



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](#)

공학석사 학위논문

레이저 용융 적층 공정으로 제조된 소재의  
초음파 나노표면개질에 관한 연구

A Study of Ultrasonic Nanocrystal Surface Modification on the  
Materials Fabricated via Direct Energy Deposition

지도교수 심도식

2020년 2월

한국해양대학교 대학원

조선기자재공학과  
김민섭

본 논문을 김민섭의 공학석사 학위논문으로 인준함.

위원장 이 은 경 (인)

위 원 심 도 식 (인)

위 원 이 승 효 (인)

2019년 12월 17일

한국해양대학교 대학원

# 목 차

List of Tables .....	iii
List of Figures .....	iv
Nomenclatures .....	ix
Abstract .....	x
<b>1. 서 론 .....</b>	<b>1</b>
1.1 연구 배경 .....	1
1.1.1 레이저 금속 적층된 제품의 표면 특성 .....	2
1.1.2 직접 용융 적층법 .....	2
1.2 연구 동향 .....	4
1.2.1 적층 소재 표면 개선을 위한 연구 사례 .....	4
1.2.2 적층 소재의 기계적 성능 개선 및 표면 처리 .....	4
1.3 연구 목적 .....	10
<b>2. 초음파 나노표면개질 .....</b>	<b>11</b>
2.1 초음파 나노표면개질 .....	11
2.2 기초 실험 .....	15
2.2.1 실험 재료 .....	22
2.2.2 DED 적층 조건 및 UNSM 조건 설정 .....	23
2.3 실험 결과 .....	25
2.3.1 적층 표면 구조 변화 .....	25
2.3.2 표면부 미세조직 변화 .....	30
<b>3. UNSM 표면 개질 요인 효과 분석 .....</b>	<b>35</b>
3.1 반응표면분석 실험 설계 .....	35
3.2 공정 조건에 따른 표면 특성 분석 .....	42
3.2.1 정적 하중의 영향 .....	43
3.2.2 인터벌의 영향 .....	47
3.2.3 이송 속도의 영향 .....	50

3.3 반응표면분석법을 이용한 공정 최적화 .....	55
3.3.1 실험 결과 및 분석 .....	55
3.3.2 UNSM 공정 최적화 .....	67
<b>4. DED 고속도공구강에 대한 UNSM 효과 분석 .....</b>	<b>80</b>
4.1 실험 장비 및 재료 .....	80
4.2 실험 방법 .....	84
4.2.1 표면 거칠기 분석 .....	84
4.2.2 미세조직 관찰 .....	84
4.2.3 표면 잔류응력 측정 .....	85
4.2.4 경도시험 .....	85
4.2.5 스크래치 시험 .....	86
4.2.6 내마모성 시험 .....	86
4.3 실험 결과 .....	88
4.3.1 표면 거칠기 변화 분석 .....	88
4.3.2 미세조직 변화 분석 .....	94
4.3.3 표면 잔류응력 변화 분석 .....	99
4.3.4 경도 변화 분석 .....	103
4.3.5 스크래치 저항성 분석 .....	107
4.3.6 내마모성 분석 .....	112
<b>5. 결론 .....</b>	<b>118</b>
<b>참고문헌 .....</b>	<b>121</b>

## List of Tables

<b>Table 1.</b> Consequences of various mechanical surface treatment process on mechanical properties .....	9
<b>Table 2.</b> Chemical compositions of AISI 316L .....	22
<b>Table 3.</b> DED processing parameters of AISI 316L .....	24
<b>Table 4.</b> UNSM processing parameters to DEDED 316L .....	24
<b>Table 5.</b> Variables and levels of the UNSM process .....	39
<b>Table 6.</b> Experimental design of the UNSM process .....	41
<b>Table 7.</b> Values of process parameters investigated .....	42
<b>Table 8.</b> Average observed waviness for UNSM parameters .....	54
<b>Table 9.</b> Average observed surface roughness for UNSM parameters .....	54
<b>Table 10.</b> Experimental results for waviness(Wa) and surface roughness(Ra) .....	57
<b>Table 11.</b> ANOVA for waviness(Wa) .....	61
<b>Table 12.</b> ANOVA for surface roughness(Ra) .....	62
<b>Table 13.</b> ANOVA for waviness(Wa) after stepwise regression .....	65
<b>Table 14.</b> ANOVA for surface roughness(Ra) after stepwise regression .....	66
<b>Table 15.</b> Validation test of optimized results .....	78
<b>Table 16.</b> Observed waviness and surface roughness values and comparison with the optimized sample .....	79
<b>Table 17.</b> Chemical compositions of AISI D2 and AISI M4 .....	81
<b>Table 18.</b> DED processing parameters of AISI M4 .....	83
<b>Table 19.</b> UNSM treatment parameters on AISI M4 .....	83
<b>Table 20.</b> Wear test conditions .....	87
<b>Table 21.</b> Chemical composition of worn surface of DEDED M4 .....	116

## List of Figures

<b>Fig. 1.</b> Laser metal deposition .....	1
<b>Fig. 2.</b> Application of direct energy deposition(DED) .....	3
<b>Fig. 3.</b> Mechanical surface treatments; (a) shot peening, (b) deep cold rolling, (c) ultrasonic shot peening, (d) laser shock peening, (e) water jet cavitation peening, and (f) vibro peening .....	6
<b>Fig. 4.</b> Ultrasonic nanocrystal surface modification(UNSM) device .....	8
<b>Fig. 5.</b> Schematic diagram of (a) UNSM experimental setup and (b) UNSM process .....	12
<b>Fig. 6.</b> Schematic diagram of (a) DED process and (b) scanning procedure for multi-layer deposition .....	14
<b>Fig. 7.</b> Schematic illustration of the deposited layer surface .....	17
<b>Fig. 8.</b> SEM image and 3D topographies of the DED deposited surface .....	18
<b>Fig. 9.</b> Roughness and waviness in a surface .....	19
<b>Fig. 10.</b> Arithmetic mean roughness/waviness value .....	20
<b>Fig. 11.</b> Typical surface roughness created using different manufacturing methods .....	21
<b>Fig. 12.</b> SEM image of AISI 316L powder .....	22
<b>Fig. 13.</b> Samples and SEM images of the DEDed surface of (a1-a2) untreated, (b1-b2) UNSM-treated samples, (c) 2D surface profile of the untreated and UNSM-treated samples. ....	26
<b>Fig. 14.</b> 3D surface topography of UNSM-treated surface according to interval; (a) 30 $\mu\text{m}$ , (b) 50 $\mu\text{m}$ , (c) 70 $\mu\text{m}$ , (d) 90 $\mu\text{m}$ .....	28
<b>Fig. 15.</b> Surface waviness and roughness of the DEDed surface after UNSM. UNSM treatment was applied to the (a) perpendicular, (b) parallel directions with the DED deposition direction .....	29

**Fig. 16.** Optical micrographs of the near-surface microstructure (a) before and (b) after UNSM, and (c) schematic illustration of the changes in surface microstructure during the UNSM treatment on the DED surface ..... 31

**Fig. 17.** Optical micrographs showing the microstructures in the near-surface UNSM treatment according to interval and direction relationship. (a) Before UNSM treatment, after treated (b) perpendicular and (c) parallel to DED direction. The deformed layer shown by yellow broken line ..... 33

**Fig. 18.** Depth of deformed microstructure from the surface after UNSM treatment ..... 34

**Fig. 19.** Diagram of (a)  $2^k$  factorial design( $k=2$ ), (b) axial and central point design, the central composite design for (c)  $k=2$  and (d)  $k=3$  ..... 38

**Fig. 20.** Surface topographies according to static load; (a) 10 N, (b) 40 N, and (c) 70 N ..... 44

**Fig. 21.** Effects of static load on waviness and surface roughness of the DEDed surface after UNSM ..... 44

**Fig. 22.** SEM images of the near-surface microstructures after UNSM treatment according to static load; (a) 10 N, (b) 40 N, (c) 70 N, and (d) plot of the deformed depth at each static load ..... 46

**Fig. 23.** Surface topographies according to interval; (a) 10  $\mu\text{m}$ , (b) 50  $\mu\text{m}$ , and (c) 90  $\mu\text{m}$  ..... 48

**Fig. 24.** Effects of interval on waviness and surface roughness of the DEDed surface after UNSM ..... 48

**Fig. 25.** SEM images of the near-surface microstructures after UNSM treatment according to interval; (a) 10  $\mu\text{m}$ , (b) 50  $\mu\text{m}$ , (c) 90  $\mu\text{m}$ , and (d) plot of the deformed depth at each interval ..... 49

<b>Fig. 26.</b> Surface topographies according to scanning speed (a) 2000 mm/min, (b) 2500 mm/min, and (c) 3000 mm/min .....	51
<b>Fig. 27.</b> Effects of scanning speed on surface waviness and roughness of the DEDed surface after UNSM .....	51
<b>Fig. 28.</b> SEM images of the near-surface microstructures after UNSM treatment according to scanning speed; (a) 2000 mm/min, (b) 2500 mm/min, and (c) 3000 mm/min, and (d) plot of the deformed depth at each scanning speed .....	52
<b>Fig. 29.</b> UNSM treated specimens according to central composite design .....	56
<b>Fig. 30.</b> Surface plot and contour plot of waviness with (a) SL and IN, (b) SL and SS, (c) SS and IN .....	69
<b>Fig. 31.</b> Surface plot and contour plot of surface roughness with (a) SL and IN, (b) SL and SS, (c) SS and IN .....	72
<b>Fig. 32.</b> Desirability function for simultaneous optimization(target is to minimize y) .....	73
<b>Fig. 33.</b> Response surface method optimizer plot about (a) waviness and surface roughness. The adjusted optimization results via changing experimental conditions; (b) Static load 45 N, interval 10 $\mu\text{m}$ , scanning speed 2600 mm/min and (c) static load 50 N, interval 10 $\mu\text{m}$ , scanning speed 2600 mm/min .....	75
<b>Fig. 34.</b> UNSM treated DEDed 316L samples with optimized condition .....	78
<b>Fig. 35.</b> SEM image of AISI M4 powder .....	81
<b>Fig. 36.</b> Experimental process of DED process and UNSM treatment .....	82
<b>Fig. 38.</b> Schematic diagrams of wear test specimens; (a) H-D2, (b) DEDed M4, and (c) UNSM-DEDED M4 .....	87

**Fig. 39.** Surface shape and 3D surface shape (a1-b1) and 2D profiles (a2 -b2) observed by FE-SEM for (a) ground surface of DEDed M4 and (b) surface of UNSM-DEDED M4 ..... 89

**Fig. 40.** DEDed M4 surface shapes obtained under various UNSM conditions ..... 91

**Fig. 41.** Differences in surface roughness for DEDed M4 samples under different UNSM conditions ..... 92

**Fig. 42.** Examples of micro-cracks in on UNSM-DEDED M4 surface ..... 93

**Fig. 43.** X-ray diffractograms of DEDed M4 before and after UNSM treatment ..... 95

**Fig. 44.** Microstructures of DEDed M4 surface (a) before and (b) after UNSM treatment ..... 97

**Fig. 45.** Cross-sectional EBSD observations of DEDed M4 specimen (a) before and (b) after UNSM treatment. (c) The graph showing the change in relative phase fraction ..... 98

**Fig. 46.** Comparison of changes in surface residual stress; DEDed M4, tempered DEDed M4, and UNSM treated DEDed M4 ..... 101

**Fig. 47.** Surface FWHMs for (a) control group measured at  $\phi 0^\circ$  ,  $\phi 90^\circ$  and for (b) UNSM-treated specimen at  $\phi 0^\circ$  ,  $\phi 90^\circ$  ..... 102

**Fig. 48.** Micro-hardness variation with depth for H-D2, DEDed M4, and UNSM-DEDED M4 ..... 105

**Fig. 49.** Measured micro-hardness variation with depth for control and UNSM parameters; (a) static load: 30 N, (b) scanning speed: 2500 mm/min, (c) variable strain energy density ..... 106

**Fig. 50.** (a-c) 3D groove shapes after scratch test and (a' -c' ) groove width measurement results; (a-a' ) H-D2, (b-b' ) DEDed M4, (c-c' ) UNSM-DEDED M4 ..... 109

**Fig. 51.** Cross-section profile of specimens after scratch test ..... 110

**Fig. 52.** Photographs of wear tracks after ball-on-disk wear test for (a) H-D2, (b) DEDed M4, and (c) UNSM-DEDED M4, and (a' -c' ) corresponding FE-SEM images of wear track width ..... 112

**Fig. 53.** FE-SEM images of worn surface morphologies of (a) H-D2, (b) DEDed M4, and (c) UNSM-DEDED M4 after test ..... 115

**Fig. 54.** Comparison of wear rates for heat-treated AISI D2, DED M4, and DED M4 after UNSM treatment ..... 117



## Nomenclatures

$A$	:	초음파 진폭 (ultrasonic amplitude)
$d$	:	볼 팁 직경 (the diameter of the ball tip)
$E$	:	변형 에너지 밀도 (strain energy density)
$F$	:	총 하중 (total load)
$f$	:	초음파 진동수 (ultrasonic frequency)
$N$	:	단위 면적 당 충돌수 (the number of impacts per unit area)
$P_{am}$	:	진폭 하중 (amplitude load)
$P_{dy}$	:	동적 하중 (dynamic load)
$P_{st}$	:	정적 하중 (static load)
$s$	:	인터벌 (interval)
$v$	:	이송속도 (scanning speed)
$S^2PD$	:	표면 강소성 변형 (surface severe plastic deformation)

# The Improvement and Evaluation of Surface Properties of Direct Laser Melting Deposited Materials by Ultrasonic Nanocrystal Surface Modification Technology

Kim, Min Seob

Department of Marine Equipment Engineering  
Graduate School of Korea Maritime and Ocean University

## Abstract

The laser metal deposition(LMD) technology has garnered much attention for being able to realize complex shapes and producing little waste material, thereby addressing the limits of existing metal product processing. Direct energy deposition (DED), a branch of laser melting deposition technology, can realize precise structures and excellent mechanical properties, and thus, it is used for various applications such as strengthening the surface of products(hardfacing) or remodeling and repairing the damaged components. However, surfaces that have been deposited by DED exhibit poor quality because the deposition bead layer shape and spatter remain on the surfaces. The surface characteristics affect not only the appearance of the product but also its mechanical functions and lifetime, making post-milling processing indispensable for refining the surface after the DED process. Furthermore, In a metal additive manufacturing process, metal powder is melted by a high-power laser before solidification; thus, a rapid temperature change is experienced, which generates tensile residual stress. The tensile residual stress in the DEDed M4 may reduce the fatigue performance and shorten the product life. UNSM technology not only improving surface roughness and refining surface microstructure by applying severe plastic deformation(S<sup>2</sup>PD) to the material surface, but also induces the compressive residual stress and improves the wear-resistance of the materials. Given that UNSM can improve a material's surface performance, in this study, UNSM technology is applied to DEDed surfaces with the aim of improving the DED product's surface quality.

It was found to the UNSM technology has a beneficial effect on reducing the surface roughness and waviness by improving the poor surface of DED products. Also, it was confirmed that the UNSM technology can induce a compressive residual stress to the DED product and improve mechanical performance including wear resistance.

**KEY WORDS:** Direct energy deposition 직접 에너지 적층; Ultrasonic nanocrystal surface modification 초음파 나노표면개질; Residual stress 잔류응력; Wear-resistance 내마모성; Surface properties 표면 특성.



# 제 1 장 서 론

## 1.1 연구 배경

적층 제조 기술(additive manufacturing process)은 3D 형상 데이터를 바탕으로 입체적인 부품을 한 층씩 쌓아올려 제작하는 가공 방법이다. 레이저 금속 적층 기술(laser metal deposition)은 적층 제조 기술 중 한 분류로써, 금속 분말을 레이저로 녹여 한 층씩 적층 제조하는 기술이다. 때문에, 레이저 금속 적층 기술은 기존의 공정으로는 구현하기 힘들었던 복잡한 형상의 제품을 제작할 수 있으며, 공정을 단축할 수 있어 경제적이며, 또한 제조 단계에서 원소재의 낭비가 거의 없기 때문에 친환경적이다. 이러한 장점 덕분에 이전의 금속 제품 가공의 한계를 극복하고 제조 산업 한 단계 진보시킬 수 있는 획기적인 기술로써 많은 주목을 받았다[1]. 레이저를 이용한 금속적층 기술은 레이저 출력(laser power) 과 파우더 공급량(powder flow rate), 동축 가스 공급량(coaxial gas)에 따라, 적층부(deposition)의 밀도와 부피가 결정된다. 그리고 금속분말의 용융과 응고조건에 따라 기계적 특성의 차이를 보여주기 때문에, 목적에 맞는 금속분말을 선택하고, 공정 조건을 설정하는 것이 매우 중요하다[2].



Fig. 1. Laser metal deposition

### 1.1.1 레이저 금속 적층된 제품의 표면 특성

레이저 금속 적층 기술은 미리 설정한 레이저의 경로를 따라서 다수의 적층 트랙(deposited track)을 겹겹이 쌓아 제조하는 공정 특성 상, 정교한 표면 형태를 구현하는 데에 한계가 있다[3]. 그리고 고출력의 레이저를 열원으로 사용하기 때문에, 공정에 쓰이는 금속 소재들은 상당한 열에너지와 플라즈마에 노출된다. 그리고 급격한 온도 변화를 겪기 때문에, 적층 제조된 표면에는 적층 비드와 스패터(spatter)가 남게 된다[4]. 이러한 불순물들은 제품의 외관에 좋지 못하며, 적층 표면에 잔존하는 균열(crack)과 기공(pore)으로 인해 제품 손상이 발생하기 쉽다. 따라서 DED 공정으로 적층 제조한 표면의 비드를 연삭 제거하고 면을 다듬질하는 후가공(post-process)을 거치게 된다. 후가공 공정으로는 기계 연마와 샌드 블라스팅(sand blasting)과 같은 물리적인 방법, 에칭(etching) 및 전해 연마 가공 등의 화학적인 방법, 그리고 플라즈마를 방사하여 표면을 가공하는 열역학적인 공정 등 그 종류가 매우 다양하다. 하지만 이러한 후가공 공정은 제품의 품질에 직접적인 영향을 미치기 때문에 많은 공정을 요구할 뿐만 아니라 소재가 연삭으로 제거되므로 경제성과 효율성이 저하되는 한계점이 있다.

### 1.1.2 직접 용융 적층법

레이저 금속 적층 기술 중 하나인 직접 용융 적층법(direct energy deposition, DED)은 복잡한 형태의 제품을 생산하거나, 금속의 하드페이싱(hardfacing), 보수재생(maintenance) 등에도 다양하게 이용되고 있다(Fig. 2)[5]. 그리고 이러한 DED 기술을 적용하여 금형의 국부적인 표면강화 기술에 대한 연구가 활발히 진행되고 있는 실정이다.

이러한 DED 기술을 적용하여 Kim 등은 AISI M2 금속분말을 표면에 적층하여 모재보다 표면 경도를 약 30~50% 향상시켰으며[6], Leunda 등은 Vanadis 4 공구강에 CPM 금속분말을 적층하여 내마모성을 향상시켰다[7]. 이러한 사전연구들을 기반으로 레이저 클래딩(laser cladding) 기술을 이용하여 실제 블랭킹 펀치(blanking punch)의 수명을 향상시키는 연구[8]와 파손된 H13 금형에 CPM 금

속분말 적층하여 경도변화와 잔류응력 측정 등을 통하여 금형 보수에 관한 연구들도 수행되었다[9]. 또한, 텅스텐(W)과 바나듐(V), 몰리브데넘(Mo) 함량이 높은 고속도공구강(high-speed tool steel)이 레이저에 의해 용융되고 응고되는 과정에 미세탄화물(fine carbide)을 형성하기 때문에 표면에서의 경도와 내마모성이 향상되는 것이 입증되었다[10].

그러나, 위와 같은 연구들은 적층하여 제조한 공구강의 금속 표면의 경도와 내마모성과 관련된 연구에만 집중되었다. 공구강이 실제 산업분야에서 사용하려면 공구강의 경도와 내마모성뿐만 아니라 피로 성능도 고려되어야 한다. 그런데 레이저 금속 적층 기술 특성 상, 금속 분말이 레이저의 높은 출력에 의해 용융되었다가 다시 응고하면서 급격한 온도 변화를 겪게 되어 인장잔류응력(tensile residual stress)을 갖게 된다[11]. Edwards와 Ramulu[12], Wycisk 등[13]은 SLM(sintering laser meting) 방식으로 제조한 타이타늄(Ti) 소재 내부의 인장응력이 인장피로거동에 미치는 영향에 대해 연구했다. 인장잔류응력은 적층 제조된 금속의 기계적 성질과 피로 강도를 저하시키는 치명적인 원인이 되기 때문에, 앞서 언급한 DED 기술로써 하드페이싱을 통한 금형의 수명 향상에는 그 한계가 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서 레이저 금속 적층 기술로 제조된 소재의 성능을 보완하는 대안을 모색해야 한다.

### 직접 용융 적층법 적용 분야



Fig. 2. Application of direct energy deposition(DED)

## 1.2 연구 동향

### 1.2.1 적층 소재 표면 개선을 위한 연구 사례

적층 제조된 제품의 열악한 표면을 개선하기 위해 여러 가지 표면 처리 연구가 진행되었다. Zhu 등[14]과 Alimardani 등[15]은 레이저를 이용하여 적층 조건에 따른 표면 특성을 분석하였다. Gong과 Li는 DED 표면에 대하여 밀링(milling) 가공을 할 때의 적층 재료, 가공 방향 및 가공 시간에 따른 표면 거칠기를 분석하였다[16]. Farayibi 등은 워터젯(water-jet) 및 전자 빔 조사(irradiation)가 DED 표면의 표면 특성을 향상시킬 수 있음을 입증하였고[17], Luo 등도 laser shock peening(LSP) 처리를 통해 그 표면 특성이 개선되었음을 확인하였다[18]. 하지만 금속 적층 공정에서 레이저의 변수를 조정하더라도 레이저를 이용한 공정 특성 상, 표면 구조(surface texture)가 완전히 개질되지 않으며, 밀링과 워터젯은 소재의 표면이 제거되는 문제점이 있다. 또한, LSP 공정은 소재의 경도 상승과 소재 내부의 잔류응력을 개선시키는 장점이 있더라도 레이저 조사로 인한 표면층의 열 변형으로 추가 가공이 필요한 단점이 있다. 때문에 선행 연구 사례들의 한계점을 반영하여 소재의 탈락 없이 표면의 형상 및 거칠기 개선하며, 동시에 소재의 기계적 특성도 향상시킬 수 있는 새로운 표면 처리 기술을 탐색하였다.

### 1.2.2 적층 소재의 기계적 성능 개선 및 표면 처리

레이저 금속 적층 소재의 기계적 성능을 향상시키기 위한 방법 중 하나로, 적층 공정 뒤에 후열처리(post-heat treatment)를 적용한 사례가 있다. Telasang 등은 AISI H13 모재에 동종 소재 AISI H13 분말을 레이저 클래딩한 뒤, 후열처리를 적용하여 적층 소재의 기계적 성능을 향상시켰다[19]. Sun 등은 AISI 4340에 대하여 레이저 클래딩을 적용한 뒤에 후열처리 전후의 인장 특성 및 피로성능을 연구하였으며, 후열처리를 적용한 소재가 그렇지 않은 소재보다 그 성능

이 좋다는 결론을 내렸다[20]. 또한, 초고강도강(ultra-high strength steel) AerMet® 100 모재에 동종 소재를 적층하여 열처리를 적용하여 인장잔류응력을 해소하여 피로성능을 개선시킨 사례도 있다[21]. 하지만 적층 소재에 대한 후열 처리는 적층 소재의 치수 변화를 발생시키며, 열처리에 대한 정밀한 제어가 어려운 단점이 있다.

재료의 파괴(failure)는 표면에 발생한 균열이 점차 전파되면서 발생한다. 이를 보완하기 위해 재료의 피로성능을 향상시키고자 많은 연구가 진행되었다. 특히, 재료 내부의 압축잔류응력과 가공경화는 균열이 전파되는 것을 억제하여 피로 수명을 향상시킬 수 있기 때문에 재료 표면층의 기계적 특성 개선을 통하여 피로수명 향상을 위한 기술이 발전되어왔다. 기계적 표면 처리(mechanical surface treatment)는 강소성 변형(severe plastic deformation)을 통해 표면의 형상(topology), 미세 구조 및 재료 특성을 개질하는 표면 처리 기법이다[22]. 이러한 기계적 표면 처리는 표면에 높은 밀도의 나노결정 미세구조(nanocrystalline structure) 생성하여 재료를 강화시키며, 이 강화는 Eq. (1)과 같이 여러 강화 효과들이 복합적으로 작용하여 나타나는 것으로 볼 수 있다[23].

$$\sigma = \sigma_0 + \sigma_\rho + \sigma_b \quad (1)$$

여기서,  $\sigma_0$ 는 마찰에 의한 응력(friction stress),  $\sigma_\rho$ 는 전위(dislocation)에 의한 강화,  $\sigma_b$ 는 결정립계(grain boundary)에 의한 강화를 의미한다.

기계적 표면 처리는 샷 피닝(shot peening, SP), 딥 콜드 롤링(deep cold rolling, DCR), 초음파 샷 피닝(ultrasonic shot peening, USP), 레이저 쇼크 피닝(laser shock peening, LSP) 등 여러 방법들이 있다. Fig. 3은 대표적인 기계적 표면 처리를 나열한 것이다.

샷 피닝(SP)은 고속으로 발사되는 매개체가 재료의 표면에 충돌하여 강소성 변형을 발생시키고 압축잔류응력 및 가공경화(strain hardening)를 유도하는 방법이다[24]. 기계적 표면 처리 기술 중에서 가장 먼저 도입되었으며, 압축공기로써 모래나 금속의 구를 재료 표면에 발사하는 에어 블라스트 샷 피닝(air blast shot peening, ABSP)이 대표적이다. 그러나 샷 피닝의 공정변수는 너무나 다양하여 각각의 공정변수를 통해 얻어지는 가공도 평가 척도로서 알멘 게이지(almen gage)를 설치하여 변형된 정도를 측정한다[25].

딥 콜드 롤링(DCR)은 버니싱(burnishing)이라고도 불리며, 수압 또는 유압으로 제어되는 금속 볼을 재료 표면에 눌러 압연하여 강소성 변형을 유도한다[26]. 비록 유도되는 압축잔류응력의 크기는 작지만, SP보다 깊은 영역까지 유도할 수 있다. DCR에 의해 냉간 가공 비율이 높고 압축 잔류 응력이 깊은 영역까지 부여되어 있으며, 표면 거칠기가 낮은 소재가 기존의 표면 처리 방법보다 약 5 배 높은 피로성능을 보인 사례도 있다[27]. 하지만, 복잡한 형상에 적용하기에는 어려움이 있어, 평평한 표면에 대해서만 사용할 수밖에 없는 제한사항이 있다.

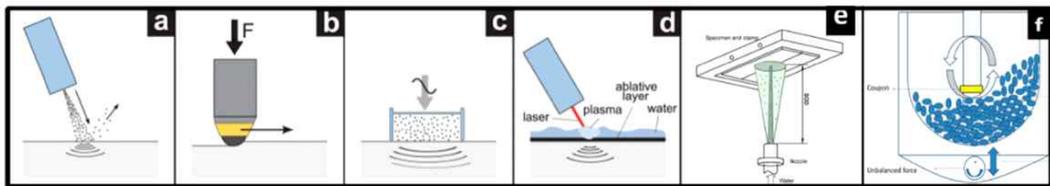


Fig. 3. Mechanical surface treatments; (a) shot peening, (b) deep cold rolling, (c) ultrasonic shot peening, (d) laser shock peening, (e) water jet cavitation peening, and (f) vibro peening[22]

초음파 샷 피닝(ultrasonic shot peening, USP)은 고주파의 초음파의 출력을 이용하여 구체의(spherical) 매개체를 진동시킴으로써, 매우 짧은 주기로 재료 표면에 충돌시킨다. USP의 주요 공정 변수는 초음파 진동수와 매개체의 크기, 피닝 적용 시간이 있다[28].

레이저 쇼크 피닝(laser shock peening, LSP)은 고출력의 펄스 레이저를 금속 표면에 고압의 플라즈마를 노출시키는데, 이 플라즈마의 충격파로써 표면에 강소성 변형을 유기시킨다[29]. 큰 압축잔류응력을 깊은 영역까지 부여할 수 있어서 효과가 우수하지만, 플라즈마의 노출에 의한 소재의 열 변형이 발생하는 단점이 있다.

이처럼 여러 가지 기계적 표면 처리 기술이 적용되고 개발되어 왔으나 공정을 적용하는 데에 있어서 외부의 요인에 대한 영향을 많이 받기 때문에, 표면과 충돌하는 매개체들의 정밀도 하락과 더불어 표면 처리 공정에 대한 신뢰성 또한 감소하게 된다. 그리고 재료의 표면 구조(surface texture) 또한 피로성능을 좌우하는 요소 중 하나이다. 재료의 표면 거칠기를 제어함으로써 표면 품질, 마찰 특성, 부식과 침식 등이 크게 개선되어 표면 손상으로 인한 내피로 및 내파괴 성능을 향상시킬 수 있다[30]. 하지만 앞서 언급한 기계적 표면 처리 공정들에 대한 연구는 단지 소재 내부의 압축잔류응력 부여, 가공경화 효과만 고려하였기 때문에 표면을 개질한 사례는 보고된 바가 거의 없다.

초음파 나노표면개질(ultrasonic nanocrystal surface modification, UNSM)은 이전의 연구를 통해 금속 재료의 내마모성[31]과 피로강도[32], 내식성[33] 등을 향상시킬 수 있음이 증명된 표면 처리 기술이다. 또한, 재료 표면에 마찰 특성 향상을 위한 마이크로 딥플 형상(micro-dimple topology)을 동시에 구현할 수 있다[34]. 또한, UNSM은 공정 변수를 정밀하게 제어할 수 있기 때문에, 기존의 ABSP이나 LSP, 그리고 비슷한 원리의 USP 기법보다 더 정밀하고 깊은 영역까지 소성 변형시킬 수 있어 효과적으로 제품의 표면 특성을 향상시킬 수 있다고 보고된 기술이다[35, 36, 37]. 이러한 UNSM 기술과 앞서 언급한 기계적 표면 처리 공정들의 기계적 특성 향상 정도를 Table 1에 나타냈다[35, 38, 39].

이러한 UNSM의 장점 때문에 레이저 금속 적층 제조된 소재들에 대하여 표면 처리를 적용한 연구가 보고되었다. Ma 등은 UNSM 표면 처리 공법으로 direct metal laser sintering(DMLS)으로 제조한 AlSi10Mg의 표면 거칠기를 개선시켰으며, selective laser melting(SLM) 기법으로 적층한 Ni-Ti의 표면 거칠기와 마모 특성을 향상시켰다[40, 41]. Zhang 등은 DMLS로 만든 Ti64 소재에 UNSM 처리를 하여 표면 거칠기와 표면경도를 개선하고, 인장잔류응력을 압축잔류응력으로 바꿔 피로성능까지 향상시켰다[42]. 그리고 Cho 등은 열처리 하지 않은 일반(bulk) AISI H13와 direct metal tooling (DMT)로 적층한 AISI H13에 대해 UNSM 처리 전후의 표면 거칠기, 표면 경도, 마찰 및 마모 거동, 미세조직변화에 대해 연구했다[43].



Fig. 4. Ultrasonic nanocrystal surface modification(UNSM) device

**Table 1.** Consequences of various mechanical surface treatment process on mechanical properties[35, 38, 39]

Mechanical surface treatment	Shot peening (SP)	Deep cold rolling (DCR)	Ultrasonic shot peening (USP)	Laser shock peening (LSP)	Ultrasonic nanocrystal surface modification (UNSM)
source	powder injection	Static load	Ultrasonic vibration	Laser plasma shockwave	Static load & Ultrasonic frequency
Compressive residual stress / depth	1	4	2	5	3
Hardness / depth	1	3	2	4	5
Nanocrystal structure	2	3	4	1	5
Surface texture	2	1	3	5	4
Surface roughness	2	4	3	1	5

(1: poor ~ 5: excellent)

### 1.3 연구목적

후가공하지 않은 DED 제품의 적층 표면에 대하여 여러 연구 사례가 보고되었지만, UNSM 처리를 통한 그 효과를 입증한 사례가 보고되지 않았다. 그래서 본 연구에서는 DED 제품의 열악한 표면 품질을 향상시키기 위한 표면 처리 방법으로써 후가공하지 않은 DED 적층 표면에 UNSM 기술을 적용하였다. DED 적층 표면에 대한 UNSM의 공정 조건을 달리하여, 그에 따른 표면 거칠기와 파상도 및 표면부에서의 미세조직 변화를 분석하였다.

또한, 레이저 금속 적층 기술로 제조된 다양한 소재들에 대한 UNSM 효과는 보고되었지만, 적층 제조된 소재 자체의 변화에만 초점이 맞춰져 있었다. 특히, DED로 하드페이싱한 냉간 금형 강에 대해 UNSM을 적용하여 얻을 수 있는 종합적인 효과는 아직 보고된 바가 없다. 그리고 후가공하지 않은 DED 제품의 적층 표면에 대하여 UNSM 처리를 통한 그 효과를 입증한 사례가 보고되지 않았다. 따라서 본 연구에서는 금형강 중의 하나인 AISI D2에 DED 공법으로 고속도공구강(high speed tool steel) AISI M4를 하드페이싱한 소재에 UNSM 처리를 했다. 그리고 DED에 대한 UNSM의 효과를 알아보기 위해 표면 경도와 표면 거칠기, 미세조직, 표면 잔류응력, 스크래치 저항성, 내마모성의 변화에 대해 논의하였다. 특히, 경도 및 내마모성 효과에 대해서는 DED로 하드페이싱한 사례를 다룬 이전의 연구들과 유사하게, 금형에 주로 적용되는 열처리한 AISI D2도 실험군에 추가하여 DED 하드페이싱 및 그에 대한 UNSM 효과를 분석하였다.

## 제 2 장 초음파 나노표면개질

### 2.1 초음파 나노표면개질

초음파 나노표면개질(ultrasonic nanocrystal surface modification, UNSM)은 초음파 진동에너지를 이용하여 가공할 소재의 일정 면적만큼 수  $\mu\text{m}$ 의 진폭으로 초당 수만 번 충돌시켜 소재의 표면에 강소성 변형(surface severe plastic deformation, S<sup>2</sup>PD)을 유발시키는 기술이다[44]. Fig. 5 (a)는 UNSM 장치의 개략도를 나타낸 것이다. 무게 추(weight)로 정적 하중(static load)을 조절하고, 초음파 발전기(oscillator)에서 특정 주파수의 초음파를 발생시킨다. 그리고 발생한 초음파는 트랜스듀서(transducer)와 부스터(booster) 장치가 텅스텐 카바이드 재질(경도 1700 HV)의 볼 팁(ball tip)이 부착된 압입자(indenter)로 하중을 전달하는데 사용된다. 이 때 전달되는 하중의 크기는 무게 추의 정적 하중(static load)과 초음파의 진동에너지로 인한 동적 하중(dynamic load)이 결합된 양이다[32]. UNSM 장치는 NC/CNC 공작기계에 설치되기 때문에 표면에 대한 정밀한 가공이 가능하다.

Fig. 5 (b)는 소재 표면에 UNSM 기술을 적용하는 모습을 나타낸 것이다. UNSM 볼 팁과 표면이 충돌하여 표면에 강소성 변형이 발생하고, 압축잔류응력과 더불어 표면 조직 내부에서 전위(dislocation)가 발생한다. 그리고 초음파 진동에 의해 반복적으로 UNSM 볼 팁과 표면이 충돌하여 표면 내부의 전위가 증식, 마침내 표면 조직 결정립은 미세화된다. 이로 인한 가공경화에 의해 표면 조직의 경도가 향상하게 된다. 또한, 반복적인 충돌에 의해 표면에는 규칙적인 마이크로 딥플 형상 구현과 더불어 표면이 정돈되어 표면 거칠기가 개선된다. 즉, 소재의 표면에 UNSM 기술을 적용함으로써 강도와 피로특성, 내마모성을 향상시킬 수 있다.

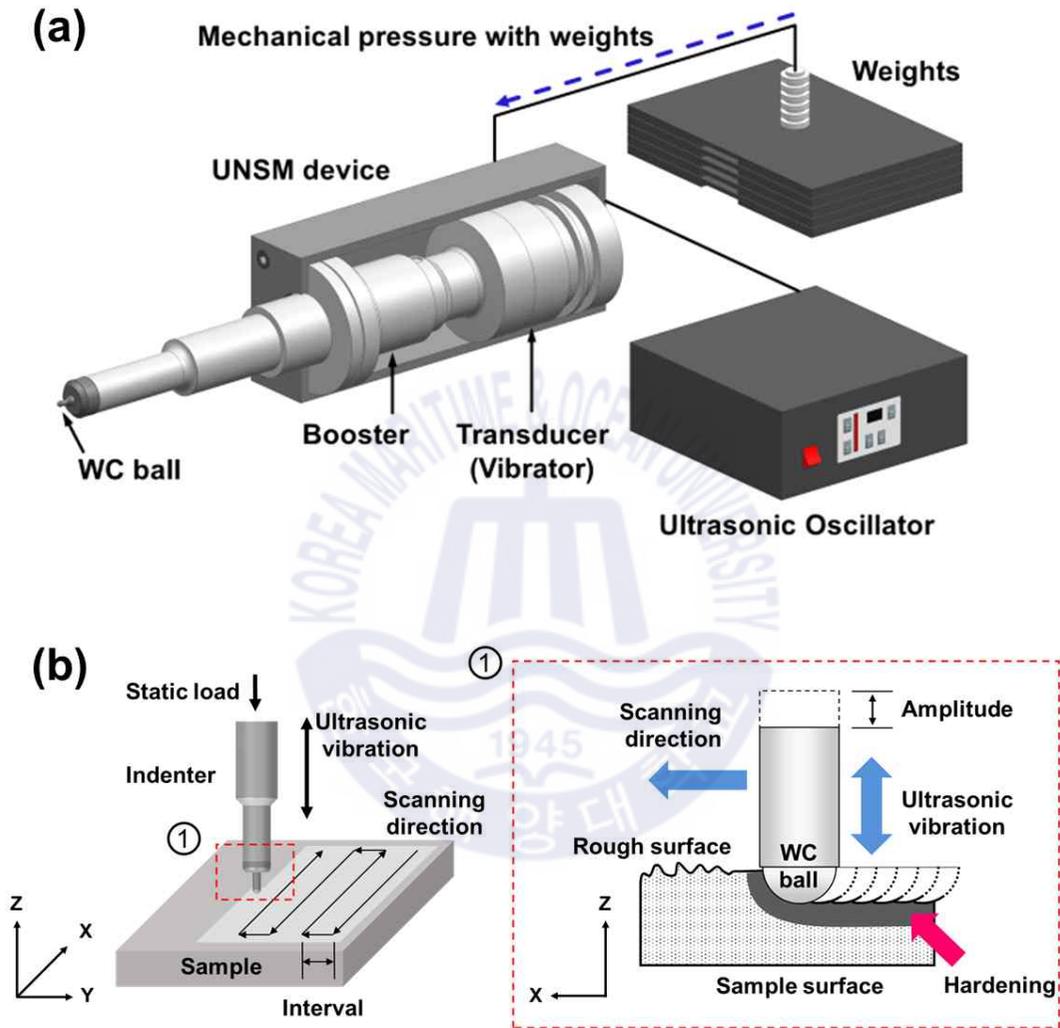


Fig. 5. Schematic diagram of (a) UNSM experimental setup and (b) UNSM process

UNSM을 적용할 때, 장치로부터 가공할 소재에 가해지는 총 하중  $F$ 는 초음파 진동 장치를 일정한 하중으로 밀어주는 정적 하중( $P_{st}$ )와 초음파의 진폭에 의한 동적 하중( $P_{dy}$ )의 합이며, Eq. (2)과 같이 나타낼 수 있다. 여기서 초음파는 정현파로 거동하기 때문에 동적하중은 그와 같은 형태로 표현된다.

$$F = P_{st} + P_{dy} = P_{st} + P_{am} \sin 2\pi ft \quad (2)$$

그런데 UNSM 공정 중에는  $P_{am}$ 이 소재와 불규칙적으로 접촉하기 때문에, 동적 하중이 완전하게 전달되지 않는다. 그러므로  $P_{am}$ 을 UNSM 공정 변수로 설정하는 데에 어려움이 있다. Li 등[45]과 Wu 등[46]은 이러한 문제를 단순화하기 위해 하중에 대한 변수를 정적 하중( $P_{st}$ )만 고려하여 연구를 수행하였다. 본 연구에서도 UNSM 공정에 있어서 재료에 가해지는 하중 변수로써,  $P_{st}$ 만을 고려하여 UNSM 효과를 분석하였다.

UNSM 공정과정에서 볼 팁이 소재와 충돌할 때의 단위 면적당 충돌 수 ( $\text{mm}^{-2}$ )는 Eq. (3)와 같이 표현된다. 단위 면적 당 충돌 수만큼 UNSM 처리를 통해 표면에 마이크로 덩플이 생성된다.

