creative commons
COMMONS DEED

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

dCollection

[UCI]I804:48009-200000290948

공학석사학위논문

Powder Bed Fusion공정으로 제조된 SUS 합금 및 Inconel 718의 미세조직 및 기계적 특성

Microstructure and Mechanical Properties of SUS Alloys and Inconel 718 fabricated by Powder Bed Fusion Process

울산대학교 대학원

첨단소재공학부

이 동 완

Powder Bed Fusion공정으로 제조된 SUS 합금 및 Inconel 718의 미세조직 및 기계적 특성

지도교수 김 진 천

이 논문을 공학석사학위 논문으로 제출함

2020년 2월

울산대학교 대학원

첨단소재공학부

이 동 완

이동완의 공학석사학위 논문을 인준함

심사위원장　신 상 용　　(인)

심사위원　　이 정 구　　(인)

심사위원　　김 진 천　　(인)

울산대학교 대학원

2020년 2월

차 례

국문 요약 .....

그림 목차 .....

표 목차 .....

1. 서론 9

2. 이론적 배경 12

2. 1. Additive Manufacturing(AM) 12

2. 1. 1. Additive Manufacturing 개요 12

2. 1. 2. Powder Bed Fusion(PBF) 개요 13

2. 1. 3. Direct Energy Deposition(DED) 개요 16

2. 1. 4. Binder Jetting(BJ) 개요 17

2. 1. 5. Material Extrusion(ME) 개요 18

2. 2 Stainless Steel(SUS) 19

2. 2. 1. SUS316L 20

2. 2. 2. SUS439L 21

2. 3 Inconel 22

2. 3. 1. Inconel718 22

2. 4 Powder Bed Fusion(PBF) 분말소재의 변수 23

2. 4. 1. 분말의 형상 및 크기 24

2. 4. 2. 분말의 입도분포 25

3. 실험 방법 26

3. 1. 재료 선정 및 특성 분석 26

3. 2. Powder Bed Fusion의 공정 변수 29

3. 2. 1. 레이저파워 및 스피드 29

3. 2. 2. 적층 패턴 31

3. 2. 3. 가입 에너지 밀도(Volume Energy Density, VED) 33

3. 2. 4. 선의 에너지(Linear Energy, LE) 33

3. 3. PBF장비 및 출력물 선정 34

3. 4. 미세조직 관찰 36

3. 5. 경도 시험 37

3. 6. 인장 시험 39

3. 7. 밀도 측정 40

4. 결과 및 고찰.....41

4. 1. 분말 특성 분석.....41

4. 2. SUS316L 미세조직 분석 52

4. 2. 1 미세조직 분석 53

4. 2. 2. 밀도 측정 57

4. 2. 3. 경도 실험 58

4. 3. SUS439L 미세조직 분석 구조분석 59

4. 3. 1. 미세조직 분석 60

4. 3. 2. 밀도 측정 64

4. 3. 3. 경도 실험 65

4. 4. Inconel718 미세조직 분석 구조분석 66

4. 4. 1 시편의 평면 미세조직 분석 67

4. 4. 2 시편의 측면 미세조직 분석 73

4. 4. 3. 경도 실험 80

4. 4. 4. 인장 실험 82

5. 결론.....85

6. 참고 문헌.....89

7. Abstract.....95

그림 목차

그림 2.1 PBF 공정 모식도 14

그림 2.2 DED공정 모식도 16

그림 2.3 BJ 공정 모식도 17

그림 2.4 FDM방식 모식도 18

그림 2.5 SUS316L으로 제조된 제품 사진 20

그림 2.6 SUS439L으로 제조된 제품 사진 21

그림 2.6 SUS439L으로 제조된 제품 사진 21

그림 3.1 분말 분석에 사용된 FE-SEM 장비 27

그림 3.2 분말 분석에 사용된 PSA 장비 27

그림 3.3 분말 분석에 사용된 XRD 장비 28

그림 3.4 Hall Flow Meter의 사진과 측정 방법 28

그림 3.5 잔류응력으로 인한 제품의 support의 비틀림 현상을 나타낸 사진 30

그림 3.6 (a) 90°회전하는 Meander 패턴, (b)69°회전하는 Meander 패턴 32

그림 3.7 비커스 경도에서 사용하는 압입자 사진 38

그림 3.8 인장실험에 사용한 인장 시편의 도면 사진 39

그림 3.9 밀도 측정에 사용된 장비 사진 40

그림 4.1 SUS316L 분말의 입도 분포 분석결과 42

그림 4.2 SUS316L분말의 FE-SEM 사진 43

그림 4.3 SUS316L분말의 XRD분석 결과 43

그림 4.4 SUS439L 분말의 입도 분포 분석결과 45

그림 4.5 SUS439L분말의 FE-SEM 사진 46

그림 4.6 SUS439L분말의 XRD분석 결과 46

그림 4.7 Inconel718 분말의 입도 분포 분석결과 48

그림 4.8 Inconel 718분말의 FE-SEM 사진 50

그림 4.9 Inconel718분말의 XRD분석 결과 51

그림 4.10 제조된 SUS316L 시편의 사진 52

그림 4.11 SUS316L 시편의 미세조직 OM사진 56

그림 4.12 SUS316L시편의 비커스 경도 평균 결과값 그래프 58

그림 4.13 제조된 SUS439L시편의 사진 59

그림 4.14 SUS439L 시편의 미세조직 OM사진 63

그림 4.15 SUS439L시편의 비커스 경도 평균 결과값 그래프 65

그림 4.16 제조된 Inconel718 시편의 사진 66

그림 4.17 분석한 평면을 나타낸 사진 67

그림 4.18 Inconel718 시편의 평면 미세조직 사진 72

그림 4.19 분석한 측면을 나타낸 사진 74

그림 4.20 Inconel718 시편의 측면 미세조직 사진 79

그림 4.21 Inconel718시편의 평면 비커스 경도 평균 결과값 그래프 81

그림 4.22 Inconel718시편의 측면 비커스 경도 평균 결과값 그래프 81

그림 4.23 제조한 인장시편 82

그림 4. (a) 실험에 사용된 인장시편. (b) 인장실험 결과 값 84

표 목차

표 2.1 ASTM에서 규정하는 3D프린팅 기술별 분류 13

표 2.2 스테인리스강의 조성 19

표 2.3 Inconel 718의 조성 22

표 3.1 시편 제작에 사용된 장비의 사양 34

표 3.2 SUS316L과 SUS439L 시편 제작에 사용된 공정 변수 35

표 3.3 Inconel718 시편 제작에 사용된 공정 변수 35

표 3.4 미세조직 관찰을 위해 사용한 재료별 에칭 용액 36

표 4.1 SUS316L의 비밀도 측정 평균 결과표 57

표 4.2 SUS439L의 비밀도 측정 평균 결과표 64

표 4.3 설계한 인장시편의 크기와 출력한 인장시편의 크기오차 83

국문요약

최근 Additive Manufacturing(AM)공정에 대한 연구와 개발이 진행함에 따라 AM공정의 방법 중 금속분말을 이용하는 방법인 Powder Bed Fusion(PBF)와 Direct Energy Deposit(DED), Binder jetting(BJ) 방법이 주목받는다. 본 연구에서는 이들 세 가지의 방법 중 가장 상업적 적용이 편리한 PBF 방식을 선정하였다.

소재는 일반적으로 가장 많이 활용되는 철계 및 Ni계 합금으로 선정하였다. 철계 합금과 Ni계 합금으로 제품을 제작하였을 때 나타나는 기계적 특성과 미세조직의 관계에 대하여 상관관계를 연구하고 이에 대한 연구결과들을 실험결과로부터 구축할 필요가 있다.

AM공정에 대한 연구와 기술이 진행됨에 따라 PBF방식으로 제조된 제품과 비교하여 일반 공정(주조) 방법으로 생산된 제품의 기계적 특성 차이에 대한 분석이 필요하다. 기계적 특성은 미세조직에 영향을 많이 받으므로, AM공정으로 제조된 제품의 미세조직을 분석하고 기계적 특성과의 관계를 해석하여 제품에 요구되는 기계적 특성을 충족시킬 필요가 있다. AM공정에서도 최적의 미세조직을 찾기 위해서는 최적의 공정변수를 찾아야 한다.

본 연구에서는 철계 합금(SUS316L, SUS439L)과 Ni계 합금(Inconel 718)의 최적의 공정변수를 찾고, 미세조직을 분석하여 제품에 요구되는 기계적 특성을 분석하였다.

핵 심 낱 말 : Additive Manufacturing, Powder Bed Fusion, SUS316L, SUS439L, Inconel718, Microstructure, Tensile test

1. 서론

3D 프린팅은 4차 산업혁명의 대표적인 키워드다. 실제로 개발된 시기는 1980년대지만 조명을 받기 시작한 것은 2010년부터다. 최근에는 자동차 제조에서부터 식품산업에까지 활용되는 등 쓰임새가 늘고 있다.

인공지능, 자율주행 등 4차 산업혁명에 따른 새로운 변화요소들은 사실상 모든 산업 분야뿐만 아니라 실생활에도 영향을 미치고 있다. 그중 3D 프린팅은 제조업에서 가장 핵심적인 기술이라고 할 수 있다. 3D 프린팅 도입 이전의 제조 과정은 일반적으로 제품 구상, 시장조사 후 제품 설계, 시제품 생산 및 성능 시험, 실제 제품 생산으로 이어진다. 그러나 3D 프린팅은 기존의 복잡하고 긴 제조 과정을 단순화시켜준다. 3D 프린터를 이용하면 제품 구상, 시장 조사 후 3D 프린터를 이용한 설계가 끝나면 바로 제품 생산이 가능해진다. 생산 도중에도 쉽게 디자인을 개선하고 바로 재생산이 가능하다. 3D 프린팅을 통해 시제품 제작비용과 시간을 획기적으로 줄일 수 있으며 공정 간소화로 인건비나 조립 비용 절감도 기대할 수 있다.

Additive manufacturing(AM)공정은 적층 제조 기술로, 설계한 디지털 디자인 데이터를 이용하여 원하는 형상을 제조하는 공정을 말한다. AM공정의 기본적은 공정 순서는 디자인 SW 또는 3D스캐너를 통한 3D 도면 모델링, 3D 프린팅(출력), 서포터 제거(일부 공정의 경우) 및 후가공으로 진행된다.[1]

ASTM에서 규정하는 AM공정은 출력하는 방법에 따라 크게 7가지로 나뉜다. 7가지 종류는 Photo-Polymerization(PP), Material Extrusion(ME), Binder Jetting(BJ), Material

Jetting(MJ), Direct Energy Deposition(DED), Powder Bed Fusion(PBF), Sheet Lamination(SL)가 있다.[2]

AM공정에 대한 연구와 개발이 진행함에 따라 AM공정의 방법 중 금속 분말을 활용하는 방법으로 Powder Bed Fusion(PBF)와 Direct Energy Deposit(DED), Binder Jetting(BJ) 방법이 주목받고 있다. 위의 세가지 방법 외 최근에는 Filament Deposition Molding(FDM)방법으로 금속 제품을 출력하고자 하나 응용에는 한계가 있다. 위의 4가지 방법 중 본 논문에서는 가장 많이 활용되고 있는 PBF 방법을 선택하여 실험을 진행하였다. PBF 방법은 금속 분말을 한 층 적층을 하고 설계한 도면대로 고출력 레이저를 이용하여 원하는 부분만을 용융시킨다. 이후 다시 금속 분말 한 층을 첫 용융층 위에 적층하고 레이저로 다시 용융시킨다. 이 작업을 사용자가 원하는 3차원 형상을 가지도록 수없이 반복하여 제품을 만드는 방법이다. PBF 공정은 분말을 직접 용융시켜 제품을 만들기 때문에 분말의 특성이 제품의 품질에 큰 영향을 미친다는 것을 알 수 있다. 따라서 PBF 공정은 원재료 분말의 특성을 정확하게 분석, 이해하고, 제어해야 좋은 품질의 제품을 얻을 수 있다. 분말의 특성 외 PBF 공정에 영향을 미치는 요인으로는 사용하는 레이저의 파워, 레이저의 속도(speed), 해칭(hatching) 간격, 적층패턴, 레이저의 직경 등이 있다. 레이저의 파워와 레이저의 속도, 해칭간격, 레이저의 직경으로 가입 에너지 밀도를 구할 수 있는데, 가입 에너지 밀도에 따라 제품의 품질이 달라진다. 가입 에너지 밀도가 너무 높으면 분말이 과용융되어 적층된 분말이 레이저에 의해 도포된 위치에서 벗어날 수 있다. 그리고 과용융으로 인해 Fume이 발생하게 되는데, 이러한 Fume들이 같이 적층이 되면 제품 내 불순물로 존재하게 되며, 균열을 발생시키는

원인이 된다. 반대로 가입 에너지 밀도가 너무 낮으면 분말이 용융이 되지 않아 다음 층을 적층할 때 형상이 내려앉아 적층 자체가 안되는 경우가 발생한다.[4-6]

본 연구에서는 AM공정에 대한 연구와 기술이 진행됨에 따라 PBF방식으로 출력할 수 있는 소재 중 철계 과 Ni계 합금 사용하여 만든 제품이 일반 공정 방법으로 생산된 철계 합금 제품과 Ni계합금 제품과 비교하였을 때 기계적 특성 차이에 대한 분석이 필요하다. 기계적 특성은 미세조직에 영향을 많이 받으며, AM공정으로 제조된 제품의 미세조직을 분석하고 기계적 특성과의 관계를 해석하여 제품에 요구되는 기계적 특성을 충족시킬 필요가 있다. 최적의 미세조직을 찾기 위해서는 최적의 공정변수를 찾아야 한다. 실험을 통하여 철계 합금과 Ni계 합금의 최적의 공정변수를 찾고, 미세조직을 분석하여 제품에 요구되는 기계적 특성을 기존 상용 소재와 비교하고자 하였다.[1, 3]

2. 이론적 배경

2. 1. Additive Manufacturing(AM)

2. 1. 1. Additive Manufacturing 개요

Additive manufacturing(AM) 공정은 적층제조 기술로, 설계한 디지털 디자인 데이터를 이용하여 원하는 형상의 제품을 제조하는 공정을 말한다. AM 공정의 기본적인 순서는 디자인 SW또는 3D스캐너를 통한 3D 도면 모델링, 출력, 서포터 제거(PBF의 경우) 및 후가공으로 진행된다. AM공정의 특징은 시제품의 제작비용 및 시간 절약, 다품종 소량생산 및 맞춤 제작, 복잡한 형상 제작 및 조립 비용 절감 등이 있다.

표2.1은 ASTM에서 규정하는 AM 공정의 7가지 종류를 보여준다. AM 공정은 출력하는 방법에 따라 크게 7가지로 나누는데, 7가지 종류는 Photo-Polymerization(PP), Material Extrusion(ME), Binder Jetting(BJ), Material Jetting(MJ), Direct Energy Deposition(DED), Powder Bed Fusion(PBF), Sheet Lamination(SL)가 있다. 7가지 공정 중 금속 재료를 사용할 수 있는 공정은 Material Extrusion(ME), Binder jetting(BJ), Direct Energy Deposition(DED), Powder Bed Fusion(PBF) 공정이 있다.[2, 3]

명칭	원리	종류
Photo-Polymerization	빛의 조사로 광경화성수지를 광중합 반응을 일으켜 선택적으로 고형화시키는 방식	SLA, DLP
Malerial Extrusion	필라멘트 타입의 수지를 부분적으로 가열하여 노즐을 통해 연속적으로 밀어내며 위치를 이동시켜 물체를 형성시킴	FDM
Binder Jetting	분말 형태의 소재 위에 액체 형태의 접착제를 분사시켜 분말을 결합시킴	3D Printing Ink-Jetting S-Print M-Print
Malerial Jetting	용액 형태의 소재 자체를 제팅으로 토출시키고 자외선 등으로 경화시킴	Polyjet Ink-Jetting Thermojet
Direct Energy Deposition (DED)	고에너지원(레이저나 전자빔 등)으로 금속분말을 용융시켜 부착시킴	LENS DED, DMT BeAM...
Power Bed Fusion (PBF)	분말 형태의 소재를 분말 베드 위에 일정한 두께로 이송하여 고에너지빔(레이저나 전자빔 등)을 주사하며 조사해 선택적으로 결합시킴	SLS, DMLS, SLM, EBM Copcept Laser
Sheet Lamination	얇은 필름 형태의 종이, 박판 수지나 금속을 열, 접착제 등으로 붙여가며 적층시킴	LOM, Ultrasonic C

표 2.1 ASTM 에서 규정하는 3D 프린팅 기술별 분류

2. 1. 2. Powder Bed Fusion(PBF) 개요

Powder Bed Fusion(PBF)공정은 구형의 금속 분말 재료를 사용하고, Laser를 주사하여 원하는 부분을 용융하여 제품을 만드는 방식이다. 용융 되는 부분을 제외하고 녹지 않는 분말이 제품을 고정해주지만, 제품의 형상 안정을 위하여, 특히 돌출된 둥근 형상(Overhang 형상)의 제품 등을 제조할 때는 설계할 때부터 지지대(support)를 같이 설계해야만 한다. 지지대는 제품의 형상을 고정할 뿐만 아니라 적층하는 과정에서 발생하는 열이 아래방향으로 원활하게 방출되게 해주는 역할을 한다. 열을 아래 방향으로 향하게 하여 내부의 열을 방출하면, 제품 내부의 잔류 응력을 해소시켜준다고 알려져 있다. 잔류응력을 해소시켜주지 않으면 제품 출력이 끝난 후 잔류 응력에 의해 제품의 형상이 비틀리거나 균열이 발생하므로 서포트의 설계는 PBF에서 매우 주요한 부분 중의 하나이다.

또한 PBF공정의 대표적인 공정변수로는 레이저의 파워, 레이저의 속도, 레이저의 두께, 해칭간격, 분말의 특성이 있다. 그림2.1은 PBF 공정을 나타내는 모식도이다.[7]

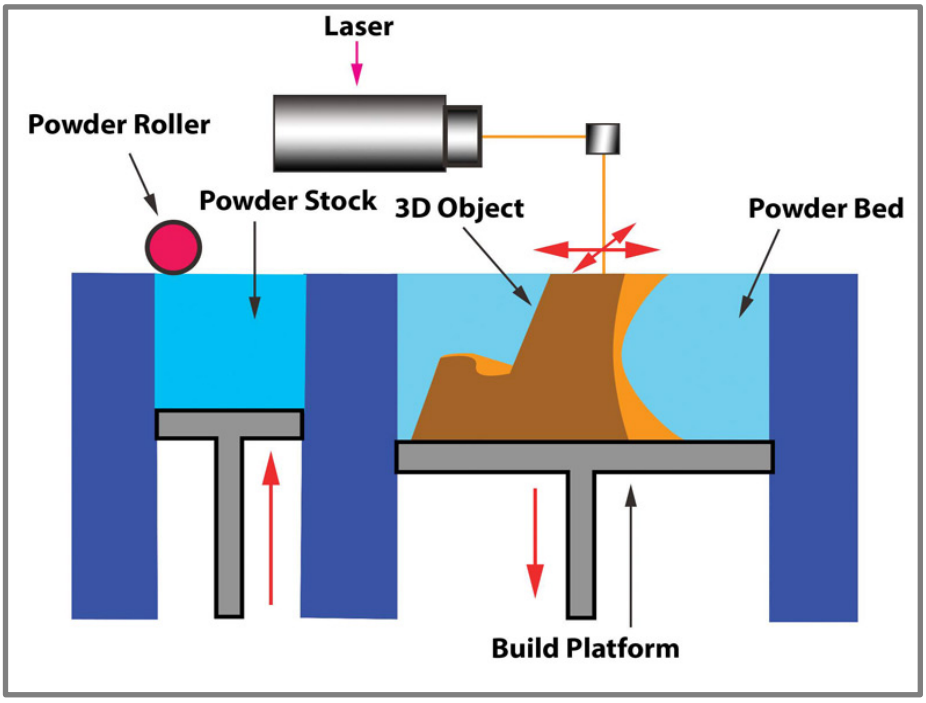


그림 2.1 PBF 공정 모식도

2. 1. 3. Direct Energy Deposition(DED) 개요

Direct Energy Deposition(DED) 공정은 재료를 공급하는 동시에 열에너지를 이용하여 그 재료를 용융 접착하면서 형상을 제작하는 공정 장법이다. 주로 금속재료를 사용하며, 분말과 선(와이어) 형태의 원료소재를 사용할 수 있다. 금속 분말을 사용할 경우, 앞선 PBF 공정에 비해 비교적 큰 분말을 사용할 수 있다. DED 공정은 진공이 필수 조건으로 요구되지 않는다. 대부분 4~5축 회전시스템을 포함하고 있어서 평면뿐만 아니라 수직면 가공이 가능하다는 장점을 가지고 있다. 다른 3D 프린터와 다르게 기존 제품에 재료를 덧붙여서 마모된 파트나 파손도 부분을 수리할 수 있지만 표면조도, 기공에 대한 품질은 PBF 보다 떨어지게 된다. 최근 DED공정에 대한 연구로 기존의 DED공정과 다르게 표면조도에 대한 개선과 공정 속도가 빠른 공정법도 개발되고 있다. 그림2.2는 DED공정을 나타낸 모식도이다. [8]

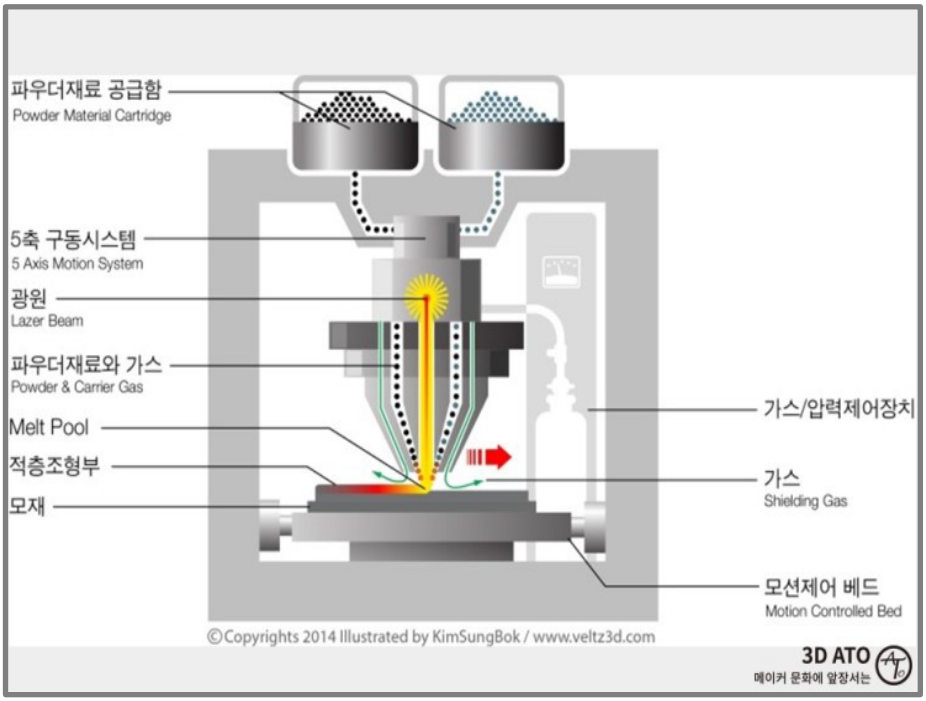


그림 2.2 DED 공정 모식도

2. 1. 4. Binder Jetting(BJ) 개요

Binder Jetting(BJ)공정은 PBF 공정과 유사한 방법이지만, PBF 공정은 레이저를 이용하여 분말을 용융하여 제품을 만들고, BJ 공정은 분말에 접착제를 분사하여 분말들을 접합하여 제품을 만드는 방법이기에 폴리머, 세라믹, 금속 제품을 모두 제조할 수 있다. 금속재료를 사용하는 경우 다른 공정과 다르게 열이나 에너지를 가하지 않으므로 서포터가 필요하지 않는다. 하지만 접착제로 접합하여 제품을 만들기 때문에, 최종 제품을 얻는 과정에서 접착제을 제조하는 탈바이딩 공정 등 후속 공정이 필수적으로 필요하고, 탈바인딩 후 일반 소결 과정을 거쳐야 한다. 그림 2.3 은 BJ 공정 모식도를 을 나타낸다. [9]

