



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](#)

2022년 2월  
석사학위논문

# 표면 피닝된 Al 6061 합금의 잔류응력 변화 연구

조선대학교 대학원

첨단소재공학과

허 채 을

# 표면 피닝된 Al 6061 합금의 잔류응력 변화 연구

Variation in Residual Stress of Surface peened Al 6061  
Alloy

2022년 2월 25일

조선대학교 대학원

첨단소재공학과

허 채 을

# 표면 피닝된 Al 6061 합금의 잔류응력 변화 연구

지도교수 김 정 석

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함.

2021년 10월

조선대학교 대학원

첨단소재공학과

허 채 을

## 허채을의 석사학위 논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 김희수 (인)

위원 조선대학교 교수 김선중 (인)

위원 조선대학교 교수 김정석 (인)

2021년 12월

조선대학교 대학원

## 목 차

LIST OF TABLES .....	iv
LIST OF FIGURES .....	v
ABSTRACT .....	viii
제 1 장 서 론 .....	1
제 2 장 이론적 배경 .....	4
제 1 절 잔류응력 .....	4
제 2 절 표면 처리 종류와 원리 .....	7
1. 쇼트 피닝 .....	7
2. 레이저 쇼크 피닝 .....	9
3. 초음파 피닝 .....	11
제 3 장 실험방법 .....	13
제 1 절 시험편의 화학적 조성 .....	13
제 2 절 피닝 처리 .....	13
제 3 절 미세구조 분석 .....	18

제 4 절 기계적 특성 평가 .....	19
제 5 절 잔류응력 측정 .....	19
제 6 절 부식 특성 평가 .....	20
제 4 장 연구 결과 및 고찰 .....	21
제 5 장 결 론 .....	45
참 고 문 헌 .....	46

## LIST OF TABLES

<b>Table 3. 1.</b> Chemical compositions of the alloys used in this study. ....	13
<b>Table 3. 2.</b> Chemical compositions of the shot balls used in this study. ....	13
<b>Table 3. 3.</b> Peening condition. ....	15
<b>Table 3. 4.</b> Peening condition for specimens. ....	15
<b>Table 4. 1.</b> Peak shifting and peak broadening in (311) planes of XRD plot after peening .....	22
<b>Table 4. 2.</b> Measured residual stress and FWHM by cos $\alpha$ method .....	25
<b>Table 4. 3.</b> Surface height parameters. ....	34
<b>Table 4. 4.</b> Surface roughness parameters. ....	34
<b>Table 4. 5.</b> The average value of current density, corrosion potential and corrosion rate of peening methods. ....	44



## LIST OF FIGURES

<b>Fig. 2. 1.</b> Residual stress distribution weled specimen after ultrasonic peening.	6
<b>Fig. 2. 2.</b> S-N curves for un-peened and shot peening specimen. ....	6
<b>Fig. 2. 3.</b> Schematic shot peening process. ....	8
<b>Fig. 2. 4.</b> Variation of compressive residual stress to depth of SP-treated and welded specimens. ....	8
<b>Fig. 2. 5.</b> Schematic of laser shock peening process. ....	10
<b>Fig. 2. 6.</b> Comparison of residual stress field induced by LSP and SP in Al7075-T7351. ....	10
<b>Fig. 2. 7.</b> Principle of ultrasonic peening. ....	12
<b>Fig. 2. 8.</b> Schematic of ultrasonic peening. ....	12
<b>Fig. 3. 1.</b> Shot peening equipment. ....	16
<b>Fig. 3. 2.</b> Laser shock peening equipment. ....	16
<b>Fig. 3. 3.</b> Ultrasonic peening equipment. ....	17
<b>Fig. 4. 1.</b> XRD patens of the Al 6061: (a) X-ray diffraction profile at each peening methods and (b) diffraction peak of (311) crystal plane showing clear peak shift. ....	23

**Fig. 4. 2.** Debye ring at each surface peening methods:(a) un-peened, (b) shot peening 40 m/s, (C) laser shock peening 4 GW/cm<sup>2</sup> and (d) ultrasonic peening 50 %. ..... 25

**Fig. 4. 3.** Debye ring for grain size. .... 25

**Fig. 4. 4.** Optical micrographs of cross sectional (x200): (a) un-peened sample (b) shot peening 40m/s sample (c) laser shock peening 4GW/cm<sup>2</sup> sample (d) ultrasonic peening 50 % sample. .... 27

**Fig. 4. 5.** Schematic illustration of the grain refinement process of peening samples. .... 28

**Fig. 4. 6.** Cross-sectional inverse pole figure maps (EBSD) to demonstrate the microstructure of (a) un-peened sample (b) shot peening 40 m/s sample (c) ultrasonic peening 50 % sample. .... 29

**Fig. 4. 7.** Cross sectional kernel average misorientation maps (EBSD) to demonstrate the microstructure of (a) un-peened sample (b) shot peening 40 m/s sample (c) ultrasonic peening 50 % sample. .... 29

**Fig. 4. 8.** Surface morphology (x55) of Al 6061 specimens: (a) un-peened, (b) shot peening 40 m/s, (C) laser shock peening 4 GW/cm<sup>2</sup> and (d) ultrasonic peening 50 %. .... 32

**Fig. 4. 9.** Surface morphology (x500) of Al 6061 specimens : (a) un-peened, (b) shot peening 40 m/s, (C) laser shock peening 4 GW/cm<sup>2</sup> and (d) ultrasonic peening 50 %. .... 33

**Fig. 4. 10.** 3D surface topography(600 μm x 600 μm). .... 35

**Fig. 4. 11.** Extracted profile of surface roughness: (a) un-peened, (b) shot peening 40 m/s, (C) laser shock peening 4 GW/cm<sup>2</sup> and (d) ultrasonic peening 50 %. ..... 36

**Fig. 4. 12.** Profile of surface roughness: (a) un-peened, (b) shot peening 40 m/s, (C) laser shock peening 4 GW/cm<sup>2</sup> and (d) ultrasonic peening 50 %. .... 36

**Fig. 4. 13.** Variation of residual stress from surface to depth. .... 38

**Fig. 4. 14.** Variation of micro-Vickers hardness from surface to depth. .... 41

**Fig. 4. 15.** Variation of nano indentation hardness from surface to depth. .... 41

**Fig. 4. 16.** Polarization curves of peening methods. .... 44

# Abstract

## Variation in Residual Stress of Surface Peened Al 6061 Alloy

By Chae-Eul Huh

Advisor: Prof. Chung-Seok Kim Ph. D.

