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

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

[UCI]I804:24011-200000266581

2018 년 2 월

석사학위 논문

금속 3D 프린팅 공정으로 다층 적층된 금형구조의 충격 및 전자빔 표면 후처리 특성

조선대학교 대학원

기 계 공 학 과

장 용 훈

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

금속 3D 프린팅 공정으로 다층적층된 금형구조의 충격 및 전자빔 표면 후처리 특성

Characteristics of Impact and Electron Beam Post-processing for Multi-layer Deposited Tool Structures Using Metal 3D Printing Process

2018 년 2 월 23 일

조선대학교 대학원

기 계 공 학 과

장 용 훈

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

금속 3D 프린팅 공정으로 다층적층된 금형구조의 충격 및 전자빔 표면 후처리 특성

지도교수 안 동 규

이 논문을 공학석사학위 신청 논문으로 제출함

2017 년 10 월

조선대학교 대학원

기 계 공 학 과

장 용 훈

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

장용훈의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 한 길 영 (인)

위 원 조선대학교 교수 안 동 규 (인)

위 원 조선대학교 교수 오 동 욱 (인)

2017 년 11 월

조선대학교 대학원

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

목 차

LIST OF TABLES ---------- iv

LIST OF FIGURES ---------- iv

NOMENCLATURES ---------- vii

ABSTRACT ---------- viii

제 1 장 서론 ---------- 1

제 1 절 연구 배경 및 관련 연구 ---------- 1

제 2 절 연구 목적 및 방법 ---------- 4

제 2 장 직접식 에너지 적층 공정 (Direct Energy Deposition) 및 다층 적층 시편 설계 및 제작 방법 ---------- 6

제 1 절 직접식 에너지 적층공정 ---------- 6

제 2 절 다층 적층 시편 설계 및 제작 ---------- 7

1. 금형 혼합 손상 패턴 방지를 위한 다층 적층된 낙하 충격 시험 시편 ---------- 7

2. 금형 혼합 손상 패턴 방지를 위한 다층 적층된 샤르피 충격 시편 ---------- 9

제 3 장 금형 혼합 손상 패턴 방지를 위한 다층 적층된

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

구조의 충격 특성 평가 ---------- 10
제 1 절 낙하 충격 시험 ---------- 10
1. 평면 충격 경계조건에서의 내충격 시험 방법 ---------- 10
2. 평면 충격 경계조건에서의 내충격 시험 결과 및 고찰 --------- 12
3. 평면 충격 경계조건에서의 내충격 시험 후 시편의 외부 균열 검사 ---------- 14
4. 평면 충격 경계조건에서의 내충격 시험 후 시편의 비파괴 내부 균열 검사 ---------- 15
5. 평면 충격 경계조건에서의 내충격 시험 후 시편의 파괴 내부 균열 검사 ---------- 16
제 2 절 샤르피 충격 시험 ---------- 19
1. 다층 적층 시편 샤르피 충격 시험 방법 ---------- 19
2. 다층 적층 시편 샤르피 충격 시험 결과 및 고찰 ---------- 20
3. 다층 적층 시편 샤르피 충격 시험 후 시편의 파단면 분석 --- 21

제 4 장 플라즈마 전자빔을 이용한 적층 시편 표면 후처리 공정 ---------- 22
제 1 절 플라즈마 전자빔을 이용한 적층면 재생성 방법 ----- 22
제 2 절 플라즈마 전자빔을 이용한 적층면 재생성 시편 설계 및 제작 ---------- 25
제 3 절 플라즈마 전자빔을 이용한 적층 시편 표면 재생성 실험 결과 및 분석 ---------- 26
1. 플라즈마 전자빔을 이용하여 재생성된 적층 시편의 표면 조도

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

분석 ---------- 26
2. 플라즈마 전자빔을 이용하여 재생성된 적층 시편의 조직 변화 분석 ---------- 33
3. 플라즈마 전자빔을 이용하여 재생성된 적층 시편의 경도 변화 분석 ---------- 46

제 5 장 혼합 손상 패턴 방지를 위한 다층 적층 구조를 가진 열간 성형 금형 ---------- 52
제 1 절 다층 적층된 구조를 가진 고온 성형 금형 설계 및 제작 ---------- 52

제 6 장 결론 및 향후 과제 ---------- 58

References ---------- 60

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

LIST OF TABLES

Table 1 Chemical composition of materials ---------- 5
Table 2 Materials of deposition layer ---------- 7
Table 3 Dimension of drop weight impact test specimens ---------- 8
Table 4 Dimension of Charpy impact test specimens ---------- 9
Table 5 Parameter of repeated impact test ---------- 11
Table 6 Parameter of Charpy impact test ---------- 18
Table 7 Parameter of re-melting process ---------- 22
Table 8 Parameter of nano-indentation test ---------- 46
Table 9 Parameter of hot-forging process ---------- 55

LIST OF FIGURES

Fig. 1 Defects of metal 3D Printing ---------- 2
Fig. 2 Stress-strain curve for different materials ---------- 5
Fig. 3 Schematic of DED process ---------- 6
Fig. 4 Design of repeated impact specimens ---------- 7
Fig. 5 Process of direct energy deposition ---------- 8
Fig. 6 Design of repeated impact specimens ---------- 9
Fig. 7 Experimental set-up of repeated impact experiments ---------- 10
Fig. 8 Impact force of repeated impact experiments ---------- 12
Fig. 9 Impact Load of repeated impact experiments ---------- 13
Fig. 10 Microscope (Xi-Cam) ---------- 14
Fig. 11 Morphology of external surface specimens ---------- 14
Fig. 12 Experimental set-up of internal defect analysis ---------- 15
Fig. 13 X-ray CT image of specimens ---------- 15
Fig. 14 Experimental set-up of scanning electron microscope ---------- 16
Fig. 15 SEM image of internal micro crack ---------- 17
Fig. 16 Experimental set-up of Charpy impact experiments ---------- 19
Fig. 17 absorbed impact energy of deposition specimens ---------- 20

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Fig. 18 fracture characteristics of specimens ---------- 21
Fig. 19 Apparatus of plasma electron beam system ---------- 23
Fig. 20 Schematic diagram of Re-melting process ---------- 24
Fig. 21 Design of re-melting process specimen ---------- 25
Fig. 22 Variation of re-melted surface ---------- 26
Fig. 23 Surface morphology of initial specemen ---------- 27
Fig. 24 Surface morphology of re-melted specimens (N = 20 shot) ---------- 27
Fig. 25 Surface morphology of re-melted specimens (N = 100 shot) ---------- 27
Fig. 26 Surface morphology of re-melted specimens (N = 200 shot) ---------- 28
Fig. 27 Experimental set-up of 3D surface profile ---------- 28
Fig. 28 Surface profile of initial specimen ---------- 29
Fig. 29 Surface profile of re-melted specimen (N = 20 shot) ---------- 29
Fig. 30 Surface profile of re-melted specimen (N = 100 shot) ---------- 29
Fig. 31 Surface profile of re-melted specimen (N = 200 shot) ---------- 29
Fig. 32 Measurement position of surface roughness ---------- 30
Fig. 33 Surface roughness measurement set-up of re-melted specimens ---------- 30
Fig. 34 Variation of surface roughness of re-melted specimens ----------31
Fig. 35 Surface roughness of re-melted specimen ---------- 32
Fig. 36 Surface morphology of re-melted specimen (initial specimen) ---------- 33
Fig. 37 Surface morphology of re-melted specimens (V = 25 KeV) ---------- 34
Fig. 38 Surface morphology of re-melted specimens (V = 30 KeV)---------- 34
Fig. 39 Surface morphology of re-melted specimens (V = 35 KeV) ---------- 34
Fig. 40 Cutting position of re-melted specimen ---------- 35
Fig. 41 Section morphology of initial specimen ---------- 36
Fig. 42 Measurement point of re-melting area ---------- 36
Fig. 43 Section morphology of re-melted specimen at beam center B position (V = 25 KeV) ---------- 37
Fig. 44 Section morphology of re-melted specimen at beam center B position (V = 30 KeV) ---------- 37
Fig. 45 Section morphology of re-melted specimen at beam center B position (V = 35 KeV) ---------- 37
Fig. 46 Re-melting thickness according to emission voltage (Beam center position B) --- 38
Fig. 47 Section morphology of re-melted specimen at beam center B position (V = 25 KeV) ---------- 39

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Fig. 48 Section morphology of re-melted specimen at beam center B position (V = 30 KeV) ---------- 39
Fig. 49 Section morphology of re-melted specimen at beam center B position (V = 35 KeV) ---------- 39
Fig. 50 Re-melting thickness according to emission voltage (Beam center position A) --- 40
Fig. 51 Section morphology of re-melted specimen at specimen center B position (V = 25 KeV) ---------- 41
Fig. 52 Section morphology of re-melted specimen at specimen center B position (V = 30 KeV) ---------- 41
Fig. 53 Section morphology of re-melted specimen at specimen center B position (V = 35 KeV) ---------- 41
Fig. 54 Re-melting thickness according to emission voltage (Specimen center position B) - 42
Fig. 55 Section morphology of re-melted specimen at specimen center A position (V = 25 KeV) ---------- 43
Fig. 56 Section morphology of re-melted specimen at specimen center A position (V = 30 KeV) ---------- 43
Fig. 57 Section morphology of re-melted specimen at specimen center A position (V = 35 KeV) ---------- 43
Fig. 58 Re-melting thickness according to emission voltage (Specimen center position A) - 44
Fig. 59 Experimental setup of hardness measurement of remelted specimens ---------- 46
Fig. 60 Variation of vickers hardness of re-melted layer (V = 25 KeV) ---------- 47
Fig. 61 Variation of vickers hardness of re-melted layer (V = 30 KeV) ---------- 48
Fig. 62 Variation of vickers hardness of re-melted layer (V = 35 KeV) ---------- 48
Fig. 63 Vickers hardness of re-melted region ---------- 49
Fig. 64 Vickers hardness of Boundary region ---------- 50
Fig. 65 Vickers hardness of remelted layer ---------- 50
Fig. 66 Wear of hot-forging die ---------- 52
Fig. 67 Concept of 4 layer structures hot-forging die ---------- 53
Fig. 68 Sectional view of offset design ---------- 54
Fig. 69 Deposition path of 4 layer structures hot-forging die ---------- 54
Fig. 70 Process of 4 layer structures hot-forging die ---------- 55
Fig. 71 Process of test for hot forging mass-production ---------- 55
Fig. 72 Number of shots for the multi-layer hot forging die ---------- 56
Fig. 73 Sectional view of the 3 layer structures hot forging die ---------- 56

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

NOMENCLATURES

HL : Hardfaing layer (하드페이싱층)

TSCL : Thermal stress control layer (열응력제어층)

DDL : Damage diminution layer (손상저감층)

W : Width of specimen (mm) (시편의 폭 길이)

D : Depth of specimen (mm) (시편의 깊이 길이)

H : Height of specimen (mm) (시편의 높이 길이)

A : Area of impact load (충격하중면적)

G : Acceleration of gravity (중력가속도)

F : Impact force (충격하중)

P : Impact load per unit area (단위면적당 충격하중)

T_H : Thickness of hardfacing layer (mm) (하드페이싱층 두께)

T_T : Thickness of TSCL (mm) (열응력제어층 두께)

T_D : Thickness of DDL (mm) (손상저감층 두께)

Ts : Thickness of substrate (mm) (모재 두께)

V : Emission voltage of electron beam (KeV) (전자빔의 방출전압)

ρ_e : Energy density of electron beam (J/cm^2) (전자빔의 에너지밀도)

N : Number of electron beam irradiation (전자빔의 조사횟수)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

ABSTRACT

Characteristics of Impact and Electron Beam Post-processing for Multi-layer Deposited Tool Structures Using Metal 3D Printing Process

Yong Hun Jang
Advisor : Prof. Ahn Dong-Gyu, Ph.D.
Departmant of Mechanical Engineering
Graduated School of Chosun University

Recently, several researches have been investigated the multi-layer hardfacing technology using a metal three-dimensional (3D) printing process to increase the service life of the hot forming die. In order to improve the surface roughness, the morphology and the stability of the hardfaced region, a post process is needed. However, the fatigue life and the hardness of the hardfaced region is reduced when the machining based post-processing technology is applied to the hardfaced region. Hence, a new post-processing technology for the metal 3D printed part is needed to decrease stress relief after post-machining. The objective of this thesis is to investigate characteristics of impact and electron beam post-processing for the multi-layer deposited tool structures using a metal 3D printing process.

Charpy impact and repeated drop impact experiments were performed to investigate the effects of the design of the multi-layer deposited structure on impact characteristics of the specimen and crack initiation in the specimen. Candidated designs of the multi-layer hardfaced region were estimated from the results of the Charpy impact experiments. In addition, proper thickness and assignment of each layer for the multi-layer structure were obtained from the results of the repeated drop impact experiments. Several remelting experiments were carried out to examine the influence of process parameters of the electron beam on characteristics of the remelted region. The emission voltage and the number of irradiation of the pulsed electron beam were chosen as the process parameters. Through the

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

experiments, variation of the surface roughness, the hardness, the microstructure, and the morphology of the remelted region according to the process parameters was investigated. From the results of the investigation, a proper combination of the process parameters was estimated.

Finally, the hot forming die was fabricated using the multi-layer hardfacing technology. In addition, characteristics of the fabricated die were investigated through the observation of multi-layer formation in the fabricated die and the behavior of the die during the hot forming experiment.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 1 장 서 론

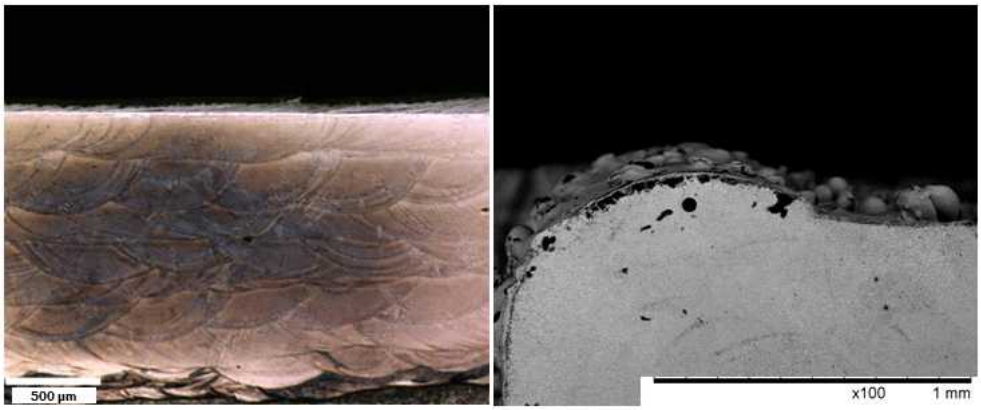
제 1 절 연구 배경 및 관련 연구

산업혁명 이후 농업중심사회에서 공업사회로 전환되며 전 세계의 산업화로 인하여 자원이 지속적으로 고갈됨에 따라 자원 및 에너지 생산 비용은 빠르게 증가하고 있으며 이산화탄소 배출로 인한 지구온난화와 같은 기후 변화에 대한 유엔 협약과 교토 의정서의 결과로 전 세계 여러 국가는 이산화탄소 배출 규제를 실시하여 에너지 절감을 요구하고 있다.[1,2] 세계적인 에너지 소비의 33 % 와 이산화탄소 배출량의 38 % 는 제조 산업에서 발생한다.[3] 제조 산업의 기계 및 생산 분야에서는 제품 수명 향상 기술, 자원 재활용 기술, 생산 에너지 효율성 증대 기술 등에 대한 연구가 폭넓게 진행되고 있다.[3] 많은 제품 생산 분야는 대량생산을 위하여 고온 성형 공정을 이용하고 있으며 생산 공정의 생산 효율 증대 및 자원 활용을 위하여 금형 수명 향상 기술에 대한 연구가 지속적으로 진행되고 있다.[4-9] 고온 성형 공정의 경우 600 ℃ 이상의 고온에서 반복적인 충격 하중이 부가되며 열연화 현상뿐만 아니라 충격파손, 마모, 침식, 균열 등 다양한 혼합 손상 패턴이 발생한다.[10-14] 이러한 손상으로 인하여 고온 성형 공정 금형의 수명은 매우 짧기 때문에 금형의 혼합 손상 패턴을 방지하기 위하여 열처리, 표면처리, 박막코팅 등 다양한 기법들이 사용되고 있다. 최근 고온 성형 금형에서 문제 되고 있는 충격/마모 특성 및 금형의 수명 등의 개선을 위하여 금형의 표면에 하드페이싱 기술을 이용하여 금형의 수명 향상에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있다.[15-17] 하드페이싱 기술은 기지금속 표면에 기계적 특성이 우수한 재료를 적층시키는 공정으로 용접과 같은 원리의 다양한 방법과 레이저를 열원으로 하는 레이저 클레딩 (Laser cladding) 등의 공정이 이용되고 있으며 최근 금속 3 차원 프린팅 기술을 이용하여 많은 연구가 수행되고 있다.[18-20] 금속 3 차원 프린팅 기술은 선택적 소결공정 (Selective laser sintering process) 이 개발된 이후 선택적 용융 공정 (Selective laser melting process), 직접식 금속 레이저 소결 공정 (Direct metal laser sintering process), 직접식 에너지 적층 공정 (Direct energy deposition process) 등 많은 공정이 개발되었다. 이러한 금속 3 차원 프린팅 기술을 이용하여 제품을 제작하는 경우 Fig. 1 과 같이 제품의 표면은 매우 거칠고 최종 적층면 주의는 불안정한 조직과 기공이 발생한다.[21-23]

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

(a) Product of metal 3D printer



(b) Morphologies of deposition surface

Fig. 1 Defects of metal 3D Printing

때문에 금속 3 차원 프린팅 기술을 이용하여 제품 제작시 후가공 공정은 필수적으로 필요하게 된다. 일반적으로 금속 3 차원 프린팅 기술로 제작된 제품의 후가공 공정은 기계 가공 공정이 적용되고 있다. 그러나 기계 가공 공정을 통한 후가공 공정은 많은 재료의 손실이 발생함과 동시에 잔류응력으로 인하여 피로수명 및 경도가 감소하게 된다.[24,25] 때문에 금속 3 차원 프린팅 공정에서 제작된 제품의 후가공시 발생하는 표면 재료 제거량 및 표면 잔류응력을 최소화하기 위하여 효율적인 새로운 후가공 공정으로 재용융 공정에 대한 연구가 진행되고 있다.[26-30] 재용융 공정의 경우 레이저 또는 전자빔과 같은 고에너지원을 열원으로 하여 표면을 재용융 시키는 공정으로 전자빔을 열원으로 하여 후가공은 수행하는 경우 표면재료가 재용융되어 표면 조도/경도/기공/부식

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

특성이 개선되며 기공 제거 및 안정적 표면 조직을 가지게 된다.[31-34)]

국내외적으로 하드페이싱 기술을 이용하여 제품의 충격특성을 개선시키기 위하여 많은 연구가 이루어지고 있으며 금속 3 차원 프린팅 공정으로 하드페이싱을 수행하는 경우 적층 경계부의 균열의 우려가 있어 국부적으로 기능성 층을 다층 적층하는 연구가 진행되고 있으며 재용융 공정의 경우 전자빔을 이용하여 제품 표면을 재용융하여 조도/경도/부식 등의 특성을 개선하는 연구가 진행되고 있다. 금형 수명 향상을 위한 하드페이싱 기술개발에 대한 연구와 전자빔을 열원으로 하는 후처리 공정에 관련된 선행연구는 다음과 같다.

하드페이싱 기술 개발 연구를 수행한 Mingxi 등은 레이저 클레딩 공정을 이용하여 Co 계 초합금을 하드페이싱하여 주사전자현미경을 이용해 표면의 미세조직을 분석하고 적층 두께에 따른 경도 변화를 분석하였다.[35)] Kashani 등은 Inconel 625 및 Stellite 21 과 Stellite 6 를 열간 성형 공정에 많이 사용되는 H 11 재료 상부에 TIG 용접 방식으로 적층하여 경도 측정 및 고온 마모 시험과 주사 전자 현미경을 이용하여 조직관찰을 하여 비교 분석 하였다.[36)] Morrow 등은 금속 3D 프린팅 공정중 하나인 DMD (Direct metal deposition) 공정으로 사출금형 상부에 초합금재료로 하드페이싱을 수행하여 연구를 수행하였다.[37)] Ahn 등은 열간 성형 금형에서 손상이 발생하는 국부적인 영역을 열피로로 인한 적층 경계부 손상을 감소시키기 위한 열응력제어를 하는 기능성층을 모재에 적층한 이후 내마모특성이 우수한 하드페이싱층을 DED (Direct energy deposition) 공정으로 적층하여 금형 수명 향상 기술 개발 연구를 수행하였다.[38)]

전자빔을 이용한 후처리 공정 연구를 수행한 Utu 등은 HVOF (High velocity oxy-fuel coating spraying) 방식으로 구리 소재의 기저부에 초합금 재료를 하드페이싱하여 전자빔을 조사해 재용융 실험을 수행하여 조직변화 분석을 수행하였다.[39)] Zhang 등은 316L 스테인리스 소재에 전자빔을 조사해 재용융 실험을 수행하여 원소 분석과 부식시험을 통하여 재용융 특성을 분석하였다.[40)] Misumi 등은 표면처리 기법 중 하나인 세라믹 박막 코팅을 SKD11 금형강에 적용하고 전자빔을 조사하여 조직, 원소 및 경도 변화 분석을 수행하였다.[41)] Kim 등은 DED 공정으로 적층된 시편에 전자빔을 조사하여 가속전압과 집속 전류에 따른 조도, 경도, 단면 형상비 변화를 분석하였다.[42)]

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 2 절 연구 목적 및 방법

기계 및 생산 분야에서는 제품 수명 향상 기술, 자원 재활용 기술, 생산 에너지 효율성 증대 등이 요구됨에 따라 전 세계적으로 새로운 기술 개발에 많은 연구를 하고 있다. 특히 고온 성형 공정은 고온의 조건에서 반복적인 충격 하중이 부가되기 때문에 고온 성형 공정의 금형은 열 연화 현상과 함께 충격파손, 마모, 침식, 균열 등 다양한 혼합 손상 패턴이 발생한다. 이러한 금형의 수명 향상을 위한 방법 중 금형 표면에 하드페이싱을 수행하는 기술을 응용하여 혼합 손상 패턴을 방지하기 위하여 기능적 재료를 적용하여 충격 손상저감층을 적층하여 열간 성형 금형의 혼합 손상을 방지하여 수명을 향상시키는 기술에 대한 연구를 진행하고자 한다. 열간 성형 금형에 사용되는 SKD 61 소재에 DED (Direct energy deposition) 공정을 이용하여 기능적 소재를 다층 적층하여 기능적 재료의 구성에 따른 충격 특성을 분석하였다. 적층에 사용된 재료와 재료의 조성비는 Table 1 과 같다. 표면의 내마모성을 증대시키기 위하여 특선개선층 (HL) 은 Stellite 21 소재를 사용하였으며 열응력 제어를 위한 층 (TSCL) 은 상, 하부 층의 재료의 체적비를 50 wt. % + 50 wt. % 혼합하여 적용하였다. 충격 손상을 감소시키기 위한 기능성 층인 손상저감층 (DDL) 은 온도에 따른 치수변화가 적으며 경면성이 좋아 플라스틱 사출금형에 많이 사용되는 P 21 재료를 사용하여 적층하였다. P 21 소재는 Fig. 2 의 응력-변형율 선도에서 하드페이싱층 소재인 Stellite 21 과 모재 소재인 SKD 61 소재 중간에 위치하므로 두 재료의 물성 차이로 인해 발생되는 균열을 방지할 수 있을 것으로 판단되었다. 내충격 충격 실험을 수행하여 다층 적층시편의 적층 조건별 시편의 내구성 시험과 내/외부 결함여부를 분석하고 고찰하였으며 샤르피 충격시험을 수행하여 손상저감층의 배치와 두께에 따른 충격 흡수 에너지를 도출하였다.