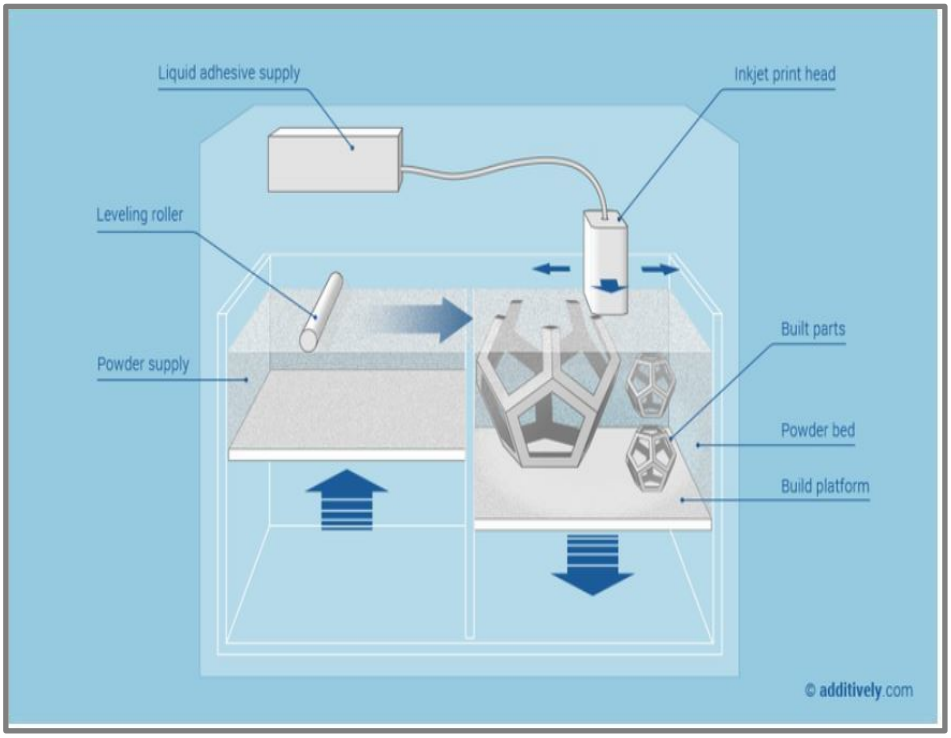


그림 2.3 BJ 공정 모식도

2. 1. 5. Material Extrusion(ME) 개요

필라멘트 타입의 재료를 노즐부에서 용융, 분출하여 적층시키는 방식이다. 이 방식은 매우 간단한 구조를 가지고 있으며, 노즐부는 X, Y 축으로만 움직이며 플레이트는 Z 축으로 내려가면서 제품을 출력한다. 스타라타시스(Stratasys)사에서 최초로 개발되었고, 현재는 개인용 3D 프린터로 가장 많이 사용되고 있는 방식이다. 재료는 주로 폴리머 소재인 ABS, PLA, PP 등을 사용하였으나 최근 금속과 혼합하여 사용되는 방식이 개발되고 있으나 금속 분말 함량 제어의 한계가 있어 단순히 금속 색상을 요구하는 단순한 장식 제품에 응용되는 수준이다. 그림 2.4 는 ME 의 공정 중 대표적인 방식인 FDM 을 나타낸 그림이다.[10]

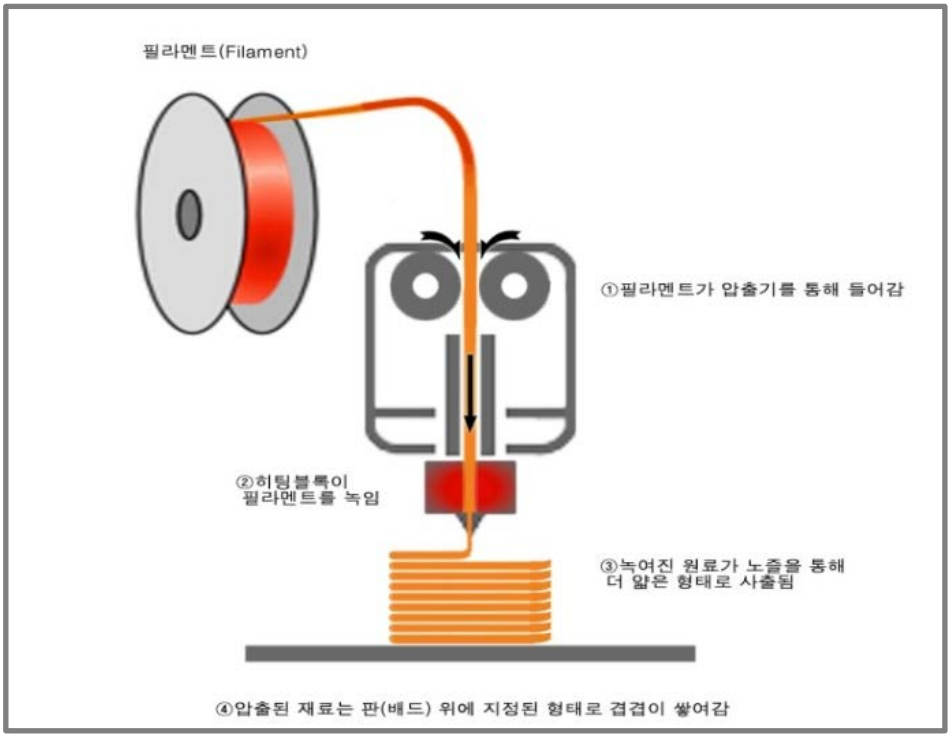


그림 2.4 FDM 방식 모식도

2. 2. Stainless Steel(SUS)

스테인리스강은 대표적인 공업 재료로 Cr, Ni, Mo 등의 합금 원소를 첨가하여 내식성을 증가시킨 강이다. Cr 은 내부의 금속을 부식으로부터 보호하는 표면 산화피막을 형성하여 철의 표면을 부동태화하여 강의 내식성을 높인다. Ni 은 원자재 가격이 고가이나 중성 또는 약산성에 대한 내식성을 향상시키며, 열처리단계에서 오스테나이트 조직(FCC)이 상온까지 잔류되게 할 수 있어 연성과 성형성이 향상된다. Mo 는 Cr 이온이 존재하는 곳에서의 내식성을 증가시킨다. 일부 스테인리스강은 Al 을 첨가하는데 이는 고온내산화성을 향상시킨다. 스테인리스강은 크게 페라이트 스테인리스강, 마르텐사이트 스테인리스강, 오스테나이트 스테인리스강으로 나뉜다. 표 2.2 는 각 스테인리스강의 조성을 나타낸다.[11-13]

구 분		기존조직		
		오스테나이트	마르텐사이트	페라이트
대표강종		SUS304	SUS410	SUS430
대표성분		18%Cr-8%Ni	18%Cr	13%Cr
열처리		고용화 열처리	풀링 후 급냉	풀링
경화성		가공경화	급냉 경화	비 급냉 경화
품질특성	내식성	높음	보통	높음
	강도	높음	높음	보통
	가공	높음	낮음	보통
	자성	상자성	상자성	상자성
	용접성	높음	낮음	보통

표 2.2 스테인리스강의 조성

2. 2. 1. SUS316L

오스테나이트계 스테인리스강은 일반 탄소강에 비하여 우수한 내식성, 내마모성 및 기계적 특성으로 주조재나 판재로 많이 사용된다. 그러나 오스테나이트계 스테인리스강은 가공성이 떨어져, 고밀도 및 3D 형상 제품의 경우 분말 공정(PIM 등)에 의한 제품 응용이 확대되고 있다.[그림 2.5] 그러나 오스테나이트 스테인리스강은 탄소강에 비하여 가공이 열악하여 정형 여 제조가 가능한 압축 소결법에 의한 2 차원 형상의 부품으로 응용이 되어 왔으며, 고밀도 및 3 차원 형상 제품의 경우 PIM 에 의한 제품의 응용 확대되고 있다. 본 연구에서 사용한 SUS316L 의 경우 가장 많이 사용되고 있은 스테인리스강이며, 기계적 강도를 요하는 부품보다는 내식성부품에 많이 응용되는 제품에 사용되고 있다. SUS316L 는 Cr: 18%, Ni: 12%, C: 0.03%, Mo: 2.0%으로 이루어진 오스트나이트계 스테인리스강이다. 이 소재는 Cr 탄화물 생성으로 인한 입계부식을 방지하기 위해 Mo 을 첨가하여 내식성, 고온강도가 상당히 우수하다.[11, 16]

그림 2.5 SUS316L 로 제조된 제품 사진[43]

0

2. 2. 2. SUS439L

SUS439L 은 페라이트계 스테인리스 강으로 자성을 갖고 있으며 Nb 로 인해 내크리프성이 우수하고 냉간성형이 가해지면 원래의 형태로 되돌아 가려는 힘이 매우 낮다. 또한 SUS316L 에 비해 절단과 가공이 용이하며 고온 열전도성, 고온 내산화성, 열팽창율 등이 뛰어나다. 이러한 특성으로 인해 주로 자동차 배기계, 파이프에 많이 사용된다. SUS439L 은 SUS316L 과 다르게 Ni, Mo 이 첨가되지 않아 내식성이 SUS316L 에 비해 떨어지지만, Ni 이 첨가되지 않아 가격이 저렴하다. Ni 대신 Ti 와 Al 이 첨가된다.[13-15]

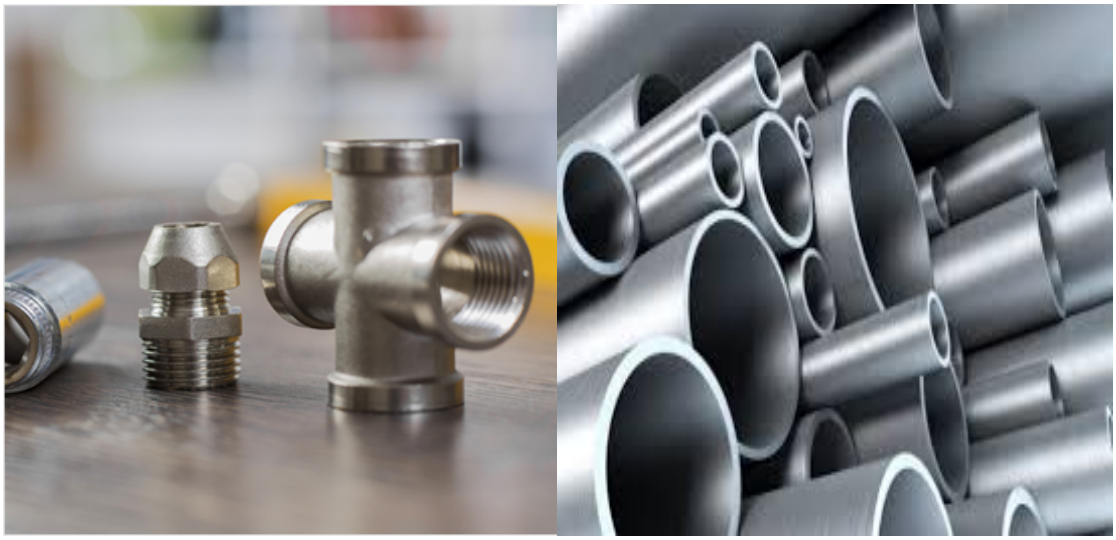


그림 2.6 SUS439L 로 제조된 제품 사진 [44].

2. 3. Inconel

2. 3. 1 Inconel718

Inconel718 은 석출경화형 니켈-크롬합금으로 -250℃의 저온에서 700℃의 고온까지 우수한 강도를 나타내는 시효 경화합금으로 시효 상태에서의 용접이 가능하고, 고온에서 내산화성이 우수한 합금이다. 인장강도, 피로강도, 크리프 강도가 높고 내산화성, 내식성이 우수하여 항공우주의 터빈엔진, 산업용 터빈; 등에 많이 사용된다.[18]

Inconel718 의 이러한 특성은 다른 Ni기, Ni-Fe기 초내열 합금들이 γ'석출물에 의해 강화되는 것에 비해 γ'' 석출물에 의해 강화되기 때문인 것으로 알려져 있다. Inconel718 은 주로 γ'상과 γ''석출물에 의해 강화되는데, γ''은 합금원소 중 Nb에 의한 것으로 규칙한 BCT 구조로써 Ni_3Nb의 조성을 가지는 주 석출물이며, γ'은 Al, Ti 등에 의해 규칙형 FCC 구조를 갖는 Ni(Al, Ti) 조성인 부차적인 석출물로써 석출경화 효과는 γ''에 비해 작다.[17-18]

표 2.3 은 Inconel718 의 조성을 나타낸다. Inconel718 의 조성은 Ni: 50~55%, C: 0.08%, Mn: 0.35%, Si: 0.35%, P: 0.015%, Cr: 17~21.0%, Co: 1.0%, Cb+Ta: 4.75~5.50%, Ti: 1.15%, Al: 0.80%, Cu: 0.30% 이며 나머지가 Fe 으로 되어있다.

Inconel 718	조성		Ni	C	Mn	Si	P	S	Cr	Co	Mo	Cb+ Ta	Ti	Al	B	Cu	Fe
	함량 (%)	Min	50.0	-	-	-	-	-	17.0	-	2.80	4.75	0.65	0.20	-	-	remain der
		Max	55.0	0.08	0.35	0.35	0.015	0.015	21.0	1.0	3.30	5.50	1.15	0.80	0.006	0.30	
		Value															

표 2.3 Inconel 718 의 조성

2. 4 Powder Bed Fusion(PBF) 분말소재의 변수

PBF 공정에 사용되는 분말의 소재는 폴리머, 금속을 주로 사용한다. PBF 공정에서 분말은 최종제품의 품질과 밀도의 핵심요소이다. PBF 공정에서 요구되는 분말은 형상이 구형이며, 크기는 15~45 ㎛, Hausner ratio 는 1.0~1.25 이다. 분말의 형상에 관한 내용은 적층에 관한 내용으로 설명할 수 있다. 분말의 형상이 불규칙하면 분말의 유동도가 떨어지게 되면서 분말이 도포되는 과정에서 원활하게 공급되지 않게 되거나 분말들이 쌓이는 과정에서 빈 공간을 많이 발생시키는 원인이 된다. 이러한 빈 공간은 열 전달을 방해할 뿐만 아니라 제품내부의 기공으로 작용하게 되며 제품의 품질을 떨어뜨리는 원인이 된다. 분말일반적으로 제조공정에서 큰 영향을 받는다. PBF 공정에서 사용되는 분말을 제조하는 방법으로는 Gas Atomization(가스분무법)을 많이 사용한다. 분말이 구형일수록 분말의 유동성을 증가시켜 적층하는 과정에서 분말이 잘 쌓이게 된다.[19-20]

2. 4. 1. 분말의 형상 및 크기

분말은 최종 제품의 품질과 밀도의 핵심요소이다. 따라서 분말에 따라 최종 제품의 품질이 결정되며, 분말의 형상과 크기를 제어할 필요가 있다.

PBF 공정에서 사용하는 분말의 형상은 구형의 분말을 사용하며, 구형을 벗어난 분말을 사용할 경우 분말의 유동도에 악영향을 주게 되며 분말의 유동도가 좋지 못하면 장비에서 분말을 공급할 때 골고루 분말 도포되지 않는다. 그렇게 되면 분말이 도포되지 않은 부분이 결함으로 작용하게 되며 제품의 품질을 떨어뜨리는 요인이 된다.

분말의 크기가 클 경우 분말간 공간을 채울 수 가 없기 때문에 이러한 공간들이 제품의 기공으로 남게 된다. 그리고 레이저의 반경보다 분말의 크기가 크게 되면 용융되지 않는 부분이 생기게 되는데 이러한 부분들이 제품의 표면조도를 떨어뜨리는 요인으로 작용한다. 반대로 분말이 너무 작은 경우 분말의 공급이 어려워지게 되며 레이저에 의해 분말이 밀려나가 도포된 부분이 없어 질 수도 있다. 그러므로 PBF 공정에서 분말의 크기는 주로 10~60 ㎛를 사용하기를 권장하고 있으며, 본 연구에서는 15~45 ㎛의 분말을 사용하였다.

분말을 만드는 방법은 여러 가지가 있지만, 구형의 분말을 만드는데 최적의 방법은 Gas Atomization(가스분무법)으로 용융시킨 재료를 가스와 함께 분사시켜 구형의 분말을 만드는 방법이다.[12]

가스분무법으로 제조된 분말은 금속분말을 이용하는 모든 임의 형상 제조시스템에 넓게 사용되고 있다. PBF 공정에서 불규칙형상을 사용할 경우 최종제품의 기공도와 밀도에 좋지 않은 영향을 미친다.[20]

2. 4. 2. 분말의 입도분포

분말의 충진 밀도를 높이기 위해서 입자크기 분포를 조절하는 것이 중요하다. 입자 크기가 다른 분말을 섞는 것이 같은 크기의 입자를 사용할 때 보다 충진 밀도가 크다. 작은 입자들이 큰 입자 사이를 채워주기 때문에 충진 밀도가 뛰어나다. 충진 밀도가 최고로 좋은 배합은 작은 입자들보다 큰 입자들의 부피가 더 많아야 한다. 큰 입자로 시작해서 작은 입자들을 더해감에 따라 큰 입자들 사이에 있는 공간을 채워지면서 충진 밀도는 초기에 증가한다. PBF 공정의 경우 재료에 따라 밀도에 영향을 주며, 입자 크기분포도가 다양할수록 입자에 열에너지의 전달이 빨라지게 되며, 작은 입자일수록 크기가 큰 분말로의 열전달이 효율적이기 때문에 분말의 입도분포는 더 넓을수록 좋다.[21]

3. 실험 방법

3. 1. 재료 선정 및 특성

PBF 공정은 분말의 특성에 의해 최종 제품의 특성과 품질이 결정되며, 특히 분말의 형상은 가장 중요한 요소이다. 일반적인 금속 AM 공정, 특히 PBF 공정에서는 레이저를 인가하여 분말을 용융을 하기 전에 원료 금속 분말이 균일한 두께와 균일한 분포로 적층되어야 한다. 만약 적층 두께와 분말의 분포가 균일하지 않는다면 원하는 치수와 밀도로 제품이 출력되지 않게 되어 제품의 품질이 떨어지게 된다.

본 연구에서는 가스분무법으로 제조된 SUS316L, SUS439L, Inconel718 의 구형 분말을 사용하여 실험을 진행하였다. 평균입도는 35~40 ㎛이다.[39].

분말의 형상 확인은 FE-SEM(그림 3.1)으로 하였으며, 분말의 크기, 입도분포는 PSA 분석(그림 3.2), XRD 분석을 통하여 분말의 조성 및 결정성에 대해 분석하였고(그림 3.3), 분말의 유동도, 겉보기 밀도, 탭 밀도는 Hall Flow Meter 를 사용하여 측정하였다(그림 3.4).

분말의 유동도의 경우 위의 컵 밑부분을 막은 후 50g 의 분말을 컵에 부어준다. 그 다음 밑부분에 막은 것을 제거하면서 시간을 측정하는 방법으로 진행하였으며, 분말의 겉보기 밀도는 외부에서 힘이 가해지지 않는 상태에서 아래부분의 컵이 꽉 찰 때까지 채운 후 무게를 측정하는 방법을 진행하였다. 분말의 탭 밀도는 외부에서 힘을 가해주면서 아래부분의 컵이 꽉 찰 때까지 채워준 후 무게를 측정하는 방법으로 진행하였다. 여기서 구한 탭 밀도를 겉보기 밀도로 나눈 값이 Hausner ratio 이다.

그림 3.1 분말 분석에 사용된 FE-SEM 장비

그림 3.2 분말 분석에 사용된 PSA 장비

그림 3.3 분말 분석에 사용된 XRD 장비

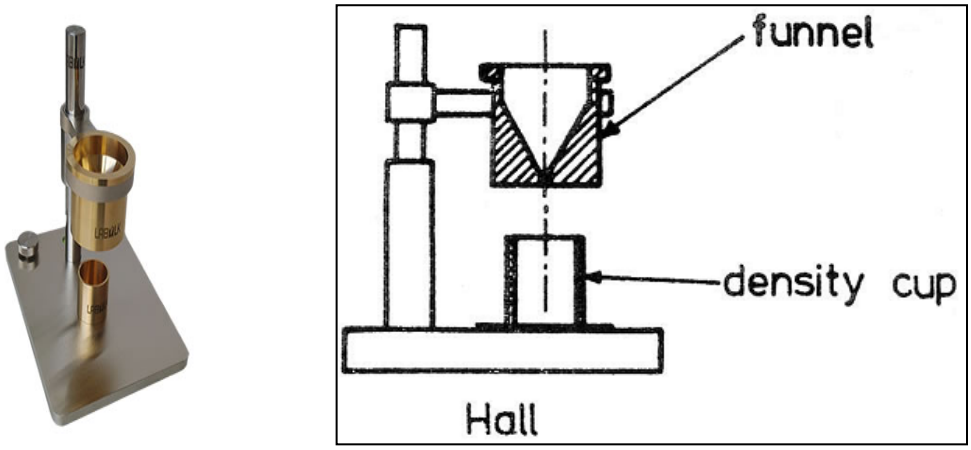


그림 3.4 Hall Flow Meter 의 사진과 측정 방법

3. 2. Powder Bed Fusion 의 공정 변수

3. 2. 1 레이저파워 및 속도

PBF 공정에서 핵심인 레이저는 분말의 특성과 함께 제품의 품질에 큰 영향을 미친다. 분말에 따라 분말을 용융시키는데 요구되는 레이저파워가 있으며, 이를 초과할 경우 과용융이 발생하여 키홀(Key Hall) 현상이 발생하거나 내부에 열에너지로 인한 응력이 쌓이게 된다. 이로 인하여 제대로 적층되지 못하여 제품의 내부에 기공이 많아지게 되거나 균열이 발생하고, 출력한 후 제품 내부 응력에 의해 비틀림 등이 발생한다.

레이저의 속도는 레이저파워와 마찬가지로 너무 느린 경우 재료가 레이저에 노출되는 시간이 많아지면서 과용융되고 열에너지로 인한 내부응력이 증가하게 되면서 출력물에 비틀림 현상이나 균열이 발생하게 된다.[39]

레이저의 파워나 속도에 따른 잔류응력에 의한 시편의 비틀림을 그림 3.5 에 나타냈다. 그림 3.5 의 경우 본 연구실에서 제조한 제품으로 레이저의 파워가 요구되는 파워에 비해 더 높은 파워를 가했을 때 시편의 support 부분에서 균열이 발생하는 것을 확인할 수 있었다.