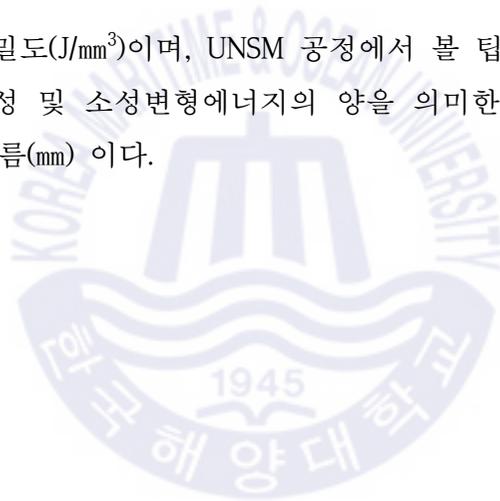
$$N = \frac{f}{v \cdot s} \quad (3)$$

여기서,  $f$ 는 초음파 진동수 (Hz)를,  $v$ 는 UNSM 공정 중에 볼 팁의 이송속도 (mm/min)를,  $s$ 는 직선형태의 공정경로 사이의 간격(mm), 인터벌(interval)을 의미한다. 여기서 이송속도를 초음파 진동수로 나누면( $v/f$ ) UNSM 공정 중에서 볼 팁 사이의 거리가 된다.

UNSM 공정에서 표면이 개질되는데 영향을 미치는 주요 변수는 총 하중  $F$ , 단위 면적당 충돌수  $N$ , 초음파의 진폭  $f$ , 그리고 볼 팁의 지름  $d$  등이 있다. 특히, 하중 변수는 앞서 언급한대로 정적 하중만을 고려한다. 이 공정변수들은 UNSM를 처리하는 데에 있어 소재에 따라 최적조건을 도출하여 적용해야 하며, 정량화하여 Eq. (4)과 같이 나타낼 수 있다.

$$E = F \times N \times \frac{A}{d} \sim P_{st} \times N \times \frac{A}{d} \quad (4)$$

$E$ 는 변형 에너지 밀도( $J/mm^3$ )이며, UNSM 공정에서 볼 팁(ball tip)을 통해 소재 표면에 전해지는 탄성 및 소성변형에너지의 양을 의미한다.  $A$ 는 초음파 진폭( $\mu m$ ),  $d$ 는 볼 팁의 지름( $mm$ )이다.



## 2.2 기초 실험

본 연구에 사용한 레이저 용융 적층 장비인 DMT(direct metal tooling) MX3 장비는 Insstek 社에서 개발하였으며, 공정 개념도와 함께 실제 장비 사진이 Fig. 6 (a)에 제시되어 있다. 장치는 4kW CO<sub>2</sub> 레이저 시스템이 포함되어 있으며, MX-CAM 소프트웨어에 의해서 운영되는 5축 NC장비이다. 3개의 분말 호퍼(hopper)와 함께, 분말 공급을 위한 파우더 노즐(powder nozzle)과 공정 가스로 구성된 파우더 공급 시스템으로 이루어져 있다. 공정 중 산화를 방지하기 위한 보호가스와 주입된 분말의 운반 가스로 아르곤(Ar)을 사용하였다. 분말 공급 장치가 장착된 헤드에는 광학 시스템과 통합되어 있으며, 모재 표면으로부터 9 mm 떨어진 노즐에서 직경 1.0 mm의 레이저 빔과 함께 분말을 공급한다. 모재 표면에 공급된 분말에는 고출력 레이저 빔이 조사되어 용융 풀(melting pool)을 형성한다. 빔이 조사되고 난 뒤 용융된 소재는 빠르게 응고되어 적층 비드를 형성하고, 이를 반복하면서 하나의 적층 면이 형성된다[47]. DED 공정의 주요 공정 매개 변수로는 레이저 출력, 레이저 빔의 크기, 파우더 공급 속도, 레이저 이송 속도가 있다. 이러한 매개 변수들의 조합은 적층된 소재의 기하학적 및 기계적/야금학적 특성, 즉 적층 레이어의 폭, 높이, 적층 표면 거칠기, 경도 및 미세 구조에 대해 상이한 영향을 줄 수 있다[48, 49].

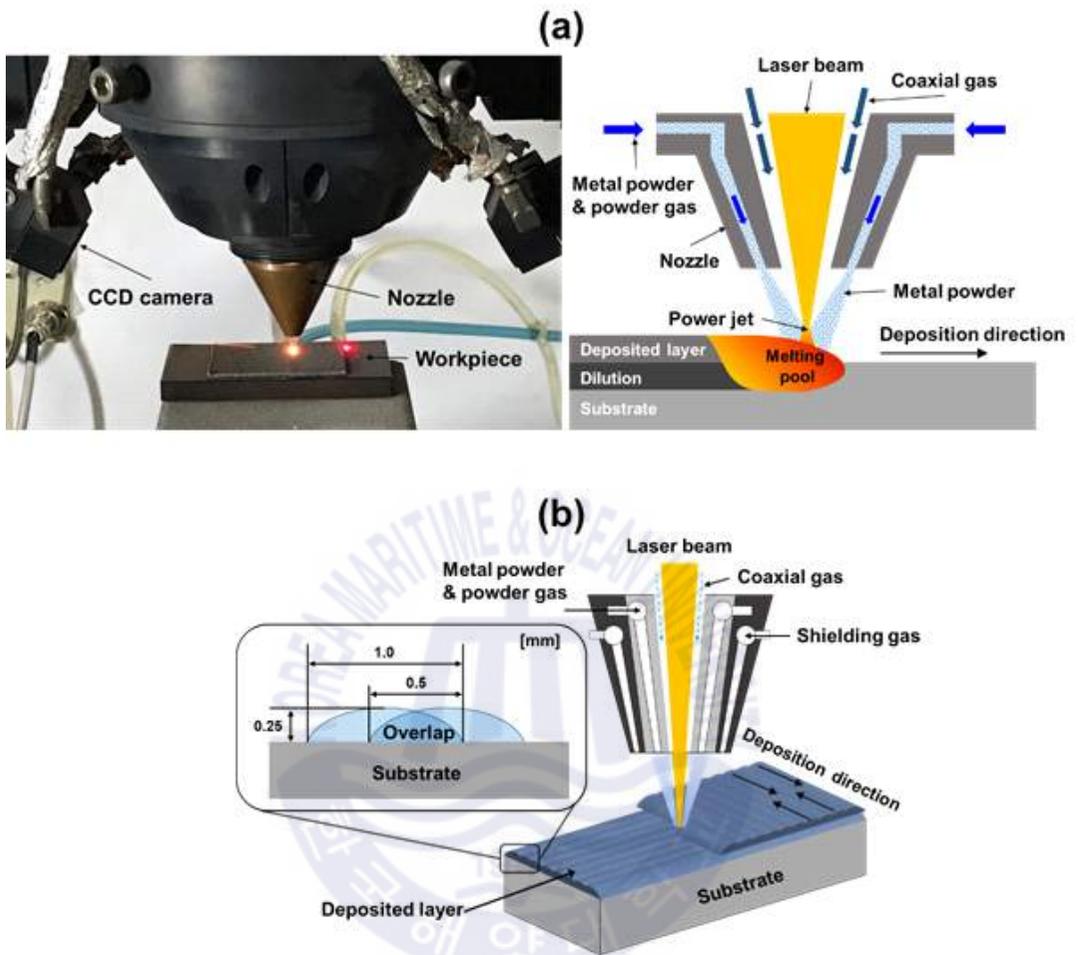


Fig. 6. Schematic diagram of (a) DED process and (b) scanning procedure for multi-layer deposition

Fig. 7은 DED로 적층 제조된 시편의 표면 형상을 도식적으로 나타낸 것이며, Fig. 8은 DED 적층 표면의 모습을 주사전자현미경(FE-SEM, MIRA3, TESCAN)과 3차원 표면조도 측정기(Contour GT-X, Bruker)로 관찰한 모습이다. DED 공정에서는 레이저 노즐의 이송하는 방향을 따라 용융풀과 적층 트랙이 형성된다. 각 적층 트랙의 중심부에서는 위로 볼록한 형태가 나타나며(마루, Fig. 7에서의 crest), 적층 트랙끼리 접합하여 겹친 영역에서는 골짜기 형상으로 나타난다(골, Fig. 7에서의 trough). 그리고 이러한 형상은 DED 공정 조건 중 오버랩 간격과 적층 트랙의 두께 등의 요인들에 의하여 마루-골(peak-to-valley)로 반복되는 구조를 갖는다. 또한, Fig. 8에서 적층 트랙 방향을 따라 스패터(spatter)가 형성되어 있는 것을 볼 수가 있는데, 이는 분말 금속에 레이저가 조사되어 생성된 용융 풀의 불안정성에서 기인한다[50]. 레이저 공정 중에 유입되는 열에너지와 분말 금속의 용융, 그리고 외부의 온도 차이로 인한 급속한 냉각[51] 등의 원인으로 용융풀 내부는 대류가 발생하여 순환한다[52]. 그러면서 용융 풀 내부에 잔존하는 증기의 압력에 의해 용융 금속 일부가 외부로 튀면서 그대로 응고되어 스패터를 형성한다. 때문에 적층 트랙과 그를 따라 형성된 스패터는 적층 표면 형상을 불규칙적으로 나타나게 하는 원인이 된다[53]. 이러한 표면 형상은 DED와 같이 레이저를 이용해 금속을 용융시키는 공정에서 대부분 발견된다.

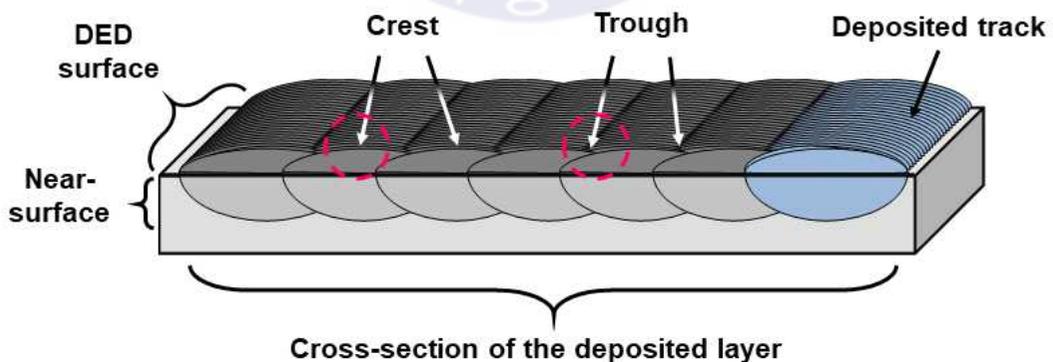


Fig. 7. Schematic illustration of the deposited layer surface

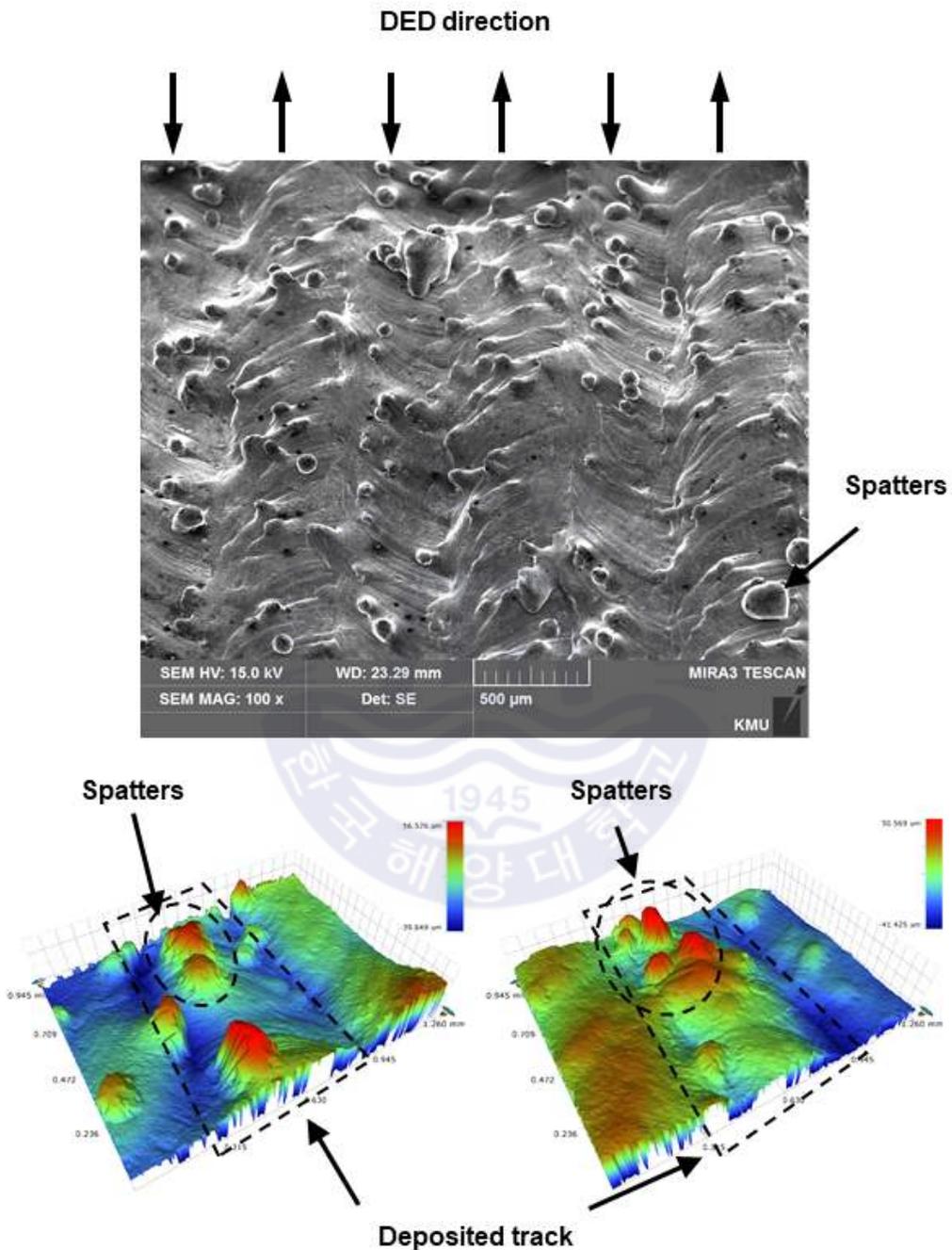


Fig. 8. SEM image and 3D topographies of the DED deposited surface.

재료의 표면은 미세한 굴곡들로 구성되며, Fig. 9와 같은 구조로 나타난다 [54]. 표면 구조(surface texture)의 단면 곡선을 표면 프로파일(surface profile)이라 하며, 다양하고 불특정한 주기를 갖는다. 이 단면 곡선에서 높은 주기(frequency) 혹은 짧은 파장(wavelength)의 곡선요소를 표면 거칠기(surface roughness)라 한다. 표면 거칠기보다 낮은 주기 혹은 긴 파장의 곡선 요소를 파상도(waviness)라고 한다. 간단하게, 표면 거칠기는 재료 표면에 작은 간격으로 나타나는 미세한 굴곡이며, 파상도는 표면의 기복, 파동을 말한다.

기계 가공된 표면의 표면 거칠기는 선삭, 밀링, 연삭 등 가공 종류와 공정에 따라 달라지며, 제품의 윤활, 마찰 및 마모, 피로 강도, 부식 등에 영향을 준다. 파상도는 연삭 불평형, 이송나사의 불균일, 기계의 진동, 열처리 불균일 등 주로 공정에서의 오류로 인해 달라진다. 파상도는 표면 거칠기만큼 많이 사용되는 단위는 아니지만 베어링 등 진동 및 소음에 민감한 부품, 밀링 가공된 제품 표면의 형상, 채터 마크(chatter mark) 분석 등에 적용된다. 따라서 제품의 표면 구조는 제품의 성능과도 직결되므로, 가공에 따른 표면 구조를 검토하고 제어하는 것이 중요하다고 볼 수 있다[55].

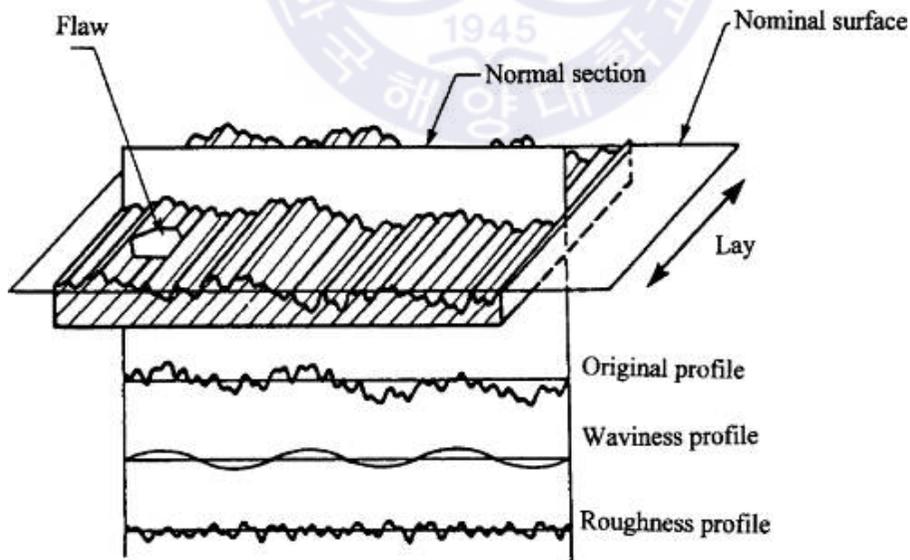


Fig. 9. Roughness and waviness in a surface[54]

표면 구조는 여러 단면 곡선이 복합적으로 구성되어 있기 때문에, 어느 하나의 지표로써 그 특성을 논하기 어렵다. 그렇기 때문에 단면 곡선에 대한 일련의 통계적 처리를 통하여 그 대푯값으로 채택한다[56]. 일반적으로 산술 평균 거칠기(arithmetic mean roughness,  $Ra$ ), 그리고 산술 평균 파상도(arithmetic mean waviness,  $Wa$ )를 주로 사용하는데, Eq. (5)와 Fig. 10에서처럼 중심선으로부터의 단면 곡선까지의 길이의 절댓값( $|Z(x)|$ ) 평균한다[57].

$$Ra, Wa = \frac{1}{l} \int_0^l |Z(x)| dx \quad (5)$$

특히, 파상도와 표면 거칠기는 거칠기 필터 (roughness cut-off filter,  $\lambda_c$ )라는 파장에 따라 분류되는데,  $\lambda_c$ 보다 큰 파장은 파상도,  $\lambda_c$ 보다 작은 파장을 표면 거칠기로 분류한다. Fig. 11은 각 가공 방법에 따라 나타나는 표면 거칠기 ( $Ra$ )를 나열한 것이다[55].

본 연구에서는 앞서 설명한 UNSM 기술로써, DED 적층 트랙들로 구성된 불균일한 표면을 개질하고자 하였다. 특히, 파상도와 표면 거칠기를 표면 형상 변화를 분석하기 위한 지표로써 선정하였으며, UNSM 처리에 의한 표면부 (Fig. 7에서의 near-surface)의 미세조직 변화도 관찰하였다.

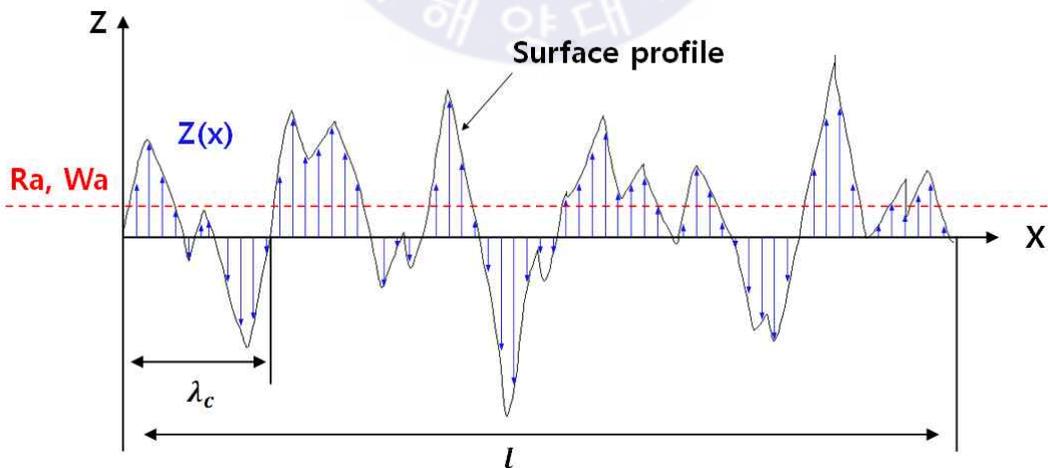


Fig. 10. Arithmetic mean roughness/waviness value

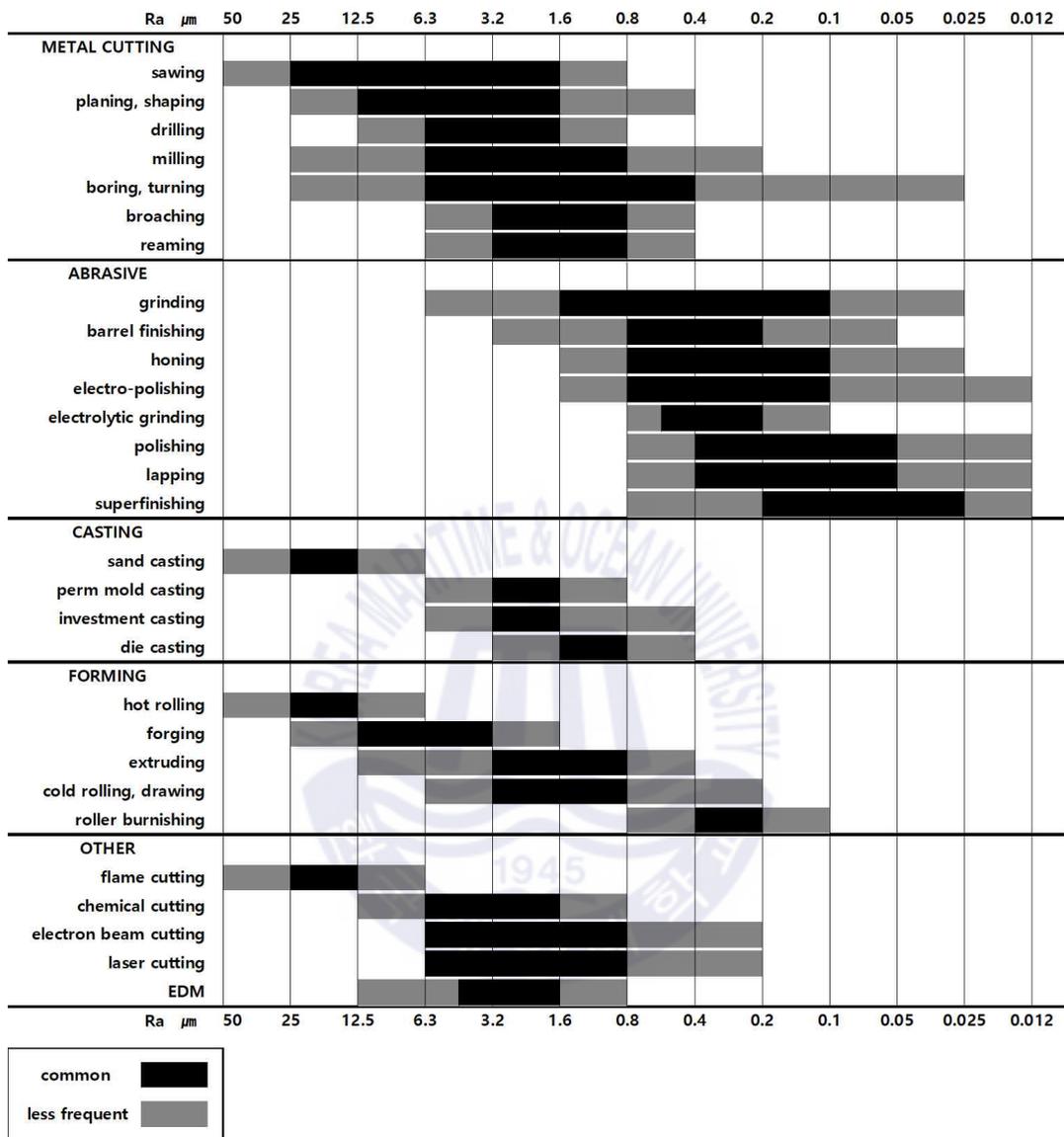


Fig. 11. Typical surface roughness created using different manufacturing methods[55]

### 2.2.1 실험 재료

UNSM이 DED 표면 구조에 미치는 영향을 비교하기 위한 기초 실험에 오스테나이트 스테인리스 강 AISI 316L을 분말과 모재로 선택하였다. Carpenter Co.에서 공급하는 AISI 316L 분말의 지름은 50  $\mu\text{m}$  ~ 150  $\mu\text{m}$ 이며, Fig. 12에서 그 모습을 확인할 수 있다. 그리고 동종재료의 모재는 열간 압연으로 생산되었다. 실험에 사용된 AISI 316L 분말과 모재의 성분은 Table 2에 제시하였다.

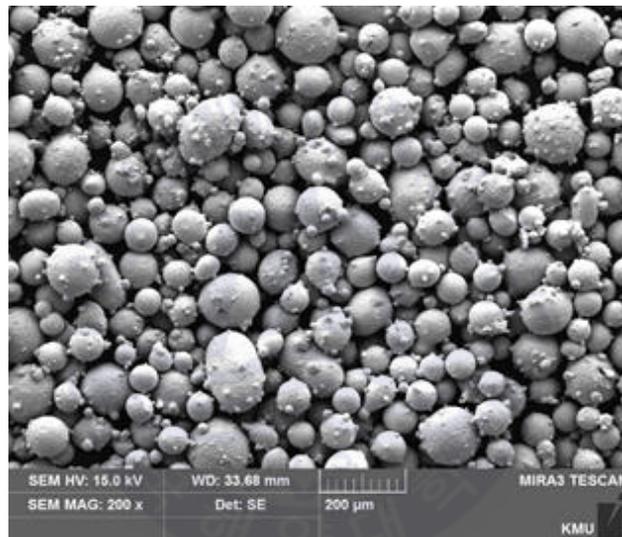


Fig. 12. SEM image of AISI 316L powder

Table 2. Chemical compositions of AISI 316L(unit: wt%) (Fe=BAL.)

	C	Cr	Ni	Si	Mn	P	S	Mo
Substrate	0.03	16.5	10.0	0.67	1.85	0.05	0.01	2.03
Powder	0.03	17.8	12.8	0.68	1.23	0.01	0.01	2.36

## 2.2.2 DED 적층 조건 및 UNSM 조건 설정

본 연구에서는 Table 3의 DED 공정조건으로 AISI 316L 금속분말을 각각 Fig. 6 (b)와 같이 단일 적층 트랙(single deposited track)의 폭의 절반인 0.5 mm를 중첩(overlap)하여, 선형 공정으로 지그재그(zigzag) 방향으로 면적층을 하였다. 단일 적층의 높이(single layer height)는 약 0.25 mm이며, 한 개의 면 적층이 완료될 때마다 직교방향으로 방향을 바꾸어 직물을 엮듯이 교차하여(weaving) 면적층을 시행하였다. 그리고 금속분말의 이송 및 산화방지를 위하여 아르곤 가스를 (Ar) powder gas와 coaxial gas로 공급하였다.

Table 4은 DEDED 316L 적층 표면에 대한 UNSM의 효과를 분석하기 위한 공정 조건을 나타낸 것이다. 이 실험에서는 불 팁 간의 인터벌 간격을 실험 변수로 설정하여, DED 적층 표면의 특성에 대한 인터벌 조건의 영향을 분석하는데 중점을 두었다. 또한, UNSM 처리 방향과 DED 적층 방향 사이의 상관관계를 조사하기 위해, DED 적층 방향에 대하여 수직 방향 및 수평 방향으로 UNSM 처리를 하였다.

**Table 3.** DED processing parameters

Powder	Laser beam power (W)	Slicing layer height (mm)	Overlap width (mm)	Powder flow rate (g/min)	Laser traverse speed (mm/min)	Powder gas (l/min)	Coaxial gas (l/min)
AISI 316L	900	0.25	0.5	2.5	850	2.5	6.0

**Table 4.** UNSM processing parameters to DEDED 316L

Ultrasonic frequency (kHz)	30
Amplitude ( $\mu\text{m}$ )	30
Ball tip diameter (mm)	2.38
Static load (N)	30
Scanning speed (mm/min)	2,000
Interval ( $\mu\text{m}$ )	30 / 50 / 70 / 90
UNSM direction to DED deposition direction	<p>Perpendicular direction      Parallel direction</p>

## 2.3 실험 결과

### 2.3.1 적층 표면 구조 변화

UNSM 처리 전후의 표면 거칠기의 변화를 관찰하기 위해 주사전자현미경과 3차원 표면조도 측정기를 사용했다. 그리고 적층 표면의 파상도 분석을 위해서 접촉식 표면 조도 측정기(Mitutoyo, SJ-410)를 사용하였다. 파상도는 표면 거칠기 데이터의 특정 범위 내에서 필터링하여 산출되므로, 재료 표면에 대한 더 큰 범위의 정보를 나타낸다. 시편 표면에 대하여 파상도와 표면 거칠기를 측정했으며, 파상도는  $W_a$ , 표면 거칠기 값은  $R_a$ 로 제시했다. 모든 UNSM 공정 조건을 적용한 시편마다 임의로 표면 5곳을 측정하고, 측정값의 제곱평균제곱근(root mean square, RMS)값을 선정하여 그 대푯값으로 선정했다.

Fig. 13 (a1)와 Fig. 13 (b1)은 UNSM 처리 전과 후의 DED 시편의 표면 구조를, 그리고 Fig. 13 (a2)와 Fig. 13 (b2)은 UNSM 처리 전과 후의 DED 적층 표면을 SEM으로 관찰한 모습이다. Fig. 13 (b1)과 Fig. 13 (b2)을 통해 DED 적층 방향과 수직으로, 인터벌  $50\ \mu\text{m}$  조건으로 UNSM 처리를 한 것을 확인할 수 있다. Fig. 13 (a2)에서 볼 수 있듯이, UNSM 처리 전에는 적층 트랙이 겹쳐진 표면의 모습과 DED 공정에서 발생한 스패터들이 남아있다[58]. 그러나 DED 적층 표면에 대해 UNSM을 적용하면 적층 트랙과 스패터가 모두 사라진다. 게다가 Fig. 13 (b2)와 같이 UNSM 방향을 따라 미세한 골(groove)이 생성되었다.

Fig. 13 (c)는 Fig. 13 (a2)와 Fig. 13 (b2) 사이의 선분 AA' 방향을 따라 2차원 단면 프로파일(profile)을 나타낸 것이다. UNSM 처리하지 않은 DED 표면은 겹쳐진 적층 트랙들과 스패터들로 인해 매우 불규칙적인 마루-골 구조의 형상이 나타난다. UNSM 처리 전의 파상도는  $W_a\ 10.124\ \mu\text{m}$ , 표면 거칠기는  $R_a\ 1.264\ \mu\text{m}$ 로 측정되었다. 그러나 UNSM을 적용한 뒤의 파상도와 표면 거칠기는 최소  $W_a\ 2.657\ \mu\text{m}$ , 최소  $R_a\ 0.174\ \mu\text{m}$ 까지 각각 감소한 것이 확인되었다. 이로써, UNSM 표면 처리를 통하여 DED 적층 표면의 불규칙적으로 굴곡진 형상을 완만하게 개질할 수 있음을 확인하였다.

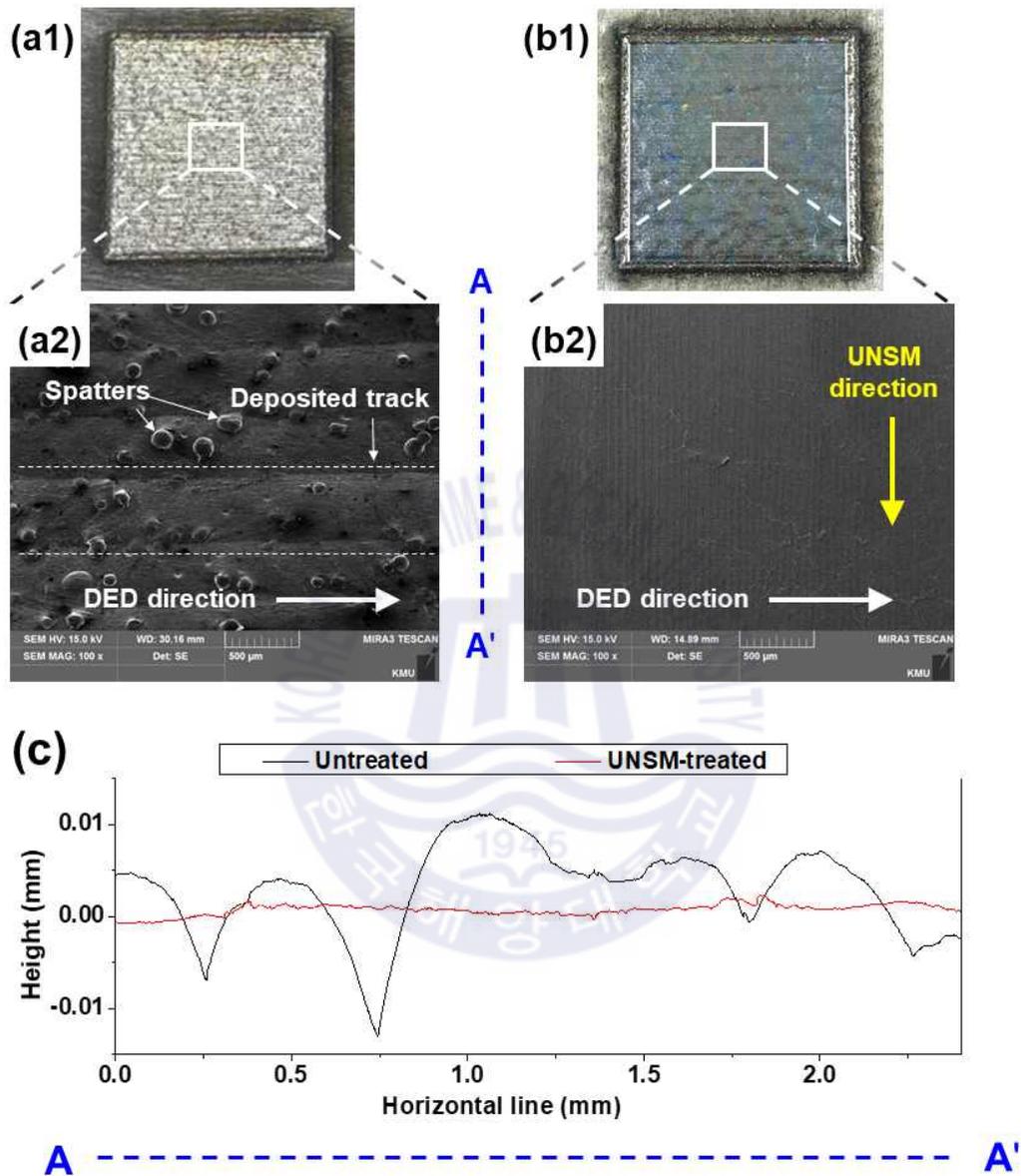


Fig. 13. Samples and SEM images of the DEDed surface of (a1-a2) untreated, (b1-b2) UNSM-treated samples, (c) 2D surface profile of the untreated and UNSM-treated samples

Fig. 14 (a)-(d)는 UNSM 인터벌 조건이 30  $\mu\text{m}$ 부터 90  $\mu\text{m}$ 까지 증가에 따른 DED 적층 표면의 형상을 나타낸 것이다. UNSM 처리하기 전의 크고 거칠었던 UNSM 표면 구조는 UNSM 처리를 통하여 규칙적으로 개질되었다. UNSM 처리 후에는 각 인터벌 조건에 따라 진행된 UNSM 처리 방향으로 마이크로 트랙(micro track)이 만들어지는데, UNSM 볼 팁이 소재의 표면과 충돌하면서  $S^2PD$ 를 유발한 것으로 유추할 수 있다[59]. 덧붙여, UNSM 처리를 통해 표면에 생성되는 마이크로 트랙과 같은 미세 표면 구조(micro surface texture)는 소재의 마찰계수를 감소시켜 내마모성을 향상시키는 데에 기여하는 것으로 보고되었다[34]. Fig. 14 와 같이, UNSM 인터벌 조건만큼 인접한 UNSM 경로가 넓어짐에 따라 마이크로 트랙의 폭도 비례하여 넓어지는 것을 알 수 있다. 그러나 인터벌이 넓어질수록 UNSM의 볼 팁이 소재의 표면과 접촉하지 않는 표면적이 증가하여, 표면 특성이 저하된다. 특히 Fig. 14 (c)(인터벌 70  $\mu\text{m}$ )와 Fig. 14 (d)(인터벌 90  $\mu\text{m}$ )와 같이 인터벌 간격이 비교적 넓어질 경우 마이크로 덤플을 관찰하기가 어려워지는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 15은 DED와 UNSM간의 방향 및 UNSM 인터벌 조건에 따른 파상도, 표면 거칠기의 변화를 나타낸 그래프이다. 전체적으로 UNSM 처리된 표면의 파상도와 표면 거칠기는 UNSM 처리하지 않은 표면( $W_a$  10.124  $\mu\text{m}$ ,  $R_a$  1.264  $\mu\text{m}$ )보다 감소하는 것으로 보인다. 그리고 UNSM 인터벌 간격이 좁아질수록 파상도와 표면 거칠기는 더 낮아지는 경향이 나타나며, 파상도는 최대 73.8%, 표면 거칠기는 최대 86.2% 감소한다. UNSM 인터벌 간격이 좁아진다는 것은 UNSM 볼 팁의 경로가 겹쳐지는 정도가 증가하는 것을 의미한다. 이는 Eq. (3)와 같이 인터벌 간격이 좁아질수록 면적 당 충돌 수가 증가하는 것을 의미하고, 결과적으로 일정한 면적에 대하여 UNSM 볼 팁이 표면과 충돌하는 영역이 넓어지게 된다. 인터벌 간격에 따라 DED 적층 표면의 형상이 변하는 경향과는 대조적으로, DED와 UNSM 사이의 방향에 따른 표면 특성 변화는 큰 차이가 나지 않은 것을 알 수 있다. 이는 DED와 UNSM 사이의 방향 관계는 UNSM 인터벌 조건만큼 표면 개질에 큰 영향을 주지 않는 것으로 판단된다.

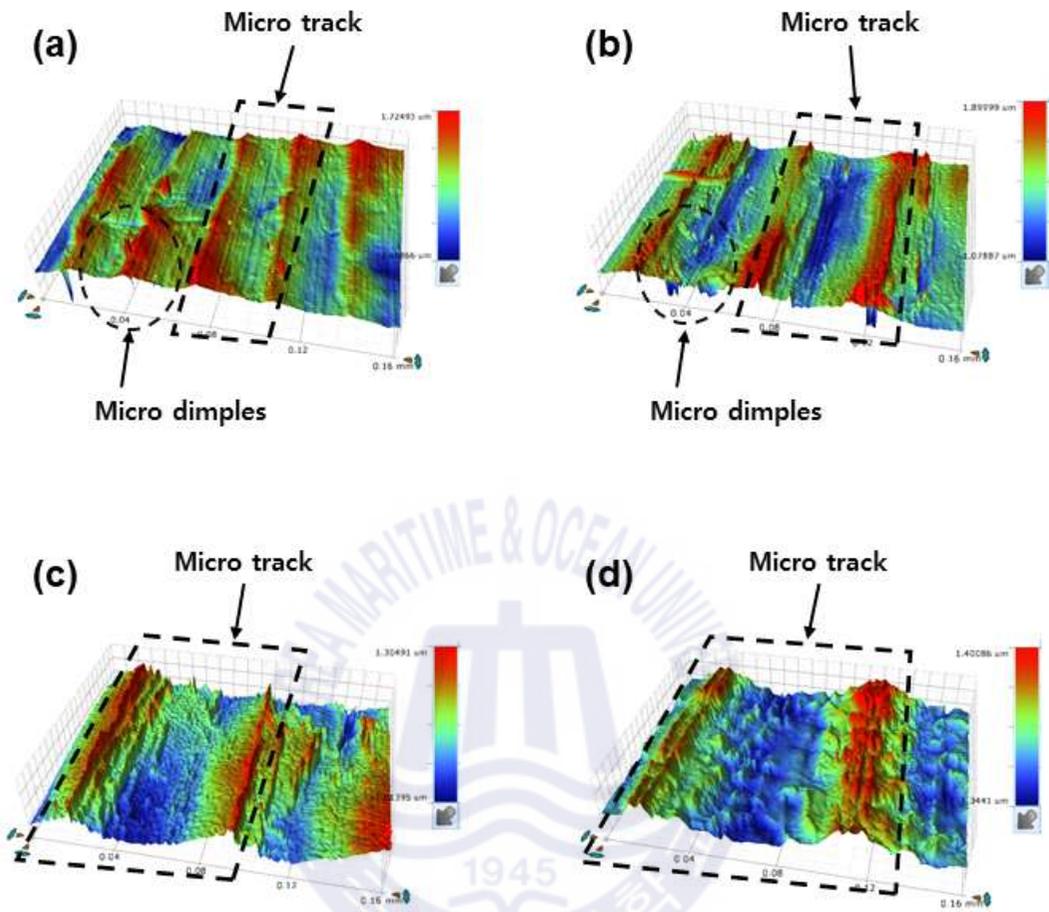


Fig. 14. 3D surface topography of UNSM-treated surface according to interval; (a) 30  $\mu\text{m}$ , (b) 50  $\mu\text{m}$ , (c) 70  $\mu\text{m}$ , (d) 90  $\mu\text{m}$ .