금속 3D 프린팅 제품의 결함 및 문제점 개선과 기계가공공정의 단점을 해결하기 위하여 면단위로 조사하는 펄스형 플라즈마 전자빔 시스템을 이용하여 가속 전압 및 조사 횟수를 변수로 하는 재용융 공정 실험을 수행하였다. 재용융 특성을 분석하기 위하여 현미경 촬영과 비접촉식 3 차원 측정을 통하여 재용융 표면의 형상변화를 분석하였으며 표면조도 측정을 수행하여 표면 거칠기를 변화를 분석하였다. 재용융 공정을 수행시 재용융층의 변화를 분석하기 위하여 주사전자현미경을 이용하여 재용융부의 조건별 조직변화를 분석하였다. 플라즈마 전자빔 조사 조건에 따른 재용융 영역의 경도 변화 분석을 위해 나노압입시험을 통하여 재용융 영역 및 재용융 경계부에 대하여 경도를 측정하여 재용융 특성이 우수한 적정 플라즈마 전자빔 조사 조건을 도출하였다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table 1 Chemical composition of materials

	Co	Cr	Mo	C	Ni	Fe
Stellite 21	Base	26.0-29.0	4.5-6.0	0.2-0.4	2.0-3.0	-
P 21	-	-	0.3	0.2	3.0	93.0
SKD 61	-	5.1-5.3	1.3-1.4	0.32-0.4	-	90.9

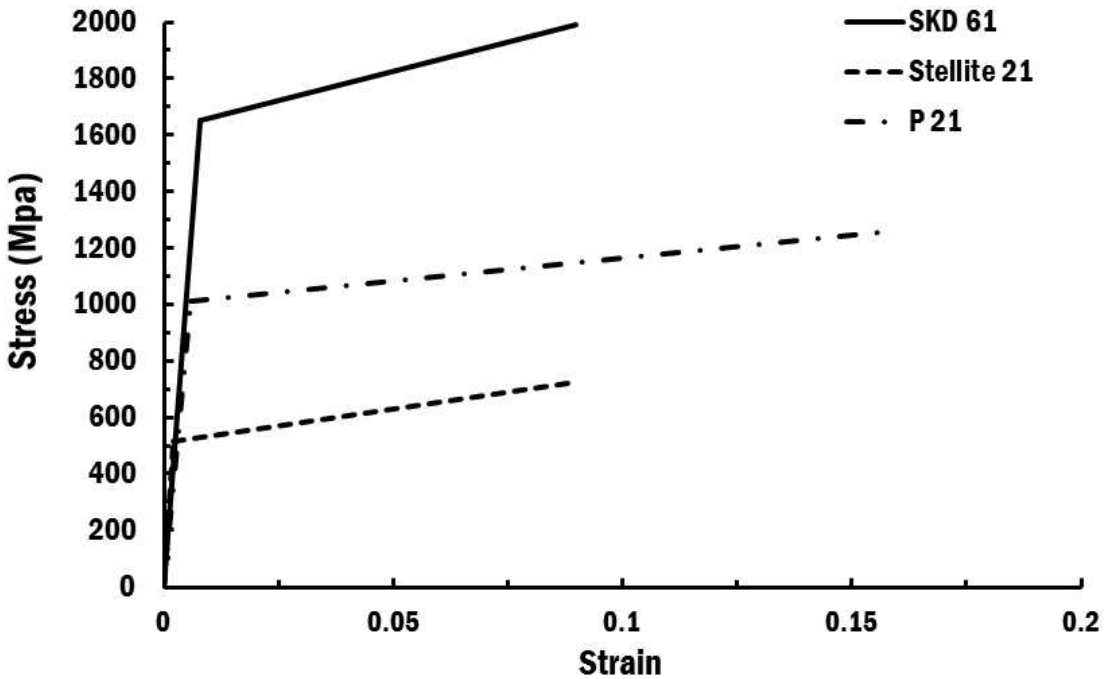


Fig. 2 Stress-strain curves for different materials

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 2 장 직접식 에너지 적층 (Direct Energy Deposition) 공정 및 다층 적층 시편 설계 및 제작 방법

제 1 절 직접식 에너지 적층공정

직접식 에너지 적층 공정이란 금속 3D 프린팅 공정중 하나로 금속 소재의 분말을 레이저클레딩 (Laser cladding) 방식을 기반으로 하여 적층시키는 공정으로 Fig. 3 와 같이 모재 재료위에 고출력 레이저를 조사하여 순간적으로 용융 풀 (melting pool) 을 생성한 후 금속 분말을 공급하여 금속 분말을 완전히 용융시켜 layer-by-layer 로 적층하는 원리로 제작이 된다. CAD 를 이용하여 설계 후 적층 단층데이터 및 공구 경로를 산출하여 3D CAD 모델과 동일한 3 차원 형상이 제작된다. 이때 한 적층 층의 두께는 0.25 mm 이다. 이후 거칠고 불안정한 조직을 가지는 표면을 후가공 공정을 통하여 가공하여 최종 제품을 제작한다. 이러한 직접식 에너지 적층 공정을 이용하면 기존의 가공법으로 제조하기 힘든 형상이나 층마다 다양한 재료를 적용하여 기능성 층을 가지는 제품을 손쉽게 제작할 수 있으며 기존에 존재하는 3 차원 형상 위에 적층할 수 있다는 장점을 가져 유지/보수를 위한 수리 및 국부적으로 기능적 표면층을 적층할 수 있다.

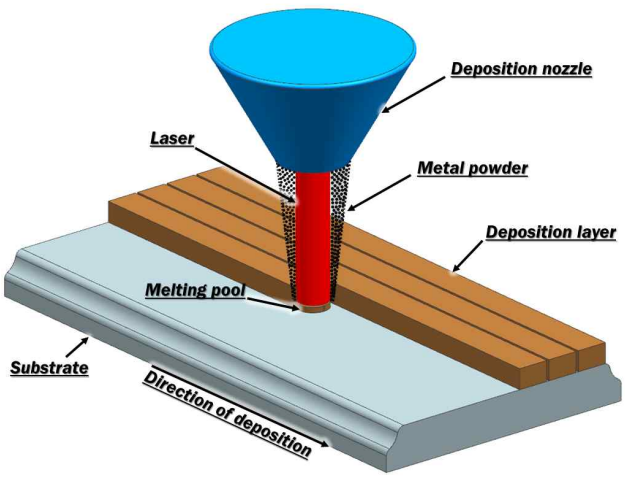


Fig. 3 Schematic diagram of DED process

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 2 절 다층 적층 시편 설계 및 제작

1. 금형 혼합 손상 패턴 방지를 위한 다층 적층된 낙하 충격 시험 시편

금속 3D 프린팅 공정으로 하드페이싱을 하는 경우 충격으로 인하여 발생할 수 있는 박리/균열/변형 등의 분석이 필요하다. 직접식 에너지 적층 공정에서 제작된 제품의 내충격성을 분석하기 위하여 평면 충격 경계 조건에서 반복적 낙하 충격을 부가하는 내충격 시험 시편을 폭 (W) 45 mm, 길이 (D) 25 mm, 높이 (H) 78 mm 로 설계하였으며 다층 적층 구조는 Fig. 4 와 같다. 시편 제작에 적용한 재료는 Table 1 과 같다. SKD 61 소재의 모재를 제작하여 상부에 기능성 소재를 적층하였다. 하드페이싱층 (HL,

Table 2 Materials of deposition layer

	materials		
	3 Layer	4 Layer (type 1)	4 Layer (type 2)
HL	Stellite 21	Stellite 21	Stellite 21
TSCL	Stellite 21 (50 wt. %) + SKD 61 (50 wt. %)	Stellite 21 (50 wt. %) + P 21 (50 wt. %)	P 21 (50 wt. %) + SKD 61 (50wt. %)
DDL	-	P 21	P 21
Substrate	SKD 61	SKD 61	SKD 61

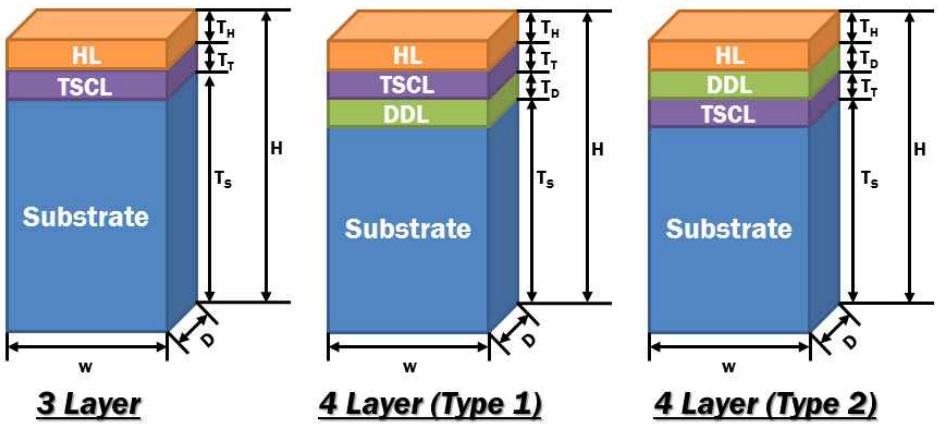


Fig. 4 Design of repeated impact specimens

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Hardfacing layer) 은 내마모성이 우수하고 고온 경도가 우수한 Stellite 21 소재를 사용하였으며 열응력 제어층 (TSCL, Thermal sterss control layer) 의 경우 상부층과 하부층의 소재를 각각 50 % 비율로 혼합하여 적용하였다. 손상저감층 (DDL, Damage diminution layer) 의 경우 P 21 소재를 적용하였다. 직접식 에너지 적층 공정의 경우 적층 두께가 5 mm 이상인 경우 잔류응력으로 인하여 균열 및 파손 등의 우려가 있어 하드페이싱층 (HL) 의 적층 두께 범위를 후가공 두께 약 1 mm 를 고려하여 적층부 치수를 Table 3 같이 선정하였다. 열응력제어층 (TSCL) 과 손상저감층 (DDL) 을 가지는 4 층 구조 (4 Layer) 의 시편 적층두께는 하드페이싱층 (HL) 2 mm, 열응력제어층 (TSCL) 과 손상저감층 (DDL) 은 각각 1 mm 의 적층두께로 설계하였다. 손상저감층 (DDL) 을 갖는 시편의 경우 손상저감층 (DDL) 의 배치에 따라 2 가지 Type 으로 설계하였으며 시편 제작의 절차는 Fig. 5 와 같다.

Table 3 Dimension of drop weight impact experiments specimens

	3 Layer	4 Layer (type 1)	4 Layer (type 2)
W	45	45	45
D	25	25	25
T_H (mm)	2	2	2
T_T (mm)	1	1	1
T_D (mm)	-	1	1
T_S (mm)	75	74	74
H (mm)	78	78	78

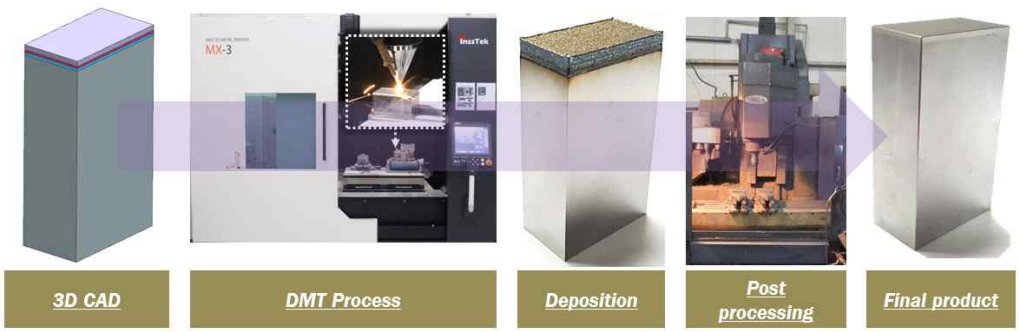


Fig. 5 Process of direct energy deposition

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

2. 금형 혼합 손상 패턴 방지를 위한 다층 적층된 샤르피 (Charpy) 충격 시편

기능성 소재의 다층 적층 시편의 순수 충격 강도 분석을 위하여 ASTM E 23 규격을 준수하여 Fig. 6 와 같이 폭 (W) 55 mm, 길이 (D) 10 mm, 높이 (H) 10 mm 크기의 노치가 없는 샤르피 충격 시험 시편을 설계하였으며 조건별 적층층 두께는 Table 4 와 같다. 하드페이싱층 (HL) 의 두께는 2 mm 이며 열응력제어층 (TSCL) 의 두께 (T_T) 는 1 mm 이다. 4 layer 시편의 경우 충격 하중을 견디기 위한 기능성 층인 손상저감층 (DDL) 의 두께 (T_D) 를 1-3 mm 범위로 설계하여 손상저감층 (DDL) 의 적층두께와 배치에 따른 충격 특성을 분석하였다. 샤르피 (Charpy) 충격 시편 모재의 두께 (T_S) 범위는 총 4-8 mm 의 범위를 가진다. 해당 두께를 갖는 모재를 제작하여 직접식 에너지 적층 공정을 이용하여 시편 제작시 적층 과정 중에 잔류응력으로 인하여 변형이 발생하게 되며 균열 및 파손의 우려가 있으며 변형으로 인하여 시편제작이 불가능하다. 때문에 이를 고려하여 61 mm × 40 mm × 64 mm 의 모재를 제작하여 59 mm × 38 mm 면적으로 적층을 수행하여 방전/연삭 가공 공정을 이용하여 후가공을 수행해 조건별 각각 3 개씩의 샤르피 충격 시편을 제작하였다.

Table 4 Dimension of Charpy impact experiments specimens

	3 Layer	4 Layer DDL 1 mm (type 1)	4 Layer DDL 2 mm (type 1)	4 Layer DDL 3 mm (type 1)	4 Layer DDL 1 mm (type 2)	4 Layer DDL 2 mm (type 2)	4 Layer DDL 3 mm (type 2)
W	55	55	55	55	55	55	55
D	10	10	10	10	10	10	10
T_H (mm)	2	2	2	2	2	2	2
T_T (mm)	1	1	1	1	1	1	1
T_D (mm)	-	1	2	3	1	2	3
T_S (mm)	7	6	5	4	6	5	4

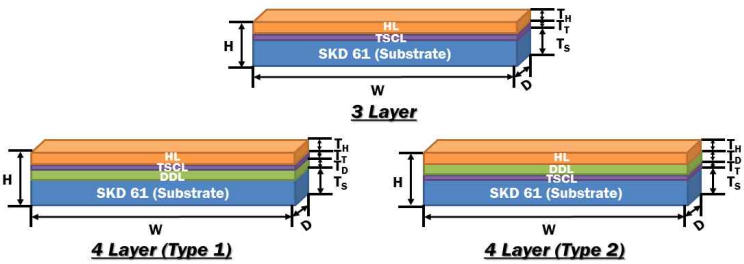


Fig. 6 Design of specimens for Charpy impact experiments

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 3 장 금형 혼합 손상 패턴 방지를 위한 다층 적층된 구조의 충격 특성 평가

제 1 절 반복 낙하 충격 시험

1. 평면 충격 경계조건에서의 내충격 시험 방법

다층 적층 구조 시편의 반복적 평면 낙하 충격 시험을 위하여 Fig. 7 의 충격 시험 장치를 이용하여 시험을 수행하였다. 시험에 사용된 변수는 Table 5 와 같다. 사용된 로드셀은 5 Ton 용량의 충격 하중을 측정할 수 있으며 낙하 충격 횟수는 500 회를 수행하였다. 시편 및 치구의 순간적 변형 및 움직임을 관찰하기 위하여 초당 10,000 프레임 촬영이 가능한 고속 카메라를 이용하여 실시간으로 모니터링 및 데이터 취득을 하였다. 충격하중이 부가되는 단위면적 (A) 는 약 1007.3 mm^2 이고 이때의 중력가속도 (G) 는 9.8 m/s 이다. 로드셀의 최대하중을 고려하기위해 기초실험을 수행하여 낙하 충격 높이를 250 mm 로 수립하였다. 충격 하중에 따른 시편의 외관분석을 광학현미경을 이용하여 50 회 충격 후 1 회 실시하였다. 시편의 내부 균열 발생여부를 미세 초점 3

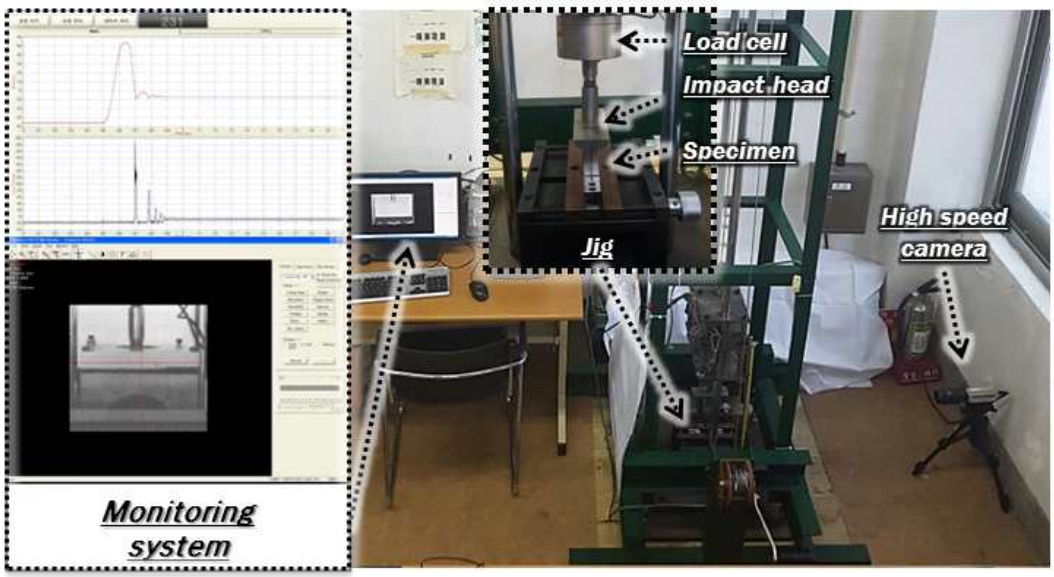


Fig. 7 Experimental set-up of repeated impact experiments

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table 5 Parameter of repeated impact experiments

Type of specimen	Shot of impact	Loadcell capacity (Ton)	Impact weight (kg_f)	A (mm^2)	G (m/s^2)
3 Layer	1,000	5	14.2	1007.3	9.81
4 Layer type1	1,000	5	14.2		
4 Layer type2	1,000	5	14.2		

차원 X-ray CT 투시 검사기를 이용하여 분석하였으며 내부 결함 예상부를 SEM 을 이용하여 파괴 분석하였다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

2. 평면 충격 경계조건에서의 내충격 시험 결과 및 고찰

혼합 손상 패턴 방지를 위한 다층 적층 구조인 3 층 구조 (3 Layer) 및 4 층 구조 (4 Layer) 시편에 대하여 평면형 낙하 충격을 통한 500 회의 반복 하중 (F) 이 부가된 충격 시험의 결과는 Fig. 8 과 같으며 식 (1) 을 이용하여 계산된 단위 면적 (A) 당 중력 가속도 (G) 를 고려한 충격 하중 (P) 의 결과는 Fig. 9 와 같다.

$$\frac{F}{A} \times G = P \tag{1}$$

반복적 낙하 충격이 부가됨에 따라 단위면적당 충격하중은 약 44.4 MPa 였으며 이는 실제 열간 성형 공정에서 부가되는 충격하중의 약 21 % 의 수준이였다. 5 Ton 용량의 로드셀을 사용하여 최대 하중으로 500 회의 반복 충격이 부가하는 동안 적층 재료 및 구조가 다른 시편의 최대 하중이 유사하고 하중 변화가 거의 없는 것으로 보아 하드페이싱층 (HL) 과 열응력제어층이 적층된 3 층 구조 (3 Layer) 와 하드페이싱층 (HL), 열응력 제어층 (TSCL) 과 손상저감층 (DDL) 이 적용된 4 층 구조 (4 Layer) 의

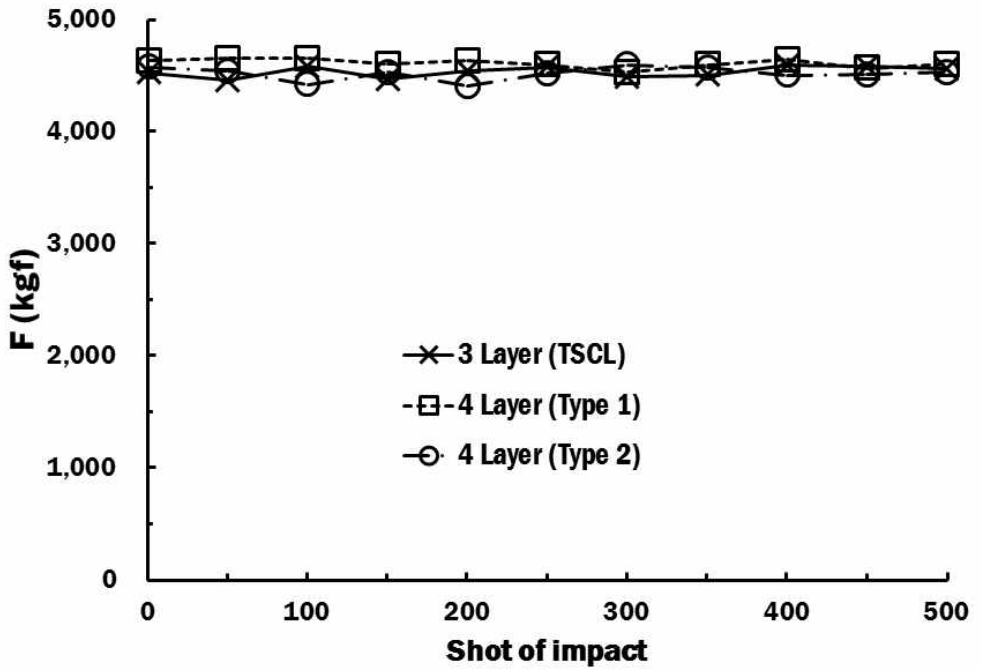


Fig. 8 Impact force of repeated impact experiments

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

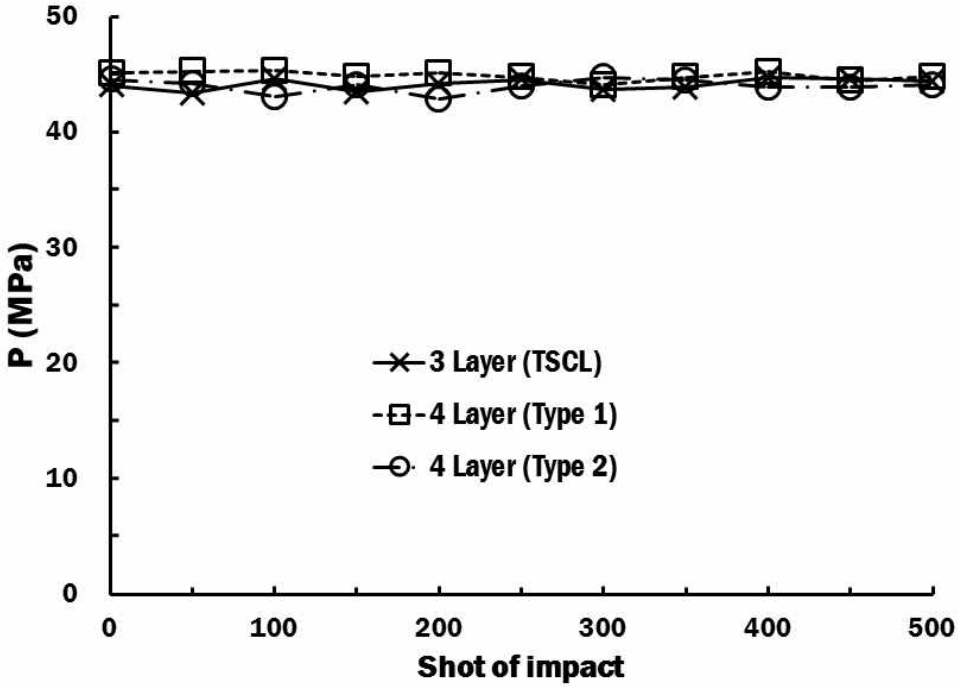


Fig. 9 Impact Load of repeated impact experiments

시편의 표면 및 적층 경계부에서 갑작스러운 파손이나 균열생성 및 성장이 발생하지 않음을 알 수 있다. 또한 적층부 재료 및 배치에 따른 내충격 특성이 거의 차이가 없음을 알 수 있다. 평면형 반복 충격 하중 부하에 따른 다층 적층 구조를 가진 시편의 적층 재료 및 배치에 따른 결함 여부를 분석하기 위하여 내, 외부의 결함 검사를 수행하였다.

Collection @ chosun

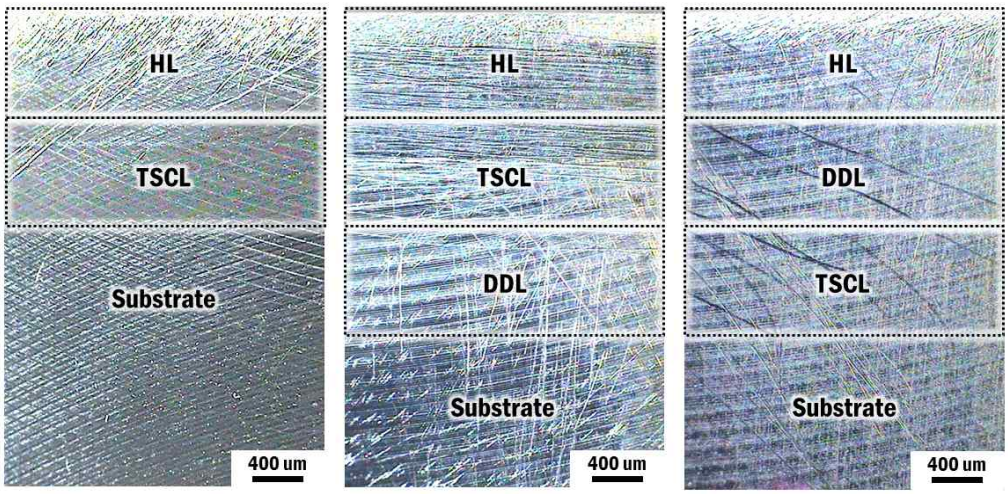
조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

3. 평면 충격 경계조건에서의 내충격 시험 후 시편의 외부 균열검사

반복적 하중이 부가되는 평면형 낙하 충격 시험 후 시편에 대하여 Fig. 10 의 광학 현미경인 Xi-cam 을 이용하여 외부 결함 발생여부에 대하여 분석하였다.