Dept. of Advanced Parts & Materials Engineering

Graduate School of Chosun University

Residual stress is the stress that remains in materials after original causes of the stress have been removed, such as tensile stress and compressive stress. Tensile residual stresses are highly likely to promote fatigue failure by small scratches, but compressive residual stresses have the effect of preventing fatigue failure by increasing rigidity. Therefore, the mechanical surface hardening method is used to locally plastically deform the area near the surface to generate compressive residual stress to improve the properties of the surface layer and the life of the material.

Types of failure such as fatigue, wear, corrosion and erosion originate at the material surface, and the structure and properties of the surface greatly affect the material. Therefore, by using the surface deformation machining process as the peening process, a beneficial compressive residual stress is applied to the material of the mechanical structures to improve the performance and life of the material. Various peening techniques have been developed to create microcrystalline structures with improved mechanical properties by converting the coarse grain structure of bulk materials into fine grains without changing the overall chemical composition of the material.

However, since a long time ago, the uncertain effect of fatigue properties

and the deterioration of the lifespan of the material frequently occur due to the indiscriminate peening and under-peening and over-peening process, and some side effects have been reported.

As such, the peening process imparts beneficial compressive residual stress to the mechanical structures to improve the material performance and lifespan, or to improve the corrosion resistance by improving the metal flow, pore closure, and the density of the material. However, by reducing the compressive residual stress through the peening process that is not suitable for the material, it not only reduces the life of the material, but also causes surface depression, peeling, and cracking, which can adversely affect the corrosion properties. There are many studies that compare and evaluate various characteristics through variables such as peening process time and peening process intensity. But, most studies correlating the characteristics according to the effect of residual stress are lacking, and studies comparing and evaluating various peening processes are also lacking. Therefore, in the present study, shot peening, laser shock peening and ultrasonic peening were performed on the commercially available surface of 6061 aluminum alloy to compare and evaluate the effect and characteristics of residual stress.

Shot peening, laser shock peening, and ultrasonic peening of Al 6061 alloy were subjected to microstructure analysis through X-ray diffraction analysis, SEM, and EBSD. Also, surface roughness measurement and residual stress measurement were performed. For mechanical properties, micro Vickers hardness machine and nano indentation were used. Electrochemical polarization corrosion test was achieved to evaluate the corrosion properties.

All specimens peened by plastic surface processing increased the FWHM of the (311) diffraction plane by X-ray diffraction, and the peak shifted to a lower angle. This is due to the grain refinement and increase in lattice defects caused by local plastic deformation and the effect of compressive residual stress, which is supported by the Debye ring, optical micrographs and EBSD analysis.

Although a large compressive residual stress was generated in the surface layer due to the peening process, shot peening showed -23 MPa, unlike laser

shock peening and ultrasonic peening, which showed compressive residual stresses of -117 MPa and -180 MPa near a depth of about 600  $\mu\text{m}$ .

Laser shock peening and ultrasonic peening showed higher hardness values than un-peened specimens even at a depth of 1 mm, unlike shot peening, which showed a sharp decrease in hardness, indicating a plastic region deeper than 1 mm due to peening.

All the peened specimens showed excellent corrosion resistance than the un-peened specimens, which seems to be the effect of the compressive residual stress generated in the surface layer. Among the peened specimens, the shot peened specimen had the low corrosion resistance, which is due to the effects of rough surface roughness and surface defects.

## 제 1 장 서 론

잔류응력은 기계 설비나 구조물에 외력이 작용하지 않는 상태에서, 그 구조물 내에 존재하는 응력으로써 열처리 공정, 용접 공정, 기계적인 가공 공정에 의하여 재료의 내부에 생성되는 응력이며, 또한 기계적인 작업에 따라서 상당히 큰 인장 잔류응력이나 압축 잔류응력이 남아있다. 압연, 단조, 절삭, 소성 가공, 도금, 용접 등의 급격한 환경 변화와 구조물의 운전 중 가동 조건에 의하여 발생되며, 기계요소나 구조물의 파괴와 피로 수명, 취성파괴, 응력 부식 균열에 영향을 미치므로 구조물의 수명과 안정성에 상당한 영향을 주게 된다[1]. 구조물에 존재하는 잔류응력에는 인장과 압축 잔류응력으로 인장 잔류응력은 작은 흠집이 피로파괴를 촉진시킬 가능성이 크지만, 압축 잔류응력은 강성을 증가시켜 피로파괴를 방지하는 효과가 있다. 따라서 기계적 표면 경화법을 이용하여 표면 근처 영역을 국부적으로 소성 변형하여 압축 잔류응력을 생성해 표면층의 특성과 재료의 수명을 개선하는 방법을 사용하고 있다.

피로, 마모, 부식 및 침식과 같은 유형의 파괴는 재료 표면에서 시작되며 표면의 구조와 특성은 재료 수명에 영향을 크게 미친다. 따라서 쇼트 피닝(Shot peening), 오일 제트 피닝(Oil jet peening), 레이저 쇼크 피닝(Laser shock peening) 및 초음파 피닝(Ultrasonic peening)과 같은 피닝 공정으로 표면 변형 가공 공정을 사용하여 기계 구조물 재료에 유익한 압축 잔류응력을 부여하여 재료의 성능과 수명을 증가시킨다. 다양한 피닝 기술이 개발되어 재료에 전체 화학 조성을 변경하지 않은 상태에서 벌크 재료의 조대한 결정립 구조를 미세한 결정립으로 변환함으로써 기계적 특성이 개선된 미세 결정 구조를 생성한다[2,3]. 쇼트 피닝은 볼을 금속 표면에 투사해서 표면에 순간적으로 소성변형을 주는데 이때 가공물의 표면은 압축 잔류응력이 생기고, 내부에는 인장 잔류응력이 생기게 되어 외력에 의한 인장이 반복적으로 작용하더라도 표면의 압축 잔류응력이 소모될 때까지는 해당 가공물의 피로 수명을 연장하여 피로 강도 및 피로 수명을 증가시키는 방법으로 잘 알려져 있다[4]. Chen 등은 Al 6061-T6 시편에 쇼트 피닝을 하여 표면층의 압축 잔류응력이 크게 향상되었으며, 표면에 평균 결정립 크기가 100 nm 미만인 나노 구조 층이 생성되어 경도가 향상되었음을 보여주었다[5]. 레이저 쇼크 피닝은 높은 강도로 표면에 펄스가 부딪히고 충격파가 생성되는 공정이다. 이러한 파동은 표면을 소성 변