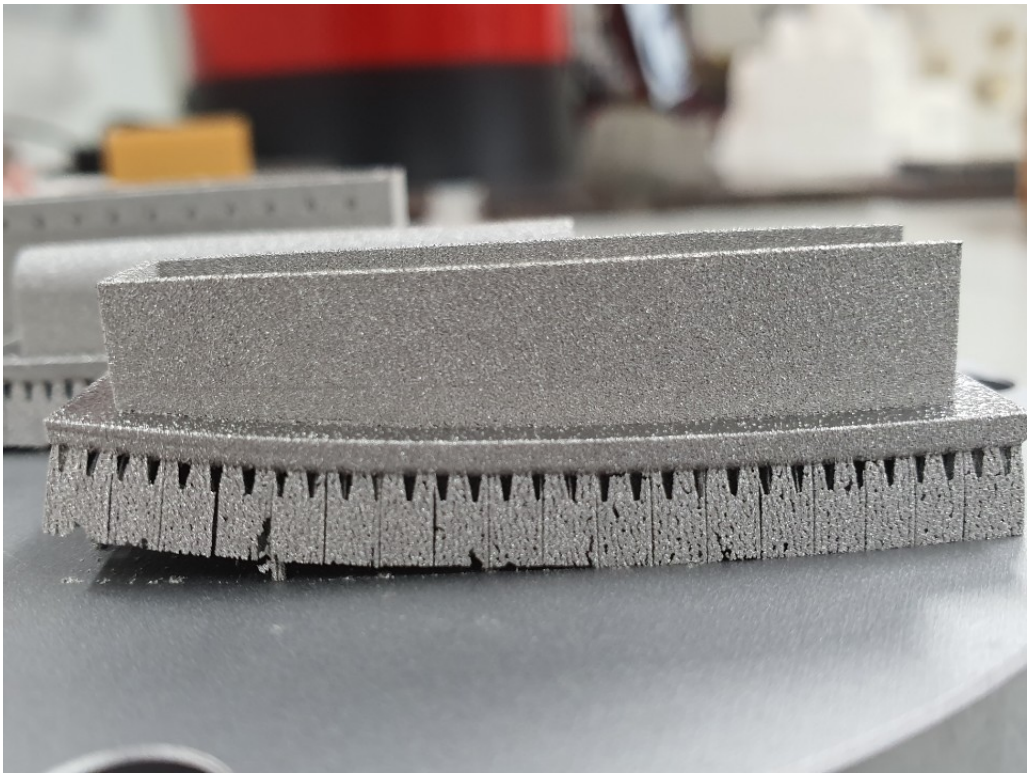
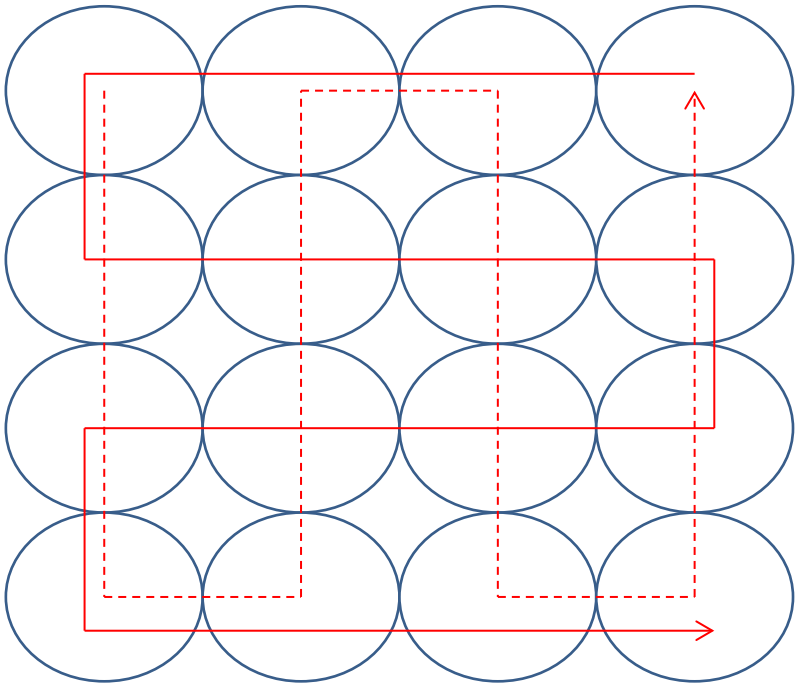


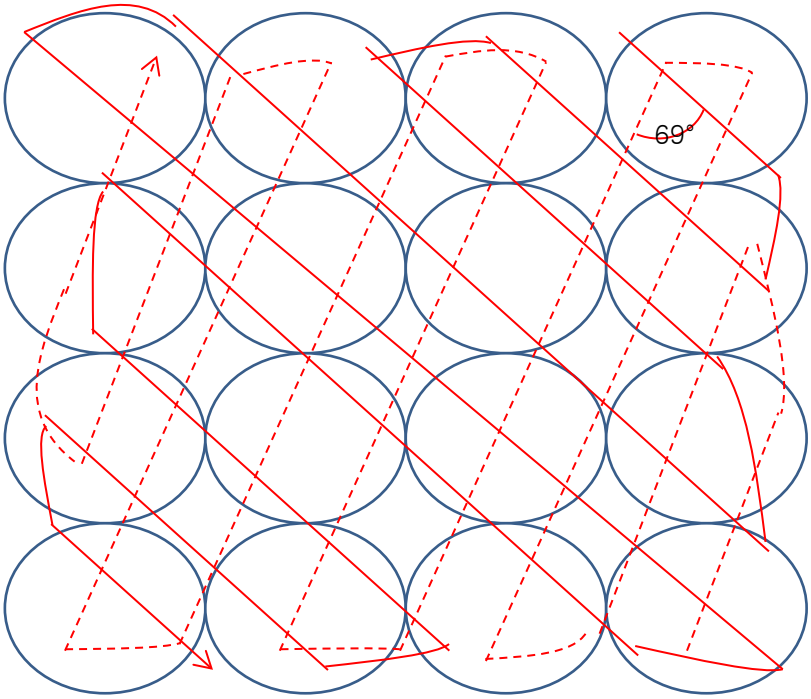
그림 3.5 잔류응력으로 인한 제품의 support 의 비틀림 현상을 나타낸 사진.

3. 2. 2 적층 패턴

본 연구에서 사용한 적층 패턴은 가장 많이 사용되고 있는 방법 중 하나인 Meander 패턴을 사용하였다. 적층 패턴은 레이저가 움직이는 방향에 따라 분말이 용융되어서 적층이 되어간다. 이때 발생하는 오차는 용융되지 않는 분말과 레이저의 정밀도에 인해 발생하는 용융과 냉각 중에 발생하는 열팽창과 수축에 의한 요인으로 설명할 수 있다. Meander 패턴은 한 층을 적층한 후 90°로 회전한 후 다시 적층하는 방법인데, 밀도를 높이고 뒤틀림을 줄이기 위하여 67~71°를 회전시켜 적층하였다. 그림 3.1 은 실험에 사용된 Meander 패턴을 나타낸 사진이다.



(a)



(b)

그림 3.6 (a) 90°회전하는 Meander 패턴, (b)69°회전하는 Meander 패턴

3. 2. 3. 가입 에너지 밀도(Volume Energy Density, VED)

가입 에너지 밀도(Volume Energy Density, VED)는 레이저의 파워(P_L)를 레이저의 속도(v_s), 레이저의 두께(D_s), 해칭 거리(Δy_s)로 나눈 값을 말한다. 가입에너지밀도는 제품의 품질과 관계가 있으며, 가입 에너지 밀도가 높을 경우 분말이 과용융되어 키홀현상이 발생하거나 기화로 인해 기공이 발생한다. 또한 너무 낮은 가입 에너지 밀도의 경우 분말이 완전히 용융되지 않아서 공공을 발생시키고 적층하는 과정에서 제대로 적층되지 않는 문제가 발생한다. 아래의 식은 가입 에너지 밀도를 구하는 식이다. [22, 24-25]

$$\mathrm{E_v(VED, J/}mm^3) = \frac{\mathrm{P_L}(W)}{\mathrm{v_s}(mm/s)\mathrm{D_s}(\mu\mathrm{m})\Delta\mathrm{y_s}(\mu\mathrm{m})}$$

3. 2. 4. 선의 에너지(Linear Energy, LE)

선의 에너지(Linear Energy, LE)는 레이저를 따라 가해지는 에너지를 말한다. 가입 에너지 밀도의 경우 재료가 받는 에너지를 말하며, 재료가 용융되는데 필요한 최대 에너지와 최소 에너지를 찾아 제품의 품질을 향상시키는데 사용된다면 선의 에너지의 경우 한 선이 용융, 냉각을 할 때 생성되는 레이어의 두께에 대해 알아내는데 사용된다. 레이어의 두께가 어느 정도인지 알아내고 각 레이어의 중심 거리가—해칭 거리이다. 해칭 거리가 멀어질수록 레이어 사이가 벌어지게 되며, 이 부분에 내부응력으로 인한 균열이 진행될 수 있다. 해칭 거리가 가까울 경우 용융되는 부분이 겹치게 되고, 겹치는 부분이 과용융되어 기화되어 기공으로 작용하거나 내부응력이 증가하게 된다. 선의 에너지는 레이저의 파워(P_L)를 레이저의 속도(v_s)로 나눈 값이며, 아래의 식과 같다.[23-25]

$$\mathrm{E_s(LE, J/mm)} = \frac{\mathrm{P_L}(W)}{\mathrm{v_s}(mm/s)}$$

3. 3. PBF 장비 및 출력물 선정

본 연구에서 사용한 PBF 장비는 Winforsys 사의 Metalsys 150 제품을 이용하였다 [표 3.1]. 실험 내부는 질소가스분위기로 하였으며, 산소농도는 0.01%로 진행하였다. 시편의 크기는 가로, 세로, 높이를 각각 10mm 로 제작하였으며, 패턴은 Meander(90°, 69°)를 사용하였다. 레이저 파워와 스피드는 재료마다 다르게 설정하였으며, SUS316L, SUS439L 의 공정 변수는 표 3.2, Inconel718 의 공정 변수는 표 3.3 에 나타냈다. Inconel718 의 인장시편의 경우 ASTM-E8 의 인장시편을 제작하여 인장실험을 진행하였다.

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㎛
Build Room Z-axis Trave	200mm
Z-axis Travel Accuracy	±3㎛
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, Titanum64계열, Titanum 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 (D x L x H)	850 X 1200 X 2000mm
Requirement Utility	Electricity : Single Phase, 220V, 10A

표 3.1 시편 제작에 사용된 장비의 사양

공정 변수 / 시편 번호	레이저의 파워 (W)	레이저의 스피드 (mm/s)	패턴
1	140	1400	Meader(90°)
2	140	1000	Meader(90°)
3	150	800	Meader(90°)
4	140	1400	Meader(69°)
5	140	1000	Meader(69°)
6	150	800	Meader(69°)

표 3.2 SUS316L과 SUS439L 시편 제작에 사용된 공정 변수

공정 변수 / 시편 번호	레이저의 파워 (W)	레이저의 스피드 (mm/s)	패턴
1	180	750	Meader(90°)
2	180	1050	Meader(90°)
3	180	1200	Meader(90°)
4	180	1400	Meader(90°)
5	180	1800	Meader(90°)
6	210	750	Meader(90°)
7	210	1050	Meader(90°)
8	210	1200	Meader(90°)
9	210	1400	Meader(90°)
10	210	1800	Meader(90°)

공정 변수 / 시편 번호	레이저의 파워 (W)	레이저의 스피드 (mm/s)	패턴
11	230	750	Meader(90°)
12	230	1050	Meader(90°)
13	230	1200	Meader(90°)
14	230	1400	Meader(90°)
15	230	1800	Meader(90°)
16	270	750	Meader(90°)
17	270	1050	Meader(90°)
18	270	1200	Meader(90°)
19	270	1400	Meader(90°)
20	270	1800	Meader(90°)

공정 변수 / 시편 번호	레이저의 파워 (W)	레이저의 스피드 (mm/s)	패턴
21	300	750	Meander(90°)
22	300	1050	Meander(90°)
23	300	1200	Meander(90°)
24	300	1400	Meander(90°)
25	300	1800	Meander(90°)

표 3.3 Inconel718 시편 제작에 사용된 공정 변수

3. 4. 미세 조직 관찰

본 연구에서는 공정변수별로 제조한 모든 시편의 미세조직을 확인하기 위하여 정밀 연마를 진행하였다. 연마면을 확인할 시편을 Plate에서 떼어낸 후 시편에 붙어있는 Support를 절단기로 제거하였다. 그 다음 시편을 Cold Mounting을 한 뒤 연마기를 이용하여, 최종적으로 알루미나 1㎛까지 연마하여 준비하였다. 미세조직을 관찰하기 위해 에칭을 진행하였으며, 사용한 에칭용액은 표3.4에 나타냈다.

에칭 후 미세조직을 광학현미경을 이용하여 관찰하였으며, 배율은 10x, 20x, 50x, 100x로 관찰하였다. 연마제나 기타 불순물을 제거하기 위해 초음파 세척기로 5분씩 5회 세척 후 수분 제거하여 관찰하였다.

재료	에칭 용액
SUS316L	Ferric chloride (27.5 g) + Copper ammonium chloride (4g) + hydrochloric acid(100ml) + distilled water (100ml)
SUS439	Ferric chloride (27.5 g) + Copper ammonium chloride (4g) + hydrochloric acid(100ml) + distilled water (100ml)
Inconel 718	ethanol(20ml) + Hydrochloric acid(2ml) + Iron(III)chloride(5g)

표 3.4 미세조직 관찰을 위해 사용한 재료별 에칭 용액

3. 5. 경도 실험

시편의 기계적 특성 중 경도를 측정하기 위해 비커스 경도기를 사용하였다. 비커스 경도기의 측정 방법은 사각뿔 형상의 다이아몬드 압입자를 이용하여 소결체에 하중을 가해 압흔을 만들고 대각선 길이의 평균값으로 구하는 방법이다(그림 3.2). 사용된 규격은 KSB 0811 금속 재료의 비커스 경도 시험 방법이다. 압입자의 가해진 하중은 0.05kg 이며, 압입 시간은 10 초이다. 측정된 경도값을 평균값으로 나타내어 계산하였다. 비커스 경도값을 구하는 식은 다음과 같다.

$$HV = \frac{0.1891F}{d^2} \quad (\mathrm{N/mm^2})$$

HV : 비커스 경도 ($\mathrm{N/mm^2}$)
이 수치에는 통상 단위를 붙이지 않는다.

F : 하중

d : 다이아몬드 압입자국의 대각선 길이(d_1과 d_2)의 산술 평균(mm)

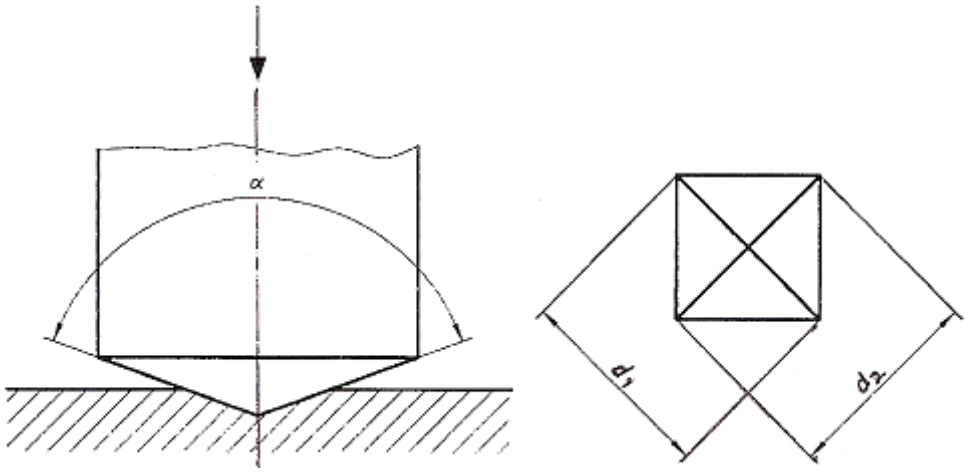


그림 3.7 비커스 경도에서 사용하는 압입자 사진과 측정에 사용된 장비 사진

3. 6. 인장 실험

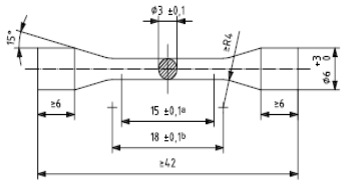
인장실험에 사용한 시편의 크기는 ISO 22674 에서 사용하는 시편의 도면을 이용하여 직접 설계 후 제작하였으며(그림 3.3), 제작한 시편의 크기는 길이 4.2cm, 폭 6cm, 두께 3mm 의 시편으로 제작하여 사용했다.

ISO 22674:2006(E)

Test specimens normally require no further finishing after the treatment described in 7.1 and 7.2. If, however, cast specimens are machined instead of polished according to the instructions for use [see 9.2 a)], record this.

Add fine marks or scribe lines to define the ends of the gauge length.

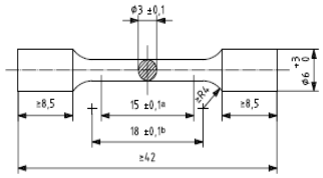
Dimensions in millimetres



a Gauge length.
b Parallel section of test specimen.

Figure 1 — Test specimen with conical shoulders

Dimensions in millimetres



a Gauge length.
b Parallel section of test specimen.

Figure 2 — Test specimen with radial shoulders

그림 3.8 인장실험에 사용한 인장 시험 장비와 인장 시편의 도면 사진

3. 7. 밀도 측정

제작한 출력물의 기공도를 측정하기 위해 크기 측정법과 아르키메데스법을 이용한 밀도 측정법을 이용하였으며, SUS316L의 밀도 7.89 g/cm^3, SUS439L의 밀도 7.70 g/cm^3, Inconel718의 밀도 8.19g/cm^3와 비교하여 비밀도를 구하였다. 측정방법은 다음과 같이 진행하였다. 그림 3.4는 밀도 측정에 사용한 장비의 사진이다.

(1) 시편의 무게를 공기 중에서 측정한다.

(2) 아르키메데스 법을 이용하여 시편의 진부피를 측정한다.

(3) 시편의 넓이와 높이를 측정하여 시편의 겉보기 부피를 측정한다.

(4) 실험에서 구한 각 데이터를 이용하여 시편의 밀도를 구한다.

그림 3.9 밀도 측정에 사용된 장비 사진

4. 결과 및 고찰

4. 1. 분말 특성 분석

SUS316L 의 분말 특성 분석결과 분말의 크기는 14.72~37.40 ㎛이었으며 분말의 입도 분포는 그림 4.1 에 나타냈으며, 분말의 형상은 그림 4.2, XRD 분석결과는 XRD 분석결과를 통하여 결정성 피크를 보고 물질의 종류를 확인하였다. SUS316L 분말의 XRD 분석결과 피크의 값은 각각 (111), (200), (220)의 결정면으로 오스테나이트계 스테인리스강의 전형적인 결정성 피크가 나타났으며, 그림 4.3 에 나타냈다. 그림 4.2 에서 보는 봐와 같이 본 연구에서 사용한 SUS316L 은 전체적으로 매끈한 구형의 형상을 가지고 있다. 다만 고배율로 관찰할 경우에는 불규칙한 형상과 일부 위성분말이 확인되지만 본 연구 PBF 공정으로 시편을 제작하는데 큰 문제가 없었다. 분말의 유동도는 16.57s/50g, 겉보기 밀도는 3.81$\mathrm{g/cm^3}$, 탭 밀도는 4.53$\mathrm{g/cm^3}$, Hausner ratio 는 1.19 로 나타났다. Hausner ratio 의 경우 PBF 공정에서 사용하기에 적합한 범위가 0.8~1.25 에서 적합하다고 판단하는데 본 연구에서 사용하는 분말의 경우 1.19 로 PBF 공정에 적합하다고 할 수 있다.

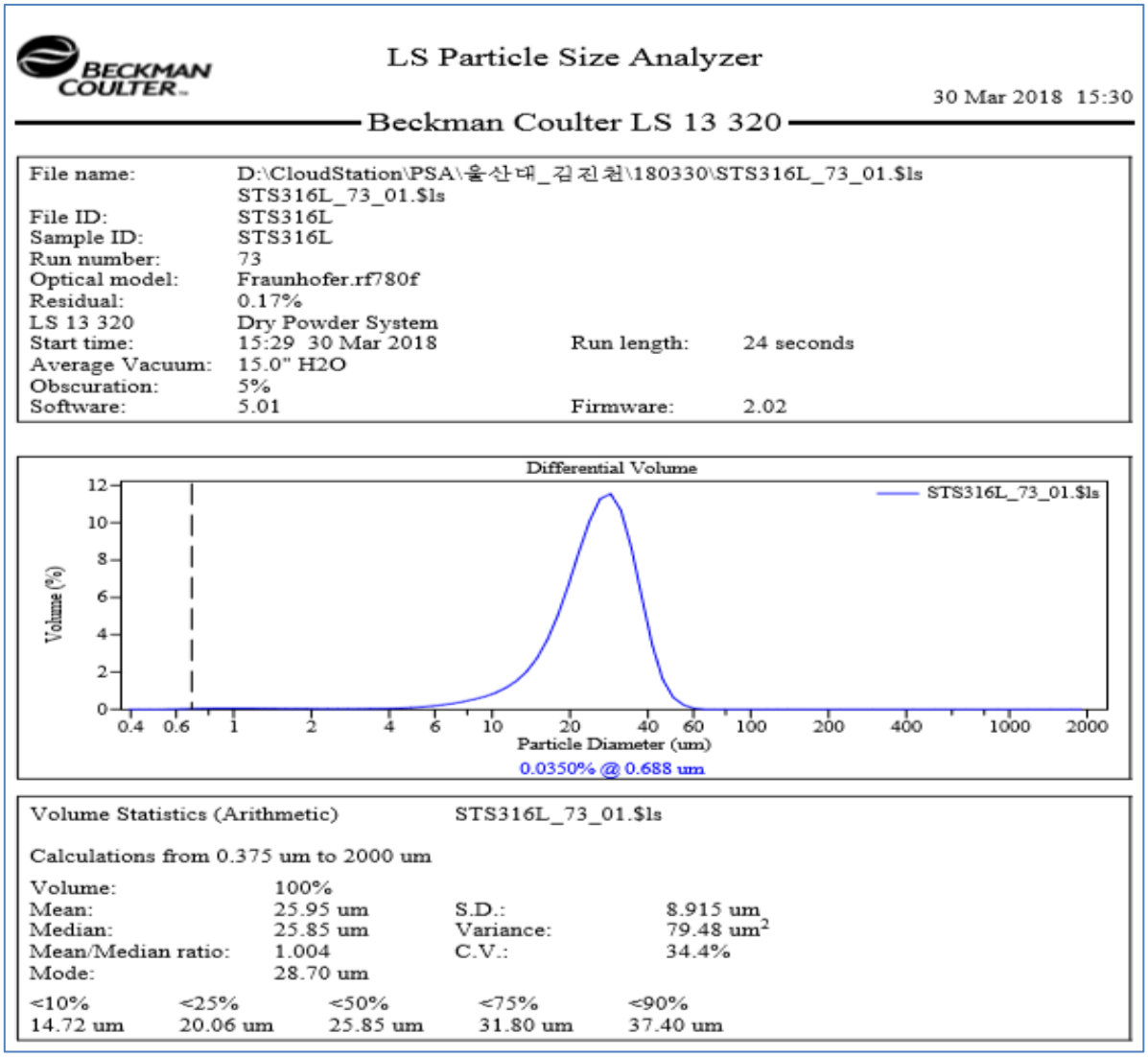


그림 4.1 SUS316L 분말의 입도 분포 분석결과

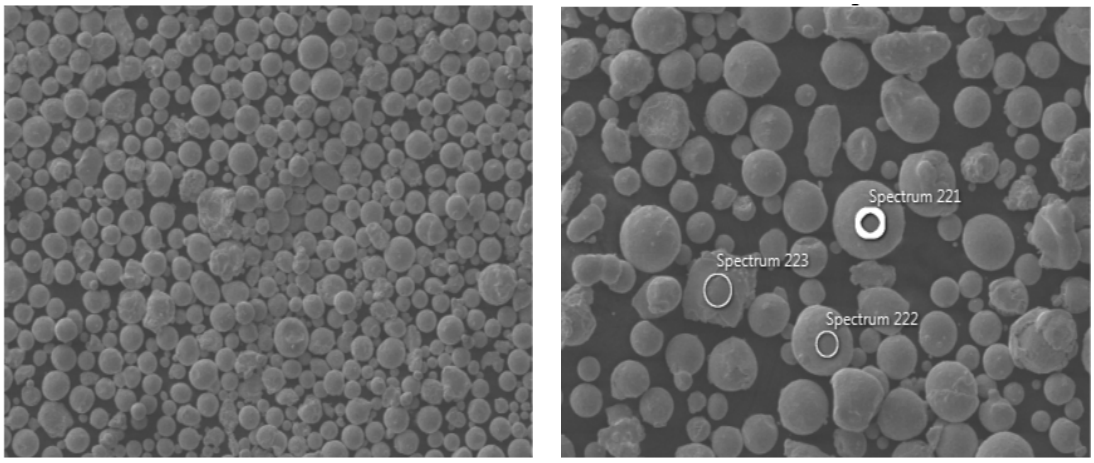


그림 4.2 SUS316L 분말의 FE-SEM 사진. 배율은 x300, x500 이다.

