 깔고 Laser를 조사하여 Melt pool을 형성해야 하는데 이 과정에서 Melt pool의 중심부의 온도와 가장자리의 온도 차이가 발생하게 된다. 이는 응고 시에 수지상간 영역에서 고/액상계면이 이동될 때 액상 내부의 용질 농도차에 따른 조성적 과냉을 형성시키며, 이를 최소화하려는 경향 때문에 위와 같은 조직이 발생한다고 판단된다.



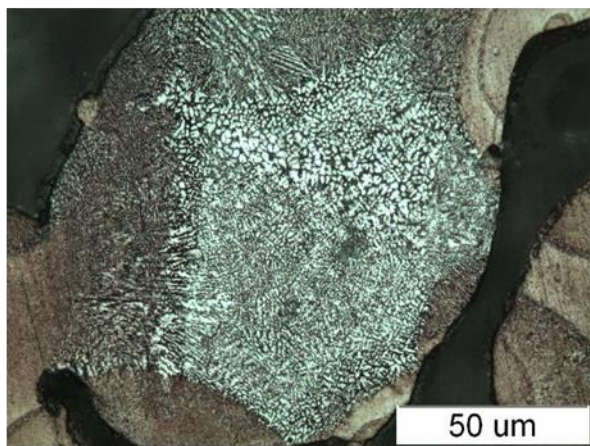
(a)



(b)

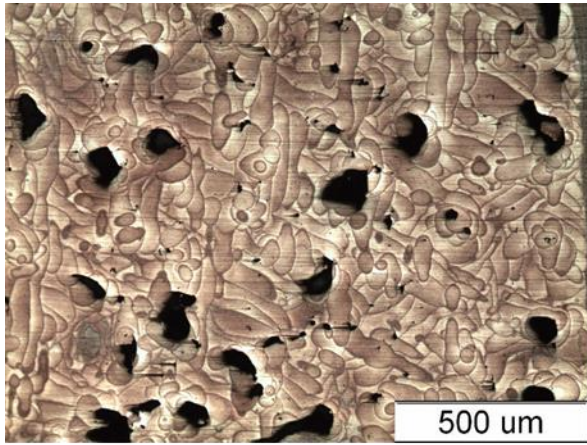


(c)

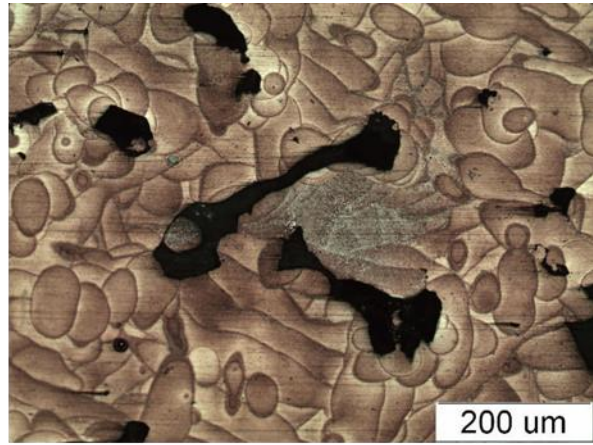


(d)

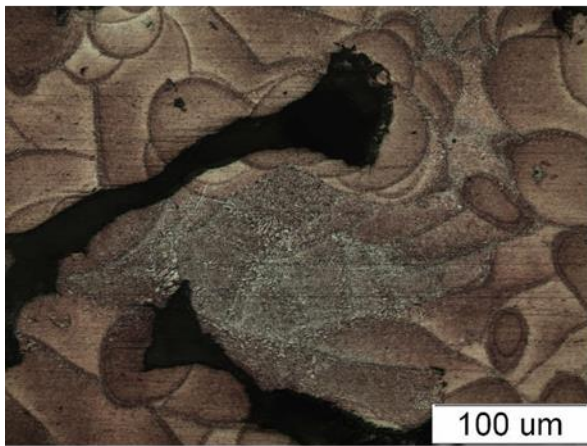
Fig 34. Microstructure of AlSi10Mg No.4 on the Z plane



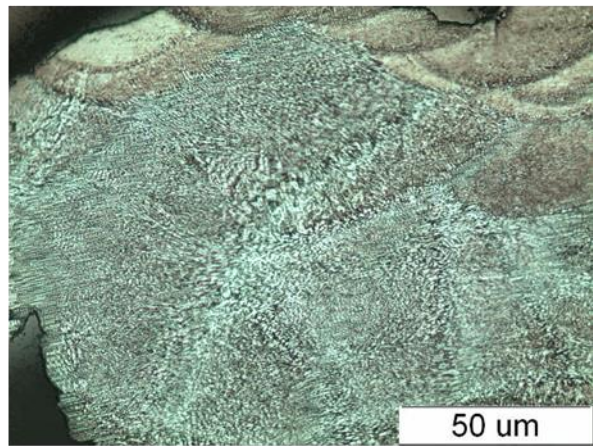
(a)



(b)

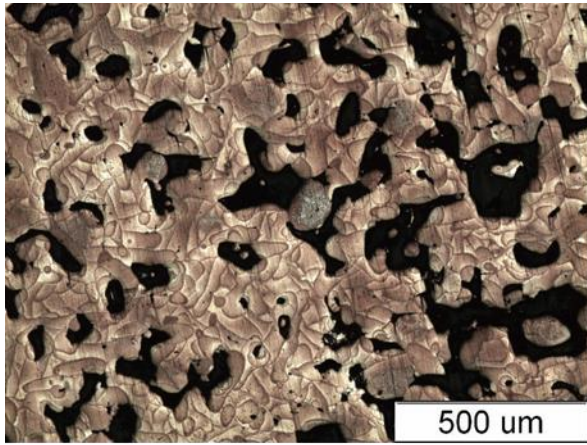


(c)

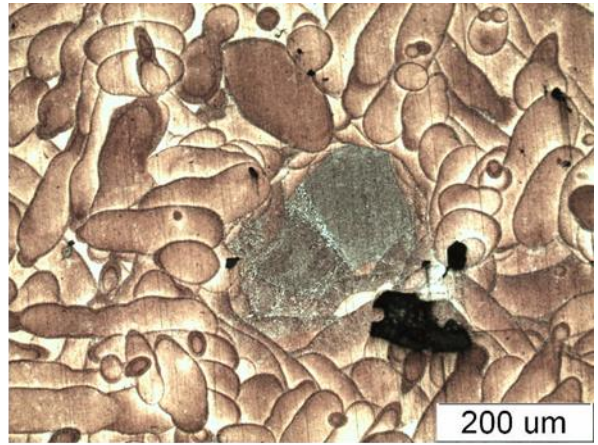


(d)

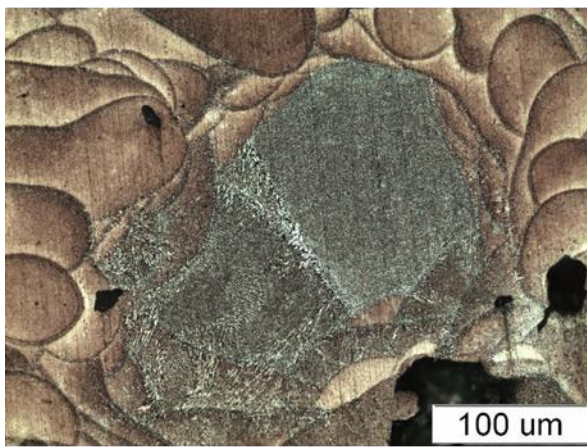
Fig 35. Microstructure of AlSi10Mg No.5 on the Z plane



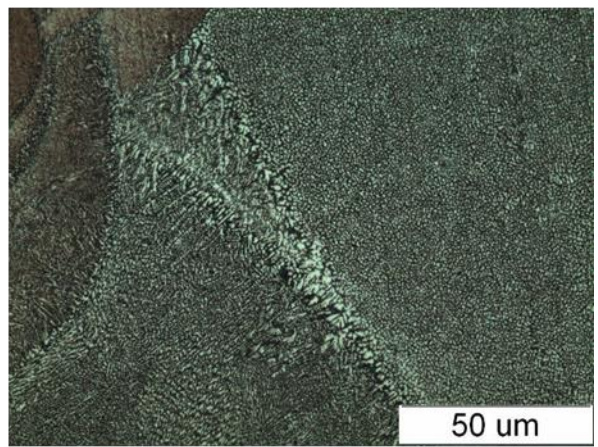
(a)



(b)



(c)



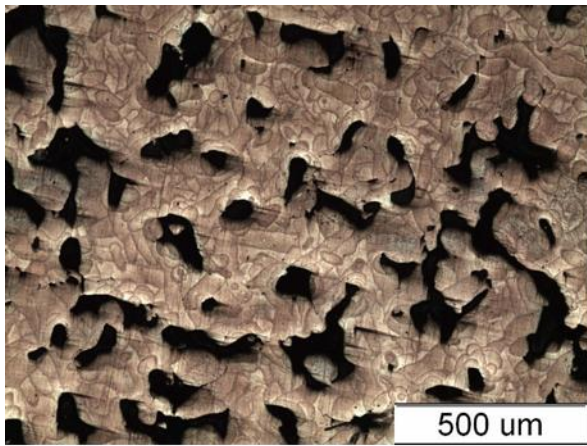
(d)

Fig 36. Microstructure of AlSi10Mg No.6 on the Z plane

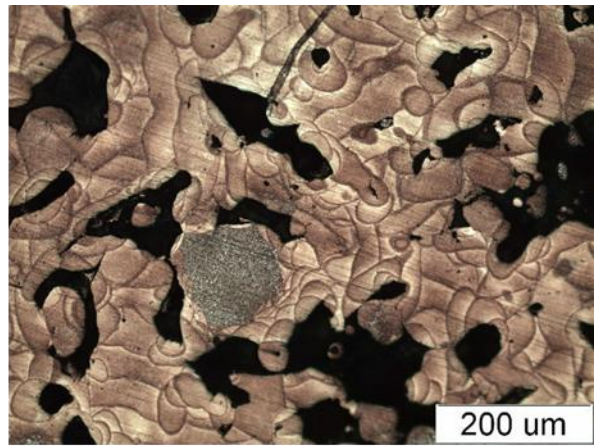
7번, 8번 그리고 9번 시편의 공정 변수 중 Laser speed는 3,500mm/s로 동일하며, Laser power는 차례대로 170W, 180W, 190W이다. Fig 39, Fig 40, Fig 41 역시 앞서 설명한 사진들과 동일하게 (a)는 50배율, (b)는 100배율, (c)는 200배율, (d)는 500배율의 분석 사진이다.

Laser speed가 3500mm/s인 시편들은 앞서 분석한 시편들보다 대체로 기공이 많은 편임을 (a) 50배율 사진에서 확인할 수 있다. 또한 각 시편의 (d) 500배율 사진에서 앞에서 확인한 조직들을 역시 분석할 수 있었다. Laser speed가 3500mm/s인 시편들 중에서는 9번 시편이 가장 최적의 미세조직을 나타내는 것으로 판단되나, 앞서 분석한 2100mm/s 시편과 2800mm/s인 시편에 비해서는 조직상태가 불완전하다. 하지만 3500mm/s의 시편에서 알 수 있는 사실이 있는데 앞서 분석한 시편에서는 Laser power가 170W인 1번과 4번 시편들의 미세조직이 양호했지만, laser speed가 3500mm/s인 시편군에서는 190W로 가장 높은 Laser power를 가지는 9번 시편이 양호했다. 9번 시편의 에너지밀도는 25.9 J/mm^3 로 앞서 분석한 시편보다 에너지가 월등히 낮지만 전체적으로 에너지도 낮고 laser speed도 굉장히 빨라 분말에 온전하게 열이 전달되지 않아서 용융이 잘 일어나지 않아 많은 기공이 형성되는 7번과 8번시편에 비해 그나마 190W의 laser power를 가지는 9번 시편이 기공이 적게 형성되는 것을 확인하였다. Laser speed가 3500mm/s인 시편들의 평균 비밀도는 97%로 가장 낮았지만 앞선 분석한 시편들보다 훨씬 낮은 비밀도를 가지는 것을 확인하였고, 이 중에서 9번 시편의 비밀도는 97.4%로 Laser speed가 3500mm/s인 시편들의 평균 밀도보다 높게 측정되는 경향을 확인할 수 있었다.

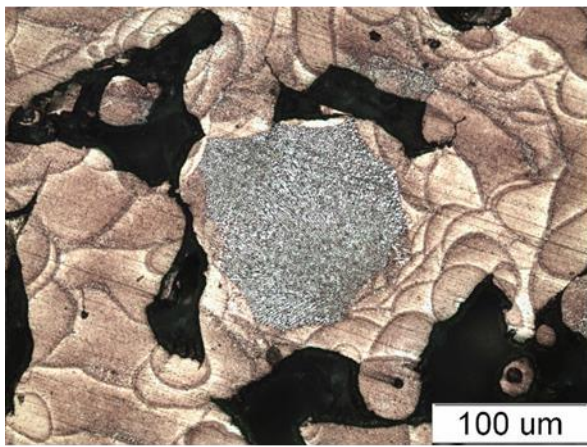
AlSi10Mg의 Z면을 분석한 결과는 Laser speed와 Laser speed가 무조건 높거나 낮다고 좋은 것이 아닌 이 두변수를 통해 계산되는 에너지밀도가 굉장히 중요하다는 것을 확인할 수 있다. 따라서 앞서 최적의 조건을 가지는 시편들을 참고하면 AlSi10Mg의 에너지밀도가 25~38 J/mm³인 시편들의 미세조직 특성이 가장 좋으나, 같은 에너지 밀도를 가지면서 laser speed가 낮은 시편을 추가적으로 분석해볼 필요성도 있다고 생각된다.



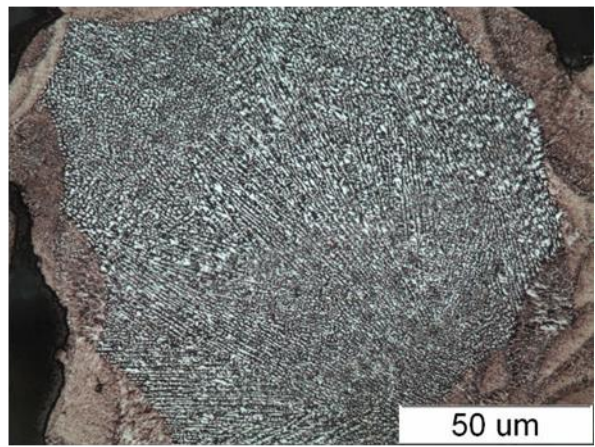
(a)



(b)

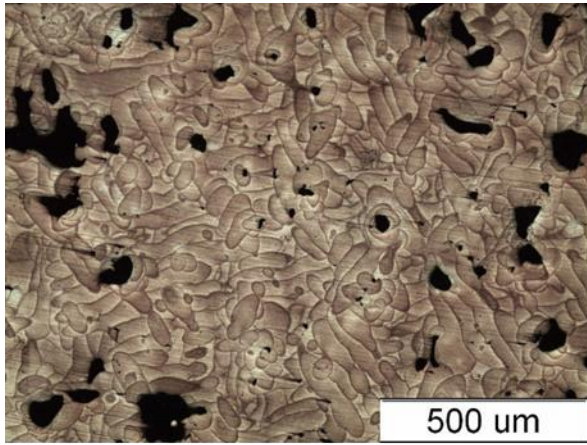


(c)

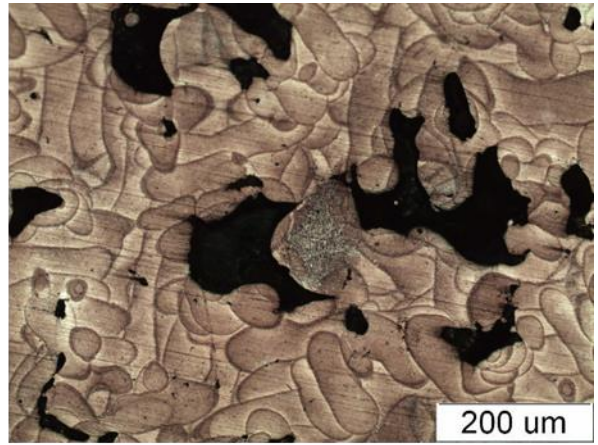


(d)

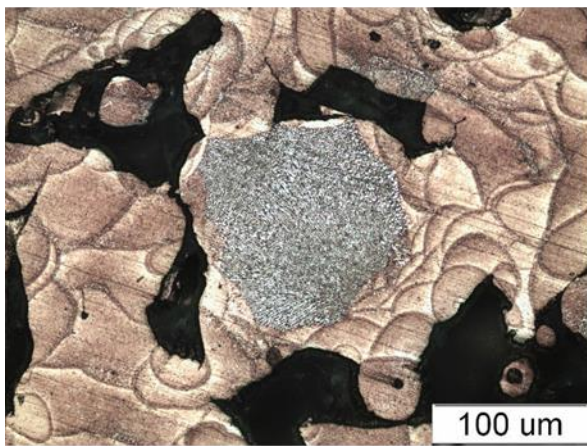
Fig 37. Microstructure of AlSi10Mg No.7 on the Z plane



