

적층제조된 스테인레스 316L에 대한 초음파나노표면개질에 따른 표면특성 및 부식성에 관한 연구

김준호*, 오영택*, 박한별*, 이동호*, 김화정*, 김의준*, 심도식*.#

*한국해양대학교 해양신소재융합공학과

Surface Quality and Corrosion of Additively Manufactured STS316L Treated by Ultrasonic Nanocrystal Surface Modification

Jun-Ho Kim*, Yeong-Taek Oh*, Han-Byeol Park*, Dong-Ho Lee*, Hwa-Jeong Kim*, Ui-Jun Kim*, Do-Sik Shim*#

*Department of Ocean Advanced Materials Convergence, Korea Maritime and Ocean University

(Received 22 April 2020; received in revised form 20 June 2020; accepted 27 June 2020)

ABSTRACT

This study investigated the effects of ultrasonic nanocrystal surface modification (UNSM) on the deteriorated surface of AISI SUS316L additively manufactured (AM) using the powder bed fusion (PBF) technique. Specifically, the effects of UNSM conditions on surface topology, hardness, and anti-corrosion were examined. Before UNSM treatment, the stainless steel 316L powder was processed via the PBF machine to prepare a substrate. We observed surface changes due to UNSM treatments in PBF SUS316L substrates and examined the correlation between topology changes, roughness, hardness, and anti-corrosion. After UNSM treatment, the coarse as-built surface was refined, and a regular micro-profile was implemented. Compared to the non-treated PBF sample, the waviness and roughness of the surfaces after UNSM treatment decreased by up to 56.0% and 94.5%, respectively, and decreased further as the interval decreased. The hardness improved by up to 63.0% at a maximum depth of 500 μm from top surface by the UNSM treatment. The results of the corrosion test showed that the corrosion resistance of the UNSM specimens was moderately improved compared to that of the untreated surface. This study confirmed that UNSM is an effective post-processing technique for additively manufactured parts.

Key Words : Ultrasonic Nanocrystal Surface Modification(초음파나노표면개질), Additive Manufacturing(적층제조), Roughness(거칠기), Hardness(경도), Corrosion(부식)

1. 서 론

금속 부품의 표면을 개선하기 위해 오랜 기간

동안 다양한 방법의 기계적 표면 처리 연구가 진행되었다. 금속 부품의 표면을 개선하기 위해 오랜 기간 동안 다양한 방법의 기계적 표면 처리 연구가 진행되었다. 기계적 표면 처리(mechanical surface treatment)는 강소성 변형(severe plastic deformation)을 통해 표면의 형상(topology), 미세

Corresponding Author : think@kmou.ac.kr

Tel: +82-51-410-4354, Fax: +82-51-404-4350

구조 및 재료 특성을 개질하는 표면 처리 기법이 다^[1]. 이러한 기계적 표면 처리는 표면에 높은 밀도의 나노결정 미세구조(nanocrystalline structure)를 생성하여 소재 표면을 강화시키게 된다. 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. 샷 피닝(SP)은 고속으로 발사되는 매개체가 재료의 표면에 충돌하여 강소성 변형을 발생시키고 압축잔류응력 및 가공경화(strain hardening)를 유도하는 방법이다^[2]. 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. 딥 콜드 롤링(DCR)은 버니싱(burnishing)이라고도 불리며, 수압 또는 유압으로 제어되는 금속 볼을 재료 표면에 눌러 압연하여 강소성 변형을 유기한다^[3]. 비록 유도되는 압축잔류응력의 크기는 작지만, SP보다 깊은 영역까지 유도할 수 있다. 초음파 샷 피닝(ultrasonic shot peening, USP)은 고주파의 초음파의 출력을 이용해서 구형(spherical)의 매개체를 진동시킴으로써, 매우 짧은 주기로 재료 표면에 충돌시킨다^[4]. 레이저 쇼크 피닝(laser shock peening, LSP)은 고출력의 펄스 레이저를 금속 표면에 고압의 플라즈마를 노출시키는데, 이 플라즈마의 충격파로써 표면에 강소성 변형을 유기시킨다^[5]. 큰 압축잔류응력을 깊은 영역까지 부여할 수 있어서 효과가 우수하지만, 플라즈마의 노출에 의한 소재의 열 변형이 발생하는 단점이 있다.

한편, 본 연구에서 다루고자 하는 초음파 나노 표면개질(ultrasonic nanocrystal surface modification, UNSM)은 이전의 연구를 통해 금속 재료의 내마모성^[6]과 피로강도^[7], 내식성^[8] 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^[9]. 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^[10]. 이러한 UNSM 기술과, 앞서 언급한 기계적 표면 처리 공정들의 특성 및 효과는 여러 문헌^[9, 11]들에서 비교할 수 있다.