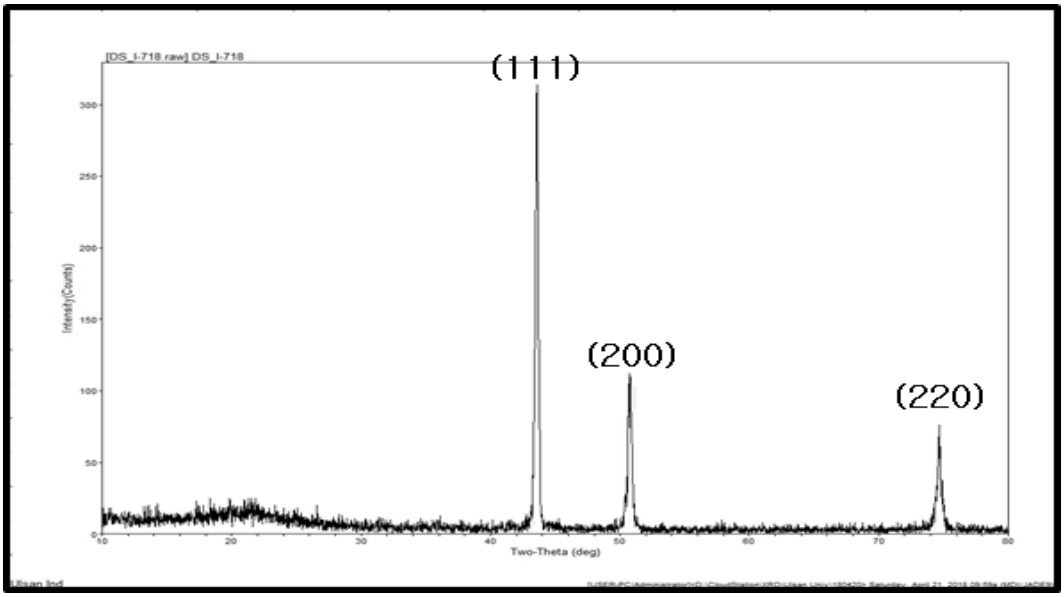


그림 4.3 SUS316L 분말의 XRD 분석 결과

SUS439L 의 분말 특성 분석결과 분말의 크기는 14.72~37.40 ㎛이었으며 분말의 입도 분포는 그림 4.4 에 나타냈으며, 분말의 형상은 그림 4.5, SUS439L 분말의 XRD 분석결과 피크의 값은 각각 (110), (200), (211)의 결정면으로 페라이트트계 스테인리스강의 전형적인 결정성 피크가 나타났으며, 그림 4.6 에 나타냈다. 그림 4.5 에서 보는 봐와 같이 본 연구에서 사용한 SUS316L 은 전체적으로 매끈한 구형의 형상을 가지고 있다. 다만 고배율로 관찰할 경우에는 불규칙한 형상과 일부 위성분말이 확인되지만 본 연구 PBF 공정으로 시편을 제작하는데 큰 문제가 없었다. 분말의 유동도는 18.29s/50g, 겉보기 밀도는 $3.79\mathrm{g/cm^3}$, 탭 밀도는 $4.34\mathrm{g/cm^3}$, Hausner ratio 는 1.15 로 나타났다. Hausner ratio 의 경우 PBF 공정에서 사용하기에 적합한 범위가 0.8~1.25 에서 적합하다고 판단하는데 본 연구에서 사용하는 분말의 경우 1.19 로 PBF 공정에 적합하다고 할 수 있다.

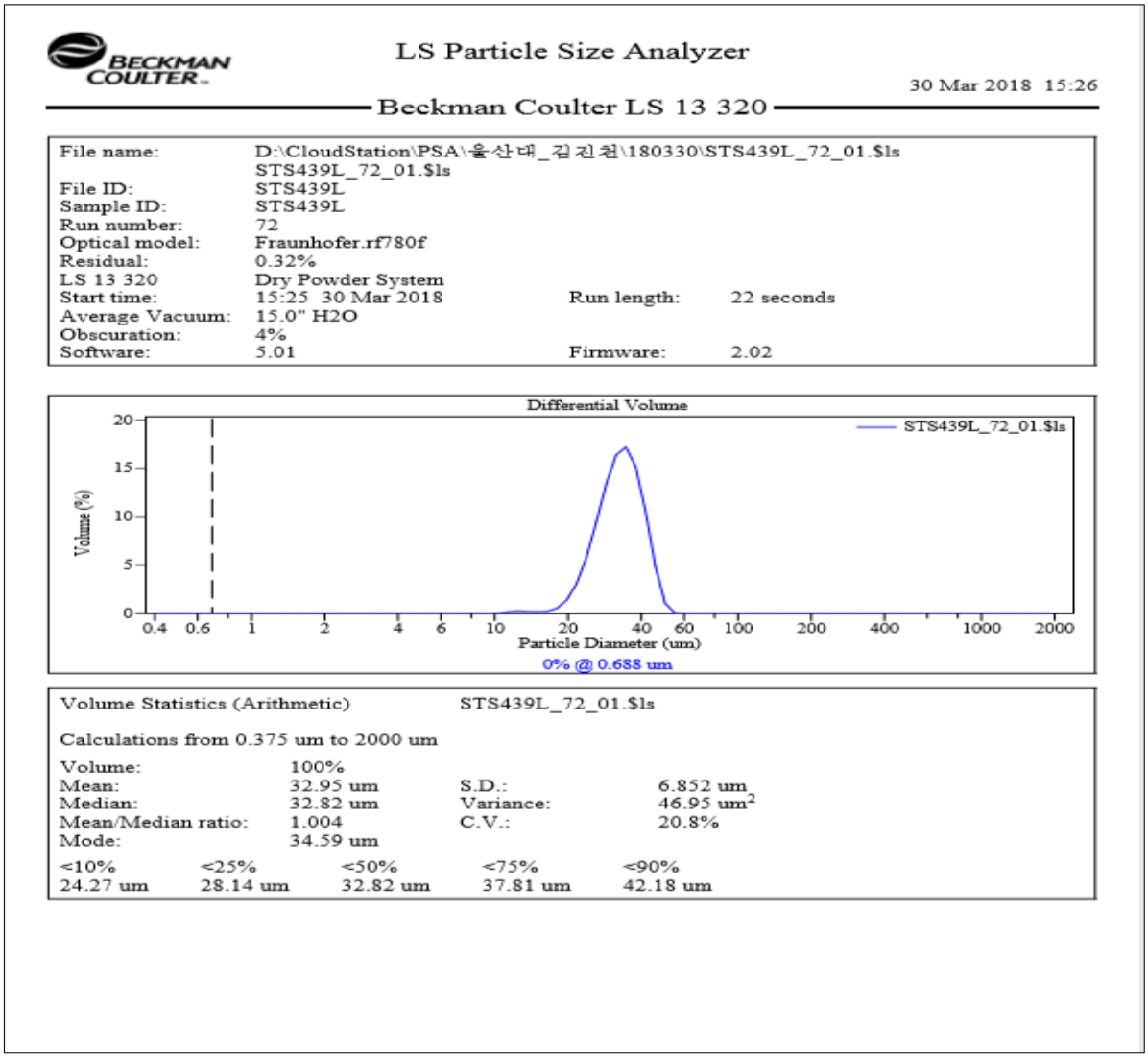


그림 4.4 SUS439L 분말의 입도 분포 분석결과

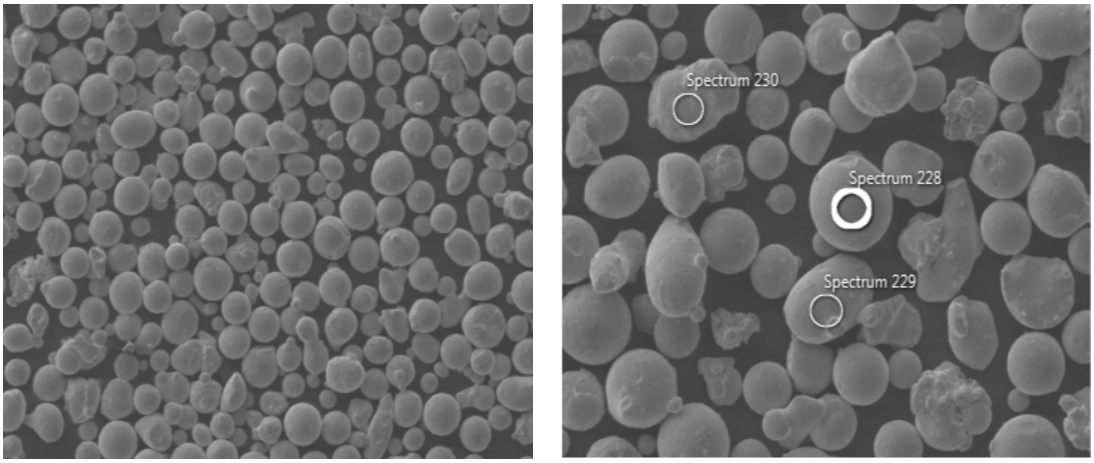


그림 4.5 SUS439L 분말의 FE-SEM 사진. 배율은 x300, x500 이다.

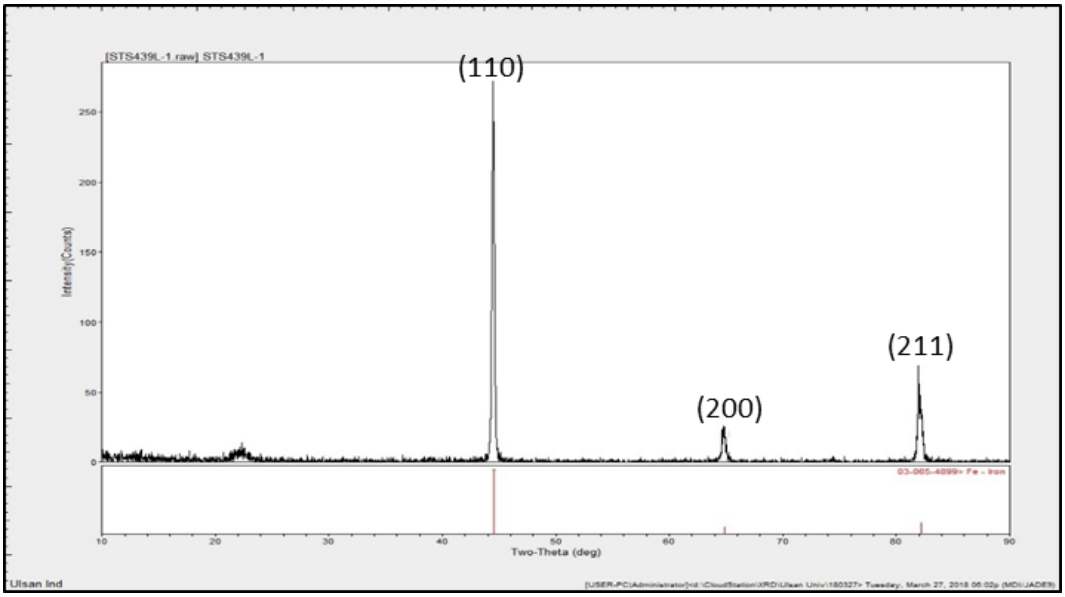


그림 4.6 SUS439L 분말의 XRD 분석 결과

Inconel718 의 분말 특성 분석결과 분말의 크기는 16.38~68.28 ㎛이었으며, 분말의 평균 크기는 42.58 ㎛이다. 분말의 입도 분포는 그림 4.11 에 나타냈으며, 분말의 형상은 그림 4.12, Inconel718 분말의 XRD 분석결과 피크의 값은 각각 (111), (200), (220)의 결정면으로 Inconel718 의 전형적인 결정성 피크가 나타났으며, 그림 4.13 에 나타냈다. 그린 4.12 에서 보는 봐와 같이 본 연구에서 사용한 SUS316L 은 전체적으로 매끈한 구형의 형상을 가지고 있다. 다만 고배율로 관찰할 경우에는 불규칙한 형상과 일부 위성분말이 확인되지만 본 연구 PBF 공정으로 시편을 제작하는데 큰 문제가 없었다. 분말의 유동도는 13.12s/50g, 겉보기 밀도는 4.38g/cm^3, 탭 밀도는 5.19g/cm^3, Hausnor ratio 는 1.19 로 나타났다. Hausner ratio 의 경우 PBF 공정에서 사용하기에 적합한 범위가 0.8~1.25 에서 적합하다고 판단하는데 본 연구에서 사용하는 분말의 경우 1.19 로 PBF 공정에 적합하다고 할 수 있다.

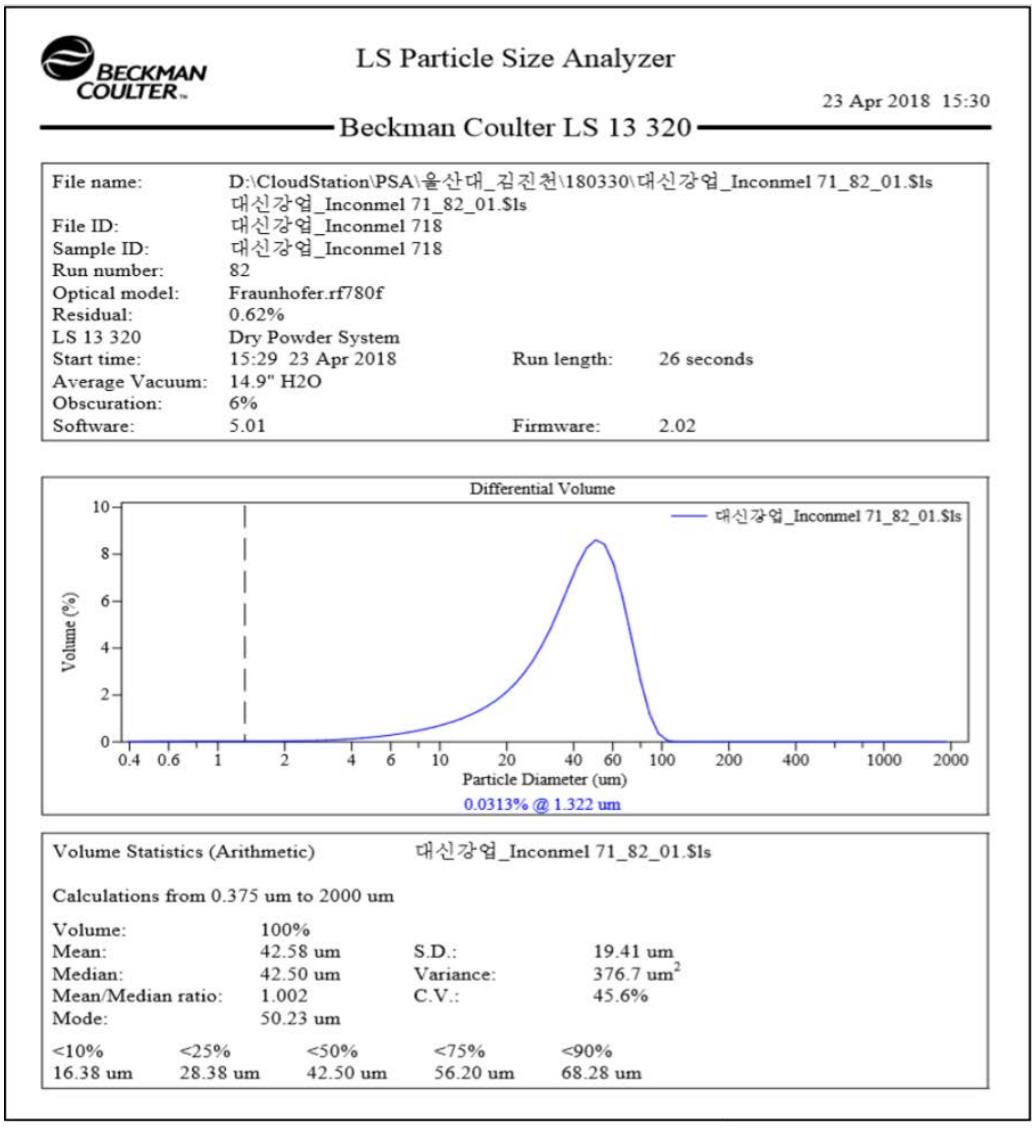
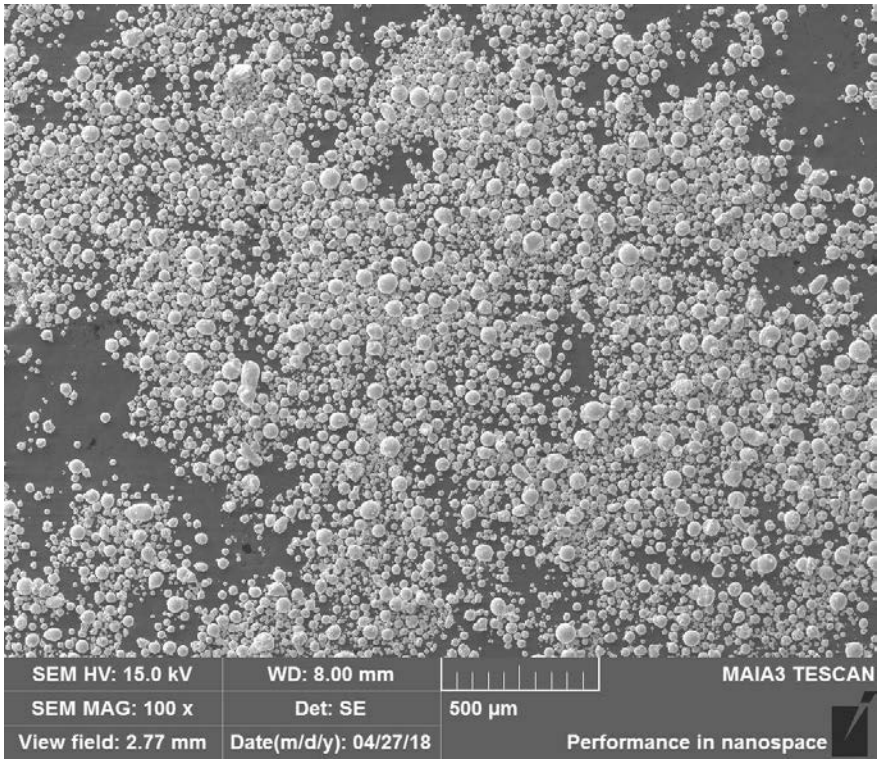
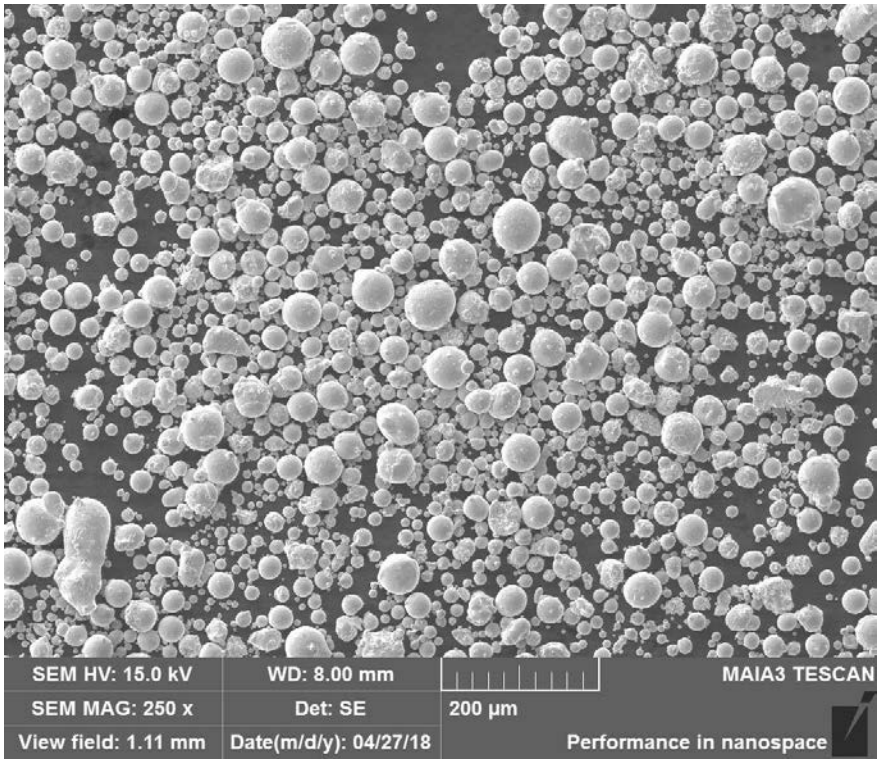


그림 4.7 Inconel718 분말의 입도 분포 분석결과


SEM HV: 15.0 kV
WD: 8.00 mm
MAIA3 TESCAN
SEM MAG: 100 x
Det: SE
500 µm
View field: 2.77 mm
Date(m/d/y): 04/27/18
Performance in nanospace


SEM HV: 15.0 kV
WD: 8.00 mm
MAIA3 TESCAN
SEM MAG: 250 x
Det: SE
200 µm
View field: 1.11 mm
Date(m/d/y): 04/27/18
Performance in nanospace

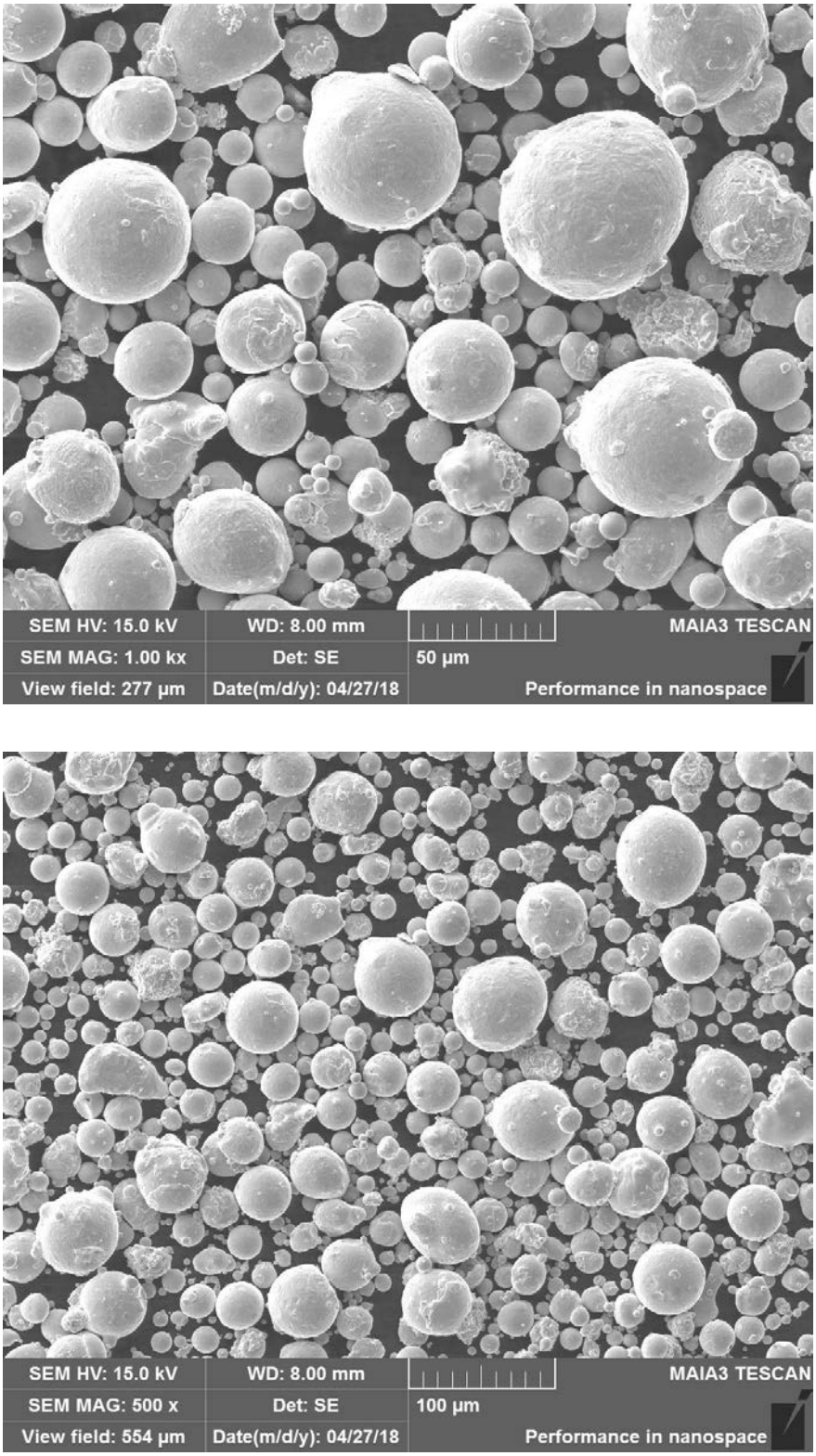


그림 4.8 Inconel 718 분말의 FE-SEM 사진. 배율은 x100, x250, x500, x1000 이다.