3 층 구조 (3 Layer) 및 4 층 구조 (4 Layer) 로 이루어진 시편에 대하여 평면형 충격 하중을 반복적으로 500 회 충격 시험을 수행한 후 적층 경계부 및 충격부 외관 결함 발생 분석 결과는 Fig. 11 과 같이 시편 외부의 스크레치만 발견되었으며 외부의 균열 및 결함은 발생하지 않음을 알 수 있다.

Fig. 10 Microscope (Xi-Cam)



(a) 3 Layer (b) 4 Layer (Type 1) (c) 4 Layer (Type 2)

Fig. 11 Morphologies of external surface of specimens

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

4. 평면 충격 경계조건에서의 내충격 시험 후 시편의 비파괴 내부 균열검사

반복적 평면 낙하 충격 시험 후 시편에 대하여 Fig. 12 과 같은 미세초점 3 차원 X-ray CT 장치를 이용하여 내부 결함 발생여부에 대하여 분석하였다.

반복 충격 시험 후 3 층 구조 (3 Layer) 와 4 층 구조 (4 Layer) 시편의 내부 투과를 수행한 결과 Fig. 13 과 같이 시편 내부에서 주름이 관찰되었다. Fig. 13 (a) 와 같이 3 층 구조 (3 Layer) 시편의 경우 상면에서부터 깊이방향으로 1.5-1.8 mm 영역에서 시편 모서리에 미세한 주름이 발생하였으며 Fig. 13 (b), (c) 와 같이 4 층 구조 (4 Layer) 시편 Type 1 의 경우 1.1-3.2 mm, Type 2 의 경우 1.5-2.3 mm 영역에서 주름이 관찰되었다. 내부결함 분석을 위하여 내부 주름 발생 영역을 가공하여 파괴 검사를 수행하였다.

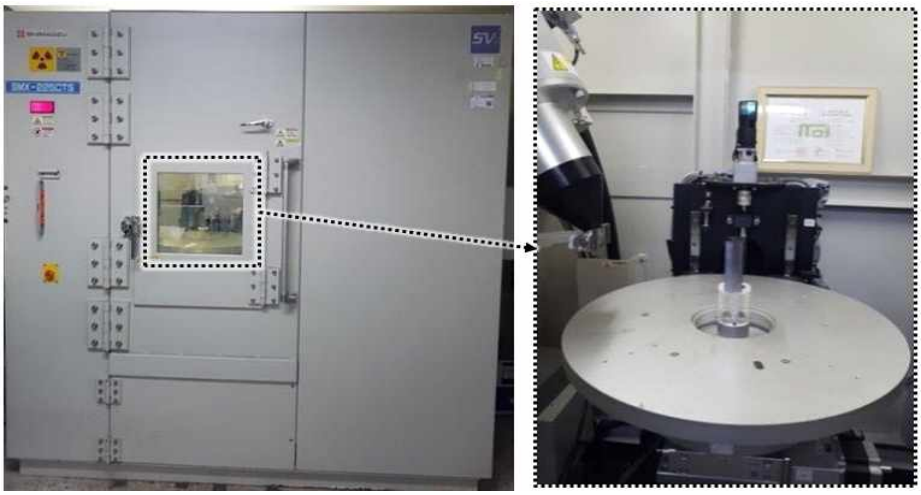
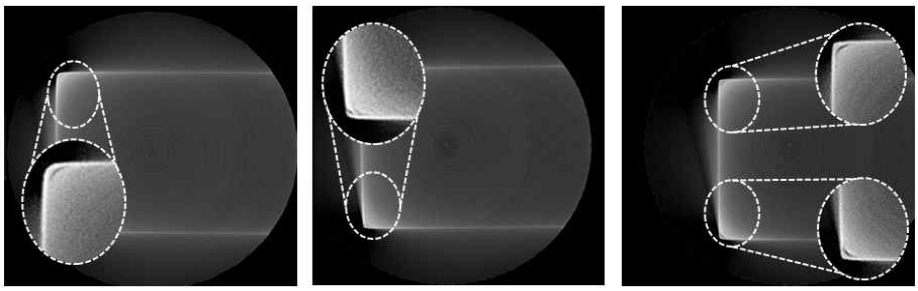


Fig. 12 Experimental set-up of internal defect analysis



(a) 3 Layer (b) 4 Layer (Type 1) (c) 4 Layer (Type 2)

Fig. 13 X-ray CT image of specimens

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

5. 평면 충격 경계조건에서의 내충격 시험 후 시편의 파괴 내부 균열 검사

혼합 손상 패턴 방지를 위한 다층 적층 구조를 가지는 시편에 대하여 반복 하중이 부가되는 평면형 낙하 충격 시험을 수행한 후 내부 결함 예상 영역을 절단 가공하여 Fig. 14 의 HITACHI 사의 주사전자현미경인 TM-1000 장비를 이용하여 파괴 검사를 수행하였다.

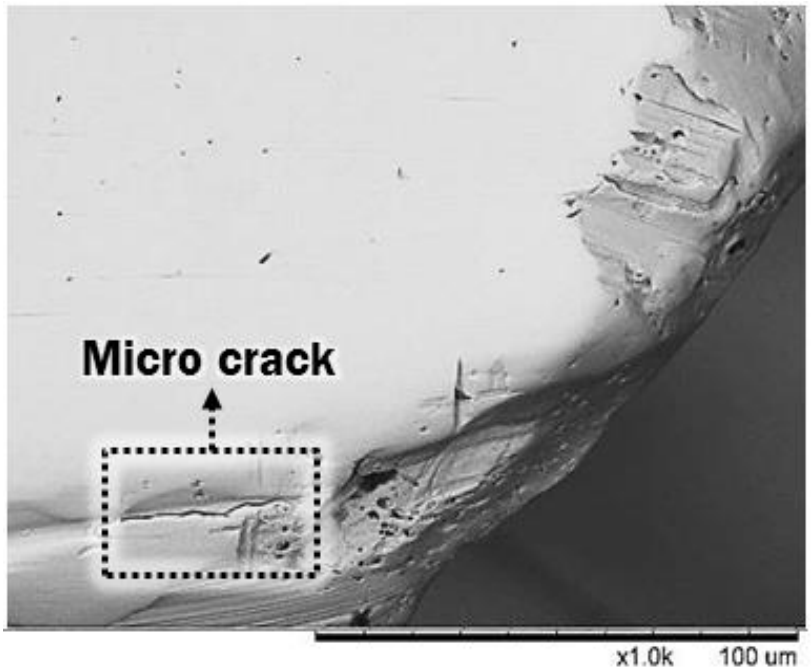
파괴 검사를 수행한 결과는 Fig. 15 와 같다. 3 층 구조 (3 Layer) 시편의 경우 Fig. 15 (a) 와 같이 시편 상부에서 1.5 mm 깊이에서 38.3 um 길이의 미세 균열이 발견되었다. 4 층 구조 (4 Layer) 시편의 경우 손상저감층의 배치가 Type 2 의 경우 Fig. 15 (c) 와 같이 시편 상부에서 1.8 mm 깊이에서 113 um 길이의 미세 균열이 발견되었다. 손상저감층 배치 Type 1 의 경우 시편 상부에서 2.0 mm 깊이에서 Fig. 15 (b) 와 같이 파괴검사 결과 미세 균열이 발견되지 않았다.

이와 같은 파괴 시험의 결과로 반복 하중이 부가되는 평면형 낙하 충격 시험을 통하여 내충격 특성이 우수한 다층 적층 구조는 내부 균열이 발견되지 않은 4 층 구조의 (4 Layer) 의 Type 1 배치임을 도출할 수 있었다.

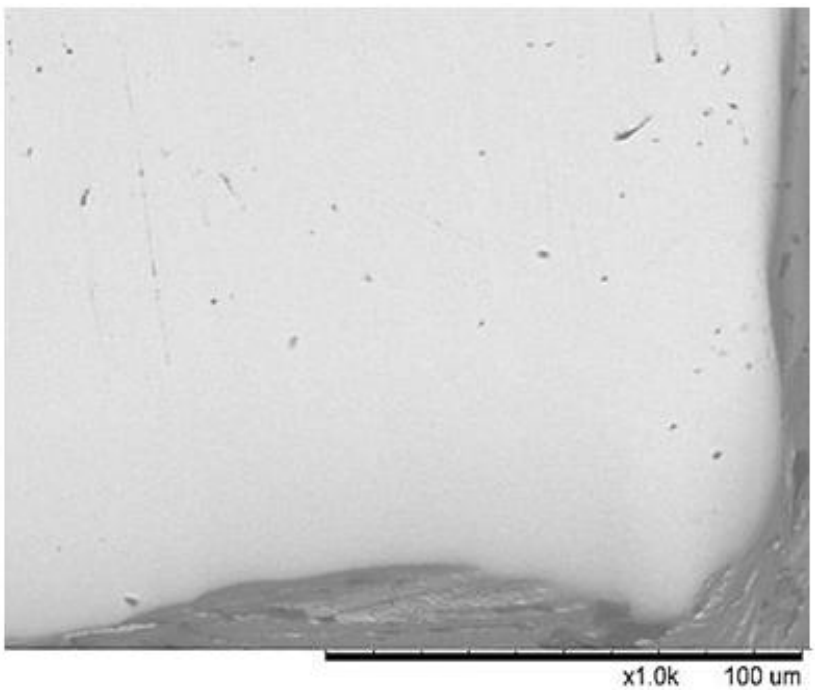
Fig. 14 Experimental set-up of scanning electron microscope

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



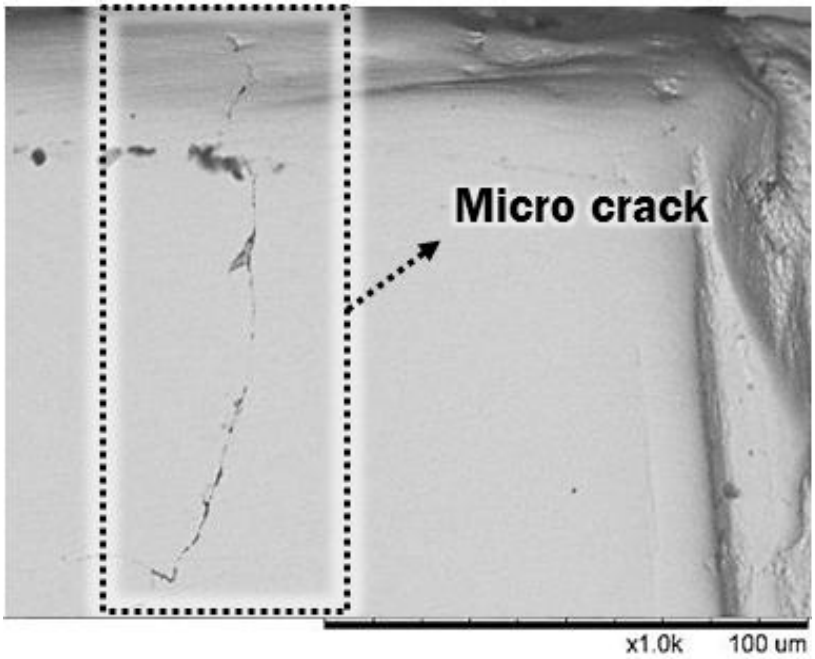
(a) 3 Layer specimen



(b) 4 Layer (Type 1) specimen

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



(c) 4 Layer (Type 2) specimen

Fig. 15 SEM image of internal micro crack

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 2 절 샤르피 충격 시험

1. 다층 적층 시편 샤르피 충격 시험 방법

다층 적층 구조를 가지는 시편의 순수 충격 강도 분석을 위하여 Fig. 16 의 충격 시험 장치를 이용하여 샤르피 충격 시험을 수행하였다. 시험에 적용된 변수는 Table 6 과 같이 상온에서 수행하였다. 충격 헤드의 무게는 50 kg 이며 5.42 m/s 의 속도로 낙하하여 실험이 수행되었으며 마이크로 프로세스 기반 하중 측정기를 이용하여 다층 적층 시편의 충격 에너지 흡수율을 도출하였다.

Table 6 Parameter of Charpy impact experiments

Test temperature (℃)	Pendulum head weight (kgf)	Impact velocity (m/s)	Impulse resolution (°)
20	50	5.42	0.036

Fig. 16 Experimental set-up of Charpy impact experiments

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

2. 다층 적층 시편 샤르피 충격 시험 결과 및 고찰

다층 적층 구조를 갖는 시편에 대하여 샤르피 충격 시험한 결과는 Fig. 17 과 같다. 손상저감층이 적용된 4 층 구조 (4 Layer) 의 Type 1 배치에서 손상저감층 (DDL) 두께가 1 mm 인 시편이 약 102 J 의 가장 큰 충격 에너지 흡수율을 가지는 다층 적층 구조임을 도출하였다. 4 층 구조 (4 Layer) 의 손상저감층의 배치에 따른 충격 에너지 흡수율의 변화는 Type 1 배치가 Type 2 배치보다 손상저감층 (DDL) 의 두께가 1 mm 일 때 14 %, 2 mm 일 때 4 % 그리고 3 mm 일 때 37 % 더 우수한 충격 에너지 흡수율을 가졌다. 3 층 구조 (3 Layer) 의 다층 적층 구조를 가지는 경우 4 층 구조 (4 Layer) 의 Type 1 배치의 손상저감층 두께 경우보다 13 % 낮은 충격 흡수율을 가졌으나 4 층 구조 (4 Layer) 의 Type 1 배치의 손상저감층 (DDL) 두께가 2-3 mm 일때의 경우와 거의 유사한 충격 에너지 흡수율의 결과를 얻었다. 4 층 구조의 (4 Layer) 의 Type 2 배치의 경우 3 층 구조 (3 Layer) 시편보다 충격에너지 흡수율이 낮은 결과를 얻었으며 이로 인하여 4 층 구조 (4 Layer) 에서 충격손상을 저감시키는 손상저감층의 배치 Type 2 는 적합하지 않음을 알 수 있다. 또한 4 층 구조 (4 Layer) 시편의 손상저감층의 두께가 증가함에 따라 두 가지 Type 모두 충격 에너지 흡수율이 떨어짐을 보였으며 이로 인하여 적층 두께가 증가함에 따라 충격이 부가될 때 적층 영역에서 결함이 발생하여 충격 에너지 흡수율이 떨어짐을 도출 할 수 있었다.

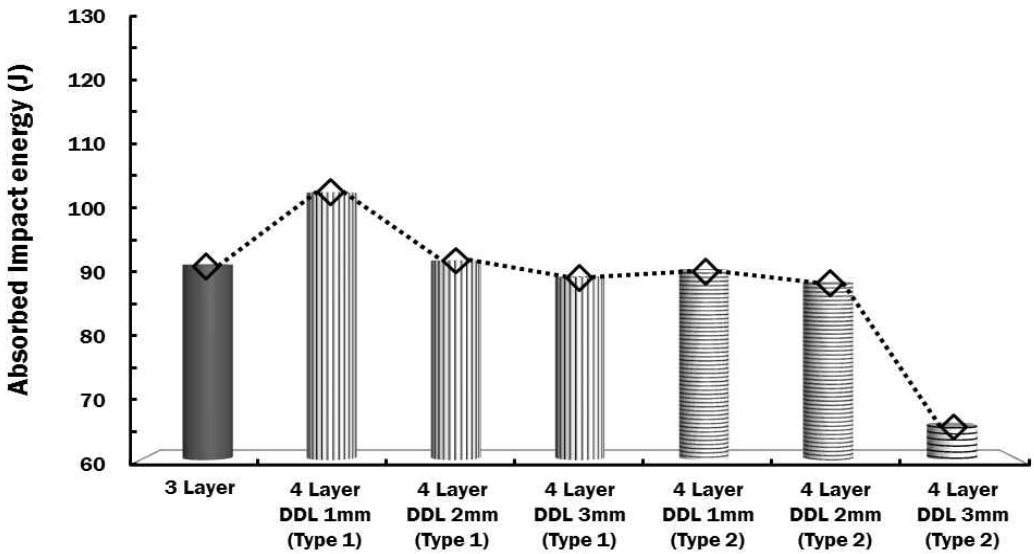


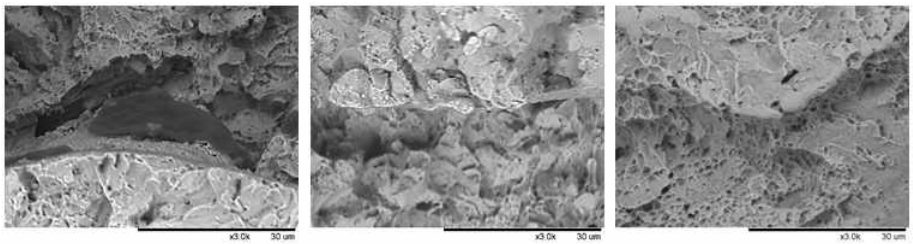
Fig. 17 Absorbed impact energy of multi-layer specimens

Collection @ chosun

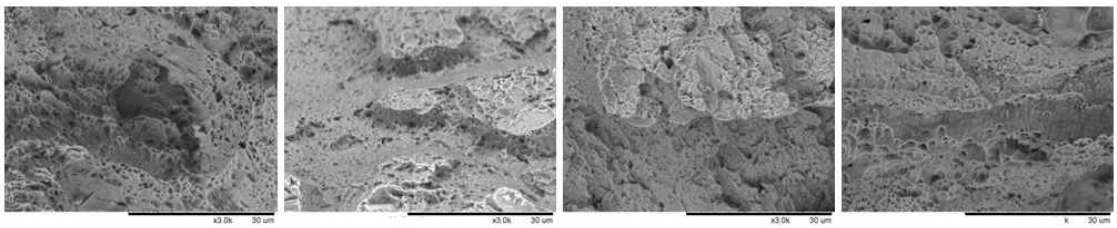
조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

3. 다층 적층 시편 샤르피 충격 시험 후 시편의 파단면 분석

다층 적층 구조를 가지는 시편의 샤르피 충격 시험 결과 손상 저감층의 두께가 증가함에 따라 충격에너지 흡수율이 감소한다. 이는 충격시 적층 영역에서 결함이 발생함을 예상할 수 있다. 때문에 적층부 파단면 분석이 필요하며 이에 대한 결과는 Fig. 18 과 같다. Fig. 18 은 모재와 적층부의 경계를 주사전자현미경을 이용하여 촬영한 것으로 모재와 적층부 경계가 분리되며 파손되었다. 손상저감층 (DDL) 의 두께가 증가할수록 낮은 충격 에너지 흡수율을 가지며 4 층 구조 (4 Layer) 의 Type 2 배치에서 손상저감층 (DDL) 두께가 3 mm 인 경우 가장 높은 충격 흡수율을 가진 4 층 구조 (4 Layer) 의 Type 1 배치에서 손상저감층 (DDL) 두께가 1 mm 의 경우보다 약 64 % 수준의 충격 에너지 흡수율을 가졌다.



(a) 3 Layer (b) 4 Layer Type 1, DDL 1 mm (c) 4 Layer Type 1, DDL 2 mm



(d) 4 Layer Type 1, DDL 3 mm (e) 4 Layer Type 2, DDL 1 mm (f) 4 Layer Type 2, DDL 2 mm (g) 4 Layer Type 2, DDL 3 mm

Fig. 18 Fracture characteristics of Charpy impact specimens

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 4 장 플라즈마 전자빔을 이용한 적층 시편 표면 후처리 공정

제 1 절 플라즈마 전자빔을 이용한 적층면 재생성 방법

플라즈마 전자빔을 이용하여 재용융 공정 실험을 위하여 Fig. 19 의 SODICK 사의 PF 32 B 펄스형 플라즈마 전자빔 장비를 이용하여 적층면 재용융 실험을 수행하였다.

실험에 사용된 변수는 Table 7 과 같다. 플라즈마 전자빔의 직경은 60 mm 이고 유효직경은 20 mm 이다. 1 펄스 조사 시간은 2 μsec 이고 반복된 펄스의 시간차는 10 초이다. 재용융 공정에 사용된 플라즈마 전자빔의 방출 전압 (V) 은 25-35 KeV 의 범위이며 해당 범위에서 에너지 밀도 (ρ_e) 는 7-13.5 J/cm^2 이고 반복적 조사 횟수 (N) 는 20-200 회의 범위로 적용하여 재용융 공정 실험을 수행하였다.

Table 7 Parameter of re-melting process

Beam diameter (mm)	60
Effective beam diameter (mm)	20
Plasma gas	Argon
Pressure of the argon gas inside the chamber (Pa)	0.05
Pulse irradiation time (μsec)	2
Interval of repeating pulse (sec)	10
V (KeV)	25-35
ρ_e (J/cm^2)	7-13.5
N	20-200

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Fig. 19 Apparatus of plasma electron beam system

플라즈마 전자빔 재용융 공정의 개념도는 Fig. 20 과 같다. 초기시편에 직경 60 mm, 유효직경 20 mm 플라즈마 전자빔을 시편 표면에 균일하게 조사하기 위하여 1 펄스 조사한 후 20 mm 이동하여 1 펄스 조사하였다. 전자빔의 이동과 에너지 충전은 동시에 진행되며 이때의 시간은 10 초이다. 초기 시편에 1 펄스 조사 후 20 mm 이동 후 1 펄스 조사하는 과정을 1 회 조사로 정의하여 반복적으로 플라즈마 전자빔을 조사하여 재용융 공정 실험을 수행하였다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

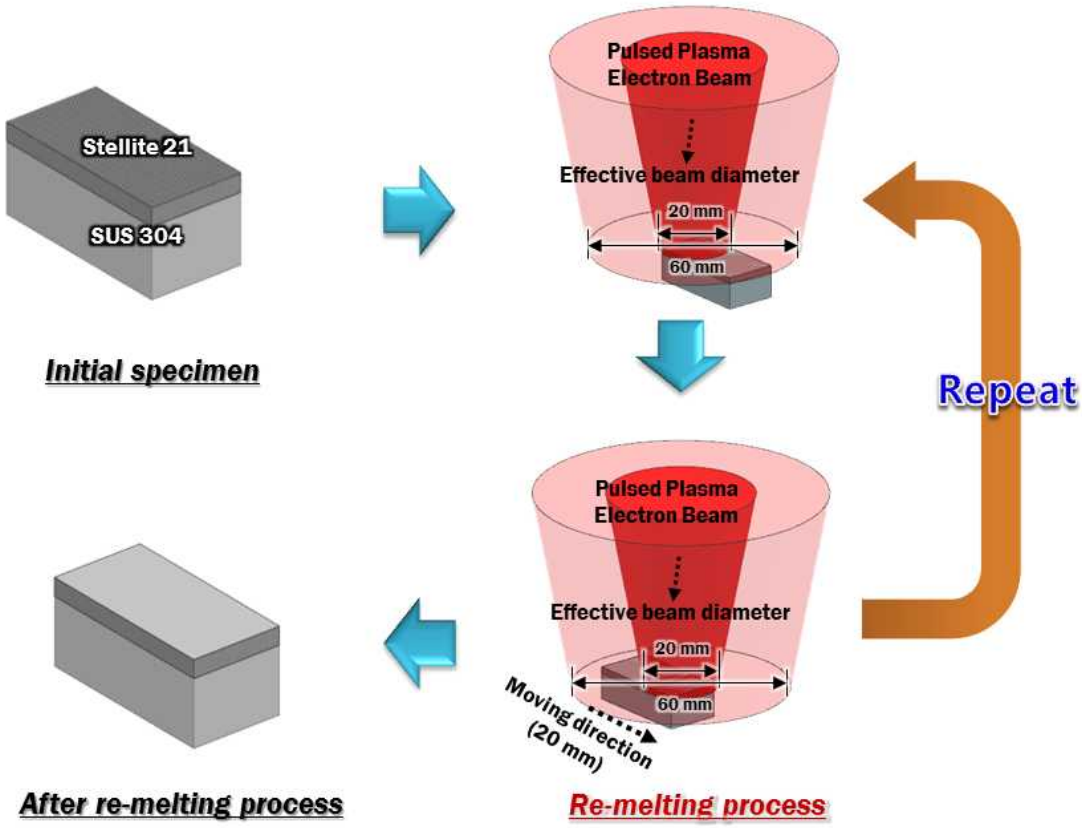


Fig. 20 Schematic diagram of Re-melting process

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 2 절 플라즈마 전자빔을 이용한 적층면 재생성 시편 설계 및 제작

플라즈마 전자빔을 이용하여 재용융 공정 실험을 위하여 Fig. 21 과 같이 시편을 설계 하였다. 직접식 에너지 적층 (DED) 공정 적층부 표면을 재용융 특성을 분석하기 위하여 모재의 소재는 적층시 결함 발생이 적은 소재인 SUS 304 를 적용하였다. 모재의 크기는 3 차원 금속 적층 공정으로 제품 제작시 플라즈마 전자빔의 유효 직경보다 큰 규모로 제작되는 경우를 고려하여 30 mm × 15 mm × 8 mm 크기로 설계하였다. 모재 상부에 직접식 에너지 적층 공정을 이용하여 Stellite 21 소재를 2 mm 적층하여 시편을 제작하였다. Stellite 21 소재를 적층하기 위한 직접식 에너지 적층 공정의 열원은 370 W 의 레이저가 사용되었으며 분말 공급 속도는 4 g/min, 공급 가스는 아르곤이 사용되었다. 적층 분말과 공급 가스의 비율은 1:4 이며 레이저 열원의 이동 속도는 0.85 m/min 이다. 이때 한층의 적층층은 0.25 mm 이며 Layer-by-Layer 의 형태로 반복되며 적층하여 제작된다. 직접식 에너지 적층 공정에서 Stellite 21 을 적층하여 제작된 제품의 적층면은 10 점 평균 거칠기 (R_z) 약 107 um 이며 중심선 평균 거칠기 (R_a) 기준 약 16 um 거친 표면을 가지고 있다.