이러한 UNSM의 장점 때문에 다양한 소재와 산업적 응용 제품에 대하여 표면 처리를 적용한 연구가 보고되었다. 특히, 최근에는 적층제조된(additive manufactured) 부품 혹은 소재의 표면 특성을 개선시키기 위한 후처리 연구가 활발히 진행되고 있으며, UNSM 기술도 그 중 하나가 된다. Ma 등은 UNSM 표면 처리 공법으로 direct metal laser sintering(DMLS)으로 제조한 AISi10Mg의 표면 거칠기를 개선시켰으며, 선택적 레이저 용융(selective laser melting, SLM) 기법으로 적층한 Ni-Ti의 표면 거칠기와 마모 특성을 향상시켰다^[12]. Zhang 등은 Ti64 소재에 UNSM 처리를 하여 표면 거칠기와 표면경도를 개선하고, 인장잔류응력을 압축잔류응력으로 바꿔 피로성능까지 향상시켰다^[17]. 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, 미세조직 변화에 대해 연구하였다^[15].

하지만, 위와 같은 연구는 적층제조된 소재의 표면을 1차로 절삭가공하여 평탄화된 소재에 UNSM 처리한 후 그 특성 변화를 관찰하였다. 적층 후 표면 절삭가공 없이 As-built 상태에서의 UNSM 효과에 대한 연구는 아직 보고된 바가 없으며, 특히 UNSM 처리 후 부식 특성에 대한 연구 사례는 알려져 있지 않다. 따라서 본 연구에서는 분말베드융합(powder bed fusion, PBF) 방식으로 적층제조된 stainless steel 316L의 표면에 UNSM 처리하여, 처리 전후의 표면거칠기(surface roughness)와 파상도(waviness), 경도변화를 관찰하고, 부식시험을 수행하였다.

2. 실험 방법

2.1 사용 재료

Table 1 Chemical composition of SUS316L steel substrate (wt%)

Element	Substrate	Powder
Fe	Bal.	Bal.
C	0.019	0.017
Si	0.68	0.67
Mn	1.23	0.61
P	0.013	0.037
S	0.004	0.001
Cr	17.8	16.44
Ni	12.8	10.01
Mo	2.36	2.05
Cu	0.05	0.33
N	0.1	0.011

본 연구에서 사용된 오스테나이트계 스테인리스강인 stainless steel 316L은 우수한 내식성, 용접성 그리고 내열성 때문에 화학, 해양, 원자력과 같은 분야에 널리 사용되고 있다^[16]. PBF을 이용한 모재 제작에는 OPM250L(Sodic) 장비를 사용하였으며, 레이저 출력 370W, 이송속도 800mm/min 그리고 레이저 직경 0.2mm 의 조건을 이용하였다. 모재 적층 후에는 응력을 제거하기 위해 어닐링 (annealing)을 실시하였다. 한편, 모재 출력에 사용된 stainless steel 316L은 가스 분무법으로 제조된 직경 10~30 μ m의 구형 분말이다. 실험에 사용된 모재와 금속 분말에 대한 화학적 조성비는 Table 1에 나타난 바와 같다.

2.2 초음파나노포면개질

Fig. 1(a)은 UNSM 장치의 개략도를, Fig. 1(b)는 소재표면에 UNSM 기술을 적용하는 모습을 나타낸 것이다. 무게 추(weight)로 정적 하중(static load)을 조절하고, 초음파 발진기(oscillator)에서 특정 주파수의 초음파를 발생시킨다. 그리고 발생한 초음파는 트랜스듀서(transducer)와 부스터(booster) 장치를 통해, 텅스텐 카바이드 재질(경도 1700 HV)의 볼 팁(ball tip)이 부착된 압입자(indenter)에 하중을 전달하게 된다. 이 때 전달되는 하중의 크기는 무게 추의 정적 하중과 초음파의 진동에너지를 인한 동적 하중(dynamic load)이 결합된 양이다. UNSM 장치는 NC/CNC 공작기계에 설치되기

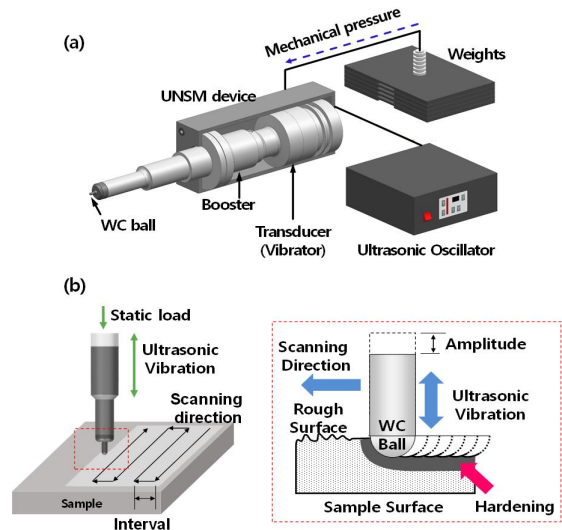


Fig. 1 Schematic diagram of (a) UNSM experimental setup and (b) UNSM process

Table 2 Experimental conditions

Process parameters	Value
Amplitude (μ m)	30
Ultrasonic frequency (kHz)	30
Ball tip diameter (mm)	2.38
Scanning speed (mm/min)	2,500
Static load (N)	10, 30, 50
Interval (μ m)	10, 50, 90

때문에 표면에 대한 정밀한 가공이 가능하다.