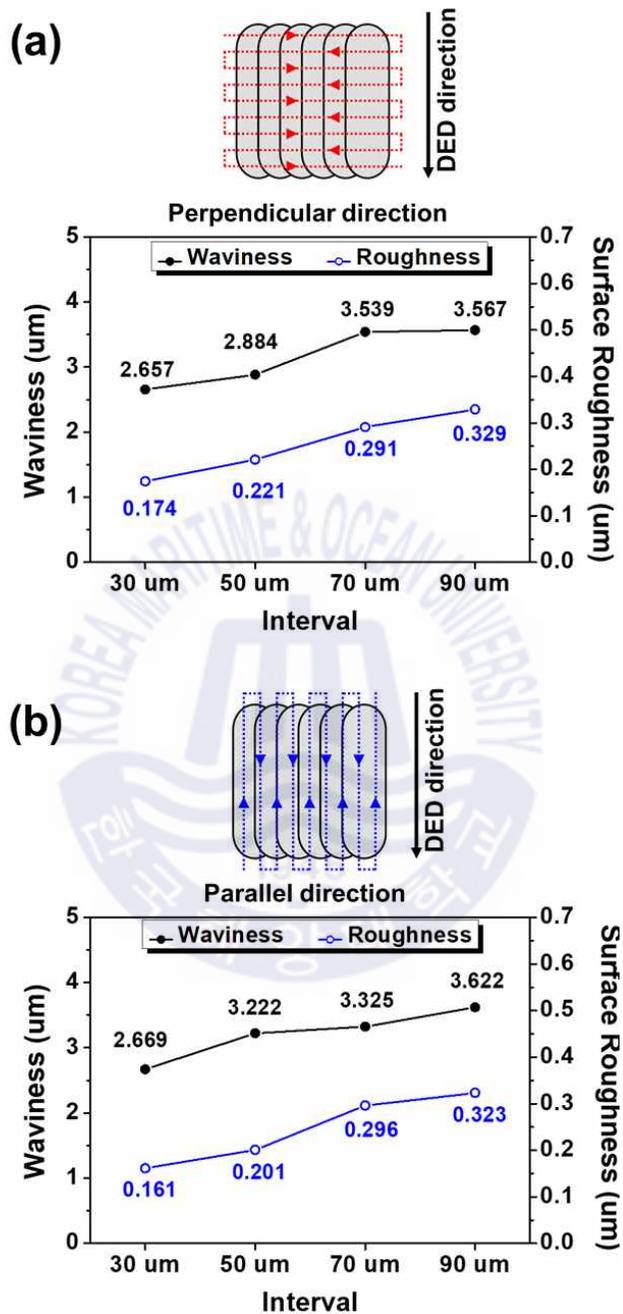


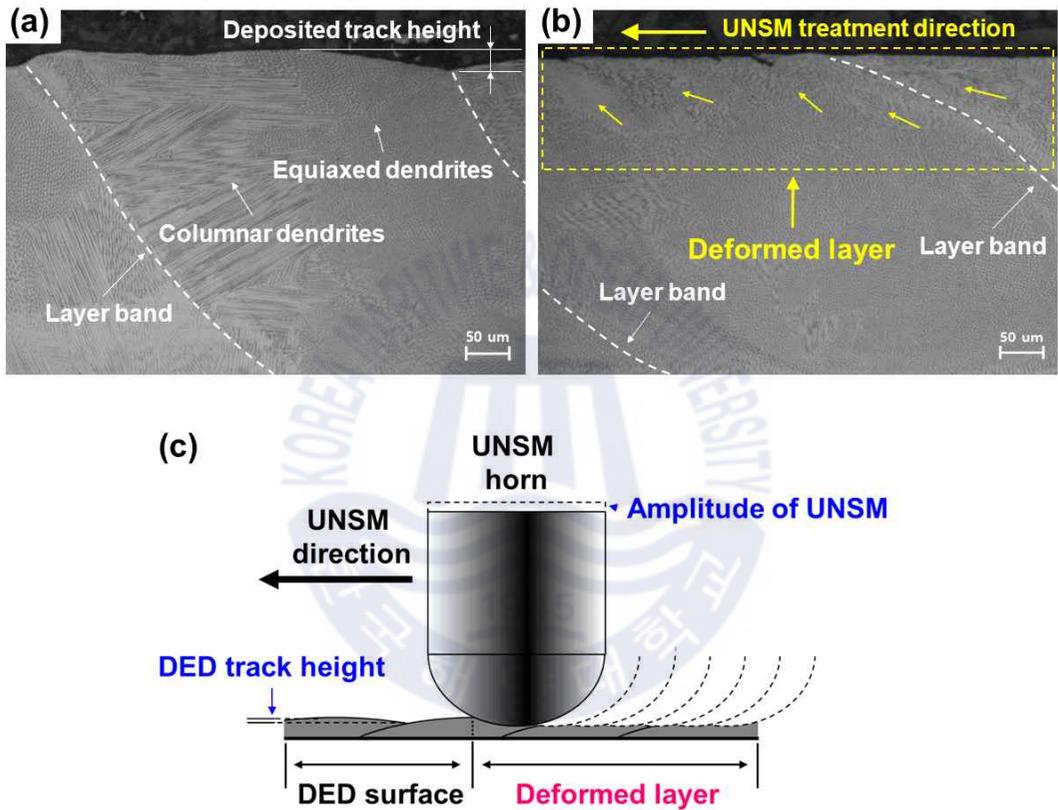
Fig. 15. Surface waviness and roughness of the DEDed surface after UNSM. UNSM treatment was applied to the (a) perpendicular, (b) parallel directions with the DED deposition direction.

### 2.3.2 표면부 미세조직 변화

Fig. 16 (a)와 Fig. 16 (b)은 UNSM 처리 전후의 DED 적층 표면 근처 (near-surface)의 미세조직을 비교한 사진이며, Fig. 16 (c)은 UNSM 공정 중에 발생하는 적층 표면 부분의 변화를 나타낸 그림이다. DED로 적층한 AISI 316L 표면의 단면 조직은 Fig. 16 (a)와 같으며, 레이저의 높은 입열량으로 생성된 용융 풀로부터 금속이 응고되면서 성장한 전형적인 덴드라이트(dendrite) 조직들을 관찰할 수 있다. 용융 풀이 응고된 적층 트랙의 가장자리(boundary)에서는 주상형 덴드라이트(columnar dendrite) 구조를 갖는다. 적층 트랙의 중심부에서는 레이저 이송 방향과 평행하게 성장한 주상형 덴드라이트의 절단면인 등축 덴드라이트(equiaxed dendrite) 구조가 보인다. 적층 트랙 중심부의 등축 덴드라이트의 결정립 크기는 가장자리의 주상형 덴드라이트의 결정립보다 미세한 것을 Fig. 16 (a)을 통해 확인할 수 있다. 중심부는 레이저가 지나가면서 재용융(remelting)될 뿐만 아니라, 내부의 잔열(residual heat) 때문에 가장자리보다 냉각 속도가 비교적 낮다. 그에 반해 가장자리는 중심부보다 상대적으로 냉각 속도가 높기 때문에 중심부를 향해 주상형 덴드라이트가 성장하며, 중심부로부터 멀어질수록 결정립의 모양이 조대하다[60]. 그리고 DED 적층 후의 표면에는 적층 트랙의 마루 및 골로 인해서 불규칙적인 표면 프로파일이 나타나며, DED 적층 비드의 높이는 약 27.6  $\mu\text{m}$ 이다.

적층 표면에 대해서 UNSM 처리했을 때의 표면부에서 발생하는 미세조직의 변화는 Fig. 16 (b)과 같이 나타난다. Fig. 16 (b)에서 UNSM 처리 방향이 DED 적층 방향과 수직이기 때문에, 표면의 단면 조직은 UNSM 방향을 향해 S<sup>2</sup>PD가 발생되었다. 또한, DED 적층 트랙의 불규칙했던 프로파일이 UNSM 처리를 통해서 완만하게 개질된 것도 관찰되었다. 적층 표면의 프로파일이 완만하게 개질된 원인은 UNSM 볼 팁의 진폭을 30  $\mu\text{m}$ 로 설정했기 때문이다. 그러므로 Fig. 16 (c)처럼 DED 적층 트랙의 높이 보다 UNSM의 진폭이 더 크기 때문에, 굴곡진 형상을 충분히 변형시켰기 때문에 표면 특성을 향상시킬 수 있었던 것으로 판단된다. UNSM 처리를 통해서 표면 특성의 개선뿐만 아니라 표면부의 조

직이 S<sup>2</sup>PD에 의해서 가공경화현상[61]과 더불어 압축잔류응력도 부여되었을 것으로 예상된다[62].



**Fig. 16.** Optical micrographs of the near-surface microstructure (a) before and (b) after UNSM, and (c) schematic illustration of the changes in surface microstructure during the UNSM treatment on the DED surface

UNSM 조건에 따른 DEDed 316L 표면부의 변화를 알아보려고 적층 표면 프로파일에서 마루와 골 영역을 비교 분석하였다. Fig. 17은 DED 적층 방향에 대한 UNSM 처리 방향과 인터벌에 따른 표면부 미세조직의 변화를 나타낸 것이다. UNSM 처리 전 마루 영역에서는 등축 덴드라이트와 미세한 주상형 덴드라이트로 구성되어 있음을 Fig. 17 (a)에서 확인할 수 있다. 그리고 적층 트랙이 겹쳐진 골 영역에서는 적층 비드 경계(layer band)를 기준으로, 적층 트랙의 가장자리에서부터 성장한 조대(coarse) 주상형 덴드라이트와 중심부의 미세 등축 덴드라이트가 확연하게 구분된다. 그리고 Fig. 17 (b)을 통해 UNSM 처리에 의해서 마루와 골이 완만하게 개질되며, 표면부의 조직이 노란색 화살표 방향으로 변형된 것을 볼 수 있다. 특히, 상대적으로 등축 덴드라이트보다 결정립이 큰 주상형 덴드라이트는 S<sup>2</sup>PD에 의한 뒤틀림이 더 크게 관찰된다. 그리고 Fig. 17 (b)에서 UNSM 인터벌이 30  $\mu\text{m}$ 일 때의 변형 깊이(deformed depth)가 인터벌이 90  $\mu\text{m}$ 일 때보다 더 큰 경향이 나타난다. Fig. 17 (c)은 DED 적층 방향과 수평방향으로 UNSM 처리를 적용했을 때, 인터벌에 따른 표면부 미세조직의 변화를 나타낸 것이다. DED 적층 방향과 동일하게 UNSM 처리하더라도 Fig. 17 (b)와 유사하게 표면이 완만하게 개질되는 것을 볼 수 있다. 또한, Fig. 17 (b)와 유사하게 인터벌이 작을수록(30  $\mu\text{m}$ ), 표면부에서의 변형 깊이는 더 큰 것을 알 수 있다.

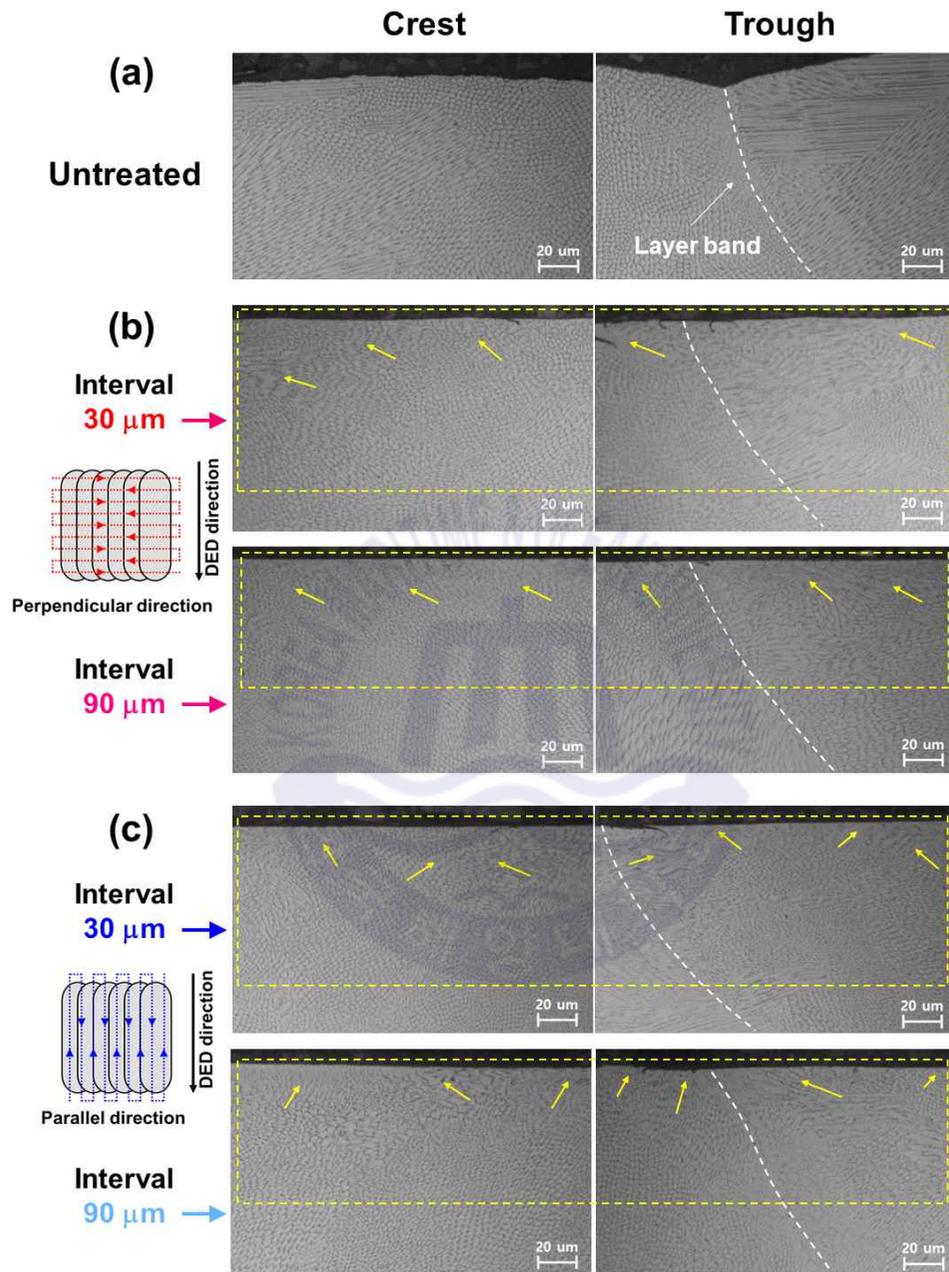


Fig. 17. Optical micrographs showing the microstructures in the near-surface UNSM treatment according to interval and direction relationship. (a) Before UNSM treatment, after treated (b) perpendicular and (c) parallel to DED direction. The deformed layer shown by yellow broken line

UNSM 조건에 따른 변형 깊이를 Fig. 18와 같이 나타내었다. 변형 깊이는 각 샘플의 표면으로부터 S<sup>2</sup>PD가 발생하여 미세조직이 뒤튼린 구간의 깊이를 총 20번 측정하여 평균값으로 산출하였다. UNSM 인터벌 조건이 30  $\mu\text{m}$ , 그리고 90  $\mu\text{m}$  일 때, DED 적층 방향과 UNSM 처리 방향에 따른 변형 깊이 차이는 각각 3.61%, 5.18%에 불과했다. 그러나 DED 적층 방향과 UNSM 처리 방향이 수직일 경우에는 인터벌이 커질수록 60.3%, 수평일 경우에는 47.0%의 차이를 보였다. 인터벌 조건에 따른 변형 깊이 차이는 확연히 나타났는데, 이는 인터벌이 좁아질수록 면적 당 가해지는 충돌 수가 증가하므로 더 깊은 구간까지 소성 변형되기 때문으로 판단된다[63]. Fig. 18의 결과를 바탕으로 변형 깊이는 DED와 UNSM 방향의 관계보다는 UNSM 인터벌에 영향을 더 많이 받는 것을 확인하였다.

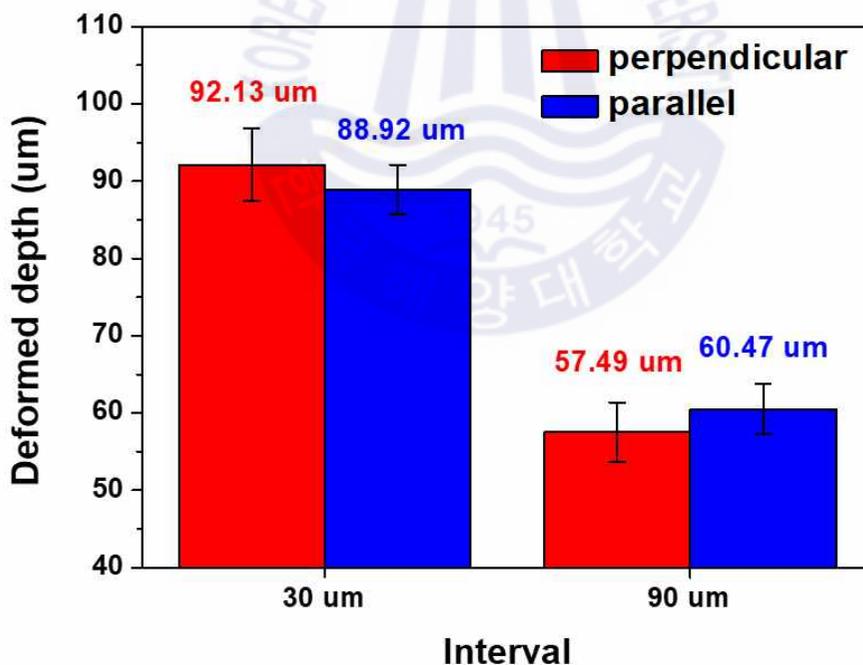


Fig. 18. Depth of deformed microstructure from the surface after UNSM treatment

## 제 3 장 UNSM 표면 개질 요인 효과 분석

### 3.1 반응표면분석 실험 설계

앞서 진행한 DED 316L 적층 표면에 대한 UNSM의 개질 효과를 분석을 위한 기초실험 결과로써, UNSM 인터벌 조건이 DED 적층 표면의 개질에 대하여 영향을 주는 것을 알 수 있었다. 이처럼 UNSM 인터벌을 비롯한 공정 조건에 따라서 표면의 형상과 그 특성이 다양하게 나타난다[64]. 그러므로 UNSM 기술을 적용하는 데에 있어서 우수한 표면 특성을 확보하기 위한 최적화 조건을 결정하는 것은 매우 중요하다.

최적화 연구는 주로 실험을 통해 진행되며, 통계적인 방식을 이용하여 최적화된 조건을 도출한다. Davim과 Figueira는 냉간 금형 강 AISI D2에 대해 연삭 가공 실험 조건을 직교배열법(orthogonal array)으로 선정하여, Ra 0.8  $\mu\text{m}$ 보다 작은 표면 거칠기를 구현하는데 성공하였다[65]. Lawrance 등은 자기유변탄성체(magneto-rheological elastomer, MRE)를 적용한 선반 가공에서, 경화 AISI 4340 강에 대한 절삭 성능을 최적화하기 위한 조건을 다구찌 설계법(Taguchi method)으로 분석하였다[66]. Mello와 Pai는 반응표면분석법과 ANOVA(analysis of variance) 분산 분석을 통해, Ti-6Al-4V 소재의 표면 거칠기를 최소화시키는 선반 연삭(turning machining) 최적화 가공 조건을 탐색하였다[67]. 또한, Sivaprakasam 등은 반응표면분석법으로써 Ti-6Al-4V에 대하여 마이크로 와이어 방전가공(micro-WEDM) 공정을 적용하는 데에 있어서, 소재 제거율(material removal rate, MRR)과 절단폭(Kerf width), 그리고 표면 거칠기에 대한 다중 반응 최적화(multiple response optimization, MRO)를 수행하였다[68].

최근에는 인공지능을 기반으로 딥 러닝(deep-learning) 기법을 적용하여 실험 계획 및 분석 사례가 보고되었다[69, 70]. 딥 러닝 기법은 예측 성능이 우수하지만 그를 위한 예비 데이터와 학습 시간이 필요할 뿐만 아니라, 선정된 요인들 간의 통계적 해석이 불가능하기 때문에 다른 보조적인 수단이 필요하다[71].

실험계획법 중에서 반응표면분석법(response surface methodology, RSM)은 달성하고자 하는 목적에 적합한 조건을 찾기 위한 통계적 기법이며, 여러 개의 독립 변수(independent variable)들이 조합되는 실험을 실시할 경우에 그 실험 횟수를 줄이는 것이 가능하다[72]. 반응표면분석법은 ANOVA 분석을 통하여 독립 변수(요인, factor)가 종속 변수(반응 값, response variable)와 어떠한 관계식을 갖고 있는지에 대한 영향력을 파악하고, 최종적으로 최적화된 독립 변수 조건을 찾는 것에 그 의의가 있다[73]. 반응표면 분석에서는 반응 값과 요인 사이의 관계를 나타내는 함수를 가정한다. 이 함수를 반응표면이라 칭하며, 보통 1차 회귀 모형(regression model) 또는 2차 회귀 모형으로 가정하여, 요인의 수가  $n$ 개일 때의 회귀 모형 함수는 Eq. (6)와 같이 표현된다[72].

$$y = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) + \epsilon = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i x_i + \sum_{i=1}^n a_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j}^n a_{ij} x_i x_j + \epsilon \quad (6)$$

여기서,  $y$ 는 반응 값,  $x_i$ 는 요인,  $x_i^2$ 는 요인의 제곱 항(quadratic term),  $x_i x_j$ 는 요인의 교호작용 항(interaction term)을 의미한다. 그리고  $a_0$ ,  $a_i$ ,  $a_{ii}$ ,  $a_{ij}$ 는 회귀 상수이며,  $\epsilon$ 는 반응 값의 오차항이다. 이 때, 반응 값에 대한 최적 조건을 도출하기 위해서는 각 요인의 수준의 관계는 곡률(curvature)로 나타나야 한다. 그렇기 때문에, 회귀 모형 함수는 각 요인들의 곡률 관계가 고려되어야 하므로 일반적으로 2차 다항 회귀 모형을 채택한다.

하지만 요인배치법(factorial design)은 이러한 곡률 관계를 감지할 수 없기 때문에 2차 회귀계수를 추정할 수 없는 단점이 있다[74]. 즉, 요인배치법을 통해서 최적 조건 도출을 위한 반응표면 함수를 설정하는 데에 한계가 있다. 이러한 한계점을 보완하기 위해 중심합성계획법(central composite design)이 고안되었다[72, 75].

중심합성계획법은 기존의  $2^k$ 요인배치법에 각 요인에 대한 축점(axial point)과 중심점(central point)을 추가한 실험계획법이다. 축점과 중심점이 추가된다면 2차 회귀 모형을 추정하기 위한 실험 표본의 수 — 요인의 수가  $k$ 개 일 때, 2차 회귀 모형 추정을 위한 실험 표본의 수는 최소  $k^2+2k+1$  이상이어야 한다 — 가 충분히 확보된다. 그리고 축점을 추가하여 요인들의 관계를 곡면으로 추정할 수 있으며, 중심점을 추가함으로써 반응표면을 추정할 때, 회귀 계수의 변동을 줄일 수 있는 이점이 있다[72].

$k=2$ 인  $2^k$ 요인배치법의 실험점은 Fig. 19 (a)처럼 4개의 꼭지점 (1, 1), (1,-1), (-1, 1), (-1, -1)으로 두 요인에 대하여 최대, 최소 수준의 조합으로 4가지 조건이 구성된다. 그리고 Fig. 19 (b)와 같이  $2k=4$ 의 축점으로  $(\alpha, 0)$ ,  $(-\alpha, 0)$ ,  $(0, \alpha)$ ,  $(0, -\alpha)$ 가 있으며, 중심점으로는 (0, 0)이 있다. 여기서  $\alpha$ 는 중심점으로부터 축방향으로의 간격을 의미하며, Eq. (5)으로 얻어진다[72, 75].

$$\alpha = (n_F)^{1/4} \quad (7)$$

여기서  $n_F$ 는 요인배치법에 사용되는 실험점의 수를 의미하며, 예를 들어  $k=2$ 일 때의  $2^k$ 요인배치법일 경우에는  $\alpha = (2^2)^{1/4} \approx 1.414$ 가 된다. 특히 Box와 Hunter는 반응표면설계를 구성하는 데에 있어서 관심 영역 전체에서 예측된 반응 값의 안정적인 분산을 갖기 위한, 즉 반응표면설계의 회전성(rotatable) 확보를 위한 적절한  $\alpha$ 의 선정이 중요하다고 언급하였다[76].

$2^k$ 요인배치법 실험점에 축점과 중심점을 추가하면 Fig. 19 (c)처럼 실험점이 구성된다. 이 때,  $\alpha \neq 1$ 이면 각 요인들은 5개의 다른 수준  $(-\alpha, -1, 0, 1, \alpha)$ 으로 설정된다. 따라서 각 요인들에 대해서 2차 회귀 모형 추정이 가능하며, 반응표면을 구성할 수 있게 된다.

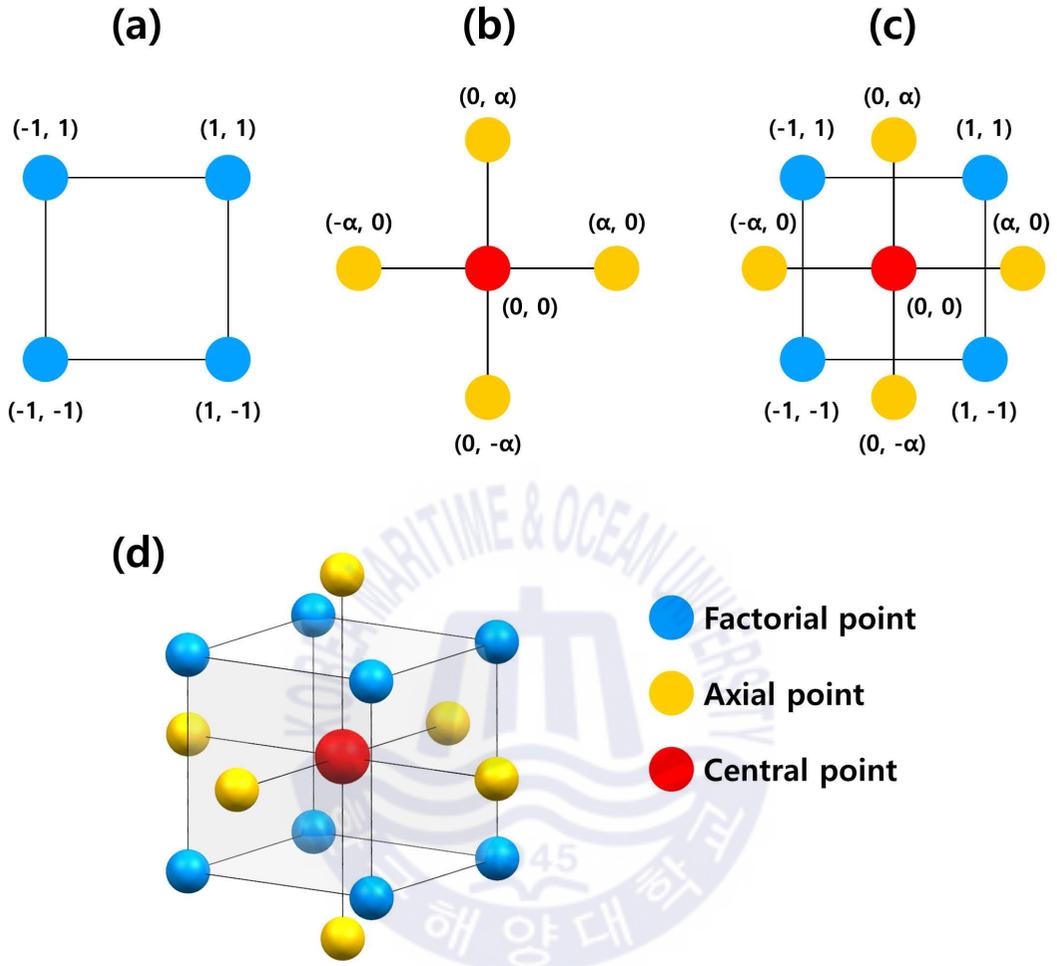


Fig. 19. Diagram of (a)  $2^k$  factorial design ( $k=2$ ), (b) axial and central point design, the central composite design for (c)  $k=2$  and (d)  $k=3$

본 연구에서는 반응표면분석법을 이용하여, 열악한 DED 적층 표면을 UNSM 기술로써 가장 효과적으로 개질시킬 수 있는 최적 조건을 정의하는 것이 목적이다. 즉, DED 적층 표면에 대하여 UNSM 기술을 적용하기 위한 실험을 계획하고, 적층 표면의 파상도, 표면 거칠기 변화를 반응표면 분석으로써 최적의 UNSM 공정 변수를 도출하고자 한다.

UNSM 공정 변수 중에서 초음파 진동수(kHz)와 초음파 진폭( $\mu\text{m}$ ), 그리고 UNSM 볼 팁의 지름(mm)은 실험에 사용한 UNSM 장치의 기본 설정 값이기 때문에, 주요 변수로 설정하는 데에 한계가 있었다. 따라서 본 연구에서는 UNSM 공정 변수 중에서 정적 하중(N), 인터벌( $\mu\text{m}$ ), 그리고 이송 속도(mm/min)을 요인으로 선정하였다. 또한, 선정한 요인들은 각각 정적 하중 10 N ~ 70 N, 인터벌 10  $\mu\text{m}$  ~ 90  $\mu\text{m}$ , 이송 속도 2000 mm/min ~ 3000 mm/min의 관심 영역을 **Table 5**와 같이 지정하였다. 정적 하중이 70 N을 초과할 경우, UNSM 장비 자체의 중량과 정적 하중 설정을 위한 무게 추의 중량까지 더해지므로 CNC 장비의 구동축이 손상될 우려가 있다. 이송속도의 설정 기준 또한 UNSM 장비의 중량으로 인한 장비 손상 가능성을 고려하여, 안정적으로 CNC 장비가 구동될 수 있는 범위로 지정하였다.

**Table 5.** Variables and levels of the UNSM process.

Variable	Symbol	Levels				
		$-\alpha$	-1	0	1	$\alpha$
Static load (N)	SL	10	25	40	55	70
Interval ( $\mu\text{m}$ )	IN	10	30	50	70	90
Scanning speed (mm/min)	SS	2000	2250	2500	2750	3000

실험에 선정한 UNSM 공정 변수, 즉 요인의 수는 3개이므로( $k=3$ ) Eq. (7)에 의해서  $\alpha = (2^3)^{1/4} \approx 1.682$ 가 된다.

Table 5에서 설정한 각 요인에 대한 실험조건의 범위에 따라 중심합성계획법을 위한 실험 표본으로 Table 6와 같이 설계하였다. 실험 표본은 8개의 실험점과(2<sup>3</sup>) 6개의 축점, 그리고 6개의 중심점까지 총 20개로 구성된다. 설정한 20개의 실험 설계는 랜덤화하여(randomized) 설정되었는데, 요인들끼리 서로 미치는 영향력을 배제하여 객관성을 확보하기 위한 것이다[72, 73]. Table 6의 실험 표본에 따라 DEDed 316L 적층 표면에 UNSM을 적용하였고, 그로 인한 표면 특성 변화를 분석하였다. 표면 특성 변화를 분석하기 위한 지표는 제 2장과 동일하게 파상도와 표면 거칠기로 선택하였으며, 측정을 위해 주사전자현미경과 3차원 표면조도 측정기, 그리고 접촉식 표면 조도 측정기를 사용하였다. 파상도와 표면 거칠기는 각 실험 표본에 대하여 10번 측정하였고, 평균을 산출하여 반응 값으로써 채택하였다. 그리고 각 실험 표본에 대한 반응 값들이 최소가 되는 공정 조건을 도출하기 위해 Minitab 18 소프트웨어를 이용하였다.



**Table 6.** Experimental design of the UNSM process

Standard number	Run order	Static load		Interval		Scanning speed	
		Unit	Symbol	Unit	Symbol	Unit	Symbol
		N	SL	$\mu\text{m}$	IN	mm/min	SS
1	6	25	-1	30	-1	2250	-1
2	10	55	1	30	-1	2250	-1
3	9	25	-1	70	1	2250	-1
4	13	55	1	70	1	2250	-1
5	20	25	-1	30	-1	2750	1
6	15	55	1	30	-1	2750	1
7	16	25	-1	70	1	2750	1
8	8	55	1	70	1	2750	1
9	18	10	$-\alpha$	50	0	2500	0
10	7	70	$\alpha$	50	0	2500	0
11	3	40	0	10	$-\alpha$	2500	0
12	19	40	0	90	$\alpha$	2500	0
13	11	40	0	50	0	2000	$-\alpha$
14	12	40	0	50	0	3000	$\alpha$
15	2	40	0	50	0	2500	0
16	17	40	0	50	0	2500	0
17	14	40	0	50	0	2500	0
18	4	40	0	50	0	2500	0
19	5	40	0	50	0	2500	0
20	1	40	0	50	0	2500	0

### 3.2 공정 조건에 따른 표면 특성 분석

DED 적층 표면의 개질에 대한 각 UNSM 요인들의 영향력을 분석하기 위해 Table 7과 같이 요인들을 분류하였다. 그리고 Table 5에서 설정한 요인의 관심 영역 내에서 중심점에 해당하는 정적 하중 40 N, 인터벌 50  $\mu\text{m}$ , 이송 속도 2500 mm/min 실험 변수 조건을 기준 조건(reference value)으로 채택하였다. 기준 조건에 대해서 각 요인의 최대, 최소 수준에 따른 DEDed 316L의 적층 표면의 파상도, 표면 거칠기 및 표면부 미세조직 변화를 분석하였다. 기준 조건에 대한 파상도와 표면 거칠기는 Table 6의 중심점 6개의 평균으로 산출하였고, 그 값을 기준 조건의 반응 값으로 채택하였다.

Table 7. Values of process parameters investigated.

Parameter	Reference value	Values investigated		
		$-\alpha$	0	$\alpha$
Static load (N)	40	10	40	70
Interval ( $\mu\text{m}$ )	50	10	50	90
Scanning speed (mm/min)	2500	2000	2500	3000

### 3.2.1 정적 하중의 영향

UNSM 공정 조건 중 정적 하중 조건이 적층 표면 개질의 영향을 조사하기 위해 정적 하중을 10 N부터 70 N까지 30 N의 간격으로 UNSM을 적용하였다. 이때, 인터벌과 이송 속도 조건은 기본 조건인 50  $\mu\text{m}$ , 2500 mm/min이다. Fig. 20은 정적 하중에 따른 적층 표면의 모습을 각각 SEM과 3차원 표면 조도 측정기로 나타낸 것이다. 그리고 Fig. 21은 UNSM 처리하지 않은 시편을 기준으로 각 조건에 따른 파상도와 표면 거칠기 변화를 보여준다. Fig. 20의 3D 표면 사진에서 볼 수 있듯이, 인터벌이 모두 동일하게 기준 조건 50  $\mu\text{m}$ 으로 설정되었기 때문에 UNSM으로 생성된 마이크로 트랙의 간격이 같다. Fig. 20 (a)는 정적 하중 10 N일 때의 표면 특성을 나타낸 것이다. 전체적으로 표면의 굴곡이 심한 것을 보아, 정적 하중이 표면을 완만하게 개질하기에는 부족한 것으로 판단된다. 이는 Fig. 21에서의 파상도와 표면 거칠기 값으로도 확인할 수 있는데, UNSM 처리하지 않은 경우에 대해서 파상도는 24.3%, 표면 거칠기는 24.0% 개질 효과를 나타낸다. 즉, 정적 하중이 10 N 조건은 다른 정적 하중 조건들에 비해 가장 적은 개선 효과를 보이고 있다. Fig. 20 (b)는 정적 하중이 40 N인 경우의 표면 구조를 나타낸 것으로, 다른 정적 하중 조건보다도 표면이 고르게 개질되어 있는 것을 볼 수 있다. 또한, Fig. 21에서 표면 거칠기가 가장 낮은 것을 확인할 수 있다. 이와는 다르게, 정적 하중 조건이 가장 큰 70 N일 때의 파상도가 가장 낮은 것을 확인할 수 있다. 이는 Eq. (2)에 의해서, 정적 하중에 비례하여 표면에 가해지는 총 하중의 크기도 변하므로, 정적 하중이 클수록 파상도에 대한 개질 효과가 더 좋아지는 것으로 판단된다. 그러나 오히려 표면 거칠기는 기준 조건 40 N보다 큰 70 N에서 상승하는 것을 미루어 보아, 표면에 가해지는 정적 하중에 선형적으로 비례하여 표면이 개질되지 않는 점을 시사한다.

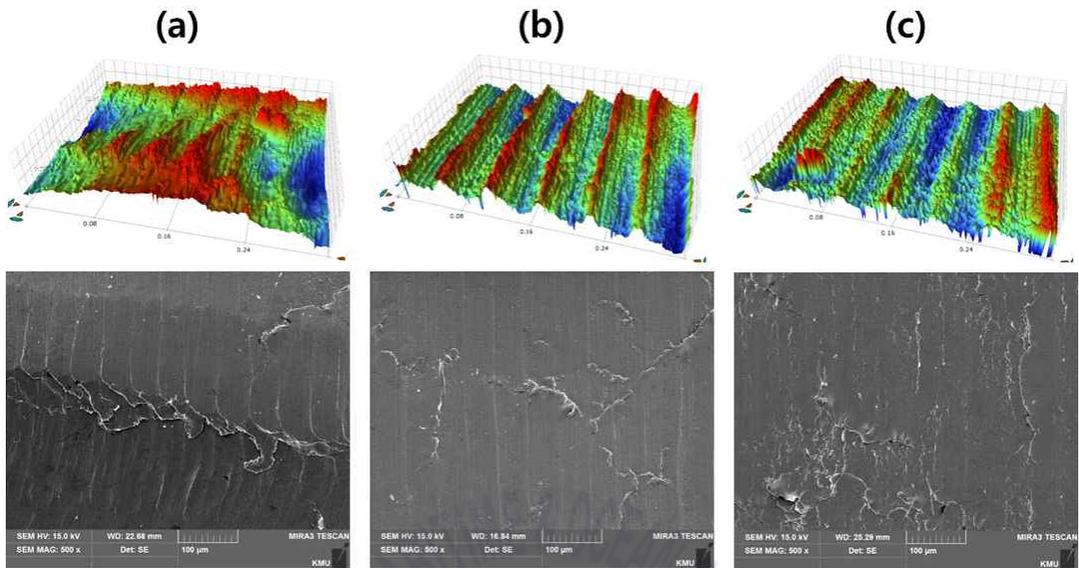


Fig. 20. Surface topographies according to static load; (a) 10 N, (b) 40 N, and (c) 70 N

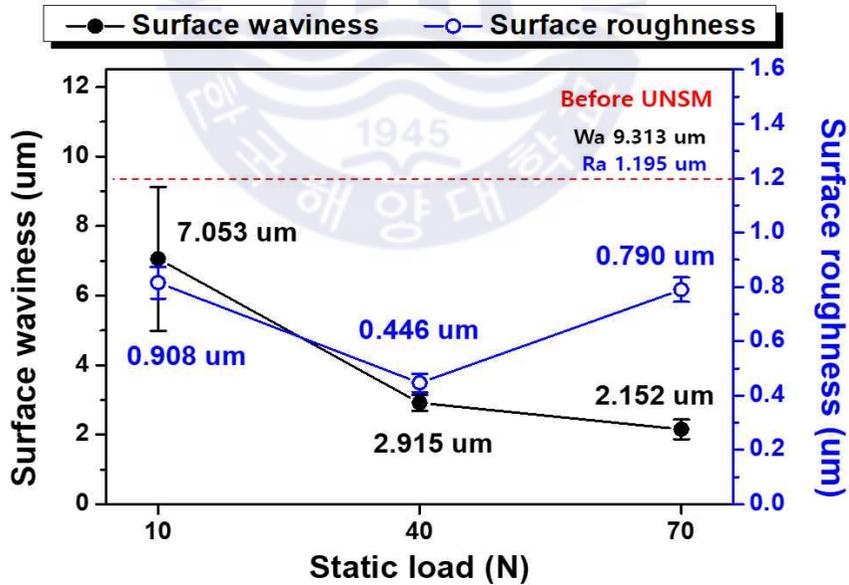


Fig. 21. Effects of static load on waviness and surface roughness of the DEDed surface after UNSM

Fig. 22 (a)-(c)은 정적 하중 변화에 따른 표면부 단면 미세조직을 SEM으로 관찰한 모습을, Fig. 22 (d)는 표면에서부터 변형된 깊이를 나타낸 그래프이다. UNSM 처리한 표면부의 미세조직은 Fig. 16 (b)와 유사하게 표면으로부터 특정한 깊이까지 뒤틀린 것을 확인할 수 있다. 특히, 정적 하중 10 N일 때의 변형 깊이는 약 5  $\mu\text{m}$  정도로, UNSM에 의한 미세조직의 변형이 다른 하중 조건에 비해 매우 작은 것을 알 수 있다. 그러므로 이전의 파상도와 표면 거칠기 변화 분석 결과도 같이 고려한다면, 정적 하중 조건 10 N은 DED 적층 표면 특성 변화에 미치는 영향이 미약한 것으로 판단된다. 전체적으로 Fig. 22 (a)-(c)와 같이 정적 하중이 커질수록 조직이 더 많이 뒤틀리며, 그와 동시에 변형되는 깊이도 증가하는 경향이 나타난다. 이는 정적 하중이 클수록 Eq. (2)에 의해서 표면에 전달되는 하중이 증가하므로, 그에 따라서 소성 변형되는 정도가 상승하는 것으로 판단된다.