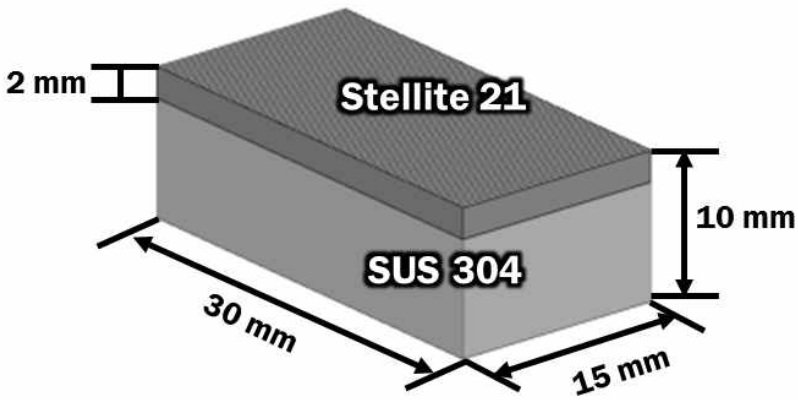


Fig. 21 Design of re-melting process specimen

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 3 절 플라즈마 전자빔을 이용한 적층 시편 표면 재생성 실험 결과 분석

1. 플라즈마 전자빔을 이용하여 재생성된 적층 시편의 표면 조도 분석

직접식 에너지 적층 공정에서 제작된 시편에 플라즈마 전자빔을 조사하여 재용융 공정 실험을 수행한 결과 적층시편의 표면은 Fig. 22 와 같다. 적층면의 표면이 플라즈마 전자빔으로 빠르게 재용융 됨에 따라 표면의 이물질은 증발되고 적층시 완전한 용융이 되지 않아 표면에 요철 형태로 남아있는 금속 분말이 용융되어 평탄화됨을 확인할 수 있다. 이러한 재용융된 시편의 중심부 표면을 광학현미경을 이용하여 분석/고찰하였다. Fig. 23 은 초기시편 표면 형상이며 Fig. 24 는 조사 횟수 (N) 20 회 일때의 방출 전압 (V) 에 따른 표면 형상이다. 플라즈마 전자빔을 20 회 조사하였을 때 표면의 방출 전압

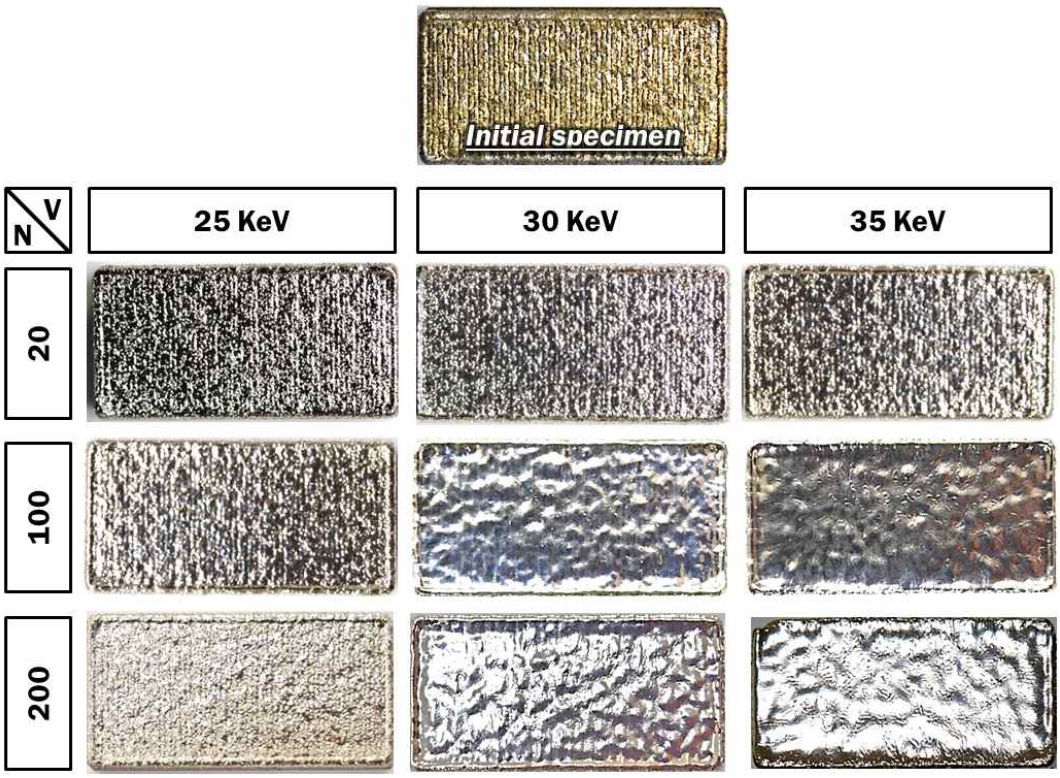


Fig. 22 Variation of re-melted surface

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

(V) 증가함에 따라 용융되지 않은 분말요철이 재용융됨을 관찰할수 있었다. Fig. 25 는 플라즈마 전자빔을 100 회 조사 (N) 하였을때의 재용융 표면형상이다. 방출 전압 (V) 이 증가할수록 재용융된 표면은 분말 요철이 재용융되어 평탄화 됨과 함께 표면에 주름이 발생함을 관찰할 수 있으며 국부적인 함몰부의 양이 증가함을 관찰할 수 있다. 이는 전자빔이 조사되며 전자의 충돌로 인한 것이며 Fig. 26 의 200 회 조사 (N) 한 시편의 경우 이러한 국부적인 함몰부의 영역이 더욱 많아짐을 알 수 있었다.

광학현미경을 이용하여 표면 형상을 분석한 결과 동일 방출 전압 (V) 조건에서 조사 횟수 (N) 가 증가할수록 재용융량이 증가하여 표면 요철은 감소하지만 표면에 주름이 발생하며 동시에 국부적으로 함몰부가 발생함을 알 수 있었다.

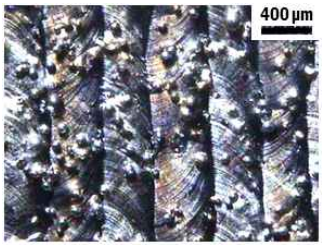
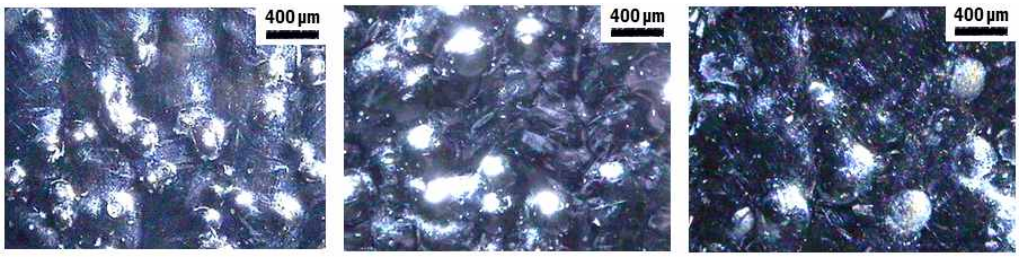
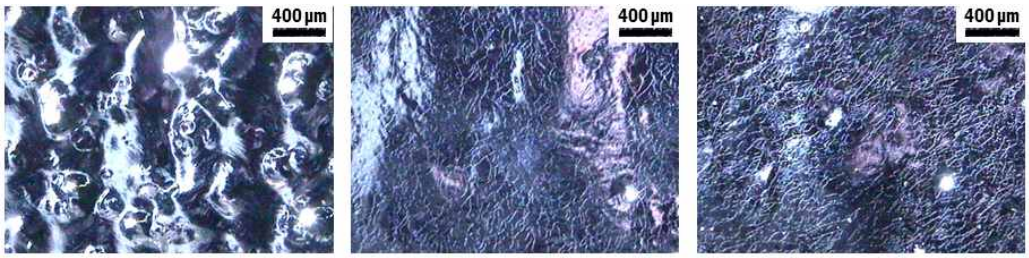


Fig. 23 Surface morphology of initial specemen



(a) V = 25 KeV (b) V = 30 KeV (c) V = 35 KeV

Fig. 24 Surface morphology of re-melted specimens (N = 20 shot)

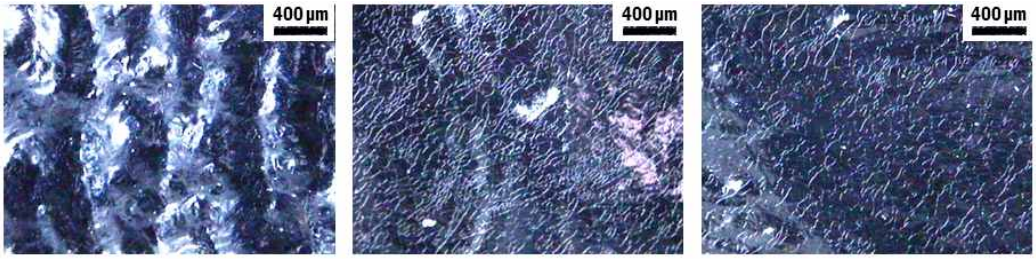


(a) V = 25 KeV (b) V = 30 KeV (c) V = 35 KeV

Fig. 25 Surface morphology of re-melted specimens (N = 100 shot)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



(a) V = 25 KeV (b) V = 30 KeV (c) V = 35 KeV

Fig. 26 Surface morphology of re-melted specimens (N = 200 shot)

재용융된 시편의 표면을 광학현미경으로 분석을 수행하는 경우 표면의 단차와 빛의 반사로 인하여 명확하게 초점이 맞추어지지 않는 단점이 있다. 때문에 Fig. 27 의 NANO SYSTEM 사의 NV-3000 장비를 이용하여 비접촉식 3 차원 표면 특성 변화 분석을 수행하였다.

Fig. 28 은 초기시편의 표면형상이다. 플라즈마 전자빔을 20 회 조사 횟수 (N) 의 방출 전압 (V) 별 표면형상은 Fig. 29 와 같다. 플라즈마 전자빔의 방출 전압 (V) 이 증가할수록 요철부가 재용융되어 표면 평탄도가 향상되었다. Fig. 30 은 플라즈마 전자빔을 100 회 조사 (N) 한 시편의 표면 형상이며 방출 전압 (V) 이 증가함에 따라 표면 요철부가 평탄화 되지만 국부적 함몰부를 관찰할 수 있었다. Fig. 31 은 플라즈마 전자빔을 200 회 조사 (N) 한 시편의 표면 형상이며 표면 요철부가 거의 재용융되어 평탄화 되고 국부적 함몰부가 존재함을 알 수 있었다. 이의 결과로 인하여 플라즈마 전자빔의 과도

Fig. 27 Experimental set-up of 3D surface profile

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

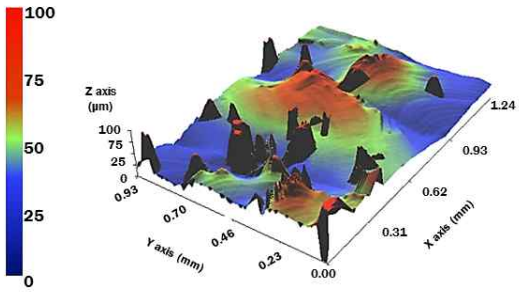
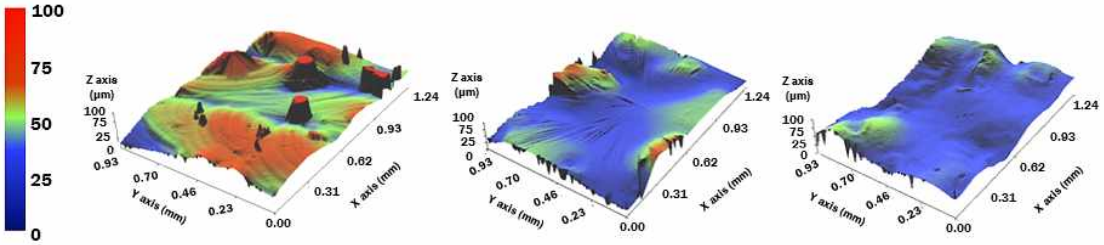
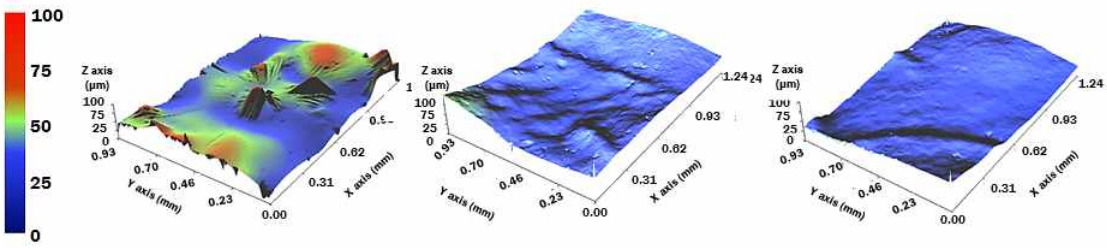


Fig. 28 Surface profile of initial specimen



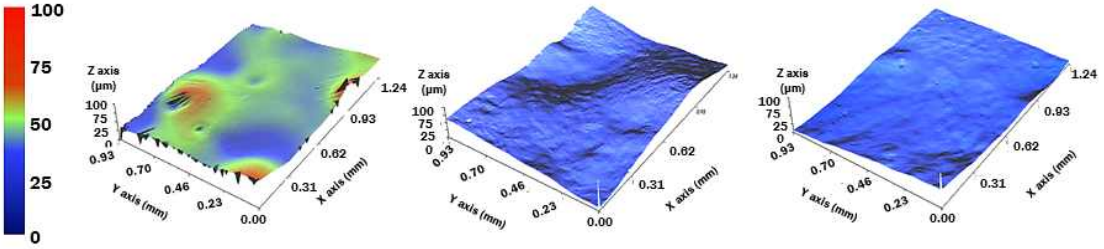
(a) V = 25 KeV (b) V = 30 KeV (c) V = 35 KeV

Fig. 29 Surface profile of re-melted specimens (N = 20 shot)



(a) V = 25 KeV (b) V = 30 KeV (c) V = 35 KeV

Fig. 30 Surface profile of re-melted specimens (N = 100 shot)



(a) V = 25 KeV (b) V = 30 KeV (c) V = 35 KeV

Fig. 31 Surface profile of re-melted specimens (N = 200 shot)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

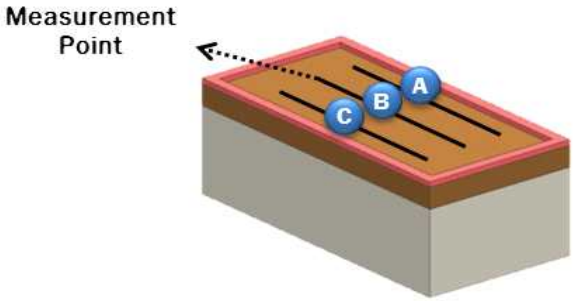


Fig. 32 Measurement position of surface roughness

한 반복 조사는 시편 표면에 국부적인 함몰부를 발생시키고 이로 인하여 표면 재용융 실험시 국부 함몰부 발생이 최소화 되도록 하여야 함을 알 수 있었다.

플라즈마 전자빔을 조사하여 재용융한 시편의 표면 거칠기를 분석하기 위하여 Fig. 33 의 MITUTOYO 사의 C 3100 접촉식 표면 거칠기 측정 장치로 재용융 시편에 대하여 표면 조도 분석을 수행하였으며 측정 위치는 Fig. 32 와 같다. 표면 재용융 시편의 표면 거칠기 측정은 ISO 1997 규격에 따라 표면 조도를 측정하였다.

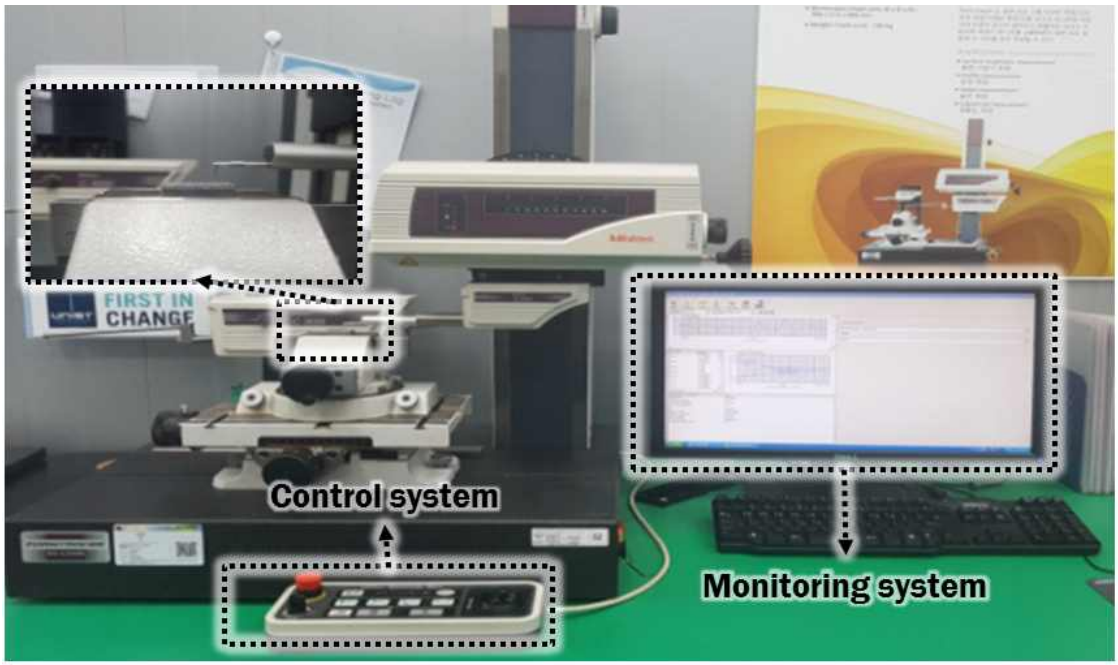


Fig. 33 Surface roughness measurement set-up of re-melted specimens

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

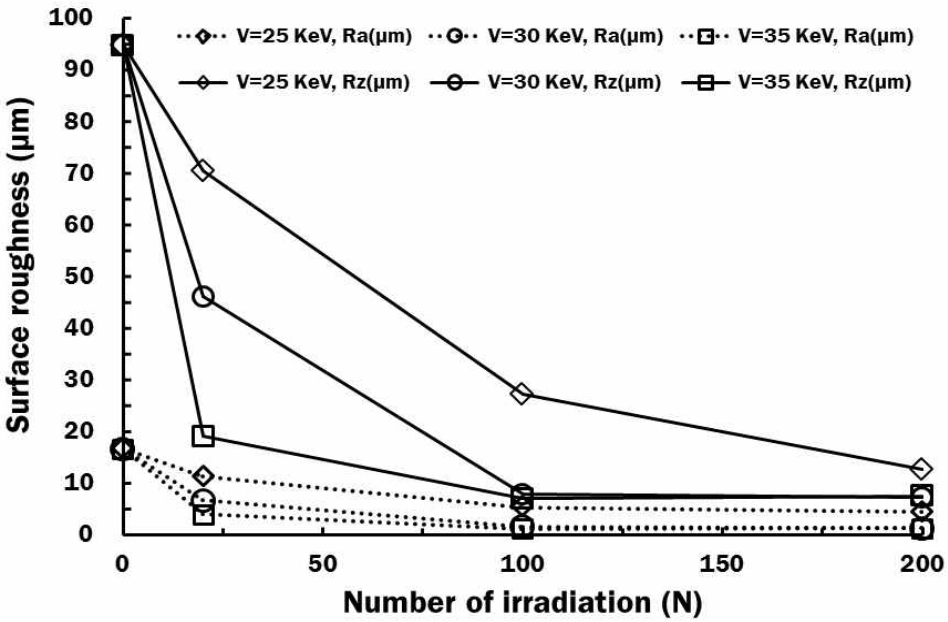


Fig. 34 Variation of surface roughness of re-melted specimens

그 결과 Fig. 34 과 같이 적층면 표면 재용융 공정을 수행할 경우 초기 시편에 비하여 표면 거칠기가 현저하게 감소함을 알 수 있었다. 방출 전압 (V) 이 증가할수록 표면 거칠기는 감소하였다. 이는 방출 전압 (V) 이 증가함에 따라 전자빔의 에너지 밀도가 증가하여 침투깊이가 깊어져 방출 전압 (V) 이 증가할수록 재용융 영역이 커지기 때문이다. 30 KeV 와 35 KeV 의 경우 조사 횟수 (N) 가 증가할수록 시편의 조도가 감소하였다. 이는 25 KeV 의 방출 전압 (V) 보다 큰 에너지 밀도로 조사됨에 따라 상대적으로 고르게 용융되었기 때문이다. 30 KeV 와 35 KeV 방출전압 (V) 의 100회, 200 회의 조사 횟수 (N) 에 의한 표면 거칠기 차이는 유사하게 측정되었으며 이는 초기 시편의 표면 거칠기보다 중심선 평균 거칠기 (Ra) 기준 약 15 %, 10 점 평균 거칠기 (Rz) 기준 약 13 % 수준이다. 조사 횟수 (N) 200 회의 35 KeV 의 방출 전압 (V) 조건의 경우 30 KeV 보다 Rz 기준 약 0.4 ㎛ 정도 보다 거친 표면이 측정되었으며 이는 전자빔의 조사에 따른 전자의 충돌로 인한 국부적 함몰부로 인한 것이다. 200 회 조사 (N) 하였을 때 30 KeV 와 35 KeV 의 방출 전압 (V) 조건의 중심선 평균 거칠기 (Ra) 차이는 거의 없었다. 표면 거칠기 위치에 따른 표면 거칠기 측정결과는 Fig. 35 과 같다. 플라즈마 전자빔의 에너지 밀도가 정규분포 형태인 Gaussian distribution 의 분포를 가짐으로 위치별 재용융 정도가 다르게 되며 에너지 밀도가 가장 높은 중심부 영역인 B 위치가 상대적으로 낮은 표면 거칠기를 가짐을 알 수 있었다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

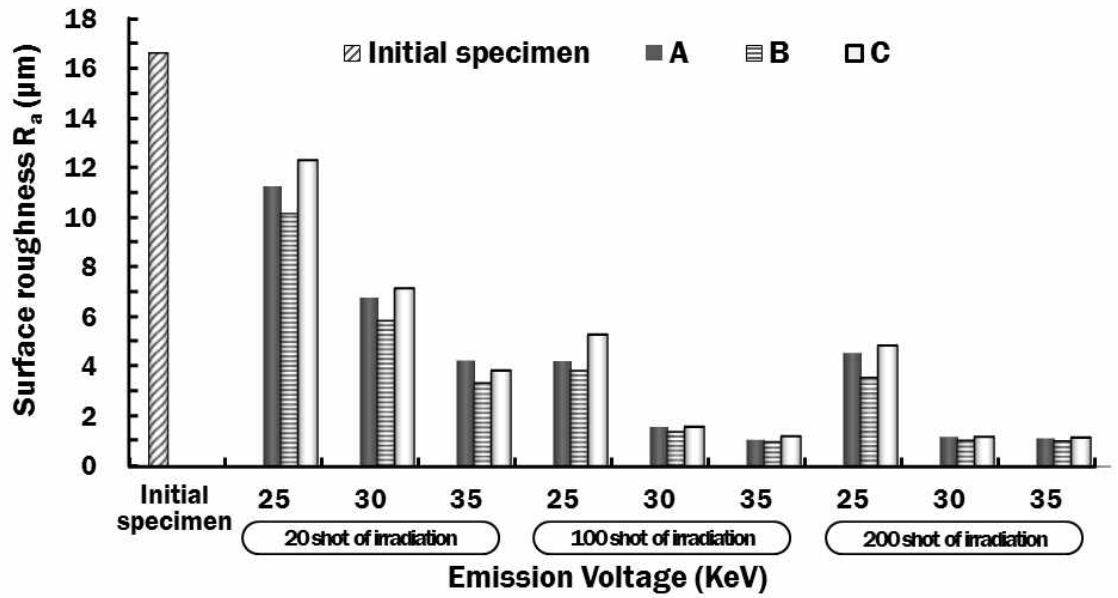


Fig. 35 Surface roughness of re-melted specimen

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

2. 플라즈마 전자빔을 이용하여 재생성된 적층 시편의 조직 변화 분석

고에너지원인 플라즈마 전자빔을 이용하여 재용융 공정 실험을 수행시 시편의 표면은 빠르게 용융되고 냉각되며 조직이 변화하고 표면의 조도/경도/부식 등의 특성이 개선된다. 때문에 명확한 분석을 위하여서 재용융 공정 실험을 수행한 시편의 표면과 단면에 대하여 조직 분석을 Fig. 14 의 주사전자현미경을 통하여서 수행하였다.