본 연구에서는 CNC 선반 공작기계에 DesignMecha 社의 UNSM 장치를 설치해 실험에 적용하였다. 구체적인 UNSM 처리 조건을 Table 2에 정리하였다. 지름 2.38mm의 텅스텐 카바이드 볼팁, 주파수 30kHz, 30 μ m의 진폭, 그리고 이송속도 2500mm/min을 통제변수로 설정했다. 정적하중과 경로 간 간격(interval)을 달리하였을 때의 UNSM 효과 변화를 알아보기 위해, 하중을 10, 30, 50N으로, 그리고 간격은 10, 50, 90 μ m로 변화시켜 처리하였다.

2.3 전처리 및 실험조건

UNSM 전후의 특성 변화를 관찰하기 위해, 처

리된 시험편은 각 시험 조건에 맞는 크기로 와이 어커팅(wire-cutting)하였다. UNSM 처리 후 표면으로부터 깊이에 따른 경도변화를 관찰하기 위해서, 시험편의 단면을 경면 연마 후에 ASTM-E384 시험 규격에 준하여 Akashi 社의 HM-122를 사용하여 미세 경도를 측정하였다. 하중 0.3kgf으로 10초간 압입하여 생긴 압흔의 면적을 측정하였으며, 표면 으로부터 깊이 20 μ m인 지점부터 약 800 μ m까지, 20 μ m 간격으로 측정하였다.

UNSM 처리 전후의 표면 특성 변화를 관찰하기 위해 주사전자현미경(Field emission scanning electron microscope, FE-SEM, MIRA3, TESCAN)과 3차원 표면조도 측정기 (Contour GT-X, Bruker)를 사용했다. 처리된 표면을 직사각형 0.63mm×0.45mm 면적만큼 측정했으며, 표면 거칠기 값은 Ra로 제시했다. UNSM 공정 조건을 적용한 모든 시험마다 임의로 표면 5곳을 측정한 뒤, 제곱평균제곱근(root mean square, RMS)값을 대푯값으로 선정하였다.

부식 특성 변화 관찰을 위해 처리된 시험편은 노출면적 10mm×10mm 만을 남기고, 나머지는 실리콘 수지로 절연 시켰다. 시험 용액은 3.5wt% NaCl 용액을 사용하였으며, 전기화학적 방법을 이용하여 부식전위(corrosion potential) 및 분극밀도(polarization potential)의 변화와 임피던스(impedance)를 측정하였다. 기준전극(reference electrode)은 포화 칼로멜 전극(saturated calomel electrode, SCE)을, 대극(counter electrode)은 백금을 사용하였다. 주사 속도(scan rate)는 5mV/s, 그리고 delay time은 1800 초, 포텐셜(V)의 범위는 -1.8~1.8V로 지정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 Surface topography

정적 하중과 경로 간격을 달리하여 UNSM 처리된 시험편과 처리 전 As-built 상태의 시험편을 Fig. 2에 나타내었다. As-built 상태의 거칠고 어두운 표면이 UNSM 처리에 의해 변화되었음을 표면의 색상으로부터 알 수 있으며, 각 조건에 따른 변화도 육안으로 관찰이 가능하다. Fig. 3은 UNSM 처리 전후 시

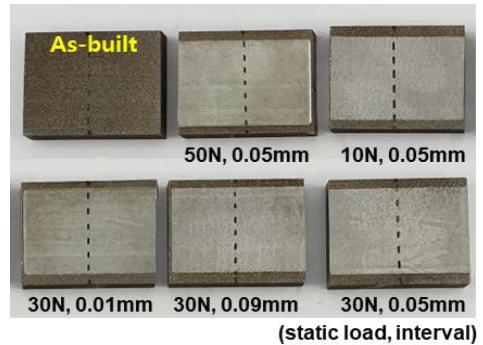


Fig. 2 Macro-images of as-built and UNSMed specimens with different conditions

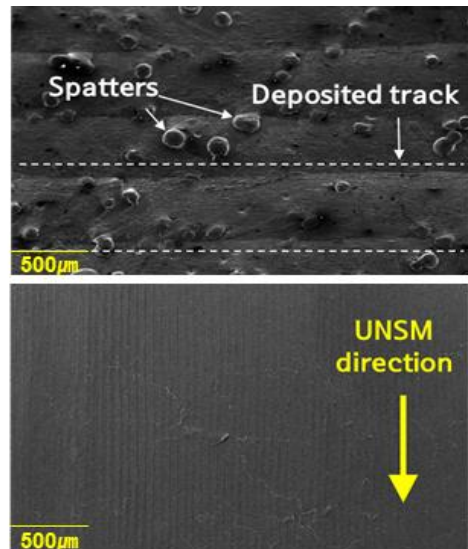


Fig. 3 SEM images of as-built (top) and UNSMed (bottom) surface

편의 표면을 주사전자현미경으로 관찰한 사진이다. PBF 공정에서는 레이저 빔의 조사(irradiation) 방향을 따라 용융풀과 적층 트랙이 형성된다. As-built 표면 사진에서와 같이 적층 트랙 방향을 따라 스패터(spatter)가 형성되어 있는 것을 볼 수가 있는데, 이는 분말 금속에 레이저가 조사되어 생성된 용융 풀의 불안정성에서 기인한다^[17]. 용융 풀 내부는 대류가 발생하여 순환하게 되는데^[18, 19], 이 때 용융 풀 내부에 잔존하는 증기의 압력에 의해 용융 금속 일부가 외부로 튀면서 그대로

응고되어 스페터를 형성한다. 때문에 적층 트랙과 그를 따라 형성된 스페터는 적층 표면 특성을 악화시키는 원인이 된다^[20].