형시키고 압축 잔류응력은 표면 이후에 영역으로 확장된다[6,7]. Park 등은 AC8A 판재에 레이저 쇼크 피닝을 하여 표면 경도가 22 % 증가했으며, 레이저 쇼크 피닝된 표면의 마찰 계수는 피닝 되지 않은 샘플보다 현저히 낮았으며 마모로 인한 질량 손실이 94 % 감소했다고 밝혔다[8]. 초음파 피닝은 쇼트 피닝과 유사한 원리이며, 볼 대신 팁을 사용하여 초음파 진동을 이용해 시편에 진동을 일으켜 시편 표면에 압축 잔류응력을 생기게 하여 잔류응력을 개선할뿐더러 피로 강도를 향상시킬 수 있다. Xing 등은 SLM(Selective Laser Melting)을 적용한 12AlSi10Mg 시편을 초음파 피닝하여 표면 경도를 약 20 % 향상시켰으며 압축 잔류응력이 1.5 - 2 mm의 깊이로 도달하였다. 또한, 표면에 소성변형이 발생하여 금속 유동과 기공 폐쇄로 인해 다공성을 줄이고 재료의 밀도를 향상시킴으로써 시편의 응력 부식 저항성 향상에 기여했다고 밝혔다[9]. Mordyuk 등은 AISI-321 스테인리스강에 초음파 피닝을 통한 SPD(Severe Plastic Deformation)에 의해 나노 결정 표면층이 생성되었음을 보여주었고, 미세 경도는 결정립 조직의 미세화 공정과 상관관계가 있는 것을 나타내었으며, 결정립 조직의 미세화에 의해 부식 전위를 현저하게 증가시킬 뿐만 아니라 전류 밀도를 감소시키는 것을 보여주었다[10]. Bae는 AH21 강재의 용접부에 초음파 피닝법을 적용한 연구를 하였는데 용접부에 약 1.5 mm까지 표면 압축 잔류응력이 측정되었으며 피로 수명을 연장하기 위해 용접 부위에 많이 쓰이는 도우 그라인딩 법에 비해 초음파 피닝을 한 시편의 피로 수명이 더 향상되었고 해수 환경에서의 부식 특성 또한 개선한 결과를 보여주었다[11].

그러나 오래전부터 무분별한 피닝 가공 공정에 의한 피로 특성의 불확실한 효과 및 언더 피닝(Under peening), 오버 피닝(Over peening)으로 오히려 재료의 수명 악화가 빈번히 발생하여 일부 부작용들도 보고되고 있다[12]. Pandey 등은 Al 7075 합금에 초음파 피닝 시간이 증가함에 따른 잔류응력 측정 및 부식 특성에 관해 연구를 하였는데, 300초 초음파 피닝한 시편의 압축 잔류응력이 300초 미만으로 피닝한 시편보다 월등히 높았지만, 300초 초음파 피닝한 시편의 표면에서는 표면 함몰과 박리 및 균열이 보였고 부식 특성 또한 300초 미만으로 피닝한 시편보다 좋지 않았다[13]. Suh 등은 Al7075-T651 재의 쇼트 피닝 압력 변화에 따른 피로 특성에 관한 연구를 하였으며, 쇼트 피닝을 하지 않은 시편과 압력 변화를 주어서 비교하였을 때 35 psi의 표면 경도가 쇼트 피닝을 하지 않은 시편보다 14.3 % 증가하였고, 15 psi는 11.2 % 증가하였으며 다른 시편보다 깊이 방향으로 200  $\mu$ m까지 경도가 높았다. 하지만 피로 수명은 25 psi가 쇼트 피닝을 하지 않은 시편보다



피로 수명이 약 50배 정도로 가장 크게 증가하였고, 15 psi와 35 psi는 약 10배 정도 증가하였으며 15 psi, 25 및 35 psi로 처리된 표면은 쇼트 볼의 충격으로 표면상의 SPD와 표면경화로 인해 쇼트 피닝을 하지 않은 시편과 5 psi 및 10 psi와 달리 표면에서 다수의 작은 표면 피로균열이 발생, 성장, 합체하여 피로 파단 되었다 [14]. Moon는 Al 6061 합금에 쇼트 볼의 투사 속도와 노출 시간을 변수로 하여 쇼트 피닝에 관한 연구를 하였으며, 쇼트 볼의 투사 속도와 노출 시간이 경과할수록 결정립이 미세화되었지만 노출 시간 12분 이후에는 경도와 압축 잔류응력이 감소하였으며, 투사 속도가 증가할수록 경도는 증가하였으나 압축 잔류응력은 감소했다고 보고하였다[15].

이처럼 피닝 가공 공정을 통해 기계 구조물 재료에 유익한 압축 잔류응력을 부여하여 재료의 성능과 수명을 증가시키거나 금속 유동과 기공 폐쇄와 재료의 밀도를 향상함으로써 부식 저항성을 향상시키는 등의 좋은 영향을 미칠 수 있지만, 재료에 맞지 않는 피닝 가공 공정을 통해 압축 잔류응력을 감소시켜 재료의 수명을 저하시킬 뿐만 아니라 표면 함몰과 박리 및 균열을 일으켜 부식 특성에 악영향을 줄 수 있다. 피닝 공정 시간과 피닝 공정 세기와 같은 변수를 통해 여러 특성을 비교 평가한 연구들은 많지만, 잔류응력 영향에 따른 특성을 연관 지은 연구는 부족하며, 여러 피닝 가공 공정을 비교 평가한 연구 또한 부족하다. 따라서 구조 부품, 프레임, 파이프라인, 저장 탱크, 항공기, 자동차, 고속 열차 및 조선 산업에 빈번하게 상용화되는 알루미늄 6061 합금 표면에 쇼트 피닝, 레이저 쇼크 피닝 및 초음파 피닝을 하여 잔류응력의 영향과 미세구조 분석, 기계적 특성, 부식 특성을 비교평가하였다.

## 제 2 장 이론적 배경

### 제 1 절 잔류응력

잔류응력(Residual stress)이란 외부 힘이나 열의 영향이 없는 상태에서 제조 및 재료 가공 후 재료 내에 남아있는 응력이다[15]. 이 잔류응력은 불균일한 영구변형을 하는 부재에서 발생한다. 이러한 영구변형은 일반적으로 소성변형(Plastic defomation)에서 발생한다. 그러나 입자의 질화(Nitriding), 탄화(Caburizing), 상변화(Phase Transformation)에 의한 금속 격자의 국소 수축이나 팽창 때문에 발생할 수도 있다. 특히 용접 구조물에서 발생하는 잔류응력은 용접부의 수축 및 변형이나 크랙을 발생시켜 결과적으로 파괴의 주원인이 될 수도 있다. 따라서 잔류응력 문제를 해결하기 위해서는 잔류응력을 측정하여 잔류응력이 어떻게 분포되며, 그 크기는 얼마인지에 대한 명확한 정보를 알아야 하며, 최소한의 크기로 이완시켜 주거나 적절한 대응책을 연구하여야 할 필요성이 있다.