표면 조직 분석을 위하여 3,000 배율로 시편의 중심부를 SEM 을 이용하여 촬영하였다. Fig. 36 은 재용융이 이루어지지 않은 초기시편의 표면 Stellite 21 조직이다. Fig. 37 은 방출 전압 (V) 이 25 KeV 에서의 조사 횟수 (N) 에 따른 표면 조직이다. Fig. 37(a) 는 플라즈마 전자빔을 20 회 조사하였을 때 Stellite 21 조직이 용융된 후 빠르게 냉각됨에 따라 미세한 조직 사이가 연결된 후 용융된 열이 냉각되는 방향에 따라 배열된 형태를 나타내고 있다. Fig. 37(b) 는 25 KeV 방출전압 (V) 의 전자빔이 100 회 조사되었을 때 재용융 시편의 표면 조직이다. 이때 냉각방향으로 배열된 Stellite 21 조직의 패턴이 점차적으로 없어지는 형태를 나타내고 있으며 Fig. 37(c) 는 25 KeV 방출전압 (V) 의 전자빔 200 회 조사한 조직의 경우 재용융된 Stellite 21 조직이 100 회 조사 횟수를 가지는 시편보다 상대적으로 불규칙해지며 평탄화된 형태를 관찰할 수 있다. Fig. 38 은 방출 전압 (V) 이 30 KeV 일때의 표면조직이다. Fig. 38(a) 는 전자빔을 20 회 조사하였을때의 Stellite 21 조직이며 25 KeV 의 20 회 조사 시편의 표면과 유사한 재용융된 Stellite 21 조직이 배열되어있으나 비교적 조직 사이의 간격이 넓게 배열되어

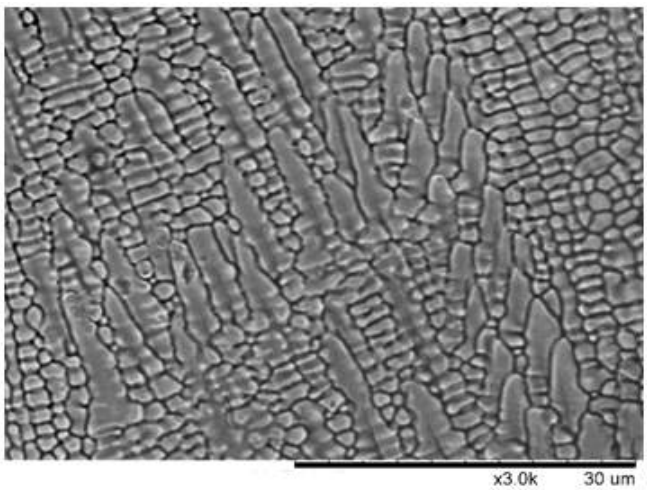
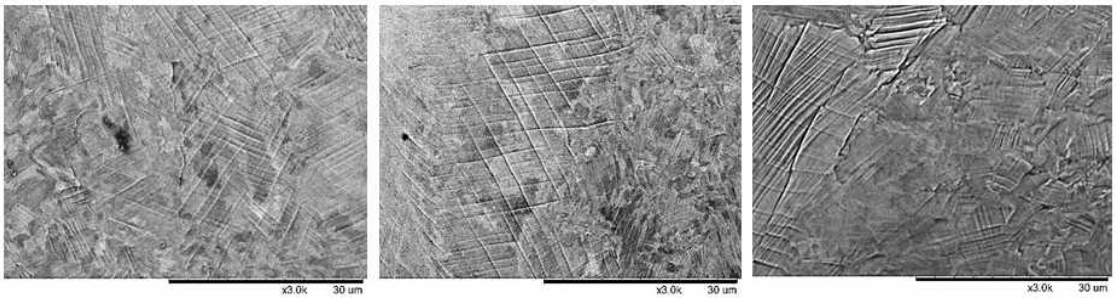


Fig. 36 Surface morphology of initial specimen

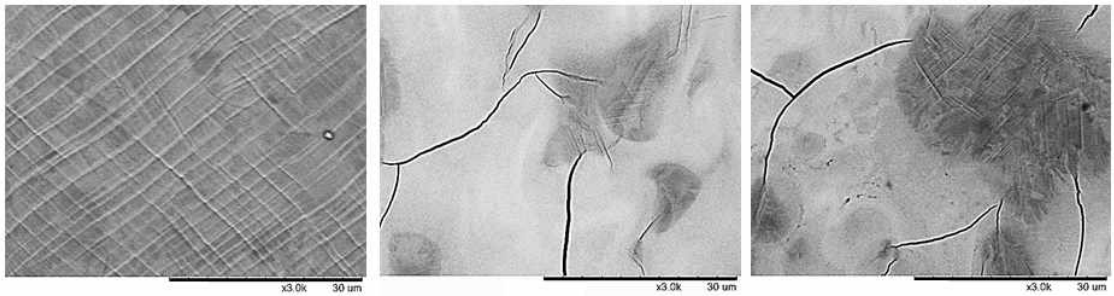
Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



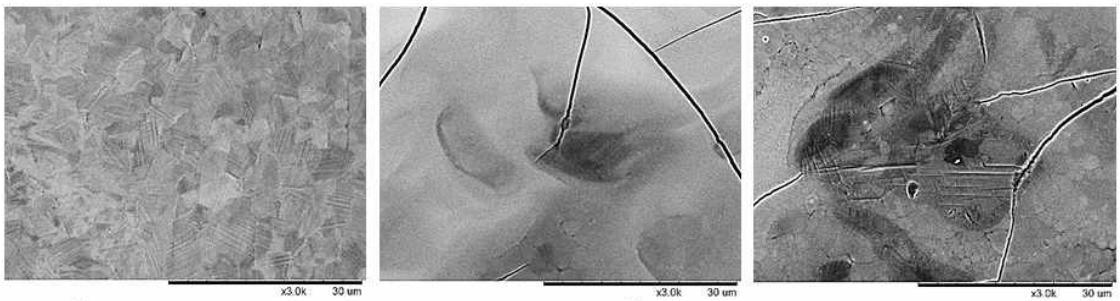
(a) N = 20 shot (b) N = 100 shot (c) N = 200 shot

Fig. 37 Surface morphology of re-melted specimens (V = 25 KeV)



(a) N = 20 shot (b) N = 100 shot (c) N = 200 shot

Fig. 38 Surface morphology of re-melted specimens (V = 30 KeV)



(a) N = 20 shot (b) N = 100 shot (c) N = 200 shot

Fig. 39 Surface morphology of re-melted specimens (V = 35 KeV)

평탄화 되어있다. Fig. 38(b) 와 Fig. 38(c) 는 30 KeV 방출전압 (V) 플라즈마 전자빔의 조사 횟수 (N) 가 각각 100 회 와 200 회의 표면 조직이며 재용융된 Stellite 21 조직의 패턴이 없어지며 평탄화된 형태를 나타낸다. 이는 보다 고온에서 용융된 이후 빠르게 냉각됨에 따라 조직이 매우 미세해지며 평탄화되기 때문이다. 플라즈마 전자빔의 방출 전압 (V) 이 30 KeV 이고 조사 횟수 (N) 가 100회 이상인 경우 시편의 표면에 균열이

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

발생하였다. Fig. 39 는 방출 전압 (V) 이 35 KeV 일때의 표면 조직이다. Fig. 39(a) 는 조사 횟수 (N) 20 회의 표면 조직이며 상대적으로 다른 방출전압 (V) 조건들에 비하여 높은 온도에서 재용융후 냉각되어 재용융된 Stellite 21 조직이 불규칙하게 배열되어 있다. Fig. 39(b) 와 Fig. 39(c) 는 방출 전압 (V) 35 KeV 전자빔 조사 횟수 (N) 가 각각 100 회와 200회의 표면 조직이며 이는 30 KeV 조건과 유사하게 균열발생과 동시에 표면 조직이 미세해 짐에 따라 재용융된 Stellite 21 조직이 옅어짐을 확인할 수 있다. 전자빔의 과도한 반복조사로 인한 균열을 최소화하여야 함을 알 수 있었으며 재용융 표면에 균열이 발생하지 않고 표면 조도가 우수한 재용융 조건은 방출 전압 (V) 35 KeV 의 20 회 조사가 적정함을 도출할 수 있었다.

위의 표면 조직 분석 결과 방출전압 (V) 조건이 다를 경우 에너지 밀도 차이로 인하여 재용융 특성이 다르게 나타난다. 에너지 밀도가 증가할수록 더욱 높은 온도에서 재용융이 이루어지기 때문이며 큰 에너지 밀도로 재용융 공정을 수행하는 경우 재용융층의 두께 또한 다르게 되며 이를 분석하기 위하여서 Fig. 40 과 같이 전자빔 중심 위치와 시편 중심 위치로 시편을 절단하여 주사전자현미경을 이용하여 5,000 배율로 단면부 분석을 수행하였다. 재용융 영역의 분석을 위하여서 연마 후 에칭을 하여 단면부의 조직을 분석하였다. 재용융 공정 실험이 이루어지지 않은 초기 시편은 Fig. 41 과 같다.

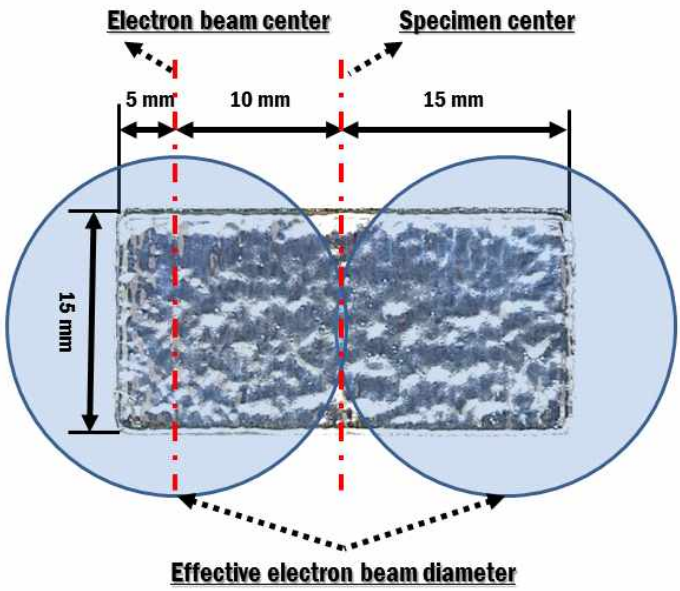


Fig. 40 Cutting position of re-melted specimen

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

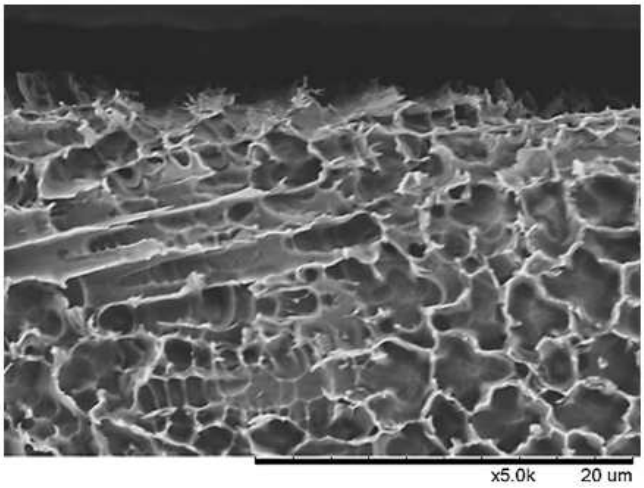


Fig. 41 Section morphology of initial specimen

플라즈마 전자빔의 에너지 밀도는 정규분포 형태인 Gaussian distribution 의 형태이다. 때문에 전자빔의 중심부와 외경부의 에너지 밀도는 차이가 발생하여 재용융 특성이 다르게 된다. 때문에 이를 분석하기 위하여 Fig. 42 의 B 위치인 플라즈마 전자빔 중심부에서의 방출전압 (V) 25 KeV 조건의 조사횟수 (V) 에 따른 단면은 Fig. 43 과 같다. 전자빔 20 회 조사 조건에서의 재용융 층의 두께는 4.77 ㎛ 로 가장 두꺼웠으며 전자빔

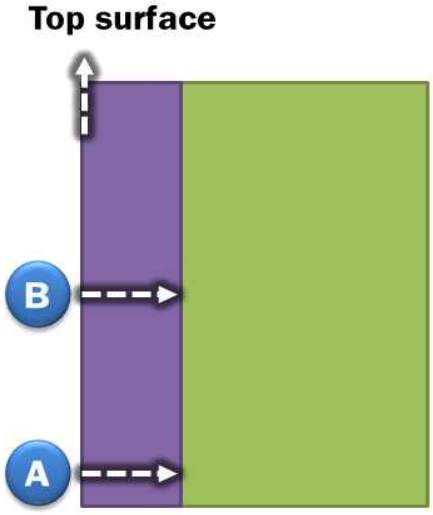
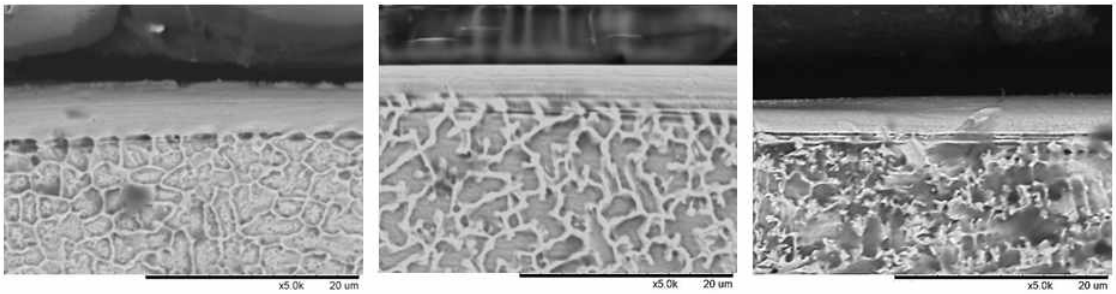


Fig. 42 Measurement point of re-melting area

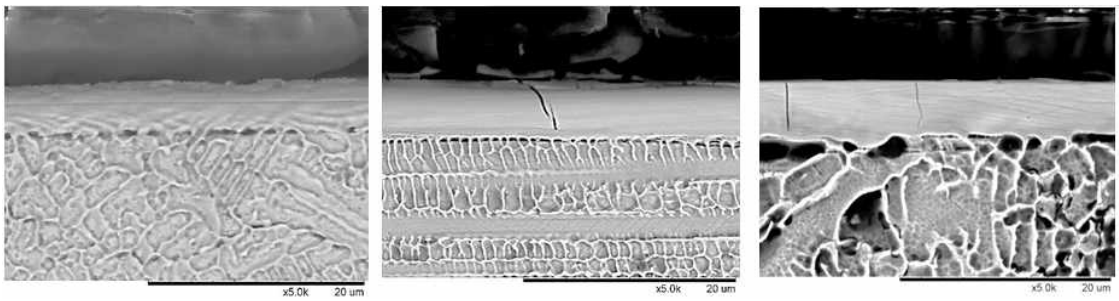
Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



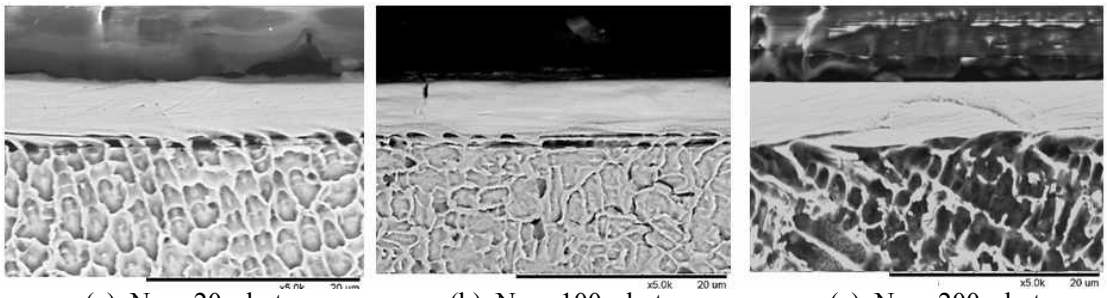
(a) N = 20 shot (b) N = 100 shot (c) N = 200 shot

Fig. 43 Section morphology of re-melted specimen at beam center B position (V = 25 KeV)



(a) N = 20 shot (b) N = 100 shot (c) N = 200 shot

Fig. 44 Section morphology of re-melted specimen at beam center B position (V = 30 KeV)



(a) N = 20 shot (b) N = 100 shot (c) N = 200 shot

Fig. 45 Section morphology of re-melted specimen at beam center B position (V = 35 KeV)

100 회 조사 조건에서의 두께는 3.59 ㎛, 전자빔 200 회 조사 조건에서의 두께는 3.48 ㎛, 의 두께로 측정 되었다. 전자빔 조사 횟수가 증가할수록 재용융되며 시편 표면의 이물질 및 불안정한 조직이 제거 되며 전자의 충돌로 인하여 표면 재료가 손실되기 때

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

문에 플라즈마 전자빔의 조사 횟수 (N) 가 증가함에 따라 재용융층의 두께는 얇아지게 되다. Fig. 44 는 방출전압 (V) 이 30 KeV 일때의 전자빔 중심부의 단면이다. 표면 조직 분석 결과와 동일하게 전자빔 조사횟수 (N) 100 회 와 200 회의 시편에서는 균열이 관찰되었다. 플라즈마 전자빔 20 회 조사 조건에서의 재용융 층의 두께는 4.79 ㎛ 이며 100 회 조사 조건에서는 4.33 ㎛, 200 회 조사 조건에서는 4.83 ㎛ 의 결과를 얻었다. Fig. 41 는 방출전압 (V) 이 35 KeV 일때의 전자빔 중심부의 단면이다. 재용융층의 두께는 전자빔 20 회 조사 조건에서의 재용융 층의 두께는 4.85 ㎛ 이고 100 회 조사조건 (N) 에서는 5.23 ㎛, 200 회 조사조건 (N) 에서는 5.38 ㎛ 를 얻었다. 균열이 발생한 조건을 제외하고 플라즈마 전자빔의 방출 전압 (V) 이 증가함에 따라 에너지밀도가 증가하여 재용융층의 두께는 증가하였으며 조사 횟수 (N) 가 증가할수록 전자의 충돌로 인한 표면재료 제거로 재용융층의 두께는 감소하였다.

전자빔 중심부 B 위치에서 방출전압 (V) 에 따른 재용융층의 두께 변화는 Fig. 46 과 같다. 모든 조사횟수 (N) 범위에서 방출전압 (V) 이 증가할수록 재용융층의 두께는 증가한다. 이는 보다 큰 에너지 밀도의 플라즈마 전자빔으로 조사함에 따라 더 많은 영역이 재용융되기 때문이다. Fig. 47 은 Fig. 42 의 A 위치에서의 25 KeV 의 방출

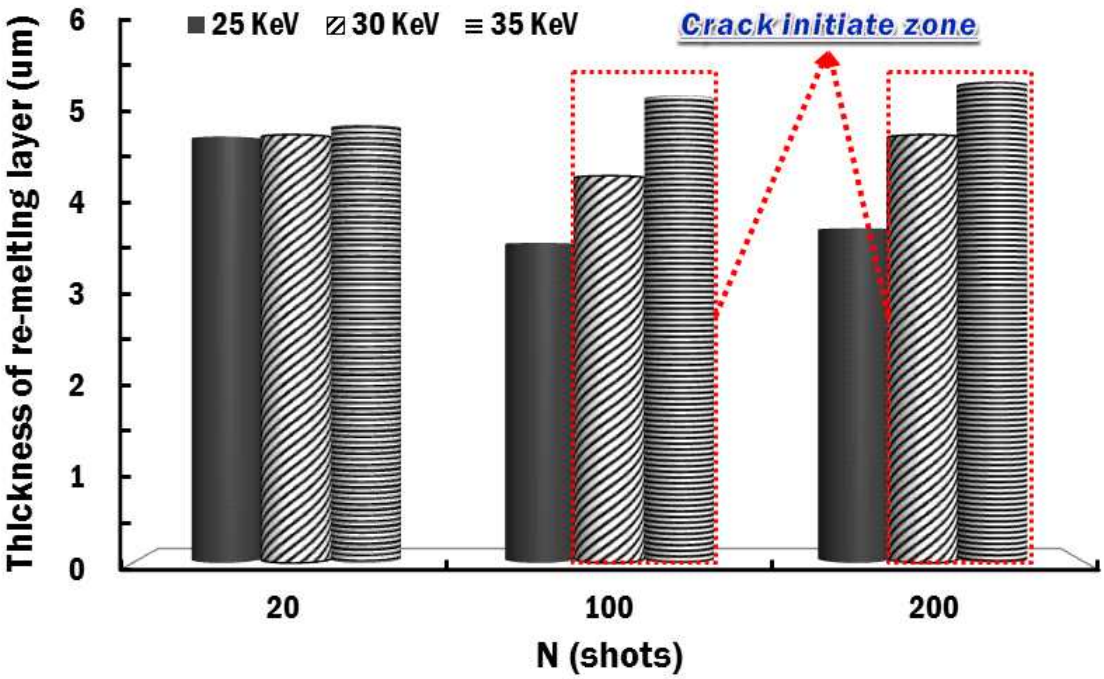
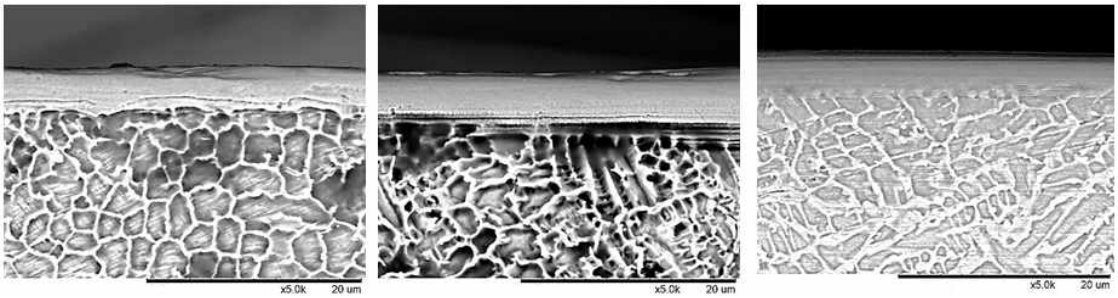


Fig. 46 Re-melting thickness according to emission voltage (Beam center position B)

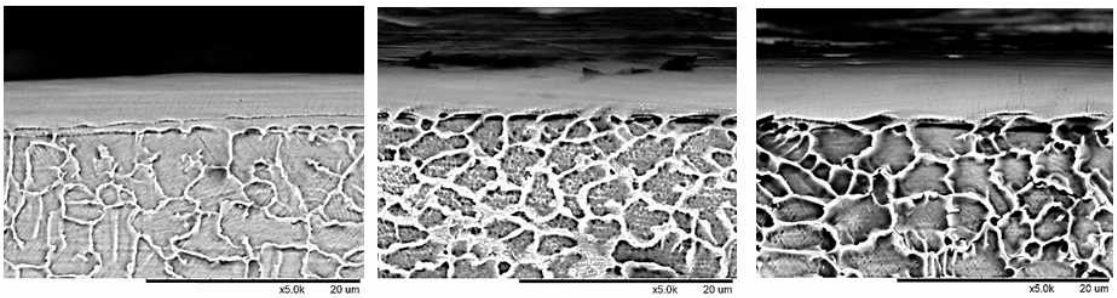
Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



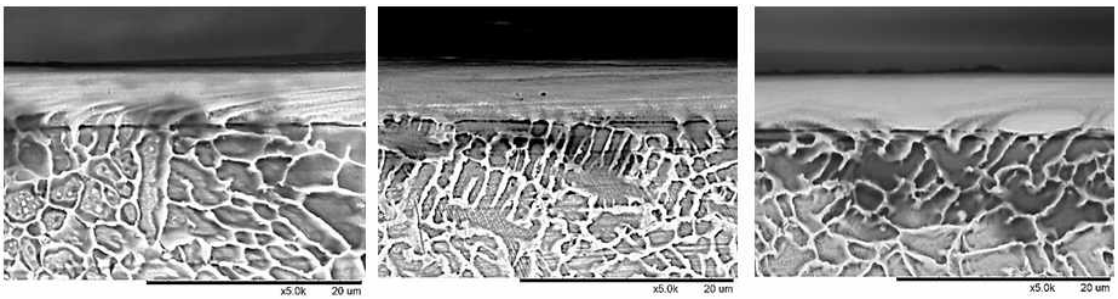
(a) N = 20 shot (b) N = 100 shot (c) N = 200 shot

Fig. 47 Section morphology of re-melted specimen at beam center A position (V = 25 KeV)



(a) N = 20 shot (b) N = 100 shot (c) N = 200 shot

Fig. 48 Section morphology of re-melted specimen at beam center A position (V = 30 KeV)



(a) N = 20 shot (b) N = 100 shot (c) N = 200 shot

Fig. 49 Section morphology of re-melted specimen at beam center A position (V = 35 KeV)

전압 (V) 에서의 시편 단면이다. 20 회의 조사조건 (N) 에서의 재용융 영역의 두께는 4.03 ㎛ 이며 100 회 조사조건 (N) 에서 3.57 ㎛, 200 회 조사조건 (N) 에서 3.43㎛ 로 조사 횟수가 증가함에 따라 재용융 영역의 두께는 감소하는 결과를 얻었다. B 위치에

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

비하여 20 회의 의 조사 횟수 (N) 일 때 약 15.5 %, 100 회의 조사 횟수 (N) 일 때 약 0.6 %, 200 회의 조사 횟수 (N) 일 때 약 1.4 % 낮은 재용융층 두께를 가졌으며 이는 유효직경의 외경 영역에 가까워짐에 따라 에너지 밀도가 감소하여 전자빔의 침투깊이가 적기 때문이다. Fig. 48 은 전자빔 중심부 A 위치에서의 30 KeV 의 방출전압 (V) 조건에서의 단면 재용융부이다. 20 회의 조사 조건 (N) 에서의 재용융 영역의 두께는 4.5 ㎛ 이며 100 회 조사 조건에서 4.25 ㎛, 200 회 조사 조건 (N) 에서 4.59 ㎛ 로 B 위치에 비하여 20 회의 의 조사 횟수 (N) 일 때 약 6.1 %, 100 회의 조사 횟수 (N) 일 때 약 1.8 %, 200 회의 조사 횟수 (N) 일 때 약 5.0 % 낮은 재용융층 두께를 가졌으며 유효직경의 외경 영역에 가까워짐에 따라 에너지 밀도가 감소하기 때문이다. Fig. 49 는 전자빔 중심부 A 위치에서의 35 KeV 의 방출전압 (V) 조건에서의 단면 재용융부이다. 20 회의 조사 조건 (N) 에서의 재용융 영역의 두께는 4.69 ㎛ 이며 100 회 조사 조건에서 4.8 ㎛, 200 회 조사 조건 (N) 에서 5.26 ㎛ 로 B 위치에 비하여 20 회의 의 조사 횟수 (N) 일 때 약 3.3 %, 100 회의 조사 횟수 (N) 일 때 약 8.2 %, 200 회의 조사 횟수 (N) 일 때 약 2.2 % 낮은 재용융층 두께를 가졌으며 유효직경의 외경 영역에 가까워짐에 따라 에너지 밀도가 감소하기 때문이다.