이러한 불규칙한 As-built 상태의 표면에 존재하는 적층 트랙과 스페터는 볼 팁의 타격에 의해 소성 변형(plastic deformation)되어, 평탄화가 되었음을 알 수 있다. 적층 트랙과 스페터가 평탄화가 되는 과정에서, 볼 팁의 이송 간격과 동일하게 일정한 간격의 패턴으로 UNSM 흔적이 남아 있음을 확인할 수 있다. 상대적으로 낮은 경도와 높은 연신율을 가지는 소재가 볼 팁에 의해 타격되면, 타격에 의해 밀려난 소재는 외곽을 따라 소성 변형되어 Pile-up이 발생한다. 이러한 과정으로 볼 팁이 일정한 경로 간격으로 트랙을 형성하는 과정에서 파도형상 패턴(wave-like pattern)이 반복되어 나타나게 된다.

3.2 표면거칠기와 파상도

UNSM 공정 조건 중 정적 하중 조건이 적층 표면 개질에 미치는 영향을 알아보기 위해 정적 하중을 10N부터 50N까지 20N의 간격으로 UNSM을 적용하였다. 이 때, 경로 간격과 이송 속도 조건은 기본 조건인 $50\ \mu\text{m}$, $2500\text{mm}/\text{min}$ 이다. Fig. 4은 정적 하중에 따른 적층 표면의 상태를 광학현미경으로 관찰하여 나타낸 것이다. 그리고 Fig. 5은 UNSM 처리하지 않은 시편을 기준으로 각 조건에 따른 파상도와 표면 거칠기 변화를 보여준다. Fig. 4의 표면 사진에서 볼 수 있듯이, 경로 간격이 모두 동일하게 기본 조건 $50\ \mu\text{m}$ 으로 설정되었기 때문에 UNSM으로 생성된 마이크로 트랙의 간격은 $50\ \mu\text{m}$ 으로 동일하다. Fig. 4(a)는 정적 하중 10N일 때의 표면 특성이다. 전체적으로 표면의 굴곡이 심한 것을 보아, 정적 하중이 표면을 완만하게 개질하기에는 부족한 것으로 판단된다. 이는 Fig. 5에서의 파상도와 표면 거칠기 값으로도 확인할 수 있는데, UNSM 처리하지 않은 경우에 대해서 표면거칠기는 10N 하중 적용 시에 83.3% 향상되었으나, 파상도는 큰 변화가 없음을 알 수 있다. 즉, 정적 하중이 10N 조건은 다른 정적 하중 조건들에 비해 가장 적은 개선 효과를 보이고 있다. Fig. 4(b)는 정적 하중이 30 N인 경우의 표면 구조를 나타낸 것으로,

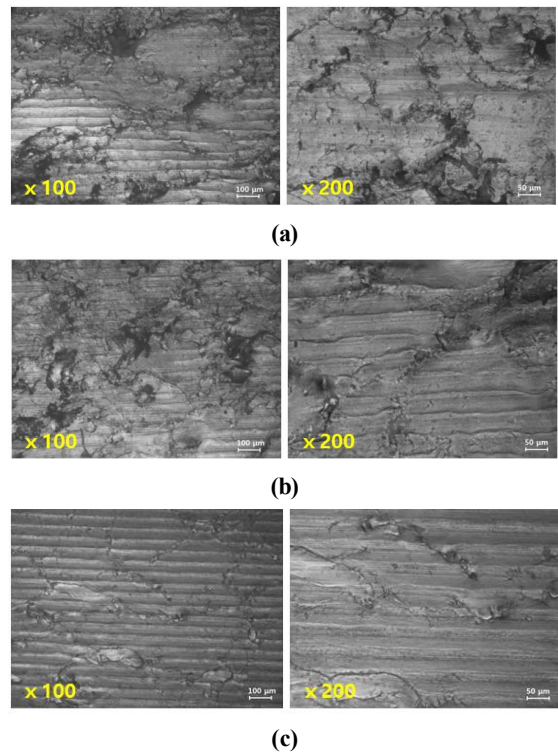


Fig. 4 Optical images of UNSMed surfaces with different loads: (a) 10N (b) 30N and (c) 50N