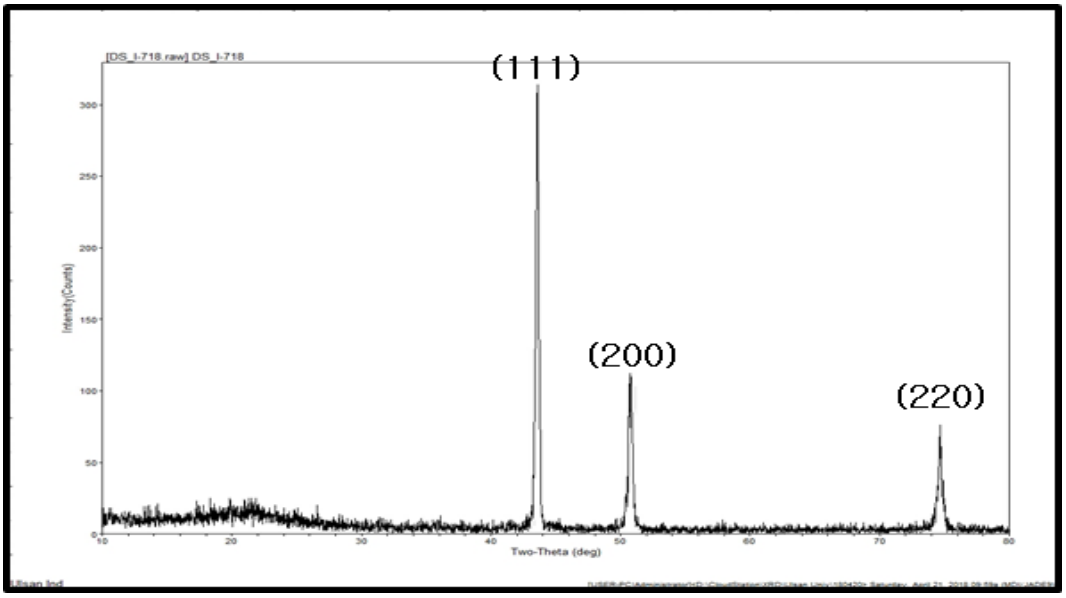


그림 4.9 Inconel718 분말의 XRD 분석 결과

4. 2. SUS316L 미세조직 분석

그림 4.10 은 PBF 공정으로 제조한 시편의 사진으로 시편 제조에 사용한 공정변수는 레이저 파워 140W, 150W 를 사용하였고, 레이저의 속도는 800mm/s, 1000mm/s, 1400mm/s 를 사용하였다. 적층 패턴은 Meander 패턴을 사용하였고, 적층할 때마다 각각 69°, 90°로 회전하면서 출력하였다.

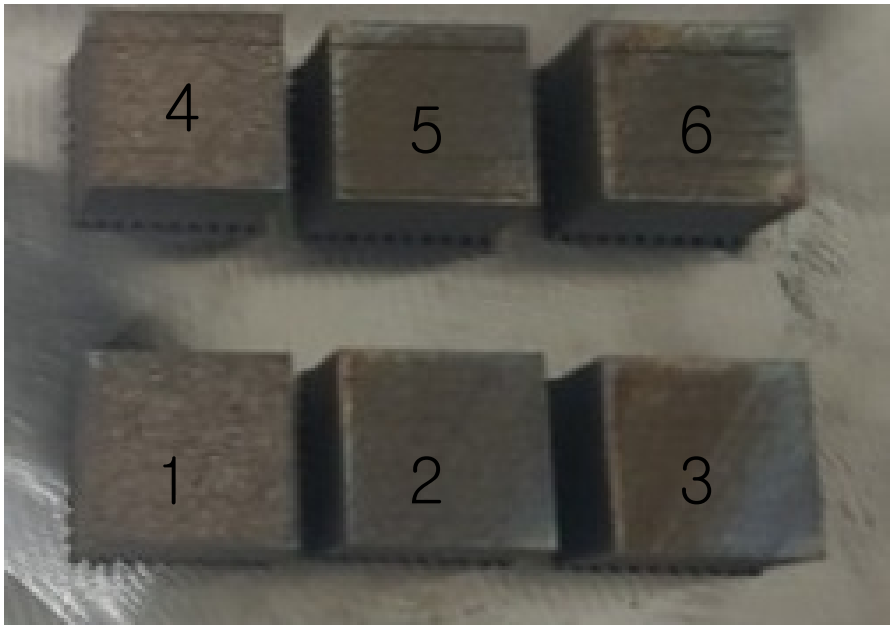


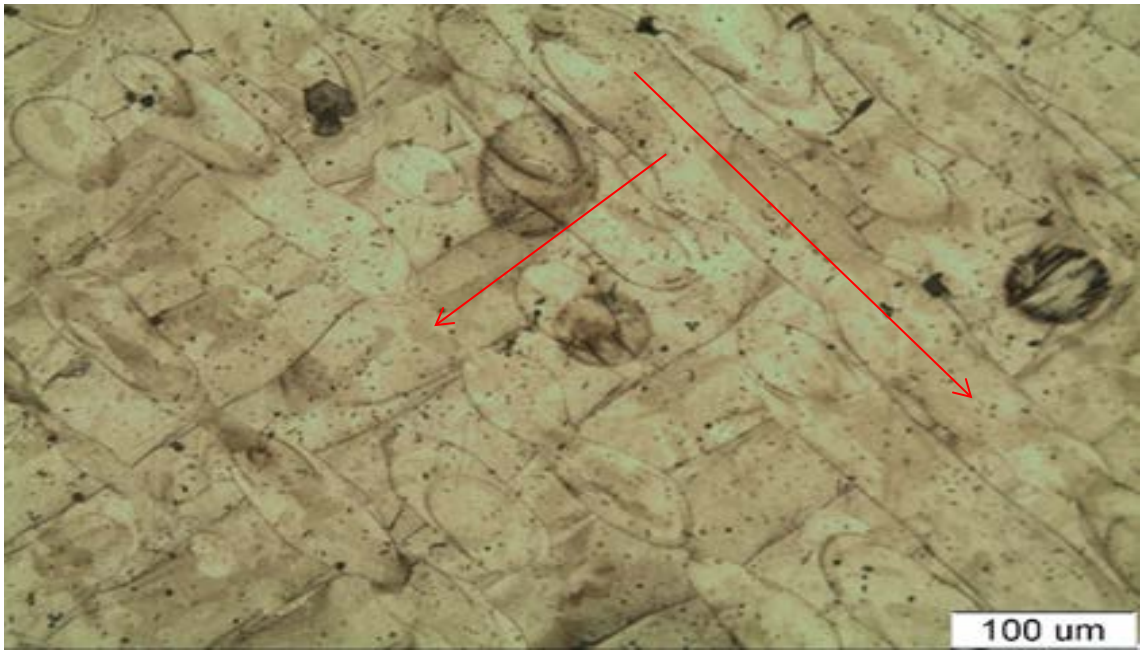
그림 4. 10 제조된 SUS316L 시편의 사진.

4. 2. 1 미세조직 분석

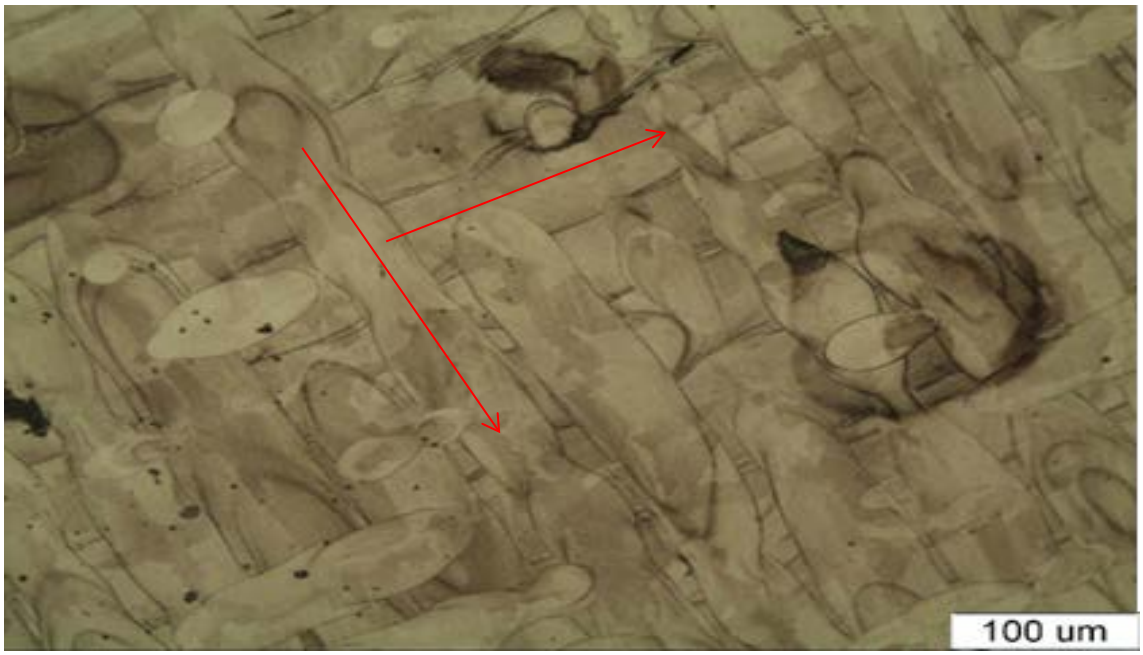
SUS316L 의 OM 사진을 보면 레이저의 패턴에 따른 미세구조 변화를 보여준다(그림 4.11). SUS316L 의 경우 레이저의 속도가 800mm/s, 1000mm/s 일 경우와 레이저의 파워가 140W 일 경우 Melt pools 의 모양이 길게 나타나며, 연속적이다. 레이저의 속도가 1400mm/s 와 레이저의 파워가 150W 의 경우 Melt pool 의 모양이 짧게 나타나며 연속적이지 못하다. 그리고 제 2 차상(O 표시부분)이 많이 나타나는데, 이 2 차상은 기공, 용융되지 않은 분말, 산화 등으로 예상된다.[26-29]

화살표 방향(→)은 적층이 진행된 방향을 나타내며, 1, 2, 3 번 시편의 경우 90°에 가까운 것을 확인할 수 있었고, 4, 5, 6 번 시편의 경우 69°에 가까운 것을 확인할 수 있었는데 제작할 때 설정하였던 적층 패턴에 따라 시편이 제작된 것을 확인하였다.

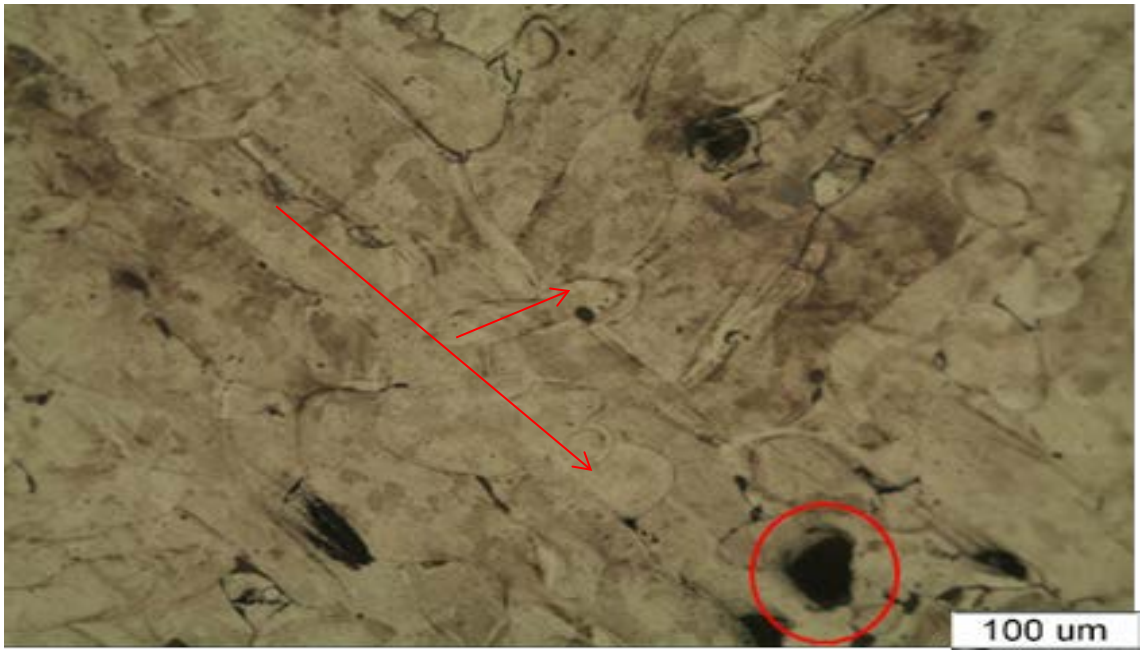
(a) 시편 1 번



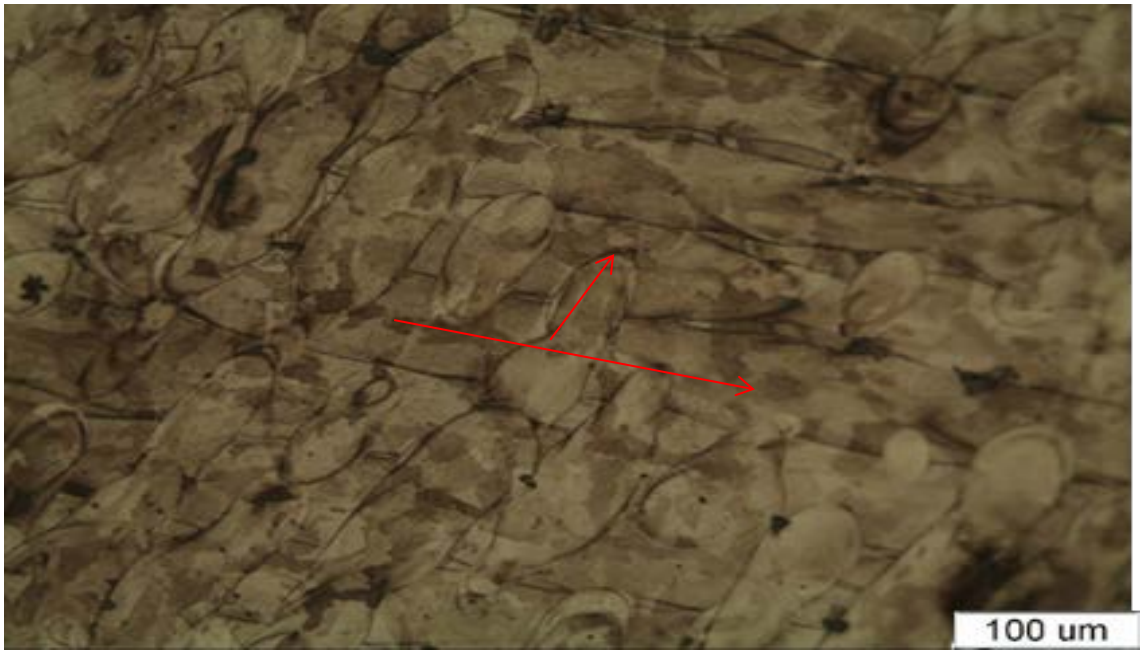
(b) 시편 2 번



(c) 시편 3 번



(d) 시편 4 번



(e) 시편 5 번

(f) 시편 6 번

그림 4.11 SUS 316L 시편의 미세조직 OM 사진.

4. 2 2. 밀도 측정

실험은 각 시편마다 5 회씩 실시하였으며 측정된 결과 값의 평균을 표 4.1 에 나타냈다. 시편의 평균 비밀도는 각각 96.6%, 96.8%, 97.1%, 97.1%, 97.8%, 98.2%로 측정되었다. 미세조직 분석 결과와 비슷한 결과가 나타났으며, 미세조직 분석에서 기공이 많았던 시편이 밀도가 낮은 편이었다.

비커스 경도 결과와 비교하였을 때 대체로 밀도가 높은 시편이 비커스 경도값도 높게 측정되는 것을 확인할 수 있었다.

시편 변호	1	2	3	4	5	6
비밀도(%)	96.6	96.8	97.1	97.1	97.8	98.2
가입 에너지 밀도 (J/cm^3)	47.62	66.67	89.29	47.62	66.67	89.29

표 4.1 SUS316L 의 비밀도 측정 평균 결과표

4. 2. 3. 경도 실험

SUS316L 의 경우 ASTM SUS316L 의 기준인 200HV 를 초과하였으며, 레이저의 속도가 1000mm/s, 800mm/s 와 레이저의 파워가 140W, 150W 이며, 적층 패턴이 meander 69° 일 때 가장 높은 값인 281.9HV 이 나타났다. SUS316L 의 경우 Melt Pool 이 짧은 조직이 경도가 더 높게 측정되었다. 그림 4.12 은 각각의 시편들의 측정된 비커스 경도의 평균 결과값을 나타낸 사진이다.[35, 38]

적층 패턴이 meander 90°의 시편이 meander 69°보다 경도 값이 비교적 낮은 값을 가지는 것을 볼 수 있는데, meander 90°보다 meander 69°으로 적층하는 것이 더 조밀하게 적층이 된다는 것을 예상할 수 있으며 밀도 측정을 통하여 확인할 수 있었다.

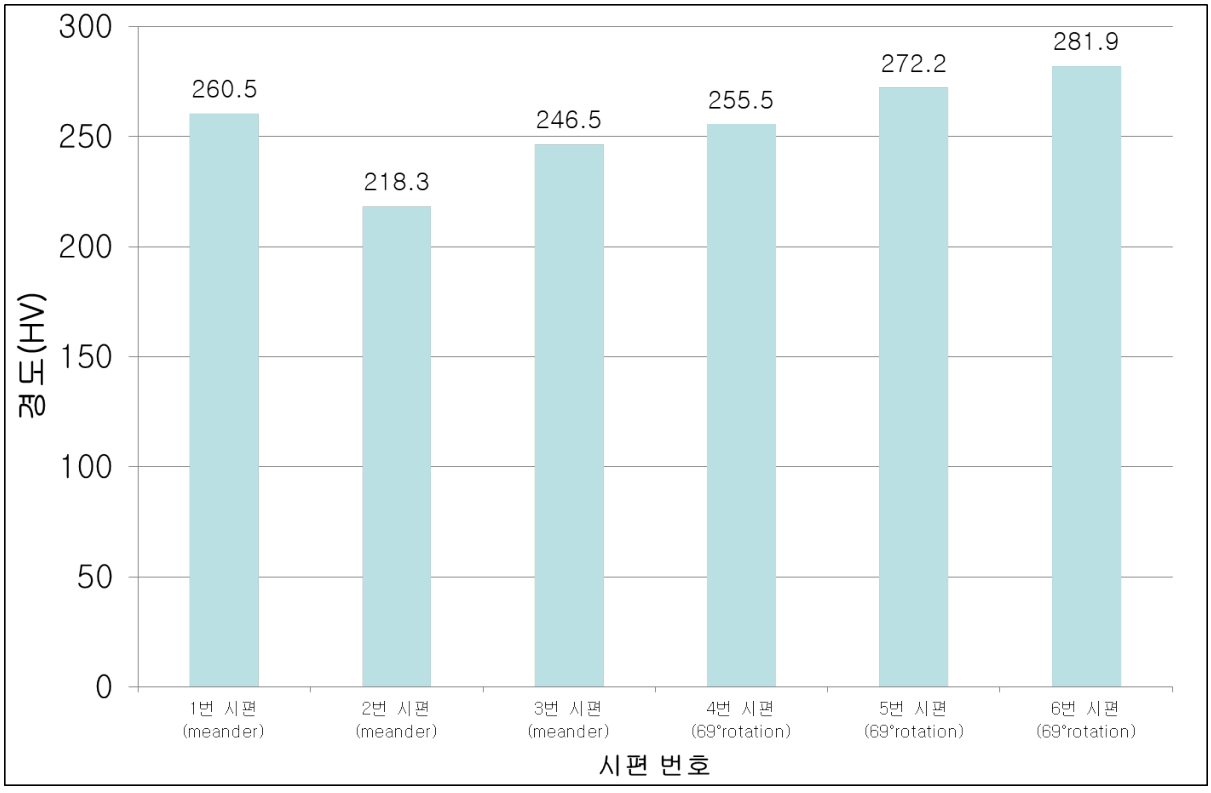


그림 4.12 SUS316L 시편의 비커스 경도 평균 결과값 그래프

4. 3. SUS439L 미세조직 분석

그림 4.13 은 PBF 공정으로 제조한 시편의 사진으로, 시편 제조에 사용한 공정변수는 레이저 파워 140W, 150W 를 사용하였고, 레이저의 속도는 800mm/s, 1000mm/s, 1400mm/s 를 사용하였다. 적층 패턴은 Meander 패턴을 사용하였고, 적층할 때마다 각각 69°, 90°로 회전하면서 출력하였다.