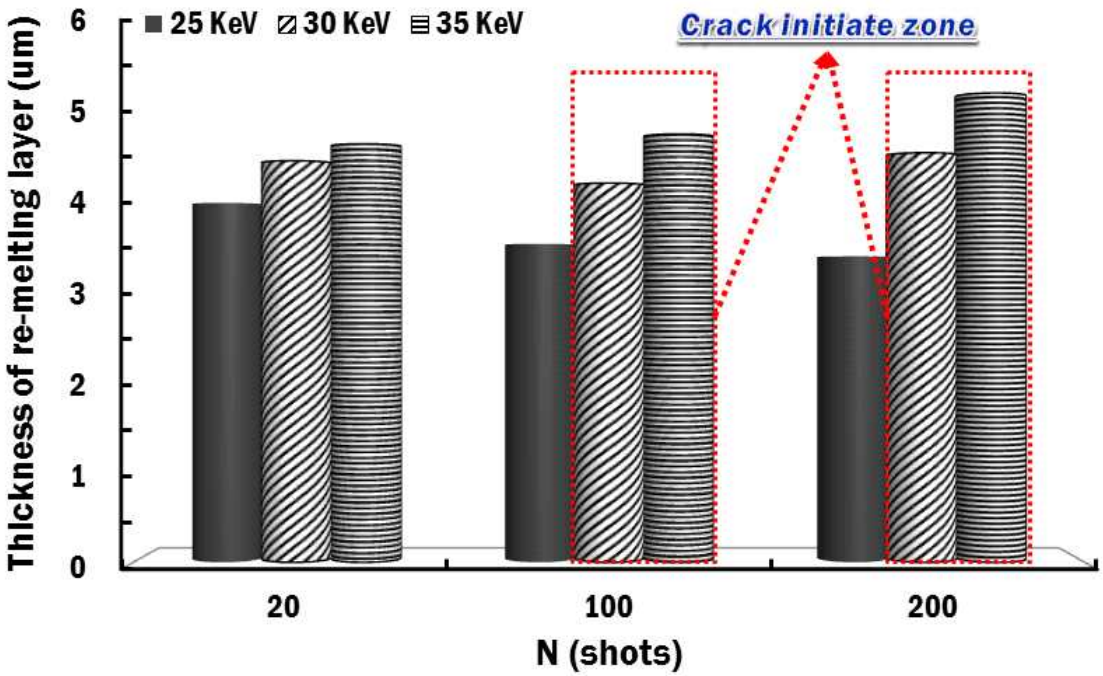
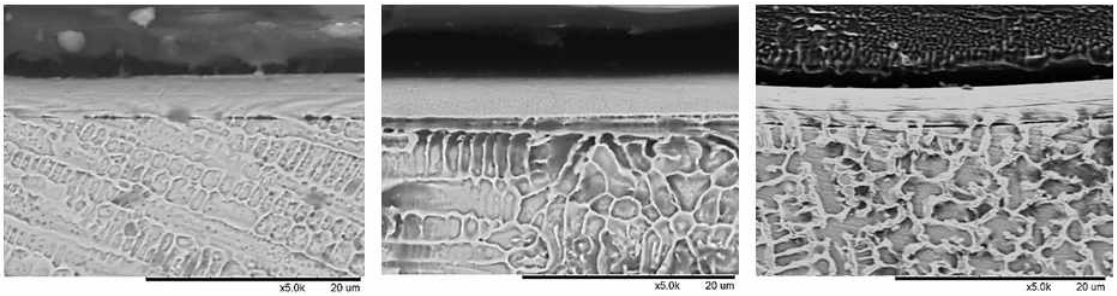


Fig. 50 Re-melting thickness according to emission voltage (Beam center position A)

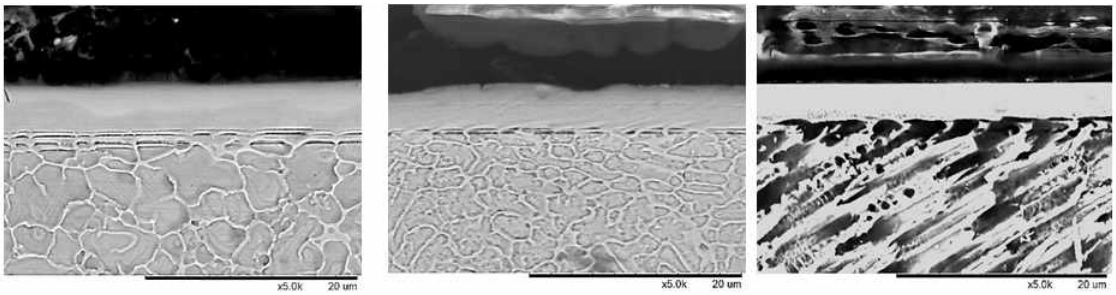
Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



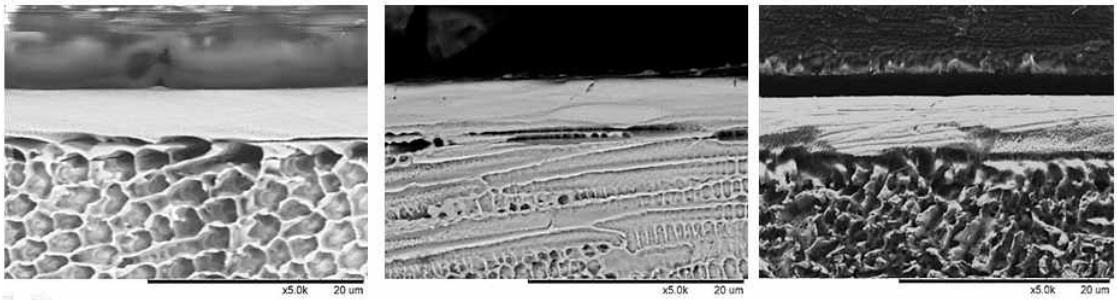
(a) N = 20 shot (b) N = 100 shot (c) N = 200 shot

Fig. 51 Section morphology of re-melted specimen at specimen center B position (V = 25 KeV)



(a) N = 20 shot (b) N = 100 shot (c) N = 200 shot

Fig. 52 Section morphology of re-melted specimen at specimen center B position (V = 30 KeV)



(a) N = 20 shot (b) N = 100 shot (c) N = 200 shot

Fig. 53 Section morphology of re-melted specimen at specimen center B position (V = 35 KeV)

전자빔 중심부 A 위치에서 방출 전압 (V) 에 따른 재용융층의 두께 변화는 Fig. 50 과 같다. 모든 조사 횟수 범위에서 방출 전압 (V) 이 증가할수록 재용융층의 두께는 증가한다. 방출 전압 (V) 이 증가함에 따라 에너지 밀도가 증가하여 플라즈마 전자빔

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

의 침투깊이가 깊어지기 때문이다.

시편의 크기가 플라즈마 전자빔의 유효 직경보다 크기 때문에 영역별로 조사를 하여 에너지밀도가 높은 빔중심부와 비교적 에너지밀도가 낮은 시편중심부의 재용융 특성을 비교 분석하였다. Fig. 51 은 방출 전압 (V) 25 KeV 로 재용융 실험을 수행한 시편중심부의 B 위치의 단면부 결과이다. 전자빔 20 회 조사 조건 (N) 에서의 재용융 층의 두께는 3.72 ㎛ 이며 전자빔 100 회 조사 조건 (N) 에서의 재용융 영역의 두께는 3.56 ㎛, 전자빔 200 회 조사 조건 (N) 에서의 재용융 영역의 두께는 3.12 ㎛ 의 두께로 측정 되었다. 전자빔 중심부 B 영역에서의 25 KeV 의 방출 전압 (V) 일때보다 20 회 조사하였을 때보다 약 22.0 %, 100 회 조사하였을 때보다 약 0.8 %, 200 회 조사하였을 때보다 약 10.3 % 낮은 결과이다. 플라즈마 전자빔 중심부영역보다 에너지 밀도가 낮은 유효직경 외곽영역이기 때문에 적은 침투깊이를 가진다. 방출 전압 (V) 30 KeV 로 재용융 실험을 수행한 시편중심부의 B 위치의 단면은 Fig. 52 와 같다. 전자빔 20 회 조사 조건 (N) 에서의 재용융 층의 두께는 4.37 ㎛ 이고, 전자빔 100 회 조사 조건 (N) 에서의 재용융 영역의 두께는 4.01 ㎛, 전자빔 200 회 조사 (N) 조건에서의 재용융 영역의 두께는 3.88 ㎛, 의 두께로 측정 되었다. 전자빔 중심부 B 영역에서의 30 KeV 의

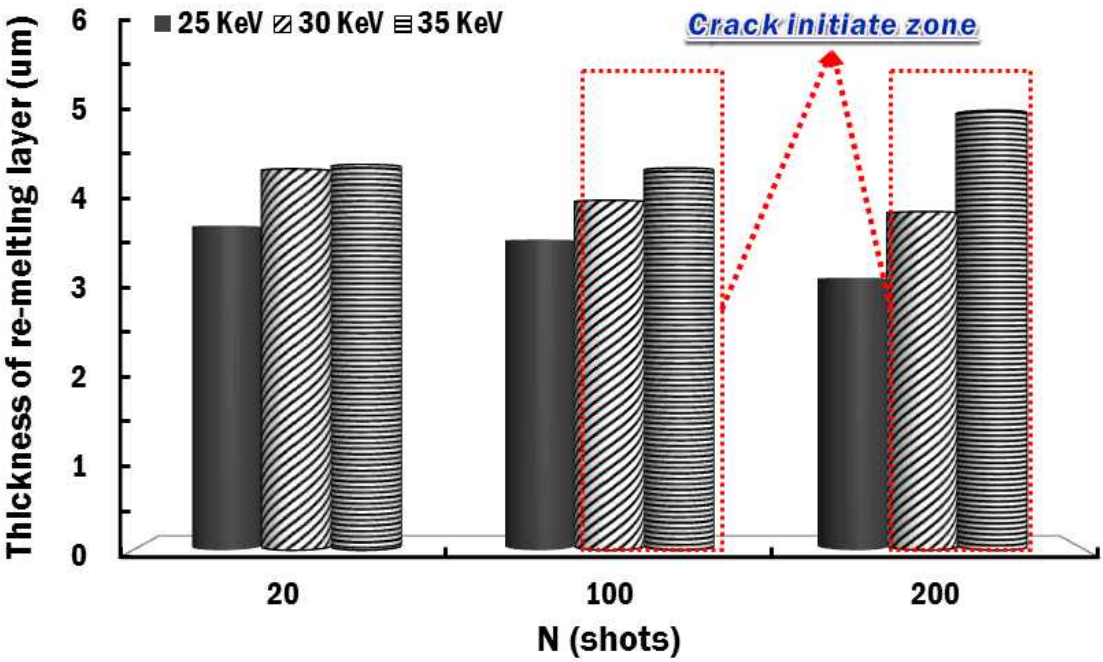
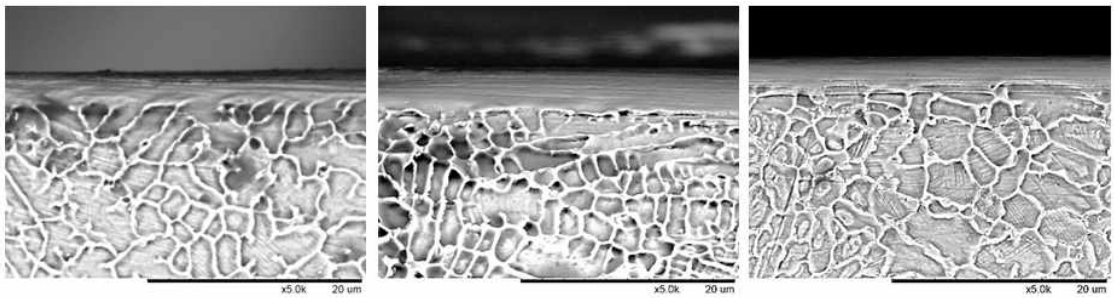


Fig. 54 Re-melting thickness according to emission voltage (Specimen center position B)

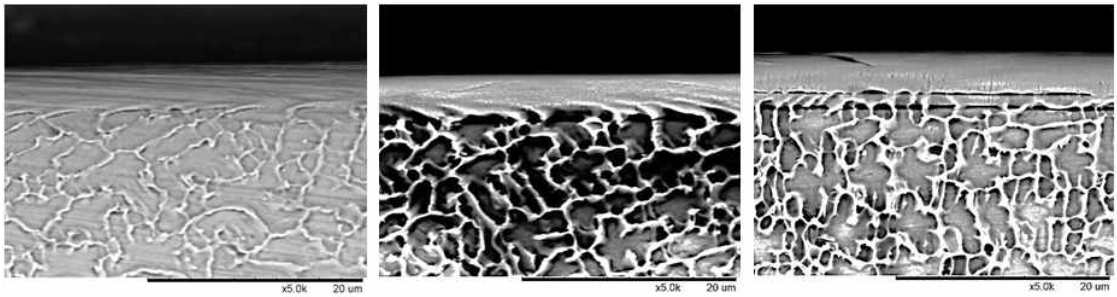
Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



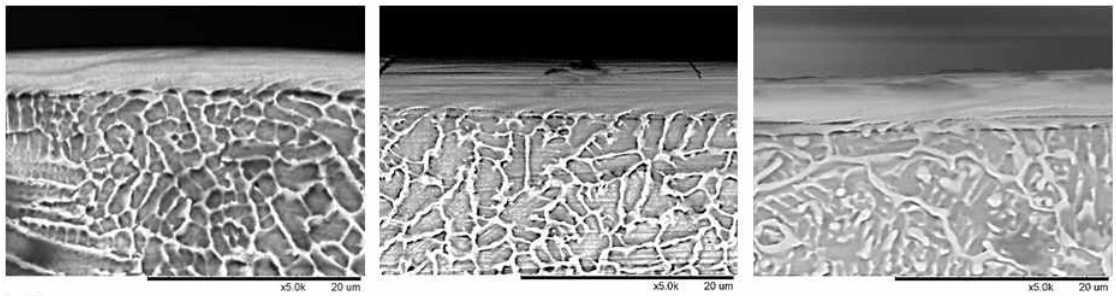
(a) N = 20 shot (b) N = 100 shot (c) N = 200 shot

Fig. 55 Section morphology of re-melted specimen at specimen center A position (V = 25 KeV)



(a) N = 20 shot (b) N = 100 shot (c) N = 200 shot

Fig. 56 Section morphology of re-melted specimen at specimen center A position (V = 30 KeV)



(a) N = 20 shot (b) N = 100 shot (c) N = 200 shot

Fig. 57 Section morphology of re-melted specimen at specimen center A position (V = 35 KeV)

방출 전압 (V) 일때보다 20 회 조사하였을 때보다 약 8.8 %, 100 회 조사하였을 때보다 약 7.4 %, 200 회 조사하였을 때보다 약 19.7 % 낮은 결과이다. Fig. 53 은 방출 전압 (V) 35 KeV 로 재용융 실험을 수행한 시편중심부의 B 위치의 단면부 결과이다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

전자빔 20 회 조사 조건 (N) 에서의 재용융 층의 두께는 4.42 ㎛ 로 가장 두꺼웠으며 전자빔 100 회 조사 조건 (N) 에서의 재용융 영역의 두께는 4.38 ㎛, 전자빔 200 회 조사 조건 (N) 에서의 재용융 영역의 두께는 5.04 ㎛ 의 두께로 측정 되었다. 전자빔 중심부 B 영역에서의 35 KeV 의 방출 전압 (V) 일때보다 20 회 조사하였을 때보다 약 8.9 %, 100 회 조사하였을 때보다 약 16.3 %, 200 회 조사하였을 때보다 약 6.3 % 낮은 결과이다.

재용융 시편 중심부 B 위치에서 방출 전압 (V) 에 따른 재용융층의 두께 변화는 Fig. 54 와 같다. 모든 조사 횟수 (N) 범위에서 방출 전압이 증가할수록 재용융층의 두께는 증가한다. 이는 보다 큰 에너지 밀도의 플라즈마 전자빔으로 조사함에 따라 더 많은 영역이 재용융되기 때문이다. Fig. 55 는 시편중심부 A 위치에서의 25 KeV 의 방출 전압 (V) 에서의 시편 단면이다. 20 회의 조사 조건 (N) 에서의 재용융 영역의 두께는 3.34 ㎛ 이며 100 회 조사 조건 (N) 에서 3.32 ㎛, 200 회 조사 조건 (N) 에서 3.02 ㎛ 이다. 전자빔 중심부 A 영역에서의 보다 20 회 조사 조건보다 약 17.1 %, 100 회 조사 조건보다 약 7.0 %, 200 회 조사 조건보다 약 12.0 % 낮은 결과이다. Fig. 56 은 시편중심부 A 위치에서의 30 KeV 의 방출 전압 (V) 에서의 시편 단면이며 20 회의 조

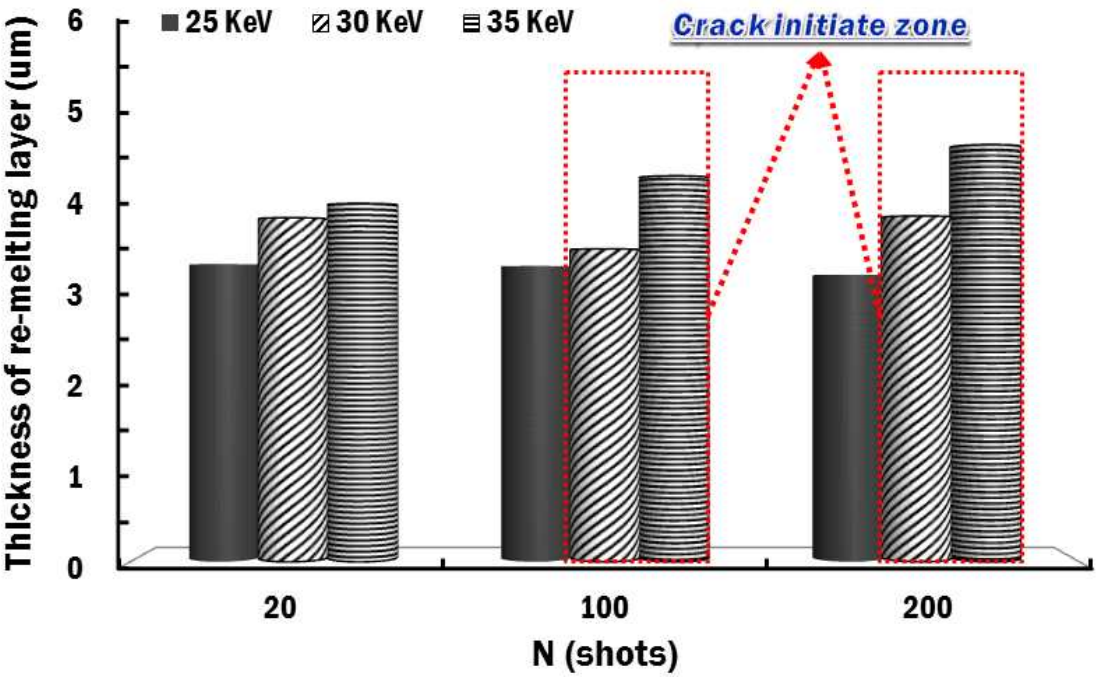


Fig. 58 Re-melting thickness according to emission voltage (Specimen center position A)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

사 조건 (N) 에서의 재용융 영역의 두께는 3.86 ㎛ 이며 100 회 조사 조건 (N) 에서 3.51 ㎛, 200 회 조사 조건 (N) 에서 3.76 ㎛ 이다. 전자빔 중심부 A 영역에서의 보다 20 회 조사 조건보다 약 14.2 %, 100 회 조사 조건보다 약 17.4 %, 200 회 조사 조건보다 약 18.1 % 낮은 결과이다. Fig. 57 은 시편중심부 A 위치에서의 35 KeV 의 방출전압 (V) 에서의 시편 단면이다. 20 회의 조사 조건 (N) 에서의 재용융 영역의 두께는 4.02 ㎛ 이며 100 회 조사 조건 (N) 에서 4.33 ㎛, 200 회 조사 조건에서 4.68 ㎛ 이다. 전자빔 중심부 A 영역에서의 보다 20 회 조사 조건보다 약 14.3 %, 100 회 조사 조건보다 약 9.8 %, 200 회 조사 조건보다 약 11.0 % 낮은 결과이다. Fig. 58 은 시편 중심부 A 영역의 재용융부 두께이다. 시편 중심부 A 영역은 전체 조건 중 가장 에너지 밀도가 낮은 영역에 해당하여 가장 낮은 재용융부 두께를 가짐을 알 수 있다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

3. 플라즈마 전자빔을 이용하여 재생성된 적층 시편의 경도 변화 분석

직접식 에너지 공정에서 제작된 시편에 플라즈마 전자빔을 조사하여 재용융 실험을 수행한 재용융 시편의 고에너지원인 플라즈마 전자빔을 이용하여 재용융 공정 실험을 수행시 시편의 표면은 빠르게 용융되고 냉각되며 재용융 공정 변수에 따라 경도 특성이 변화하게 되어 공정 변수에 따른 경도특성 분석이 필요하다. 재용융 공정 실험 시편에 대한 단면 조직 분석 결과 재용융 영역의 두께는 6 ㎛ 미만이다. 마이크로 단위의 비커스 경도를 측정하는 경우 압입영역이 약 40~50 ㎛ 크기로 재용융 영역의 정확한 경도측정이 불가하다. 때문에 재용융 영역의 경도측정을 위하여 Fig. 59 의 ANTON PAAR 사의 TTX - NHT3 나노 압입시험기를 나노 단위의 경도를 분석을 수행하였으며 경도 분석을 위한 압입 시험변수는 Table 8 과 같으며 나노 크기의 Berkovich 팁을 이용하여 비커스 (Vickers) 경도측정을 수행하였다.