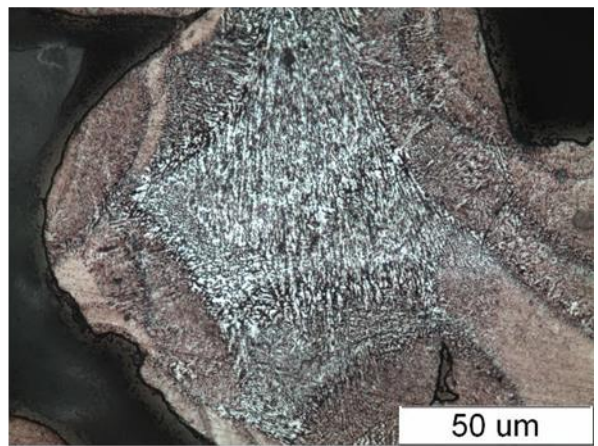
(a)



(b)

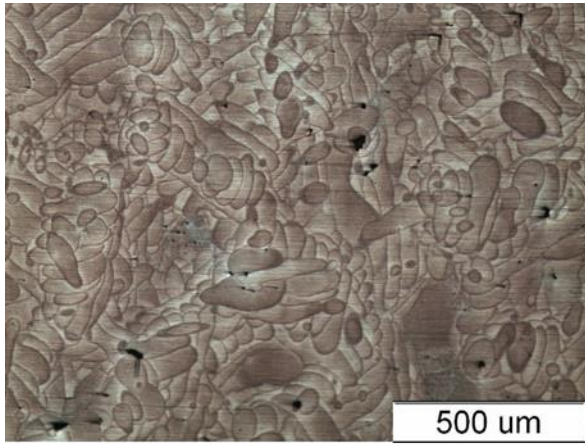


(c)

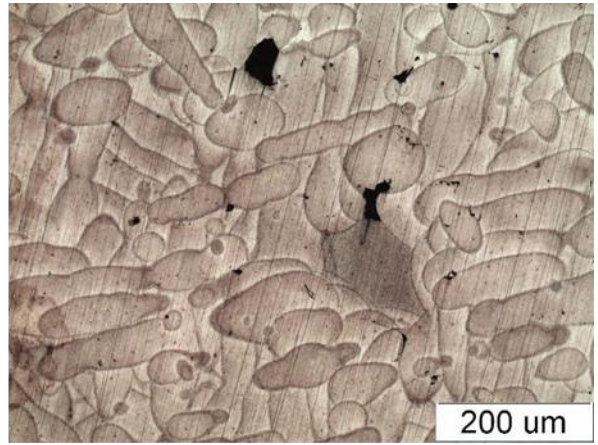


(d)

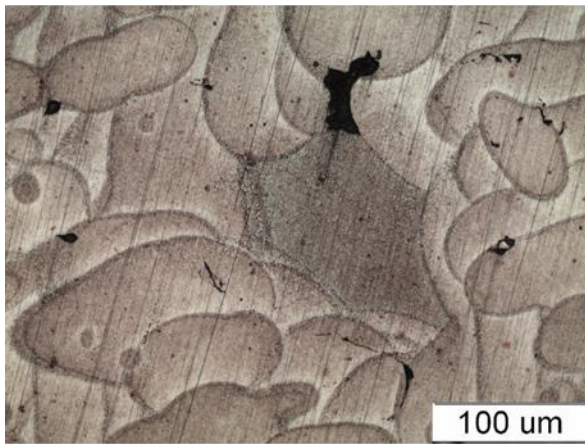
Fig 38. Microstructure of AlSi10Mg No.8 on the Z plane



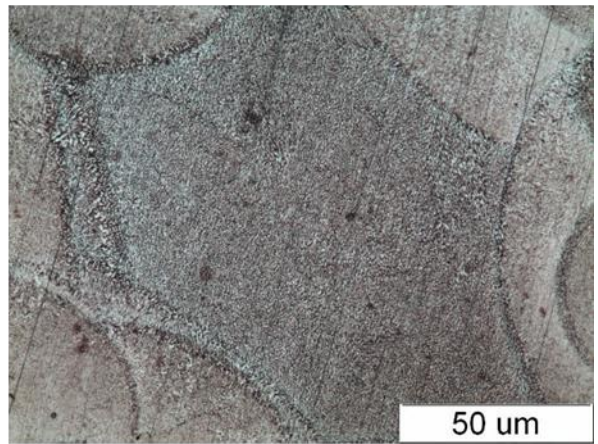
(a)



(b)



(c)



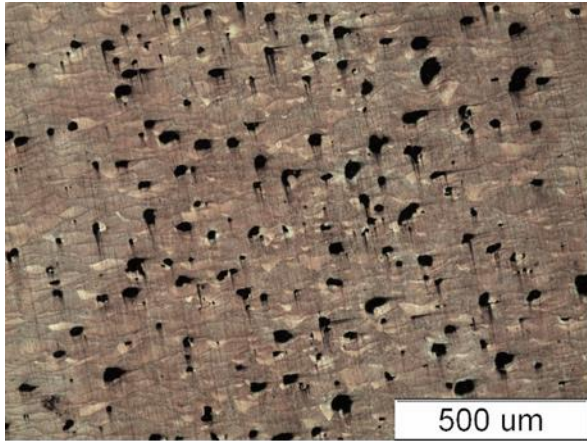
(d)

Fig 39. Microstructure of AlSi10Mg No.9 on the Z plane

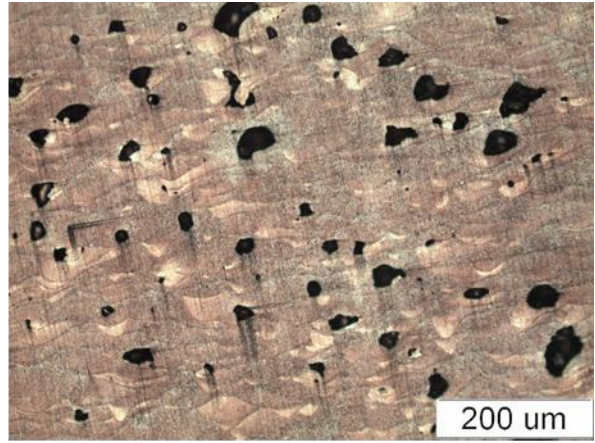
Fig 42부터 Fig 50까지는 시편의 X 면을 에칭한 후 광학현미경으로 미세조직을 분석한 사진이며 Z 면과 동일하게 Keller 용액을 사용하여 에칭을 완료하였다. (a)와 (b)는 X면에서 좌측 부분의 미세조직을 분석한 사진이며 배율은 각각 100배율과 500배율을 나타낸다. (c)와 (d)는 X면에서 우측 부분의 미세조직을 분석한 사진이며 배율은 역시 각각 100배율과 500배율이다.

X 면에서는 가우시안 효과에 기인하여 입사 레이저 빔의 Z축 방향으로 반 타원형태의 Melt pool을 형성하며, 이 Melt pool들이 모여 물결무늬를 나타내는데, 이는 PBF 방식으로 시편을 제작했을 때 나타나는 대표적인 특징이며, 모든 AlSi10Mg 시편의 X면 미세조직 분석 사진에서 이를 확인할 수 있다. 반 타원 형태의 Melt pool의 두께(노란색 화살표)를 측정한 결과 시편 평균 28.9 μm 였으며, 이는 시편 제조에 사용된 Metalysis 150 장비의 층 두께(Layer Thickness) 설정 변수인 30 μm 와 유사한 점을 보였다. 이에 따라 알 수 있는 사실은 Laser power와 Laser speed 변수는 Melt pool의 두께에는 크게 영향을 미치지 않으며 Melt pool 두께 차이로 인한 공정 안정성의 감소는 일어나지 않는다는 것이다.

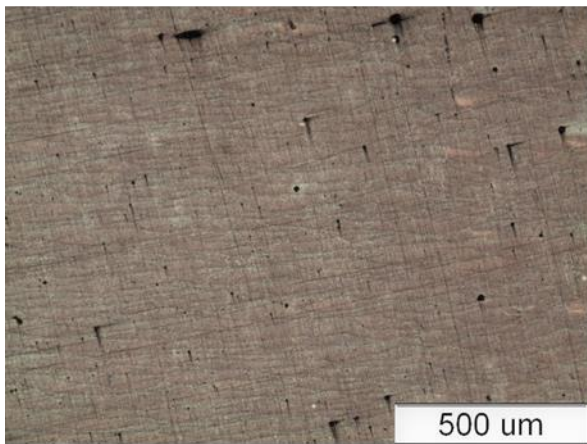
앞서 언급한 물결무늬 말고도 시편마다 발생하는 또 다른 공통적인 특징을 발견할 수 있었다. 각 시편의 Fig에서 확인할 수 있듯이 X면의 좌측편이 우측편에 비해 기공이 훨씬 많은 것을 확인할 수 있다. 또한 X면의 좌측편의 Melt pool은 세로는 길고 가로는 짧지만, 우측편의 Melt pool은 세로는 짧고 가로는 길게 형성되어 있는 것을 확인할 수 있었다. 공통적인 현상이 발생한 것으로 봐서 이는 Laser power와 Laser speed의 공정 변수 차이로 발생한 것이 아닌 PBF 장비 자체의 설정에서 문제가 있는 것으로 판단된다. 주 원인은 적층이 이루어지는 Bed의 평형이 맞지 않아 문제가 발생한 것으로 보인다.



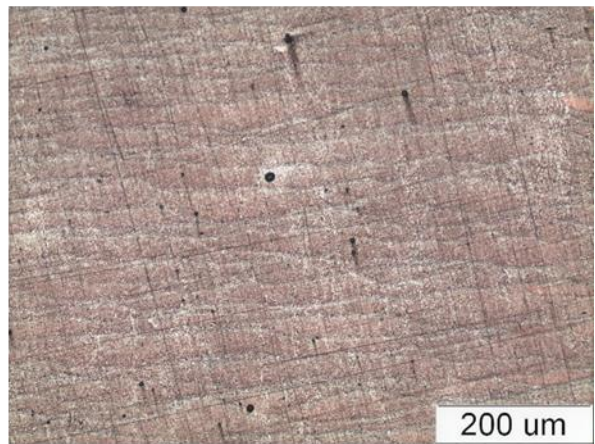
(a)



(b)

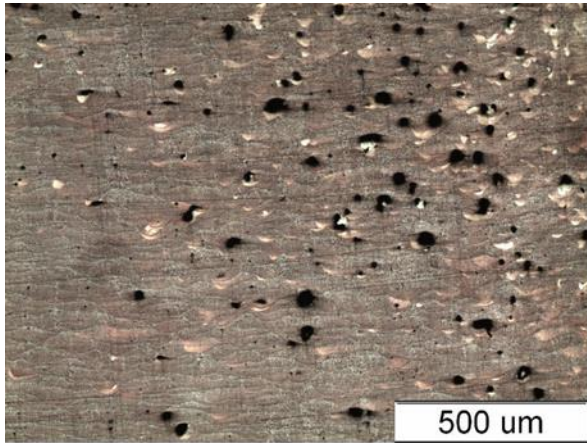


(c)

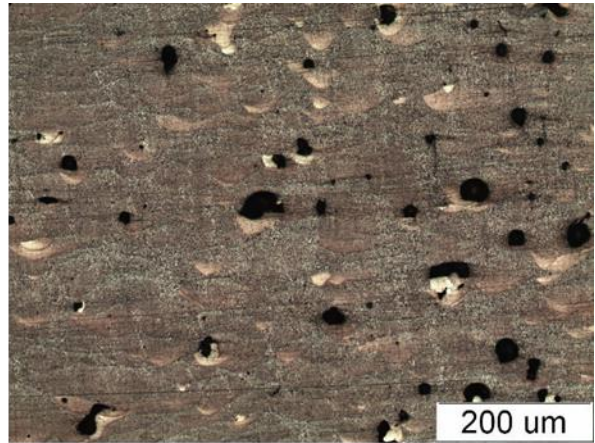


(d)

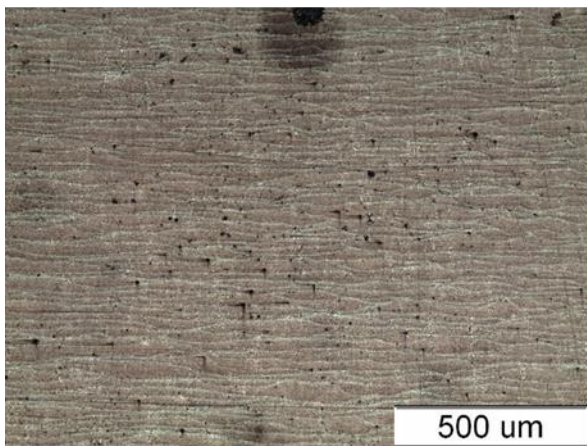
Fig 40. Microstructure of AlSi10Mg No.1 in the X plane



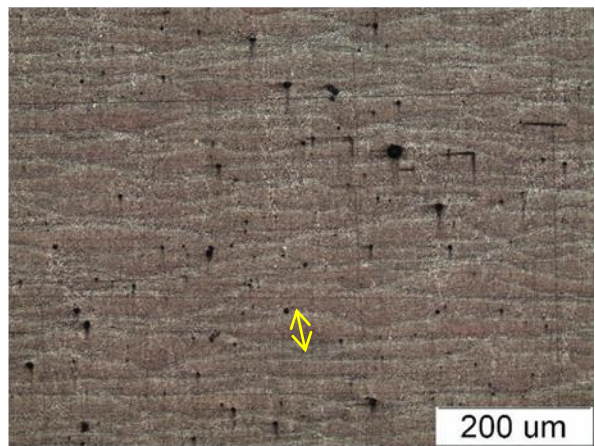
(a)



(b)

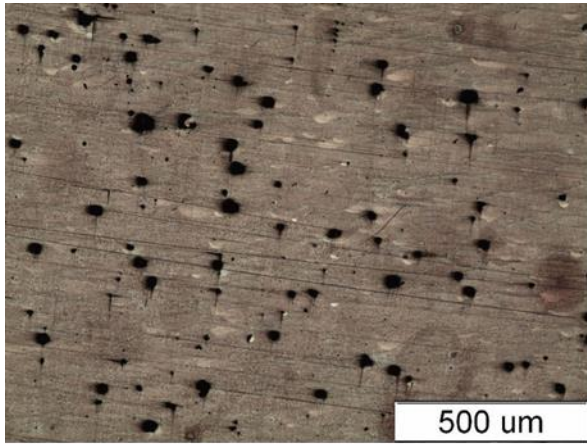


(c)

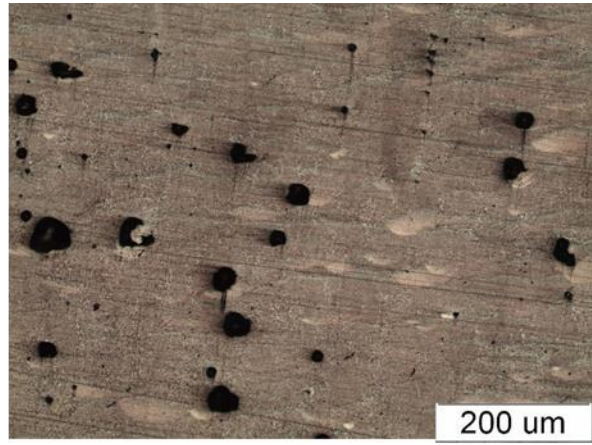


(d)

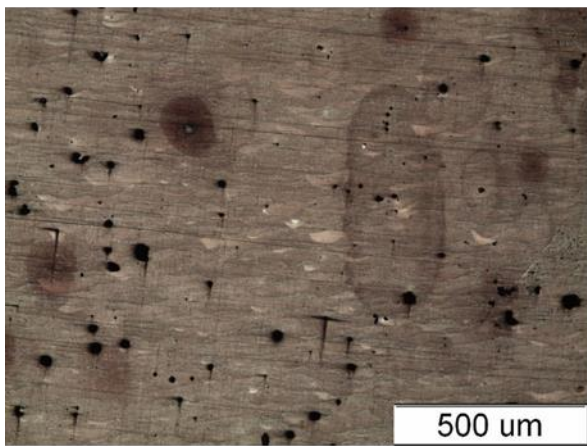
Fig 41. Microstructure of AlSi10Mg No.2 in the X plane



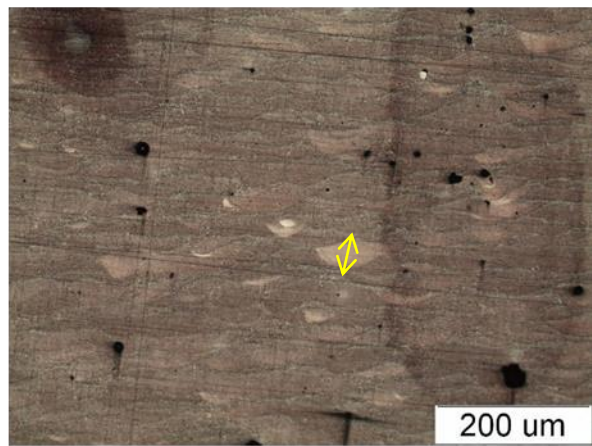
(a)



(b)