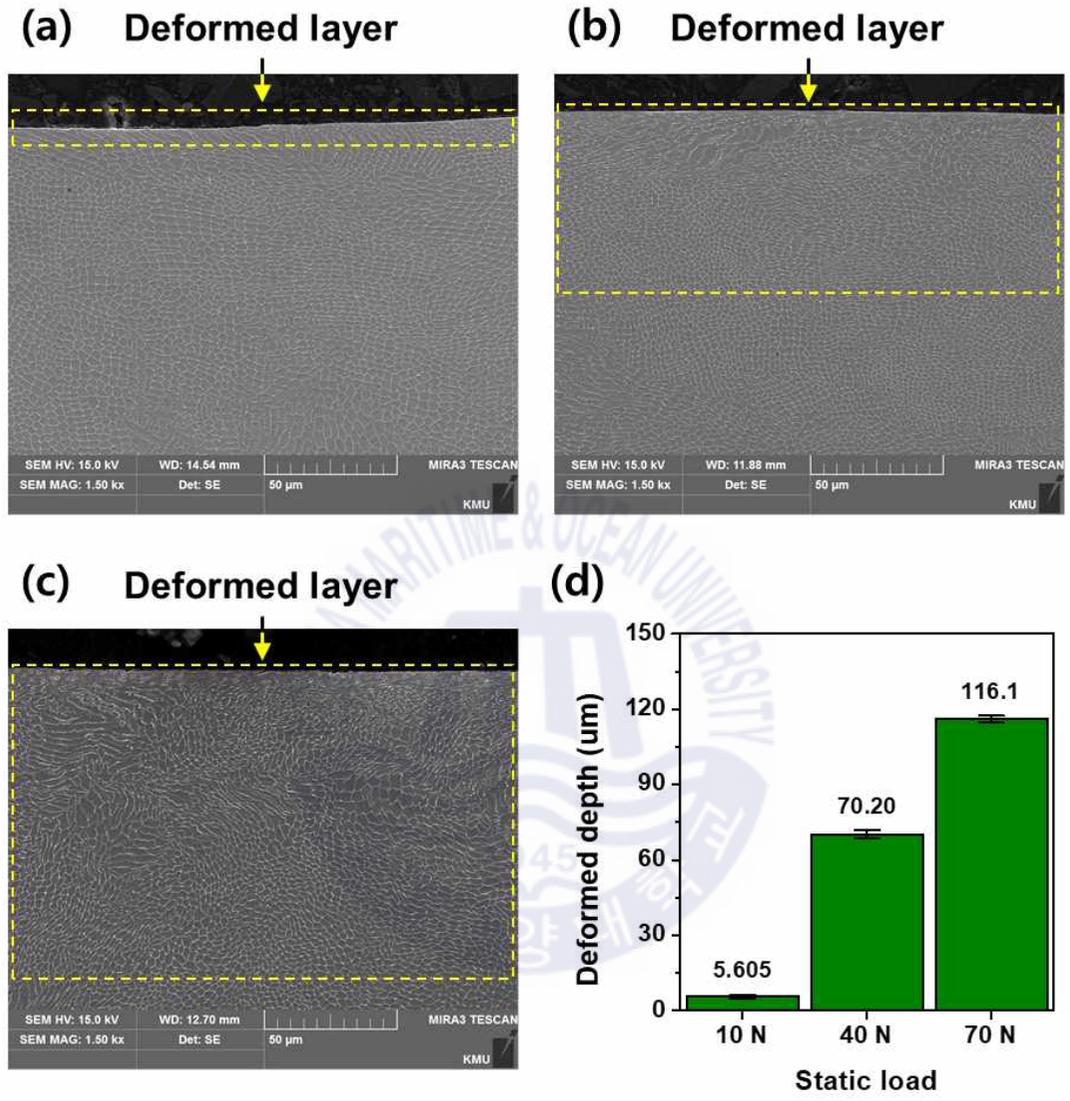


Fig. 22. SEM images of the near-surface microstructures after UNSM treatment according to static load; (a) 10 N, (b) 40 N, (c) 70 N, and (d) the plot of the deformed depth at each static load

### 3.2.2 인터벌의 영향

UNSM 공정 조건 중 인터벌 조건이 적층 표면 개질의 영향을 조사하기 위해 정적 하중을 10  $\mu\text{m}$ 부터 90  $\mu\text{m}$ 까지 50  $\mu\text{m}$ 의 간격으로 UNSM을 적용하였다. 이때, 정적 하중과 이송 속도는 기본 조건인 40 N과 2500 mm/min이다. Fig. 23은 UNSM 인터벌 조건에 따라 나타나는 DED 적층 표면의 형상을 나타낸 것이다. 표면에 인터벌 조건에 따라, 마이크로 트랙이 형성되어 있는 것을 확인할 수 있는데, 인터벌 조건이 넓어질수록 마이크로 트랙의 폭이 넓어지는 경향이 나타난다. Fig. 24은 UNSM 처리하지 않은 경우를 기준으로 각 인터벌 조건에 따른 파상도와 표면 거칠기 변화를 보여준다. Fig. 23에서도 볼 수 있듯이, 인터벌이 증가할수록 파상도와 표면 거칠기가 상승하여 표면 구조가 비교적 표면 특성이 불규칙적으로 나타나며, 표면 특성도 열악해지는 것을 알 수 있다. 이는 Eq. (3)에 의해 인터벌 간격이 넓어짐에 따라, 면적 당 충돌 수가 감소하여 UNSM에 의한 표면 개질 효과도 점차 줄어들어 의한 것으로 판단된다. UNSM 인터벌 조건 중 가장 낮은 간격 10  $\mu\text{m}$ 에서 파상도와 표면 거칠기가 모두 낮게 나타난 것을 볼 수가 있는데, UNSM 처리하지 않은 경우보다 각각 80.1%, 71.0%만큼의 개질 효과가 나타났다.

Fig. 25 (a)-(c)은 인터벌 변화에 따른 표면부 단면 미세조직을 SEM으로 관찰한 모습을, Fig. 25 (d)는 표면에서부터 변형된 깊이를 나타낸 그래프이다. Fig. 25 (a)-(c)을 바탕으로, 인터벌 간격이 작아질수록 조직이 더 많이 뒤틀리며, 그와 동시에 변형되는 깊이도 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이는 정적 하중에 비례하여 변형 깊이도 증가하는 Fig. 22에서의 경향과 반대되는 것을 알 수 있다. 결국, 인터벌이 감소할수록 Eq. (3)에 의해서 표면과의 면적 당 충돌 수가 증가하기 때문에, 그에 따라서 소성 변형되는 정도가 상승하는 것으로 유추할 수 있다.

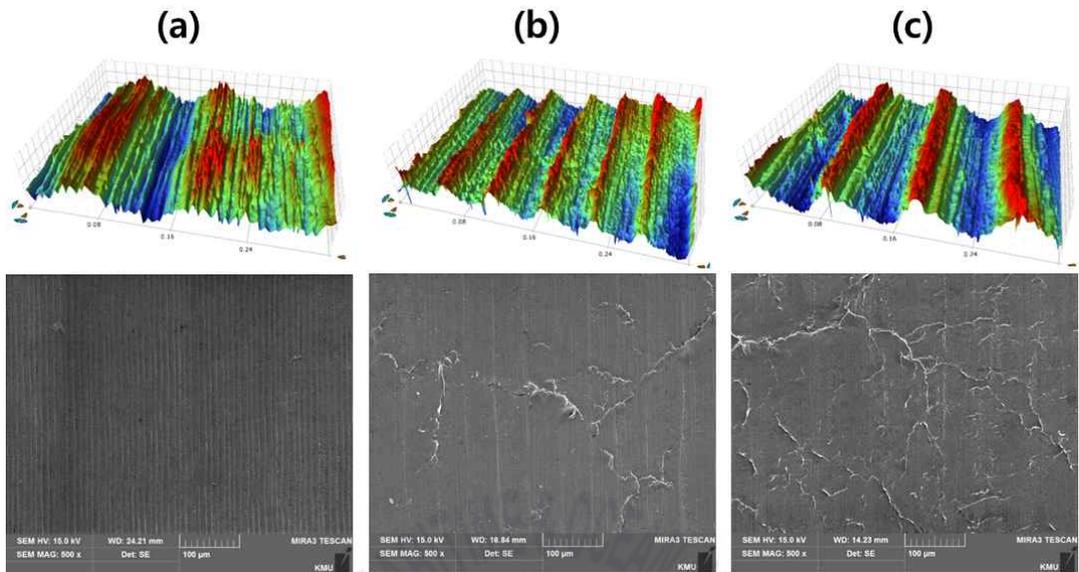


Fig. 23. Surface topographies according to interval; (a) 10  $\mu\text{m}$ , (b) 50  $\mu\text{m}$ , and (c) 90  $\mu\text{m}$ .

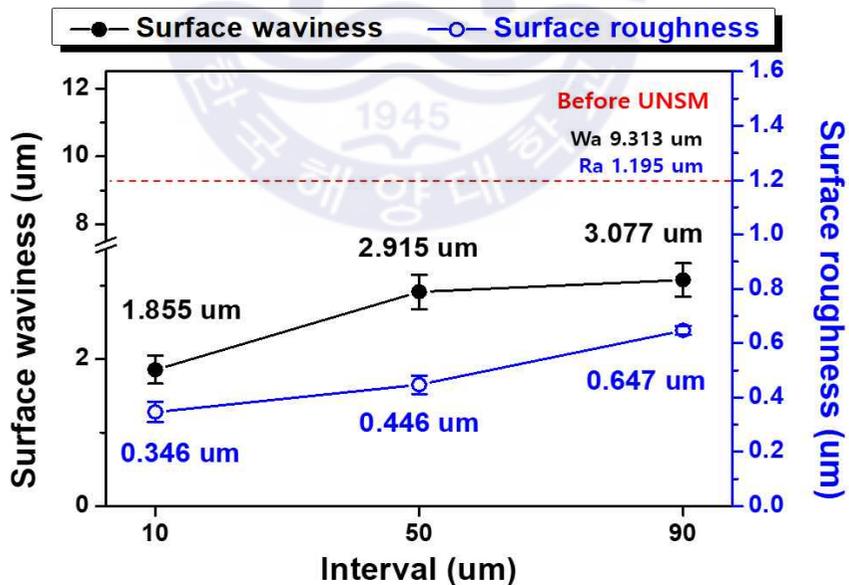


Fig. 24. Effects of interval on waviness and surface roughness of the DEDed surface after UNSM

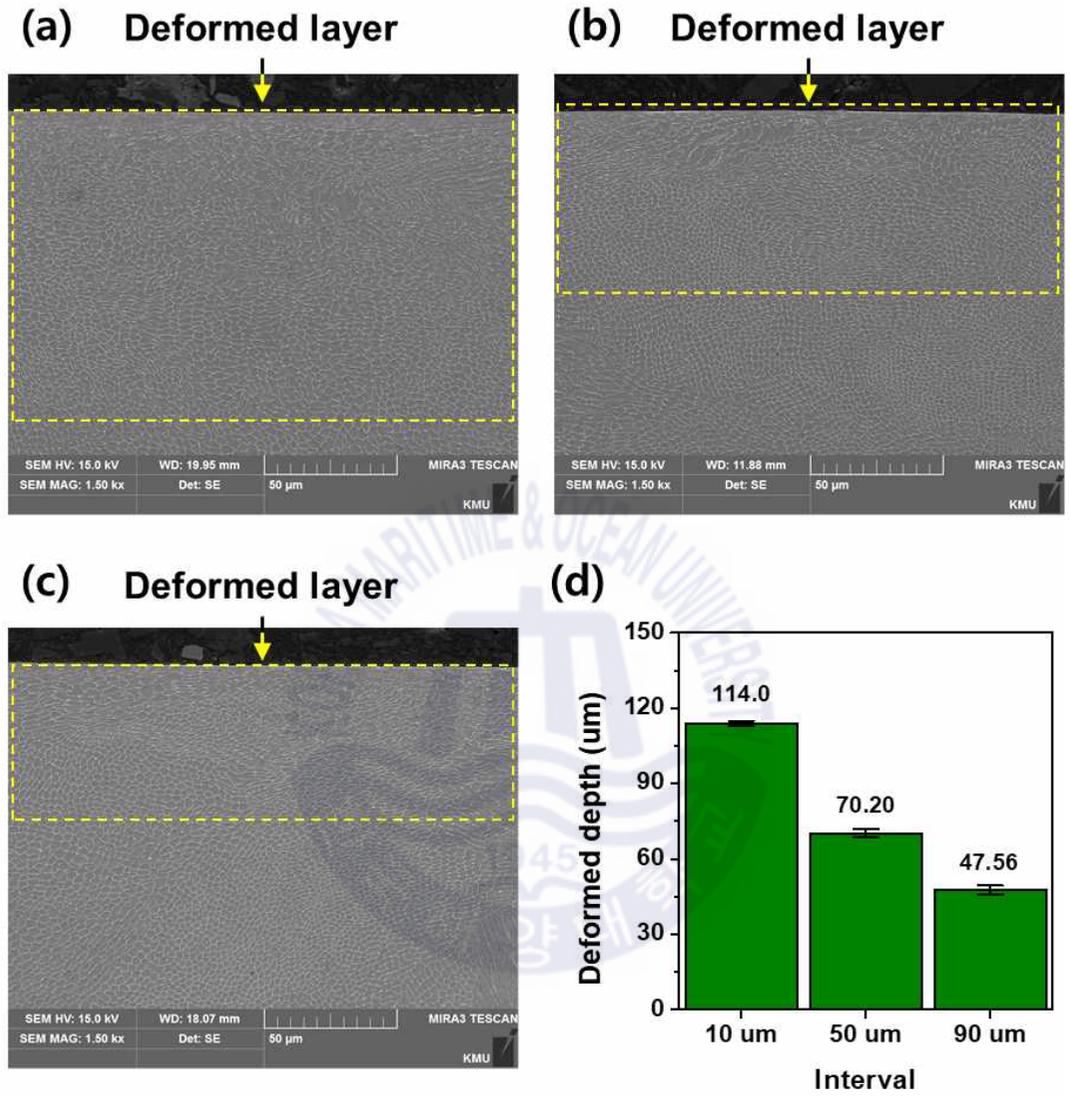


Fig. 25. SEM images of the near-surface microstructures after UNSM treatment according to interval; (a) 10  $\mu\text{m}$ , (b) 50  $\mu\text{m}$ , (c) 90  $\mu\text{m}$ , and (d) plot of the deformed depth at each interval

### 3.2.3 이송 속도의 영향

UNSM 공정 조건 중 이송 속도 조건이 적층 표면 개질의 영향을 조사하기 위해 이송 속도를 2000 mm/min부터 3000 mm/min 까지 500 mm/min의 간격으로 UNSM을 적용하였다. 이 때, 정적 하중과 인터벌은 기본 조건인 40 N과 50  $\mu$ m이다. Fig. 26은 이송 속도에 따른 적층 표면의 모습을 각각 SEM과 3차원 표면조도 측정기로 나타낸 것이다. 인터벌 조건이 동일하므로, 표면에 구현된 마이크로 트랙의 폭도 비슷하게 나타난다. 그리고 Fig. 27은 UNSM 처리하지 않은 경우를 기준으로 각 조건에 따른 파상도와 표면 거칠기 변화를 보여준다. 이송 속도가 커질수록 파상도가 높게 나타나는데, 인터벌의 경우와 같이 Eq. (3)에 의해 면적 당 충돌 수가 감소하여 표면 개질 효과도 달라지는 것으로 판단된다. 그러나 기준 조건인 이송 속도가 2500 mm/min일 때의 표면 거칠기가 다른 이송 속도의 조건 중에서 가장 낮은 것을 확인할 수 있는데, 정적 하중의 영향을 분석한 경우처럼 기준 조건에서 표면 거칠기가 가장 낮게 구현되었다. 이를 통해서 UNSM 이송 속도에 선형적으로 반비례하여 표면이 개질되지 않는 것을 알 수 있다.

Fig. 28 (a)-(c)은 이송속도 변화에 따른 표면부 단면 미세조직을 SEM으로 관찰한 모습을, Fig. 28 (d)는 표면에서부터 변형된 깊이를 나타낸 그래프이다. 인터벌에 따른 표면 미세조직을 나타낸 Fig. 25 (a)-(c)와 비슷하게, Fig. 28 (a)-(c)에서도 이송 속도가 느려질수록 조직이 더 많이 뒤틀리며, 그와 동시에 변형되는 깊이도 증가하는 것으로 나타났다. 그러나 Fig. 25 (d)와 Fig. 28 (d)를 비교했을 때, 인터벌에 따른 변형 깊이가 감소하는 경향보다 이송속도에 따른 변형 깊이의 감소하는 경향이 작은 것을 알 수 있다. 이는 인터벌과 마찬가지로 이송 속도가 감소하면 Eq. (3)에 의해서 표면과의 면적 당 충돌 수가 증가하지만, 인터벌 조건보다 표면이 소성 변형되는 데에 미치는 영향력이 작은 것으로 판단된다.

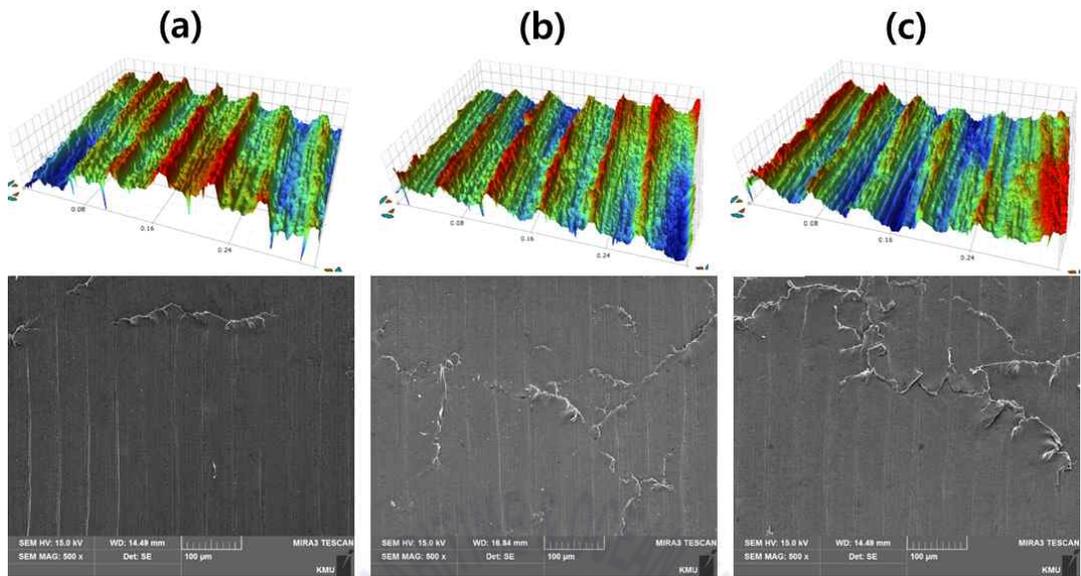


Fig. 26. Surface topographies according to scanning speed (a) 2000 mm/min, (b) 2500 mm/min, and (c) 3000 mm/min

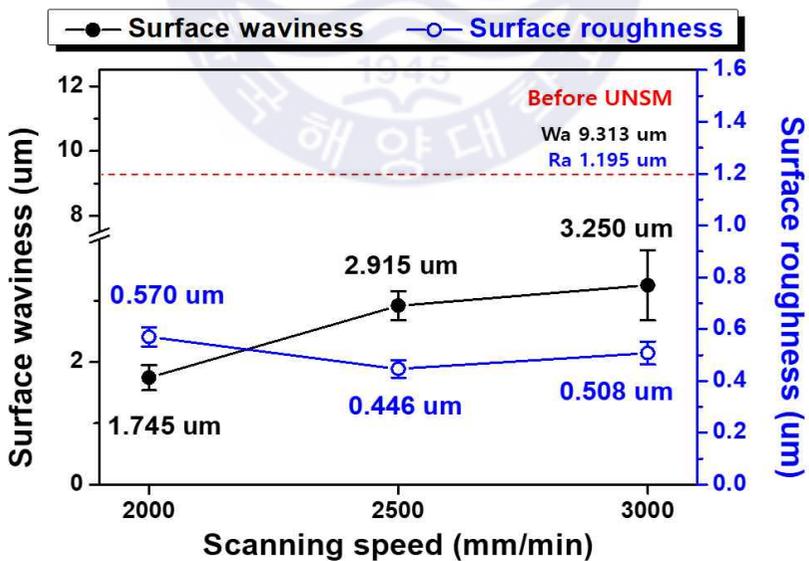
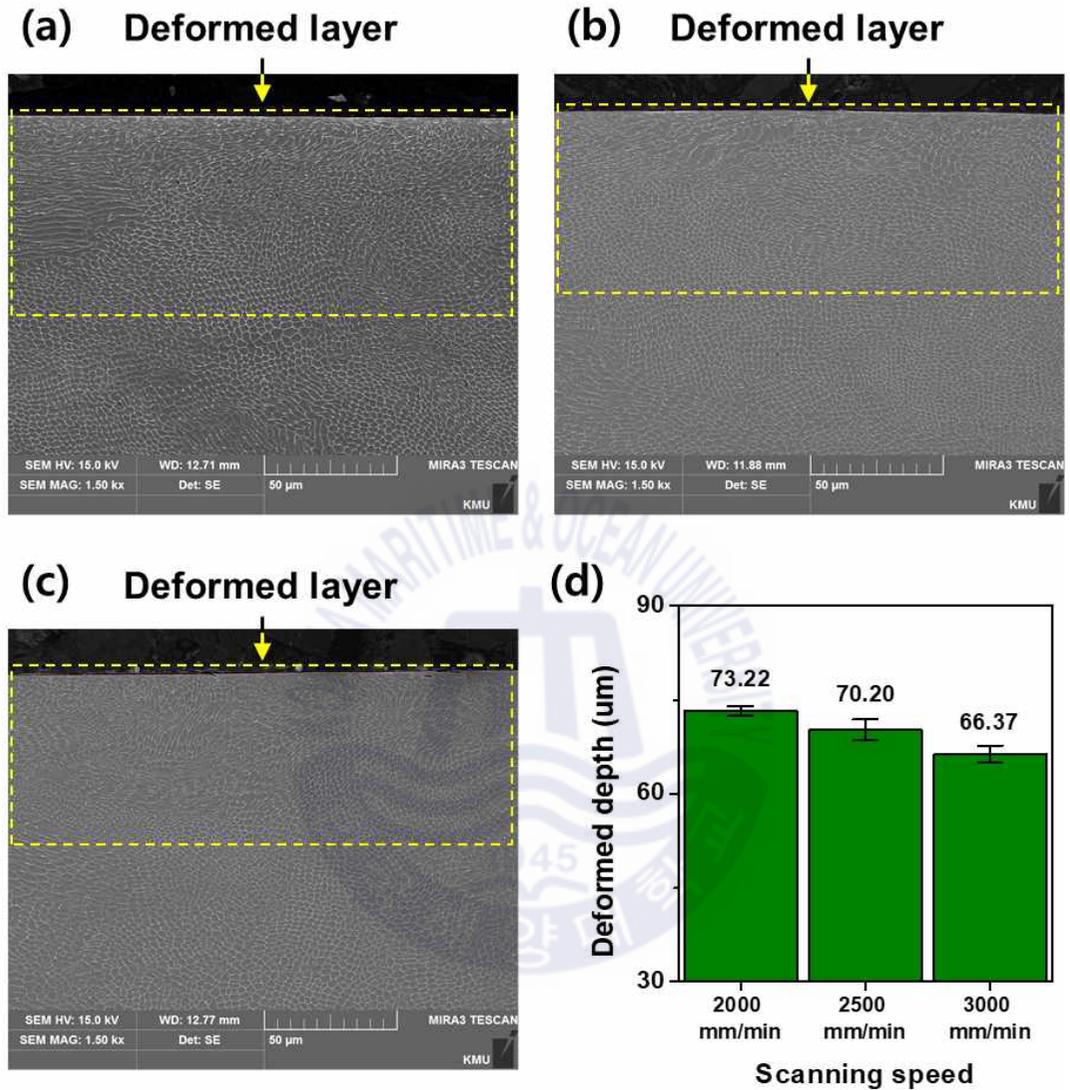


Fig. 27. Effects of scanning speed on surface waviness and roughness of the DEDED surface after UNSM



**Fig. 28.** SEM images of the near-surface microstructures after UNSM treatment according to scanning speed; (a) 2000 mm/min, (b) 2500 mm/min, and (c) 3000 mm/min, and (d) plot of the deformed depth at each scanning speed

Table 8은 각 요인들의 최대, 최소 수준에서 파상도의 반응 값을, Table 9은 표면 거칠기의 반응 값을 나타낸 것이며, 요인 수준에 따른 파상도, 표면 거칠기의 변화 양상을 파악할 수 있다. 파상도가 가장 낮게 구현되는 UNSM 요인은 정적 하중 40 N, 인터벌 50  $\mu\text{m}$ , 이송 속도 2000 mm/min 이며, UNSM 처리 전보다 81.3% 낮아짐을 Table 8에서 확인할 수 있다. 그리고 정적 하중 요인의 수준에 따른 파상도 반응 값의 차이가 가장 크게 나타나는 것으로 판단된다 ( $\Delta Wa = \max - \min = 4.901 \mu\text{m}$ ). Table 9을 통해서 표면 거칠기가 가장 낮게 개선되는 UNSM 요인은 정적 하중 40 N, 인터벌 10  $\mu\text{m}$ , 이송 속도 2500 mm/min 이며, UNSM 처리 전보다 71.0% 낮아지는 것을 확인할 수 있다. 또한 Table 8의 분석 결과와 유사하게, 정적 하중 요인의 수준에 따른 표면 거칠기 반응 값의 차이가 가장 크게 나타났다 ( $\Delta Ra = \max - \min = 0.462 \mu\text{m}$ ).

Table 8과 Table 9을 통해서 UNSM에 의한 각 반응 값이 가장 낮게 나타나는 조건을 확인할 수 있었지만, 파상도와 표면 거칠기 반응 값을 동시에 최소로 만족시킬 최적 조건을 선정하기에는 어려움이 있다. 최적 조건을 선정하려면 모든 실험 표본에 대한 반응 값을 조사하여 요인과 반응 값의 관계 함수, 즉 반응표면을 찾아야 한다. 이처럼 반응 값을 단순하게 분석하는 것으로는 각 요인들에 대한 영향력을 파악하기 어려워, 반응표면분석을 시행하는 데에 부적절하다[75, 76].

**Table 8.** Average observed waviness for UNSM parameters

Parameter	Value	Waviness (Wa, $\mu\text{m}$ )	Wa reduction ratio (%)	$\Delta$ Wa ( $\mu\text{m}$ )
	Untreated	9.313	-	-
Static load (N)	10	7.053	24.3	4.901
	40	2.915	68.7	
	70	2.152	76.9	
Interval ( $\mu\text{m}$ )	10	1.855	80.1	1.222
	50	2.915	68.7	
	90	3.077	67.0	
Scanning speed (mm/min)	2000	1.745	81.3	1.505
	2500	2.915	68.7	
	3000	3.250	65.1	

**Table 9.** Average observed surface roughness for UNSM parameters

Parameter	Value	Surface roughness (Ra, $\mu\text{m}$ )	Ra reduction ratio (%)	$\Delta$ Ra ( $\mu\text{m}$ )
	Untreated	1.195	-	-
Static load (N)	10	0.908	24.0	0.462
	40	0.446	62.7	
	70	0.790	33.9	
Interval ( $\mu\text{m}$ )	10	0.346	71.0	0.301
	50	0.446	62.7	
	90	0.647	45.9	
Scanning speed (mm/min)	2000	0.570	52.3	0.124
	2500	0.446	62.7	
	3000	0.508	57.5	

### 3.3 반응표면분석법을 이용한 공정 최적화

#### 3.3.1 실험 결과 및 분석

Fig. 29은 Table 6의 반응표면 설계를 바탕으로, DEDed 316L 적층 표면에 대하여 UNSM을 적용하였을 때의 시편 표면 모습을 나열한 것이다. 그리고 각 시편의 파상도와 표면 거칠기 반응 값을 Table 10에 정리하였다. 각 조건별 파상도와 표면 거칠기는 Wa 1.745  $\mu\text{m}$  ~ 7.053  $\mu\text{m}$ , Ra 0.346  $\mu\text{m}$  ~ 0.815  $\mu\text{m}$  까지 나타난다. 최소 파상도와 최소 표면 거칠기는 각각 표준 순서 #13과 #11에서 측정되었으며, 이는 이전의 Table 8과 Table 9에 대한 분석 결과와 같은 것을 알 수 있다. 또한, 앞서 언급하였듯이 최소 정적 하중 수준(10 N)에 해당하는 표준 순서 #9의 파상도와 표면거칠기는 20개의 실험 표본들 중에서 가장 크게 나온 것으로 확인되며, Fig. 29에서도 다른 표본들보다 확연하게 표면 구조가 좋지 못하다. Fig. 29의 UNSM 처리된 적층 표면 표본 중에서 표준 순서 #9와 #10, 그리고 중심점에 해당하는 #15 ~ #20의 시편을 미루어 볼 때, 정적 하중에 가장 큰 영향을 받는 것을 확인할 수 있다.



Fig. 29. UNSM treated specimens according to central composite design

**Table 10.** Experimental results for waviness(Wa) and surface roughness(Ra)

Standard number	Run order	Static load	Interval	Scanning speed	Waviness (Wa)	Surface roughness (Ra)
		SL	IN	SS	$\mu\text{m}$	$\mu\text{m}$
1	6	-1	-1	-1	2.688	0.398
2	10	1	-1	-1	2.462	0.583
3	9	-1	1	-1	4.334	0.527
4	13	1	1	-1	2.566	0.742
5	20	-1	-1	1	3.229	0.406
6	15	1	-1	1	2.277	0.501
7	16	-1	1	1	4.369	0.604
8	8	1	1	1	2.863	0.712
9	18	$-\alpha$	0	0	7.053	0.815
10	7	$\alpha$	0	0	2.152	0.790
11	3	0	$-\alpha$	0	1.855	0.346
12	19	0	$\alpha$	0	3.077	0.647
13	11	0	0	$-\alpha$	1.745	0.570
14	12	0	0	$\alpha$	3.250	0.508
15	2	0	0	0	3.399	0.461
16	17	0	0	0	2.257	0.516
17	14	0	0	0	2.392	0.417
18	4	0	0	0	2.598	0.428
19	5	0	0	0	3.619	0.430
20	1	0	0	0	3.223	0.423

Table 10의 반응 값을 토대로 UNSM 요인에 대한 파상도와 표면 거칠기의 2차 회귀 모형은 Eq. (6)에 의해서 각각 Eq. (8)과 Eq. (9)로 구축되었다.

$$Y_{Wa} = 2.912 - 0.891 SL + 0.370 IN + 0.240 SS + 0.421 SL*SL - 0.113 IN*IN - 0.114 SS*SS - 0.262 SL*IN - 0.058 SL*SS - 0.003 IN*SS \quad (8)$$

$$Y_{Ra} = 0.4437 + 0.0345 SL + 0.0813 IN - 0.0094 SS + 0.0881 SL*SL + 0.0116 IN*IN + 0.0222 SS*SS + 0.0053 SL*IN - 0.0245 SL*SS + 0.0152 IN*SS \quad (9)$$

여기서,  $Y_{Wa}$ 는 파상도의 반응 값( $\mu\text{m}$ ),  $Y_{Ra}$ 는 표면 거칠기의 반응 값( $\mu\text{m}$ ), SL은 코드화된(coded) 정적 하중 (N), IN은 코드화된 인터벌( $\mu\text{m}$ ), SS는 코드화된 이송 속도(mm/min)이다.

반응표면분석법에 의하여 도출된 모형 Eq. (8)과 Eq. (9)에 대하여 ANOVA 분석 결과는 각각 Table 11과 Table 12에 나타났다. 회귀 모형에 대한 ANOVA 분석은 요인이 반응 값에 영향을 미치는지에 대한 여부, 즉 유의한가에 대한 여부를 판단하기 위해 시행된다[72]. ANOVA 분석에서 F-value가 클수록 요인이 반응 값에 대한 효과가 높다고 판단하며, 각 회귀 계수의 중요성을 분석할 때 사용되는 p-value는, 통계적 가설 검정 방법 중 하나인 F-test에서 F-value가 F-분포(F-distribution)를 벗어나지 않을 확률을 의미한다[77]. F-test에서 F-value가 F-분포를 벗어나면 그 검정 결과는 유의하다고 판단하는데, 따라서 p-value가 작다는 것은 F-value가 F-분포를 벗어나므로 회귀 상수가 유의한 것을 의미한다. 일반적으로, ANOVA 분석에서 F-value가 높을수록, p-value가 낮을수록 회귀 모형이 유의하다고 판단한다[75]. 이 때, 회귀 모형이 유의함을 판단하기 위한 p-value의 신뢰수준(confidence level)을 설정해야 하는데 본 연구

에서는 95%의 신뢰수준을 적용하였다. 그리하여 p-value가 0.05 (100% - 95% = 5%)를 유의 수준으로 설정하여 p-value가 0.05보다 낮다면, 반응 값에 대해 영향력이 높은 요인으로 판별하였다.

Table 11은 UNSM 실험 표본에 따른 파상도 반응 값에 대하여 ANOVA 분석을 수행한 결과이다. 전체 모형을 나타내는 Model 항의 p-value가  $0.004 < 0.05$  이므로, 파상도 반응 값( $Y_{wa}$ )에 대한 2차 회귀 모형은 유의한 것으로 판단된다. 그리고 선형 모형(linear)항의 p-value  $0.001 < 0.05$  이므로, UNSM 요인인 정적 하중(SL), 인터벌(IN), 이송 속도(SS) 중에서 유의한 항이 있다고 판단할 수 있다. 또한 제곱(square)항의 p-value 값으로써, 유의한 제곱 항이 있음을 판단할 수 있다. 그러나 교호작용(interaction)항의 p-value가 0.05보다 크기 때문에,  $Y_{wa}$ 에 대하여 유의한 교호작용 항이 없다고 판단하였다. 세부적으로 SL  $\times$  IN, IN  $\times$  SS, SL  $\times$  SS 모두 유의한 항이 없는 것을 파악할 수 있다.

회귀 모형에 대한 적합성 결여 검증(lack-of-fit test)은 회귀 모형이 적합하다는 귀무가설 검정법이며, 적합성 결여 항의 p-value가 유의 수준 이하일 경우 회귀 모형이 관계를 올바르게 나타내지 못한다는 결론을 내리게 된다. 즉, 적합성 결여 p-value가 유의수준보다 커야 회귀 모형이 적절하게 도출되었다고 판단할 수 있다[75]. 따라서 Table 11의 파상도 반응 값의 회귀 모형에 대한 적합성 결여 검증 결과, p-value 0.348로 0.05보다 크므로 회귀 모형이 적절하게 도출되었다고 판단하였다.

Table 11의 파상도 반응 값의 회귀 모형에 대한 ANOVA 분석 결과에서 결정 계수(determination coefficient, R-sq)와 수정 결정 계수(adjusted determination coefficient, R-sq (adj))는 회귀 모형에 의해 설명되는 반응 값에서의 변동을 백분율로 나타낸 것이다. 일반적으로 도출한 회귀 모형이 반응 값을 얼마나 잘 적합시키는지 확인할 때 사용하며, R-sq 값이 80% 이상일 경우에는 그 모형이 적절하다고 제시한 바 있다[78]. Table 10의 R-sq 값과 R-sq (adj) 값은 각각 85.10%, 71.69%이며, 회귀 모형의 유효성과 적절성이 다소 부족한 것으로 나타났다. 이는 회귀 모형을 도출하는 데에 있어서 변동이 큰 반응 값이 있는 경우

발생한다[67, 72]. 이러한 원인으로 정적 하중이 10 N인 실험 표본에서의 측정된 파상도가 다른 실험 표본보다 상대적으로 높게 측정되었을 뿐만 아니라, 굴곡진 표면 구조가 측정값의 정확성을 떨어뜨려 그로 인해 회귀 모형을 추정하는 데에 있어서 큰 변동이 발생한 것으로 판단된다.

Table 12은 UNSM 실험 표본에 따른 표면 거칠기 반응 값에 대하여 ANOVA 분석한 결과이다. 전체 모형을 나타내는 모델(model)항의 p-value가  $0.001 < 0.05$ 이므로, 표면 거칠기 반응 값( $Y_{Ra}$ )에 대한 2차 회귀 모형은 유의한 것으로 판단된다. 그리고 선형 항 및 제곱 항이 회귀 모형에 유의한 것으로 여겨지며, Table 11과 유사한 경향을 나타냈다. 표면 거칠기 반응 값의 회귀 모형에 대한 적합성 결여 검증 결과는 p-value  $0.076 > 0.05$  이므로, 회귀 모형이 적절하게 도출되었다고 결론지을 수 있다. 또한, 표면 거칠기 반응 값의 회귀 모형에 대하여 R-sq 값과 R-sq (adj) 값은 각각 90.30%, 81.57%로 나타나 파상도 반응 값 회귀 모형보다 높은 유효성과 적절성이 높은 것으로 판단된다.

각 UNSM 요인의 p-value를 비교해보면 설정한 관심 영역 내에서 파상도와 표면 거칠기 반응 값에 대한 영향력을 파악할 수 있다. 파상도에 대한 각 요인의 영향력은 정적 하중이 가장 큰 것으로 확인되었고(p-value  $0.000 < 0.05$ ), 표면 거칠기에 대한 영향력은 인터벌이 가장 큰 것으로 나타났다(p-value  $0.000 < 0.05$ ). 주목할 점은 이송 속도의 영향력인데, 파상도와 표면 거칠기에 대하여 모두 유의하지 않은 것으로 나타났으며, 선형 항뿐만 아니라 제곱 항과 교호작용 항에서도 유의성이 발견되지 않았다. ANOVA 분석을 통하여 파상도와 표면 거칠기에 대한 각 요인들의 영향력 검증 결과는, 앞서 논의하였던 축점에서의 반응 값을 비교한 결과보다 더 의미 있는 것으로 간주할 수 있다. 그 이유는 ANOVA 분석을 위해 각 반응 값에 대한 2차 회귀 모형을 도출하였고, 각 요인들의 수준으로써 곡선 관계까지 고려했기 때문에 보다 더 정밀하고 유연하게 영향력을 분석할 수 있기 때문이다[72, 73, 75].

**Table 11.** ANOVA for waviness(Wa)

Source	Degree of freedom (DF)	Sum of square (Adj SS)	Mean square (Adj MS)	F value	P value (Prob>F)	
Model	9	22.5520	2.5058	6.35	0.004	significant
Linear	3	15.7446	5.2482	13.29	0.001	significant
SL-static load	1	12.6993	12.6993	32.16	0.000	significant
IN-interval	1	2.1906	2.1906	5.55	0.040	significant
SS-scanning speed	1	0.8547	0.8547	2.16	0.172	
Square	3	6.2315	2.0772	5.26	0.020	significant
SL × SL	1	4.4344	4.4344	11.23	0.007	significant
IN × IN	1	0.3279	0.3279	0.83	0.384	
SS × SS	1	0.2839	0.2839	0.72	0.416	
Interaction	3	0.5759	0.1920	0.49	0.699	
SL × IN	1	0.5491	0.5491	1.39	0.266	
IN × SS	1	0.0267	0.0267	0.07	0.800	
SL × SS	1	0.0001	0.0001	0.00	0.989	
Residual error	10	3.9483	0.3948			
Lack- of-fit	5	2.3167	0.4633	1.42	0.355	not significant
Pure error	5	1.6315	0.3263			
Cor total	19	26.5002				

S=0.628352

R-sq=85.10%

R-sq (adj)=71.69%

**Table 12.** ANOVA for surface roughness(Ra)

Source	Degree of freedom (DF)	Sum of square (Adj SS)	Mean square (Adj MS)	F value	P value (Prob>F)	
Model	9	0.330360	0.036707	10.35	0.001	significant
Linear	3	0.126351	0.042117	11.87	0.001	significant
SL-static load	1	0.019090	0.019090	5.38	0.043	significant
IN-interval	1	0.105842	0.105842	29.83	0.000	significant
SS-scanning speed	1	0.001419	0.001419	0.40	0.541	
Square	3	0.197140	0.065713	18.52	0.000	significant
SL × SL	1	0.195142	0.195142	55.00	0.000	significant
IN × IN	1	0.003358	0.003358	0.95	0.354	
SS × SS	1	0.012418	0.012418	3.50	0.091	
Interaction	3	0.006870	0.002290	0.65	0.603	
SL × IN	1	0.000228	0.000228	0.06	0.805	
IN × SS	1	0.004802	0.004802	1.35	0.272	
SL × SS	1	0.001840	0.001840	0.52	0.488	
Residual error	10	0.035480	0.003548			
Lack- of-fit	5	0.028431	0.005686	4.03	0.076	not significant
Pure error	5	0.007049	0.001410			
Cor total	19	0.365840				

S=0.0595652

R-sq=90.30%

R-sq (adj)=81.57%

ANOVA 분석 결과를 바탕으로 요인에 대한 반응 값에 대한 적합한 모형을 탐색하는 과정을 단계적 회귀 분석(stepwise regression) 또는 풀링(pooling)이라 하며[79], p-value가 유의 수준보다 작아 해당 회귀 모형에 유의한 항만 남겨 최종적인 모형을 도출하는 것을 그 목적으로 한다. 본 연구에서는 회귀 모형에 유의하지 않는 항을 교호작용 항부터 선형 모형까지 점진적으로 제거하는 후진 제거법(backward elimination method)으로써, 새로운 회귀 모형을 도출하였다.