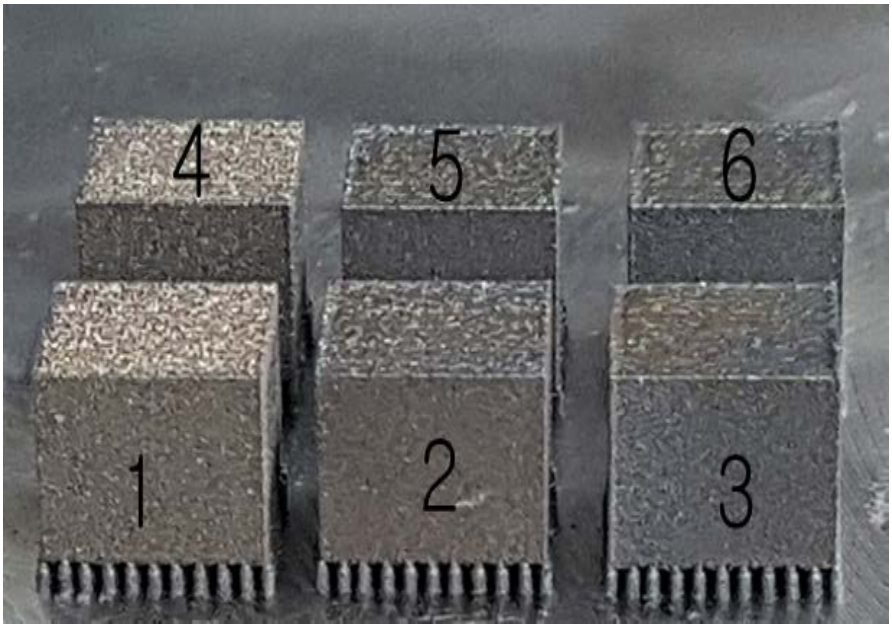
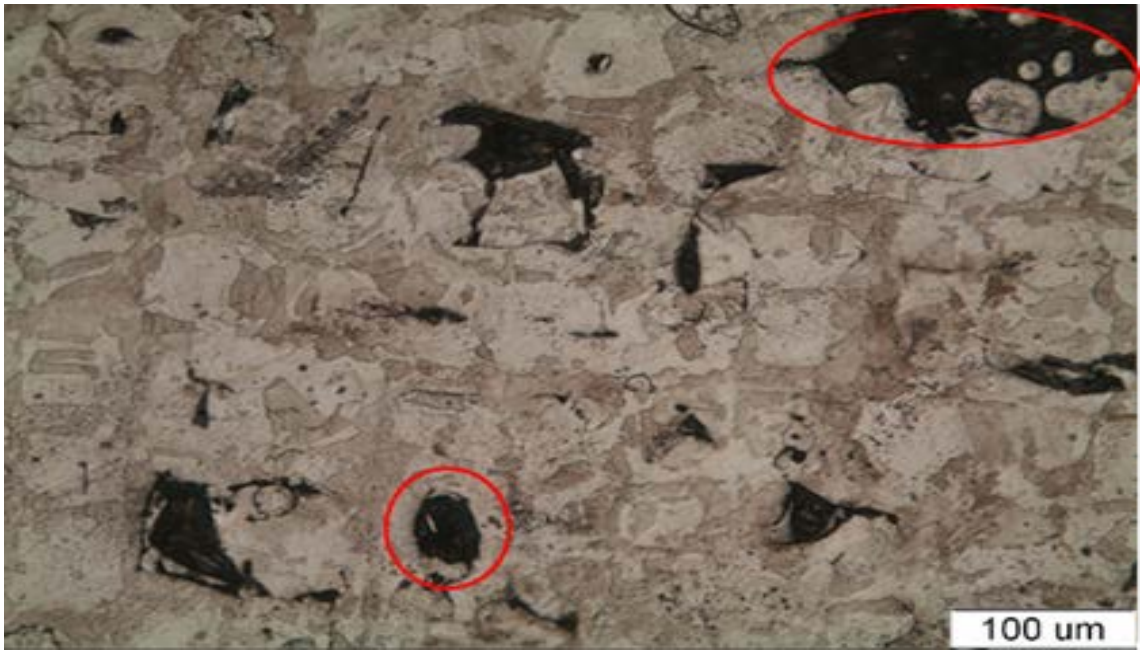


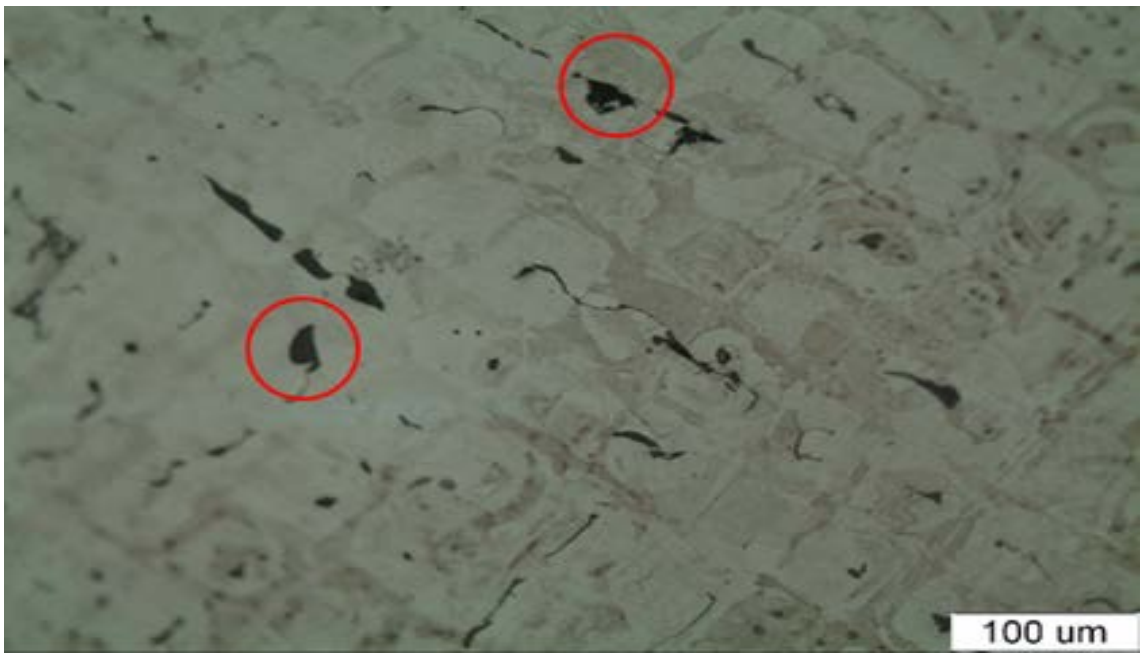
그림 4.13 제조된 SUS439L 시편의 사진.

4. 3. 1 미세조직 분석

SUS439L 의 OM 사진을 보면 레이저의 패턴에 따른 미세구조 변화를 보여준다 (그림 4.14). SUS439L 의 경우 SUS31L 과 다르게 체크무늬의 미세조직이 나타났으며, 레이저의 속도가 800mm/s, 1000mm/s 일 경우와 레이저의 파워가 140W 일 경우 Melt pools 의 모양이 길게 나타나며, 연속적이다. 레이저의 속도가 1400mm/s 와 레이저의 파워가 150W 의 경우 제 2 차상이 많이 나타난다. 이 2 차상(O 표시부분)은 기공, 용융되지 않은 분말, 산화 등으로 예상된다. 또한 레이저의 속도가 1400mm/s 와 레이저의 파워가 150W 조건으로 제작된 1 번과 4 번의 경우 다른 시편들에 비해 더 많은 균열, 기공이 확인되었다.[27-31]

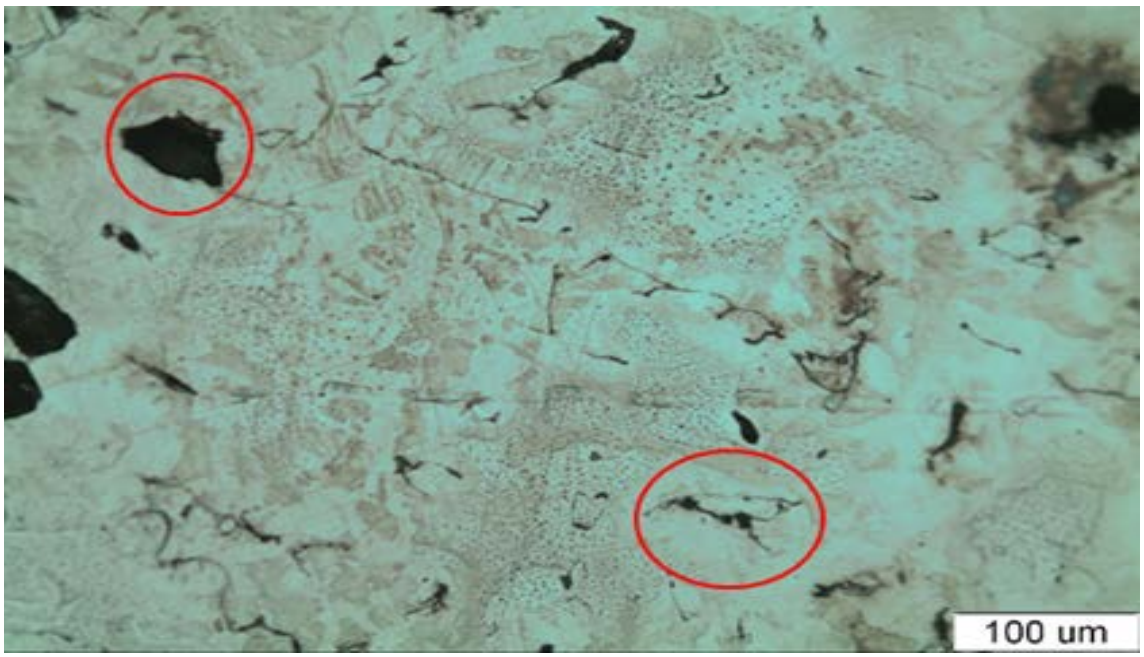


(a) 시편 1 번



(b) 시편 2 번

(c) 시편 3 번



(d) 시편 4 번

(e) 시편 5 번

(f) 시편 6 번

그림 4.14 SUS439L 시편의 미세조직 OM 사진.

4. 3 2. 밀도 측정

실험은 각 시편마다 5 회씩 실시하였으며 측정된 결과 값의 평균을 표 4.2 에 나타냈다. 시편의 평균 비밀도는 각각 97.6%, 97.8%, 98.1%, 97.7%, 97.9%, 98.5%로 측정되었다.

미세조직 분석결과에서 공공 및 균열이 많은 시편이 비밀도가 낮으며, 적층 패턴에 큰 영향을 받지 않은 것을 확인할 수 있었다.

비커스 경도 결과와 비교하였을 때 대체로 밀도가 높은 시편이 비커스 경도값도 높게 측정되는 것을 확인할 수 있었다.

시편 변호	1	2	3	4	5	6
비밀도(%)	97.6	97.8	98.1	97.7	97.9	98.5
가입 에너지 밀도 (J/cm^3)	47.62	66.67	89.29	47.62	66.67	89.29

표 4.2 SUS439L 의 비밀도 측정 평균 결과표

4. 3. 3. 경도 실험

SUS439L 의 경우 KS SUS439L 의 기준인 200HV 이하를 초과하였으며, 레이저의 파워가 140W, 레이저의 속도가 1000mm/s, 1400mm/s, 레이저의 패턴이 69° rotation 일 때 가장 높은 값인 331.6HV 이 나타났으며, 그림 4.15 은 각 시편의 비커스 경도의 평균값을 나타낸 사진이다.[35, 38]

SUS439L 의 경우 SUS316L 과 다르게 레이저의 파워와 레이저의 속도, 적층 패턴과 관계없이 평균 경도값이 비슷한 것을 확인할 수 있었는데, 위의 밀도 측정결과를 보는 것과 같이 6 개의 시편들이 모두 비슷한 값을 가진 것을 알 수 있다. 이는 본 연구에서 사용한 공정 변수가 SUS439L 에 사용하기 적합한 공정변수인 것을 알 수 있다.

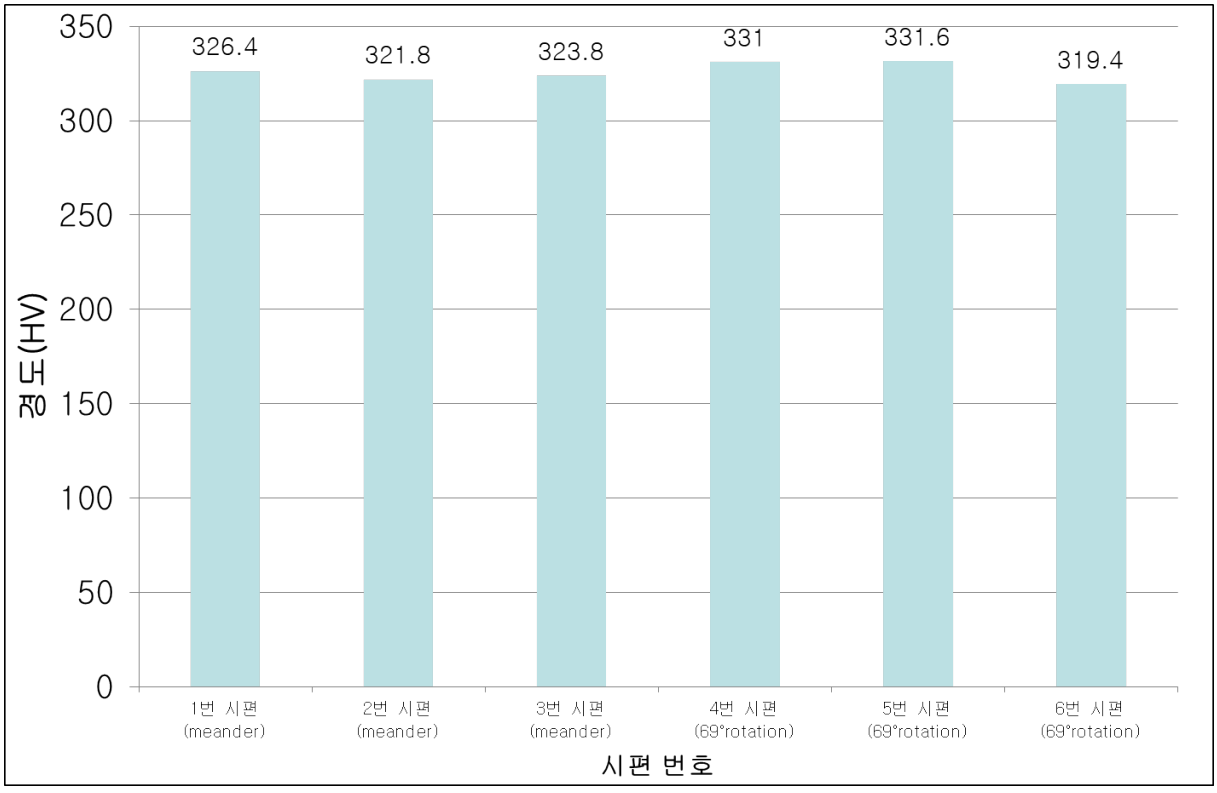


그림 4.15 SUS439L 시편의 비커스 경도 평균 결과값 그래프

4. 4. Inconel 718 미세조직 분석 구조분석

그림 4.16 은 PBF 공정으로 제조한 시편의 사진으로 시편 제조에 사용한 공정변수는 레이저 파워 180W, 210W, 230W, 270W, 300W 를 사용하였고, 레이저의 속도는 750mm/s, 1050mm/s, 1200mm/s, 1400mm/s, 1800mm/s 를 사용하였다. 적층 패턴은 Meander 패턴을 사용하였고, 적층할 때마다 90°로 회전하면서 출력하였다. 분석한 시편은 13 번 시편을 중심으로 대각선(\)방향을 기준으로 4, 7, 9, 10, 13, 16, 17, 19, 21 번 시편을 분석하였고 시편의 가입 에너지 밀도는 가입 에너지 밀도는 61.22 J/mm^2, 95.23 J/mm^2, 71.43 J/mm^2, 55.56 J/mm^2, 91.27 J/mm^2, 171.43 J/mm^2, 122.45 J/mm^2, 91.38 J/mm^2, 136.05 J/mm^2 으로 측정됐다. 시편을 이렇게 분석한 이유는 시편표면을 연마한 후 확인하였을 때 대각선(\)방향을 기준으로 위쪽의 경우 표면에 기공이 많이 있었으며, 아래쪽의 경우 기공이 적은 편이었다.

PBF 공정에서 레이저가 주사되는 면을 평면, 평면을 기준으로 옆면을 측면으로 정하여 시편을 연마한 후 에칭하여 OM 으로 관찰하였다.

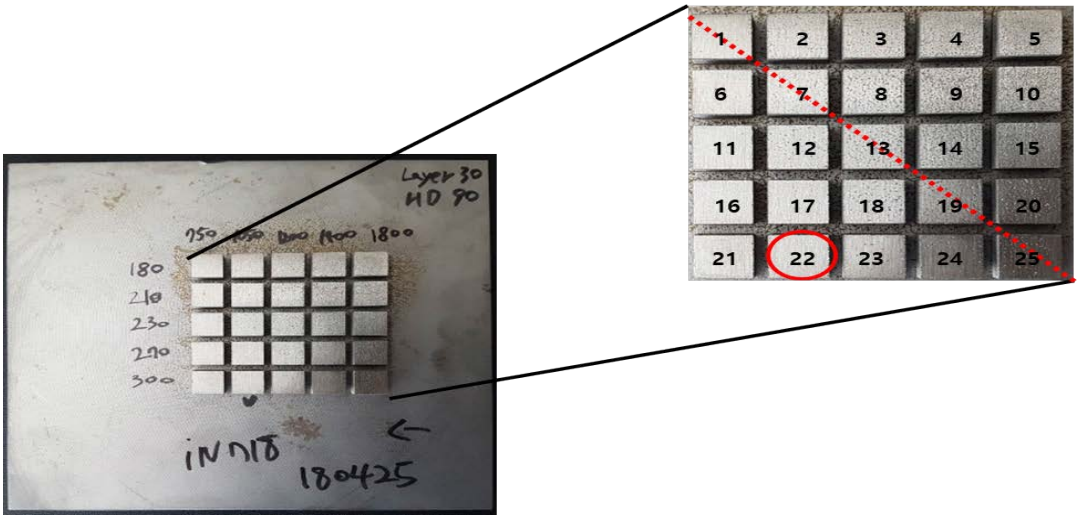


그림 4.16 제조된 Inconel718 시편의 사진.

4. 4. 1. 시편의 평면 미세조직 분석

Inconel 718 의 평면을 에칭 후 OM 사진으로 배율은 x20 이다. PBF 공정 중 레이저가 주사되는 면을 평면으로 하였다(그림 4.21). 레이저 패턴은 Meander 패턴으로 제작하였으나, 미세조직 분석 결과 일부 조직이 패턴 방향과 동일한 방향으로 보인다.[31]

그림 4.22 의 경우 각 시편들의 에칭 후 OM 사진을 나타냈다. 평면 미세조직 결과에서 대부분 많은 기공과 균열들이 관찰되었으며, 특히 9, 10, 13, 16 시편들의 미세조직이 균열, 기공이 제일 많이 확인하였으며, 22 시편이 제일 적은 기공, 균열인 것을 확인할 수 있었다. [30-33]

9, 10, 13, 16 번 시편들의 경우 가입에너지밀도가 $71.43 J/cm^3$, $55.56 J/cm^3$, $91.27 J/cm^3$, $171.43 J/cm^3$ 으로 10 번 시편의 경우 레이저 속도가 너무 빨라 재료가 충분히 용융되는데 시간이 충분하지 못하여 재료가 용융되지 못하여 분말들이 제대로 적층되지 않아 발생하는 문제라고 확인되며, 16 번 시편의 경우 레이저 파워가 높지만 레이저 속도가 느리기 때문에 과용융으로 인한 내부 응력에 의해 균열이 발생하는 것을 확인 할 수 있었다.

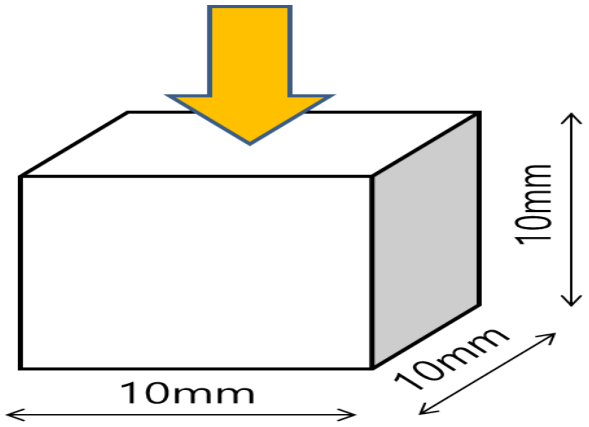
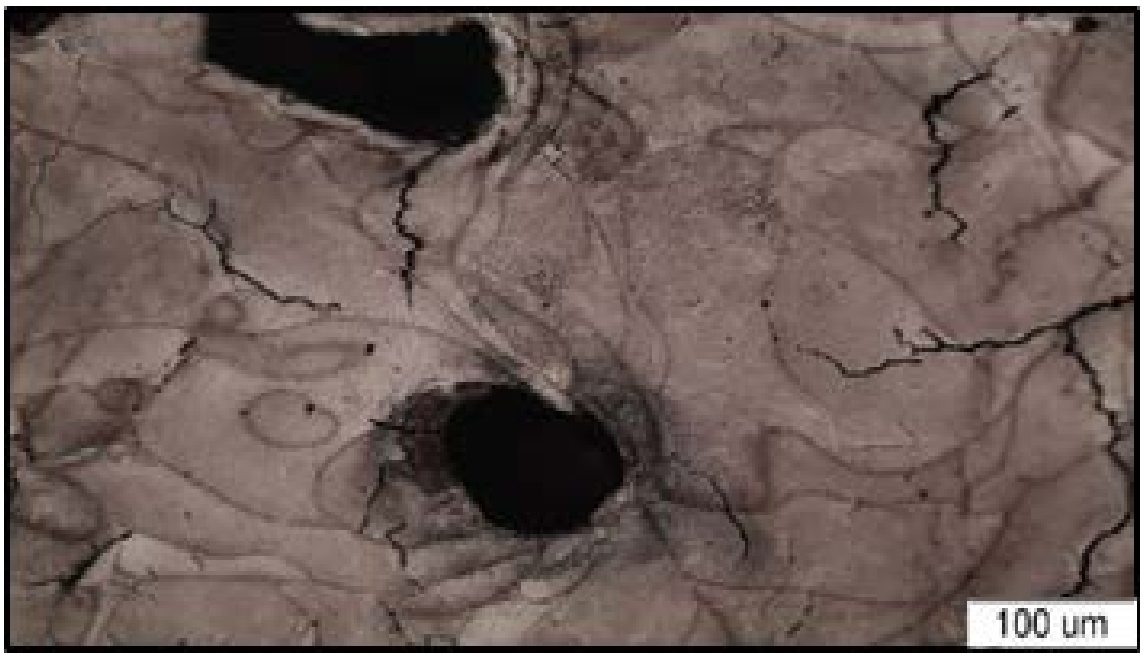


그림 4.17 분석한 평면을 나타낸 사진.