특히 발전설비와 같은 중요 설비에서는 구조물, 재료 등의 여러 가지 결함을 가져올 수 있는 인자를 탐지하여 안전성 및 신뢰성을 향상시키는 것이 중요하며, 산업 구조 설비의 대형화, 대용량화에 따라 이러한 설비들의 관리능력을 향상시키기 위해 잔류응력 측정 및 이와 같은 기술의 중요성은 날로 증가하고 있다[1].

Fig. 2. 1.는 AH32 강재의 용접 부위에 초음파 피닝 전과 후의 깊이 방향으로의 잔류응력 분포를 그래프로 나타내었는데, 용접부에 인장 잔류응력이 분포되어 있는데 이러한 표면의 인장 잔류응력은 균열의 발생과 발생된 균열의 진전에 큰 영향을 미치는 인자가 된다. 이러한 인자를 제거하기 위해 표면에 역으로 압축 잔류응력을 부가하여 균열 발생의 균열 진전의 억제 효과를 줄 수 있도록 초음파 피닝을 용접 부위에 처리를 하였는데 약 1.5 mm까지 높은 표면 압축 잔류응력이 측정되어 인장이 표면에 반복적으로 작용하더라도 표면의 압축 잔류응력이 감소할 때까지 피로 수명이 길어진다[11]. Fig. 2. 2. 는 Al 7075-T6 합금에 쇼트 피닝한 시편과 피닝 하지 않은 시편의 피로 특성을 알기 위한 S-N 선도를 구하기 위해 회전 굽힘 피로 시험을 하여 피로 강도를 측정된 것이며, S-N 선에서  $1 \times 10^7$  사이클을 기준으로 해서 쇼트 피닝 전과 후의 시험편을 비교해 보면 쇼트 피닝 처리한 시편

의 피로 한도는 약 315 MPa이고 일반 시편의 피로 한도는 약 206 MPa 로서 약 52 % 피로 한도가 증가하였다[16].

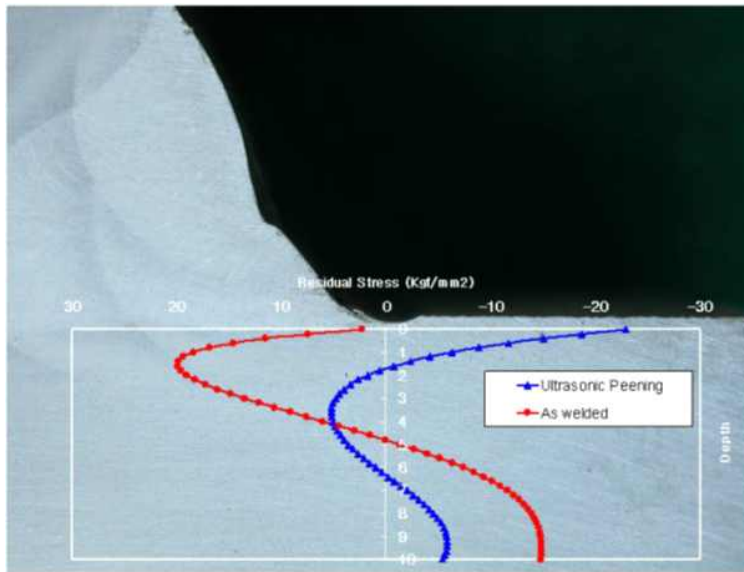


Fig. 2. 1. Residual stress distribution welded specimen after ultrasonic peening[11].

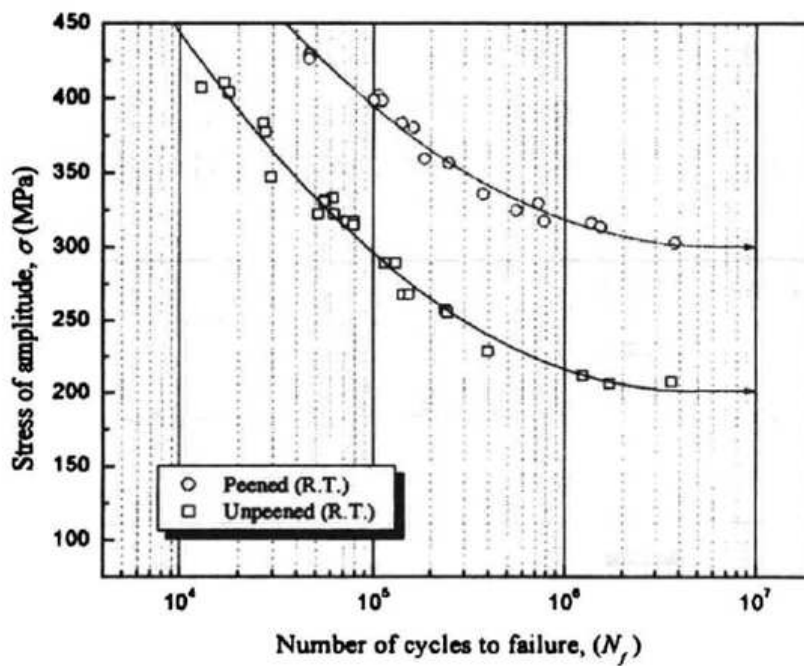


Fig. 2. 2. S-N curves for un-peened and shot peening specimen[16].

## 제 2 절 표면 처리 종류와 원리

### 1. 쇼트 피닝(Shot peening)

금속 부품의 표면에 쇼트 볼(shot ball)이라는 강구를 고속으로 금속의 표면에 투사하여 금속의 표면을 해머 링(hammering) 하는 일종의 냉간가공이다. 쇼트 피닝은 강철, 세라믹 또는 유리와 같은 단단한 재료로 만들어진 볼이 금속 표면을 고속으로 타격하게 되는데 타격 후 탄성 응력을 받는 영역은 완전히 하중을 받지 않은 상태로 회복되는 경향이 있지만, 소성 변형된 영역은 약간의 영구변형이 유지된다[17]. 이 소성 변형 층은 변형 전의 상태로 유지하려는 반력이 작용하게 되어 표면에는 압축 잔류응력, 내부에는 인장 잔류응력을 갖고 평형을 이룬다[18]. 레이저 쇼크 피닝 공정의 개략도는 Fig. 2. 3에 나타내었다. 쇼트 볼 충돌에 의한 압축 잔류응력의 크기는 가공조건에 따라 차이는 있지만, 일반적으로 표면에서 깊이 0.15 - 0.25 mm 정도에 분포된다. 결국 쇼트 피닝 가공으로 재료의 표면에 압축 잔류응력을 남게 함으로써 피로 수명이 연장된다[19,20]. 하지만, 처리된 층의 두께와 재료의 거동이 균일하지 않으며 얇은 재료와 날카로운 모서리가 공정에 의해 변형될 수 있다.