Table 13는 Table 11의 과상도 반응 값  $Y_{wa}$ 에 대한 ANOVA 분석 결과를 바탕으로 후진제거법으로 회귀 분석한 결과를 나타낸 것이다. Table 11에서 유의하지 않았던 교호작용 항과 제곱 항  $IN \times IN$ ,  $SS \times SS$ 을 풀링하였으며, 그 항의 개수만큼 오차(residual error)의 자유도(degree of freedom, DF)가 높아진 것을 확인할 수 있다. 그리고 선형 항 중에서 이송 속도 SS은 회귀 모형에 유의하지 않지만 그대로 포함시켰는데, 이는 UNSM를 적용하는 데에 있어서 이송 속도 변수는 반드시 설정해야하기 때문이다. 단계적 회귀 분석으로 수정된 회귀 모형에 대한 적합성 결여 검증 결과는 p-value  $0.515 > 0.05$ 이며, 해당 모형이 반응 값에 대하여 적절하게 도출되었다고 판단할 수 있다. 또한 R-sq 값은 81.03%로 4.07% 감소하였는데, 단계적 회귀 분석 과정에서 유의하지 않은 항이 오차에 포함되어 전체 항의 개수가 줄었기 때문이다. 오히려 R-sq (adj) 값이 4.28% 증가한 것을 알 수 있는데, 이는 단계적 회귀 분석을 통해서 회귀 모형이 개선되었음을 의미한다. 마지막으로 과상도 반응 값에 대한 수정 회귀 모형은 Eq. (10)과 같이 구축된다.

$$Y_{wa} = 2.703 - 0.891 SL + 0.370 IN + 0.231 SS + 0.459 SL*SL \quad (10)$$

Table 14은 Table 12의 표면 거칠기 반응 값  $Y_{Ra}$ 에 대한 ANOVA 분석 결과를 바탕으로 후진제거법으로 회귀 분석한 결과를 나타낸 것이다. Table 12에서 유의하지 않았던 교호작용 항과 제곱 항  $IN \times IN$ ,  $SS \times SS$ 을 풀링하였으며, 그 항의 개수만큼 오차(residual error)의 자유도(degree of freedom, DF)가 높아진 것을 확인할 수 있다. 그리고 과상도에 대한 단계적 회귀 분석 절차와 동일하게 이송속도 SS 항은 회귀 모형에 유지하였다. 그에 따라 수정된 회귀 모형에 대한 적합성 결여 검정 결과, p-value  $0.091 > 0.05$ 로 해당 모형이 표면 거칠기 반응 값에 대하여 적절하게 도출되었다고 판단하였다. 그리고 단계적 회귀 분석 이후의 R-sq 값은 5.60% 감소하였으며, R-sq (adj) 값도 감소한 것을 알 수 있는데 (-0.95%), 본 회귀 모형에 대하여 개선하는 정도가 약한 것으로 판단된다. 이는 단계적 회귀 분석 과정에서 선형 항의 이송 속도 SS를 제거하지 않고 그대로 유지함으로써 발생한 것으로 예상된다. 표면 거칠기 반응 값에 대한 수정 회귀 모형은 Eq. (11)과 같이 나타난다.

$$Y_{Ra} = 0.4755 + 0.345 SL + 0.0813 IN - 0.0094 SS + 0.0821 SL*SL \quad (11)$$

**Table 13.** ANOVA for waviness(Wa) after stepwise regression

Source	Degree of freedom (DF)	Sum of square (Adj SS)	Mean square (Adj MS)	F value	P value (Prob>F)	
Model	4	21.4718	5.3680	16.01	0.000	significant
Linear	3	15.7446	5.2482	15.66	0.000	significant
SL-static load	1	12.6993	12.6993	37.88	0.000	significant
IN-interval	1	2.1906	2.1906	6.53	0.022	significant
SS-scanning speed	1	0.8547	0.8547	2.55	0.131	
Square	1	5.7272	5.7272	17.08	0.001	significant
SL × SL	1	5.7272	5.7272	17.08	0.001	significant
Residual error	15	5.0284	0.3352			
Lack- of-fit	10	3.3969	0.3397	1.04	0.515	not significant
Pure error	5	1.6315	0.3263			
Cor total	19	26.5002				

S=0.578987

R-sq=81.03%

R-sq (adj)=75.97%

**Table 14.** ANOVA for surface roughness(Ra) after stepwise regression

Source	Degree of freedom (DF)	Sum of square (Adj SS)	Mean square (Adj MS)	F value	P value (Prob>F)	
Model	4	0.309856	0.077464	20.76	0.000	significant
Linear	3	0.126351	0.042117	11.28	0.000	significant
SL-static load	1	0.019090	0.019090	5.11	0.039	significant
IN-interval	1	0.105842	0.105842	28.36	0.000	significant
SS-scanning speed	1	0.001419	0.001419	0.38	0.547	
Square	1	0.183506	0.183506	49.17	0.000	significant
SL × SL	1	0.183506	0.183506	49.17	0.000	significant
Residual error	15	0.055984	0.003732			
Lack- of-fit	10	0.048936	0.004894	3.47	0.091	not significant
Pure error	5	0.007049	0.001410			
Cor total	19	0.365840				

S=0.0610924

R-sq=84.70%

R-sq (adj)=80.62%

### 3.3.2 UNSM 공정 최적화

파상도와 표면 거칠기 반응 값에 대한 각각의 회귀 모형 Eq. (10)과 Eq. (11)을 바탕으로, 두 가지 반응 값을 최소로 나타낼 수 있는 최적화된 조건을 탐색할 수 있다. Eq. (10)로써 나타나는 파상도 반응 값의 회귀 모형에 대한 표면도(surface plot)와 등고선도(contour plot)는 Fig. 30와 같다. Fig. 30 (a)는 정적 하중과 인터벌 변화에 따른 파상도의 반응 표면 거동을 나타낸 것이다. 이송 속도는 중심점에서의 수준인 2500 mm/min으로 고정하였다. Fig. 30 (a)에서 정적 하중과 인터벌 수준에 의한 파상도 분포는  $Wa$  2  $\mu\text{m}$  ~ 7  $\mu\text{m}$ 로 나타난다. 그리고 파상도 변화 분포가 정적 하중에 대하여 더 크게 나타나므로 파상도에 대한 영향력이 인터벌의 영향력보다 큰 것으로 파악되며, 이는 Table 13의 ANOVA 분석 결과와 동일하다. Fig 30 (a)에서 파상도는 정적 하중 40 N ~70 N, 인터벌 36  $\mu\text{m}$  이하인 영역에서 가장 낮게 나타나는 것으로 확인된다( $Wa < 2 \mu\text{m}$ ). 이를 통해, UNSM 공정 조건 중 정적 하중이 40 N 이상이면 DED 적층 표면에 대해서 높은 파상도의 원인이 되는 적층 트랙을 효과적으로 개질할 수 있는 것으로 판단된다. 또한, 인터벌 간격이 좁아질수록 DED 적층 표면에 대한 단위 면적 당 충돌 수가 증가하므로 파상도 개선에 큰 효과가 있는 것을 알 수 있다.

Fig. 30 (b)는 정적 하중과 이송 속도 변화에 따른 파상도의 반응 표면 거동을 보여준다. 인터벌은 중심점에서의 수준인 50  $\mu\text{m}$ 로 고정하였다. Fig. 30 (b)에서 정적 하중과 인터벌 수준에 의한 파상도 분포는  $Wa$  2  $\mu\text{m}$  ~ 6  $\mu\text{m}$ 로 나타난다. 파상도 변화 분포는 정적 하중에 대하여 더 크게 나타나며, 파상도에 대한 영향력이 이송 속도의 영향력보다 큰 것으로 파악된다. 이는 Table 13의 ANOVA 분석 결과와 유사하며, Fig 30. (a)와 반응 표면 거동이 비슷하게 나타나는 점은 주목할 만하다. 이는 인터벌과 마찬가지로 Eq. (3)에서 이송 속도가 감소하면 적층 표면과의 단위 면적 당 충돌 수가 증가하여 파상도 개선에 효과를 나타내기 때문이다. 그러나 표면도와 등고선도를 비교하면 그 구배(gradation)와 굴곡(curvature)이 미세하게나마 완만한 것을 확인할 수 있고, 파상도가 가장 낮게 나타나는 영역( $Wa < 2\mu\text{m}$ )은 정적하중 45 N ~ 64 N, 이송 속

도 2210 mm/min 이하이며, Fig 30. (a)에서의 영역보다 작게 분포되어있다. 이는 파상도 변화에 미치는 영향력이 이송 속도보다 인터벌이 더 크기 때문으로 판단되며, Table 13의 ANOVA 분석에서도 확인할 수 있다.

Fig. 30 (c)는 인터벌과 이송 속도 변화에 따른 파상도의 반응 표면 거동을 나타낸 것이며, 정적 하중은 중심점에서의 수준인 40 N으로 고정하였다. 인터벌과 이송 속도에 의한 파상도 변화 분포는  $W_a$  1.6  $\mu\text{m}$  ~ 3.7  $\mu\text{m}$ 로 나타난다. Fig. 30 (c)의 반응표면 거동을 Fig. 30 (a), Fig. 30 (b)와 다르게 선형적으로 나타나는 것을 확인할 수 있는데, 이는 Eq. (10)에서 인터벌과 이송속도 요인에 대한 2차 항이 포함되어 있지 않으므로, 그에 대한 곡률 관계를 고려할 수 없기 때문이다. 따라서 Fig. 30 (c)를 통해 인터벌 간격과 이송 속도가 감소할수록 파상도가 선형적으로 낮아지는 것으로 보이며, Eq. (3)에 의해 면적 당 충돌 수가 증가하는 것이 그 원인으로 판단된다. Fig. 30 (c)을 미루어 봤을 때, 인터벌 16  $\mu\text{m}$  이하, 이송 속도 2100 mm/min 이하에서 파상도가 가장 낮게 나타나는 것으로 확인된다( $W_a < 1.6 \mu\text{m}$ ). 또한, 파상도의 변화 분포가 인터벌에 대하여 큰 것으로 나타나며, 앞서 논의하였던 것처럼 파상도에 대한 영향력이 더 이송 속도가 미치는 영향력보다 더 큰 것으로 판단할 수 있다.

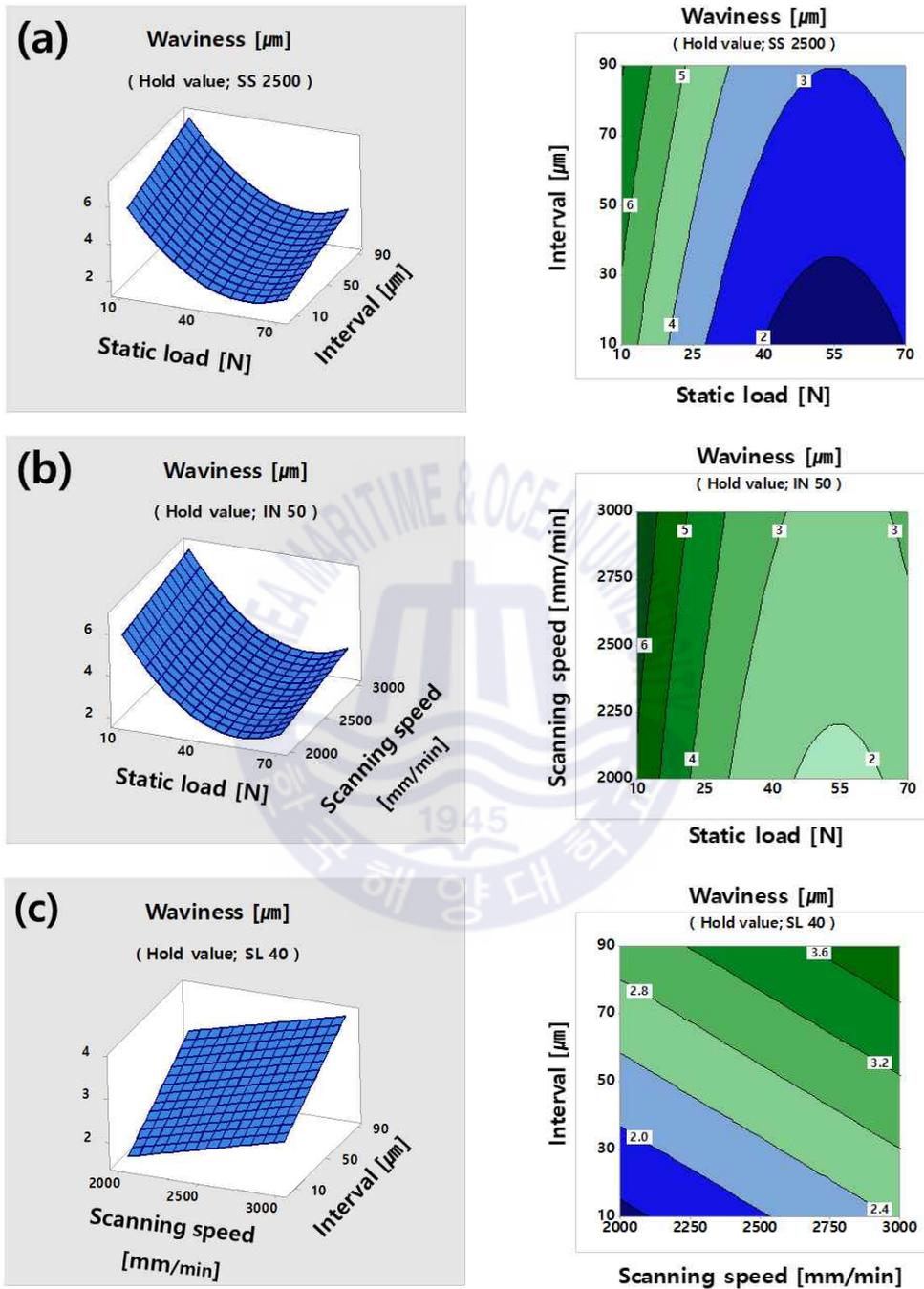


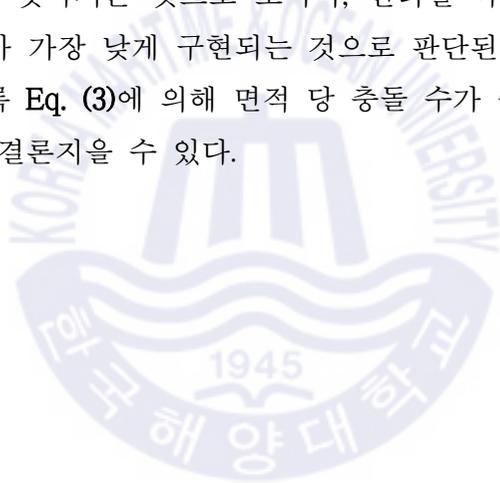
Fig. 30. Surface plot and contour plot of waviness with (a) SL and IN, (b) SL and SS, (c) SS and IN

Eq. (11)로써 나타나는 표면 거칠기 반응 값의 회귀 모형에 대한 표면도 (surface plot)와 등고선도(contour plot)는 Fig. 31과 같다. Fig. 31 (a)는 정적 하중과 인터벌 변화에 따른 표면 거칠기의 반응 표면 거동을 나타낸 것이다. 이송 속도는 중심점에서의 수준인 2500 mm/min으로 고정하였다. Fig. 31 (a)에서 정적 하중과 인터벌 수준에 의한 표면 거칠기 분포는 Ra 0.4  $\mu\text{m}$  ~ 1.0  $\mu\text{m}$ 로 나타난다. Fig. 30 (a)와 비슷하게 표면 거칠기 변화 분포는 정적 하중에 대하여 더 크게 나타나므로 표면 거칠기에 대한 영향력이 인터벌의 영향력보다 큰 것으로 파악되며, 이는 Table 14의 ANOVA 분석 결과와 유사한 것을 알 수 있다. Fig. 31 (a)에서 표면 거칠기는 정적 하중 21 N ~ 52 N, 인터벌 32  $\mu\text{m}$  이하의 영역에서 가장 낮게 나타나는 것으로 확인된다(Ra < 0.4  $\mu\text{m}$ ). 이를 통해 UNSM 공정 조건 중 정적 하중 약 36 N를 기준으로 표면 거칠기 개선 효과가 달라지는 것을 알 수 있는데, 표면 거칠기 변화는 정적 하중에 대하여 선형적인 관계가 아님을 판단할 수 있으며, 그 경향은 Fig. 30의 파상도 변화보다 더 큰 것을 알 수 있다. 이는 Fig. 14의 정적 하중의 수준에 따른 표면 구조에서도 나타나는데, 정적 하중 40 N에서의 표면이 가장 균질하게 개질된 것을 확인할 수 있다. 그리고 인터벌 간격이 좁아질수록 DED 적층 표면에 대한 단위 면적 당 층돌 수가 증가하므로 표면 거칠기 개선에 큰 효과가 있는 것을 알 수 있으며, Fig. 30 (a)의 파상도 변화 경향과 비슷하다.

Fig. 31 (b)는 정적 하중과 이송 속도 변화에 따른 표면 거칠기의 반응 표면 거동을 나타낸 것이다. 인터벌은 중심점에서의 수준인 50  $\mu\text{m}$ 로 고정하였다. Fig. 31 (b)에서 정적 하중과 인터벌 수준에 의한 표면 거칠기 분포는 Ra 0.5  $\mu\text{m}$  ~ 0.8  $\mu\text{m}$ 로 나타난다. 표면 거칠기 변화 분포는 정적 하중에 대하여 더 크게 나타나며, 파상도에 대한 영향력이 이송 속도의 영향력보다 큰 것으로 파악되며, 이는 Table 14의 ANOVA 분석 결과에서도 확인할 수 있다. 특히, 이송 속도에 의한 표면 거칠기 변화는 거의 없는 것을 Fig. 31 (b)를 통해 판단할 수 있는데, Table 14와 같이 이송 속도 요인의 p-value 0.547 > 0.05 이므로, 표면 거칠기 반응 값에 대하여 유의하지 않기 때문이다. 따라서, 표면 거칠기는 이송 속도의 수준과 거의 무관하게 정적하중 36 N 근처에서 가장 낮게 나타난다

( $Ra < 0.5\mu\text{m}$ ).

**Fig. 31 (c)**는 인터벌과 이송 속도 변화에 따른 표면 거칠기의 반응 표면 거동을 나타낸 것이며, 정적 하중은 중심점에서의 수준인 40 N으로 고정하였다. 인터벌과 이송 속도에 의한 표면 거칠기 변화 분포는  $Ra\ 0.3\ \mu\text{m} \sim 0.7\ \mu\text{m}$ 로 나타난다. **Fig. 31 (c)**의 반응표면 거동은 선형적으로 나타나는 것을 확인할 수 있는데, 앞서 파상도 반응 값에 대한 인터벌과 이송 속도의 관계를 논의한 것처럼 **Eq. (11)**에서도 인터벌과 이송 속도에 대한 곡률 관계를 찾을 수 없는 것이 원인이다. 더욱이 **Fig. 31 (c)**에서도 표면 거칠기에 대한 이송 속도의 영향력은 거의 없는 것으로 나타났다. **Fig. 31 (c)**를 통해 인터벌 간격이 감소할수록 표면 거칠기가 선형적으로 낮아지는 것으로 보이며, 인터벌 약  $30\ \mu\text{m}$  보다 낮은 영역에서 표면 거칠기가 가장 낮게 구현되는 것으로 판단된다( $Ra < 0.4\ \mu\text{m}$ ). 인터벌 조건이 감소할수록 **Eq. (3)**에 의해 면적 당 충돌 수가 증가하여 표면 거칠기가 낮아지는 것으로 결론지을 수 있다.



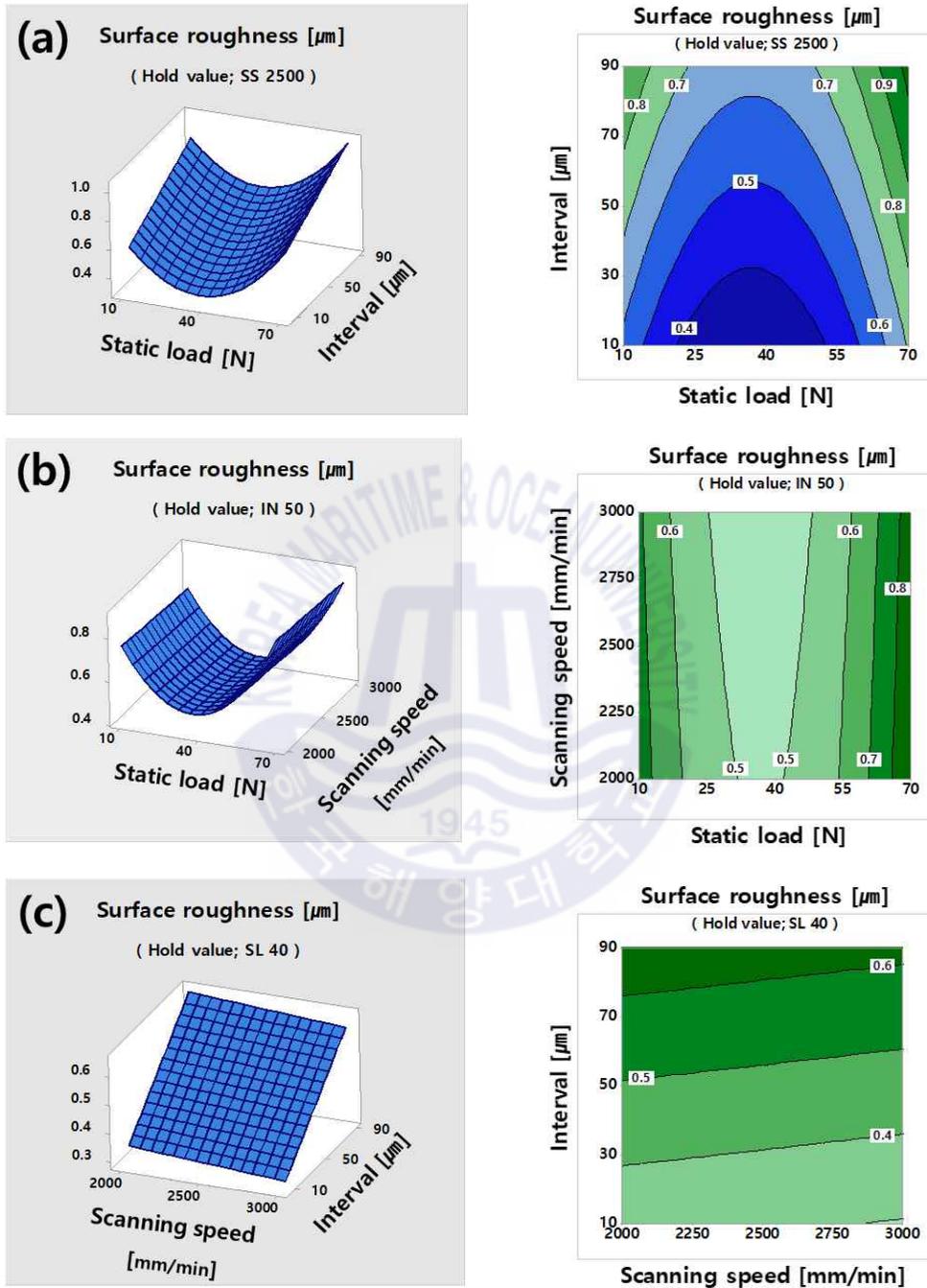


Fig. 31. Surface plot and contour plot of surface roughness with (a) SL and IN, (b) SL and SS, (c) SS and IN

파상도 반응 값과 표면 거칠기 반응 값에 대한 회귀 모형 Eq. (10)과 Eq. (11)를 통해서 표면도와 등고선도 분석을 수행하였으며, 각 요인의 유의도와 수준에 따른 파상도와 표면 거칠기 변화를 파악할 수 있었다. 반응표면분석법은 요인과 반응 값 사이의 회귀 모형을 도출하고, 요인에 따른 반응 값의 변화를 분석하여 최종적으로 목표하는 반응을 달성할 수 있는 요인들의 최적 조건을 찾을 수 있다. 앞서 언급하였듯이, 본 연구의 목적은 반응표면분석법을 이용하여, 열악한 DED 적층 표면을 UNSM 기술로써 가장 효과적으로 개질시킬 수 있는 최적 조건을 정의하는 것이다. 따라서 UNSM 처리한 DED 적층 표면의 파상도와 표면 거칠기가 가장 낮게 나타날 것으로 예측되는 최적 조건을 탐색하였다.

여러 가지 목적에 따른 최적 조건을 탐색하기 위해서 만족도 함수(desirability function)가 고안되는데, 파상도와 표면 거칠기 모두 최소 값을 갖도록 목적함수로 설정하였으며, 그에 따른 만족도 함수는 Eq. (12)과 같고, Fig. 32와 같은 그래프로 표현된다[80].

$$\begin{cases} 1 & y < T \\ \left(\frac{U-y}{U-T}\right)^r & T \leq y \leq U \\ 0 & y > U \end{cases} \quad (12)$$

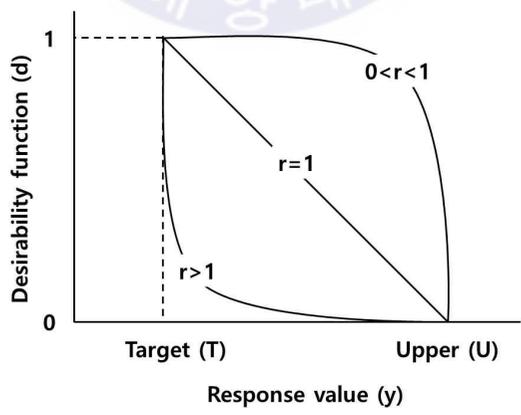


Fig. 32. Desirability function for simultaneous optimization(target is to minimize y)

Eq. (12)에서  $y$ 는 반응 값 (response),  $T$ 는 목표치 (target),  $U$ 는 상한 값 (Upper value),  $r$ 은 가중치(weight)를 의미한다. 반응 값은 만족도 함수에 의해서 0과 1사이의 숫자로 변환되며, 만족도 함수가 1에 가까울수록 이상적인 목적 값이 도출될 것을 의미한다. 본 연구에서는 파상도와 표면 거칠기 반응 값에 대해 가중치  $r=1$ 로 설정하여, Eq. (10)과 Eq. (11)의 회귀 모형에 대한 최적 조건을 탐색하기 위한 반응 최적화를 실시하였다.

Fig. 33 (a)는 파상도와 표면 거칠기에 대한 반응 최적화 그래프를 나타낸 것이다. 정적 하중 47.5738 N, 인터벌 10  $\mu\text{m}$ , 이송 속도 2626.26 mm/min이 파상도와 표면 거칠기를 동시에 최적값에 달할 수 있는 최적화된 조건으로 제시되었다. 본 최적 조건에 대하여 파상도는 1.7470  $\mu\text{m}$ (개별 만족도 99.96%)로 예측되며, 표면 거칠기는 0.3465  $\mu\text{m}$ (개별 만족도 99.83%)로 예측되었다. 그리고 이에 대한 종합 만족도는 99.90%로 1에 근사하다.

그러나 본 연구에서 적용된 UNSM 공정에서 설정할 수 있는 정적하중의 최소 단위는 5 N이다. 즉, 최적 조건으로 도출된 47.5738 N 대신에 45 N 혹은 50 N의 정적 하중을 적용해야만 한다. 이송 속도 조건도 UNSM 장치와 부착되는 CNC 장비에 대한 사용성(usability)을 확보하기 위해 2626.26 mm/min을 근사하여 2600 mm/min로 수정하였다. Fig. 33 (a)에서의 최적 조건을 수정하여 그에 대한 만족도를 검증하였으며, 그 결과를 Fig. 33 (b)와 Fig. 33 (c)에 나타냈다. Fig. 33 (b)는 정적 하중 45 N, 인터벌 10  $\mu\text{m}$ , 이송 속도 2600 mm/min일 때의 최적화 결과이며, 종합 만족도는 99.39%로 나타났다. Fig. 33 (c)는 정적 하중 50 N, 인터벌 10  $\mu\text{m}$ , 이송 속도 2600 mm/min일 때의 최적화 결과이며, 종합 만족도는 97.53%로 나타났다. Fig. 33 (b)의 최적 조건의 종합 만족도가 Fig. 33 (c)보다 높게 산출되는 것을 확인할 수 있다. 또한, 본래의 최적 조건에 대한 종합 만족도보다 0.51% 낮으므로, Fig. 33 (b)의 최적 조건은 건전한 것으로 판단하였다. 따라서 DED 적층 표면의 파상도와 표면 거칠기를 가장 낮게 구현할 수 있는 UNSM 최적 조건을 정적 하중 45 N, 인터벌 10  $\mu\text{m}$ , 이송 속도 2600 mm/min으로 선정하였다. 그리고 최적 조건에 의한 적층 표면의 파상도는 1.8097  $\mu\text{m}$ (개별 만족도 98.78%), 표면 거칠기는 0.3297  $\mu\text{m}$ (개별 만족도 100%)로



반응 최적화를 통해 선정된 최적 조건에 대한 검증 실험을 수행하였으며, 5개의 DEDed 316L 적층 표면에 Table 15에 제시된 UNSM 최적 조건으로 표면 처리를 적용하였다. 최적화된 UNSM 조건을 적용한 DEDed 316L의 시편은 Fig. 34에 제시하였다. 최적 조건으로 UNSM을 적용한 DEDed 316L 적층 표면의 파상도와 표면 거칠기의 값을 구하기 위해 5개의 샘플에서 10번씩 측정된 결과를 평균하였으며, 측정 결과는 Table 14와 같다. 최적 조건으로 UNSM 처리한 시편의 파상도는 1.7690  $\mu\text{m}$ , 표면 거칠기는 0.3216  $\mu\text{m}$ 이다. 이와 Fig. 24에서의 반응 최적화에 의한 파상도 예측 값(1.8097  $\mu\text{m}$ )과 표면 거칠기 예측 값(0.3297  $\mu\text{m}$ )과 비교하였을 때, 각각 2.30%, 2.52% 더 낮게 구현된 것을 확인할 수 있었다. 즉, 반응 최적화를 통해 선정된 UNSM 최적 조건은 효과적으로 DED 적층 표면을 개질하는 것으로 판단된다.

반응 최적화로 선정된 최적 조건이 다른 실험 표본들의 조건보다 적층 표면의 파상도와 표면 거칠기를 개선시킬 수 있는지 비교하였다. 앞서, 반응표면분석법에 의해 설정된 조건에 대한 파상도와 표면 거칠기 측정 결과는 Table 15에 나타내었다. 그리고 최적 조건과 반응표면 분석법에 의해 설정된 표본 중에서 파상도 또는 표면 거칠기가 가장 낮게 관측된 표본들과의 비교 결과를 Table 16와 같이 정리하였다. 표준 순서 #13에서(정적 하중 40 N, 인터벌 50  $\mu\text{m}$ , 이송 속도 2000 mm/min) 가장 낮은 파상도 1.745  $\mu\text{m}$ 가 측정되었으며, 이는 최적 조건보다 1.36% 낮은 값이다. 그리고 표준 순서 #11(정적 하중 40 N, 인터벌 10  $\mu\text{m}$ , 이송 속도 2500 mm/min)에서 가장 낮은 표면 거칠기 0.346  $\mu\text{m}$ 가 측정되었고, 최적 조건보다 7.59 % 높은 값이다. 즉 최적 조건에 의한 표면 거칠기는 다른 표본들보다 가장 낮게 나타났지만, 파상도는 표준 순서 #13보다 높게 나타났으며 #13을 제외한 다른 표본들보다 낮은 것으로 확인되었다. 최적 조건으로써 파상도를 가장 낮게 구현하는 데에 실패한 것으로 보일 수 있지만, 본 연구에서는 파상도와 표면 거칠기를 동시에 낮출 수 있는 다중 반응 최적화(multiple response optimization, MRO)를 수행하였다. 즉, 파상도가 가장 낮게 구현되는 조건과 표면 거칠기가 가장 낮게 구현되는 조건을 절충하여 최적 조건을 유도하였기 때문에, 다른 표본들보다 두 가지 반응 값을 동시에 최저로

낮추기에는 한계가 있는 것으로 판단된다. 주목할 점은 파상도가 가장 낮았던 표준 순서 #13의 표면 거칠기는  $0.570\ \mu\text{m}$ 이며, 오히려 최적 조건보다 77.2% 높게 나타난 것이다. 따라서 반응 최적화로 선정된 최적 조건은 DED 적층 표면에 대해서 파상도와 표면 거칠기를 동시에 최저값까지 낮출 수 있으며, 다른 UNSM 공정 조건보다 적층 표면을 효과적으로 개선할 수 있는 것으로 판단된다.

그리하여 UNSM 최적 조건이 DED 적층 표면을 개선하는, 실제적인 후처리 공정으로 적용할 수 있는지 평가를 실시하였다. 일반적으로 금속 가공 제품의 표면은 기계 연마(mechanical grinding)를 적용하므로, UNSM 최적 조건에 대한 비교군으로 설정하였다. DED 316L의 적층 표면을 기계 연마하여 파상도와 표면 거칠기를 측정된 결과는 **Table 16**에 나타내었다. 기계 연마한 표본의 표면 거칠기는  $1.1535\ \mu\text{m}$ 이며, UNSM 최적 조건보다 259% 높은 값이다. 즉, DED 적층 표면에 대한 기계 연마보다 UNSM 표면 처리를 적용하였을 경우에 우수한 표면 거칠기를 구현할 수 있는 것으로 판단할 수 있다. 하지만 기계 연마한 표본의 파상도는  $0.3090\ \mu\text{m}$ 로 측정되었으며, 이는 UNSM 최적 조건보다 82.5% 낮은 것을 알 수 있다. 즉 DED 적층 표면에 대해서 기계 연마를 적용하는 것이 UNSM 표면 처리를 하는 경우보다 더 낮은 파상도를 구현할 수 있다. 이러한 차이가 발생한 이유는 기계 연마와 UNSM의 가공 종류에 의해 발생한 것으로 유추할 수 있다. 기계 연마는 소재의 일정 부분을 절삭하면서 표면을 가공하는 방법이며, 이와는 반대로 UNSM은 소재의 절삭대신 소성변형으로만 표면을 개질하는 가공 기술이다. 그렇기 때문에 UNSM에 의해서 파상도를 낮추는 데에는 그 한계가 있다고 판단하였다. 대신 UNSM을 적용한 시편의 표면 거칠기가 기계 연마로 가공한 경우보다 훨씬 낮은 점을 미루어 봤을 때, DED 적층 표면에 대하여 기계 연마로 후처리를 수행한 뒤에 UNSM을 적용한다면 우수한 표면 거칠기를 구현할 수 있을 것으로 판단된다.



Fig. 34. UNSM treated DEDED 316L samples with optimized condition

Table 15. Validation test of optimized results

Optimized conditions	Static load (N)	Interval ( $\mu\text{m}$ )	Scanning speed (mm/min)
		40	10
Response value	Observed	Predicted	% Error
Waviness ( $\mu\text{m}$ )	1.7690	1.8097	2.30
Surface roughness ( $\mu\text{m}$ )	0.3216	0.3297	2.52

**Table 16.** Observed waviness and surface roughness values and comparison with the optimized sample

Sample	Observed waviness ( $\mu\text{m}$ )	comparison with the optimized sample	Observed surface roughness ( $\mu\text{m}$ )	comparison with the optimized sample
Optimized	1.7690	-	0.3216	-
Standard number #11 (40 N, 10 $\mu\text{m}$ , 2500 mm/min)	1.855	4.86% higher	0.346	7.59% higher
Standard number #13 (40 N, 50 $\mu\text{m}$ , 2000 mm/min)	1.745	1.36% lower	0.570	77.2% higher
Grinded DEDED 316L	0.3090	82.5% lower	1.1535	259% higher

## 제 4 장 DED 고속도공구강에 대한 UNSM 효과 분석

DED 적층 표면에 대한 UNSM 처리를 통해 파상도와 표면 거칠기를 개선하였으며, 그에 대한 최적조건을 탐색하였다. 이에 DED 소재의 파상도 및 표면 거칠기뿐만 아니라 기계적 성능을 한 층 향상시키고자 하였다. 최근 냉간 금형강 AISI D2에 DED 기술로써 하드페이싱을 적용하여, 강도 및 마모 성능을 획기적으로 높인 연구 사례가 보고된 바 있다 Baek 등은 냉간 전단 금형에 주로 사용되는 열처리한 D2보다 강도가 좋은 고속도공구강 AISI M4를 일반 D2 모재에 하드페이싱을 적용하여, 전단 공정에서 발생하던 국부적인 손상을 방지하여 DED를 통한 표면 강화 성능을 입증하였다[81, 82]. 여기에 UNSM 기술을 적용하여 더 우수한 기계적 성질을 얻고자 하였다. 특히, DED 공정 특성 상 소재에 인장잔류응력이 내재되어 있는데, UNSM 처리를 통해서 압축잔류응력을 부여함으로써, 소재 표면의 인장잔류응력 완화와 동시에 내마모성도 향상하고자 하였다.

### 4.1 실험 재료 및 실험 조건

AISI D2는 우수한 내마모성과 인성을 가지고 있으며, 절삭성도 좋기 때문에 냉간 프레스 금형(cold-press dies)에 많이 사용되는 합금 공구강재이다. 그런데 탄소 및 크롬 함량이 높기 때문에 실제로 금형 및 공구강으로 사용하려면 퀴칭(quenching) 및 템퍼링(tempering) 등의 열처리를 통해 경화시켜야 사용해야 한다[83].

AISI D2에 DED를 적용할 고속도공구강 AISI M4는 Mo, V, W 이 함유된 합금이다. 경도와 함께 인성도 우수하여 냉간 단조 금형이나 고속프레스 금형 및 부품 등으로 사용되고 있으며, 충격과 고온에 강한 특성을 나타내기 때문에 절삭용 공구에 주로 사용되고 있다[84]. DED 공정에 사용한 AISI M4는 Carpenter 社の 직경 50  $\mu\text{m}$  ~ 150  $\mu\text{m}$ 인 구형 분말이며, Fig. 35에서 확인할 수 있다. 실험에 사용된 AISI D2와 AISI M4의 화학적 성분은 Table 17과 같다.

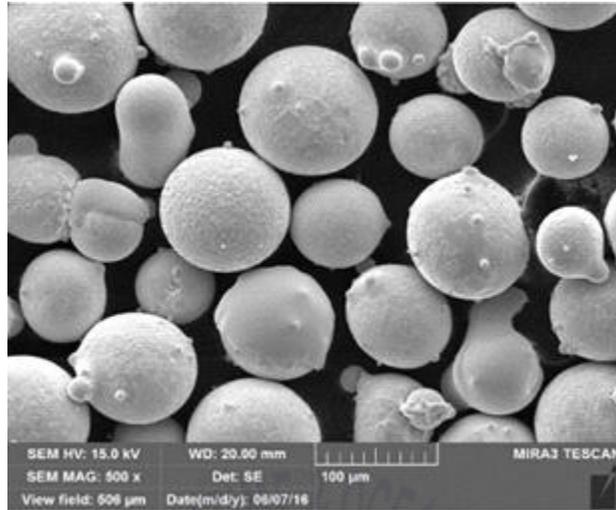


Fig. 35. SEM image of AISI M4 powder.

Table 17. Chemical compositions of AISI D2 and AISI M4(unit: wt%) (Fe=BAL.)

Metal	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	V	W
AISI D2	1.46	0.26	0.44	0.26	0.001	0.20	11.56	0.83	0.14	0.22	-
AISI M4	1.33	0.33	0.26	0.03	0.03	0.3	4.25	4.88	0.25	4.12	5.88

본 연구에서는 UNSM을 통한 DED 소재에 대한 기계적 성능 향상을 분석하는데 앞서, 불규칙적인 DED 적층 표면 형상에 의해 UNSM 효과가 저하되는 것을 배제하고자 표면에 기계 연마 후처리를 적용하였다. 두께 10 mm, 길이 100 mm × 폭 50 mm 크기의 열처리하지 않은 AISI D2 위에 AISI M4를 DED 공정으로 적층한 뒤, DED M4의 높이가 1 mm가 되도록 기계 연마하였다. 그리고 Table 18의 UNSM 공정 변수에 따라 총 8개의 UNSM 처리된 DED 적층 시편을 제작하였다. Fig. 36 (a)은 그 과정을 나타낸 그림이며, Fig. 36 (b)는 실제 DED 적층 표면을 기계 연마한 뒤에 UNSM을 적용한 시편의 모습이다. 각 시편의 기계적인 특성을 파악하기 위해 길이 10 mm × 폭 10 mm × 높이 11 mm로 직육면체 형상 시편을 와이어커팅(wire cutting)하여 추출하였다.