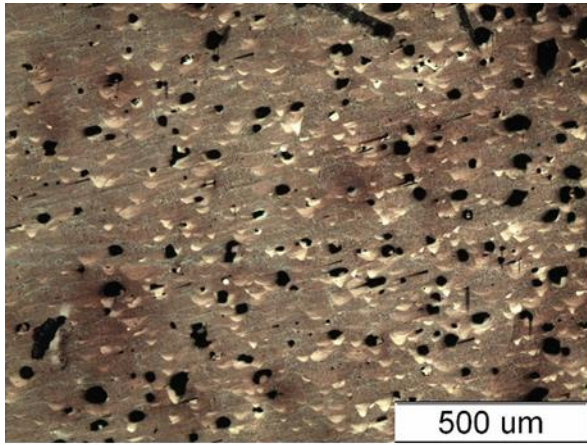


(c)

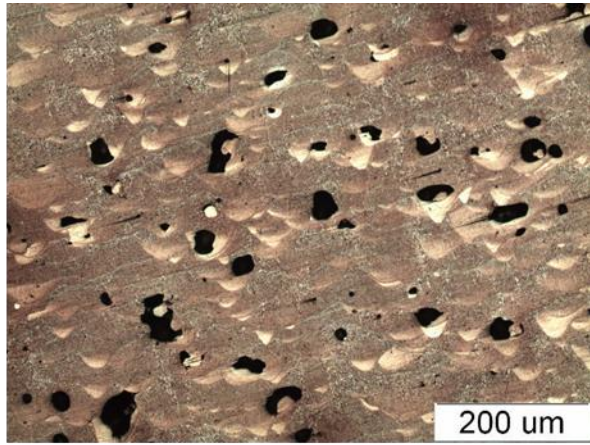


(d)

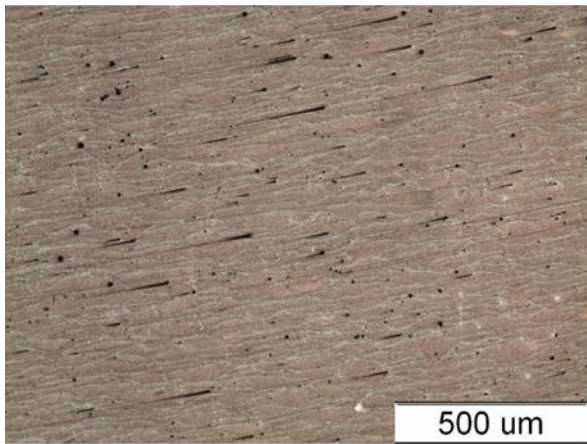
Fig 42. Microstructure of AlSi10Mg No.3 in the X plane



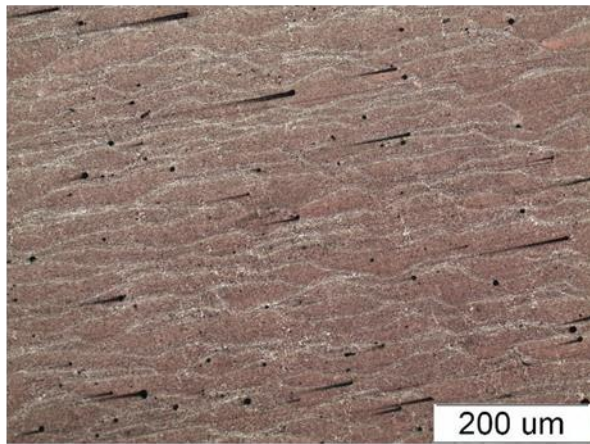
(a)



(b)

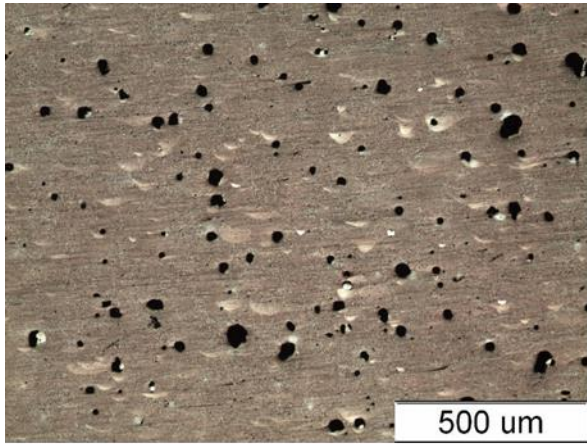


(c)

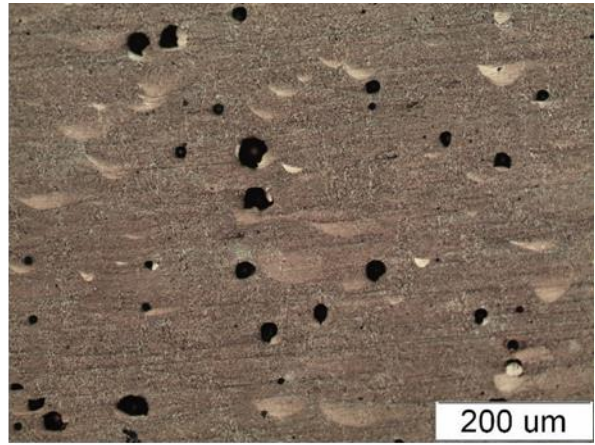


(d)

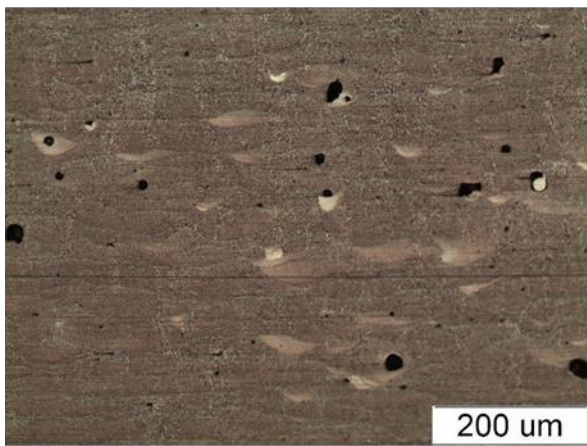
Fig 43. Microstructure of AlSi10Mg No.4 in the X plane



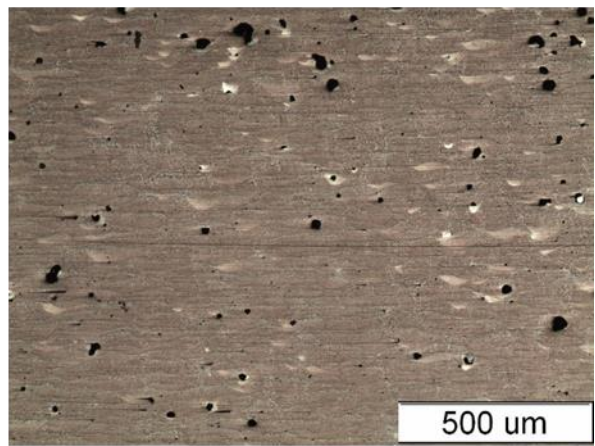
(a)



(b)

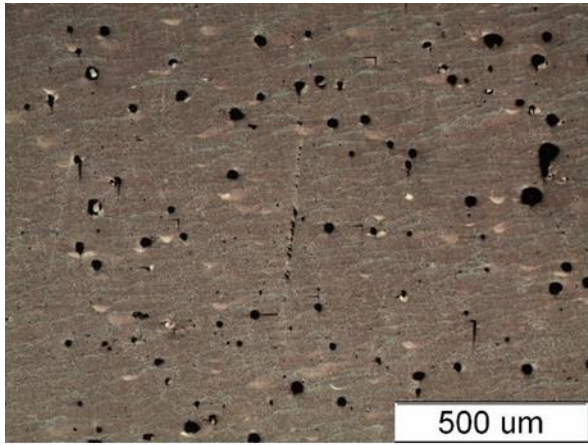


(c)

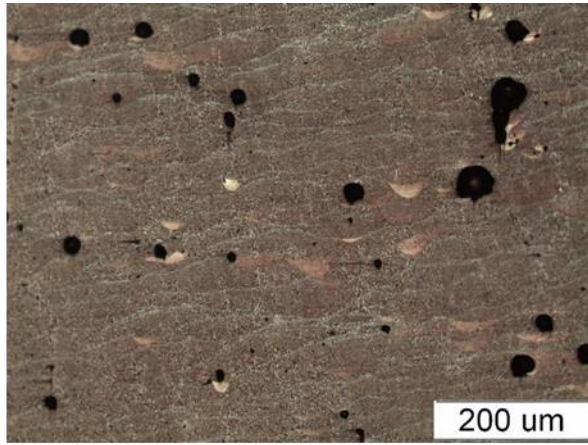


(d)

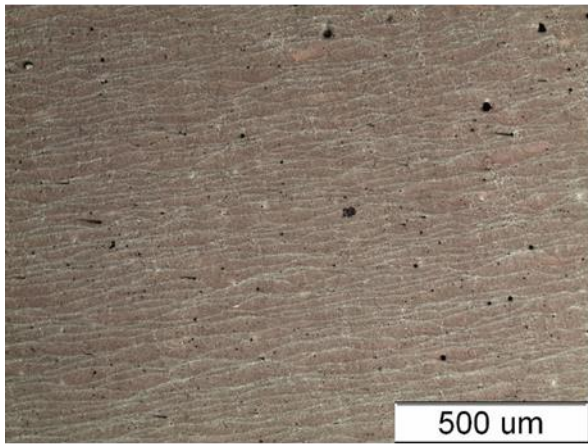
Fig 44. Microstructure of AlSi10Mg No.5 in the X plane



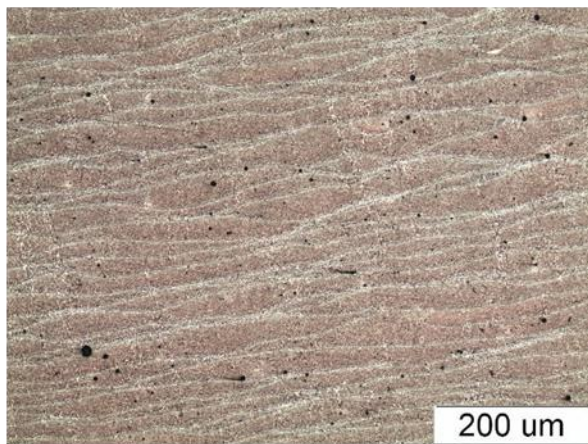
(a)



(b)

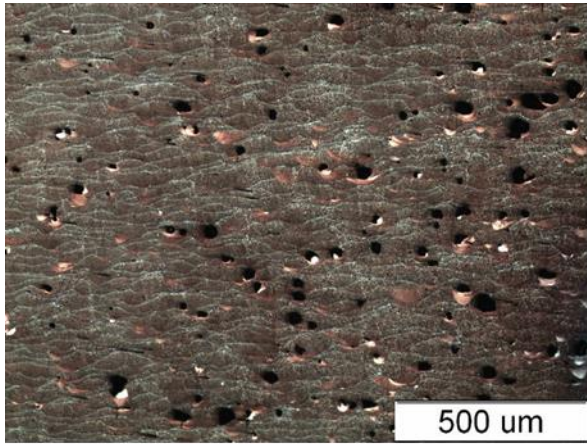


(c)

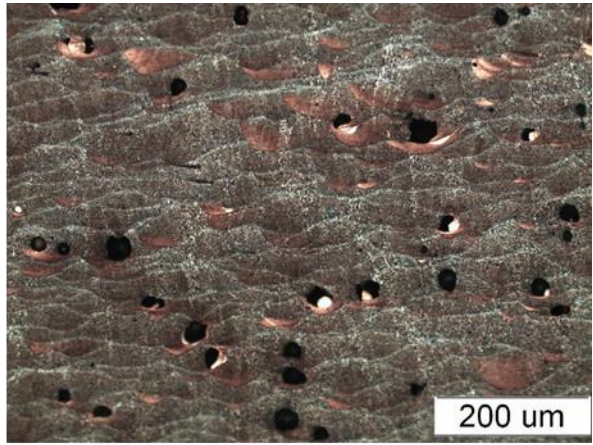


(d)

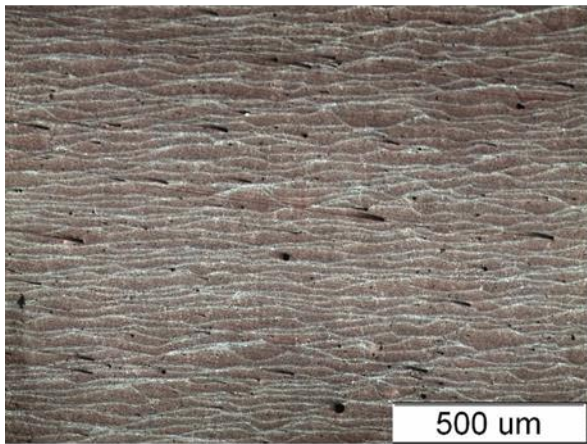
Fig 45. Microstructure of AlSi10Mg No.6 in the X plane



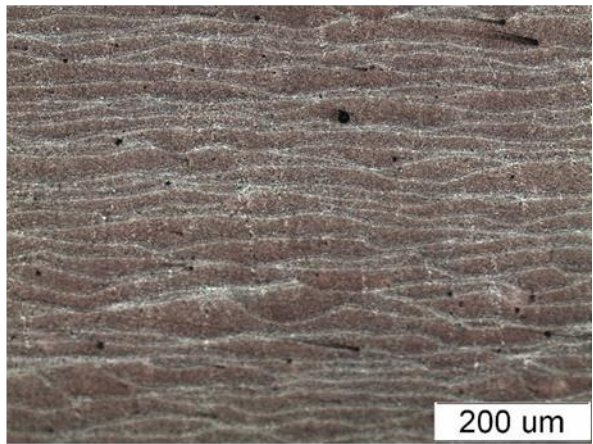
(a)



(b)

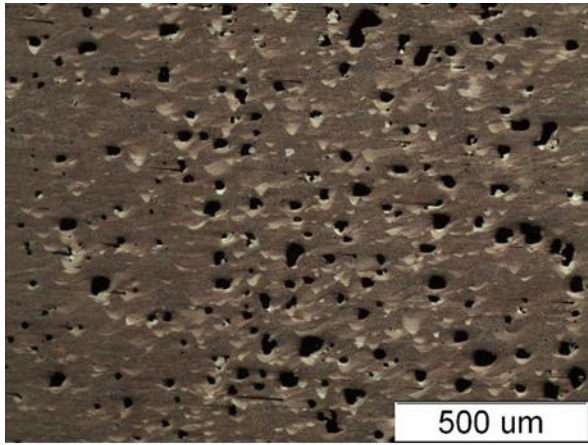


(c)

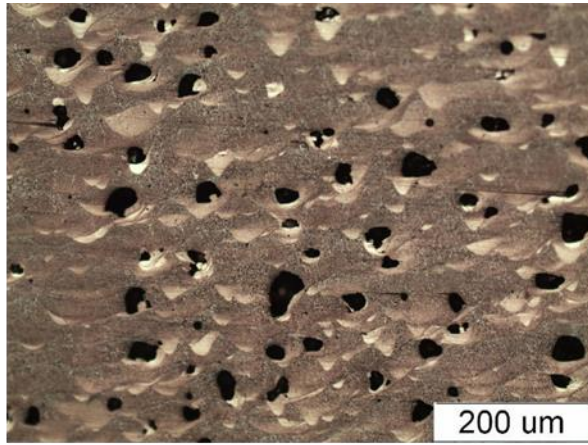


(d)

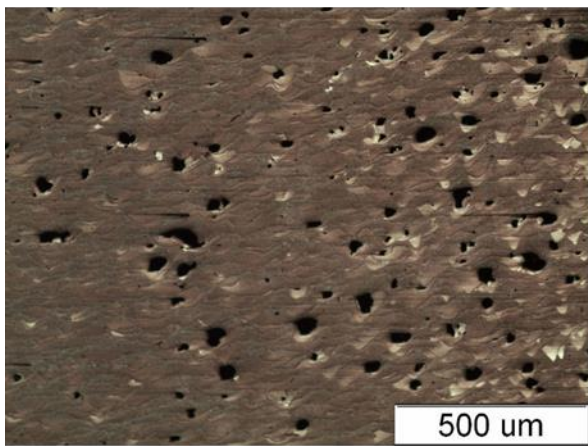
Fig 46. Microstructure of AlSi10Mg No.7 in the X plane



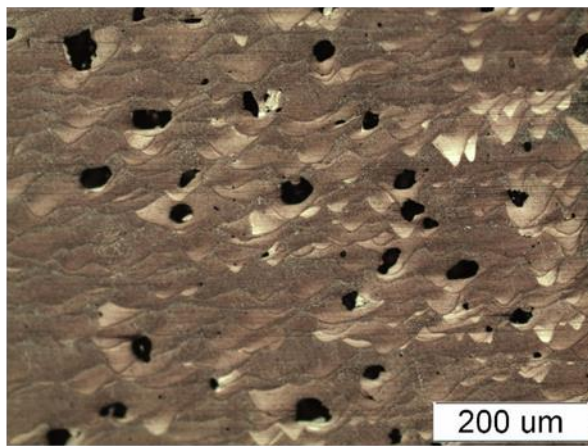
(a)



(b)