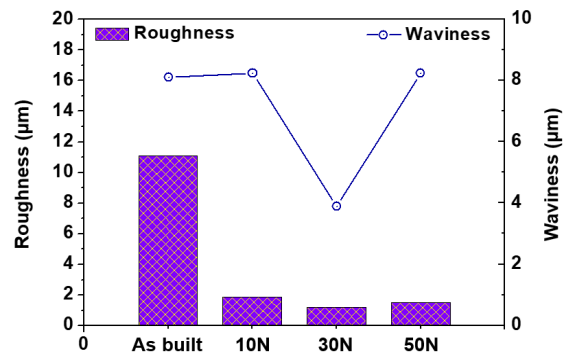


Fig. 5 Effects of static load on waviness and surface roughness of UNSMed surfaces

다른 정적 하중 조건보다도 표면이 고르게 개질되어 있는 것을 볼 수 있으며, 표면 거칠기와 파상도가 가장 낮은 것을 확인할 수 있다. 이에 비해 정적 하중 조건이 가장 큰 50N일 때는 적용 전에 비

해 86.5%의 개선된 표면거칠기를 보이고 있지만, 30N에 비해서는 소폭 상승하는 것을 알 수 있다. 한편, 30N에 비해 50N에서의 파상도는 처리 전의 수준과 유사하다. 이러한 결과들은 표면에 가해지는 정적 하중에 선형적으로 비례하여 표면이 개질되지 않는다는 것을 의미한다. 정적 하중에 비례하여 표면에 가해지는 총 하중의 크기도 증가하지만, 정적 하중이 특정 범위 이상으로 과도하게 커지게 되면 오히려 표면거칠기와 파상도 개선 정도가 감소하게 된다. 이는, 대상 소재의 종류와 특성에 맞도록 정적 하중의 설정이 중요함을 시사한다.

UNSM 공정 조건 중 경로 간격 조건이 적층 표면 개질에 미치는 영향을 알아보기 위해 정적 하중을 10 μm 에서부터 90 μm 까지 40 μm 의 간격으로 UNSM을 적용하였다. 이 때, 정적 하중과 이송 속도는 기본 조건인 30N과 2500mm/min이다. Fig. 6은 UNSM 경로 간격 조건에 따라 나타나는 표면의 형

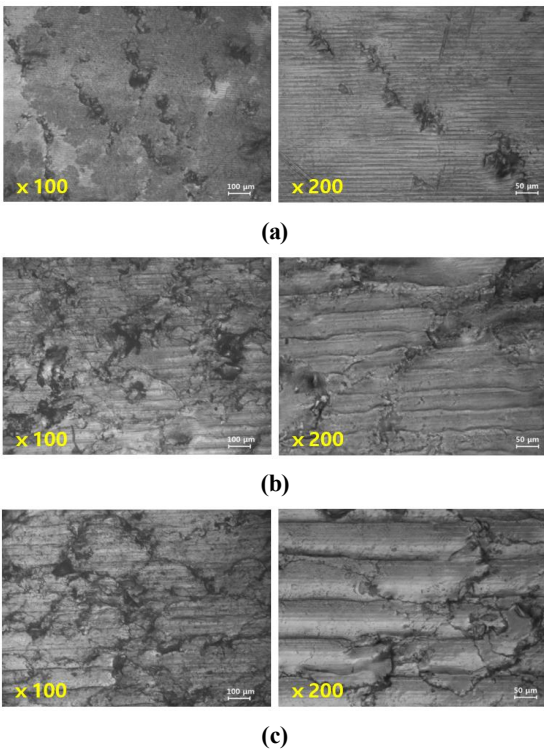


Fig. 6 Optical images of UNSMed surfaces with different intervals: (a) 10 μm (b) 50 μm and (c) 90 μm

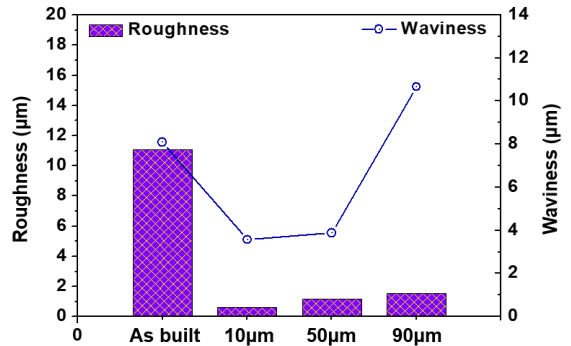


Fig. 7 Effects of static load on waviness and surface roughness of UNSMed surfaces

상을 나타낸 것이다. 표면에는 경로 간격 조건에 따라, 마이크로 트랙이 형성되어 있는 것을 확인할 수 있는데, 간격이 넓어질수록 마이크로 트랙의 폭이 넓어지게 된다. Fig. 7은 UNSM 처리하지 않은 경우를 기준으로 각 간격 조건에 따른 파상도와 표면 거칠기 변화를 보여준다. 조건 중 가장 낮은 간격 10 μm 에서 파상도와 표면 거칠기가 모두 낮게 나타난 것을 볼 수가 있는데, UNSM 처리하지 않은 경우보다 각각 56.0%, 94.5% 만큼의 개질 효과가 나타났다. 간격이 증가할수록 표면 구조가 비교적 불규칙적으로 나타나며, 파상도와 표면 거칠기가 상승하는 등의 표면 특성이 열악해지는 것을 알 수 있다. 이는 경로 간격이 넓어짐에 따라, 면적당 충돌 수가 감소하여 UNSM에 의한 표면 개질 효과도 점차 줄어들었기 때문이다.