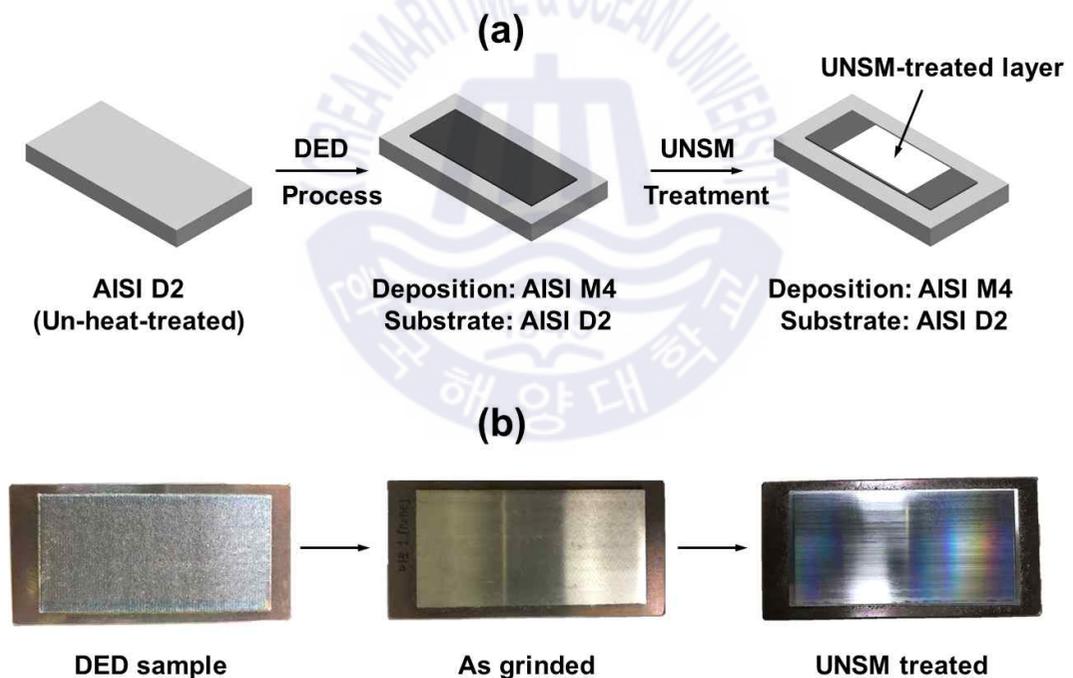


Fig. 36. Experimental process of DED process and UNSM treatment

Table 19은 DEDED M4에 대한 구체적인 UNSM 공정 조건을 정리한 것이다. #1은 UNSM 처리를 하지 않은 대조군 (control)이다. 지름 2.38 mm의 텅스텐 카바이드 볼 팁, 주파수 30 kHz, 인터벌 간격을 50  $\mu$ m, 초음파 진폭을 30  $\mu$ m로 설정했다. 정적하중 30 N, 이송속도 2500 mm/min을 기준으로 정적 하중과 이송속도를 달리하였을 때, DEDED M4의 특성 변화를 연구하였다. 특히, 경도 및 내마모성 효과에 대한 분석은 기존 금형에 주로 사용되는 열처리한 D2 소재와 DED로 하드페이싱한 소재, 그리고 UNSM 표면 처리한 하드페이싱 소재를 대상으로 하였는데, 이는 DED 하드페이싱에 의한 기계적 특성 변화 및 UNSM에 의한 기계적 특성 변화를 비교 분석을 위한 것이다.

Table 18. DED processing parameters of AISI M4

Powder	Laser beam power (W)	Slicing layer height (mm)	Overlap width (mm)	Powder flow rate (g/min)	Laser traverse speed (mm/min)	Powder gas (l/min)	Coaxial gas (l/min)
AISI M4	800	0.25	0.5	4.5	850	2.5	8.0

Table 19. UNSM treatment parameters on AISI M4

	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8
Static load (N)	none	10		30			50	
Scanning speed (mm/min)	none	2500	3000	2000	2500	3000	2000	2500

## 4.2 실험 방법

### 4.2.1 표면 거칠기 분석

UNSM 처리 전후의 표면 거칠기의 변화를 관찰하기 위해 주사전자현미경과 3차원 표면조도 측정기를 사용했다. 표면 거칠기 값은 Ra로 제시했다. 모든 UNSM 공정 조건을 적용한 시편마다 임의로 표면 5곳을 측정하고, 평균하여 그 대푯값으로 선정했다.

### 4.2.2 미세조직 관찰

UNSM 처리 전후 DEDED M4의 깊이별 미세조직 변화를 관찰하기 위해 XRD(X-Ray Diffractometer)와 광학 현미경, FE-SEM, 그리고 EBSD(Electron backscatter diffraction)을 사용하였다. RIGAKU 社の D/MAX 2500VL/PC 장비로 결정구조와 상(phase)을 분석했으며, 사용한 X-ray 타겟(target)은 Cu K $\alpha$  ( $\lambda = 1.54 \text{ \AA}$ )이고, 설정된 가속전압과 가속전류는 각각 30 kV, 250 mA였다. 0.1  $\mu\text{m}$  이상의 균일한 표면을 얻기 위하여 실리콘카바이드(SiC) 재질의 연마지로 #2000 그릿까지 폴리싱(polishing)을 시행했다. 그 뒤, 1  $\mu\text{m}$  다이아몬드 서스펜션으로 다시 폴리싱하여 거울처럼 매끈한 표면을 만들었다. DEDED M4의 미세조직 관찰을 위한 에칭액은 5% 나이탈(질산 5% + 에탄올) 부식액으로 이용하여 30초 이상 부식시켜 전처리를 하였다. 전처리된 직육면체 시편의 단면의 깊이별 미세조직 분석을 위해 광학 현미경(Nikon, ECLIPSE LV150)과 주사전자현미경을 이용하여 가속전압 10.0 kV에서 관찰하였다.

### 4.2.3 표면 잔류응력 측정

UNSM 처리 전후, 잔류응력 측정기(Micro-360s)를 사용하여 시험편의 표면에서의 잔류응력을 측정하였다. 잔류응력 측정에 사용된 X-Ray 타겟(target)은 Cr K $\alpha$  ( $\lambda = 2.23 \text{ \AA}$ )이며, 가속전압 30 kV, 가속전류 1.50 mA로 설정하였다. 각 포인트에서의 잔류응력은  $\cos\alpha$  법으로 산출하였다[85]. UNSM 공정 특성 상 선형으로 진행방향이 있기 때문에, 같은 지점이라도 측정 각도에 따라 잔류응력의 값이 다르다. 때문에 측정하는 한 지점 당  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ 의 측정각도로 잔류응력을 측정하였다. UNSM 처리 방향과 같은 방향을  $\phi 0^\circ$ , 수직인 방향을  $\phi 90^\circ$ 로 표기하였다.

### 4.2.4 경도시험

열처리한 AISI D2(H-D2)와 DED 적층한 분말 금속 M4(DEDed M4), 그리고 UNSM 처리한 DED M4(UNSM-DEDed M4)에 대해서 표면으로부터 깊이에 따른 경도변화를 관찰하였다. UNSM 처리 후 표면으로부터 깊이에 따른 경도변화를 관찰하기 위해서 Akashi 社의 HM-122를 사용하여 하중 0.1 kgf, 압입 시간(indentation time)을 10초로 설정했다. 그리고 표면으로부터 깊이 20  $\mu\text{m}$ 인 지점부터 2400  $\mu\text{m}$ 까지, 20  $\mu\text{m}$  간격으로 측정하였다. H-D2도 DEDed M4의 경도 측정 조건과 같은 조건으로, 측정간격을 100  $\mu\text{m}$ 로 하여 표면으로부터 1800  $\mu\text{m}$ 까지 비커스 경도를 측정하였다. 총 3번씩 반복 측정하여 평균을 계산하였다.

#### 4.2.5 스크래치 시험 (Scratch test)

UNSM처리 후 표면 나노결정구조 개질과 표면경도 향상 등 기계적 특성을 비교하기 위해, H-D2과 DEDED M4, 그리고 UNSM-DEDED M4에 대해서 스크래치 시험을 시행하였다. 표면의 스크래치 저항성을 확인하기 위해 다이아몬드 팁(diamond tip)이 부착되어있는 J&L Tech 社의 스크래치 시험기 JLST022를 사용했다. 적용한 스크래치 횟수 한 번 당 적용 하중은 10 N, 스크래치 길이 2.0 mm, 하중속도 60 N/min 으로 설정하였다. 각 조건의 시편에 5번의 스크래치 시험을 수행했으며, 스크래치 시험 후 주사전사현미경으로 스크래치 압흔의 폭을 측정하였다.

#### 4.2.6 내마모성 시험

H-D2과 DEDED M4, 그리고 UNSM-DEDED M4의 마모특성을 비교하기 위해 알앤비(R&B) 社의 고온 표면 내구성 평가 장치(high temperature abrasion tester)를 사용해 Fig. 37와 같이 볼 온 디스크(ball-on-disk type) 마모시험을 시행하였다. 마모시험에 사용된 시편의 모양은 Fig. 38과 같고, 각 시편에 대해 지름 12.7 mm(0.5 inch)의 텅스텐 카바이드(WC) 볼을 사용했으며, 마모시험 조건은 Table 20와 같다. 마모 시험 전후 각 시편의 내마모성을 비교하기 위해서 에너지 분산형 분광기(energy dispersive spectrometer, EDS)와 주사전사현미경을 사용하여 마모 흔(wear track)을 관찰했으며, OHAUS 社의 전자 저울 장비(EX-224G)를 사용하여 시험 전 후의 질량 변화를 측정하였다. 측정한 질량 변화로써 부피 감량(wear volume), 마모율(wear rate)을 산출 및 비교하였다. 마모율은 ASTM G99-95a[86]을 참고하여 산출하였다.

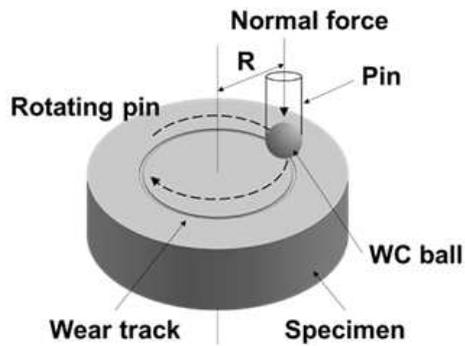


Fig. 37. Ball-on-disk equipment for wear test.

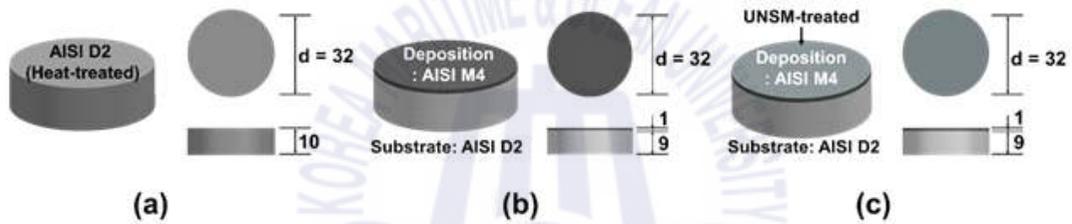


Fig. 38. Schematic diagrams of wear test specimens; (a) H-D2, (b) DEDed M4, and (c) UNSM-DEDED M4

Table 20. Wear test conditions

Normal force (N)	100
Rotation speed (rpm)	100
Testing time (sec)	3600
Wear track diameter (mm)	20
Ambient temperature (°C)	25
Relative humidity (% R.H.)	55 ± 3
Lubricating condition	Dry

## 4.3 실험 결과

### 4.3.1 표면 거칠기 변화 분석

UNSM 처리하지 않은 DEDED M4 표면에 UNSM을 적용한 뒤, 그 표면 특성의 변화를 관찰하였다. Fig. 39는 기계 연마한 DEDED M4에 UNSM 처리 전과 후의 표면을 주사전자현미경과 표면 거칠기 측정기로 관찰한 모습이다. Fig. 39 (a)에서의 DEDED M4를 기계 연마만 했을 때의 거칠었던 표면이 UNSM 처리 후에는 Fig. 39 (b)처럼 표면이 매끄럽게 정돈이 되었다. 그리고 Fig. 39 (b)와 같이 UNSM 처리한 DEDED M4의 표면에서 UNSM 처리 경로를 따라 생성된 마이크로 트랙과 마이크로 덩플이 관찰되었다. 또한, UNSM 공정조건으로 설정한 50  $\mu\text{m}$  인터벌의 간격만큼 떨어져 있음을 확인할 수 있다. 이는 표면 거칠기 측정 결과에서도 확인할 수 있는데, UNSM 처리하지 않은 DEDED M4의 표면 구조는 Fig. 39 (a1)와 Fig. 39 (a2)처럼 나타났다. 그리고 UNSM-DEDED M4의 표면에는 Fig. 39 (b1)와 Fig. 39 (b2)와 같이, 대체적으로 정돈된 표면과 더불어 조직된 표면(textured surface)도 확인할 수 있었다. Fig. 39를 바탕으로 UNSM 처리 후 표면에 생성된 표면 구조와 더불어 거친 표면이 정돈됨으로써 윤활과 마모 성능이 향상될 것으로 예상할 수 있다[34]. 고르고 매끄러운 표면과 다수의 마이크로 덩플 및 마이크로 트랙 등이 조직된 표면은 마모에 의한 잔해(debris)를 줄이고, 그로 인한 추가적인 마모를 방지할 수 있다[87]. 또한, 표면에 가해지는 과도한 응력은 마모의 주요 원인이 된다. 조직된 표면은 접촉 영역에서 과도한 응력 집중을 방지할 수 있으며, 반복적인 마모에 대해서 응력 분포를 균일하게 분산시켜 표면의 마모가 줄일 수 있다[88].

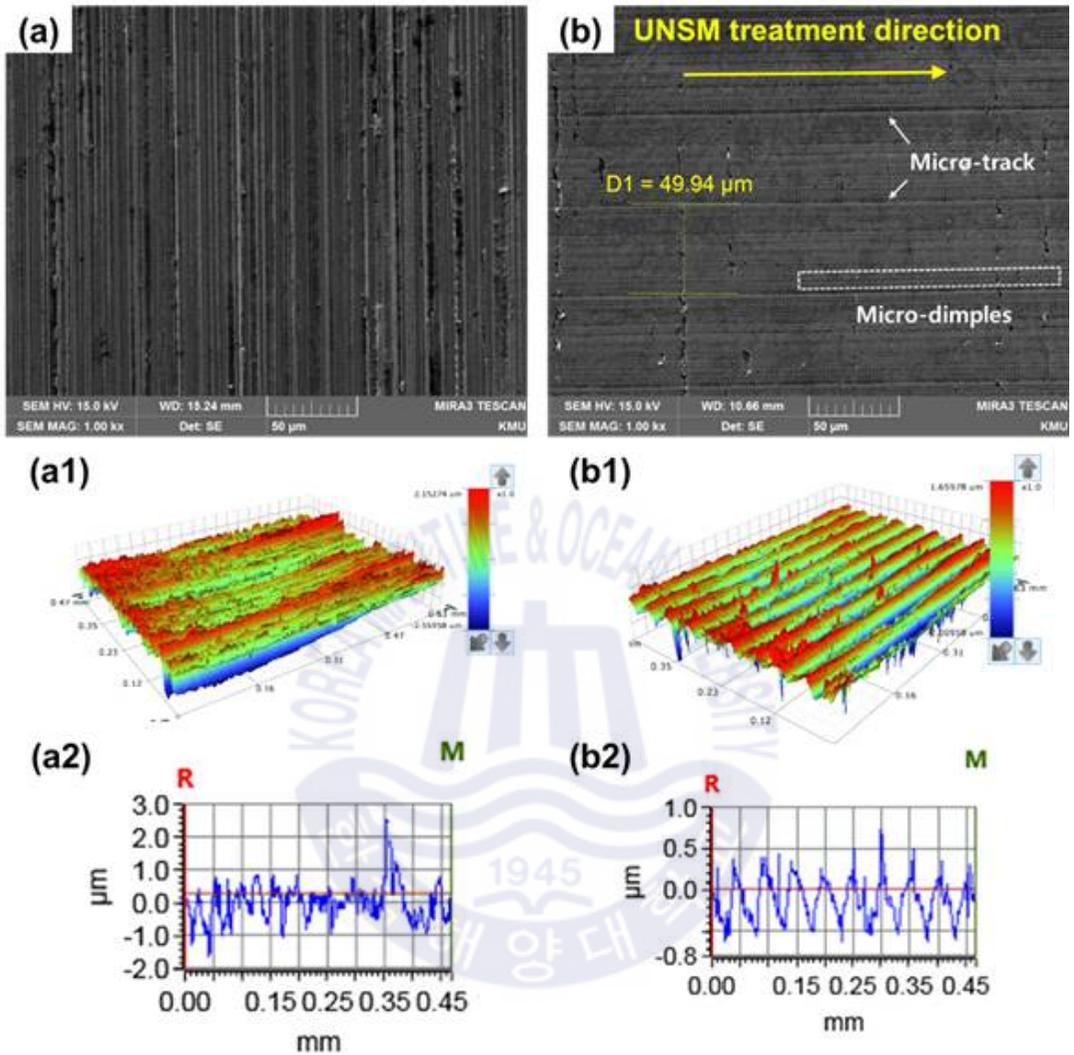


Fig. 39. Surface shape and 3D surface shape (a1-b1) and 2D profiles (a2-b2) observed by FE-SEM for (a) ground surface of DEDED M4 and (b) surface of UNSM-DEDED M4

각 공정조건에 따라서 UNSM 처리된 표면 구조는 Fig. 40과 같으며, 표면 거칠기 변화를 Fig. 41에 정리하였다. 정적 하중이 30 N으로 일정할 때, 이송 속도가 2500 mm/min인 UNSM 조건에서 가장 낮은 표면 거칠기 값을 나타냈으며, 이송 속도가 가장 빠른 조건에서 가장 높은 표면 거칠기를 나타냈다. 이는 이송 속도가 증가함에 따라 Eq. (3)에 의해 단위 면적 당 충돌 수가 감소하기 때문으로 보인다.

이송 속도가 2500 mm/min로 일정할 때의 표면 거칠기 측정 결과, 정적 하중 30 N의 UNSM 조건에서 표면 거칠기의 값이 가장 낮게 나왔다. 그리고 정적 하중이 가장 작을 경우, 정적 하중 10 N에서 가장 높은 표면 거칠기를 나타내었다. DEDed M4의 표면에 30 N 이상의 정적 하중으로 UNSM 처리를 하게 되면 Ra 100 nm 미만의 표면 거칠기 구현이 가능함을 짐작할 수 있다. 마지막으로 UNSM 공정조건 중 변형 에너지 밀도(Eq. (4))변화에 따라서 DED M4의 표면 거칠기 변화를 비교하였다. 비교한 조건 중에서 중간 단계의 변형 에너지 밀도 조건에서 가장 낮은 표면 거칠기 값을 나타냈으며, 이전 조건들에서 비교했던 결과와 같은 것을 알 수 있었다. 그리고 변형 에너지 밀도가 가장 낮은 공정 조건에서 가장 높은 표면 거칠기를 나타냈다.

Fig. 41에서 연삭 후, UNSM 처리하지 않은 시편의 표면 거칠기는 496.6 nm였다. 그리고 각 UNSM 처리한 시편들의 표면 거칠기를 분석한 결과, UNSM 처리한 DEDed M4의 표면 거칠기는 최대 130.2 nm를 구현하는 것을 알 수 있었다. 특히, 공정조건 중 정적 하중이 10 N일 경우, 모두 Ra 100 nm 이상의 표면 거칠기 값을 나타내었다. 정적 하중이 30 N, 이송 속도가 2500 mm/min인 조건 (exp. #5)의 표면 거칠기가 가장 낮았다. 그 뒤를 이어 정적 하중 50 N, 이송 속도가 2000 mm/min인 조건 (exp. #7)이 낮은 표면 거칠기 값을 나타냄을 알 수 있었다. Fig. 40과 Fig. 41을 통해서 대체적으로 정적 하중이 클수록, 이송 속도가 낮은 UNSM 조건일수록 재료의 표면에 가해지는 변형에너지 밀도가 높아져 표면 거칠기 또한 낮아지는 경향을 확인할 수 있다. 덧붙여서, 변형에너지 밀도가 높다고 해서 항상 표면 거칠기의 값이 낮아지지 않는다는 것을 알 수 있다. Fig. 42에서처럼 UNSM 처리 후, 재료의 표면에는 미소 균열

(micro-crack)이 남아있다. 이는 UNSM 처리 전에 연삭된 표면에 남아있던 단차나 연마 홈(grinding grooves)이 미처 개질되지 못하고 짓뭉개지거나(crushed), 또는 UNSM 처리 공정 과정에서 표면이 변형에너지를 받아 미세하게 융기하면서 표면 거칠기의 차이를 발생시키게 된 것으로 판단된다. 따라서 변형에너지 밀도가 높더라도 재료 표면에 구현 가능한 표면 거칠기의 임계 값(critical limit)이 있다고 예상할 수 있으며, 이는 이전에 진행된 레이저 피닝에 대한 연구에서도 찾아볼 수 있는 현상이다[89].

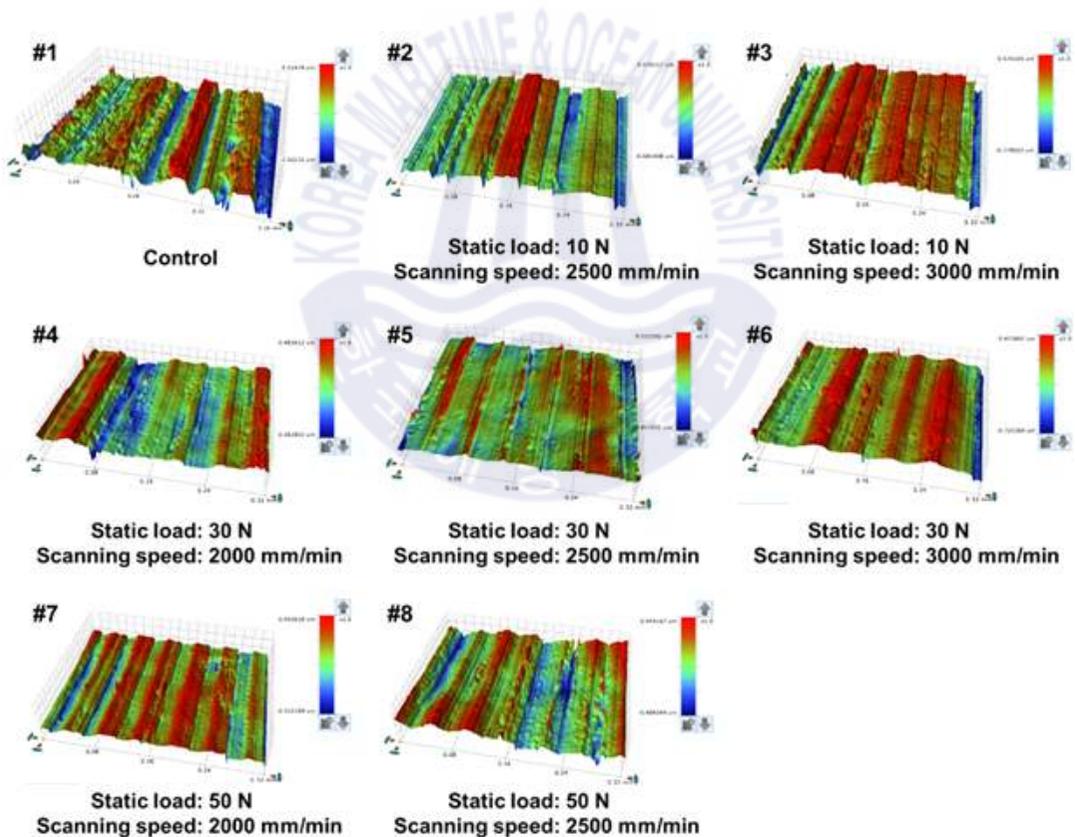


Fig. 40. DEDed M4 surface shapes obtained under various UNSM conditions

각 UNSM 공정 조건 중에서 정적 하중 30 N, 이송 속도 2500 mm/min인 조건 일 때(exp. #5), DEDED M4의 표면에 대해 가장 낮은 표면 거칠기를 구현할 수 있음을 알 수 있었다. Fig. 41을 통해서 UNSM 처리를 하면 표면 거칠기는 88.31% 감소함을 알 수 있다. Gheisari와 Polycarpou에 의하면, 표면부의 경도와 표면 거칠기로 어떤 재료의 내마모성을 고려할 때, 경도는 낮지만 표면이 매끈한 재료가, 경도는 높지만 표면이 거친 재료보다 내마모성이 우수할 수 있다고 결론지은 바 있다[90]. 그래서 앞서 분석한 경도와 표면 거칠기 결과를 바탕으로 정적 하중 30 N, 이송 속도 2500 mm/min인 UNSM 공정 조건이 DEDED M4의 내마모성을 가장 좋게 향상시킬 수 있다고 판단했으며, 이 조건으로 UNSM-DEDED M4의 내마모성에 대해서 검증하였다.

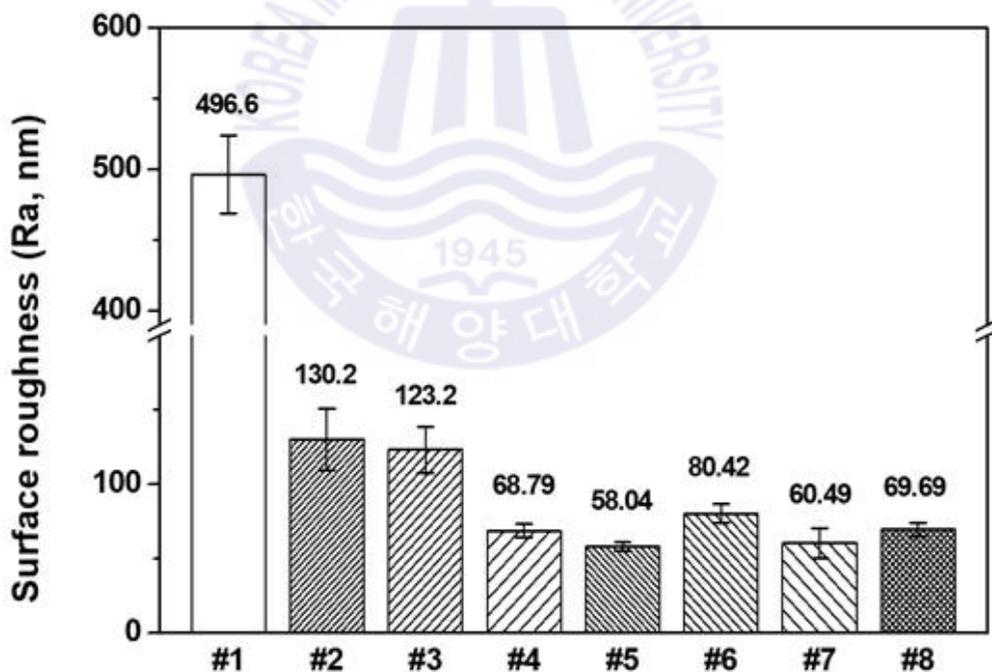
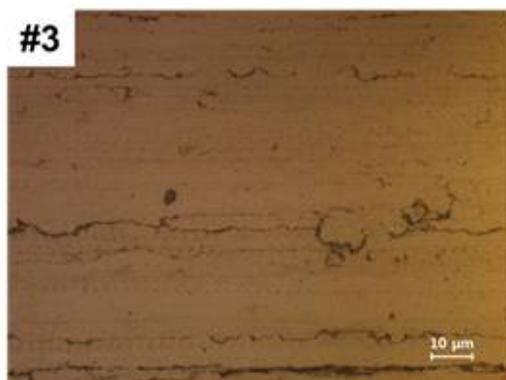


Fig. 41. Differences in surface roughness for DEDED M4 samples under different UNSM conditions



**#2**  
Static load: 10 N  
Scanning speed: 2500 mm/min



**#3**  
Static load: 10 N  
Scanning speed: 3000 mm/min



**#5**  
Static load: 30 N  
Scanning speed: 2500 mm/min



**#7**  
Static load: 50 N  
Scanning speed: 2000 mm/min

Fig. 42. Examples of micro-cracks in on UNSM-DEDED M4 surface

### 4.3.2 미세조직 변화 분석

DEDed M4와 UNSM-DED M4 표면부에 형성된 미세조직의 결정구조와 상(phase)에 대한 XRD 회절도(diffractogram)를 Fig. 43에 나타내었다. XRD 분석 결과, 주로 DEDed M4를 이루는 상은 오스테나이트(austenite,  $\gamma$ )와 마르텐사이트(martensite,  $\alpha'$ )임을 확인할 수 있다. 이외에도 여러 XRD 피크(peak)가 관찰되었는데, Wang 등의 분석 결과, 텅스텐(W)과 몰리브데넘(Mo) 함량이 높은 탄화물( $M_6C$ )임을 밝혀냈다[10]. MC는 V의 함량이 높으며,  $M_6C$ 는 W 및 Mo 함량이 높은 탄화물이다. MC와  $M_6C$  탄화물은 주로 고속도 공구강에서 발견되며 [91], 레이저 용융 공정 동안 재가열(re-heating) 효과로 인해 내부 온도에 의해 침전된다[92]. DEDed M4에 이송속도 2500 mm/min, 정적 하중 30 N인 조건(exp. #5)으로 UNSM 처리한 결과, 오스테나이트 상이 확연하게 줄어들었다. 이러한 현상은 UNSM에 의해서 오스테나이트에  $S^2PD$ 가 유발되고, 결국 마르텐사이트로 변태되었기 때문으로 판단된다. Minoru Umemoto는 금속 표면의 조직이  $S^2PD$ 에 의해 미세화되는 원인 중 마르텐사이트 변태(martensitic transformation)에 대한 메커니즘(mechanism)을 보고한 바 있다[61]. 그리고 순철(pure iron)[93], AISI 304[94], AISI 316L[95] 등 금속과 합금에서 발생한 표면 조직의 마르텐사이트 변태 현상을 논의한 사례도 있다.

UNSM 처리 후, DEDed M4의 XRD 피크의 폭이 넓어졌으며, 회절의 세기(intensity)가 약해졌음을 Fig. 43을 통해 확인할 수 있다. 이는 UNSM에 의해 표면 조직이 미세화되었을 뿐만 아니라,  $S^2PD$ 를 겪으면서 미소 변형률(micro strain)이 발생하여 격자 구조(lattice structure)가 뒤틀렸기 때문이다[96]. Zhang 등은 소성 변형에 의한 미소 변형률이 원래의 결정립을 나노 크기의 결정립으로 생성하는 원인이라고 보고 했다[97]. XRD 회절 분석을 통해 UNSM 처리가 DEDed M4의 결정구조와 결정립 크기를 미세화시키는 데에 유용한 기술임을 확인하였다.

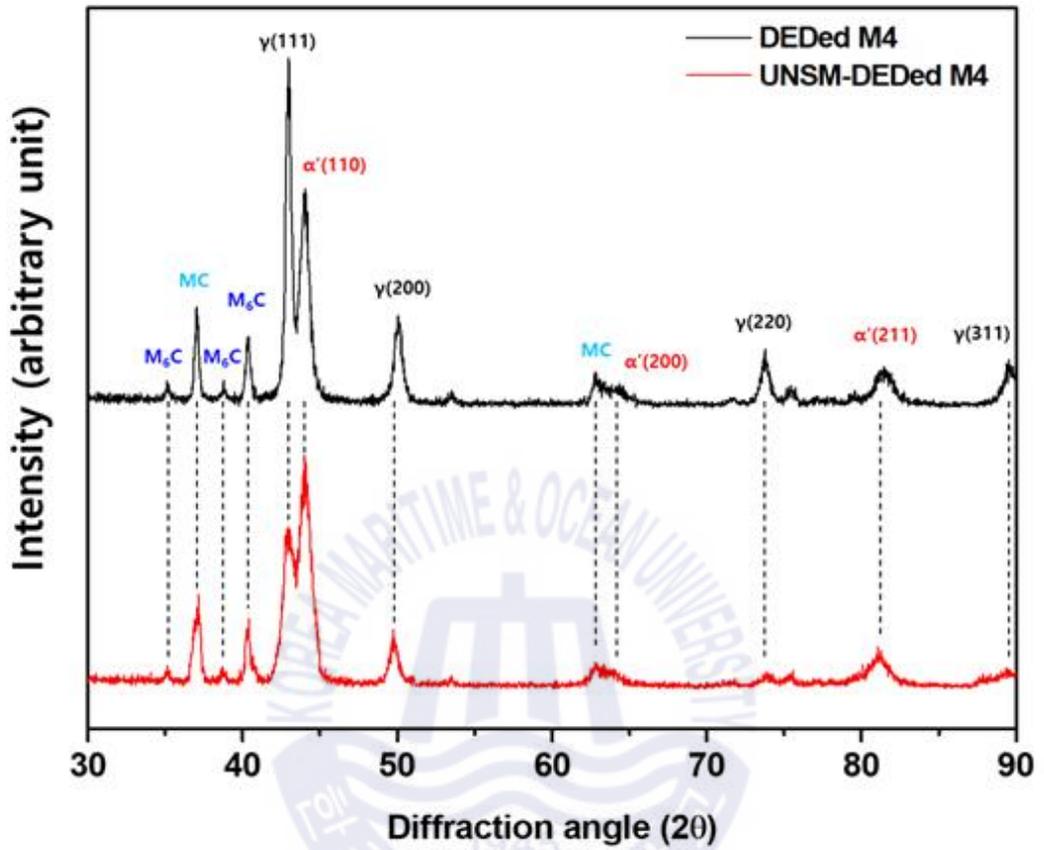


Fig. 43. X-ray diffractograms of DEDED M4 before and after UNSM treatment

**Fig. 44 (a)**은 DEDED M4 표면 미세조직을 주사전사현미경으로 8000배 확대하여 관찰한 사진이다. 본 연구에서 사용된 시편은 DED 적층 후 표면을 기계 연마했기 때문에, 실제로는 DEDED M4의 적층부에 해당한다. 그렇기 때문에, 이전의 DEDED M4에 대한 조직 분석 결과에서 나타난 DEDED M4의 적층부 조직과 동일한 모습을 보이고 있다[98, 99]. DEDED M4에서 주로 관찰되는 조직은 주상형 텐드라이트 구조의 잔류 오스테나이트와 마르텐사이트 조직이었다. 그리고 텐드라이트 곳곳에서 석출된  $M_6C$ 탄화물이 관찰되었다. DED 공정에서 레이저에 의해 용융된 금속분말은 화 한 뒤에 급속냉각으로 인하여 마르텐사이트로 변태하는데, 적층부에서는 냉각속도가 급격하지 않기 때문에 냉각이 지연되면서 조직이 성장되어 텐드라이트 형태로 나타난다. 그리고 텐드라이트 조직은 DED 공정 중에 용융과 응고 과정을 반복하기 때문에 매우 복잡한 방향으로 생성되어 있다. DEDED M4 적층부 텐드라이트 형태의 오스테나이트는 예열된 모재의 온도와 금속분말의 응고속도에 영향을 받음이 보고된 바 있다[82].

**Fig. 44 (b)**는 UNSM 처리한 DEDED M4 표면 미세조직을 관찰한 모습이다. UNSM 처리 후, 표면으로부터 깊이 방향으로 약  $6.3 \mu\text{m}$ 까지 소성 변형된 모습이다. 점선으로 표현된 영역에서 UNSM 처리방향으로 표면의 결정립이 치우친 경향을 관찰할 수 있다.

UNSM의 영향으로 소성 변형되어 생성된 나노 구조 층(nanostructured layer) 깊이는 면적 당 충돌 수와 단순하게 선형 비례하는 관계가 아니다[32]. 이는 전위가 증가하는 속도와 소멸하는 속도가 균형을 이룰 때, 변형률이 증가하더라도 더 이상 나노 결정립의 크기를 줄이지 못하기 때문이다[100, 101].

이렇게 소성변형의 영향을 받아 조직이 변형되는 정도는 총 하중, 면적 당 충돌수, 초음파 진폭, 볼 팁의 지름 등 UNSM의 공정변수와 소재의 특성에 따라 달라진다. 이와 관련해서, 이전에 진행된 연구에서는 UNSM을 적용한 소재에 대해 경도의 향상, 결정립 미세화, 압축잔류응력 부여 등 소재의 기계적 및 표면 마이크로 덤플이 형성되어 표면 특성이 개선되었음이 보고되었다[102, 103, 104].

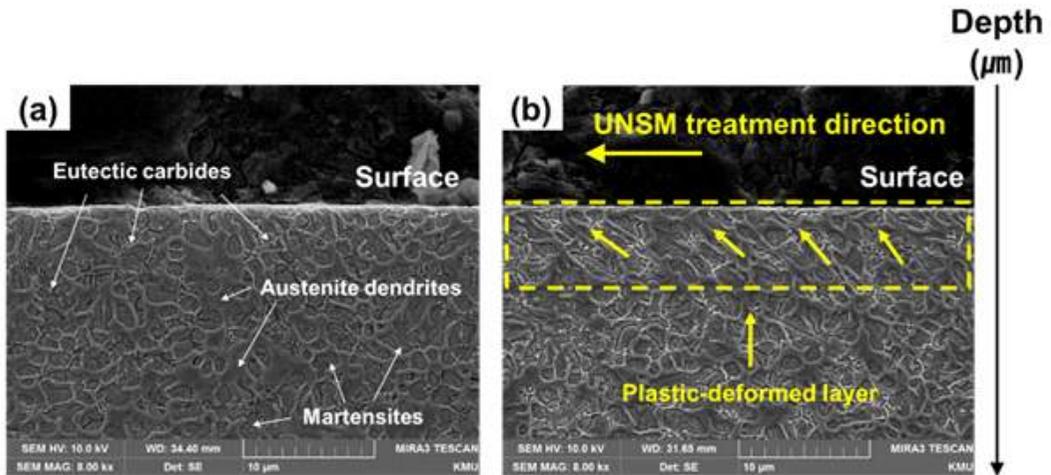


Fig. 44. Microstructures of DEDED M4 surface (a) before and (b) after UNSM treatment

Fig. 45는 EBSD를 사용하여 UNSM 처리 전후의 DEDED M4의 상분율을 나타낸 것이다. DEDED M4 내부의 탄화물은 오스테나이트와 결정학적으로 구조가 유사하기 때문에[105, 106], 함께 FCC 상으로 나타난다. DEDED M4 표면의 미세조직은 FCC보다 마르텐사이트(BCC)가 더 많은 분포를 나타내는 것을 볼 수 있는데, 이는 적층 공정 동안에 재가열 효과로 인해 잔류 오스테나이트가 마르텐사이트로의 변태를 촉진하기 때문이다. BCC와 FCC의 상대 분율을 나타낸 Fig. 45 (c)의 그래프를 통해서, UNSM 처리 전의 DEDED M4의 마르텐사이트 분율이 71.04%인 것을 확인할 수 있다. Fig. 45 (b)는 UNSM 처리한 DEDED M4의 단면 조직에 대한 EBSD 관찰 결과이다. 그리고 Fig. 45 (c)에서 UNSM 처리 후의 마르텐사이트의 분율이 77.14%로, UNSM 처리 전보다 6.10% 증가한 것이 확인된다. Fig. 43의 XRD 관찰 결과로부터 확인된 것처럼 DEDED M4의 표면에 UNSM 처리 이후에 마르텐사이트의 분율이 상승한 것을 알 수 있다. 이러한 거동은 UNSM을 통해 DEDED M4의 표면 조직에 S<sup>2</sup>PD가 유기되어 마르텐사이트 변태가 원인인 것으로 판단된다.

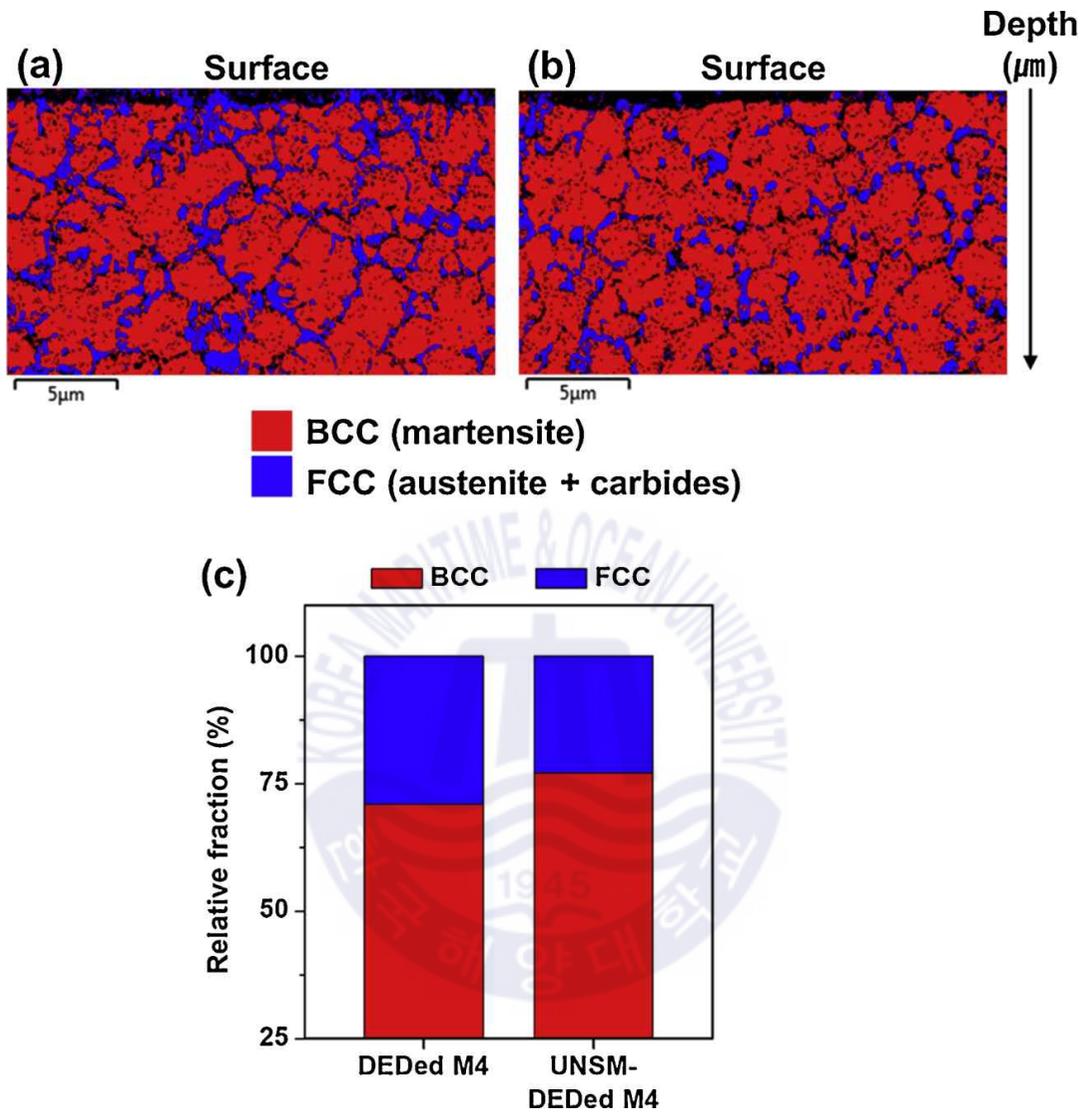


Fig. 45. Cross-sectional EBSD observations of DEDed M4 specimen (a) before and (b) after UNSM treatment. (c) The graph showing the change in relative phase fraction

### 4.3.3 표면 잔류응력 변화 분석

압축잔류응력은 표면층을 경화시키고, 반복하중에 의한 인장응력과 상쇄되기 때문에 재료의 피로수명을 향상시킨다. 본 연구에서는, DEDed M4의 잔류응력을 해소하기 위해서 후템퍼링(post-tempering)을 적용하였으며, 이와 UNSM 처리한 DEDed M4와 비교하여 잔류응력이 얼마나 변화하는지 분석하였다. 후 템퍼링 열처리는 823 K에서 270분을 시행하였다. 일반적으로 표면에 가해지는 에너지가 많을수록 잔류응력의 변화가 크기 때문에, 변형 에너지 밀도가 가장 큰 조건(exp. #7)으로 UNSM 처리하여 표면 잔류응력을 측정하였다. Fig. 46은 아무런 처리하지 않은 DEDed M4와 템퍼링을 적용한 DEDed M4, 그리고 UNSM 처리한 DEDed M4의 표면 잔류응력 값을 보여준다. 각 시편 표면의 측정각도  $\phi 0^\circ$ ,  $\phi 90^\circ$ 에서의 잔류응력 변화를 상대적으로 나타내었다. Fig. 46을 통해서 DEDed M4 표면의 인장잔류응력은 템퍼링 또는 UNSM 처리에 의해 압축잔류응력으로 전환된 것을 확인할 수 있다. 측정각도  $\phi 0^\circ$ 에서의 DEDed M4와 템퍼링을 적용한 DEDed M4, UNSM 처리한 DEDed M4의 잔류응력 값은 각각 362 MPa, -149 MPa, -1290 MPa 였다. 그리고 측정각도  $\phi 90^\circ$ 에서의 잔류응력 값은 각각 414 MPa, -158 MPa, -2011 MPa 였다.