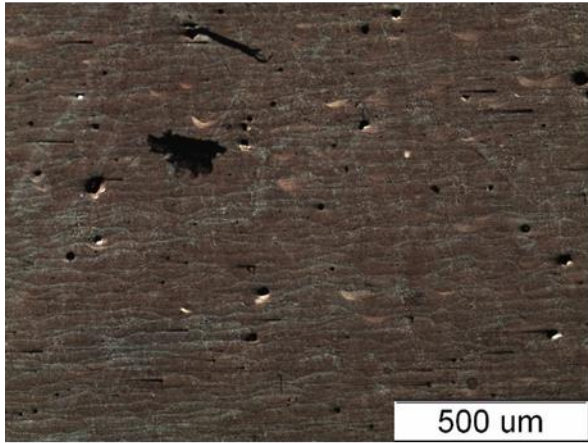


(c)

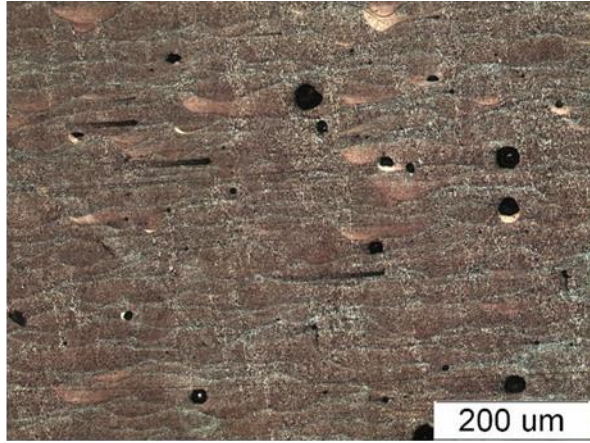


(d)

Fig 47. Microstructure of AlSi10Mg No.8 in the X plane



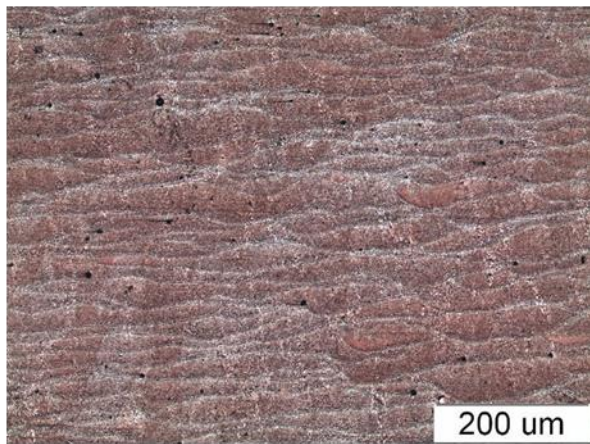
(a)



(b)



(c)

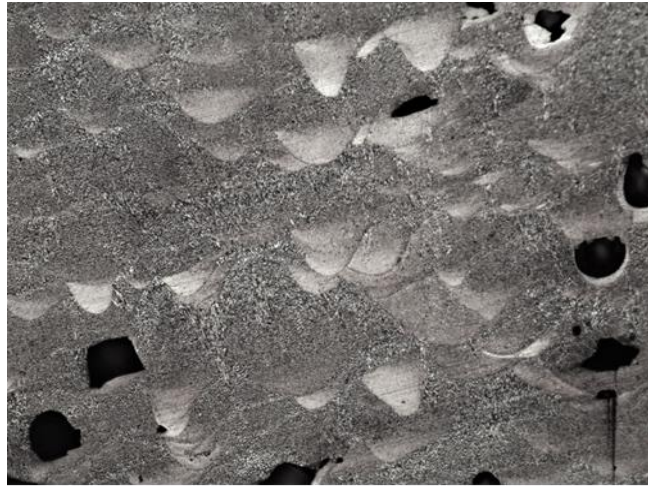


(d)

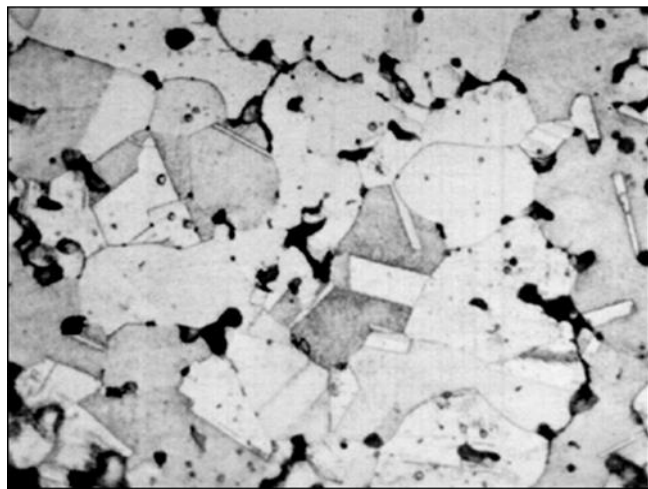
Fig 48. Microstructure of AlSi10Mg No.9 in the X plane

Fig 51은 PBF 공정으로 제조된 AlSi10Mg의 미세조직 사진을 일반적인 SI 사형주조의 미세조직 사진과 분말 야금의 미세조직 사진을 비교해보았다. 먼저 분말 야금과 PBF공정의 미세조직의 차이에 대해 서술해보면, 둘 다 분말을 사용하여 공정을 진행한다는 공통점이 있다. 따라서 PBF에는 분말들이 모여서 형성한 Melt pool을 확인할 수 있으며, 분말 야금에서는 분말들이 압축 및 소결되어 형성한 결정립계를 확인할 수 있다. 두 공정 모두 분말을 사용한다는 공정 특성상 기공이 형성된다는 공통점이 있지만, 분말 야금은 압축 및 소결에 의해 발생하는 분말의 결정립 성장 및 조밀화 때문에 결정립의 크기 차이가 큰 편이다. 하지만 PBF의 경우 형성되는 Melt pool의 크기나 두께가 일정한 편이다. 그리고 분말 야금의 경우 일반적으로 모든 방향으로 균일하게 열과 압력이 작용하기에 결정립의 방향이 등방향을 나타내지만, PBF의 경우 Z축의 방향으로 적층 하며 시편을 제조해 나가기에 Melt pool의 방향이 아래로 볼록한 모양으로 형성하게 된다.

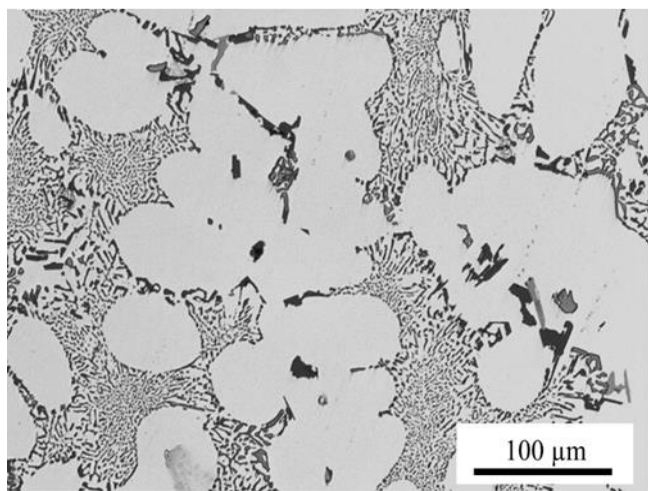
다음은 PBF 공정과 주조 공정과의 차이를 비교해보았으며, 둘의 미세조직 차이는 확연하게 알아볼 수 있었다. 주조의 경우에는 알루미늄 기지상 주위로 공정상이 둘러싸면서 형성하는 수지상 구조를 확인할 수 있으며, 금속간 화합물이 일부 존재하는 사실 역시 확인하였다. 하지만 PBF공정의 경우 레이저의 작용으로 인해 발생하는 Melt pool을 확인할 수 있었으며, Etching을 하면 발견할 수 있는 Melt pool 사이의 Submicron cell 조직을 확인할 수가 있다. PBF 공정 조직 역시 SEM이나 TEM을 통해 심층분석을 진행하게 되면 각 Melt pool존재하는 수지상 구조를 확인할 수 있는데 PBF 역시 레이저를 통한 용융 및 급속 냉각 매커니즘을 가지기 때문이다.



(a)



(b)



(c)

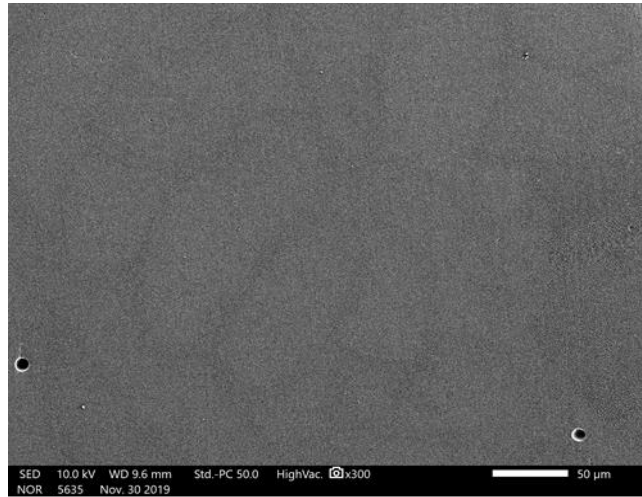
Fig 49. Microstructures of (a) AM, (b) Powder Metallurgy, (c) Sand casting

4. 2 AlSi10Mg 시편 분석

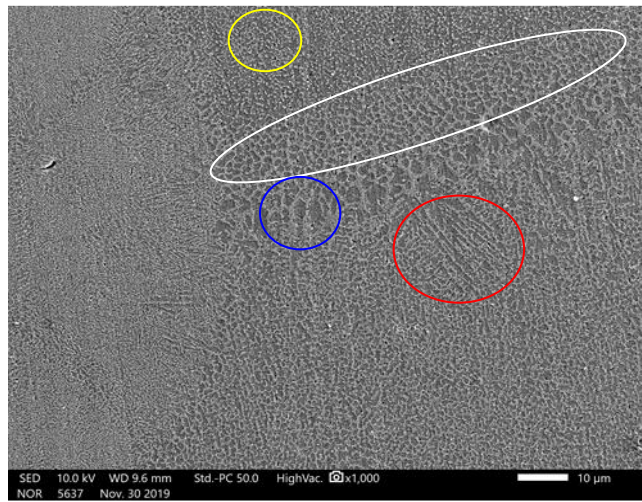
4. 2 .3 Scanning Electron Microscope (SEM)

Fig 51은 AlSi10Mg 3번 시편을 주사전자현미경(SEM)으로 분석을 한 사진이며, (a)는 300배율, (b)는 1,000배율, (c)는 3,000배율의 분석 사진이다. (a) 300배율의 사진에서 Melt pool의 경계면은 연속적이지 않지만 확실히 구분할 수 있다. 이처럼 Melt pool들이 이어지지 않고 끊겨 보이는 이유는 이전에 적층 했던 Layer 중 일부분이 재용융되어 열전달의 불균일성을 초래하여 Melt pool의 깊이와 형태를 변화시키기 때문이다.

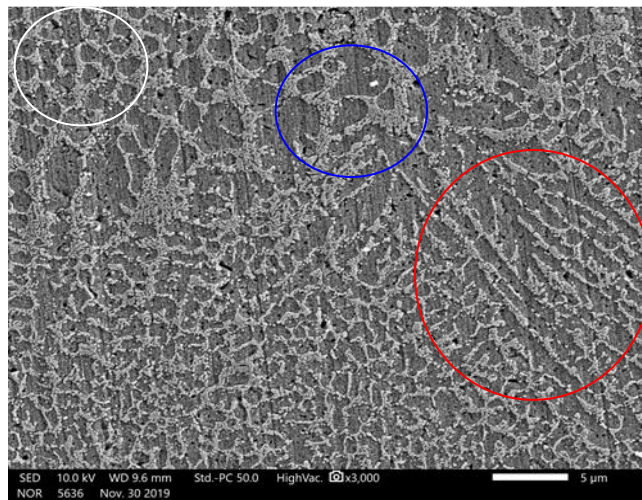
SEM에서 관찰되는 조직 역시 3가지로 나눌 수 있다. 먼저 Melt pool 내부에 존재하는 미세한 $1\mu\text{m}$ 이하의 Submicron cell을 확인할 수 있으며(노란 원), 이 조직들은 Melt pool에서 대부분을 차지하고 있다. Submicron cell이외에도 수지상을 확인할 수도 있는데 수지상의 경우 Melt pool의 중심을 향해 성장하는 경향이 있는 것을 확인할 수 있다(빨간 원). 두 번째로는 이보다 조금 더 큰 조대한 cell을 확인할 수 있는데 이는 대개 $5\mu\text{m}$ 정도 크기를 가지며, 이 조직들은 수지상과 다르게 Melt pool의 중앙으로 성장하려는 경향은 보이지 않는다(파란 원). 또한, 넓이는 미세한 Submicron cell 영역보다 넓지만, 길이는 짧은 경향을 나타낸다. 마지막으로 Heat affecter zones (HAZ)영역이며 폭이 약 $2\sim 3\mu\text{m}$ 로, 조대한 Submicron cell 영역 주위에서 관찰할 수 있다(하얀 원). HAZ에서는 섬유형태를 가지는 Al-Si network가 입자로 부서졌지만, 원래의 network가 남아있어 관찰할 수 있다. 또한 입자로 부서진 조대한 Si의 입자도 HAZ에서 관찰할 수 있다 [44].



(a)



(b)



(c)

Fig 50. Results of AlSi10Mg 's microstructure from SEM

4. 2 AlSi10Mg 시편 분석

4. 2 .4 Hardness

AlSi10Mg의 시편의 Z 면과 X 면의 경도는 비커스 경도기를 사용하여 측정을 하였다. 경도 값의 정확도를 위해 시편 당 5회 실시하였으며, 하중은 1.961N으로 설정하여 경도를 측정하였다. 경도의 측정 부위는 시편의 중심부 1회, 중심부로부터 각각 0.3cm씩 상하좌우 이동시켜서 1번씩 측정하여 총 5회 측정을 완료하였다. Table 16에 Z 면과 X 면에 대한 경도 측정값을 정리해 두었다.

Z 면의 경도는 최소 141.58HV (7번 시편)부터 최대 152.08HV (1번 시편)로 측정값을 얻었으며, 평균 경도는 143.21HV로 측정되었다. X면의 경도는 최소 122.36HV (9번 시편)부터 최대 138.08HV (2번 시편)로 측정값을 얻었으며, 평균 경도는 130.44HV로 측정되었다.

대체로 Z면의 경도가 X면의 경도보다 높게 나오는 것을 확인하였으며, Laser speed가 낮을수록 경도가 높게 나오는 경향 역시 확인할 수 있었다. 이는 앞서 미세조직에서 확인한 기공의 정도 및 Melt pool의 두께와 길이가 영향을 미치는 것으로 판단된다. 평균적으로 Z면에서 분석한 Melt pool의 평균두께는 60~70 μm 이며, X면에서 분석한 Melt pool의 평균두께는 28.6 μm 였다. 기계적 특성에 영향을 미치는 1 μm 이하의 미세결정립이 Z면의 Melt pool 내부에 존재하는 양이 X면에 있는 Melt pool 내부에 존재하는 양보다 훨씬 많을 것이며, 이에 따라 Z면의 경도가 X면의 경도보다 높게 나타나게 된다. 또한 적층을 하여 제품을 제조하는 PBF 공정 특성상 Z축 방향으로 작용하는 인장강도가 X축 방향으로 작용하는 기계적 강도보다 떨어진다고 알려져 있으며, 이는 경도에도 동일하게 적용될 수 있다고 판단된다.

Table 17. Result of AlSi10Mg's Hardness

Z surface		X surface	
Sample	Hardness (HV)	Sample	Hardness (HV)
1	152.08	1	129.72
2	150.58	2	138.08
3	148.72	3	133.34
4	149.38	4	134.24
5	142.96	5	135.36
6	144.82	6	125.20
7	141.58	7	126.62
8	143.65	8	129.08
9	142.12	9	122.36

4. 3 Inconel 시편 분석

4. 3 .1 Density

Inconel 718 시편을 제조할 때 layer 두께는 $30\mu\text{m}$, hatching size는 $70\mu\text{m}$, point size는 0.0021mm^2 으로 고정변수를 두었으며, Laser power와 laser speed에 변화를 주며 진행하였다. Laser power의 범위는 100~200W이며, Laser speed의 범위는 300~700mm/s로 설정하여 시편을 제조하였으며, Table 10에 정리하였고, 위의 공정 변수로 계산한 에너지 밀도 값은 Table 13에 정리하였다. Inconel 718 시편의 비밀도 분석 결과는 아래 Table 18에 첨부하였다. 앞서 분석한 AlSi10Mg 시편의 경우 Laser speed가 빨라질수록 비밀도가 감소했던 반면 Inconel 718의 경우 Laser speed와는 크게 관련이 없었다. 하지만 Inconel 718은 Table 10에 정리해 두었던 에너지밀도와 연관이 있는 사실을 확인하였다. 에너지 밀도가 $100\text{J}/\text{mm}^3$ 가 넘어가는 고에너지의 시편들의 경우 대체적으로 낮은 비밀도를 가지는 것을 확인할 수 있었으며, 2번 시편과 같이 저 에너지 시편 역시 낮은 비밀도를 가지는 것을 확인할 수 있었다. 98.8%로 가장 높은 비밀도를 가지는 4번 시편의 에너지 밀도는 $69.4\text{ J}/\text{mm}^3$ 였으며 해당 시편의 미세조직을 분석하였을 때 가장 기공이 적을 것으로 판단된다.