3.3 경도

경도에 대한 UNSM 효과를 알아보기 위해 처리된 시편 단면에서의 깊이별 경도 분포(Fig. 8)를 확인하였다. 처리 전 SUS316L 모재 경도는 평균 230HV이다. 그림에 나타난 바와 같이, UNSM 처리에 의해 모재 표면부의 경도가 상승하였음을 확인할 수 있다. 이는 UNSM 볼 팁의 타격에 의해 결정립이 미세화되었으며, 이 과정에서 발생된 소성변형에 의해 전위 밀도가 증가한 결과라고 할 수 있다[9]. 또한, Fig. 8에 나타난 바와 같이 볼 팁에 의한 직접 접촉으로 타격되는 표면에서의 경도 상승이 가장 크게 나타나며, 하부로 내려 갈수

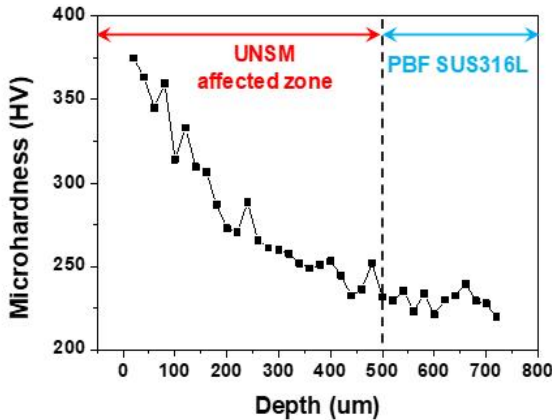
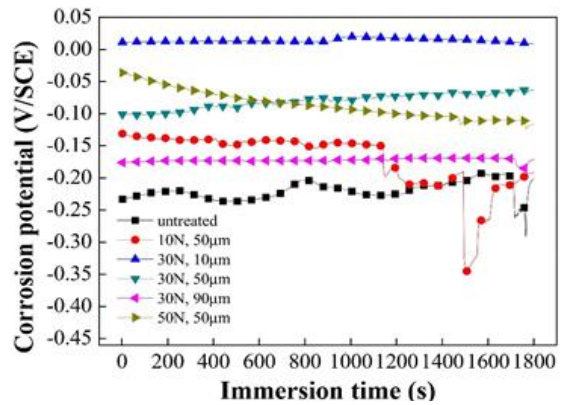


Fig. 8 Micro-hardness variation in vertical direction

록 정도가 감소하는 것을 알 수 있다. UNSM 처리에 의해 표면으로부터 깊이 약 500 μm 까지 정도가 향상되었으며, 그 이상 내려갈수록 효과는 나타나지 않고 처리 전의 정도와 동일하게 나타난다. UNSM 효과가 나타나는 깊이는 소재의 특성에 따라 다르게 나타나며, 연질 특성(ductility)이 큰 소재의 경우에는 UNSM에 의한 변형에너지가 더 깊은 영역까지 전달된다. 본 연구에서 사용된 SUS316L 소재의 경우에도 상대적으로 연성이 크기 때문에 평균 유효 깊이(200~300 μm)보다는 다소 깊은 영역까지 효과가 나타나고 있다.

3.4 부식시험

UNSM 처리된 표면이 내부부식에 미치는 영향을 알아보기 위해 전기화학적 방법으로 부식 시험을 실시하였다. 3.5wt% NaCl 용액에서 UNSM 처리 전후의 부식전위, 부식 전류 밀도, 임피던스의 변화를 측정하였으며, 그 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이, 처리 조건과 관계없이 UNSM 처리 후의 표면이 처리하지 않은 시편보다 부식 전위와 임피던스가 높게 나타나는 것을 알 수 있다. 내부부식이 높은 표면은 일반적으로 높은 부식 전위와 임피던스를 나타낸다. 따라서, UNSM 처리에 의해 표면의 내부부식이 증가함을 확인할 수 있었다. 한편, Fig.9(a)의 부식 전위를 비교해볼 때, 하중이 클수록 그리고 경로 간격이 작을수록 내부부식이 상대적으로 좋은 것으로 나타나고 있다. 하지만,



(a)

(b)

Fig. 9 (a) Corrosion potentials and (b) impedances of UNSMed specimens at 3.5wt% NaCl solution

Fig.9(b)의 임피던스 결과에서는 부식 전위 결과에서와 동일한 경향은 관찰되지 않는다.