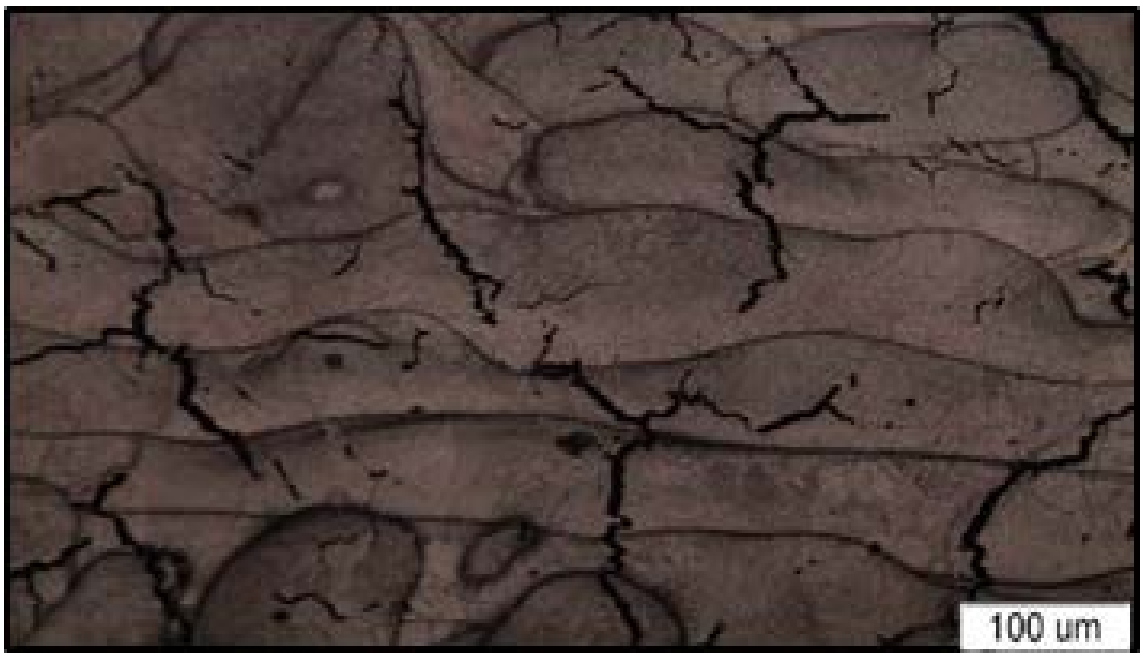
(a) 시편 4 번

(b) 시편 7 번

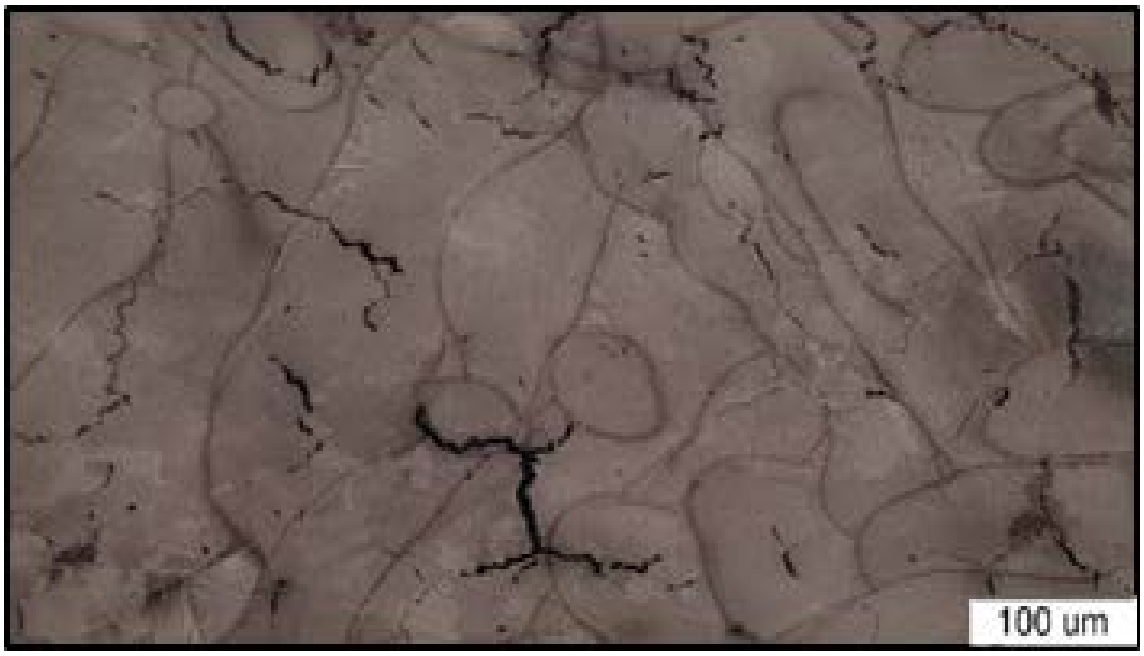


(c) 시편 9 번

(d) 시편 10 번



(e) 시편 13 번



(f) 시편 16 번

(g) 시편 17 번

(h) 시편 19 번

(i) 시편 22 번

그림 4.18 Inconel 718 시편의 평면 미세조직 분석결과.

4. 4. 2. 시편의 측면 미세조직 분석

Inconel 718 의 측면을 에칭 후 OM 사진으로 배율은 x20 이다. PBF 공정 중 레이저가 주사되는 면을 평면으로 하였을 때 옆면을 측면으로 하였다(그림 4.19). 레이저 패턴은 Meander 패턴으로 제작하였다. 미세조직 분석 결과 일부 조직이 패턴 방향과 동일한 방향으로 보이다 대부분의 미세조직은 레이저의 패턴과 관계없이 형성된 것을 확인할 수 있었다.[30-33]

그림 4.20 은 시편의 측면을 에칭한 후 OM 으로 관찰한 사진이다. 측면의 미세조직 결과 각 샘플 마다 급냉 조직이 관찰 되었으며, 특히 이 조직들은 10, 13, 17 에서 뚜렷하게 관찰되었고, 이들의 공정 변수는 레이저의 파워가 각각 180W, 210W, 270W 이고, 레이저의 속도는 각각 1050mm/s, 1200mm/s, 1800mm/s 으로 PBF 공정이 빠른 시간 분말이 용융되었다가 냉각이 이루어질 때 용해될 시간이 충분하지 않기 때문에 Nb 및 Mo (분할 계수 k <1 인 분리에 취약한 요소)와 달리 rhenium k 의 분배 계수는 1 보다 크다. 따라서, 레늄의 농도 (Cr 및 Fe 뿐만 아니라)는 수지상 축 및 Nb Mo 와 Ti 는 수지상 공간에서 더 높다. γ 상에서 이들 원소의 다양 화 된 농도는 더 높은 냉각 속도 및 더 높은 농도의 rhenium 에서 더 집중적이다. 이것은 매우 미세한 γ 상의 수지상 공간에 분포 된 비교적 많은 분율의 분산상 입자 (공정 반응의 생성물)에 의해 확인된다.[40-42]

분말에 따라 분말을 용융시키는데 요구되는 레이저파워가 있으며, 이를 초과할 경우 과용융이 발생하여 키홀(Key Hall) 현상이 발생하거나 내부에 열에너지로 인한 응력이 쌓이게 된다. 그림 4.20 의 (b), (h)시편을 보면 (O) 부분이 키홀이 있는 것을 확인할 수 있다. 키홀 현상은 레이저 용접에서 주로 발생하는 현상이며 레이저를 과하게 주사하게

되면 그 부분에 구멍이 발생한다. 이 구멍을 키홀이라고 하는데 키홀 벽면에서 레이저가 반사하게 되면서 용입의 깊이를 깊게 만드는 현상을 말한다. 이로 인하여 제대로 적층되지 못하여 제품의 내부에 기공이 많아지게 되거나 균열이 발생하고, 출력한 후 제품 내부 응력에 의해 비틀림 등이 발생한다.

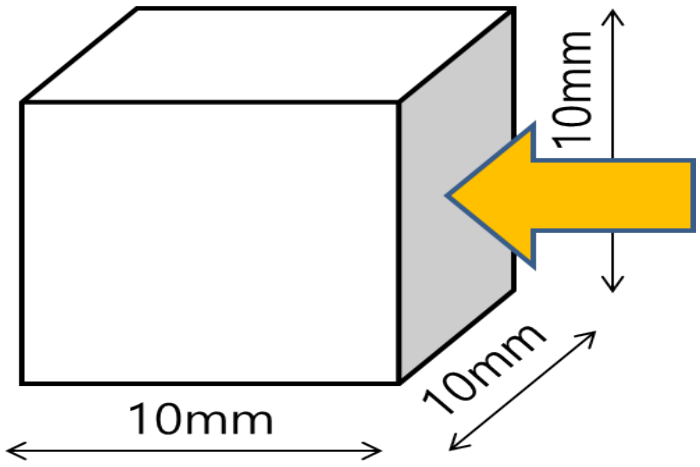
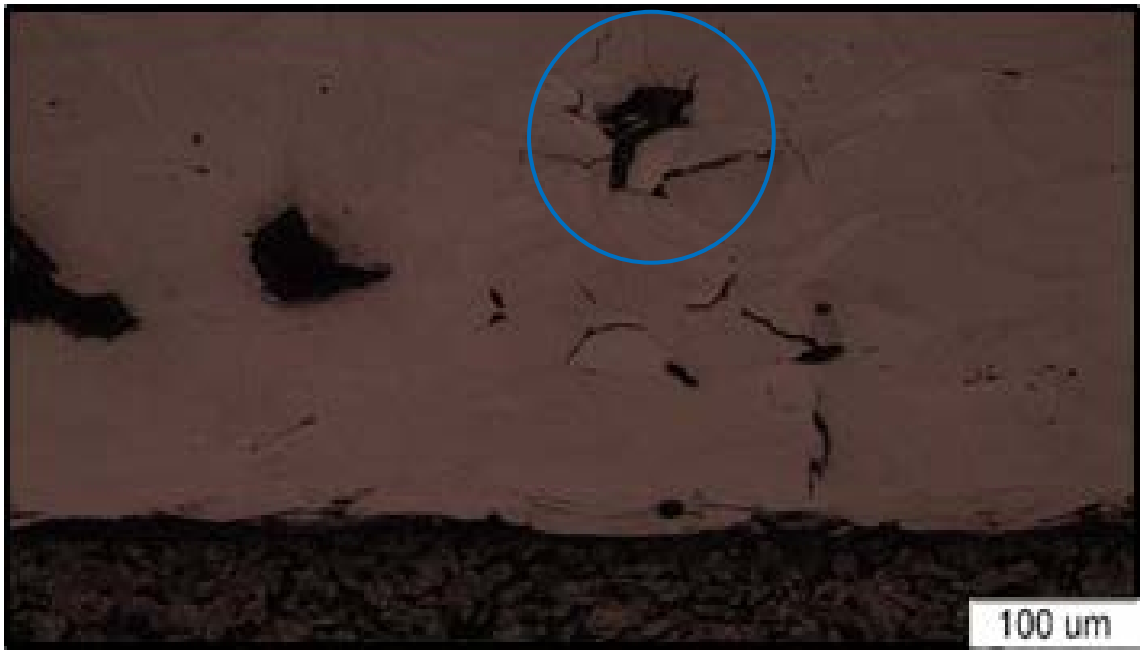


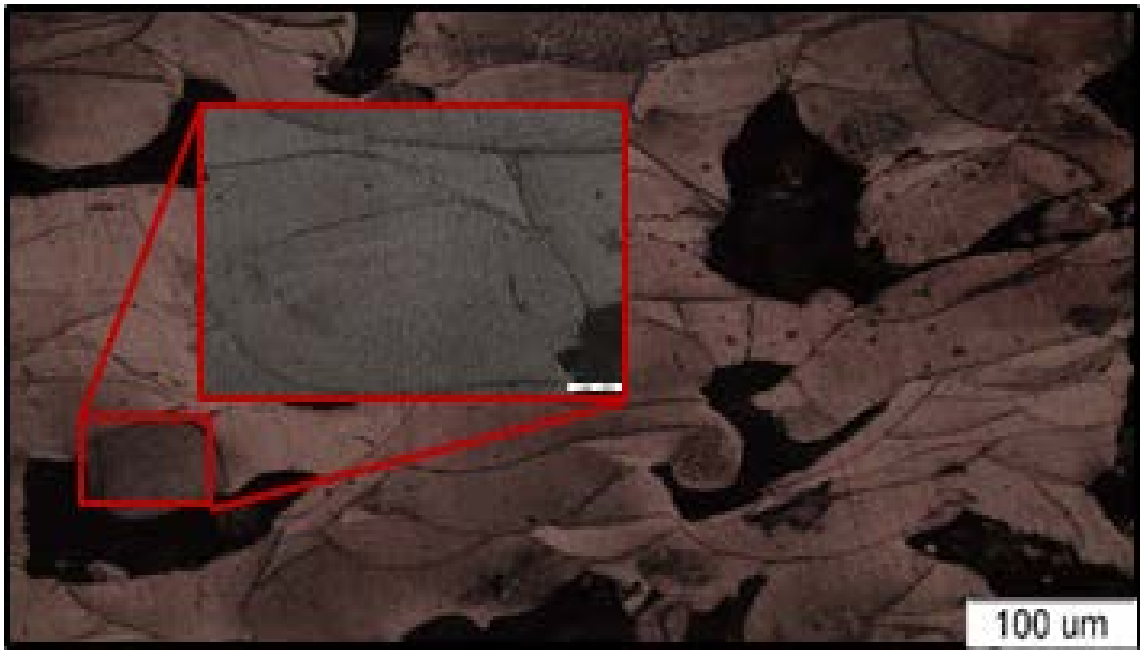
그림 4.19 분석한 측면을 나타낸 사진.

(a) 시편 4 번

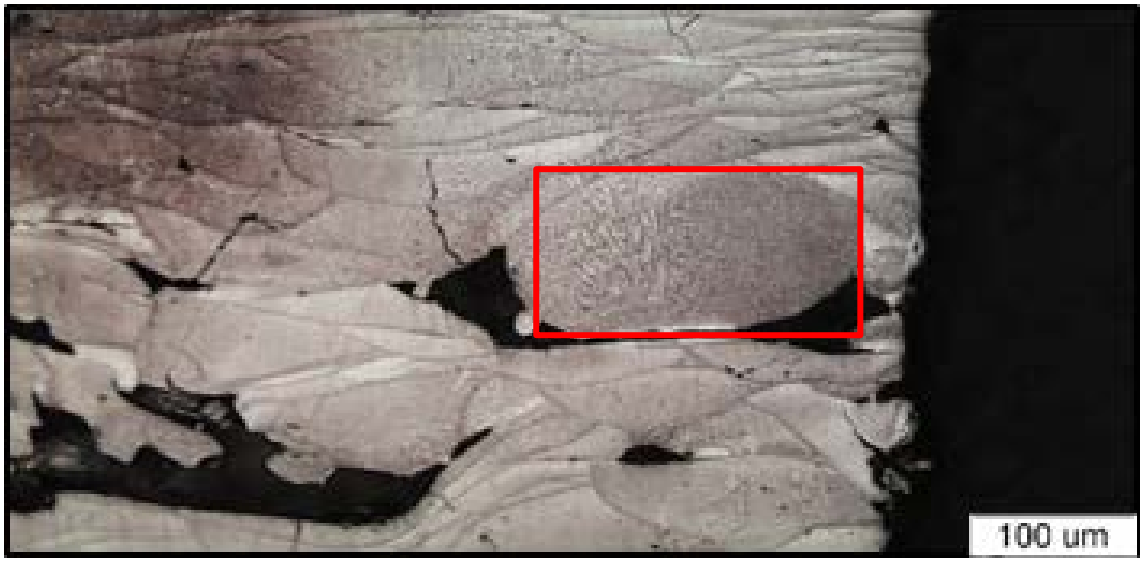


(b) 시편 7 번

(c) 시편 9 번

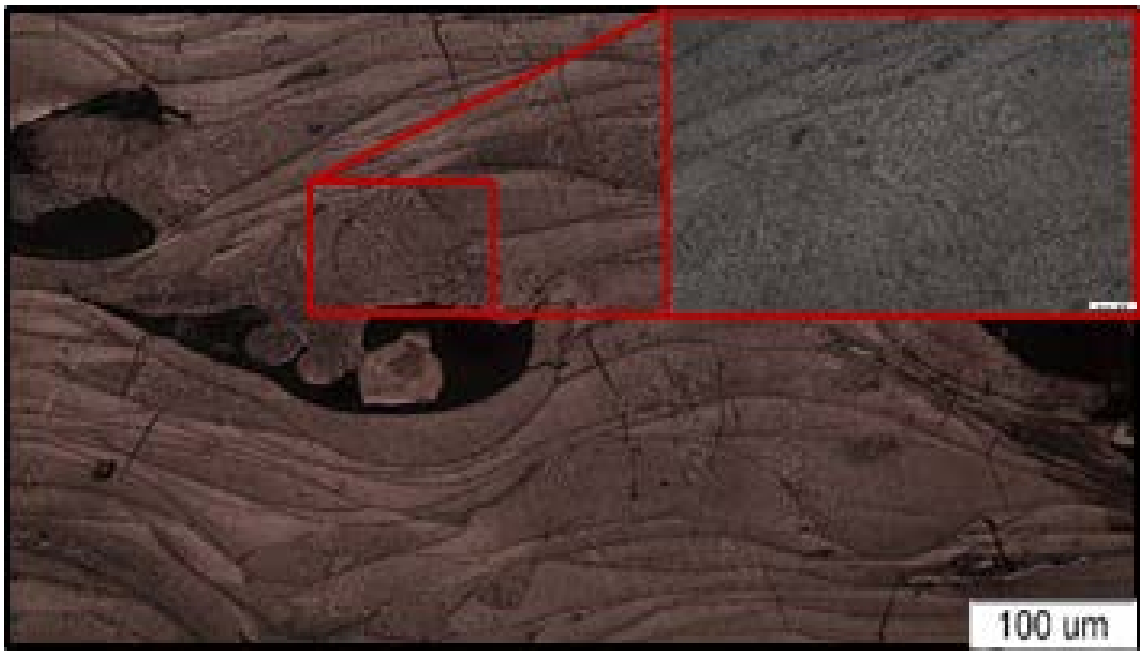


(d) 시편 10 번



(e) 시편 13 번

(f) 시편 16 번



(g) 시편 17 번

(h) 시편 19 번

(i) 시편 22 번

그림 4.20 Inconel 718 시편의 측면 미세조직 사진.

4. 4. 3. 경도 실험

그림 4.21 는 Inconel718 의 평면 경도분석 결과를 나타낸 사진이다. 레이저의 속도가 750mm/s 와 레이저의 파워가 270W 일 때 가장 높은 값인 308.4HV 으로 나타났다.

제일 낮은 경도 값을 지니는 시편은 13 번으로 공정 변수는 레이저의 속도가 1200mm/s, 레이저의 파워는 230W 로 경도값은 221.9HV 이다. 이는 다른 시편에 비해 더 많은 기공, 균열에 의해 낮게 측정된 것으로 판단된다.

그림 4.22 는 Inconel718 의 측면 경도분석 결과를 나타낸 사진이다. 레이저의 속도가 1200mm/s 와 레이저의 파워가 230W 일 때 가장 높은 값인 345.5HV 으로 주조제품의 경도보다 높거나 비슷하게 나타났다.

제일 낮은 경도 값을 지니는 공정 변수는 레이저의 속도가 1400mm/s, 레이저의 파와는 210W 으로 경도값은 300.7HV 이다. 이는 다른 시편에 비해 더 많은 기공, 균열에 의해 낮게 측정된 것으로 판단된다.

레이저의 속도가 1200mm/s, 1400mm/s, 레이저의 파워가 210W, 230W 일 때 낮은 HV 값을 지니며, 이는 레이저의 파워가 강하면 분말을 과용융 시키며, 원하는 부분 외 다른 부분에도 영향을 주며, 레이저의 속도가 빠르면 분말의 용융, 소결이 제대로 이루어지지 않아 낮은 것으로 판단된다.[34-37]

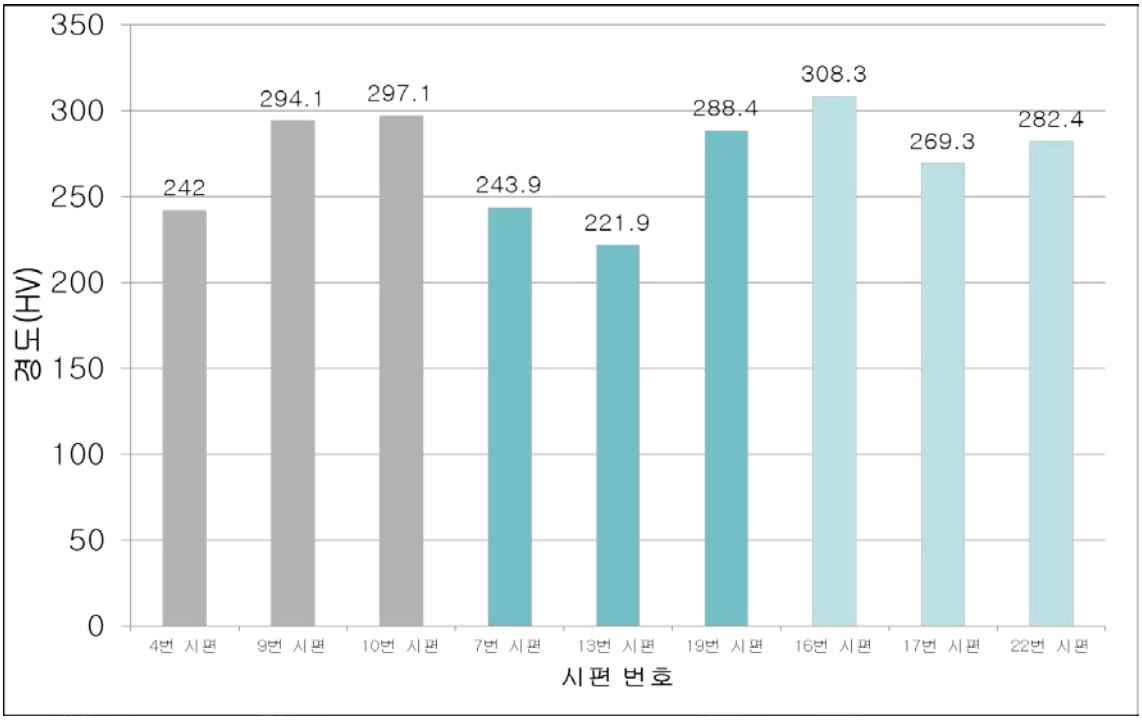


그림 4.21 Inconel718 시편의 평면 비커스 경도 평균 결과값 그래프

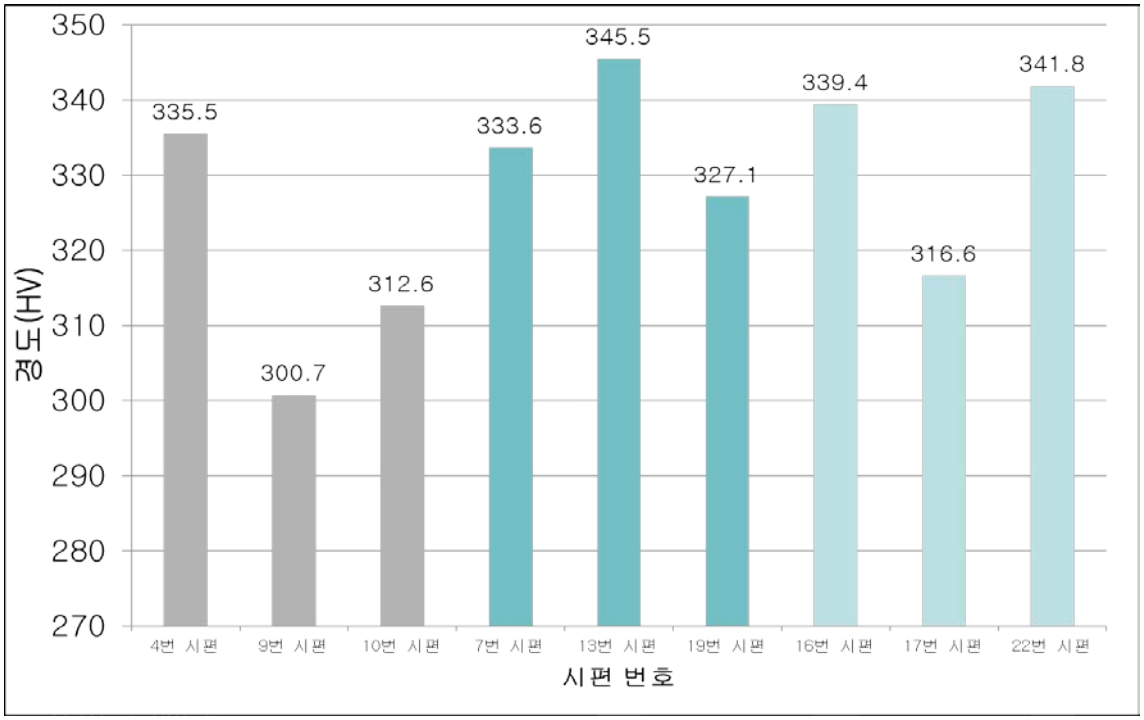


그림 4.22 Inconel718 시편의 측면 비커스 경도 평균 결과값 그래프

4. 4. 4. 인장 실험

인장 시편은 ISO 22674에서 사용하는 시편의 도면을 이용하여 제작하였으며 제작한 시편이 설계대로 제작이 출력이 되었는지 확인하기 위해 크기를 측정하였다(그림4.23),

인장 시편의 크기 오차 측정결과 최소 0%에서 최대 1.90%로 측정되었다(표4.3). 이러한 오차가 발생하는 이유로 적층하는 과정에서 내부에 쌓여 있던 열들이 냉각되면서 수축이 일어나는데 설계하는 과정에서 이를 고려하여 계산한 후 출력하였기 때문에 이러한 크기 오차가 발생한 것으로 확인된다.