Table 18. Result of Inconel 718's Hardness

Sample	Apparent Density (%)
1	98.4
2	97.9
3	97.5
4	98.8
5	97.3
6	98.0

4. 3 Inconel 시편 분석

4. 3 .2 Optical Microscope (OM)

Inconel 718 시편의 형상은 일반적인 큐브 형상이 아닌 γ 형상의 시편이며, Fig 52에 시편의 X 면을 마운팅 처리한 사진을 첨부하였다. 본연구에서는 해당시편에서 3가지 영역으로 나누어 미세조직 분석을 하였다. A 부분은 첫 layer부터 마지막 layer까지 온전하게 적층이 이루어진 영역 중 윗부분을 나타내고 있고, B 부분은 행오버 구조로 적층 Layer가 없이 서포터만으로 layer를 지지하여 적층을 하는 영역이다. C 부분은 온전하게 적층이 된 영역 중 아랫부분이며 첫 layer부터 B 영역이 행오버 구조를 가지는 layer까지의 영역을 나타낸다. 이렇게 3가지 영역으로 나누어서 분석한 목적은 각 영역에 따른 열의 방출속도와 Melt pool의 두께 등이 차이가 있을 것이라 판단하였으며, 이를 확인하기 위함이다. A 영역의 경우 서포터가 아닌 Layer로 적층 되어진 영역이므로 서포터로만 지지된 B 영역보다 열 방출속도가 빠르며 방출되는 열의 양도 많을 것이라 판단하여 기공이 더 적고 Melt pool의 형상도 온전할 것이라고 판단된다. C 영역의 경우 layer만으로 적층 되고 A, B영역보다 높이가 낮기에 열 방출 양과 속도가 빠를 것이라 생각하였으나, 적층 되는 면적이 좁기 때문에 좌우로 퍼지는 형상의 Melt pool보다는 아래로 깊게 형성되는 Melt pool이 형성될 것이라고 판단한다. 그리고 3가지 영역의 미세조직 분석을 끝낸 후 경도 분석을 실시하여, Melt pool의 형상이나 영역에 따라 생성되는 기공의 양이 경도 값에 얼마나 영향을 미치며 연관이 있는지에 대해 분석해볼 예정이다.

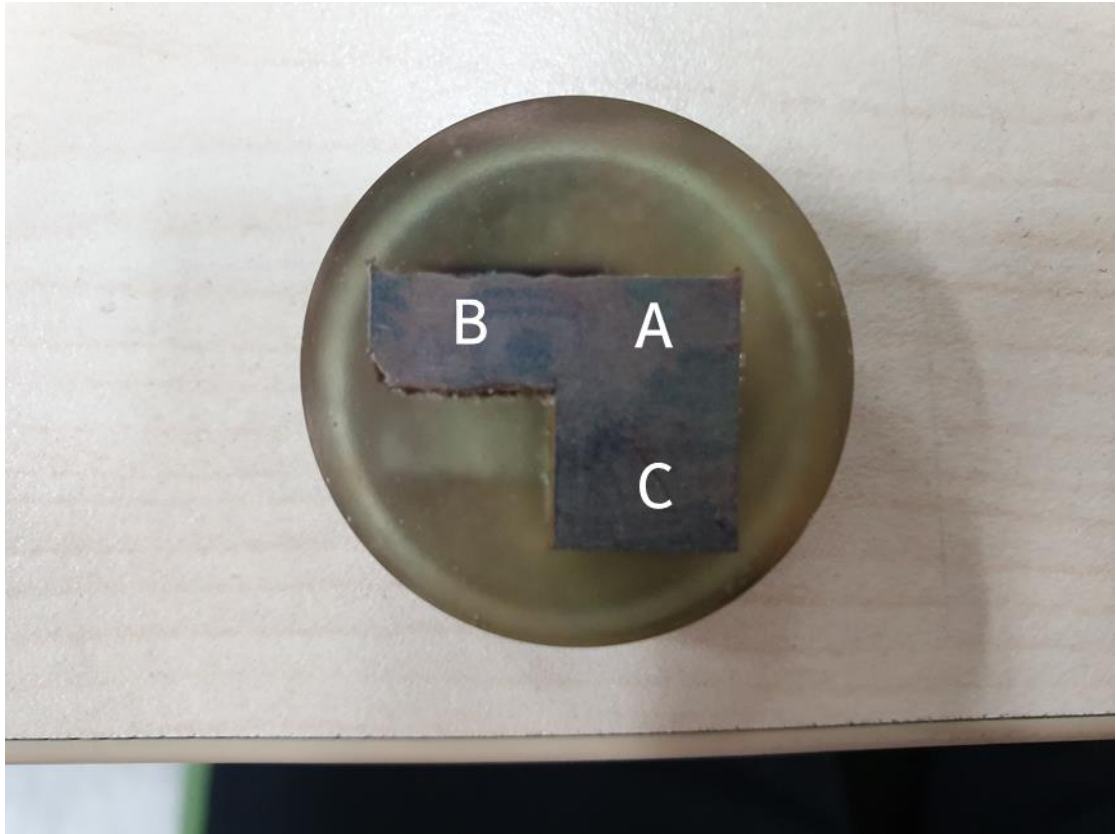


Fig 51. Inconel 718 Cross Section Surface

1번과 2번 시편의 공정 변수 중 laser power는 100W로 동일하며, Laser speed는 각각 400mm/s, 700mm/s로 다르게 설정하였다. 공정 변수를 통해 에너지 밀도를 계산한 결과 1번 시편은 $83.3\text{J}/\text{mm}^3$, 2번 시편은 $39.7\text{J}/\text{mm}^3$ 를 구할 수 있었다. Fig 53과 Fig 54는 광학현미경으로 시편의 X면 미세조직을 분석한 것을 나타냈으며, (a)는 1번 영역의 100배율, (b)는 500배율 분석 사진을 나타내고, (c)와 (d)는 각각 2번 영역의 100배율, 500배율 분석 사진을 나타내며, (e)와 (f)는 3번 영역의 100배율, 500배율 분석 사진을 나타내고 있다.

Fig 53과 Fig 54의 미세조직 사진들을 보고 시편의 상태를 먼저 비교해보면 1번 시편이 2번 시편보다 기공이 훨씬 적으며 Melt pool의 상태도 온전한 것을 확인할 수 있었다. 또한 1번 시편의 Melt pool은 전체적으로 가로가 넓고 세로가 짧은 편이지만, 2번 시편의 Melt pool은 전체적으로 세로가 길며 수직상 때문에 온전하게 관찰하기에도 어려움이 있다. 또한 2번 시편의 3번 영역의 500배율 (f)사진에서는 분말의 형상을 볼 수 있는데 이는 애초에 $39.7\text{J}/\text{mm}^3$ 로 레이저가 낮은 에너지를 가지는 상태인데 Laser speed까지 너무 빨라 Laser energy가 분말에 제대로 전달되지 않아 소결이 이루어지지 않은 채로 적층이 되어버린 현상이다.

다음은 동일한 시편 내에서 A, B, C 영역을 비교해본 결과를 정리하였다. 두 시편 모두 A 영역과 B 영역의 Melt pool이 C 영역의 Melt pool보다 넓게 형성된 것을 확인할 수 있었다. 이는 용융이 일어나는 Layer 면적의 차이로 인해 발생하는 현상이라 생각된다. A와 B의 Layer의 면적은 C보다 훨씬 넓기 때문에 Laser가 분말을 용융 시켜 1개의 Layer를 형성하는데 소요되는 시간이 길고 용융되는 면적이 넓다. 이 때문에 분말이 용융하여 Melt pool을 형성할 때 충분히 넓게 확산할 공간과 영역이 존재하기 때문에

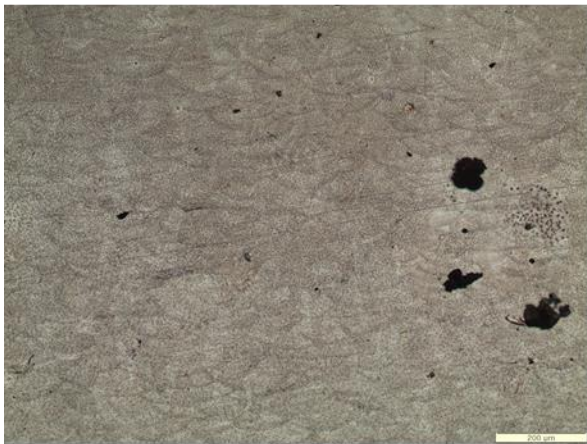
좌우로 넓은 형태의 melt pool을 형성하게 된다. 그러나 C 영역의 경우 Layer의 면적이 좁기 때문에 Laser가 분말을 용융하여 한 layer를 적층 하는 시간이 훨씬 짧으며 공간도 적다. 이 때문에 Melt pool 형성할 때 좌우보다는 아래로 확산이 일어나는 경향이 크다. 또한 Layer를 적층 하는 시간이 짧기 때문에 다음에 적층 되는 Layer가 아래의 Layer에 영향을 끼치게 된다. 이때 발생하는 열도 Melt pool을 아래로 형성시키는 데 영향을 끼친다. 그리고 A 영역과 B 영역을 비교해보면 Melt pool의 형상은 비슷해 보이나 2번 영역의 기공이 훨씬 많은 것을 확인할 수 있다. 이는 각 영역을 무엇이 지지하는가에 따라 발생하는 차이인데, 1번 영역의 경우 3번 영역 위에 적층이 되고 있어 열이 빠질 수 있는 면적이 넓어 열 방출 속도도 빠르고, 열 방출량도 많다. 하지만 2번 영역의 경우 아래가 Layer로 적층 되는 것이 아니라 서포터로 적층 하였기에 열이 빠지는 양도 적으며, 열이 빠지는 속도 역시 느려서 기공 등의 문제점이 발생하여 기계적 특성과 제품 밀도에 악영향을 끼칠 수 있다.



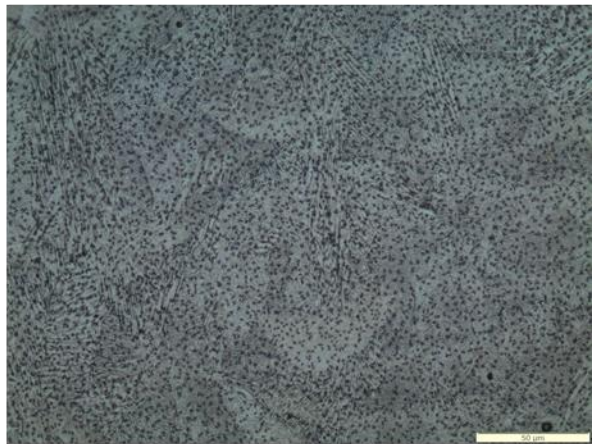
(a)



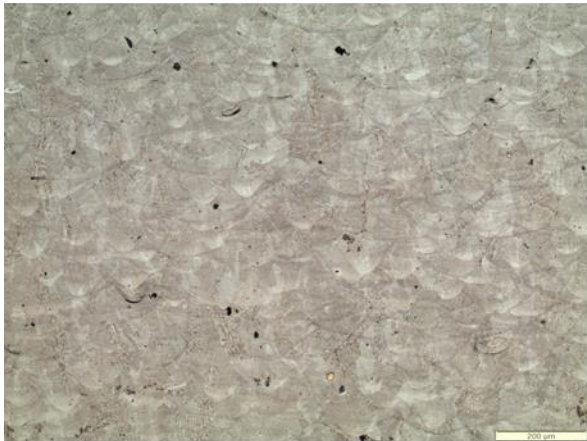
(b)



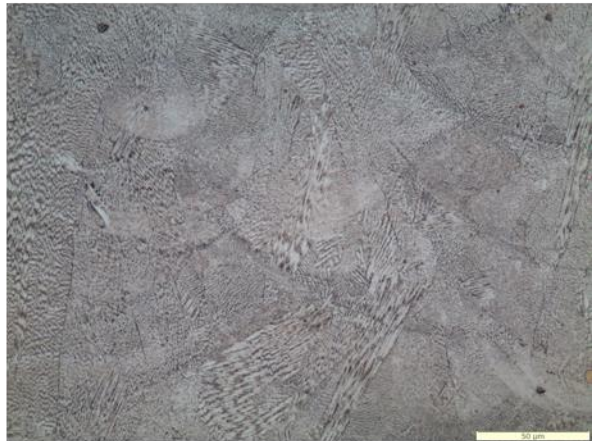
(c)



(d)



(c)

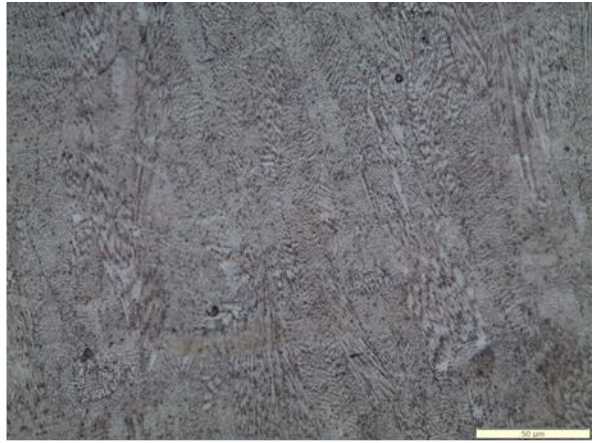


(c)

Fig 52. Microstructure of Inconel 718 No.1 in the X plane



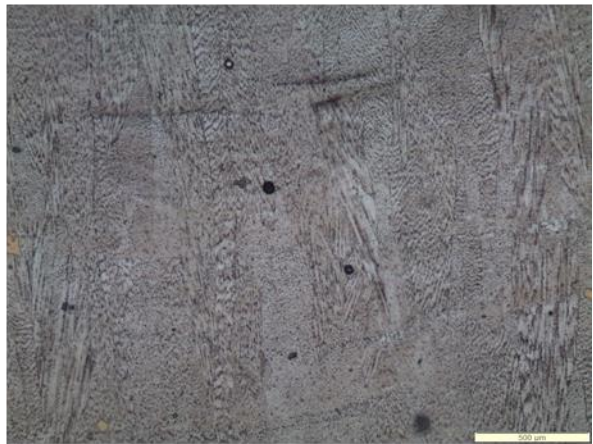
(a)



(b)



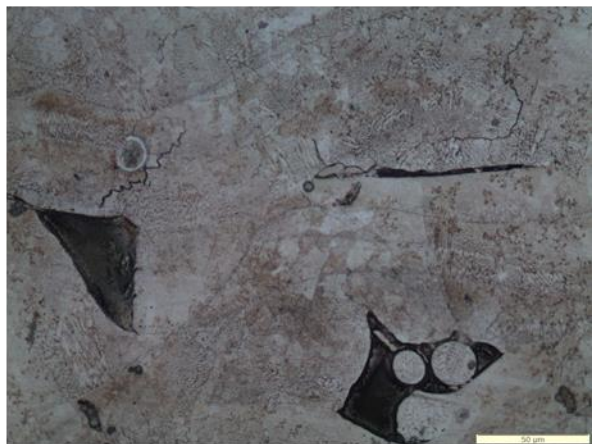
(c)



(d)



(e)



(f)

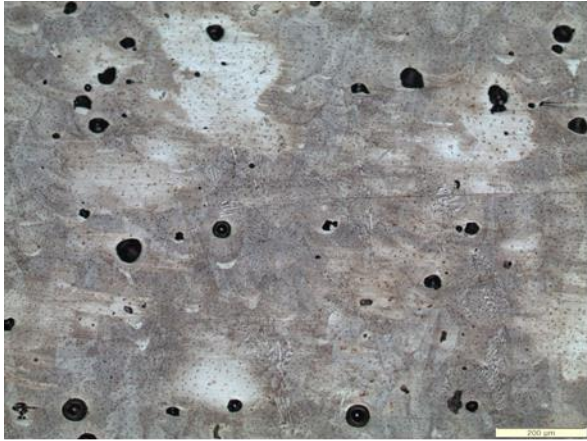
Fig 53. Microstructure of Inconel 718 No.2 in the X plane

3번과 4번 시편의 Laser power는 150W로 앞선 시편들보다 파워가 더 강한 시편들이며, Laser speed는 각각 300mm/s와 600mm/s이다. 공정 변수를 통해 에너지 밀도를 계산한 결과 3번 시편은 $166.7\text{J}/\text{mm}^3$, 4번 시편은 $69.4\text{J}/\text{mm}^3$ 를 구할 수 있었다. Fig 55과 Fig 56은 광학현미경으로 시편의 X면 미세조직을 분석한 것을 나타냈으며, (a)는 1번 영역의 100배율을, (b)는 500배율 분석 사진을 나타내고, (c)와 (d)는 각각 2번 영역의 100배율, 500배율 분석사진을 나타내며, (e)와 (f)는 3번 영역의 100배율, 500배율 분석 사진을 나타내고 있다.