일반적으로 해수 용액에서는 염소 이온에 의한 피막의 파괴에 의해서 양극분극이 감소되어 부식전위가 낮아지게 된다. 스테인리스강은 표면의 부동태 피막(passive film)에 의해 내식성이 뛰어난 금속으로 알려져 있다. 이 치밀한 부동태 피막이 파괴되면 피트(pit)가 형성되고 피트 내 용액 정체가 발생하며 용존산소가 고갈되고 양이온이 과다해지는 결과를 낳게 된다. 그 결과, 전하평형을 위해 염소 이온을 끌어들이어 HCl을 형성하는 것이 일반적인 스테인리스강의 부식 메커니즘이다. 이러한 부식 반응은 염소이온의 농도가 높거나 표면에 좁은 틈새

가 있는 경우에 더욱 가속화된다. 이를 막기 위해 합금 원소 Mo, Cr, Ni 등을 첨가하거나, 표면을 매끈하게 처리하여 내피트성을 증가시키기도 한다. 따라서, UNSM 처리 후의 표면거칠기가 내식성에 큰 영향을 미칠 것으로 예상할 수 있다. 하지만, 앞선 실험에서 하중 30N과 간격 10 μ m의 조건에서 가장 낮은 표면거칠기가 나타났지만, 이러한 경향이 내부식성 결과와 동일하게 나타나지는 않았다. 그리고, 부식 전위와 임피던스에서 조건 별로 다소 상이한 결과를 보이고 있다. 이러한 현상은 본 연구에서 사용한 하중과 간격 조건이 한정되어 있기 때문이며, 표면거칠기와 달리 UNSM 처리에 의해 표면에 불규칙하게 생성되는 다수의 피트도 원인이 될 수 있다. 또한 스테인레스강의 경우 처리 전에도 이미 높은 내식성을 가지고 있기 때문에 내부식성에 대한 경향을 관찰하기 위해서는 보다 높은 염도에서의 부식시험이 필요할 수도 있다.

4. 결 론

본 논문은 적층 제조된 SUS316L 소재의 표면 개질을 위한 UNSM 적용에 관한 연구이다. UNSM 효과를 알아보기 위해 처리 전후의 표면 특성, 경도 및 내부식성 변화를 살펴보았다. 실험을 통해 도출된 결론은 아래와 같다.

1. As-built 시편 표면의 적층 트랙과 스패터는 볼 탭의 타격에 의해 평탄화가 나타났으며, UNSM 처리 경로 간격과 동일하게 일정한 패턴을 가지는 규칙적인 표면으로 변화되었다. 하중과 경로 간격에 따른 파상도와 표면거칠기를 살펴본 결과, 경로 간 간격이 좁을수록 그리고 하중이 높을수록 파상도와 표면거칠기가 더욱 크게 개선되었다. 하지만 지나치게 높은 정적 하중을 적용할 경우에는 타격에 따른 표면 소재의 변형으로 오히려 파상도가 높아짐을 확인하였다.
2. UNSM 처리에 따른 경도 변화 관찰 결과, 처리 후 표면에서의 경도가 상승하였으며, 표면으로부터 약 500 μ m의 깊이까지 그 효과가 나타남을 확인하였다.

3. 부식 시험 결과, UNSM 처리 후의 내부식성이 처리 전에 비해서 향상되는 것을 확인하였다. 하지만, 하중 그리고 경로 간격에 따른 내식성 변화를 살펴보기 위해서는 다양한 처리 조건 및 부식시험 조건에서의 추가 실험이 필요할 것으로 판단된다.

Reze et al. [21]에 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. 본 논문의 실험에서 UNSM 후 표면거칠기가 처리 조건에 따라 달라지는 것을 확인할 수 있었다. 이와 같은 결과로부터, 내마모성과 내부식성 향상을 위해서는 경도와 함께 표면거칠기를 동시에 개선시킬 수 있는 소재별 UNSM 처리 조건에 대한 최적화가 필요함을 확인할 수 있었다.

한편, SUS316L의 표면거칠기와 내부식성 간의 상관 관계가, 한정된 UNSM 조건, 피트 생성, 낮은 염도 등의 원인으로, 명확히 규명되지 않았다. 향후에는 다양한 UNSM 조건과 부식 환경에서 피막 파괴 및 피트 생성을 관찰하기 위한 실험과 분석 연구를 진행할 계획이다.

후 기

“이 논문은 2020년도 한국연구재단(과제번호: 2017R1C1B5076047)과 한국에너지기술연구원 에너지자원기술개발사업(과제번호: 2018201010633B)의 연구비 지원에 의하여 연구되었음.”