Fig. 46에서 DEDed M4의 표면에서 DED 공정 중에 급속한 온도 변화로 인하여 발생한 인장잔류응력이 확인되었다[11]. 게다가 템퍼링 또는 UNSM 처리를 통해 인장잔류응력에서 압축잔류응력으로 변환되며, UNSM 처리가 템퍼링보다 더 큰 압축잔류응력을 부여하는 것으로 확인할 수 있었다. Sanz와 Navas는 레이저 적층 제조한 인코넬 718(Inconel 718)에 대하여 후열처리(post-heat treatment)를 적용했을 때, 표면의 인장잔류응력이 해소된다고 보고하였으나, shot peening 처리한 경우와 비교했을 때보다 압축잔류응력을 부여하는 효과가 작다고 하였다[107].

UNSM 처리 후에 표면에 부여된 압축잔류응력의 크기는 측정 각도  $\phi 0^\circ$  보다 측정 각도  $\phi 90^\circ$ 에서 더 크게 나타났는데, 이는 UNSM에서만 볼 수 있는 현상이 아닌 압연 등의 공정에서도 볼 수 있는 현상임을 알 수 있다[42, 108, 109, 110].

Fig. 47은 DEDed M4에 UNSM 처리 전후, 시편 표면의 잔류응력 측정각도에 따른 XRD 피크의 반치폭(full width at half maximum, FWHM)을 나타낸 것이다. 반치폭은 결정립의 크기와 미소 변형률에 의한 가공경화에 의해 영향을 받는다. 결정립의 크기는 Eq. (13)의 Scherrer 식에서 반치폭과  $2\theta$  값을 이용하여 계산할 수 있다.

$$Grainsize = 0.9 \times \frac{\lambda}{B \times \cos\theta} \quad (13)$$

이 때,  $\lambda$ 는 사용한 X-선 파장의 길이, B는 반치폭, 그리고  $\theta$ 는 회절각도를 나타낸다. Eq. (13)에 의해 반치폭이 클수록 결정립의 크기는 감소하며, 이는 소성 가공 공정에서 가공 전후 재료의 가공경화된 정도를 판단할 수 있는 척도로 쓰일 수 있다[111]. 즉, 반치폭의 폭이 넓을수록 결정립의 크기가 작아 가공경화된 정도가 크다고 볼 수 있다.

Fig. 47 (a)는 UNSM 처리하지 않은 DEDed M4의 잔류응력 측정각도에 따른 반치폭을 나타낸 것이다. 측정각도  $\phi 0^\circ$ 와  $\phi 90^\circ$ 의 표면 반치폭은 각각  $3.98^\circ$ ,  $3.91^\circ$ 로 비슷한 반치폭을 나타내고 있다. Fig. 47 (b)는 UNSM 처리한 DEDed M4 표면의 잔류응력 측정각도에 따른 반치폭을 나타낸 것이다. 측정각도  $\phi 0^\circ$ 와  $\phi 90^\circ$ 에서 각각  $5.32^\circ$ ,  $5.21^\circ$ 의 반치폭이 측정되었다. Fig. 47의 결과를 통해 UNSM 처리 후의 반치폭 변화는 33.5% 증가함을 알 수 있다. UNSM-DEDED M4의 XRD 회절 폭의 증가는 앞서 Fig. 43의 XRD 분석 결과에서도 나타난 현상이다. 그리고 Eq. (13)에 의해서 UNSM 처리 후, 결정립의 크기 변화는 25.8% 감소하였음을 유추할 수 있다. 즉, UNSM 처리를 통해 DEDed M4 표면의 결정립이 미세화와 더불어 그로 인해 가공경화되었다고 판단할 수 있다.

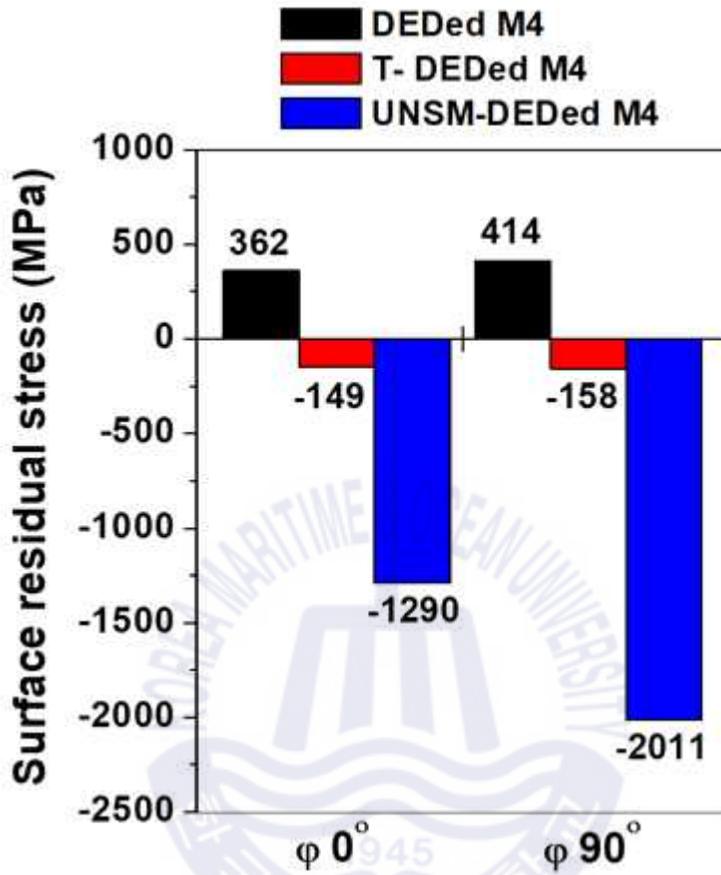


Fig. 46. Comparison of changes in surface residual stress; DEDed M4, tempered DEDed M4, and UNSM treated DEDed M4

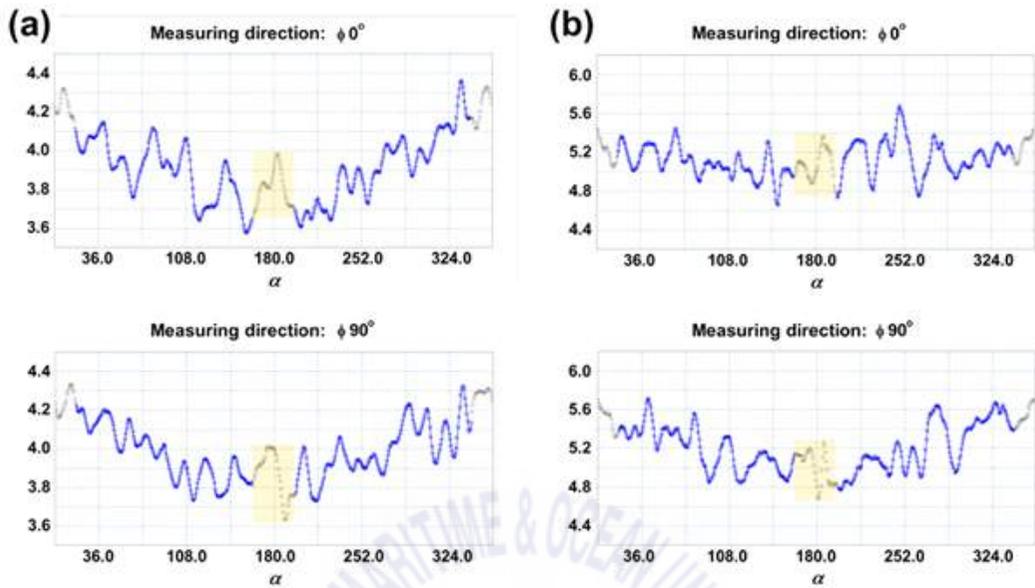


Fig. 47. Surface FWHMs for (a) control group measured at  $\phi 0^\circ$ ,  $\phi 90^\circ$  and for (b) UNSM-treated specimen at  $\phi 0^\circ$ ,  $\phi 90^\circ$

#### 4.3.4 경도 변화 분석

Fig. 48은 표면으로부터 깊이에 따른 열처리한 D2(H-D2)와 DEDED M4, 그리고 UNSM-DEDed M4의 경도변화를 나타낸 그래프이다. 표면으로부터 1.8 mm까지 100  $\mu\text{m}$  간격으로 경도를 측정하였다. DEDED M4의 경도 곡선은 이전에 열처리에 따른 DEDED M4의 경도 변화에 대한 연구 결과[98]와 비슷한 경향을 보였다. 모재 D2의 경도는 약 252.6 HV로 나타났으며, H-D2의 경도는 625.2 HV으로 열처리를 통하여 D2의 경도를 148% 정도 향상된 것을 확인하였다. 그리고 열처리하지 않은 D2에 DED 공정으로 하드페이싱한 M4의 경도는 약 755.9 HV으로, 하드페이싱으로써 표면 경도가 212% 강화된 것을 알 수 있다. 이는 H-D2의 경도보다 약 20.9% 높다. DEDED M4에 이송속도 2000 mm/min, 50N의 정적하중 조건으로 UNSM 처리를 하면 경도는 열처리하지 않은 D2보다 287% 향상되며, 이는 H-D2보다 56.6% 높다.

UNSM 공정조건을 달리 하였을 때, 표면으로부터 깊이에 따른 DED M4의 경도변화를 Fig. 49 (a)-(c)과 같이 나타내었다. 8개의 공정조건을 이송속도(그림 49 (a)), 정적 하중(Fig. 49 (b)), 그리고 변형 에너지 밀도(Fig. 49 (c))에 따라 분류하였다. Fig. 49에서와 같이, 전체적으로 UNSM 처리한 시편들은 UNSM 처리를 하지 않은 시편에 비해 표면으로부터 깊이 약 480  $\mu\text{m}$ 까지 경도가 향상되었다. 이는 UNSM 처리에 의해 표면 부분이 소성 변형되어 결정립이 미세화되었으며 가공경화되어 경도가 증가했다고 볼 수 있다[108]. Hall-Petch 식에 의해 미세화된 결정립은 재료의 강도 및 경도를 높인다[112]. 그리고 깊이 480  $\mu\text{m}$ 보다 깊어질수록 UNSM 효과가 사라져 모든 공정조건의 경도는 약 780 HV로 비슷하게 나타난다.

Fig. 49 (a)은 UNSM 이송속도 조건별 표면으로부터 깊이에 따른 DEDED M4의 경도 변화를 나타낸 그래프이며, 이 때 정적 하중은 30 N으로 동일하다. Fig. 49 (a)에 의해서 DEDED M4에 대해서 UNSM 처리할 때, 이송속도의 변화는 경도변화에 커다란 영향을 끼치지 않음을 볼 수 있다.

Fig. 49 (b)은 UNSM 정적 하중 조건별 표면으로부터 깊이에 따른 DEDED M4의 경도변화를 나타낸 그래프이며, 이 때 이송속도는 2500 mm/min으로 동일하다. Fig. 49 (b)의 경도변화를 보면 정적 하중이 커질수록 경도가 증가하지만, 30 N과 50 N의 경도 차이는 미미하다. 또한, Fig. 49 (a)와 Fig. 49 (b)를 비교하면, DEDED M4에 대한 UNSM 처리 시 이송속도보다 하중의 크기가 표면부분의 경도변화에 좀 더 많은 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.

Eq. (4)에 의해서 변형 에너지 밀도는 정적 하중에 비례하고, 이송 속도에 반비례함을 알 수 있다. 본 연구에서 설정한 조건 중 가장 낮은 변형 에너지 밀도는  $1513 \text{ J/mm}^3$  이며(exp. #3), 가장 높은 변형 에너지 밀도는  $11345 \text{ J/mm}^3$  였다(exp. #7). 변형 에너지 밀도가  $5445 \text{ J/mm}^3$  인 공정 조건(exp. #5)을 기준으로, Fig. 48 (c)는 UNSM 변형 에너지 밀도 조건에 대해 표면으로부터 깊이에 따른 DEDED M4의 경도변화를 나타낸 그래프이다. 변형 에너지 밀도에 비례하여 경도가 높아지는 경향이 발견되었다. 변형 에너지 밀도가 높을수록 표면에 가해지는 변형 에너지의 양이 많아 결정립이 미세화되기 쉬우며, 그만큼 경도의 변화폭도 클 것이라 예상할 수 있다.

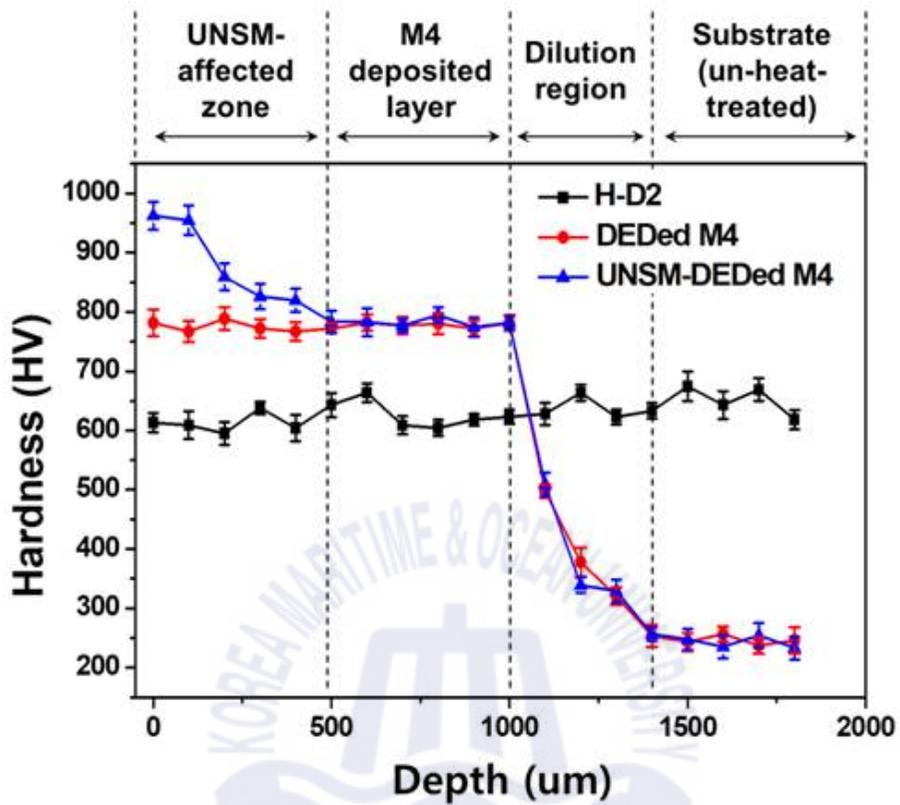


Fig. 48. Micro-hardness variation with depth for H-D2, DEDED M4, and UNSM-DEDed M4

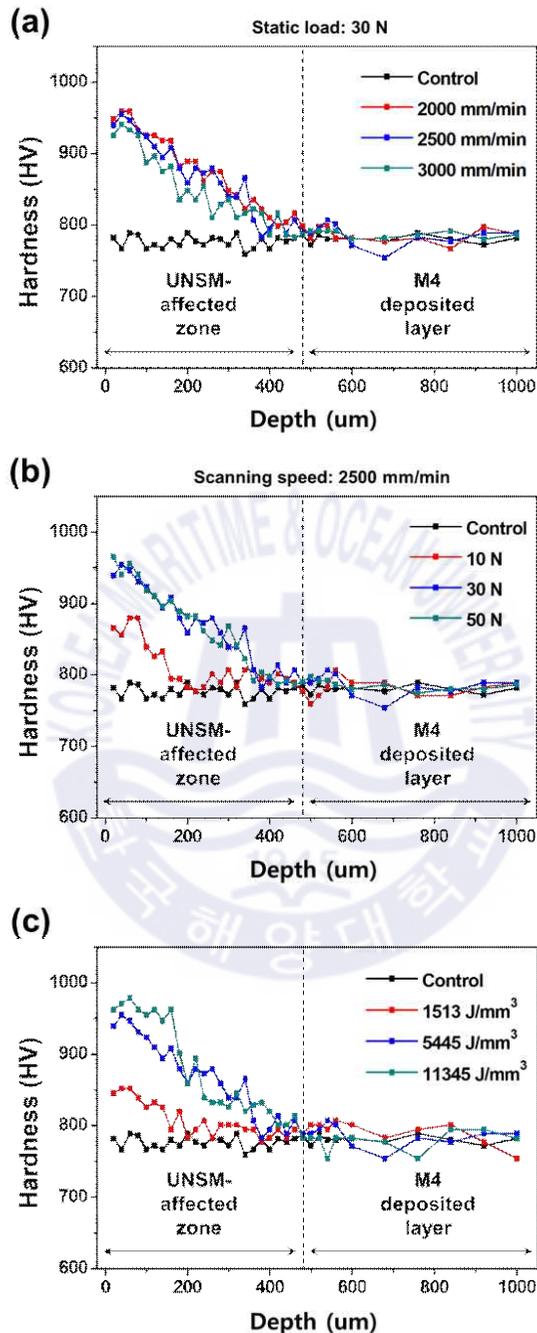


Fig. 49. Measured micro-hardness variation with depth for control and UNSM parameters; (a) static load: 30 N, (b) scanning speed: 2500 mm/min, (c) variable strain energy density

#### 4.3.5 스크래치 저항성 분석

전단 성형에 사용되는 금형은 성형 공정 중에 가해지는 높은 하중과 소재의 전단 저항에 의해서 스크래치(scratch)와 칩핑(chipping)등의 마모가 발생하기 쉽다. 금형 마모는 금형의 내구도를 비롯하여 성형된 소재의 품질까지 저하된다. 그렇기 때문에, 내마모성은 냉간 금형의 성능을 좌우하는 매우 중요한 요소이다[113]. 특히, 스크래치 발생에 의한 손상은 곧 금형의 성능과 직결되기 때문에 금형 강에 사용되는 소재의 스크래치에 대한 저항성도 고려해야 한다 [114].

Fig. 50은 H-D2, DEDED M4, 그리고 UNSM-DEDED M4 시편에 대한 스크래치 시험 후의 압흔을 나타낸 모습이다. Figs. 50 (a)와 (a')는 H-D2, Figs. 50 (b)와 (b')는 DEDED M4, 그리고 Figs. 50 (c)와 (c')는 이전 실험에서 마모성능이 가장 좋다고 판단되는 정적 하중 30 N, 이송 속도 2500 mm/min인 조건(exp. #5)으로 UNSM 처리한 DEDED M4이다. Fig. 50 (a)-(c)는 차례대로 스크래치 시험한 각 시편들에 새겨진 압흔을 3차원 형상으로 나타낸 것이다. Fig. 50 (a)와 (b)에서의 시편은 기계 연마로 인해 거친 표면이 남아있는 데에 반하여, Fig. 50 (c)의 UNSM 처리된 시편은 기계 연마한 표면에 UNSM 처리를 했기 때문에 표면이 정돈되어 있음을 알 수 있다. Fig. 50 (a')-(c')는 H-D2, DEDED M4, 그리고 UNSM-DEDED M4에 대한 스크래치 시험 후의 압흔 폭을 측정된 결과를 나타낸 사진이다. 측정된 압흔 폭은 각각 91.41  $\mu\text{m}$ , 68.56  $\mu\text{m}$ , 49.99  $\mu\text{m}$  이다. 3차원 형상을 비교했을 때처럼 Fig. 50 (a')와 Fig. 50 (b')을 비교하면, DEDED M4의 경도가 H-D2보다 높아 압흔의 폭이 작다는 것을 알 수 있다. 그리고 Fig. 50 (b')와 Fig. 50 (c')를 비교했을 때, DEDED M4 시편보다 UNSM-DEDED M4 시편의 압흔 폭이 작아진 것을 확인했다. 그리고 이러한 경향은 Fig. 50 (a)-(c)에서도 나타난다.

Fig. 51은 스크래치 시험 후의 압흔을 2차원 단면으로 나타낸 모습이다. H-D2의 압흔 깊이(2.76  $\mu\text{m}$ )보다 DEDED M4의 압흔 깊이(1.68  $\mu\text{m}$ )가 39.1% 작다. 그리고 DEDED M4에 UNSM 처리할 경우, 압흔 깊이(1.01  $\mu\text{m}$ )는 39.9% 감소한다. Jardret 등은 스크래치 압흔과 재료의 표면 경도와의 관계를 다뤘는데, 경도가 높은 재료에서 발생한 압흔은 경도가 낮은 재료의 형상보다 작은 경향이 있음을 밝혔다[115]. 이를 토대로 DED공정을 통해 D2에 M4 금속 분말을 하드페이싱할 경우, 표면 경도가 상승해 스크래치 저항성에 대해 이로운 결과를 얻을 수 있다고 판단할 수 있다. 그리고 UNSM 처리 후에는 DEDED M4의 표면조직이 미세화되어 경도가 증가하였기 때문에 압흔의 크기가 작아졌다고 볼 수 있다. 각 시편의 압흔 양 옆에 솟아오른 pile-up 현상을 Fig. 51을 통해서 확인할 수 있는데, 이는 스크래치 시험하는 과정에서 재료의 탄-소성 변형된 정도의 척도로 판단된다[115, 116]. Pöhl 등은 가공경화된 소재의 pile-up 거동에 대해서 논의했으며, 가공경화되기 쉬운 소재일수록 낮은 pile-up 현상을 나타낸다고 했다[117]. 즉, 가공경화된 표면은 위로 솟는 소성 변형 거동을 억제하기 때문에 pile-up 생성을 억제한다는 것을 유추할 수 있다. Fig. 51의 UNSM-DEDED M4의 pile-up이 DEDED M4보다 작은 것을 볼 수 있는데, UNSM 처리를 통해 DEDED M4의 표면에 S<sup>2</sup>PD가 유발되었기 때문이다. DEDED M4와 UNSM-DEDED M4의 스크래치 거동에 대한 분석을 통해서 UNSM 처리는 DEDED M4의 스크래치 저항성을 향상시키는 데 이로운 기술임을 결론지을 수 있다.

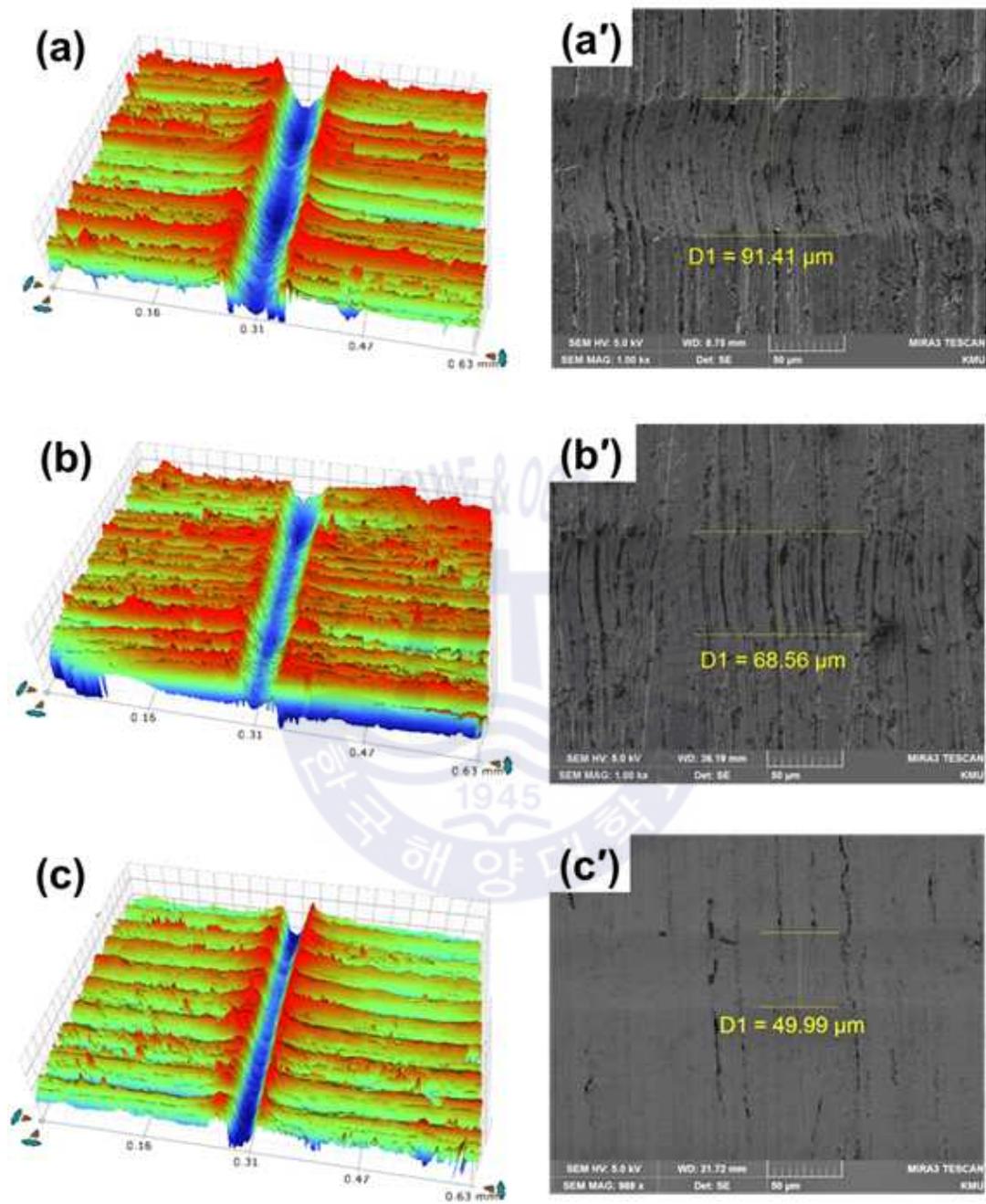


Fig. 50. (a-c) 3D groove shapes after scratch test and (a' -c' ) groove width measurement results; (a-a' ) H-D2, (b-b' ) DEDed M4, (c-c' ) UNSM-DEDED M4

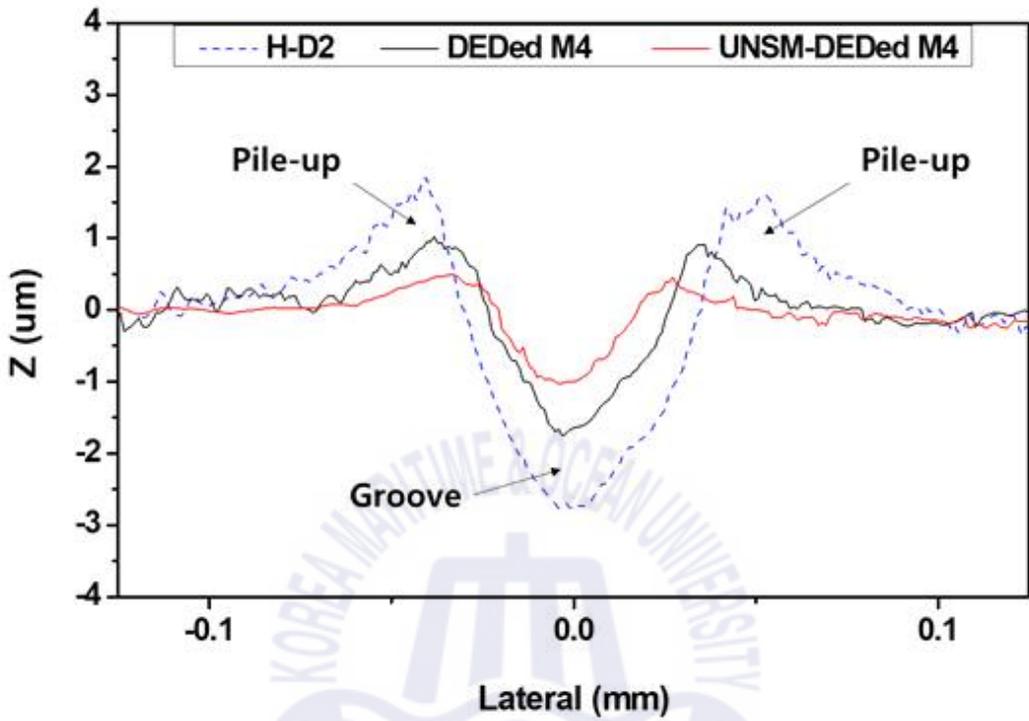


Fig. 51. Cross-section profile of specimens after scratch test

#### 4.3.6 내마모성 분석

H-D2과 DEDED M4, 그리고 주어진 공정조건 중 내마모성 향상에 가장 많은 영향을 줄 것이라 판단하는 UNSM 조건(exp. #5)으로 처리한 DEDED M4 시편에 붙은 디스크 마모시험을 통해 마모 특성을 비교하였다. Fig. 52는 붙은 디스크 마모시험 후의 각 시편에 남은 마모 흔(wear scar)에 대한 사진과 주사전자현미경으로 그 마모 흔을 확대하여 압흔 폭을 측정된 결과를 나타낸 것이다. 주어진 시편 중에서 H-D2의 경도가 가장 낮기 때문에 Fig. 52 (a')에서처럼 마모시험 후 압흔 폭이 가장 크게 남았다. 그리고 열처리 하지 않은 D2에 DED 공정으로 M4를 적층하였을 때, 압흔 폭은 약 79.8% 감소하여 내마모성이 크게 향상됨을 알 수 있었다. 이러한 결과는 H-D2보다 DEDED M4의 더 높은 경도에 기인했다고 판단할 수 있다. Fig. 52 (b')과 Fig. 52 (c')을 비교했을 때 압흔 폭은 약 34.6% 감소함을 알 수 있다. DEDED M4에 UNSM 처리를 하게 되면 표면 층 금속에 S<sup>2</sup>PD를 유발하여 결정립이 미세화되고, 결국 Hall-Petch 이론에 의해 경도가 증가한다. 이러한 결과를 뒷받침하여 Lai 등에 의하면, 변형에 의한 소재 내부의 격자 구조의 변형과 더불어 결정립 미세화로 인해서, 변형된 표면층은 높은 경도 및 압축잔류응력이 증대되어 내마모성이 증가한다[118]. 게다가 UNSM 처리를 통해서 DEDED M4 표면 부분에 압축잔류응력이 부여되기 때문에 결과적으로 내마모성이 향상함을 알 수 있다[44, 34, 119].

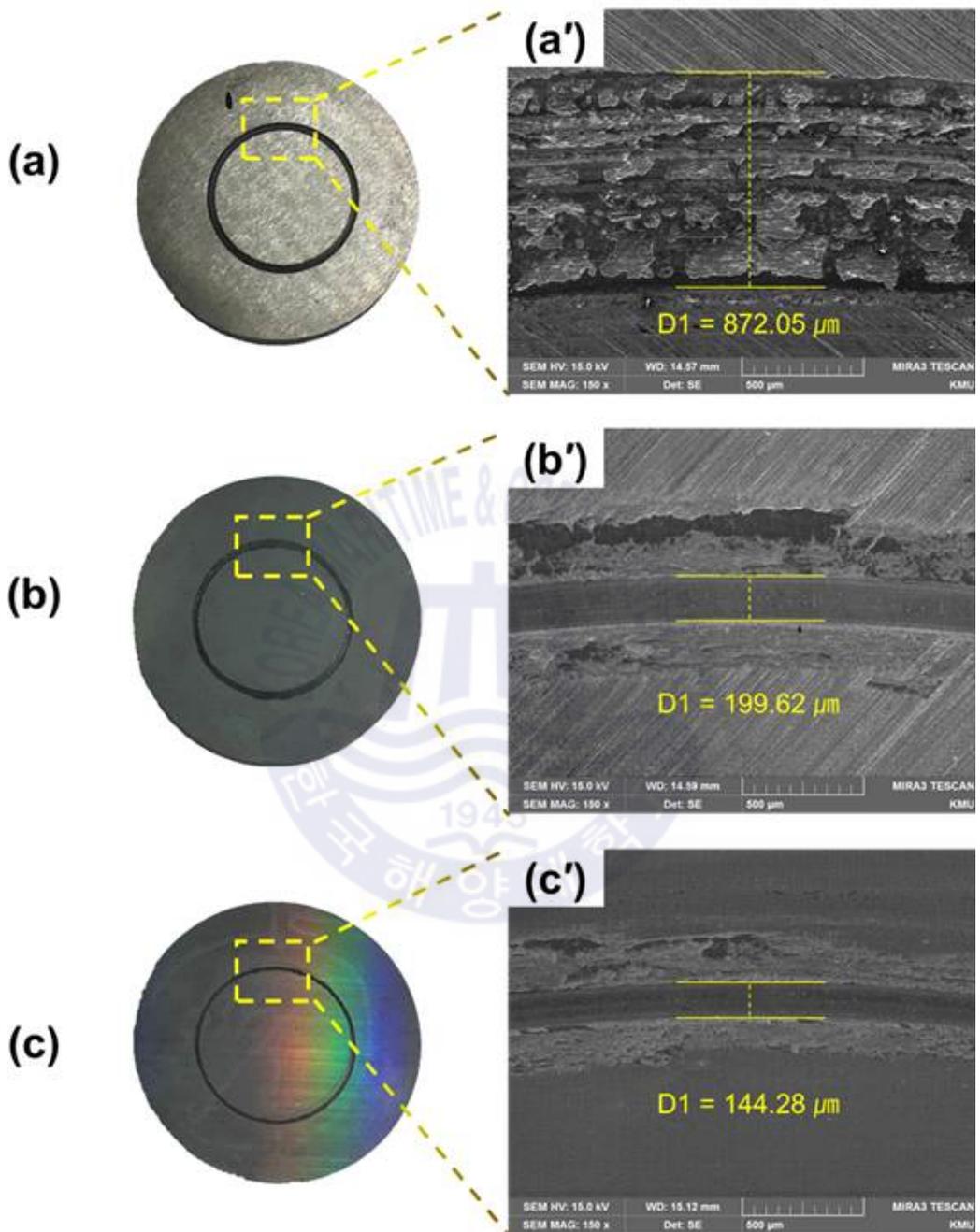


Fig. 52. Photographs of wear tracks after ball-on-disk wear test for (a) H-D2, (b) DEDed M4, and (c) UNSM-DEDed M4, and (a' -c' ) corresponding FE-SEM images of wear track width

마모 거동은 재료 표면의 소성 변형과 마찰에 의한 표면의 마모층 (tribo-layer) 형성 등 복잡한 양상을 나타낸다. Fig. 53은 볼 온 디스크 마모 시험 후의 시편 각각의 마모 거동을 나타낸 것이다.

마모 시험 후, H-D2에서는 응착마모(adhesive wear)가 발생한 것을 Fig. 53 (a)를 통해서 확인할 수 있다. 응착마모와 더불어, H-D2의 표면에서 마모 입자 (wear particles)가 쓸리면서 골링(galling) 현상도 발생했다. 마모 입자는 마모 시험동안에 높은 압력 및 가공경화에 노출되어 삼중마모(three-body wear)를 일으킬 수 있는 고경도 입자로 바뀐다[120]. Fig. 53 (a)의 마모 방향(노란색 화살표)을 따라서 H-D2 표면에 삼중마모로 인한 흔적을 확인할 수 있다. 그로 인하여 H-D2 표면의 마모 흔에서 연삭마모(abrasive wear)도 발생한 것으로 보인다[121]. 마지막으로 응착마모로 인해 표면층이 벗겨지고 다수의 스폐링(spalling)이 발생하여, 마모 시험 후의 H-D2는 상당한 손상을 입은 것을 확인하였다.

Fig. 53 (b)는 마모 시험 후의 DEDed M4 표면을 나타낸 것이다. Lin 등에 의하면, 재료의 내마모성은 미세조직, 특히 마르텐사이트에 영향을 받는다고 하였다[122]. 또한, Kasak과 Neumeyer은 MC 탄화물의 함량이 높을수록 마모량이 적어지므로, 혼합 탄화물은 철 기반 탄화물(Fe-based carbides)보다 내마모성이 뛰어나다고 주장하였다[123]. 이를 바탕으로, DEDed M4의 마모거동은 H-D2와 다른 양상으로 나타나는 것으로 판단할 수 있다. 마모 시험 후, DEDed M4의 손상된 표면에서는 검은 층이 발견된다. Fig. 53 (b)에서 노란색 점선으로 표시된 영역을 EDS 분석하였으며, 그에 대한 화학적 조성을 Table 21에 나타내었다. Fig. 53 (b)의 점 A에서는 텅스텐(W)과 몰리브데넘(Mo) 및 바나듐(V)이 발견되었으며, 이는 DEDed M4 미세조직을 구성하고 있는 MC, M<sub>6</sub>C 탄화물에 의해 나타난 것으로 판단된다. 이와는 다르게 Fig. 53 (b)의 점 B에서는 철(Fe)을 제외한 어떠한 성분들보다 산소(O)의 비중이 6.96% 높아진 것을 알 수 있다. 이로써, 마모 시험 과정 중에 DEDed M4의 표면에서는 산화층(oxide layer)이 생성된 것으로 예측할 수 있다.

마찰열로 인해서 생성된 산화층은 물체 간의 접촉을 방지하고 응착마모를 억제하기 때문에 금속의 내마모성을 향상시키는데 도움이 된다[124, 125]. 그러나 산화층은 매우 얇기 때문에 접촉 응력에 의해서 쉽게 제거될 수 있다[126]. 그리고 산화층이 제거된 영역은 외력을 받아 소성 변형되어 이후의 추가적인 산화층이 생성되지 않아서[127, 128], 결국 응착 마모가 발생하게 된다. 또한, 박리된 산화층은 다시 외력에 의해 분해 및 가공경화되어 경도가 높은 마모 입자로 전환되어 그로 인한 추가적인 마모가 발생한다[129]. 결국, 작은 마모 입자에 의해 삼중마모가 발생하여 마모 트랙에서는 연삭마모 거동이 발견된다. 결과적으로 산화층의 분리 및 응착마모와 연삭마모 거동이 복합적으로 발생하는 것으로 판단된다.

UNSM 처리된 DEDed M4의 마모 거동은 Fig. 53 (c)에서 확인할 수 있으며, DEDed M4와 유사하게 산화층 마모가 발견된다. 하지만 DEDed M4보다 산화층의 박리가 적고, 산화층이 넓게 분포되어 있는 것으로 확인된다. 심지어 산화층이 박리되어도 DEDed M4에서 발견되던 응착마모 경향도 적게 나타났다. 이는 UNSM으로 인해 표면이 가공경화되었으며, 표면 거칠기가 감소하였기 때문에 마모 시험 중에 소성 변형이 발생하기가 어려워져 응착마모에 대한 저항성이 증가한 것으로 보인다[130]. 또한 DEDed M4보다 산화층에서의 분리가 적은 것이 관찰되는데, Garcia-Escosa 등에 의해, 가공경화된 표면에 형성된 산화층은 가공경화되지 않은 표면의 산화층보다 더 오랜 시간동안 유지되는 것으로 판단된다[131]. 그러므로 Fig. 53 (c)와 같이 UNSM 처리를 통해 표면 경도가 향상된 DEDed M4의 표면에 형성된 산화층은 UNSM 처리되지 않은 표면에 형성된 것보다 손상된 정도가 적은 것이 확인된다. 즉, 산화층이 더 오랫동안 유지되어 응착마모가 억제되므로, UNSM-DEDED M4에서는 산화층 마모 및 삼중마모에 의한 연삭마모가 주로 발견된다.