Fig. 2. 4는 깊이 방향으로의 잔류응력을 Al 2219 합금에 직경이 0.8 mm인 쇼트 볼과 1.2 mm인 쇼트볼로 쇼트 피닝한 시편을 용접된 시편과 비교한 그래프이며, 용접후에 남아있는 인장 잔류응력이 쇼트 피닝으로 인해 제거되고 압축 잔류응력이 500 - 700  $\mu\text{m}$ 의 깊이까지 형성되어 있는 것을 볼 수 있었다[21].

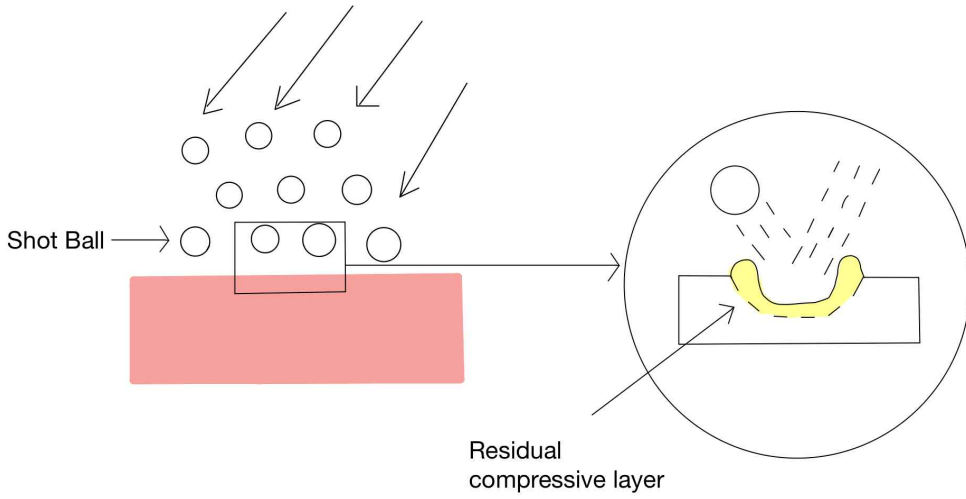


Fig. 2. 3. Schematic shot peening process.

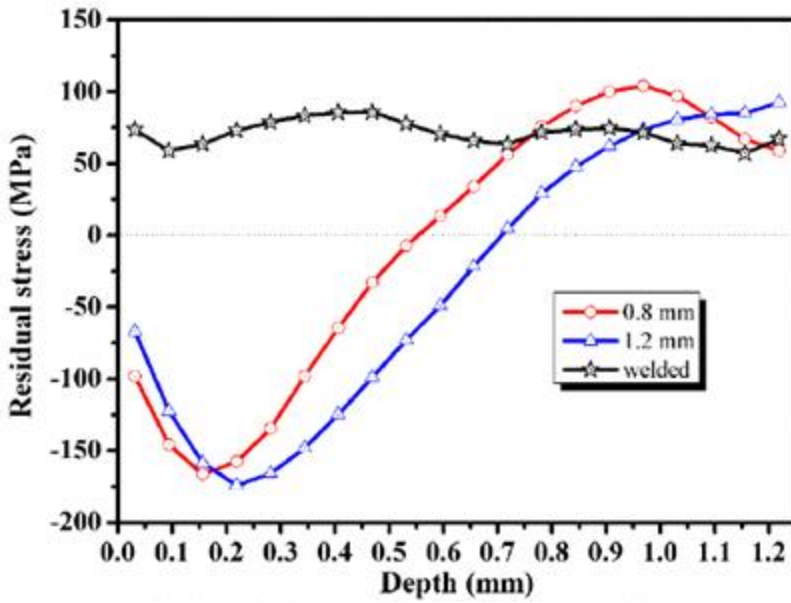


Fig. 2. 4. Variation of compressive residual stress to depth of SP-treated and welded specimens[21].

## 2. 레이저 쇼크 피닝(Laser shock peening)

높은 피크 출력의 단 펄스 레이저를 재료에 조사하면 재료의 표층이 플라즈마화 되고, 표면에 고압의 플라즈마가 발생한다. 이때 그림과 같이 레이저 간섭 층(물 등)이 존재하면 간섭 층은 플라즈마의 팽창을 방해하기 때문에 좁은 영역에 레이저 에너지가 집중된다. 그에 따라서 발생하는 GPa 급의 강도에 달하는 플라즈마의 압력에 의해 충격파가 발생하고 재료 내부로 전파된다. 이 충격파에 의해서 금속 표면에 국부적인 소성변형이 발생하고 주위의 미변형 부에 의해 구속을 당함으로써 재료의 표면에 압축 잔류응력이 형성된다. 소성변형에 의한 압축 잔류응력은 피로 강도를 높여 응력부식균열의 방지, 피로균열의 진전 방지 등에 상당히 유효하다 [22,23]. 레이저 쇼크 피닝 공정의 개략도는 Fig. 2. 5에 나타내었다. 레이저 쇼크 피닝은 처리 깊이가 깊지만, 공정이 비싸고 종종 넓은 영역을 처리하기엔 너무 느리며 공정 매개변수를 제어하기에 다소 어렵다. 또한 운영을 위해서는 고급 설치 및 깨끗한 환경이 필요하다.

Fig. 2. 6은 깊이 방향으로의 잔류응력을 Al 7075 합금에 레이저 쇼크 피닝을 사용한 시편과 쇼트 피닝을 한 시편을 비교한 그래프를 보여주고 있으며, 쇼트 피닝을 한 시편의 압축 잔류응력의 깊이는 약 250  $\mu\text{m}$ 로 얇은 깊이를 보여주지만, 레이저 쇼크 피닝한 시편의 압축 잔류응력 깊이는 약 950  $\mu\text{m}$ 에서도 약 -100 MPa를 보이며 깊은 압축 잔류응력을 보였다[24].