REFERENCES

1. Kumar, D., Idapalapati, S., Wang, W., Narasimalu, S., “Effect of surface mechanical treatments on the microstructure-property-performance of engineering alloys,” *Materials*, Vol. 12, No. 16, pp. 2503, 2019.
2. Klotz, T., Delbergue, D., Bocher, P., Levesque,

- M., Brochu, M., "Surface characteristics and fatigue behavior of shot peened Inconel 718," *International Journal of Fatigue*, Vol. 110, pp. 10-21, 2018.
3. Kumar, D., Idapalapati, S., Wei, W., "Microstructural response and strain hardening in deep cold rolled nickel-based superalloy for aerospace application," *CIRP Ann-Manuf. Techn.*, Vol. 71, pp. 374-379, 2018.
 4. Liu, G., Lu, J., Lu, K., "Surface nanocrystallization of 316L stainless steel induced by ultrasonic shot peening," *Material Science & Engineering A*, Vol. 286, pp. 91-95, 2000.
 5. Zhang, X. C., Zhang, Y. K., Lu, J. Z., Xuan, F. Z., Wang, Z. D., Tu, S. T., "Improvement of fatigue life of Ti-6Al-4V alloy by laser shock peening," *Material Science & Engineering A*, Vol. 527, pp. 3411-3415, 2010.
 5. Amanov, A., Cho, I. S., Kim, D. E., Pyun, Y. S., "Fretting wear and friction reduction of CP titanium and Ti-6Al-4V alloy by ultrasonic nanocrystalline surface modification," *Surface and Coating Technology*, Vol. 207, pp. 135-142, 2012.
 7. Cao, X. J., Pyoun, Y. S., Murakami, R., "Fatigue properties of a S45C steel subjected to ultrasonic nanocrystal surface modification," *Appl. Surf. Sci.*, Vol. 256, pp. 6297-6303, 2010.(doi.org/10.1016/j.apsusc.2010.04.007)
 8. Telang, A., Gill, A. S., Tammana, D., Wen, X., Kumar, M., Teyseyre, S., Vasudevan, V. K., "Surface grain boundary engineering of Alloy 600 for improved resistance to stress corrosion cracking," *Material Science & Engineering A*, Vol. 648, pp. 280-288, 2015.
 9. Amanov, A., Cho, I. S., Pyoun, Y. S., Lee, C. S., Park, I. G., "Micro-dimpled surface by ultrasonic nanocrystal surface modification and its tribological effects," *Wear*, Vol. 286-287, pp. 136-144, 2012.
 10. Cho, I. H., Song, G. H., Kim, C. S., Nobuhide, A., Combs, A., Park, J., Pyoun, Y. S., "Nano structured surface modification of tool steel and its beneficial effects in mechanical properties," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 19, No. 11, pp. 2151-2156, 2005.
 11. Han, C. H., Phyoun, Y. S., & Kim, C. S., "Ultrasonic micro-burnishing in view of eco-materials processing," *Advances in Tech. of Mater. and Mater. Proc. J.*, Vol. 4, no. 1, pp. 25-28, 2002.
 12. Ma, C., Dong, Y., Ye, C., "Improving surface finish of 3D-printed metals by ultrasonic nanocrystal surface modification," *CIRP Ann-Manuf. Techn.*, Vol. 45, pp. 319-322, 2016.
 13. Ma, C., Andani, M. T., Qin, H., Moghaddam, N. S., Ibrahim, H., Jahadakbar, A., Dong, Y., "Improving surface finish and wear resistance of additive manufactured nickel-titanium by ultrasonic nano-crystal surface modification," *Journal of Materials Processing and Technology*, Vol. 249, pp. 433-440, 2017.
 14. Zhang, H., Chiang, R., Qin, H., Ren, Z., Hou, X., Lin, D., Ye, C., "The effects of ultrasonic nanocrystal surface modification on the fatigue performance of 3D-printed Ti64," *International Journal of Fatigue*, Vol. 103, pp. 136-146, 2017.
 15. Cho, I. S., Lee, C. S., Choi, C. H., Lee, H. G., Lee, M., Jeon, Y., "Effect of the ultrasonic nanocrystalline surface modification (UNSM) on bulk and 3D-printed AISI H13 tool steels," *Metals*, Vol. 7, No. 11, pp. 510, 2017.
 16. Song, R. B., Xiang, J. Y., Hou, D. P., "Characteristics of mechanical properties and microstructure for 316L austenitic stainless steel," *Journal of iron and steel research, international*, Vol. 18, pp. 53-59, 2011.
 17. Khairallah, S. A., Anderson, A. T., Rubenchik, A., King, W. E., "Laser powder-bed fusion additive manufacturing: Physics of complex melt flow and formation mechanisms of pores, spatter, and denudation zones," *Acta Mater.*, Vol. 108,

pp. 36-45, 2016.

18. Li, Y., & Gu, D., "Thermal behavior during selective laser melting of commercially pure titanium powder: Numerical simulation and experimental study," *Additive Manufacturing*, Vol. 1-4, pp. 99-109, 2014.
19. Zheng, L., Zhang, Q., Cao, H., Wu, W., Ma, H., Ding, X., Fan, S., "Melt pool boundary extraction and its width prediction from infrared images in selective laser melting," *Materials & Design*, Vol. 183, 108110, 2019.
20. Li, C., Guo, Y. B., Zhao, J. B., "Interfacial phenomena and characteristics between the deposited material and substrate in selective laser melting Inconel 625," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 243, pp. 269-281, 2017.
21. Gheisari, R., Andreas, A. Polycarpou., "Three-body abrasive wear of hard coatings: Effects of hardness and roughness," *Thin Solid Films*, Vol. 666, pp. 66-75, 2018.