Table 8 Parameter of nano-indentation test

Indenter	Max. laod (mN)	Approach distance (nm)	Approach speed (nm/min)
Berkovich	20	50	5.42

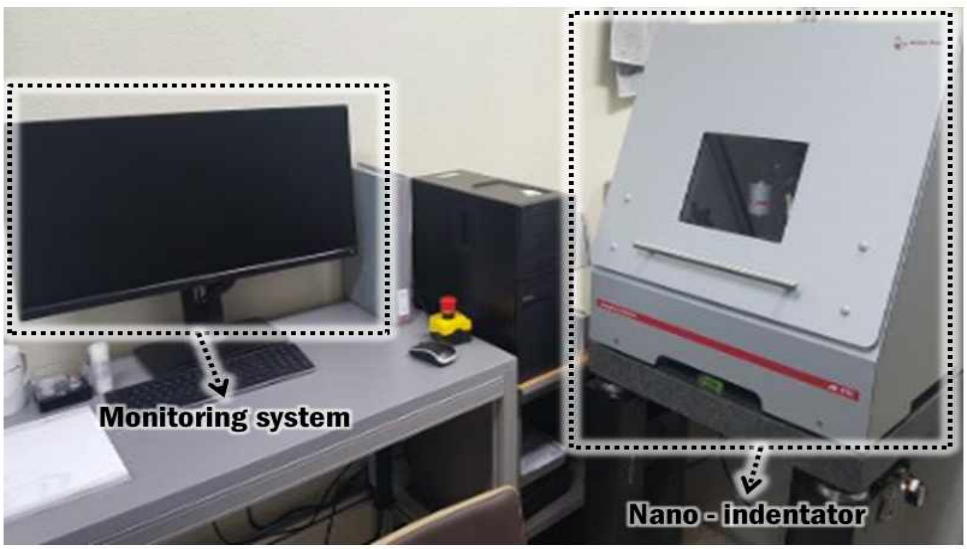


Fig. 59 Experimental setup of hardness measurement of remelted specimens

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

플라즈마 전자빔을 이용하여 재용융한 시편의 단면부 재용융 영역의 경도 측정 결과 25 KeV 방출 전압 (V) 의 경도 변화는 Fig. 60 과 같다. 전자빔의 조사 횟수 (N) 20 회에서 재용융부의 경도는 약 655 Hv 이고 조사 횟수 (N) 100 회에서 약 737 Hv 로 측정되었으며 200 회 조사 횟수 (N) 에서는 약 742 Hv로 측정되었다. 방출 전압 (V) 이 증가할수록 재용융부의 경도는 증가하였다. 경계부에서는 적층부와 재용융부 사이의 경도는 20 회 조사 횟수 (N) 에서 약 593 Hv, 100 회 조사 횟수 (N) 에서는 약 536 Hv, 200 회 조사 횟수 (N) 에서는 약 527 Hv 로 측정되었으며 재용융되지 않은 적층부는 약 453 Hv 로 측정되었다. 30 KeV 방출 전압 (V) 의 경도 변화는 Fig. 61 과 같다. 전자빔의 조사 횟수 (N) 20 회에서 재용융부의 경도는 약 723 Hv 이고 조사 횟수 (N) 100 회에서 약 846 Hv 로 측정되었으며 200 회 조사 횟수 (N) 에서는 약 852 Hv 로 측정되었다. 방출 전압 (V) 이 증가할수록 재용융부의 경도는 증가하였다. 경계부에서는 적층부와 재용융부 사이의 경도는 20 회 조사 횟수 (N) 에서 약 566 Hv, 100 회 조사 횟수 (N) 에서는 약 574 Hv, 200 회 조사 횟수 (N) 에서는 약 628 Hv 로 측정되었다. 재용융되지 않은 적층부는 약 456 Hv 로 측정되었다. 35 KeV 방출 전압의 경도 변화는 Fig. 62 와 같다. 전자빔의 조사 횟수 (N) 20 회에서 재용융부의 경도는 약 735 Hv 이고 조사 횟수 (N) 100 회에서 약 915 Hv 로 측정되었으며 200 회 조사 횟수 (N) 에서는 약 2187 Hv로 측정되었다. 방출 전압 (V) 이 증가할수록 재용융부의 경도는 증

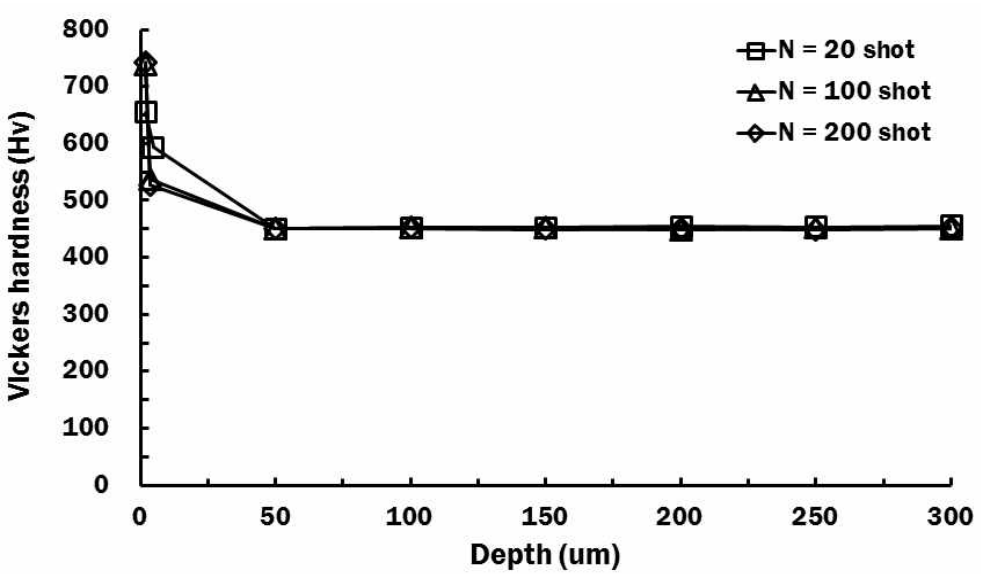


Fig. 60 Variation of vickers hardness of re-melted layer (V = 25 KeV)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

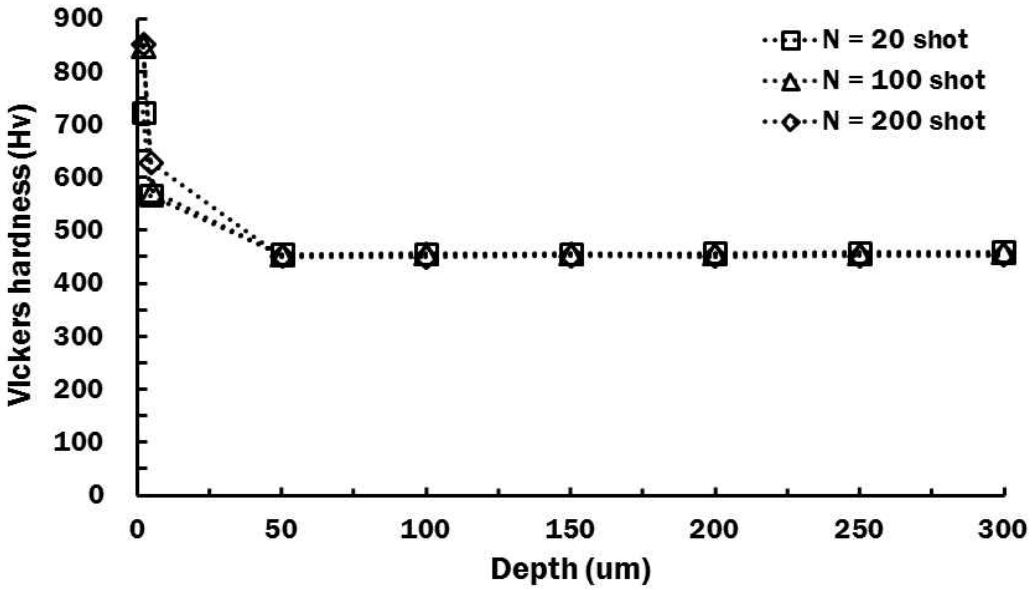


Fig. 61 Variation of vickers hardness of re-melted layer (V = 30 KeV)

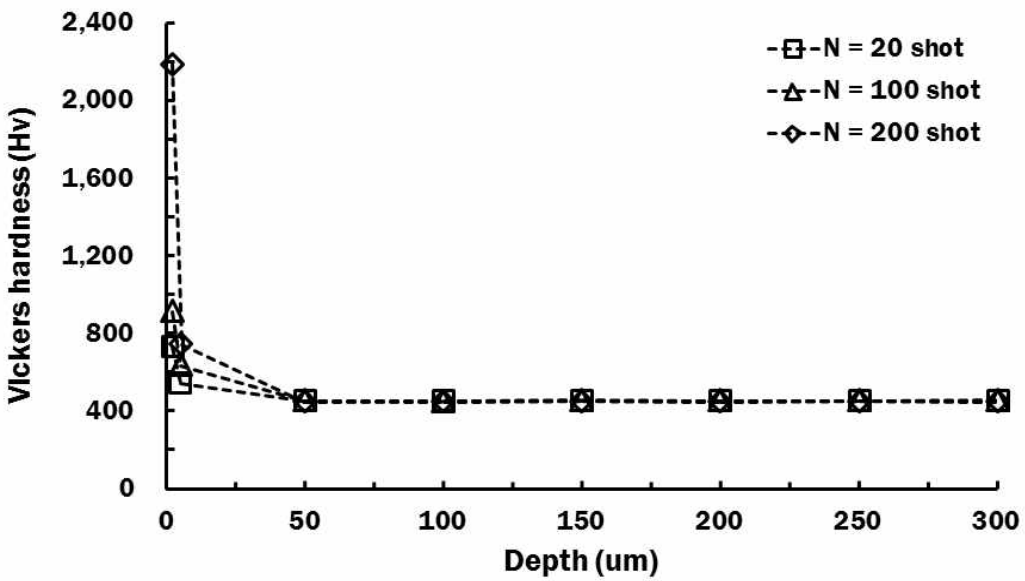


Fig. 62 Variation of vickers hardness of re-melted layer (V = 35 KeV)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

가하였다. 경계부에서는 적층부와 재용융부 사이의 경도는 20 회 조사 횟수 (N) 에서 약 543 Hv, 100 회조사 횟수 (N) 에서는 약 638 Hv 그리고 200 회 조사 횟수 (N) 에서는 약 742 Hv 로 측정되었으며 재용융되지 않은 적층부는 약 456 Hv 로 측정되었다.

플라즈마 전자빔을 이용하여 재용융한 시편의 공정 조건별 단면부 재용융영역의 경도 측정 결과는 Fig. 63 과 같으며 재용융부의 경계영역의 경도 측정결과는 Fig. 64 와 같다. 플라즈마 전자빔의 방출 전압 (V) 과 조사 횟수 (N) 의 증가에 따라 재용융부와 재용융 경계부의 경도는 증가하였다. 전자빔의 방출 전압 (V) 이 증가할수록 높은 에너지 밀도로 조사됨에 따라 적층 재료인 Stellite 21 의 조직이 미세해져 높은 경도를 지니는 조직으로 변화하여 경도가 증가하였다. 가장 큰 에너지 밀도를 가지는 35 KeV 의 200 회 조사한 결과 가장 높은 경도가 측정이 되었으며 초기시편보다 약 4.9배의 경도를 지녔다. 재용융 부의 경도 측정 결과와 재용융 공정 변수에 따라 시편의 형상을 분석하였을 때 약 840 Hv 이상의 경도를 지녔을 때 시편의 표면은 균열이 발생하게 된다. 표면에 균열은 플라즈마 전자빔 재용융 공정 변수중 방출전압 (V) 30 KeV 에서 100 회, 200 회 조사하였을때와 방출전압 (V) 35 KeV 일 때 100 회, 200 회 조사하였을때 발생하였다. 전자빔이 큰 에너지 밀도로 과도하게 반복적으로 조사됨에 따라

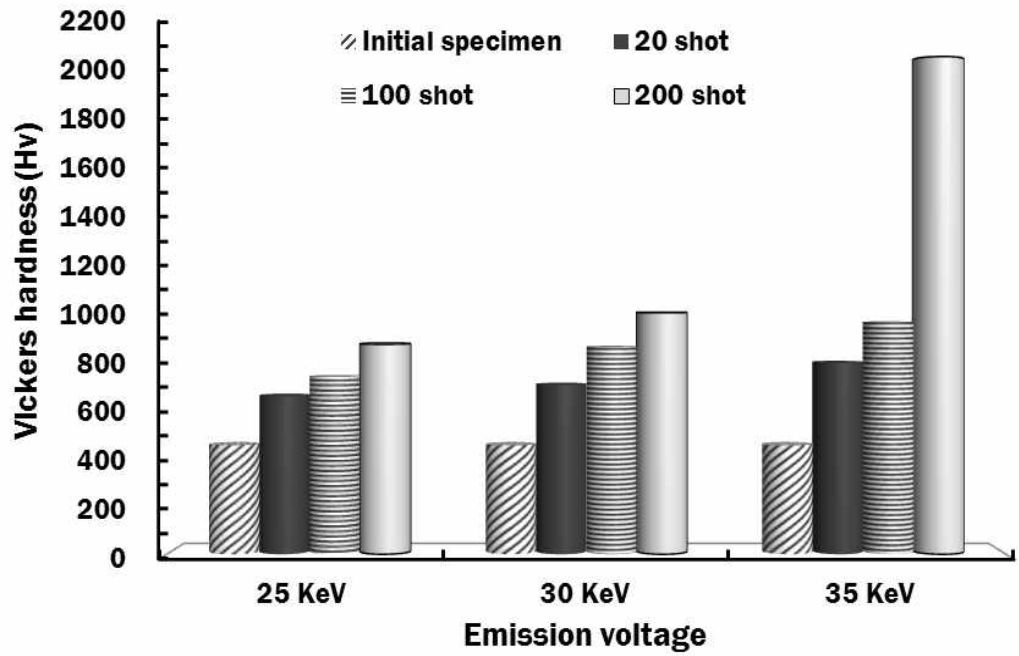


Fig. 63 Vickers hardness of re-melted region

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

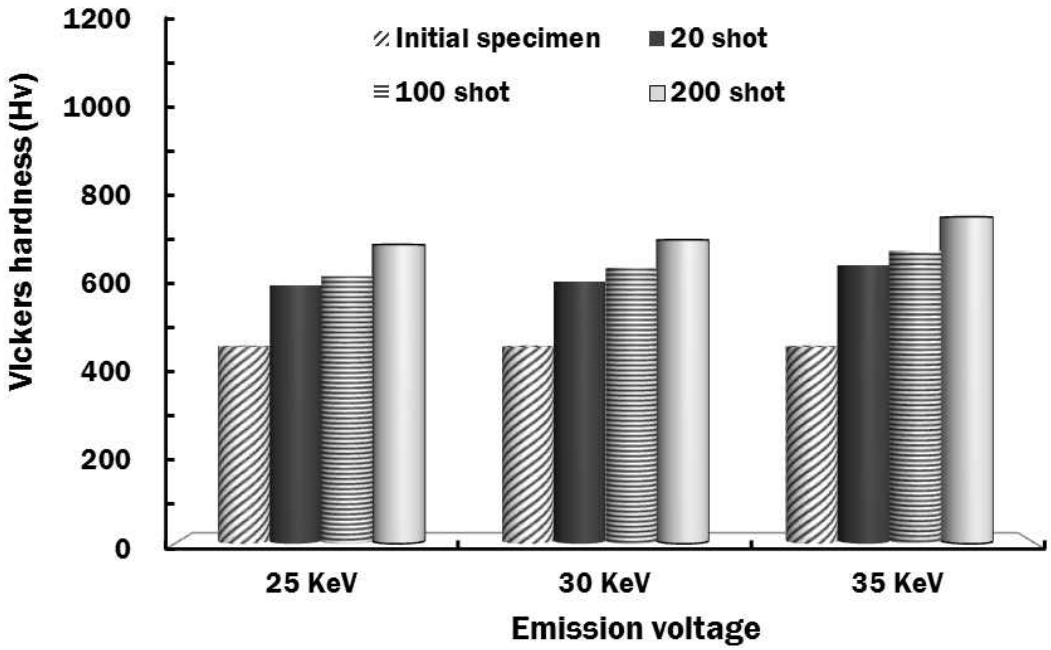


Fig. 64 Vickers hardness of boundary region

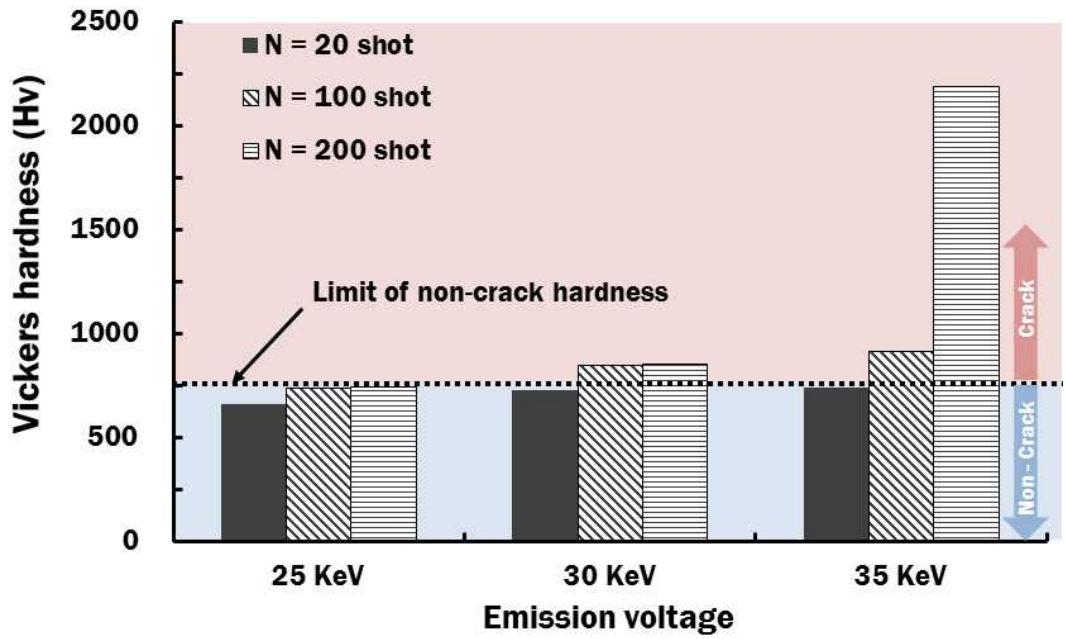


Fig. 65 Vickers hardness of remelted layer

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

재용융부의 조직은 용융과 빠른 냉각으로 미세해진 조직은 높은 경도를 지니게 되며 재용융부와 적층 재료인 Stellite 21 은 조직의 차이로 인하여 균열이 발생한다. Fig. 63 은 재용융부와 재용융 경계부의 경도 차이이다. 재용융부와 재용융 경계부의 경도차이가 약 185 Hv 이상인 경우 재용융 표면에서 균열이 발생하였다. 이의 결과로 플라즈마 전자빔의 큰 에너지 밀도로 과도한 반복 조사는 시편 표면에 균열을 발생시키기 때문에 표면 재용융 실험시 과도한 반복적 조사는 최소화 하여야함을 알 수 있으며 재용융 표면에 균열이 발생하지 않으며 우수한 경도특성을 가지는 재용융 공정 조건을 35 KeV 방출전압 (V) 의 20 회 조사임을 도출 할 수 있었다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 5 장 혼합 손상 패턴 방지를 위한 다층 적층 구조를 가진 열간 성형 금형

제 1 절 다층 적층 구조를 가진 열간 성형 금형 설계 및 제작

열간 성형 공정에서는 고온에서 반복적인 충격 하중이 부가되는 가혹한 생산조건으로 제품에 제작되게 된다. 가혹한 생산 조건은 고온마모, 고온침식, 열피로 충격파손 등의 다양한 손합 손상 패턴을 가지게 된다. Fig. 66 은 고온성형금형에서 마모가 된 금형이다. 마모된 영역은 초기에 10.5 mm 의 곡률 반경을 가지고 있으나 가혹한 생산 조건으로 제품 생산이 진행 되며 마모되어 손상된 형태이다. Fig. 66 금형의 수명을 증대시키기 위해 마모 영역에 기능성 층을 부가하여 손합 손상 패턴을 방지하여야 한다. 혼합 손상 패턴 방지를 위한 다층 적층 구조에 대하여 기초 실험을 수행하여 우수한 충격 특성을 가지는 4 층 구조 (4 Layer) 조건에서 Type 1 배치를 마모영역에 국부적으로 적용하여 Fig. 67 과 같은 구조를 가지는 열간 성형 금형 설계를 수행하였다. 3차원 금속 프린팅 공정을 이용하여 적층시 발생하는 잔류응력으로 인한 변형 및 파손을

Fig. 66 Wear of hot-forging die

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

방지하고 적층 재료 최소화를 위하여 열간 금형에서 주요 손상부를 분석하여 국부적인 적층영역을 설계하였다. DED (Direct energy deposition) 공정을 이용하여 적층시 발생하는 거친 표면 거칠기와 불안정한 표면조직 제거를 위하여 후처리공정을 고려하여 최종 형상에서 1.5 mm 오프셋 (Offset) 하여 설계를 수행하였다. 적층부 단면의 형태는 Fig. 68 과 같으며 열응력 제어층 (TSCL) 과 손상저감층 (DDL) 은 외부 표면으로부터 거리를 고려하여 30° 의 각도를 가지는 형태로 형상이 고안되었다. 적층에 사용된 DED 기반 공정은 INSSTEK 사의 MX3 장비를 이용하여 적층하였으며 Fig. 69 과 같은 적층경로 데이터를 생성하여 모재 재료위에 고출력 레이저를 조사하여 순간적으로 용융풀 (melting pool) 을 생성한 후 금속 분말을 공급하여 금속 분말을 완전히 용융시켜 layer-by-layer 로 적층하였다. 적층순서로는 4 층 구조 (4 Layer) 조건에서 Type 1 배치로 적층하기 위하여 손상저감층 (DDL) 을 P21 소재로 적층한 이후 열응력 제어층 (TSCL)을 상부와 하부재료인 Stellite 21 과 P 21 을 50 wt. % + 50 wt. % 비율로 적층한 이후 최종적으로 Stellite 21 재료를 적층하였다.

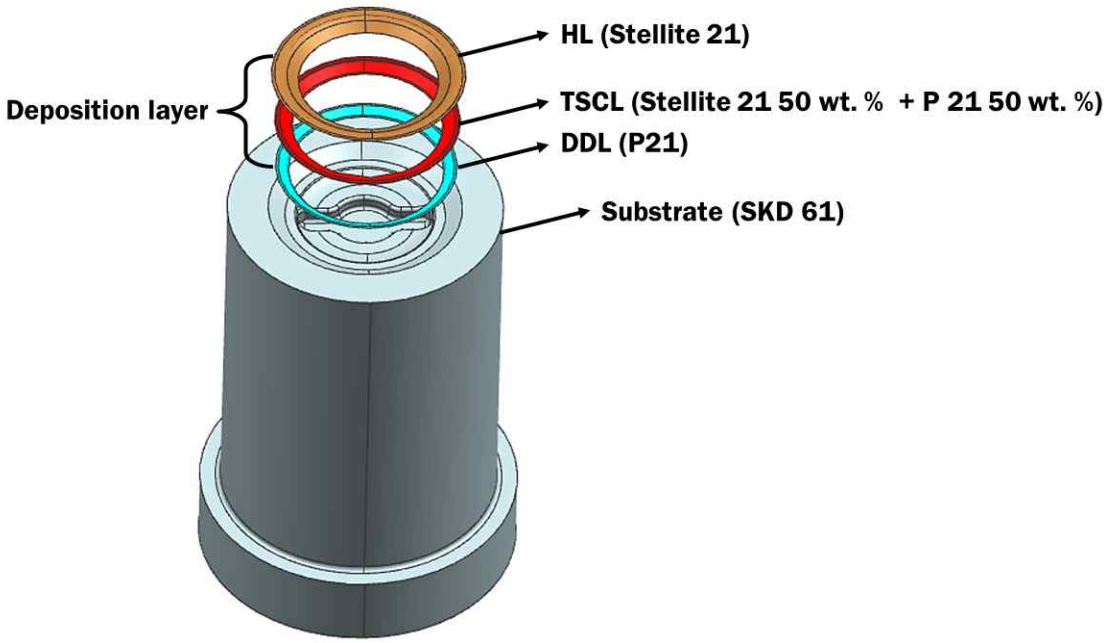


Fig. 67 Concept of 4 layer structures hot-forging die

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

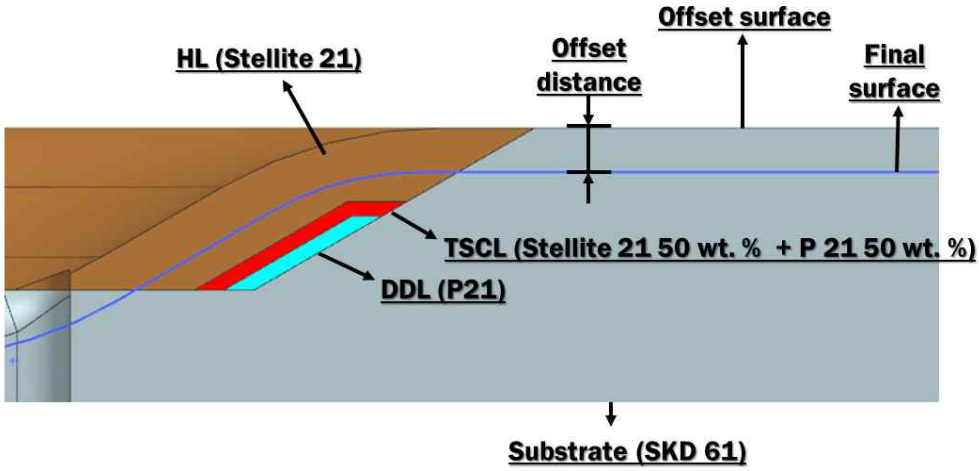


Fig. 68 Sectional view of offset design for 4 layer structures hot-forging die

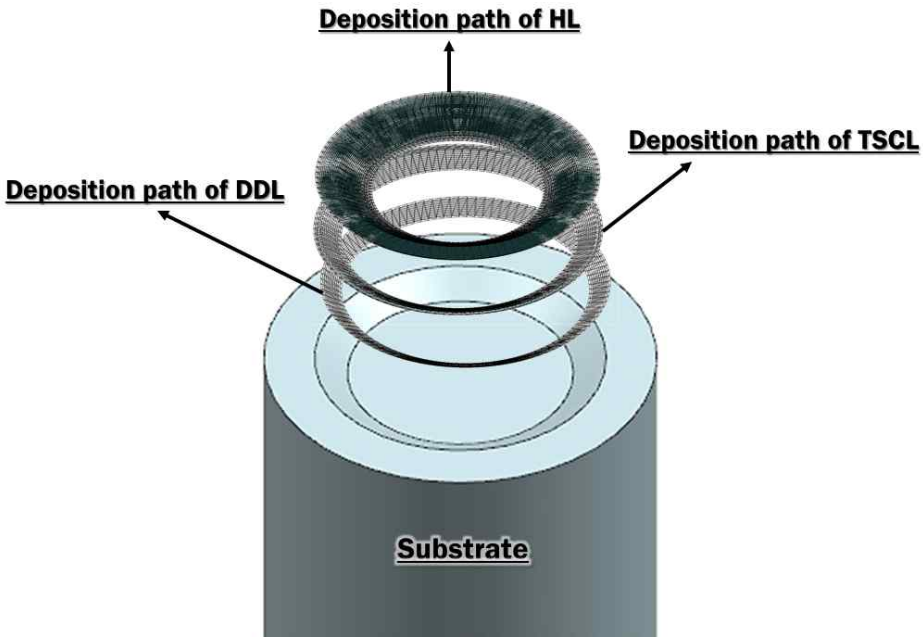


Fig. 69 Deposition path of 4 layer structures hot-forging die

금형의 제작 절차는 Fig. 70 과 같다. DED 공정을 통하여 모재에 DDL, TSCL 그리고 HL 순서로 적층을 하고 열처리를 한 후 기계가공공정을 통하여 최종 형상으로 가공하였다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

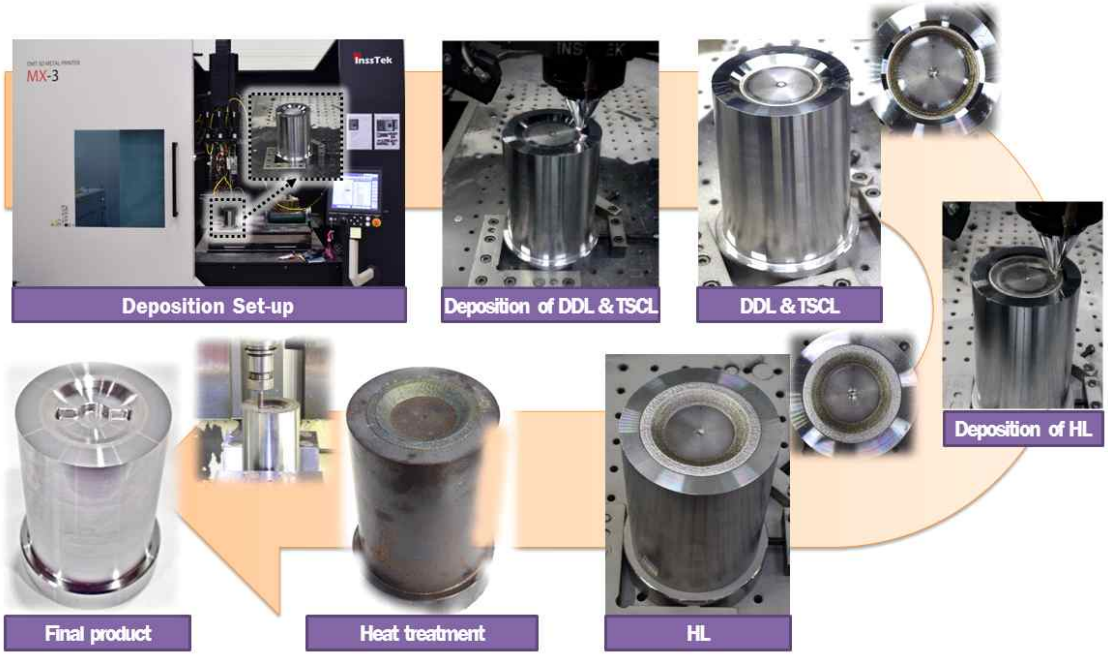


Fig. 70 Process of 4 layer structure hot-forging die

제작된 금형을 이용한 열단 성형 공정은 ENOMOTO 사의 스크류 프레스 방식의 공정이며 성정조건은 Table 9 와 같다. 금형 예열온도는 231.4 ℃ 이고 제품 성형시 하중부가는 8360 KN 이며 RAM 속도는 705 mm/sec 이다. 제품 양산실험 절차는 Fig. 71 과 같다. 금형을 로딩 (Loading) 한 후 약 231 ℃ 로 예열을 하여 Set-up 된 상태에서 소재를 약 1200 ℃ 로 가열하여 제품 성형이 이루어진다.