측정한 시편의 지름은 2,915mm이며 인장강도는 458.44MPa, 연신율은 6.703%, 변형속도는 2mm/min으로 측정되었다(그림4.24). 인장 시편 결과에 따라 해당 시편은 ISO 22674의 Type 4에 해당하며, 상부구조물, 파이프 같이 높은 힘을 받는 얇은 부분을 요구하는 제품에 사용하기 유용하다.

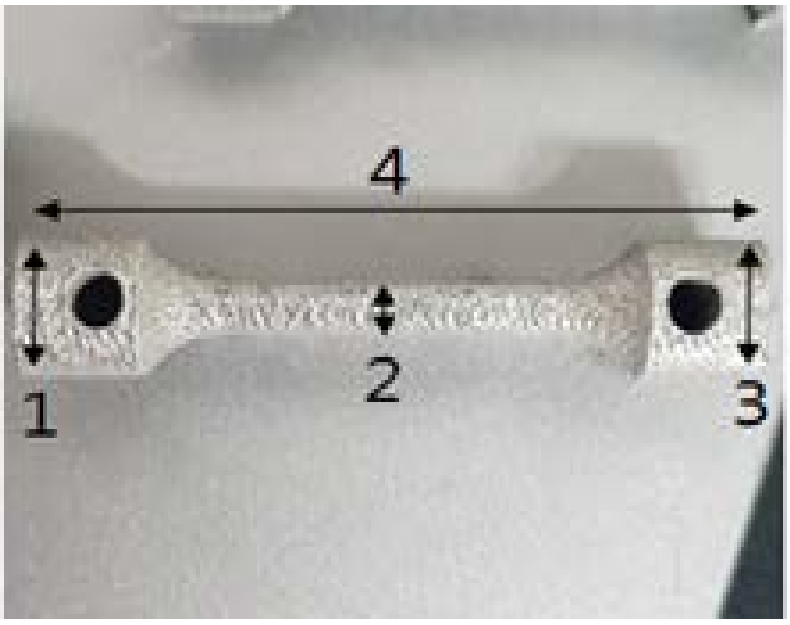
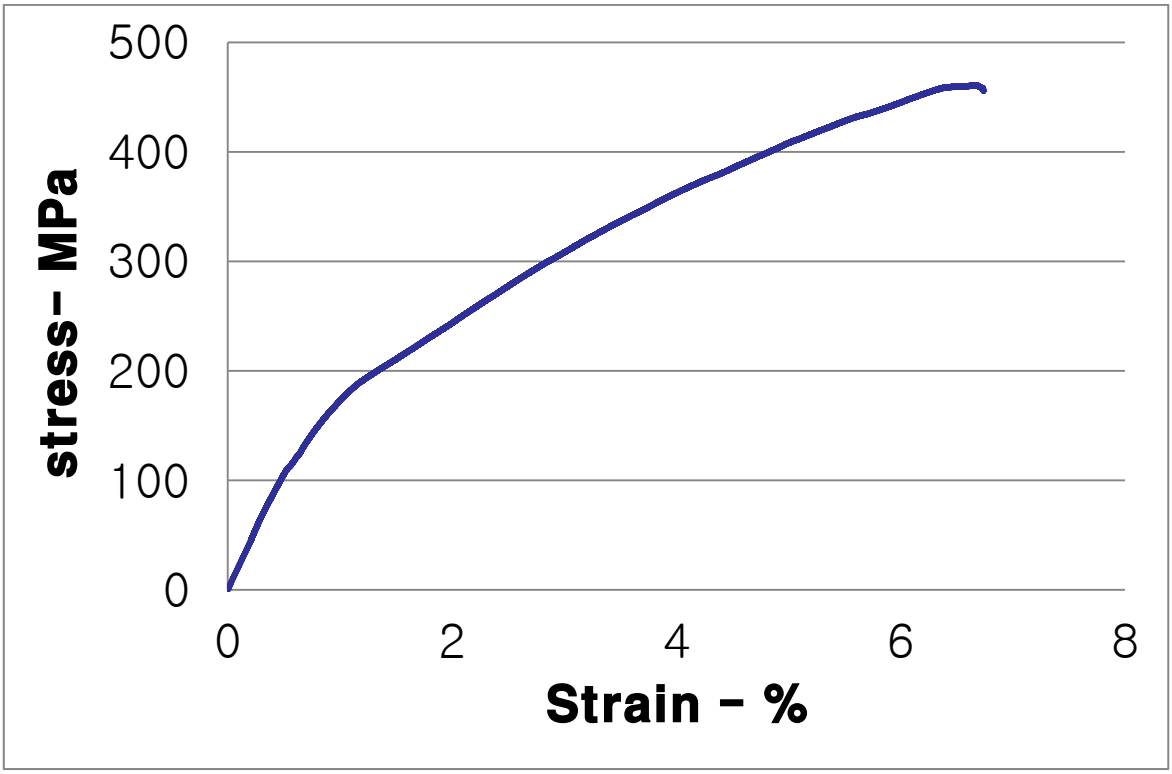


그림 4.23 제조한 인장시편.

측정부위	설계한 인장 시편	출력한 인장 시편	크기 오차
1(왼쪽 jig 부)	7.80mm	7.85mm	+0.60%
2(중간인장단면부)	3.10mm	3.10mm	0.00%
3(오른쪽 jig 부)	7.80mm	7.95mm	+1.90%
4(전체크기)	42mm	42.15mm	+0.36%

표 4.3 설계한 인장시편의 크기와 출력한 인장시편의 크기오차

(a)



(b)

그림 4.24 (a) 실험에 사용된 인장시편. (b) 인장실험 결과 값

5. 결론

본 연구에서는 Powder Bed Fusion(PBF)방식으로 제조된 철계 합금 및 Ni 계 합금의 미세조직 분석 및 기계적 특성분석을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. SUS316L 의 시편을 140W-800mm/s, 140W-1000mm/s 의 조건으로 진행 시 가입 에너지 밀도는 66.6J/mm^2 이며, 90°Meander, 69°Meander 패턴은 뚜렷하게 확인된다. Melt pools 의 모양이 길게 나타나며, 연속적이다.

2. SUS316L 의 시편을 150W-1400mm/s 의 조건으로 진행 시 가입 에너지 밀도는 51.02 J/mm^2 이며, 90°Meander, 69°Meander 패턴은 뚜렷하게 확인이 되지만 1 번과 4 번 시편과 같이 Melt pools 의 모양이 짧게 나타나며, 불연속적이다.

3. STS316L 의 경우 ASTM STS316L 의 기준인 200HV 를 초과하였으며, 140W-1000mm/s, 150W-800mm/s, 레이저 패턴이 69° rotation 의 공정 조건일 때 가장 높은 값인 281.9HV 이 나타났다.

4. SUS316L 시편의 경우 Melt Pool 이 짧은 조직이 경도가 더 높게 측정됐다.

5. SUS439L 의 시편을 140W-800mm/s, 140W-1000mm/s 의 조건으로 진행 시 가입 에너지 밀도는 66.6J/mm^2 이며, 90°Meander, 69°Meander 패턴은 뚜렷하게 확인된다. Melt pools 의 모양이 길게 나타나며, 연속적이다

6. SUS439L 의 시편을 150W-1400mm/s 의 조건으로 진행 시 가입 에너지 밀도는 51.02 J/mm^2 이며, meander 90°, meander 69° 패턴은 뚜렷하게 확인이 되지만 제 2 차상이 많이 관찰되고, Melt pools 의 모양이 짧게 나타나며, 불연속적이다

7. SUS439L 의 경우 KS STS439 의 기준인 200HV 이하를 초과하였으며, 140W-1000mm/s, 140W-1400mm/s, 레이저의 패턴이 69°Meander 공정 조건일 때 가장 높은 값인 331.6HV 이 나타났으며, 밀도와 경도가 연관이 있는 것을 확인할 수 있었다. 밀도 측정결과 공정변수에 따른 시편의 밀도가 비슷하다는 것을 확인하였다. 그리고 실험에 사용한 공정변수가 SUS439L 에 사용하기에 적합한 것을 확인하였다.

8. 같은 공정 조건으로 시편을 제조하였을 때 SUS316L 에 비해 SUS439L 의 시편에 과융융에 의한 키홀 현상과 균열이 많이 발생하는 것을 확인하였다.

9. Inconel718 시편의 평면 미세조직 결과에서 210W-1400mm/s, 230W-1200mm/s, 270W-1400mm/s 의 공정 조건으로 진행 시 가입 에너지 밀도는 71.42 J/mm^2, 91.27 J/mm^2 이며, 시편들의 미세조직이 균열, 기공이 제일 많이 관찰되었고, 시편제작 직후 관찰하였을 때 제일 기공이 적은 것으로 확인되었던 300W-1050mm/s 시편이 제일 적은 기공 및 균열을 지닌 것을 확인할 수 있었다.

10. 레이저 패턴은 meander 패턴으로 제작하였으나, 미세조직 분석 결과 일부 조직이 패턴 방향과 동일한 방향으로 보인다.

11. Inconel718 의 평면 경도분석 결과 일반적인 주조제품의 경도인 330HV 에 비해 낮은 경도값을 지녔으며, 270W-750mm/s 이 가장 높은 값인 308.4HV 으로 주조제품의 경도와 비슷한 경도값이 나타났다.

12. Inconel718 시편의 측면의 미세조직 결과 각 샘플 마다 급냉조직이 관찰되었으며, 특히 이 조직들은 210W-1800mm/s, 230W-1200mm/s, 270W-

1050mm/s 시편에서 뚜렷하게 관찰되었고, PBF 공정이 빠른 시간 내 분말이 용융되었다가 냉각이 이루어질 때 열의 이동이 위에서 아래로 진행되기 때문에 이러한 조직이 관찰되는 것으로 확인된다.

13. Inconel718 의 측면 경도분석 결과 일반적인 주조제품의 경도인 330HV 를 근접하거나 초과하였으며, 공정조건이 230W-1200mm/s 이 가장 높은 값인 345.5HV 으로 주조제품의 경도보다 높거나 비슷하게 나타났다.

14. 210W-1200mm/s, 230W-1400mm/s 의 공정 조건으로 만든 시편이 낮은 HV 값을 지니며, 분말에 따라 분말을 용융시키는데 요구되는 레이저파워가 있으며, 이를 초과할 경우 과용융이 발생하여 키홀(Key Hall) 현상이 발생하거나 내부에 열에너지로 인한 응력이 쌓이게 된다. 키홀 현상은 레이저 용접에서 주로 발생하는 현상이며 레이저를 과하게 주사하게 되면 그 부분에 구멍이 발생한다. 이 구멍을 키홀이라고 하는데 키홀 벽면에서 레이저가 반사하게 면서 용입의 깊이를 깊게 만드는 현상을 말한다. 이로 인하여 제대로 적층되지 못하여 제품의 내부에 기공이 많아지게 되거나 균열이 발생하고, 출력한 후 제품 내부 응력에 의해 비틀림 등이 발생한다.

15. 인장 시편의 크기 오차 측정결과 최소 0%에서 최대 1.90%로 측정되었다(표 4.3). 이러한 오차가 발생하는 이유로 적층하는 과정에서 내부에 쌓여 있던 열들이 냉각되면서 수축이 일어나는데 설계하는 과정에서 이를 고려하여 계산한 후 출력하였기 때문에 이러한 크기 오차가 발생한 것으로 확인된다.

16. 측정한 시편의 지름은 2,915mm 이며 인장강도는 458.44MPa, 연신율은 6.703%, 변형속도는 2mm/min 으로 측정되었다(그림 4.24). 인장 시편 결과에 따라 해당 시편은 ISO 22674 의 Type 4 에 해당하며, 상부구조물, 파이프 같이 높은 힘을 받는 얇은 부분을 요구하는 제품에 사용하기 유용하다.

17. 레이저의 속도는 레이저파워와 마찬가지로 너무 느린 경우 재료가 레이저에 노출되는 시간이 많아지면서 과용융되고 열에너지로 인한 내부응력이 증가하게 되면서 출력물에 비틀림 현상이나 균열이 발생하게 된다.[39]

참고 문헌

[1] 3D 프린팅 기술 동향, 한국콘텐츠진흥원, 2013, P4-8

[2] ASTM International Committee F42 on Additive Manufacturing Technology defines AM as the process of joining materials to make objects from 3D model data, usually layer upon layer, as opposed to subtractive manufacturing method.

[3] 3D 프린터의 개념 및 원리, 대림아이앤에스, 2014

[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] 김용석, 최성웅, and 양순용, 금속 3D 프린팅 적층제조 (AM) 공정 시뮬레이션 기술에 관한 고찰 (Ⅰ). 드라이브· 컨트롤, 2019. 16(3): p. 42-50.

[7] Jikai Liu, Yufan Zheng, Rafiq Ahmad, Jinyuan Tang, Yongsheng Ma, Minimum length scale constraints in multi-scale topology optimisation for additive manufacturing, Virtual and Physical Prototyping 14:3, 2019, P229-241.

[8] A. Raghavan, H. L. Wei, T. A. Palmer, and T. DebRoy, Heat transfer and fluid flow in additive manufacturing, Journal of Laser Applications 25, 2013

[9] J. A. Gonzalez, J. Mirelesa, Y. Lin, R. B. Wicker, Characterization of ceramic components fabricated using binder jetting additive manufacturing technology, Ceramics International, 2016, P10559-10564

[10] Jonathan Raasch, Marcus Ivey, Daniel Aldrich, David S. Nobes, Cagri Ayranci, Characterization of polyurethane shape memory polymer processed by material extrusion additive manufacturing, 2015, P132-141

[11] 한봉희, 조직과 성질을 주로 한 금속재료, ㈜교보문고, 2011, P299-300

[12] 오욱진, 김민섭, 이욱진, 심도식, PBF 방식으로 제조된 SUS316L 부품의 DED 공정 보수 후 인장 특성 분석, 한국소성가공학회 학술대회 논문집, 2018, P184-184.

[13] Y. Kato, K. Nakabayashi, T. Shimura, MPR, 48, 1993, P32

[14] H. Suzuki, H. Ohtsubo, MPR, 49, 1994, P28

[15] A. Bose, MPR, 48, 1993, P18

[16] Jea-Young Jo, Dong-Jun Kim, Wang-Hoi Gu, Jin-Chun Kim, Min-Kyun Shin, Jae-Hyun Lim, View All Authors, Production and characterization of SUS 439 powders by gas atomization process, IEEE, 28 June-1 July 2013

[17] M. J. Donachie, Jr. "Superalloy Source book", ASM, 1984, P3

[18] D. F. Paulonis, J. M. Oblak, D. S. Duvall: Trans, ASM, Vol.62, (1969), P611

[19] H. Niu, I. Chang, Scripta Mater. 41, 1999, P25

[20] J. Mazumder, D. Dutta, N. Kikuchi, A. Ghosh, Opt, Lasers Eng, P34

[21] J. P. Kruth, P. Mercelis, J. V. Vaerenbergh, L. Froyen, M. Rombouts, Binding mechanisms in selective laser sintering and selective laser melting, Rapid Protoyping Journal, 11(1), 2005, P26-36

[22] Hahn Choo, Ling Sham, John Bohling, Austin Ngo, Xianghui Xiao, Yang Ren, Philip J. Depond, Manyali, J. Matthews, Elena Garlea, Effect of laser power on defect, texture, and microstructure of a laser powder bed fusion processed 316L stainless steel, Materials & Design, 2019, 107534

[23] Migue Zavala-Arredondo, Tyler London, Madie Allen, Tomaso Maccio, Sam Ward, David Griffiths, Amanda Allison, Paul Goodwin, Carl Hauser, Use of power factor and specific point energy as design parameters in laser powder-bed-fusion (L-PBF) of AlSi10Mg alloy, Materials & Design, 2019, 108018

[24] H. Gong K. Rafi, H. Gu, T. Starr, B. Stucker, Influence of defects on mechanical properties of Ti-6Al-4V components produced by selective laser melting and electron beam melting, 2015, Mater. Des. 86, P545-554

[25] H. Gong K. Rafi, H. Gu, T. Starr, B. Stucker, Analysis of defect generation in Ti-6Al-4V parts made using powder bed fusion additive manufacturing processes, Addit. Manuf, 2014, P1-4, P87-98

[26] Subrat Deb Nath, Harish Irrinki, Gautam Gupta, Martin Kearns, Ozkan Gulsoy, Sundar Atrea, Microstructure-property relationships of 420 stainless steel fabricated by laser-powder bed fusion, Powder Technology, 2019, P738-746

[27] Nath, Subrata Deb, "Process-property-microstructure relationships in laser-powder bed fusion of 420 stainless steel.", 2018, Electronic Theses and Dissertations, Paper 3074.

[28] D'Accardi, E.; Altenburg, S.; Maierhofer, C.; Palumbo, D.; Galietti, U. Detection of Typical Metal Additive Manufacturing Defects by the Application of Thermographic Techniques. Proceedings 2019, 27, 24.

[29] Xiaoyuan Lou, Miao Song, Paul W. Emigh, Michelle A. Othon, Peter L. Andresen, On the stress corrosion crack growth behaviour in high temperature water of 316L stainless steel made by laser powder bed fusion additive manufacturing, Corrosion Science, 2017, P140-153

[30] T. Mukherjee, T. DebRoy, Printability of 316 stainless steel, Science and Technology of Welding and Joining, 24:5, 2019, P412-419

[31] Branden Kappes, Senthamilaruvi Moorthy, Dana Drake, Henry Geerlings, Aaron Stebner, Machine Learning to Optimize Additive Manufacturing Parameters for Laser

[32] Lass, E.A., Stoudt, M.R., Williams, M.E. et al. Metall and Mat Trans A, 2017, 48: 5547.

[33] Powder Bed Fusion of Inconel 718, Proceedings of the 9th International Symposium on Superalloy 718 & Derivatives: Energy, Aerospace, and Industrial Applications, 2018, P595-610

[34] Jing Li, Zhanyong Zhao, Peikang Bai, Hong qiao Qu, Bin Liu, Liang Li, Liyun Wu, Renguo Guan, Hu Liu, Zhanhu Guo, Microstructural evolution and mechanical properties of IN718 alloy fabricated by selective laser melting following different heat treatments, Journal of Alloys and Compounds, 2019, P861-870

[35] P. Ninpetch, N. Teenok, P. Kowitwarangkul, S. Mahathanabodee, R. Tongsri, P. Ratanadecho, The Influence of Laser Parameters on the Melted Track and Microstructure of AISI 316L Fabricated by L-PBF Process, IIWAP 2019

[36] Daniel, T., "The Development of Design Rules for Selective Laser Melting", Ph. D Thesis, University of Wales Institute Cardiff, 2009

[37] Igor, Y. and I, S., "Selective laser melting technology: from the single laser melted track stability to 3D parts of complex shape", Physics Procedia, 2010, vol. 5, P551-560

[38] Irrinki, Harish; Dilip, Samuel; Kate, Kunal; Badwe, Sunil; Pasebani, Somayeh, Microstructure Evolution of Laser Powder Bed Fusion (L-PBF) of 17-4 PH Stainless Steel Powders, European Congress and Exhibition on Powder Metallurgy. European PM Conference Proceedings; Shrewsbury, 2016

[39] Rauniyar, SK & Chou, K. JOM, Melt Pool Analysis and Mesoscale Simulation of Laser Powder Bed Fusion Process (L-PBF) with Ti-6Al-4V Powder Particles, 2019, P938–945

[40] Song, Hyeyun. "Multi-scale Microstructure Characterization for Improved Understanding of Microstructure-Property Relationship in Additive Manufacturing."

Electronic Thesis or Dissertation. Ohio State University, 2016. OhioLINK Electronic Theses and Dissertations Center. 28 Oct 2019.

[41] Yang, Y.P., Jamshidinia, M., Boulware, P. et al, Comput Mech, 2018, 61: 599.

[42 Tomasz Kurzynowsk, iIrina Smolina, Karol Kobiela, Bogumiła Kuźnicka, Edward Chlebus, Wear and corrosion behaviour of Inconel 718 laser surface alloyed with rhenium, Materials & Design, Volume 132, 15 October 2017, Pages 349-359

[43] 호원

[44] ㈜명인코리아

Abstract

As the research and development of the Additive Manufacturing (AM) process has recently progressed, powder bed fusion (PBF), direct energy deposit (DED), and binder jetting (BJ) methods are the most common methods of utilizing metal among AM processes. The PBF method, which is the most used of the three methods, was selected. Materials are generally selected as the most commonly used iron-based alloys and Ni-based alloys. It is necessary to build a DB regarding the relationship between the mechanical properties and microstructures that appear when products are manufactured from iron-based alloys, Ni-based alloys.

SUS316L is an austenitic stainless steel, which is widely used in corrosion resistant parts with complex shapes due to its excellent corrosion resistance, abrasion resistance and mechanical properties. SUS439L is a ferritic stainless steel, which has excellent corrosion resistance, abrasion resistance, and mechanical properties compared to general carbon steel, and is mainly used for automobile exhaust and pipe because of its excellent formability. Unlike SUS316L, SUS439L is not added Ni and Mo, so corrosion resistance is lower than SUS316L. However, SUS439L is inexpensive because Ni is not added, and Ti and Al are added.

Inconel718 is an aging hardening nickel-chromium alloy, an age hardening alloy that shows excellent strength from -250ºC to high temperature of 700ºC. it has high tensile strength, fatigue strength, creep rupture strength, excellent oxidation resistance and corrosion resistance, and is widely used in aerospace turbine engines, industrial turbines, and the like.

As research and technology on AM process progress, products made of iron-based alloy and Ni-based alloy that can be printed by PBF method are compared with iron-based alloy and Ni-based alloy produced by general process method. An analysis of the difference in mechanical properties is needed. The mechanical properties are greatly affected by the microstructure, and it is necessary to analyze the microstructure of the product manufactured by the AM process and to analyze the relationship with the mechanical properties to satisfy the mechanical properties required for the product. In

order to find the optimal microstructure, it is necessary to find the optimal process variables. Through experiments, we will find the optimal process parameters for iron and Ni-based alloys and analyze the microstructure to meet the mechanical properties required for the product.