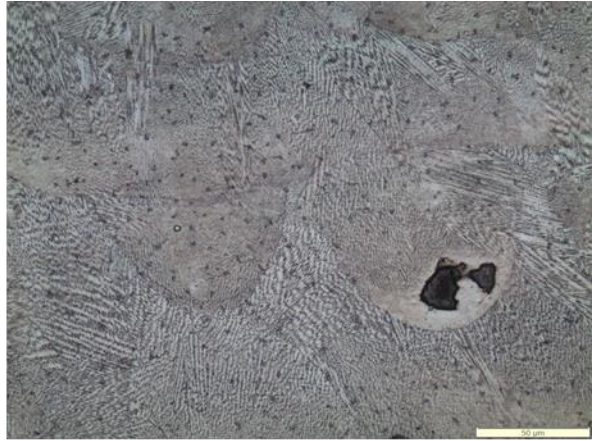
Laser power가 100W인 시편에서는 Laser speed가 느린 1번 시편이 Laser speed가 빠른 2번 시편보다 Melt pool이 안정하고 기공이 훨씬 적은 경향을 보였지만, Laser power가 150W인 시편 군들은 반대로 Laser speed가 빠른 4번 시편이 Laser speed가 느린 3번 시편보다 기공이 적고 훨씬 Melt pool이 안정된 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 알 수 있는 사실이 있는데 Laser speed가 느리고, power가 높을수록 반드시 좋은 공정 조건은 아니며, 이를 통해 형성되는 에너지 밀도 또한 높다고 좋은 특성을 가지는 제품을 제조하는 것도 아니다.

1번 시편의 경우는 에너지 밀도가 낮을뿐더러 Laser speed가 너무 낮아 분말에 에너지 전달이 제대로 이루어지지 않아 용융이 잘 안 돼서 기공이 형성되는 등의 문제가 발생했다면 3번 시편의 경우는 이와 반대되는 경우이다. 이와 같은 현상을 Keyhole effect라고 하는데, 가해지는 에너지가 높고 Laser speed가 낮을 경우 과용융이 발생하여 Melt pool을 깊게 뚫고 내려가기도 하며, 과용융으로 인한 형성된 가스가 Layer에서 빠져나가지 못하고 그 자리에 기공을 형성하기도 한다. Fig 55에서 볼 수 있듯이 Keyhole effect가 발생할 때의 기공의 형상은 spherical porosity를 가진다

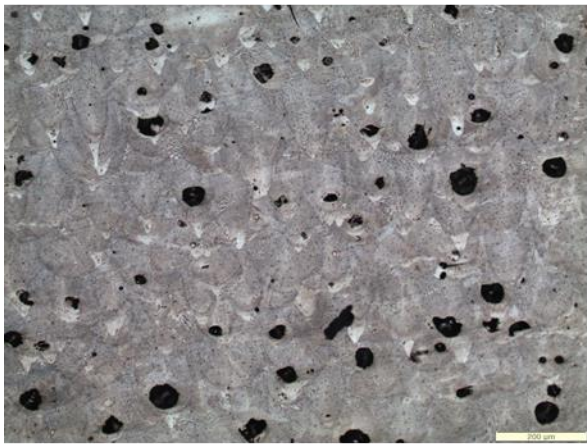
같은 시편에서의 다른 영역을 비교해보면 앞의 시편들처럼 1번과 2번 melt pool은 가로로 넓게 형성되고 세로는 짧게 형성되는 것을 확인할 수 있었으며, 3번 melt pool은 세로는 길고 가로는 짧게 형성되는 것을 확인할 수 있었다. 그리고 1번과 2번을 비교해보면 Melt pool의 형상은 비슷해 보이나 2번 영역의 기공이 훨씬 많은 것을 확인할 수 있다.



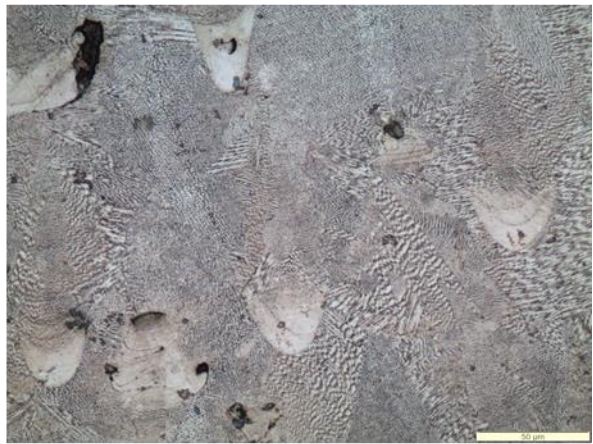
(a)



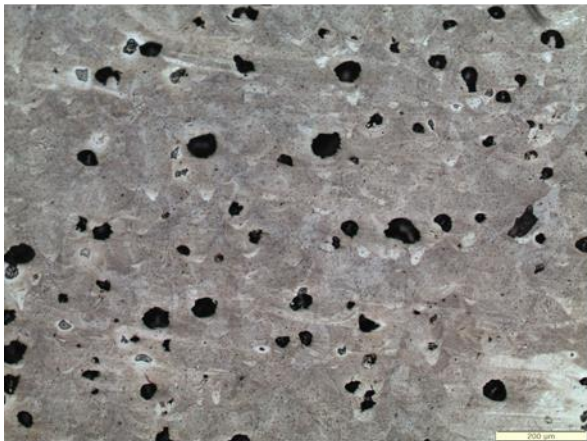
(b)



(c)



(d)

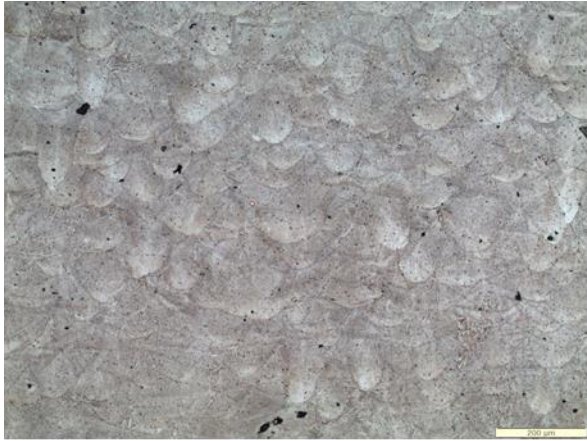


(e)

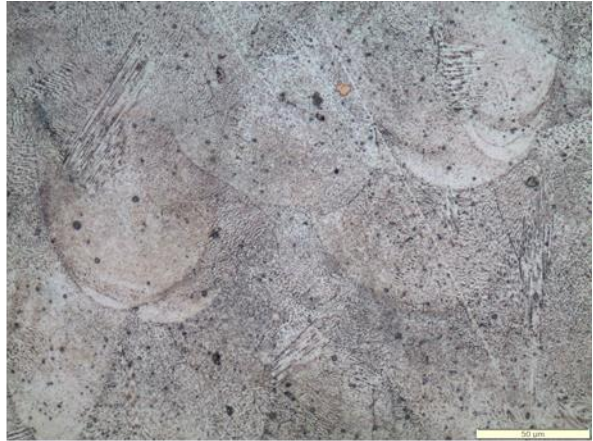


(f)

Fig 54. Microstructure of Inconel 718 No.3 in the X plane



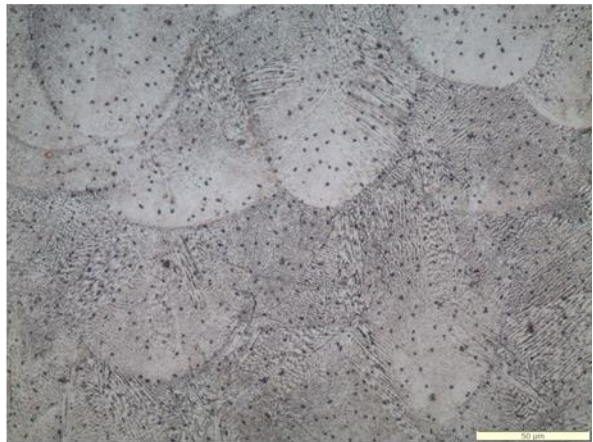
(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Fig 55. Microstructure of Inconel 718 No.4 in the X plane

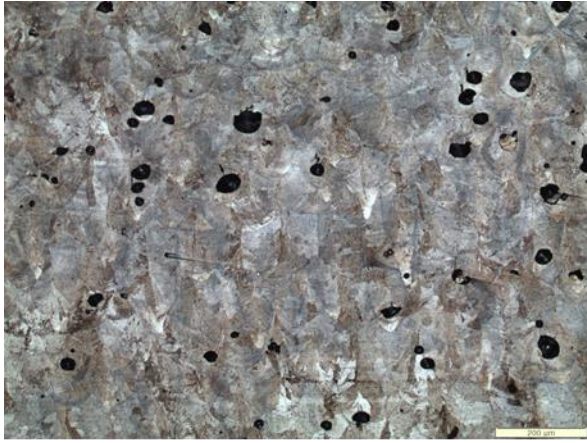
5번과 6번 시편의 Laser power는 200W로 가장 높은 power로 시편들을 제조하였으며, Laser speed는 각각 400mm/s와 700mm/s이다. 공정 변수를 통해 에너지 밀도를 계산한 결과 5번 시편은 208.3J/mm^3 , 6번 시편은 95.2J/mm^3 를 구할 수 있었다. Fig 57과 Fig 58은 광학현미경으로 시편의 X면 미세조직을 분석한 것을 나타냈으며, (a)는 1번 영역의 100배율을, (b)는 500배율 분석 사진을 나타내고, (c)와 (d)는 각각 2번 영역의 100배율, 500배율 분석사진을 나타내며, (e)와 (f)는 3번 영역의 100배율, 500배율 분석 사진을 나타내고 있다.

앞서 시편들의 에너지 밀도를 정리하면 1번 시편은 83.3 J/mm^3 , 2번 시편은 39.7 J/mm^3 , 3번 시편은 166.7 J/mm^3 , 4번 시편은 69.4 J/mm^3 이었다. 그리고 1번 시편과 4번 시편이 가장 좋은 특성을 가지는 것으로 확인하였고, 2번 시편은 적은 에너지 밀도로 인한 불안정한 용융 현상을 확인하였으며, 3번 시편은 높은 에너지 밀도로 인한 과용융 현상을 확인하였다. 이를 토대로 $70\sim 100\text{ J/mm}^3$ 의 에너지 밀도가 Inconel 718의 적층에 가장 좋은 에너지 밀도라고 생각하며, 그보다 낮은 에너지 밀도는 불완전한 용융 문제를 가지고 그보다 높은 에너지 밀도는 과용융의 문제점을 가지는 것을 예측할 수 있다. 5번 시편과 6번 시편을 보면 이와 같은 결론을 확실히 할 수 있다.

5번 시편의 경우 에너지 밀도가 208.3 J/mm^3 로 분석 시편 중 가장 높은 에너지 밀도를 가지는 시편이며, 이 때문에 기공이 가장 많이 존재하는 것을 확인할 수 있었고, Melt pool의 세로 길이가 가장 긴 것을 확인할 수 있었다. 6번 시편의 경우 1번과 4번 시편처럼 안정된 Melt pool의 양이 어느 정도 존재하는 것을 확인하였으나 두 시편보다는 기공이 훨씬 더 많이 존재하는 사실을 확인할 수 있었다. 이를 통해 최적의 에너지 밀도는 $70\sim 90\text{ J/mm}^3$ 정도라고 생각하며, 최적의 공정변수를 찾기 위해서는 해당

에너지 밀도 값을 가지는 laser power와 Laser speed를 설정하여 다시 분석을 해볼 필요가 있다.

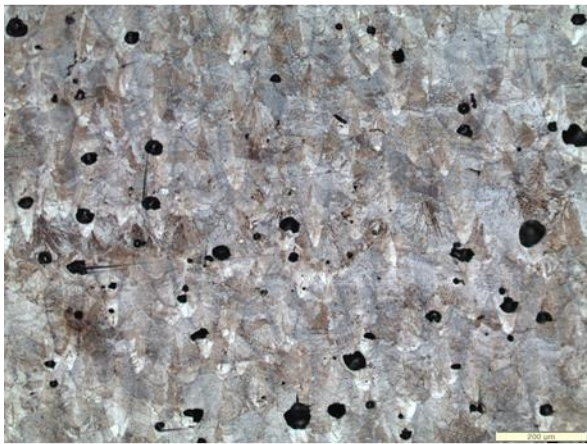
따라서 본 연구에서 제조된 Inconel 718 시편의 미세조직 분석 결과 4번 시편 (Laser power: 150W, Laser speed: 600mm/s)이 가장 기공이 적으며 Melt pool의 상태가 온전한 것을 확인할 수 있었으며, A, B, C 3가지 영역 간의 미세조직 차이가 적고 균일하며, 모든 영역에서 적은 기공을 가지고 있는 것을 확인하였다. 또한 1번 시편 역시 4번 시편 못지않게 전체적으로 우수한 미세조직 특성을 보였으나, B영역에서 보이는 큰 기공 등의 문제점들이 발견되어 4번 시편 다음으로 우수한 시편으로 선정하였다.



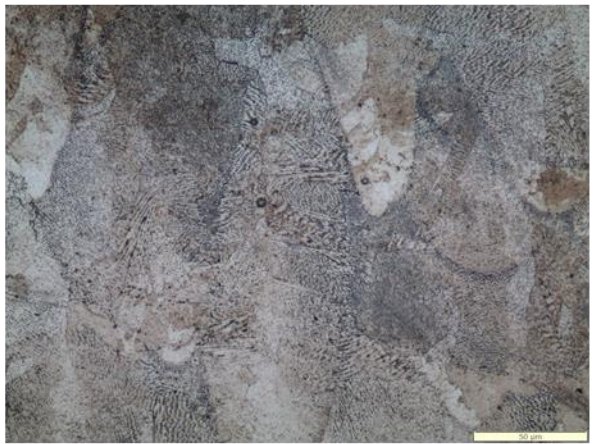
(a)



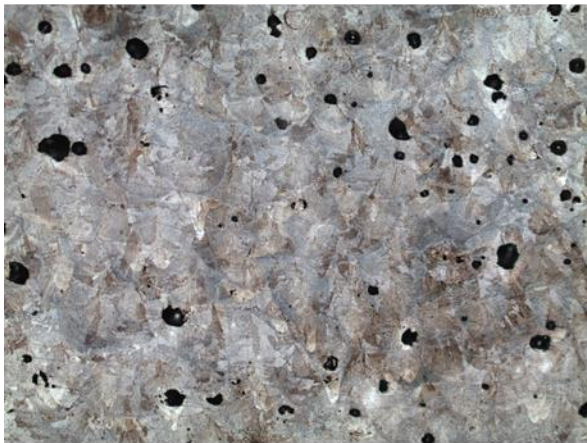
(b)



(c)



(d)



(e)

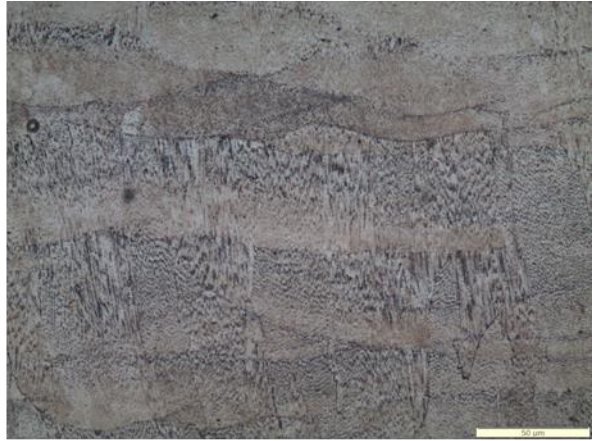


(f)

Fig 56. Microstructure of Inconel 718 No.5 in the X plane



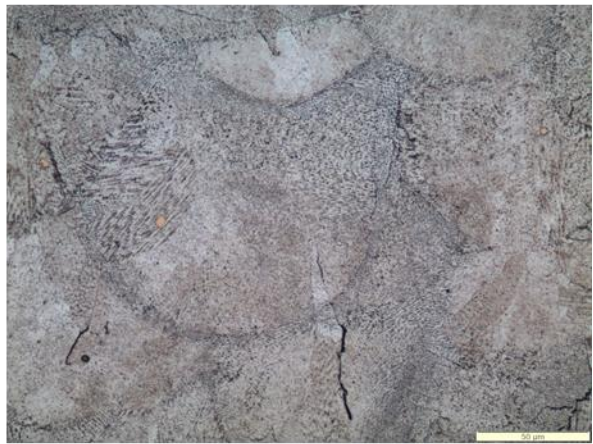
(a)



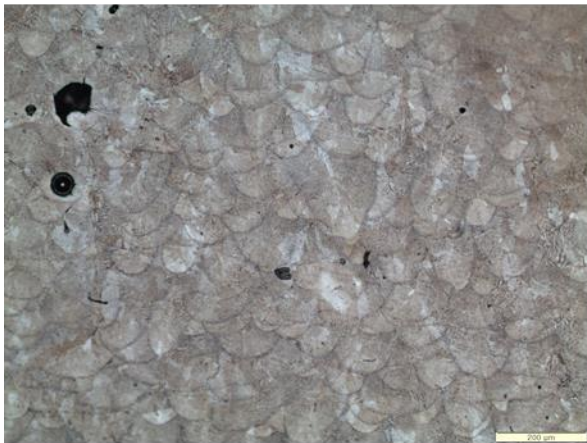
(b)