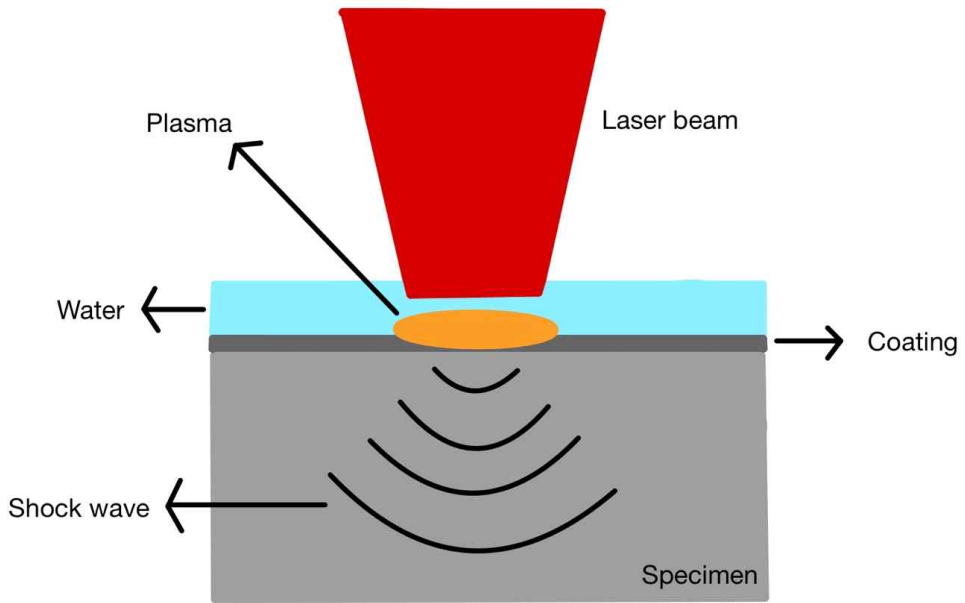


Fig. 2. 5. Schematic of laser shock peening process.

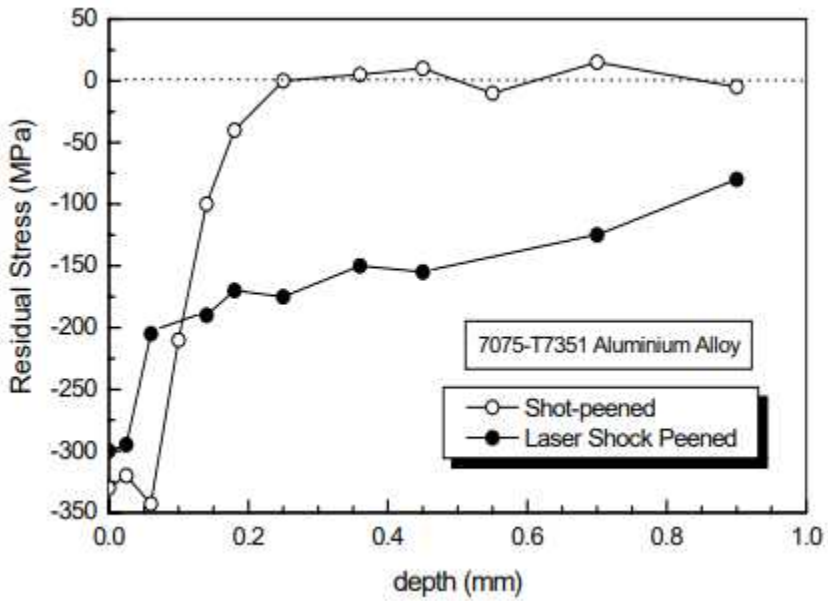


Fig. 2. 6. Comparison of residual stress fields induced by LSP and SP in Al 7075-T7351[24].



### 3. 초음파 피닝(Ultrasonic peening)

초음파 피닝 시스템에서 전기 신호는 초음파 발생기에 의해 생성된 압전 변환기에 의해 기계적 진동으로 변환된다. 이 기계적 진동은 sonotrode에 의해 증폭되고 고주파 피닝을 발생하기 위해 바늘을 구동하는 데 사용된다. 초음파 진동이 원통형 팁(바늘)을 통해 재료 표면에 적용된다. 초음파 피닝의 원리는 Fig. 2. 7에 나타내었다. 표면층은 소성변형을 받아 표면의 미세 균열이 닫히며 해로운 인장 잔류응력이 효과적으로 제거되고, 압축 잔류응력 층이 재료 표면에 가해진다. 초음파 피닝 공정의 개략도는 Fig. 2. 8에 나타내었다. 다른 기술과 비교하면 초음파 피닝은 형상에 구애받지 않으면서도 균일한 처리가 가능하고, 높은 생산성, 저렴한 비용, 경량 부품으로 더 나은 이동성 및 다양한 태도와 청결 상태에서 다양한 유형의 작업에 대한 우수한 유연성을 포함하여 많은 이점을 가질 수 있다[25]. 일반적인 쇼트 피닝 공정과 비교하여 초음파 피닝은 단단한 볼과 운동 에너지로 인해 표면 영역에서 더 큰 깊이로 소성변형 및 압축 잔류응력을 유도한다. 또한, 높은 변형률에서 강한 소성변형으로 인해 초음파 피닝의 표면 영역에서 매우 미세한 결정립 구조가 생성되어 결정립 조직의 미세화에서 나노 규모 및 압축 잔류응력의 도입에 이르기까지 금속 및 합금의 피로에서 내식성과 균열 발생에 대한 저항에 긍정적인 영향을 미친다[26].