Table 9 Parameter of hot-forging process

Pre-heating temperature (℃)	231.4
Load (KN)	8360
RAM speed (mm/sec)	705

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

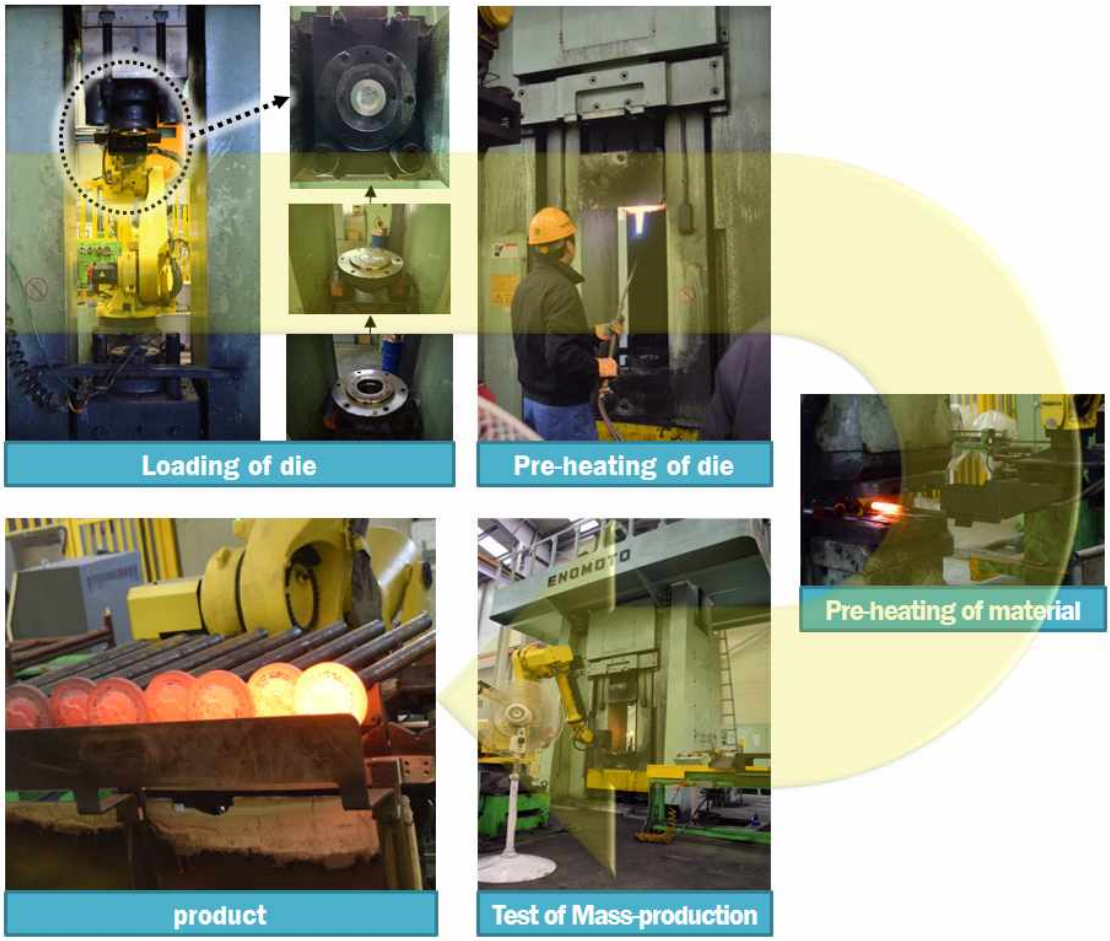


Fig. 71 Process of test for hot-forging mass-production

Fig. 72 은 4 층 구조 (4 layer) 와 선행연구된 3 층 구조 (3 layer) 구조 금형의 균열 발생 타발수를 비교한 결과이다. 3 층 구조 (3 layer) 의 금형은 100 타 타발수 미만에서 균열이 발생하였으며 4 층 구조 (4 layer) 구조의 금형은 약 800 타의 이상의 타발수에서 고온 성형 공정이 진행중이다. 이는 약 10 배 이상의 차이를 보이며 마모 영역에 국부적으로 4 층 구조 (4 layer) 를 적층한 금형 구조가 상대적으로 높은 수명을 지님을 알 수 있었다. Fig. 73 은 3 층 구조 (3 layer) 금형의 단면부 이미지 이다. 3 층 구조 (3 layer) 의 금형은 적층부 전면에 균열이 발생하였다. 이는 금형의 표면에 전체적으로 적층을 수행하여 열간 성형 공정 시 충격하중의 분산이 이루어지지 않아 적층부 표면에서 균열이 발생하였다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

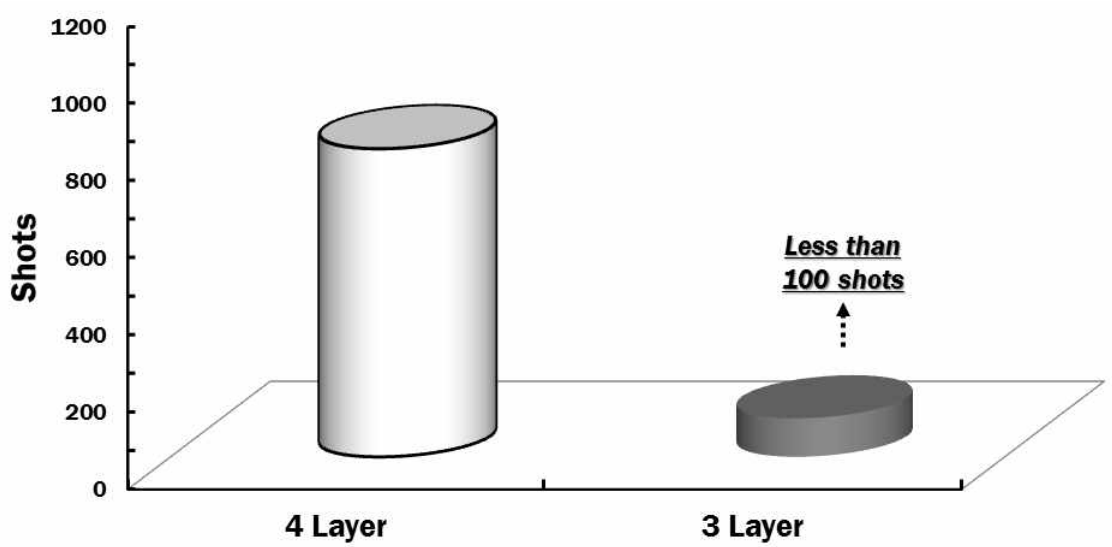


Fig. 72 Number of shots for the multi-layer hot-forging die

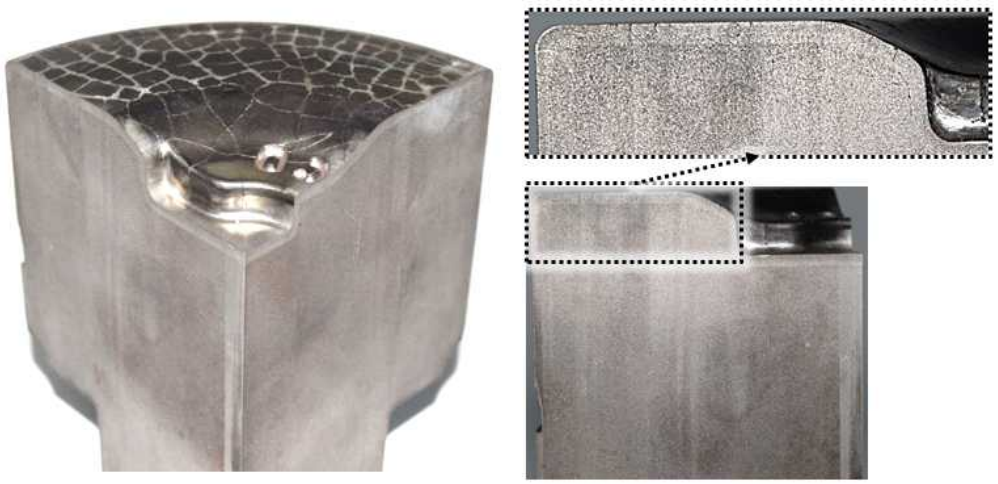


Fig. 73 Sectional view of the die in 3 layers structures hot-forging die

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 6 장 결론 및 향후 과제

본 연구에서는 혼합 손상 패턴 방지를 위한 금속 3D 프린팅 공정으로 다층적층된 금형구조의 충격 및 전자빔 표면 후처리 특성 분석을 위하여 직접식 에너지 적층 공정을 이용하여 특선개선층, 열응력제어층 및 손상저감층이 포함된 다층적층 구조의 시편을 제작하여 충격특성을 분석하였으며 SUS 304 소재에 Stellite 21 을 적층하여 재용융 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 평면 충격 경계 조건에서의 반복적 낙하 충격시험 결과 3 Layre 및 4 Laeyr 구조의 시편에서 충격 횟수가 증가하여도 하중변화는 거의 유사하게 나타내었으며 비파괴 검사결과 모든 시편에서 미세한 주름형태의 결함 예상부를 관찰할 수 있었다. 실험 후 시편에 대하여 파괴검사를 수행한 결과 3 Layer 구조과 4 Layer 구조의 Type 2 배치에서 미세 균열부가 확인됨에 따라 내충격 특성이 우수한 다층적층 조건을 4 Layer 구조의 Type 1 배치임을 도출하였다.

둘째, 다층적층 구조의 시편을 노치가 없는 형태의 샤르피 충격시험의 결과 충격으로 인한 파단 형태는 적층 경계부에서 파괴가 발생하게 되며 적층 두께가 증가할수록 적은 충격에너지 흡수율을 가짐을 알 수 있었다. 그 결과 충격에너지 흡수율이 가장 우수한 조건은 4 Layer 구조의 Type 1 배치에서 손상저감층 두께 1 mm 임을 도출하였다.

셋째, 직접식 에너지 적층공정으로 제작된 제품에 플라즈마 전자빔을 이용하여 재용융 실험을 수행하여 표면조도/조직/경도 변화를 분석하였다. 방출 전압이 증가함에 따라 표면 조도 및 경도는 증가하였으며 조직 분석결과 재용융 영역의 두께 또한 증가하였다. 하지만 플라즈마 전자빔의 과도한 반복적 조사는 표면에 국부적인 함몰부를 형성시키고 전자의 충돌로 인한 표면재료 소실 및 균열이 발생함을 알 수 있었다. 그 결과 표면조도/조직/경도 특성이 우수한 재용융 조건을 35 KeV 20 회 조사임을 도출하였다.

넷째, 다층적층 구조를 가지는 금형의 열간 성형 공정 양산 실험 결과 선행 연구된 3 Layer 구조의 금형보다 국부적으로 적층된 4 Layer 구조의 금형의 수명이 약 10 배 이상 증가함에 따라 금형의 주요 손상부에 국부적으로 4 Layer 구조로 적층하여 금형을 제작하여야 함을 알 수 있었다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

추후 고온 성형 금형에 적용될 다층적층 구조의 충격 특성 개선 및 후처리 공정에 적용할 플라즈마 전자빔 공정개발을 위하여 다음과 같은 연구를 수행해야 할 것이다. 고온 샤르피 충격시험 및 해석을 통하여 온도 변화에 따른 충격 특성 분석을 수행해야 할 것이다. 또한 금속 3D 프린팅 공정제품에 전자빔을 이용한 재용융 공정의 특성개선의 한계로 인하여 보다 적은 표면재료를 후가공한 이후 전자빔을 이용한 재용융 공정을 수행하여 표면 특성 변화 분석에 대한 연구가 이루어져야 할 것이다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

REFERENCES

1. Bodansky, D, “The United Nations framework convention on climate change: a commentary,” Yale J. Int'l l., Vol. 18, pp. 451, 1993
2. Oberthür, Sebastian, and Hermann E. Ott, "The Kyoto Protocol: international climate policy for the 21st century," Springer Science & Business Media, pp. 1-136, 1999.
3. Emissions, C. O, "Tracking Industrial Energy Efficiency and CO2 Emissions, "JRC Scientific and Technical Reports, pp. 1-324 2007.
4. Shepeleva, L., Medres, B., Kaplan, W. D, "Bamberger, M., and Weisheit, "A. Laser cladding of turbine blades," Surface and Coatings Technology, Vol. 125, No 1, pp. 45-48, 2000
5. Sexton, L., Lavin, S., Byrne, G., and Kennedy, A, "Laser cladding of aerospace materials," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 122, No. 1, pp. 63-68, 2002
6. Anton, S. R., and Inman, D. J, "Vibration energy harvesting for unmanned aerial vehicles," In SPIE's 15th Annual International Symposium on Smart Structures and Materials & Nondestructive Evaluation and Health Monitoring, Vol. 6928, pp. 692824, 2008
7. Park, C. W., Kwon, K. S., Kim, W. B., Min, B. K., Park, S. J., Sung, I. H., Yoon, Y. S., Lee, K. S., Lee, J. H. and Seok, J. W, "Energy consumption reduction technology in manufacturing－A selective review of policies, standards, and research," International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, Vol. 10, No. 5, pp. 151-173, 2009
8. Cannata, A. and Taisch, M., "Introducing energy performances in production management: towards energy efficient manufacturing," In IFIP International Conference on Advances in Production Management Systems, pp. 168-175, Springer, Berlin, Heidelberg, 2009
9. Salonitis, K. and Ball, P, "Energy efficient manufacturing from machine tools to manufacturing systems," Proceeding of CIRP, Vol. 7, pp. 634-639, 2013
10. Summerville, E., Venkatesan, K. and Subramanian, C, "Wear processes in hot forging

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

press tools," Materials & Design, Vol. 16, No. 5, pp. 289-294, 1995

11. Lee, R. S. and Jou, J. L, "Application of numerical simulation for wear analysis of warm forging die," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 140, No. 1, pp. 43-48, 2003
12. Kim, D. H., Lee, H. C., Kim, B. M. and Kim, K. H, "Estimation of die service life against plastic deformation and wear during hot forging processes," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 166, No. 3, pp. 372-380, 2005
13. Miller, A. E. and Maijer, D. M, "Investigation of erosive-corrosive wear in the low pressure die casting of aluminum A356," Materials Science and Engineering, Vol. A, No. 435, pp. 100-111, 2006
14. Terčelj, M., Panjan, P., Urankar, I., Fajfar, P. and Turk, R, "A newly designed laboratory hot forging test for evaluation of coated tool wear resistance," Surface and Coatings Technology, Vol. 200, No. 11, pp 3594-3604, 2006
15. Mitterer, C., Holler, F., Üstel, F. and Heim, D, "Application of hard coatings in aluminium die casting－soldering, erosion and thermal fatigue behaviour," Surface and coatings Technology, Vol. 125, No. 1, pp. 233-239, 2000
16. Persson, D. H., Jacobson, S. and Hogmark, S, "Effect of temperature on friction and galling of laser processed Norem 02 and Stellite 21," Wear, Vol. 255, No. 1, pp. 498-503, 2003
17. Fouilland, L., El Mansori, M. and Massaq, A., "Friction-induced work hardening of cobalt-base hardfacing deposits for hot forging tools," Journal of materials processing technology, Vol. 209, No. 7, pp. 3366-3373, 2009
18. Ahn, D. G., Kim, S. H, and Lee, H. J, "A Preliminary Study on the Application of Three-Dimensional (3D) Printing Technologies to Hot Bulk Forming Processes-Example of Preform Design and Investigation of Hot-working Tool Steel Deposited Surface," Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 31, No. 12, pp. 1093-1100, 2014
19. Park, N. R. and Ahn, D. G, "Wear characteristics of Stellite6 and NOREM02 hardfaced SKD61 hot working tool steel at the elevated temperature," International journal of precision engineering and manufacturing, Vol. 15, No. 12, pp. 2549-2558, 2014
20. Klocke, F., Arntz, K., Teli, M., Winands, K., Wegener, M, and Oliari, S,

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

"State-of-the-art Laser Additive Manufacturing for Hot-work Tool Steels," Proceeding of CIRP, Vol. 63, pp. 58-63, 2017

21. Khaing, M. W., Fuh, J. Y. H. and Lu, L, "Direct metal laser sintering for rapid tooling: processing and characterisation of EOS parts," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 113, No. 1, pp. 269-272, 2001
22. Simchi, A., Petzoldt, F. and Pohl, H, "On the development of direct metal laser sintering for rapid tooling," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 141, No. 3, pp. 319-328, 2003
23. Yasa, E. and Kruth, J. P, "Application of laser re-melting on selective laser melting parts," Advances in Production engineering and Management, Vol. 6, No. 4, pp. 259-270, 2011
24. Lee, K. S., Lee, J. G., Lee, S. H., Park, C. Y., Lee, S. G. and Park, J. H, "A Study on Machining Effects on Residual Stress at Dissimilar Metal Weld Region," Journal of Welding and Joining, Vol. 29, No. 2, pp. 56-63, 2011
25. Ding, D., Pan, Z., Cuiuri, D. and Li, H, "Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests," The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 81, No. 1-4, pp. 465-481, 2015
26. Lima, M. S. F., Folio, F. and Mischler, S, "Microstructure and surface properties of laser-remelted titanium nitride coatings on titanium," Surface and Coatings Technology, Vol. 199, No. 1, pp. 83-91, 2005
27. Yasa, E., Kruth, J. P. and Deckers, J, "Manufacturing by combining selective laser melting and selective laser erosion/laser re-melting," CIRP Annals-Manufacturing Technology, Vol. 60, No. 1, pp. 263-266, 2011
28. Marimuthu, S., Triantaphyllou, A., Antar, M., Wimpenny, D., Morton, H. and Beard, M, "Laser polishing of selective laser melted components," International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 95, pp. 97-104, 2015
29. De Formanoir, C., Michotte, S., Rigo, O., Germain, L. and Godet, S, "Electron beam melted Ti–6Al–4V: Microstructure, texture and mechanical behavior of the as-built and heat-treated material," Materials Science and Engineering: A, No. 652, pp. 105-119, 2016
30. Jung, J. H., Park, H. K., Lee, B. S., Choi, J., Seo, B. S., Kim, H. K., Kim, G. H. and Kim, H. G, "Study on surface shape control of pure Ti fabricated by electron beam

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

melting using electrolytic polishing," Surface and Coatings Technology, No. 324, pp. 106-110, 2017

31. Daichi, Y., Wang, Z., Yamazaki, K. and Sano, S, "Investigation of the formation and energy density of high-current pulsed electron beams," Plasma Chemistry and Plasma Processing, Vol. 27, No. 4, pp. 458-472, 2007
32. Okada, A., Uno, Y., McGeough, J. A., Fujiwara, K., Doi, K., Uemura, K. and Sano, S, "Surface finishing of stainless steels for orthopedic surgical tools by large-area electron beam irradiation," CIRP Annals-Manufacturing Technology, Vol. 57, No. 1, pp. 223-226, 2008
33. Wu, J., Allain-Bonasso, N., Zhang, X. D., Zou, J. X., Hao, S. Z., Grosdider, T. and Dong, C, "Low energy high current pulsed electron beam treatment for improving surface microstructure and properties," In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Vol. 12, No. 1, p. 012010, 2010
34. Kim, J., Park, S. S. and Park, H. W, "Corrosion inhibition and surface hardening of KP1 and KP4 mold steels using pulsed electron beam treatment," Corrosion Science, Vol. 89, pp. 179-188, 2014
35. Mingxi, L., Yizhu, H. and Guoxiong, S, "Microstructure and wear resistance of laser clad cobalt-based alloy multi-layer coatings," Applied Surface Science, Vol. 230, No. 1, pp. 201-206, 2004
36. Kashani, H., Amadeh, A. and Ghasemi, H. M, "Room and high temperature wear behaviors of nickel and cobalt base weld overlay coatings on hot forging dies," Wear, Vol. 262, No. 7, pp. 800-806, 2007
37. Morrow, W. R., Qi, H., Kim, I., Mazumder, J. and Skerlos, S. J, "Environmental aspects of laser-based and conventional tool and die manufacturing," Journal of Cleaner Production, Vol. 15, No. 10, pp. 932-943, 2007
38. Ahn, D. G., Lee, H. J., Cho, J. R. and Guk, D. S, "Improvement of the wear resistance of hot forging dies using a locally selective deposition technology with transition layers," CIRP Annals-Manufacturing Technology, Vol. 65, No. 1, pp. 257-260, 2016
39. Utu, D., Brandl, W., Marginean, G., Cartis, I. and Serban, V. A., "Morphology and phase modification of HVOF-sprayed MCrAlY-coatings remelted by electron beam

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

irradiation," Vacuum, Vol. 77, No. 4, pp. 451-455, 2005

40. Zhang, K., Zou, J., Grosdidier, T., Dong, C. and Yang, D, "Improved pitting corrosion resistance of AISI 316L stainless steel treated by high current pulsed electron beam," Surface and Coatings Technology, Vol. 201, No. 3, pp. 1393-1400, 2006
41. Misumi, S., Okada, A., Okamoto, Y. and Inoue, M., "Fundamental Study on Sputter Deposition of Ceramic Film by Large-Area Electron Beam Irradiation," Proceeding CIRP, Vol 6, pp. 486-491, 2013
42. Kim, D. I., Lee, H. J., Ahn, D. G., Kim, J. S. and Kang, E. G, "Preliminary Study on Improvement of Surface Characteristics of Stellite21 Deposited Layer by Powder Feeding Type of Direct Energy Deposition Process Using Plasma Electron Beam," Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 33, No. 11, pp. 951-959, 2016
43. Kim, D. I., “A Study on Design of the Damage Diminution Layer (DDL) for the Prevention of Defects of Multi-layer Deposited Metallic Materials,” published master dissertation, Departmant of Mechanical Engineering of Chosun University, 2017

Collection @ chosun