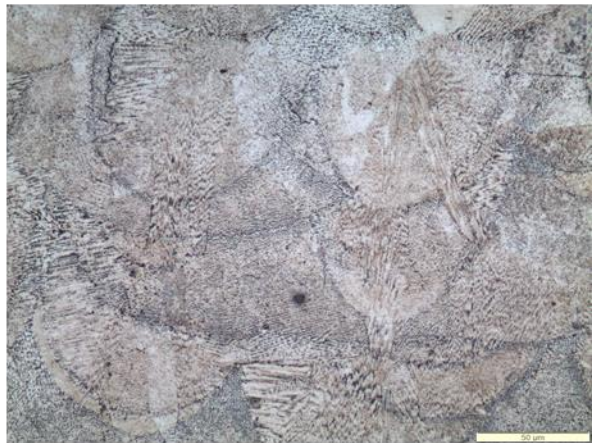
(c)



(d)



(e)

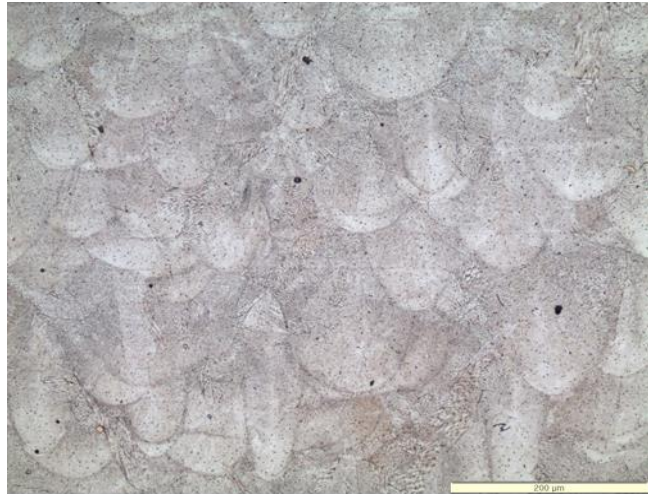


(f)

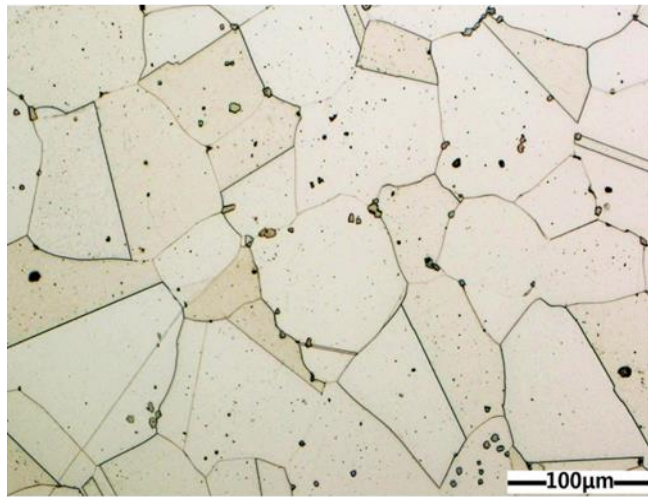
Fig 57. Microstructure of Inconel 718 No.6 in the X plane

Fig 58은 PBF 공정으로 제조된 Inconel 718의 미세조직 사진을 일반적인 사형주조와 분말 야금의 미세조직 사진을 비교하였다. AlSi10Mg의 비교사진에서 확인한 것처럼 Inconel 718에서도 공통적인 특징을 확인할 수 있다. PBF로 제조한 시편의 미세조직 사진에서는 반 타원 형태의 미세조직이 모여서 물결무늬를 형성하는 것을 확인할 수 있다. 분말 야금에서는 분말들이 압축 및 소결되어 형성한 결정립계를 확인할 수 있으며, 분말 야금은 압축 및 소결에 의해 발생하는 분말의 결정립 성장 및 조밀화 때문에 결정립의 크기 차이가 큰 편이다.

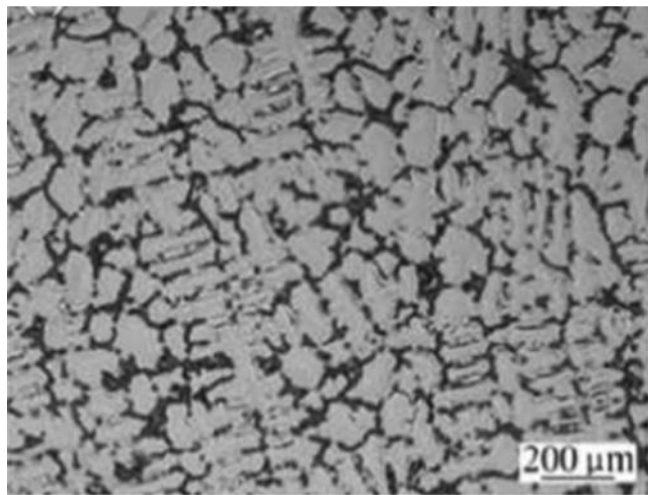
다음은 PBF 공정과 주조 공정과의 차이를 비교해보았으며, 둘의 미세조직 차이는 확연하게 알아볼 수 있었다. 주조의 미세조직은 하얀 색을 띠는 γ 상 주위로 검은 색을 띠는 δ 이 둘러싸면서 형성하는 수지상 구조를 확인할 수 있다. γ 상은 Ni계 합금에서 기본이 되는 상이라고 알려져 있다. 이와 다르게 PBF공정의 경우 레이저를 주사하는 방향으로 형성되는 반 타원 형태의 Melt pool을 확인할 수 있었다.



(a)



(b)



(c)

Fig 58. Microstructures of (a) AM, (b) Powder Metallurgy, (c) Sand casting

4. 3 Inconel 718 시편 분석

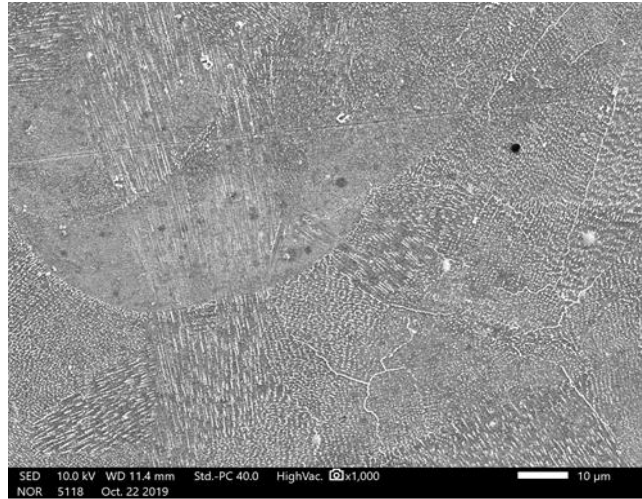
4. 3 .3 Scanning Electron Microscope (SEM)

Fig 59와 Fig 60은 각각 4번 시편과 5번 시편의 3번 영역의 SEM 분석 사진을 나타낸 것이다. Fig 59는 (a)는 1,000배, (b)는 3,000배, (c)는 10,000배의 배율로 분석한 사진이며, Fig 60은 (a) 950배, (b)는 3,000배, (c)는 4,000배의 배율로 분석한 사진이다. No4 시편은 기공이 가장 적으며, Melt pool 및 경도 값이 우수한 시편이기 때문에 분석을 진행하였으며, No5 시편은 가장 높은 에너지 밀도를 가지는 시편이기에 분석을 진행하려고 한다.

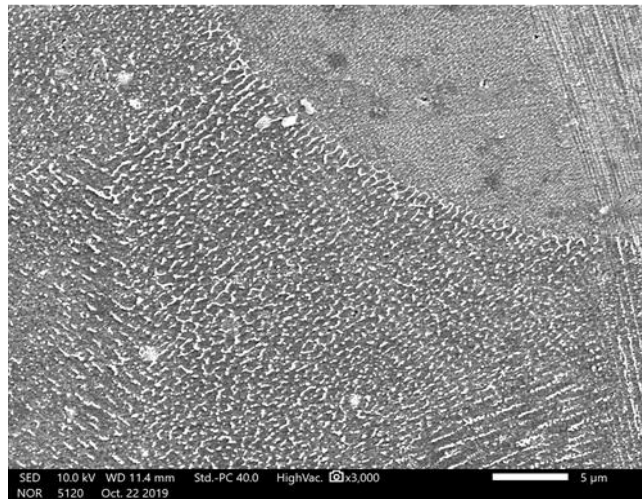
Fig 59 (a) 1,000배율 사진에서 Melt pool 간의 경계면을 확실히 구분할 수 있을 뿐만 아니라 수지상 구조 및 조대한 cell 영역과 미세한 cell 영역을 전부 다 확인할 수 있었다. (b) 3,000배율에는 Melt pool의 경계면을 확대하여 분석을 진행한 사진인데 왼쪽부터 차례대로 조대한 cell 영역, 미세한 cell 영역, 수지상 영역을 확인할 수 있다. Inconel 718에서 발견되는 수지상 Laves 상일 수도 있다. Laves 상은 Nb가 포함된 Ni계 초합금에 나타나는 전형적인 TCP(topologically closed-Packed: TCP) 상으로서, 육방정계 MgZn₂형의 결정구조로 기지조직보다 Cr와 Nb를 많이 함유한 (Ni, Fe,Cr)₂(Nb, Ti)조성을 갖는다. 이는 기계적 특성을 저하하는 유해상으로 알려져 있어 열처리를 통해 시편 내에 존재하는 Laves 상을 제거하여 극저온에서도 용접부의 취성 파괴를 억제하는 등의 대처를 해야만 한다 [46].

Fig 59 (c) 사진에는 Melt pool의 경계면에서 조대한 cell과 미세한 cell의 차이를 확연히 구분할 수 있다.

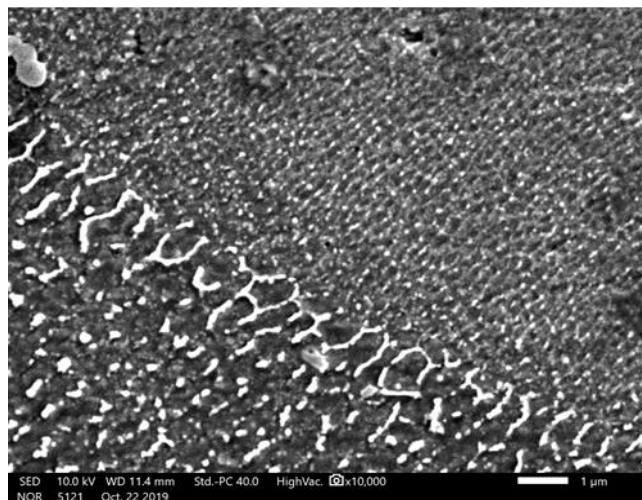
Fig 60의 (a)와 (b)에서 Laves 상을 굉장히 많이 확인할 수 있는데, 이는 높은 에너지 밀도 때문에 많은 양의 laves상이 형성된 것으로 판단된다. 또한 Laves 상이 수지상의 형태로 존재하고 있으며 Melt pool의 중심부로 향하는 사실을 확인할 수 있다. (c)에서는 Fig 59와 동일하게 조대한 cell과 미세한 cell의 영역을 확인할 수 있으며, Melt pool 경계면에 존재하는 조대한 cell 주위의 HAZ 영역까지 확인할 수 있다. [47].



(a)

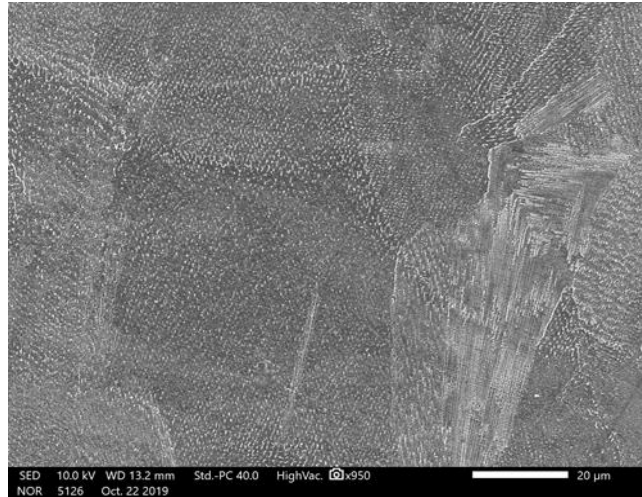


(b)

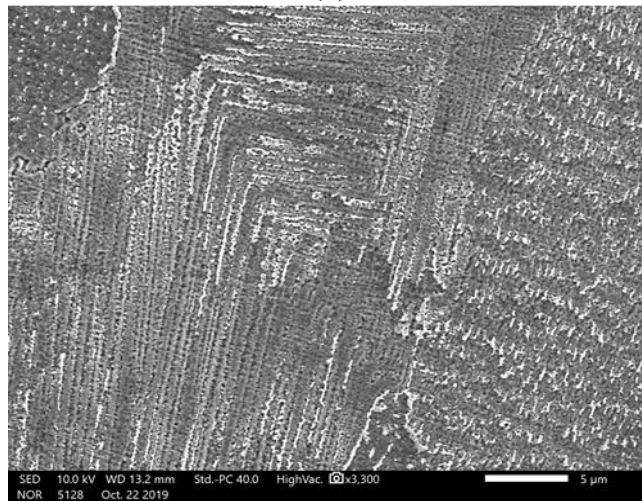


(c)

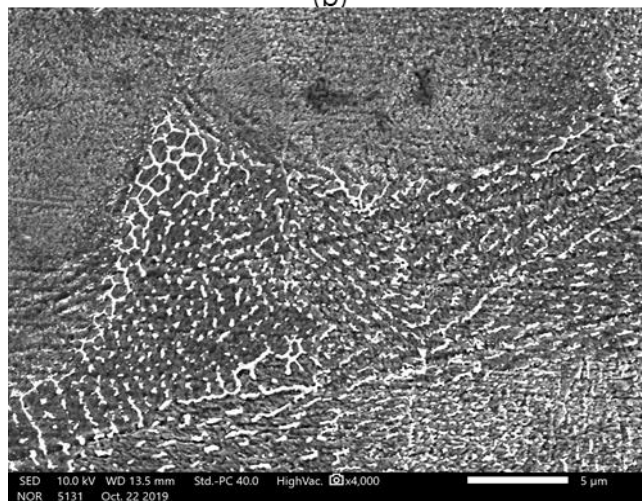
Fig 59. Results of Inconel 718 No.4's microstructure from SEM



(a)



(b)



(c)

Fig 60. Results of Inconel 718 No.5's microstructure from SEM

4. 3 Inconel 718 시편 분석

4. 3 .4 Hardness

Inconel 718 시편의 X면 경도는 비커스 경도기를 사용하여 측정을 하였다. 경도 값의 정확도를 위해 한 영역 당 5회, 즉 1 시편에 3영역 총 15회 실시하였으며, 하중은 1.961N으로 설정하여 경도를 측정하였다. Table 17에는 시편의 평균 경도 값을 나타냈으며, Table 18, Table 19, Table 20은 각 시편의 영역별 경도를 나타냈다.

Table 17에서 확인할 수 있듯이 X 면의 경도는 최소 331.51HV (6번 시편)부터 최대 361.87HV (4번 시편)로 측정값을 얻었으며, 평균 경도는 344.66HV로 측정되었다. OM을 통한 미세조직 분석에서 4번 시편이 기공이 가장 적고 Melt pool도 가장 안정된 것을 확인하였는데, 경도 값 역시 가장 높은 것을 확인할 수 있었다. 또한 과용융 현상이 일어나던 3번과 5번 시편의 경우의 경도 값은 각각 357.73HV, 345.21HV이었으며, 불안정한 용융 현상이 발생하던 2번 시편의 경우의 경도 값은 323.01HV를 구할 수 있었다. 이를 통해 에너지 밀도가 낮은 경우가 높은 경우보다 훨씬 더 기계적 특성을 저하하는 사실 또한 확인할 수 있었다. 이를 통해 한가지 알 수 있는 사실이 있는데, 현미경으로 구분할 수 있을 정도로 기공이 적고 우수한 미세조직의 경우 경도 값이 높게 측정되는 것을 확인할 수 있었으며, 미세조직과 경도와 연관성이 있다는 사실을 어느 정도 확인할 수 있었다.

Table 18, Table 19, Table 20에서 나타난 영역별 경도 값을 비교해보았다. 1번 영역의 평균 경도 값은 346.33HV, 2번 영역의 평균 경도 값은 338.83HV, 3번 영역의 평균 경도 값은 348.87HV를 구할 수 있었으며, 서포터로만 적층 layer를 지지하던 2번 영역이 가장 낮은 경도 값을 가지는 것을 확인할 수 있었다.