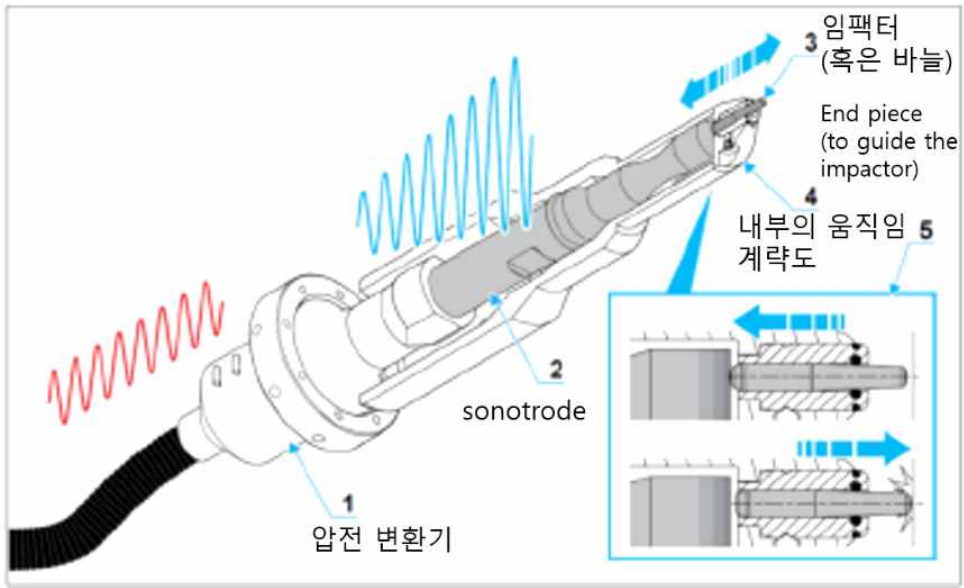


Fig. 2. 7. Principle of ultrasonic peening[27].

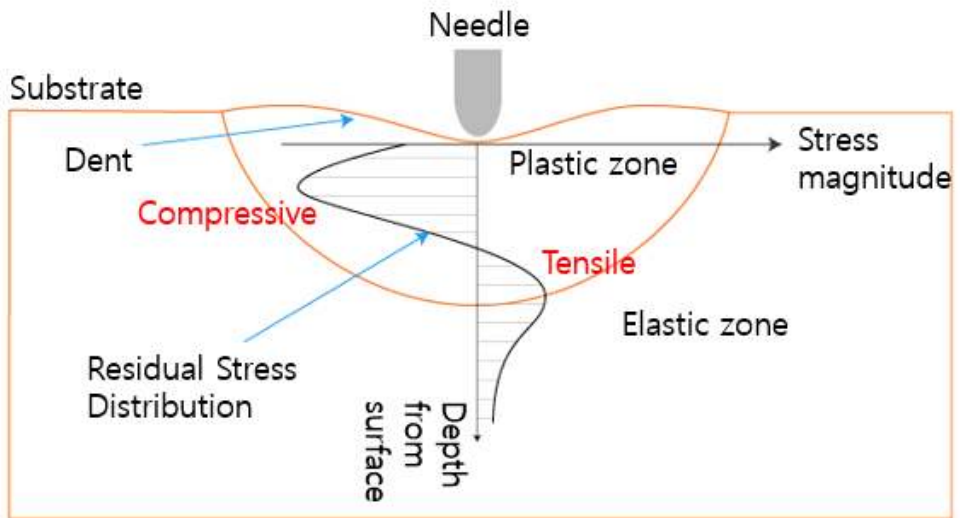


Fig. 2. 8. Schematic of ultrasonic peening.

## 제 3 장 실험 방법

### 제 1 절 시험편의 화학적 조성

본 연구에서는 Al 6061-T6를 사용하였으며 100 mm x 50 mm x 5 mm의 바 형태로 가공되었다. 합금의 조성은 표와 같다.

Table. 3. 1. Chemical compositions of the alloys used in this study.

	(wt%)								
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
Al 6061	0.725	0.223	0.302	0.071	0.992	0.165	0.033	0.023	Bal.

### 제 2 절 피닝 처리

쇼트 피닝 장비로는 공기압을 사용하여 투사하는 방식인 에어 브라스트(SAB-T-1 N)를 사용되었으며 사용된 쇼트 볼은 Steel Cut Wire Shot(SPCCW)를 사용하였으며 직경은 0.8 mm이다. 쇼트 볼의 경도는 약 633 HV이며 성분은 Table. 3. 2와 같다. 노출 시간은 6분으로 고정하고 투사 속도를 변수로 하여 40 m/s로 쇼트 피닝 하였다.

Table. 3. 2. Chemical compositions of the shot balls used in this study.

	(wt%)					
	C	S	Mn	Si	P	Fe
SPCCW 08	0.83	0.004	0.67	0.24	0.01	Bal.

레이저 쇼크 피닝 장비로는 고주파 Nd:YAG 레이저(Continum, Powerlite Precision II; wavelength = 532 nm, beam diameter = 11 mm, overlapping ratios = 50 %)가 사용되었고, 레이저 쇼크 피닝 동안 노즐을 사용하여 수층을 생성하여 플라즈마 압력의 소실을 줄였다. 레이저 빔의 크기를 조절하는 방식으로 에너지 밀도를 조절하여  $4\text{GW}/\text{cm}^2$  의 세기에서 수행되었다. 레이저 빔은 X-Y모터 구동형 정밀 이송 장치를 사용하여 시편을 이송하면서 레이저 빔이 조사되도록 하였다. 보호 코팅으로는 알루미늄 호일(GoodFellow; 두께 = 100  $\mu\text{m}$ , 순도 = 99 %)을 시편에 접착하여 실험을 진행하였다.

초음파 피닝 장비로는 NOMAD(SONAT)를 사용되었다. Sonotrode에서 20 kHz의 초음파가 송출되었으며 Impactor의 직경은 3 mm이다. 초음파 피닝 시간을 2분으로 하고 진폭을 50 %로 한 시편을 제작하였다.

피닝 처리 조건에 대한 정리는 다음 표에 나타내었다.

Table. 3. 3. Peening condition.

Shot Peening	Laser shock peening	Ultrasonic peening
Air blast(sstblast, SAB-T-1N) Steel Cut wire shot ball(633Hv, diameter 0.8 mm) Coverage 100 % Peening time: 6 min Ball velocity: 40 m/s	Nd:YAG Laser(Continum, Powerlite Precision II;wavelength = 532 nm, laser spot size = 1.64 mm, overlapping ratios = 50 %) Protective coating : aluminium hoil Laser intensity: 4 GW/cm <sup>2</sup>	(SONAT, NOMAD; ultrasonic frequency 20 kHz, impactor diameter 3 mm) Peening time: 2 min Amplitude: 50 %

Table. 3. 4. Peening condition for specimens.

SP			LSP		UP		
Specimen name	Speed (m/s)	Peening time (min)	Specimen name	Laser intensity (GW/cm <sup>2</sup> )	Specimen name	Ultrasonic amplitude (%)	Peening time (min)
SP40m/s	40	6	LSP4GW/cm <sup>2</sup>	4	UP50%	50	2



Fig. 3. 1. Shot peening equipment.