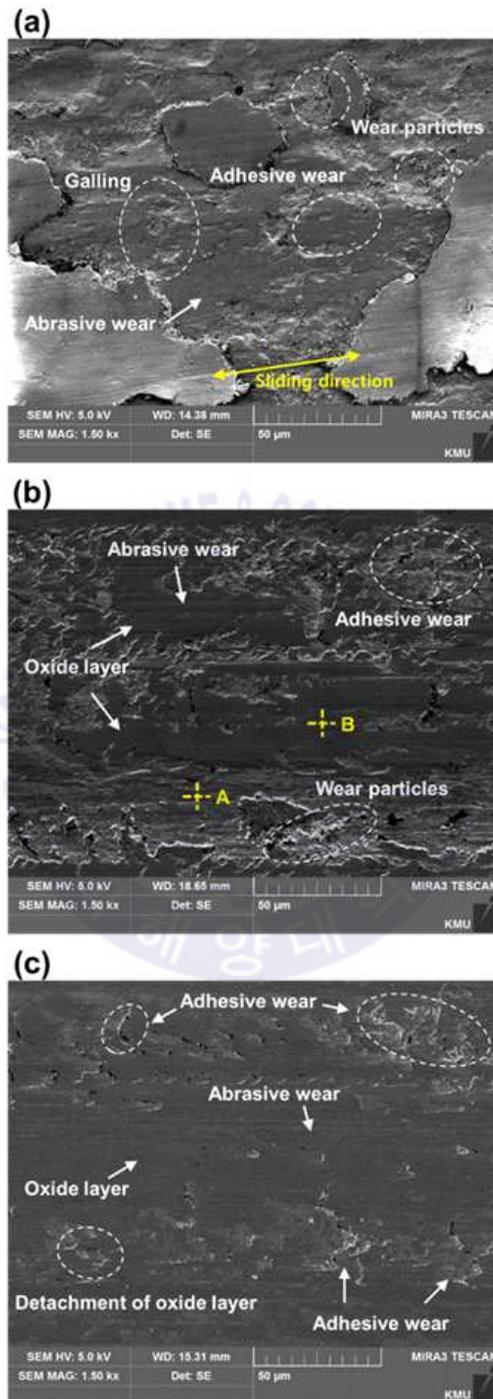


Fig. 53. FE-SEM images of worn surface morphologies of (a) H-D2, (b) DEDed M4, and (c) UNSM-DEDED M4 after test

**Table 21.** Chemical composition of worn surface of DEDed M4 (in wt%)

	C	O	W	Mo	V	Cr	Fe
Area A	1.87	9.73	13.33	8.25	6.67	5.08	55.07
Area B	1.77	16.69	8.83	4.93	3.45	3.34	60.99

**Fig. 54**는 볼 온 디스크 마모시험 후 각 시편의 마모율을 나타낸 것이다. **Fig. 54**를 통해서 AISI D2에 DED 공정으로 M4를 하드페이싱할 경우, 마모율은 약 68.3% 감소하여 내마모성에 크게 기여함을 알 수 있다. 그리고 DEDed M4에 UNSM 처리를 함으로써 마모율은 약 85.7% 감소하는 점을 볼 수 있다. UNSM 처리를 통해 DEDed M4의 경도가 상승하여 Archard equation에 의해서 마모율이 감소했다고 예상할 수 있다[132]. 또한, UNSM 처리 후 표면 거칠기가 낮아지고 경도가 상승하여 UNSM 처리 전보다 마모율이 감소한 것으로 보인다. 이전에 Gleiter는 조밀해진 결정립과 나노결정구조를 이루는 재료는 비교적 큰 크기의 결정으로 이루어진 재료보다 단단하고 내마모성이 우수하다고 결론지은 바 있다[133]. 그리고 UNSM 처리 후에 나타나는 경도의 증가뿐만 아니라 입자 크기의 미세화 등의 특성변화는 모두 내마모성 향상에 기여한다[127]. 따라서 DEDed M4 표면에 UNSM 처리를 하게 되면, 재료의 결정립이 조밀해지고 경도가 높아지기 때문에 내마모성 또한 향상된다고 판단할 수 있다.

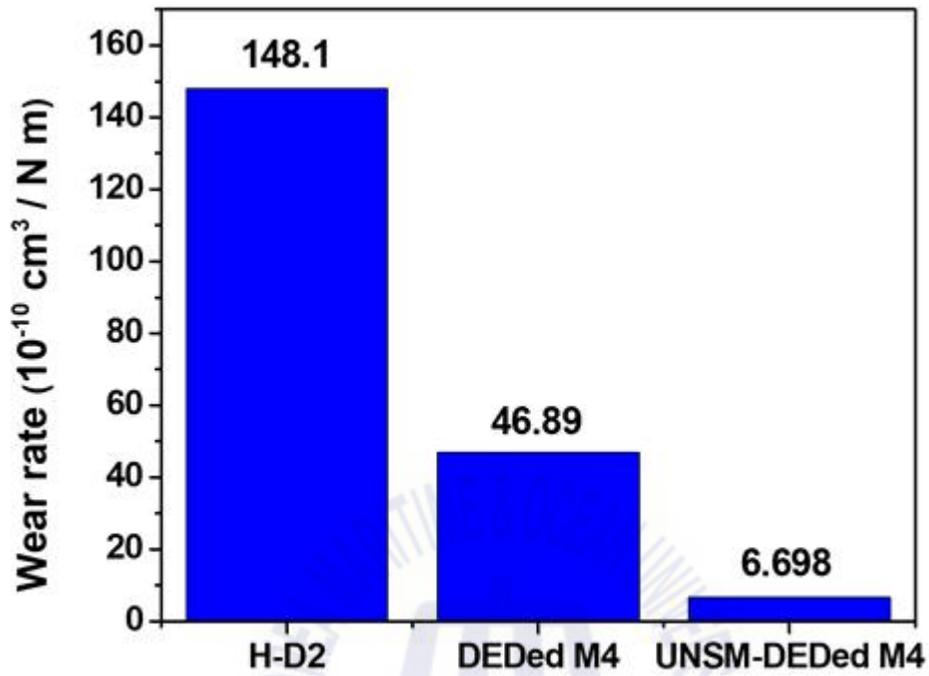


Fig. 54. Comparison of wear rates for heat-treated AISI D2, DED M4, and DED M4 after UNSM treatment

## 제 5 장 결 론

본 연구에서는 후가공하지 않은 DED 적층 표면에 대하여 UNSM 표면 처리 기술을 적용하였을 때의 파상도, 표면 거칠기, 그리고 표면부의 미세조직 변화를 분석하였다. 그리고 UNSM 공정 변수 중에서 세 가지를 선정하여, 반응표면 분석법으로써 DED 적층 표면 개질을 위한 실험 설계와 최적 조건을 도출하였다. 그리고 열처리 하지 않은 D2에 DED 기술을 이용하여 M4 고속도공구강 분말을 하드페이싱한 뒤, UNSM 표면처리를 통한 기계적 특성 변화를 분석하였다. 그리하여 본 연구를 통해 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) UNSM 기술로 DED 적층 표면의 파상도와 표면 거칠기를 감소시켜, 표면 특성을 개선시킬 수 있다. UNSM 인터벌 조건과 DED와의 방향 관계에 따라 표면 특성을 비교한 결과, 인터벌이 좁을수록 DED 적층 표면의 파상도와 표면 거칠기가 낮아지는 경향이 나타났다. 하지만, DED 적층 방향과 UNSM와의 방향 관계가 적층 표면이 개질되는 정도에 미치는 영향력은 낮았다.

(2) DED 적층 표면의 파상도와 표면 거칠기 개질에 대한 최적 조건을 찾기 위해 반응표면분석법을 통해 최적화를 실시하였다. UNSM 공정 변수 중에서 정적 하중과 인터벌, 그리고 이송 속도를 요인으로 선정하였으며, 각 요인에 따른 파상도와 표면 거칠기 반응 값에 대하여 ANOVA 분산 분석하였다. 그 결과 파상도에 대하여 정적 하중, 인터벌, 이송 속도 순서대로 영향력이 있었으며, 표면 거칠기에 대하여 인터벌, 정적하중, 이송 속도 순서대로 영향력이 있음을 확인하였다.

(3) DED 적층 표면의 파상도, 표면 거칠기 반응 값에 대하여 각각의 회귀 모형을 도출하였으며, 반응 값들을 모두 최소로 만족시키는 최적조건을 탐색하였다. 정적 하중 45 N, 인터벌 10  $\mu\text{m}$ , 이송 속도 2600 mm/min으로 분석되었으며, 예측되는 파상도 반응 값은 1.8097  $\mu\text{m}$ , 표면 거칠기 반응 값은 0.3297  $\mu\text{m}$ 였다. 최적화 조건으로 반복 실험한 결과, 관측된 파상도는 1.7690  $\mu\text{m}$ , 표면 거칠기는 0.3216  $\mu\text{m}$ 로 각각 2.30%, 2.52% 낮은 수치를 보여 탐색한 UNSM 최적 조건이 DED 적층 표면을 효과적으로 개질할 수 있음을 확인하였다. 그러나 기계 연마한 표본보다 표면 거칠기는 우수하게 개질할 수 있었으나, 파상도를 개질하는데에 한계가 있는 것으로 확인되었다.

(4) 그리고 UNSM이 기계 연마된 DEDed M4의 표면 거칠기를 낮출 뿐만 아니라, 내마모성에 이로운 마이크로 덩플을 표면에 형성했음을 발견하였다. UNSM 공정 조건에 따른 표면 거칠기를 분석한 결과, 정적 하중 30 N, 이송 속도 2500 mm/min인 조건이 DEDed M4의 표면 거칠기 개선에 가장 효과적임을 확인하였다. UNSM 처리된 DEDed M4 단면 조직에서 소성 변형된 표면 층이 나타났다. UNSM에 의해 조직에  $\text{S}^2\text{PD}$ 가 유발되어 마르텐사이트 변태로 인하여 결국, DEDed M4에서 오스테나이트의 분율이 감소한 대신 마르텐사이트의 분율이 상승함을 알 수 있었다.

(5) UNSM 처리에 의하여 유기된  $\text{S}^2\text{PD}$ 에 결정립이 미세화되고 격자 구조가 뒤틀리면서 XRD 회절 피크의 폭이 넓어진 것을 발견하였다. 이와 같은 분석 결과로 UNSM은 DEDed M4의 조직에  $\text{S}^2\text{PD}$ 를 유발해 나노 표면 경화 층(nano-surface hardened layer)을 생성하여 기계적 특성을 향상시킬 수 있다고 판단했다. 또한, DEDed M4 표면의 인장잔류응력을 압축잔류응력으로 전환시켜 피로 성능에 이로운 영향을 미칠 것이라고 판단하였다.

(6) UNSM 처리를 통해 DEDED M4 미세조직의 결정립이 미세화되면서 경도가 향상하였다. 정적 하중이 크거나 이송 속도가 느려질수록, 즉 변형 에너지 밀도가 높을수록 UNSM-DEDED M4의 경도가 커지는 경향이 있었다. 이송 속도보다 정적 하중이 UNSM-DEDED M4의 경도 변화에 가장 큰 영향을 주는 것으로 분석되었다.

(7) 열처리한 H-D2, DEDED M4, 그리고 UNSM-DEDED M4 시편의 내마모성 검증을 위해 스크래치 시험과 불 온 디스크 마모시험을 수행하였다. 스크래치 압흔의 형상을 비교했을 때, UNSM-DEDED M4의 압흔이 가장 작았다. 불 온 디스크 마모 시험 후, H-D2는 손상이 많이 된 것에 비해, DEDED M4와 UNSM-DEDED M4는 손상을 적게 입었다. 마모율 비교를 통해서 UNSM-DEDED M4가 DEDED M4보다 손상이 적은 것을 알 수 있었다. UNSM 처리가 DEDED M4의 내마모성 향상에 이로운 작용을 함을 확인할 수 있었다.

본 연구를 통해서 UNSM이 DED로 적층된 소재에 미치는 다양한 영향을 분석하였다. UNSM 처리를 통해 파상도 및 표면 거칠기의 개선 뿐만 아니라 표면 경도와 표면의 인장잔류응력이 압축잔류응력이 전환되어 DEDED M4의 내마모성과 피로성능에 유익한 영향을 줄 것이라고 판단된다.

하지만 UNSM 처리를 하는 데에 있어서 기술적 한계로 인하여, UNSM 처리된 DEDED M4의 피로성능을 분석하는 데 어려움이 있었다. 이 점은 추후의 연구에서 보완되고 검증되어야 할 것이다. 이 밖에도 다양한 종류의 적층 제조한 소재들에 대해서 UNSM이 주는 영향을 분석하고, 재료의 기계적 특성을 극대화시킬 수 있는 실험 계획법을 통한 UNSM 공정 최적화는 앞으로의 흥미로운 연구 주제가 될 것이다. 그리하여 최종적으로 금속 레이저 적층 기술과 더불어 UNSM 기술이 실제 산업에서의 범용성을 가질 수 있도록 다양한 연구가 수행되어야 할 것이다.

## 참고문헌

- [1] Yasa, E., & Kruth, J. P. (2011). Application of laser re-melting on selective laser melting parts. *Advances in Production engineering and Management*, 6(4), 259-270.
- [2] Shim, D. S., Baek, G. Y., Seo, J. S., Shin, G. Y., Kim, K. P., & Lee, K. Y. (2016). Effect of layer thickness setting on deposition characteristics in direct energy deposition (DED) process. *Optics & Laser Technology*, 86, 69-78.
- [3] Pinkerton, A. J., & Li, L. (2003). The effect of laser pulse width on multiple-layer 316L steel clad microstructure and surface finish. *Applied Surface Science*, 208, 411-416.
- [4] Gharbi, M., Peyre, P., Gorny, C., Carin, M., Morville, S., Le Masson, P., ... & Fabbro, R. (2013). Influence of various process conditions on surface finishes induced by the direct metal deposition laser technique on a Ti - 6Al - 4V alloy. *Journal of materials processing technology*, 213(5), 791-800.
- [5] Mazumder, J., Dutta, D., Kikuchi, N., & Ghosh, A. (2000). Closed loop direct metal deposition: art to part. *Optics and Lasers in Engineering*, 34(4-6), 397-414.
- [6] Kim, W. H., Jung, B. H., Park, I. D., Oh, M. H., Choi, S. W., & Kang, D. M. (2015). Surface hardness as a function of laser metal deposition parameters. *Transactions of Materials Processing*, 24(4), 272-279.
- [7] Leunda, J., Soriano, C., Sanz, C., & Navas, V. G. (2011). Laser cladding of vanadium-carbide tool steels for die repair. *Physics Procedia*, 12, 345-352.
- [8] Pleterski, M., Muhič, T., Podgornik, B., & Tušek, J. (2011). Blanking punch life improvement by laser cladding. *Engineering Failure Analysis*, 18(6), 1527-1537.
- [9] Kattire, P., Paul, S., Singh, R., & Yan, W. (2015). Experimental characterization of laser cladding of CPM 9V on H13 tool steel for die repair applications. *Journal of Manufacturing Processes*, 20, 492-499.
- [10] Wang, S. H., Chen, J. Y., & Xue, L. (2006). A study of the abrasive wear behaviour of laser-clad tool steel coatings. *Surface and Coatings Technology*, 200(11), 3446-3458.

- [11] Mercelis, P., & Kruth, J. P. (2006). Residual stresses in selective laser sintering and selective laser melting. *Rapid prototyping journal*, 12(5), 254-265.
- [12] Edwards, P., & Ramulu, M. (2014). Fatigue performance evaluation of selective laser melted Ti - 6Al - 4V. *Materials Science and Engineering: A*, 598, 327-337.
- [13] Wycisk, E., Solbach, A., Siddique, S., Herzog, D., Walther, F., & Emmelmann, C. (2014). Effects of defects in laser additive manufactured Ti-6Al-4V on fatigue properties. *Physics Procedia*, 56, 371-378.
- [14] Zhu, G., Li, D., Zhang, A., Pi, G., & Tang, Y. (2012). The influence of laser and powder defocusing characteristics on the surface quality in laser direct metal deposition. *Optics & Laser Technology*, 44(2), 349-356.
- [15] Alimardani, M., Fallah, V., Iravani-Tabrizipour, M., & Khajepour, A. (2012). Surface finish in laser solid freeform fabrication of an AISI 303L stainless steel thin wall. *Journal of Materials Processing Technology*, 212(1), 113-119.
- [16] Gong, Y., & Li, P. (2019). Analysis of tool wear performance and surface quality in post milling of additive manufactured 316L stainless steel. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 33(5), 2387-2395.
- [17] Farayibi, P. K., Abioye, T. E., Murray, J. W., Kinnell, P. K., & Clare, A. T. (2015). Surface improvement of laser clad Ti - 6Al - 4V using plain waterjet and pulsed electron beam irradiation. *Journal of Materials Processing Technology*, 218, 1-11.
- [18] Luo, K. Y., Jing, X., Sheng, J., Sun, G. F., Yan, Z., & Lu, J. Z. (2016). Characterization and analyses on micro-hardness, residual stress and microstructure in laser cladding coating of 316L stainless steel subjected to massive LSP treatment. *Journal of Alloys and Compounds*, 673, 158-169.
- [19] Telasang, G., Majumdar, J. D., Wasekar, N., Padmanabham, G., & Manna, I. (2015). Microstructure and mechanical properties of laser clad and post-cladding tempered AISI H13 tool steel. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 46(5), 2309-2321.

- [20] Da Sun, S., Liu, Q., Brandt, M., Luzin, V., Cottam, R., Janardhana, M., & Clark, G. (2014). Effect of laser clad repair on the fatigue behaviour of ultra-high strength AISI 4340 steel. *Materials Science and Engineering: A*, 606, 46-57.
- [21] Lourenço, J. M., Da Sun, S., Sharp, K., Luzin, V., Klein, A. N., Wang, C. H., & Brandt, M. (2016). Fatigue and fracture behavior of laser clad repair of AerMet® 100 ultra-high strength steel. *International Journal of Fatigue*, 85, 18-30.
- [22] Kumar, D., Idapalapati, S., Wang, W., & Narasimalu, S. (2019). Effect of Surface Mechanical Treatments on the Microstructure-Property-Performance of Engineering Alloys. *Materials*, 12(16), 2503.
- [23] Hansen, N. (2004). Hall - Petch relation and boundary strengthening. *Scripta Materialia*, 51(8), 801-806.
- [24] Klotz, T., Delbergue, D., Bocher, P., Lévesque, M., & Brochu, M. (2018). Surface characteristics and fatigue behavior of shot peened Inconel 718. *International Journal of Fatigue*, 110, 10-21.
- [25] Eckersley, J. S., & Meister, T. J. M. (1997). Three innovations advance the science of shot peening. American Gear Manufacturers Association.
- [26] Kumar, D., Idapalapati, S., & Wei, W. (2018). Microstructural response and strain hardening in deep cold rolled nickel-based superalloy for aerospace application. *Procedia CIRP*, 71, 374-379.
- [27] Bozdana, A. T., Gindy, N. N., & Li, H. (2005). Deep cold rolling with ultrasonic vibrations – a new mechanical surface enhancement technique. *International Journal of Machine tools and manufacture*, 45(6), 713-718.
- [28] Liu, G., Lu, J., & Lu, K. (2000). Surface nanocrystallization of 316L stainless steel induced by ultrasonic shot peening. *Materials Science and Engineering: A*, 286(1), 91-95.
- [29] Zhang, X. C., Zhang, Y. K., Lu, J. Z., Xuan, F. Z., Wang, Z. D., & Tu, S. T. (2010). Improvement of fatigue life of Ti - 6Al - 4V alloy by laser shock peening. *Materials Science and Engineering: A*, 527(15), 3411-3415.

- [30] Krolczyk, G. M., & Legutko, S. (2014). Experimental analysis by measurement of surface roughness variations in turning process of duplex stainless steel. *Metrology and Measurement Systems*, 21(4), 759-770.
- [31] Amanov, A., Cho, I. S., Kim, D. E., & Pyun, Y. S. (2012). Fretting wear and friction reduction of CP titanium and Ti - 6Al - 4V alloy by ultrasonic nanocrystalline surface modification. *Surface and coatings technology*, 207, 135-142.
- [32] Cao, X. J., Pyoun, Y. S., & Murakami, R. (2010). Fatigue properties of a S45C steel subjected to ultrasonic nanocrystal surface modification. *Applied Surface Science*, 256(21), 6297-6303.
- [33] Telang, A., Gill, A. S., Tammana, D., Wen, X., Kumar, M., Teyseyre, S., ... & Vasudevan, V. K. (2015). Surface grain boundary engineering of Alloy 600 for improved resistance to stress corrosion cracking. *Materials Science and Engineering: A*, 648, 280-288.
- [34] Amanov, A., Cho, I. S., Pyoun, Y. S., Lee, C. S., & Park, I. G. (2012). Micro-dimpled surface by ultrasonic nanocrystal surface modification and its tribological effects. *Wear*, 286, 136-144
- [35] Pyoun, Y. S., Cho, I. S., Lee, C. S., Park, I. G., Kim, D. S., Kim, C. S., & Cho, I. H. (2007). Application of Ultrasonic Nano-Crystal Surface Modification Technology Which realizes simultaneous improvement of fatigue strength with peening effect and improvement of wear resistance and friction loss with case hardening and micro dimples surface topology. *The Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*, 5, 346-354..
- [36] Cho, I. H., Song, G. H., Kim, C. S., Nobuhide, A., Combs, A., Park, J., ... & Pyoun, Y. S. (2005). Nano structured surface modification of tool steel and its beneficial effects in mechanical properties. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 19(11), 2151-2156.
- [37] Pyun, Y. S., Han, C. H., & Azuma, N. (2001). Development of an Automated Super Surface Finishing System for the 3D Sculptured Surface of Model and Dies using Ultrasonic Micro Burnishing Technology. *Processing of the 32nd ISR*.

- [38] Han, C. H., Phyoun, Y. S., & Kim, C. S. (2002). Ultrasonic micro-burnishing in view of eco-materials processing. *Advances in Technology of Materials and Materials Processing Journal*, 4(1), 25-28.
- [39] Phyoun, Y. S. (2003, November). An application of micro cold forging technology using ultrasonic energy for the nano level surface texture and the improved mechanical properties. In *Korea-Japan international nano-symposium*.
- [40] Ma, C., Dong, Y., & Ye, C. (2016). Improving surface finish of 3D-printed metals by ultrasonic nanocrystal surface modification. *Procedia CIRP*, 45, 319-322.
- [41] Ma, C., Andani, M. T., Qin, H., Moghaddam, N. S., Ibrahim, H., Jahadakbar, A., ... & Dong, Y. (2017). Improving surface finish and wear resistance of additive manufactured nickel-titanium by ultrasonic nano-crystal surface modification. *Journal of Materials Processing Technology*, 249, 433-440.
- [42] Zhang, H., Chiang, R., Qin, H., Ren, Z., Hou, X., Lin, D., ... & Ye, C. (2017). The effects of ultrasonic nanocrystal surface modification on the fatigue performance of 3D-printed Ti64. *International Journal of Fatigue*, 103, 136-146.
- [43] Cho, I. S., Lee, C. S., Choi, C. H., Lee, H. G., Lee, M., & Jeon, Y. (2017). Effect of the ultrasonic nanocrystalline surface modification (UNSM) on bulk and 3D-printed AISI H13 tool steels. *Metals*, 7(11),
- [44] Suh, C. M., Song, G. H., Suh, M. S., & Phyoun, Y. S. (2007). Fatigue and mechanical characteristics of nano-structured tool steel by ultrasonic cold forging technology. *Materials Science and Engineering: A*, 443(1-2), 101-106. 510.
- [45] Li, Y., Lei, L., Zeng, P. (2011) The numerical simulation of shot peening process with an equivalent static loading method. *Journal of Plasticity Engineering*, 18(3), 70-74.
- [46] Wu, B., Zhang, L., Zhang, J., Murakami, R. I., & Phyoun, Y. S. (2015). An investigation of ultrasonic nanocrystal surface modification machining process by numerical simulation. *Advances in Engineering Software*, 83, 59-69.

- [47] Pape, F., Noelke, C., Kaieler, S., Haferkamp, H., & Gesing, T. M. (2014). Influence of foaming agents on laser based manufacturing of closed-cell Ti foam. *Procedia Materials Science*, 4, 97-102.
- [48] Stamp, R., Fox, P., O'neill, W., Jones, E., & Sutcliffe, C. (2009). The development of a scanning strategy for the manufacture of porous biomaterials by selective laser melting. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 20(9), 1839.
- [49] Li, X., Wang, C., Wang, L., Zhang, W., & Li, Y. (2010). Fabrication of bioactive titanium with controlled porous structure and cell culture in vitro. *Rare Metal Materials and Engineering*, 39(10), 1697-1701.
- [50] Khairallah, S. A., Anderson, A. T., Rubenchik, A., & King, W. E. (2016). Laser powder-bed fusion additive manufacturing: Physics of complex melt flow and formation mechanisms of pores, spatter, and denudation zones. *Acta Materialia*, 108, 36-45.
- [51] Li, Y., & Gu, D. (2014). Thermal behavior during selective laser melting of commercially pure titanium powder: Numerical simulation and experimental study. *Additive Manufacturing*, 1, 99-109.
- [52] Zheng, L., Zhang, Q., Cao, H., Wu, W., Ma, H., Ding, X., ... & Fan, S. (2019). Melt pool boundary extraction and its width prediction from infrared images in selective laser melting. *Materials & Design*, 183, 108110.
- [53] Li, C., Guo, Y. B., & Zhao, J. B. (2017). Interfacial phenomena and characteristics between the deposited material and substrate in selective laser melting Inconel 625. *Journal of Materials Processing Technology*, 243, 269-281.
- [54] Standard, A. S. Q. (1995). B46. 1, Surface Texture. American Society of Mechanical Engineers, New York.
- [55] Holbrook, E. O. F. D. J., Horton, L., & Green, H. H. R. R. E. (2004). *Machinery's Handbook: A Reference Book For The Mechanical Engineer, Designer, Manufacturing Engineer, Draftsman, Toolmaker And Machinist*.

- [56] Mummery, L. (1992). Surface texture analysis: the handbook (p. 23). West Germany: Hommelwerke GmbH
- [57] ISO, E. 4287 (1998) Geometrical product specifications (GPS)–Surface texture: Profile method–Terms, definitions and surface texture parameters (ISO 4287: 1997). CEN/CENELEC, Brussels.
- [58] Gu, D. (2015). Laser additive manufacturing of high-performance materials. Springer.
- [59] Amanov, A., Pyun, Y. S., & Sasaki, S. (2014). Effects of ultrasonic nanocrystalline surface modification (UNSM) technique on the tribological behavior of sintered Cu-based alloy. *Tribology International*, 72, 187-197.
- [60] Zheng, B., Zhou, Y., Smugeresky, J. E., Schoenung, J. M., & Lavernia, E. J. (2008). Thermal behavior and microstructure evolution during laser deposition with laser-engineered net shaping: part II. Experimental investigation and discussion. *Metallurgical and materials transactions A*, 39(9), 2237-2245.
- [61] Umemoto, M. (2003). Nanocrystallization of steels by severe plastic deformation. *Materials Transactions*, 44(10), 1900-1911.
- [62] Moon, J. H., Baek, S. M., Lee, S. G., Seong, Y., Amanov, A., Lee, S., & Kim, H. S. (2019). Effects of residual stress on the mechanical properties of copper processed using ultrasonic-nanocrystalline surface modification. *Materials Research Letters*, 7(3), 97-102.
- [63] Wu, B., Wang, P., Pyoun, Y. S., Zhang, J., & Murakami, R. I. (2013). Study on the fatigue properties of plasma nitriding S45C with a pre-ultrasonic nanocrystal surface modification process. *Surface and Coatings Technology*, 216, 191-198.
- [64] Amanov, A., Pyoun, Y. S., Cho, I. S., Lee, C. S., & Park, I. G. (2011). The evaluation of the micro-tracks and micro-dimples on the tribological characteristics of thrust ball bearings. *Journal of nanoscience and nanotechnology*, 11(1), 701-705.
- [65] Davim, J. P., & Figueira, L. (2007). Machinability evaluation in hard turning of cold work tool steel (D2) with ceramic tools using statistical techniques. *Materials & design*, 28(4), 1186-1191.

- [66] Lawrance, G., Paul, P. S., Vasanth, X. A., Varadarajan, A. S., & Daniel, E. (2019). Influence of magnetorheological elastomer on tool vibration and cutting performance during boring of hardened AISI4340 steel. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 33(4), 1555-1561.
- [67] Mello, G. D., & Pai, P. S. (2018). Surface Roughness Modeling in High Speed Turning of Ti-6Al-4V Using Response Surface Methodology. *Materials Today: Proceedings*, 5(5), 11686-11696.
- [68] Sivaprakasam, P., Hariharan, P., & Gowri, S. (2014). Modeling and analysis of micro-WEDM process of titanium alloy (Ti - 6Al - 4V) using response surface approach. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 17(4), 227-235.
- [69] Paturi, U. M. R., Devarasetti, H., & Narala, S. K. R. (2018). Application Of Regression And Artificial Neural Network Analysis In Modelling Of Surface Roughness In Hard Turning Of AISI 52100 Steel. *Materials Today: Proceedings*, 5(2), 4766-4777.
- [70] Mulay, A., Ben, B. S., Ismail, S., & Kocanda, A. (2019). Prediction of average surface roughness and formability in single point incremental forming using artificial neural network. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 19(4), 1135-1149.
- [71] Kim, D. M., Kim, D. Y., & Park, H. W. (2017). Optimization of the hard turning process of the harden bearing steel using response surface methodology, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 34(10), 683-687.
- [72] Montgomery, D. C. (2005). *Design and analysis of experiments; sixth edition*. John Wiley & Sons.
- [73] Box, G. E., & Draper, N. R. (1987). *Empirical model-building and response surfaces*. John Wiley & Sons.
- [74] Park, S. H. (2003). *Modern Design of Experiments-Revised edition*. Min Young.

- [75] Khuri, A. I., & Cornell, J. A. (1996). Response surfaces: designs and analyses. Marcel Dekker, Inc., New York.
- [76] Box, G. E., & Hunter, J. S. (1957). Multi-factor experimental designs for exploring response surfaces. *The Annals of Mathematical Statistics*, 28(1), 195-241.
- [77] Lomax, R. G. (2007). *Statistical concepts: A second course*. Lawrence Erlbaum Associates Publishers.
- [78] Joglekar, A. M., May, A. T., Graf, E., & Saguy, I. (1987). Product excellence through experimental design. *Food product and development: From concept to the marketplace*, 211.
- [79] Dunkler, D., Plischke, M., Leffondré, K., & Heinze, G. (2014). Augmented backward elimination: a pragmatic and purposeful way to develop statistical models. *PLoS One*, 9(11), e113677.
- [80] Derringer, G., & Suich, R. (1980). Simultaneous optimization of several response variables. *Journal of quality technology*, 12(4), 214-219.
- [81] Baek, G. Y., Shin, G. Y., Lee, K. Y., & Shim, D. S. (2019). Mechanical Properties of Tool Steels with High Wear Resistance via Directed Energy Deposition. *Metals*, 9(3), 282.
- [82] Baek, G. Y., Lee, K. Y., Park, S. H., & Shim, D. S. (2017). Effects of substrate preheating during direct energy deposition on microstructure, hardness, tensile strength, and notch toughness. *Metals and Materials International*, 23(6), 1204-1215.
- [83] Das, D., Sarkar, R., Dutta, A. K., & Ray, K. K. (2010). Influence of sub-zero treatments on fracture toughness of AISI D2 steel. *Materials Science and Engineering: A*, 528(2), 589-603.
- [84] Heaney, D. F. (Ed.). (2018). *Handbook of metal injection molding*. Woodhead Publishing.
- [85] Tanaka, K. (2017). X-ray stress measurement by the cosa method using two-dimensional detector, Part I, Fundamentals of measurements and Part II,

Measurement procedure and applications. *Journal of the Society of Materials Science, Japan*, 66(7), 470-478.

- [86] Designation, A. S. T. M. G99-95a (2000) e1. Standard test method for wear testing with a pin-on-disk apparatus.
- [87] Wang, L. (2014). Use of structured surfaces for friction and wear control on bearing surfaces. *Surface Topography: Metrology and Properties*, 2(4), 043001.
- [88] Xing, Y., Deng, J., Feng, X., & Yu, S. (2013). Effect of laser surface texturing on Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/TiC ceramic sliding against steel under dry friction. *Materials & Design* (1980-2015), 52, 234-245.
- [89] Zhou, J., Sun, Y., Huang, S., Sheng, J., Li, J., & Agyenim-Boateng, E. (2019). Effect of laser peening on friction and wear behavior of medical Ti6Al4V alloy. *Optics & Laser Technology*, 109, 263-269.
- [90] Gheisari, R., & Polycarpou, A. A. (2018). Three-body abrasive wear of hard coatings: Effects of hardness and roughness. *Thin Solid Films*, 666, 66-75.
- [91] Fontalvo, G. A., Humer, R., Mitterer, C., Sammt, K., & Schemmel, I. (2006). Microstructural aspects determining the adhesive wear of tool steels. *Wear*, 260(9-10), 1028-1034.
- [92] Briki, J., & Slima, S. B. (2008). A new continuous cooling transformation diagram for AISI M4 high-speed tool steel. *Journal of materials engineering and performance*, 17(6), 864-869.
- [93] Tao, N. R., Wang, Z. B., Tong, W. P., Sui, M. L., Lu, J., & Lu, K. (2002). An investigation of surface nanocrystallization mechanism in Fe induced by surface mechanical attrition treatment. *Acta materialia*, 50(18), 4603-4616.
- [94] Zhang, H. W., Hei, Z. K., Liu, G., Lu, J., & Lu, K. (2003). Formation of nanostructured surface layer on AISI 304 stainless steel by means of surface mechanical attrition treatment. *Acta materialia*, 51(7), 1871-1881.

- [95] Roland, T., Reiraint, D., Lu, K., & Lu, J. (2006). Fatigue life improvement through surface nanostructuring of stainless steel by means of surface mechanical attrition treatment. *Scripta Materialia*, 54(11), 1949-1954.
- [96] Amanov, A., Sasaki, S., Kim, D. E., Penkov, O. V., & Pyun, Y. S. (2013). Improvement of the tribological properties of Al6061 - T6 alloy under dry sliding conditions. *Tribology International*, 64, 24-32.
- [97] Zhang, L., Han, Y., & Lu, J. (2008). Nanocrystallization of zirconium subjected to surface mechanical attrition treatment. *Nanotechnology*, 19(16), 165706.
- [98] Shim, D. S., Baek, G. Y., & Lee, E. M. (2017). Effect of substrate preheating by induction heater on direct energy deposition of AISI M4 powder. *Materials Science and Engineering: A*, 682, 550-562.
- [99] Shim, D. S., Baek, G. Y., Lee, S. B., Yu, J. H., Choi, Y. S., & Park, S. H. (2017). Influence of heat treatment on wear behavior and impact toughness of AISI M4 coated by laser melting deposition. *Surface and Coatings Technology*, 328, 219-230.
- [100] Wagner, L. (1999). Mechanical surface treatments on titanium, aluminum and magnesium alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 263(2), 210-216.
- [101] Wu, X. L., Tao, N. R., Hong, Y. S., Xu, B., Lu, J., & Lu, K. (2002). Microstructure and evolution of mechanically-induced ultrafine grain in surface layer of AL-alloy subjected to USSP. *Acta materialia*, 50(8), 2075-2084.
- [102] Amanov, A., Sasaki, S., Cho, I. S., Suzuki, Y., Kim, H. J., & Kim, D. E. (2013). An investigation of the tribological and nano-scratch behaviors of Fe - Ni - Cr alloy sintered by direct metal laser sintering. *Materials & Design*, 47, 386-394.
- [103] Amanov, A., Cho, I. S., & Sasaki, S. (2014). The influence of DLC coating on the mechanical and frictional properties of unpeened and peened Cu-based bimetal under dry sliding conditions. *Materials Chemistry and Physics*, 143(2), 814-824.
- [104] Amanov, A., Kim, J. H., Pyun, Y. S., Hirayama, T., & Hino, M. (2015). Wear mechanisms of silicon carbide subjected to ultrasonic nanocrystalline surface modification technique. *Wear*, 332, 891-899.

- [105] Serna, M. M., Jesus, E. R. B., Galego, E., Martinez, L. G., Corrêa, H. P. S., & Rossi, J. L. (2006). An overview of the microstructures present in high-speed steel-carbides crystallography. In *Materials science forum* (Vol. 530, pp. 48-52). Trans Tech Publications Ltd.
- [106] Rahman, N. U., Capuano, L., Van Der Meer, A., De Rooij, M. B., Matthews, D. T. A., Walmag, G., ... & Römer, G. R. B. E. (2018). Development and characterization of multilayer laser clad high speed steels. *Additive manufacturing*, 24, 76-85.
- [107] Sanz, C., & Navas, V. G. (2013). Structural integrity of direct metal laser sintered parts subjected to thermal and finishing treatments. *Journal of Materials Processing Technology*, 213(12), 2126-2136.
- [108] Ye, C., Telang, A., Gill, A. S., Suslov, S., Idell, Y., Zweiacker, K., ... & Vasudevan, V. K. (2014). Gradient nanostructure and residual stresses induced by Ultrasonic Nano-crystal Surface Modification in 304 austenitic stainless steel for high strength and high ductility. *Materials Science and Engineering: A*, 613, 274-288.
- [109] Gill, A., Telang, A., Mannava, S. R., Qian, D., Pyoun, Y. S., Soyama, H., & Vasudevan, V. K. (2013). Comparison of mechanisms of advanced mechanical surface treatments in nickel-based superalloy. *Materials Science and Engineering: A*, 576, 346-355.
- [110] Kattoura, M., Telang, A., Mannava, S. R., Qian, D., & Vasudevan, V. K. (2018). Effect of ultrasonic nanocrystal surface modification on residual stress, microstructure and fatigue behavior of ATI 718Plus alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 711, 364-377.
- [111] Scholtes, B. (1997). *Assessment of residual stresses. Structural and Residual Stress Analysis by Nondestructive Methods*, Elsevier, Amsterdam, 590.
- [112] Hall, E. O. (1951). The deformation and ageing of mild steel: III discussion of results. *Proceedings of the Physical Society. Section B*, 64(9), 747.
- [113] Wang, Z., Kubota, H., Xue, D., Lin, Q., & Okamura, M. (2006). Galling behavior in square cup drawing of high-tensile-strength steel. *JOURNAL-JAPAN SOCIETY FOR TECHNOLOGY OF PLASTICITY*, 47(10), 988.

- [114] Choi, H. S., Kim, S. G., Kim, B. M., & Ko, D. C. (2013). Quantitative Evaluation of Scratch Related Tool Life for Stamping of UHSS Using Pin-on-Flat Surface Test. *Transactions of Materials Processing*, 22(2), 86-92.
- [115] Jardret, V., Zahouani, H., Loubet, J. L., & Mathia, T. G. (1998). Understanding and quantification of elastic and plastic deformation during a scratch test. *Wear*, 218(1), 8-14.
- [116] Zum Gahr, K. H. (1987). *Microstructure and wear of materials* (Vol. 10). Elsevier.
- [117] Pöhl, F., Huth, S., & Theisen, W. (2014). Indentation of self-similar indenters: An FEM-assisted energy-based analysis. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 66, 32-41.
- [118] Lai, F., Qu, S., Lewis, R., Slatter, T., Fu, W., & Li, X. (2019). The influence of ultrasonic surface rolling on the fatigue and wear properties of 23-8N engine valve steel. *International Journal of Fatigue*, 125, 299-313.
- [119] Cherif, A., Pyoun, Y., & Scholtes, B. (2010). Effects of ultrasonic nanocrystal surface modification (UNSM) on residual stress state and fatigue strength of AISI 304. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 19(2), 282-286.
- [120] Schedin, E. (1994). Galling mechanisms in sheet forming operations. *Wear*, 179(1-2), 123-128.
- [121] Li, G., Qu, S., Xie, M., & Li, X. (2017). Effect of ultrasonic surface rolling at low temperatures on surface layer microstructure and properties of HIP Ti-6Al-4V alloy. *Surface and Coatings Technology*, 316, 75-84.
- [122] Lin, Y. C., Wang, S. W., & Chen, T. M. (2002). A study on the wear behavior of hardened medium carbon steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 120(1-3), 126-132.
- [123] Kasak, A., & Neumeyer, T. A. (1969). Observations on wear of high-hardness steels. *Wear*, 14(6), 445-454.
- [124] Vardavoulias, M. (1994). The role of hard second phases in the mild oxidational wear mechanism of high-speed steel-based materials. *Wear*, 173(1-2), 105-114.

- [125] Garbar, I. I. (2002). Gradation of oxidational wear of metals. *Tribology International*, 35(11), 749-755.
- [126] Hashemi, N., Mertens, A., Montrieux, H. M., Tchuindjang, J. T., Dedry, O., Carrus, R., & Lecomte-Beckers, J. (2017). Oxidative wear behaviour of laser clad High Speed Steel thick deposits: Influence of sliding speed, carbide type and morphology. *Surface and Coatings Technology*, 315, 519-529.
- [127] Amanov, A., & Pyun, Y. S. (2018). Lowering friction of ball screws made of different steel grades through ultrasonic impact treatment. *Tribology International*, 123, 105-119.
- [128] Straffelini, G., & Molinari, A. (1999). Dry sliding wear of Ti - 6Al - 4V alloy as influenced by the counterface and sliding conditions. *Wear*, 236(1-2), 328-338.
- [129] Kato, K. (2000). Wear in relation to friction – a review. *Wear*, 241(2), 151-157.
- [130] Savaşkan, T., & Bican, O. (2010). Dry sliding friction and wear properties of Al - 25Zn - 3Cu - 3Si alloy. *Tribology International*, 43(8), 1346-1352.
- [131] Gracia-Escosa, E., García, I., de Damborenea, J. J., & Conde, A. (2017). Friction and wear behaviour of tool steels sliding against 22MnB5 steel. *Journal of Materials Research and Technology*, 6(3), 241-250.
- [132] Williams, J. A. A. (1999). Wear modelling: analytical, computational and mapping: a continuum mechanics approach. *Wear*, 225, 1-17.
- [133] Gleiter, H. (2000). Nanostructured materials: basic concepts and microstructure. *Acta materialia*, 48(1), 1-29.