Table 19. Result of Inconel 718' s hardness

Sample	X surface
1	348.63
2	323.01
3	357.73
4	361.87
5	345.21
6	331.51

Table 20. Result of Inconel 718's Hardness with same Laser Power(100W)

Sample	Average (HV)	Max (HV)	Min (HV)	Range (HV)
1-1	351.6	362.1	339.5	22.6
1-2	337.68	361.0	318.9	42.1
1-3	357.06	384.3	336.4	47.9
2-1	323.92	362.3	295.7	66.6
2-2	316.28	320.8	306.8	14
2-3	328.84	338.4	317.0	21.4

Table 21. Result of Inconel 718's Hardness with same Laser Power(150W)

Sample	Average (HV)	Max (HV)	Min (HV)	Range (HV)
3-1	352.12	376.1	335.4	40.7
3-2	367.46	377.3	358.7	18.6
3-3	353.60	365.5	333.4	32.1
4-1	358.02	373.7	343.6	40.1
4-2	366.48	379.7	352.1	27.6
4-3	361.12	376.1	354.3	21.8

Table 22. Result of Inconel 718's Hardness with same Laser Power(200W)

Sample	Average (HV)	Max (HV)	Min (HV)	Range (HV)
5-1	356.22	367.8	342.6	25.2
5-2	323.18	348.9	295.4	53.5
5-3	356.22	383.4	317.0	67.4
6-1	336.48	358.7	316.1	42.6
6-2	321.92	331.4	317.0	14.4
6-3	336.12	343.6	324.6	9

5. 결론

본 연구의 목적은 Powder Bed fusion 을 통해 제조된 AlSi10Mg 및 Inconel 718 시편의 미세조직 분석 및 기계적 특성 분석이다. 그 전에 시편 제조에 사용되는 금속 분말의 특성, 미세조직, 성분 등의 다양한 분석을 하였다.

AlSi10Mg 분말과 Inconel 718 분말은 가스 분무법으로 제조된 분말로 SEM 으로 분석한 결과 구형의 형상을 가지는 것을 확인하였다. AlSi10Mg 분말의 D10 은 24.46 μm , D50 은 36.74 μm , D90 은 54.02 μm 값을 측정하였으며. Inconel 718 분말의 D10 25.98 μm , D50 은 37.24 μm , D90 은 50.94 μm 값을 측정할 수 있었다.

분말의 분석을 마친 후에 AlSi10Mg 시편과 Inconel 718 시편에 대한 분석을 진행하였다. AlSi10Mg 시편을 제조할 때의 공정변수는 층 두께 30 μm , 해칭 간격 70 μm . Laser 크기 0.021 μm^2 , Laser Power 는 170~190W, Laser Speed 는 2,100~3,500mm/s 로 설정하여 총 9 개의 시편을 선정하였다. Laser speed 가 2100mm/s 인 시편군중에서는 3 번시편의 미세조직이 가장 기공이 적고 온전한 melt pool 이 많이 존재하는 최적의 조건을 가지는 시편이라고 할 수 있으며, 3 번 시편의 에너지 밀도 값은 43.1J/mm³ 이었다. Laser speed 가 2,800mm/s 인 시편들은 앞서 확인한 Laser speed 가 2,100mm/s 의 시편들보다 기공이 더 많고, 형성된 기공과 빠른 Laser speed 등의 공정 조건으로 인해 Melt pool 이 조금 더 짧고 불균일하게 형성되어 있는 것을 확인할 수 있다. 4 번 시편의 에너지밀도는 28.9 J/mm³ 인데 Laser power 는 170W 로 동일하나 4 번 시편의 Laser speed 가 700mm/s 정도 더 빠르게 레이저를 주사하기에 에너지 전달이 온전하게 이루어지지않을 수 있다. 이 과정에서 용융이 제대로 일어나지 않아서 1 번 시편보다 좀더 큰 기공을 형성한 것으로 판단된다. Laser speed 가 3500mm/s 인 시편들

중에서는 9 번 시편이 가장 최적의 미세조직을 나타내는 것으로 판단되나, 앞서 분석한 2100mm/s 시편과 2800mm/s 인 시편에 비해서는 조직상태가 불완전하다. AlSi10Mg 의 모든 시편에서 3 가지의 공통적인 조직을 확인할 수 있었다. 첫번째 조직은 Melt pool 사이에 존재하는 1~2 μm 의 Submicron cell, 두 번째 조직은 Melt pool 내부에 존재하는 1 μm 이하의 submicron cell, 마지막 세 번째 조직은 앞서 설명한 수지상 구조이다. Z 면의 경도는 최소 141.58HV (7 번 시편)부터 최대 152.08HV (1 번 시편)로 측정값을 얻었으며, 평균 경도는 143.21HV 로 측정되었다. X 면의 경도는 최소 122.36HV (9 번 시편)부터 최대 138.08HV (2 번 시편)로 측정값을 얻었으며, 평균 경도는 130.44HV 로 측정되었다. 대체로 Z 면의 경도가 X 면의 경도보다 높게 나오는 것을 확인하였으며, Laser speed 가 낮을수록 경도 값이 높게 나오는 사실 역시 확인할 수 있었다.

다음은 Inconel 718의 분석 결과이다. AlSi10Mg 시편을 제조할 때의 공정변수는 총 두께 30 μm , 해칭 간격 70 μm . Laser 크기 0.021 μm^2 , Laser Power는 100~200W, Laser Speed는 300~700mm/s로 설정하였으며 총 6개의 시편을 제조하였다. Inconel 718의 시편 형상은 큐브 형상이 아닌 'ㄱ'형상의 시편이며, 영역을 구분 지어 분석을 진행하였다. 1번 부분은 첫 Layer부터 마지막 layer까지 온전하게 적층이 이루어진 영역 중 상단 부분이며, 3번 부분은 하단 부분이다. 2번 영역은 1번과 2번 영역의 경계선부터 적층이 시작된 행오버 구조의 영역으로 아래는 서포터로 지지가 되면서 적층 되었다. 시편들의 에너지 밀도를 정리하면 1번 시편은 83.3 J/mm³, 2번 시편은 39.7 J/mm³, 3번 시편은 166.7 J/mm³, 4번 시편은 69.4 J/mm³이었다. 그리고 1번 시편과 4번 시편이 가장 좋은 특성을 가지는 것으로 확인하였고, 2번 시편은 적은 에너지 밀도로 인한 불안정한 용융 현상을 확인하였으며, 3번 시편은 높은 에너지 밀도로 인한 과용융 현상을 확인하였다. 5번

시편의 경우 에너지 밀도가 208.3 J/mm^3 로 분석 시편 중 가장 높은 에너지 밀도를 가지는 시편이며, 이 때문에 기공이 가장 많이 존재하는 것을 확인할 수 있었고, Melt pool의 세로 길이가 가장 긴 것을 확인할 수 있었다. 6번 시편의 경우 1번과 4번 시편처럼 안정된 Melt pool의 양이 어느 정도 존재하는 것을 확인하였으나 두 시편보다는 기공이 훨씬 더 많이 존재하는 사실을 확인할 수 있었다. 이를 토대로 $70\sim 90 \text{ J/mm}^3$ 의 에너지 밀도가 Inconel 718의 적층에 가장 좋은 에너지 밀도라고 생각하며, 그보다 낮은 에너지 밀도는 불안정한 용융 문제를 가지고 그보다 높은 에너지 밀도는 과용융의 문제점을 가지는 것을 확인하였다.

OM 과 SEM 을 통한 미세조직 분석이 끝난 후에 비커스 경도기를 통한 경도 분석을 진행하였다. X 면의 경도는 최소 331.51HV (6 번 시편)부터 최대 361.87HV (4 번 시편)로 측정값을 얻었으며, 평균 경도는 344.66HV 로 측정되었다. OM 을 통한 미세조직 분석에서 4 번 시편이 기공이 가장 적고 Melt pool 도 가장 안정된 것을 확인하였는데, 경도 값 역시 가장 높은 것을 확인할 수 있었다. 또한 과용융 현상이 일어나던 3 번과 5 번 시편의 경우의 경도 값은 각각 357.73HV , 345.21HV 이었으며, 불안정한 용융 현상이 발생하던 2 번 시편의 경우의 경도 값은 323.01HV 를 구할 수 있었다. 이를 통해 에너지 밀도가 낮은 경우가 높은 경우보다 훨씬 더 기계적 특성을 저하하는 사실 또한 확인할 수 있었다. 1 번 영역의 평균 경도 값은 346.33HV , 2 번 영역의 평균 경도 값은 338.83HV , 3 번 영역의 평균 경도 값은 348.87HV 를 구할 수 있었으며, 서포터로만 적층 layer 를 지지하던 2 번 영역이 가장 낮은 경도 값을 가지는 것을 확인할 수 있었다.

6. 참고문헌

1. Park, S.-H., et al., *Current Status of Biomedical Applications using 3D Printing Technology*. Journal of the Korean Society for Precision Engineering, 2014. **31**(12): p. 1067-1076.
2. 김용석, 최성웅, and 양순용, *금속 3D 프린팅 적층제조 (AM) 공정 시뮬레이션 기술에 관한 고찰 (I)*. 드라이브·컨트롤, 2019. **16**(3): p. 42-50.
3. Lee, J.-S., *R&D Strategy for 3D Printing Metal Powders*. Journal of Korean Powder Metallurgy Institute, 2015. **22**(2): p. 138-145.
4. Oh, J.-W., H. Na, and H. Choi, *Technology Trend of the additive Manufacturing (AM)*. Journal of Korean Powder Metallurgy Institute, 2017. **24**(6): p. 494-507.
5. An, Y.J., et al., *Study on the Development and Sintering Process Characteristics of Powder Bed Fusion System*. Journal of the Korean Society for Precision Engineering, 2015. **32**(9): p. 773-779.
6. 이준엽, et al., *티타늄 합금 부품의 생산성 향상을 위한 3D 프린팅 제조공정 최적화*. 대한기계학회 춘추학술대회, 2019: p. 81-81.
7. Li, S., et al., *Melt-pool motion, temperature variation and dendritic morphology of Inconel 718 during pulsed- and continuous-wave laser additive manufacturing: A comparative study*. Materials & Design, 2017. **119**: p. 351-360.
8. Criales, L.E., et al., *Laser powder bed fusion of nickel alloy 625: Experimental investigations of effects of process parameters on melt pool size and shape with spatter analysis*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2017. **121**: p. 22-36.
9. Aversa, A., et al., *New Aluminum Alloys Specifically Designed for Laser Powder Bed Fusion: A Review*. Materials, 2019. **12**(7).
10. Manfredi, D. and R. Bidulský, *Laser powder bed fusion of aluminum alloys*. Acta Metallurgica Slovaca, 2017. **23**(3).
11. Das, S.K. and W. Yin, *The worldwide aluminum economy: The current state of the industry*. Jom, 2007. **59**(11): p. 57-63.
12. Aversa, A., et al., *Effect of Process and Post-Process Conditions on the Mechanical Properties of an A357 Alloy Produced via Laser Powder Bed Fusion*. Metals, 2017. **7**(2).
13. Jia, Q. and D. Gu, *Selective laser melting additive manufacturing of Inconel 718 superalloy parts: Densification, microstructure and properties*. Journal of Alloys and Compounds, 2014. **585**: p. 713-721.
14. Lass, E.A., et al., *Formation of the Ni₃Nb δ -Phase in Stress-Relieved Inconel 625 Produced via Laser Powder-Bed Fusion Additive Manufacturing*. Metallurgical and Materials Transactions A, 2017. **48**(11): p. 5547-5558.
15. 백상흠, *[기획특집: 3D 프린팅 기술] 3D 프린팅의 다양한 기술 및 특징 소개*. Korean Industrial Chemistry News, 2015. **18**(1): p. 2-10.

16. Thomas, D., *The development of design rules for selective laser melting*. 2009, University of Wales.
17. Committee, A., *ASTM International Committee F42-Additive Manufacturing Technologies*. ASTM F2792-12 Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 2009.
18. Choi, J.-W. and H.-C. Kim, *3D Printing Technologies - A Review*. Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, 2015. **14**(3): p. 1-8.
19. 이보경, et al., *ICT 와 3D 프린팅에 의한 제 3 차 산업혁명*. KT 경제경영연구소, 2012.
20. 미래창조과학부/산업통상자원부, *3D 프린팅 전략기술 로드맵*. 2013.
21. 광기호 and 박성우, *[기계기술정책] 글로벌 3D 프린터산업 기술 동향 분석*. 기계저널, 2013. **53**(10): p. 58-64.
22. Yi, L., C. Gläßner, and J.C. Aurich, *How to integrate additive manufacturing technologies into manufacturing systems successfully: A perspective from the commercial vehicle industry*. Journal of Manufacturing Systems, 2019. **53**: p. 195-211.
23. Diptanshu, et al., *Ceramic Additive Manufacturing Using VAT Photopolymerization*, in *Volume 1: Additive Manufacturing; Bio and Sustainable Manufacturing*. 2018.
24. Tuan Rahim, T.N.A., et al., *Preparation and characterization of a newly developed polyamide composite utilising an affordable 3D printer*. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2015. **34**(19): p. 1628-1638.
25. R.Dancel, *Case Study Paper on Additive Manufacturing (3D Printing Technology)*. ResearchGate, 2019.
26. Kim, D., et al., *Application of 3D Printing Technology in Seismic Physical Modeling*. The Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers, 2019. **56**(3): p. 260-269.
27. Moylan, S., et al., *Infrared thermography for laser-based powder bed fusion additive manufacturing processes*. 2014. p. 1191-1196.
28. Agarwala, M., *Direct selective laser sintering of metals*. Rapid Prototyping Journal, 1995. **1**(1): p. 26-36.
29. Sireesha, M., et al., *A review on additive manufacturing and its way into the oil and gas industry*. RSC Advances, 2018. **8**(40): p. 22460-22468.
30. Kang, M.-C., D.-H. Ye, and G.-H. Go, *International Development Trend and Technical Issues of Metal Additive Manufacturing*. Journal of Welding and Joining, 2016. **34**(4): p. 9-16.
31. Kempen, K., et al., *Mechanical Properties of AlSi10Mg Produced by Selective Laser Melting*. Physics Procedia, 2012. **39**: p. 439-446.
32. Wei, P., et al., *The AlSi10Mg samples produced by selective laser melting: single track, densification, microstructure and mechanical behavior*. Applied Surface Science, 2017. **408**: p. 38-50.

33. Alghamdi, F. and M. Haghshenas, *Microstructural and small-scale characterization of additive manufactured AlSi10Mg alloy*. SN Applied Sciences, 2019. **1**(3).
34. Ma, C., Y. Dong, and C. Ye, *Improving Surface Finish of 3D-printed Metals by Ultrasonic Nanocrystal Surface Modification*. Procedia CIRP, 2016. **45**: p. 319-322.
35. Knorovsky, G., et al., *Inconel 718: a solidification diagram*. Metallurgical transactions A, 1989. **20**(10): p. 2149-2158.
36. Dudzinski, D., et al., *A review of developments towards dry and high speed machining of Inconel 718 alloy*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2004. **44**(4): p. 439-456.
37. Amato, K.N., et al., *Microstructures and mechanical behavior of Inconel 718 fabricated by selective laser melting*. Acta Materialia, 2012. **60**(5): p. 2229-2239.
38. Maiyar, L.M., et al., *Optimization of Machining Parameters for end Milling of Inconel 718 Super Alloy Using Taguchi based Grey Relational Analysis*. Procedia Engineering, 2013. **64**: p. 1276-1282.
39. Rahim, E., N. Warap, and Z. Mohid, *Thermal-Assisted Machining of Nickel-based Alloy*, in *Superalloys*. 2015.
40. Prashanth, K.G., et al., *Is the energy density a reliable parameter for materials synthesis by selective laser melting?* Materials Research Letters, 2017. **5**(6): p. 386-390.
41. 김무선, *SLM 공정 기법으로 제작한 AlSi10Mg 인장특성에 관한 연구*. 한국산학기술학회논문지, 2018. **19**(12).
42. 김지훈, 예병준, and 김영환, *가스아토마이징된 Zl87. 3misc metal8. 3Ni4. 4 분말의 냉각속도와 수지상 가지 가격에 관한 고찰*. 한국주조공학회지 (주조), 1999. **19**(1): p. 54-65.
43. 천창근, et al., *최신연구동향: 금속기반 3D 프린팅 공정기술 현황 및 기술개발 방향*. 재료마당, 2013. **26**(6): p. 61-68.
44. Li, W., et al., *Effect of heat treatment on AlSi10Mg alloy fabricated by selective laser melting: Microstructure evolution, mechanical properties and fracture mechanism*. Materials Science and Engineering: A, 2016. **663**: p. 116-125.

6. Abstract

Recently, 3D printing was defined as AM (Additive Manufacturing) in English and additive manufacturing in Korean due to ASTM regulations. AM has a total of seven methods: Vit photo polymerization, Material Setting, Material extension, Powder Bed Fusion, Binder Jetting, Sheet Lamination, and Directing Energy Deposition. One of these is Powder Bed Fusion, which is widely used in industrial fields. Powder Bed Fusion method is a method of simply applying powder thinner and applying a high-power laser to make products by depositing them through melting and coagulation. Currently, parts manufactured in the PBF method are widely used in various key industries, including aerospace, automotive, biomedical and chemical industries. Typical materials used include titanium alloys with high strength but low density and excellent corrosion resistance; aluminum alloys with excellent conductivity and corrosion resistance; Ni alloys with high strength and ductility; and iron alloys, which are most commonly used. However, in order to be utilized in more diverse industries, it is necessary to obtain data on various process variables for materials used in PBFs and to actively study the association between micro-organization and mechanical properties. In this study, we selected AlSi10Mg, Inconel 718, which is widely used among the aforementioned alloys, and manufactured the samples with the PBF AM process, and conducted micro-tissue analysis and mechanical properties analysis.