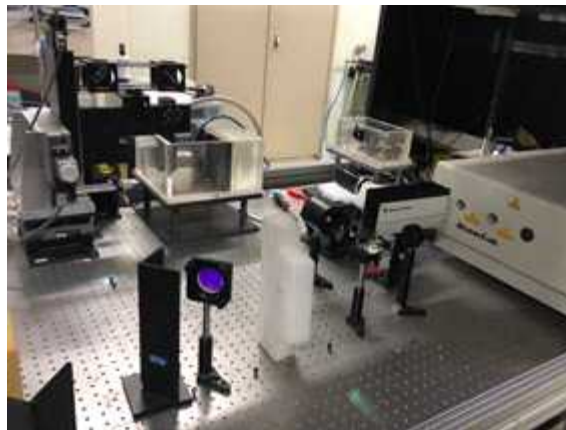


Fig. 3. 2. Laser shock peening equipment.



Fig. 3. 3. Ultrasonic peening equipment[28].

### 제 3 절 미세구조 분석

피닝된 시편의 표면 미세구조 분석을 위해 X선 회절 분석을 수행하였다. X선 회절기(Panalytical, Multipurpose X-ray Diffractometer)를 이용하여 20°에서 100°까지 스캔 간격은 0.02°로, 유지 시간 1 s 2θ스캔으로 수행하였다. X선은 CuKα 타겟 조건으로 전류 30 mA, 튜브 전압을 40 kV로 설정하였다.

미세 조직 분석을 위해 피닝된 시험편으로부터 잔류응력에 영향이 가지 않도록 단면의 미세구조를 관찰하기 위해 시험편에 A2 reagent(Ethanol 683 ml + 2-Butoxyetanol 91 ml + Dist. water 137 ml + Perchloric acid 60 % 75 ml) 용액으로 상온에서 40 V, 50초 전해 연마한 후 Keller's reagent(Nitric acid 25 ml + Hydrochloric acid 15 ml + Hydrofluoric acid 10 ml + Dist. water 50 ml)을 사용하여 에칭 후 광학 현미경(Optical Microscope, Zeiss, AXIO Vert.A1)으로 단면의 미세구조를 관찰하였고, 시편의 단면을 마운팅 한 후 #220에서 #4000까지 SiC Paper로 연마 후 알루미나 페이스트 1 μm를 이용하여 미세 연마 작업을 하였다. 그리고 colloidal silica 용액으로 진동 연마를 1시간 한 후, 후방산란 전자회절(Electron Backscatter Diffraction, JEOL, JSM-7100F)을 사용하여 x 550 배율로 시편 단면의 미세조직을 관찰하였다.

피닝에 따른 재료의 표면 미세조직 변화를 알아보기 위해 주사 전자현미경(Scanning Electron Microscope, AIS 2000C)으로 관찰하였다. 피닝 처리한 시편의 표면을 관찰하기 위해 연마하지 않고 관찰하였다.

표면 조도는 공초점 현미경(3D Surface Confocal Laser Scanning Microscope, Carl Zeiss)으로 사용하였으며 x 10배율로 측정하여 600 μm x 600 μm 면적의 표면 조도를 측정하였다.



## 제 4 절 기계적 특성 평가

피닝된 시편의 깊이 방향으로의 기계적 특성을 평가하기 위해 경도 시험을 수행하였다. 경도 시험은 피닝된 시편의 표면을 깊이 방향으로 전해 연마를 해가면서 깊이당 5번 측정하여 평균값을 내었다. 정밀한 경도 측정을 위하여 미소 비커스 경도 시험기(Simadzu, HMV-G)를 사용하였다. 시험 중 하중 시간은 5 s로, 압입 하중은 100 g으로 수행하였다.

나노 인텐테이션(Micro Materials, NanoTest NTX)으로 측정한 경도 시험은 시편의 단면에서 표면에서 깊이 방향으로 측정하였으며, 깊이당 3번 측정하여 평균값을 내었다. 시험 중 하중 시간은 10 s로, 압입 하중은 3 g으로 수행하였다.

## 제 5 절 잔류응력 측정

피닝에 따른 재료의 깊이 방향으로의 잔류응력의 변화를 비교하기 위해 잔류응력 측정용 X선 회절기(Stresstech, XSTRESS 3000 G2)를 사용하여 피닝 시편 표면에 깊이 방향으로 전해 연마를 하면서 잔류응력을 측정하였다. CrK $\alpha$  방사선을 사용하여 튜브 전압은 30 kV에 전류는 7 mA로 설정하였다.  $\sin^2\psi - 2\theta(d)$ 를 플롯 하여 이때의 기울기를 잔류응력 값으로 계산하였다.

$\cos^2\alpha - \epsilon$ (비틀림)를 플롯 하여 이때의 기울기를 잔류응력 값으로 산출하는 잔류응력 측정용 X선 회절기(PULSTEC,  $\mu$ -360s)를 사용하여 피닝 시편의 표면의 잔류응력을 측정하였다. CrK $\alpha$  방사선을 사용하였으며 튜브 전압은 30 kV에 전류는 1.5 mA로 설정하였다.

## 제 6 절 부식 특성 평가

부식 특성을 평가하기 위해 전기화학적 분극 실험을 수행하였으며 standard three-electrode system(WonAtech, ZIVE SP 1)를 사용했다. 피닝 된 시편의  $1 \text{ cm}^2$  면적으로 노출된 작업 전극과 기준 전극으로는 포화 칼로멜 전극을 사용하였고 보조 전극으로는 백금 와이어를 사용하였다. 모든 부식 실험은 실온에서 3.5 % NaCl 용액으로 수행하였다. 실험은 SM6 프로그램을 사용하였으며 전위 범위는  $-1 \text{ Vsce} \sim 1 \text{ Vsce}$ 로 지정되었으며 열린 회로를 이용하였다. 스캔 속도는  $1 \text{ mV/s}$ , 전류(I) 범위는  $10 \text{ mA}$ , 실험 시간은 약 30분이다.

## 제 4 장 실험 결과 및 고찰

### 제 1 절 미세구조 평가

Fig. 4. 1. (a)는 피닝되지 않은 시편과 다양한 방법으로 피닝된 시편의 X선 회절 분석 결과이다. X선 회절 분석 결과, 다양한 격자 면의 알루미늄 피크를 보여주고 있다. Fig. 4. 1. (b)는 (311) 면을 확대한 결과이며 피닝된 시편의 피크가 피닝되지 않은 시편의 피크보다 저각으로 이동된 것을 한눈에 볼 수 있다. Table 4. 1. 은 (311) 면의 피닝되지 않은 시편을 기준으로 피닝된 시편들의 피크 이동 정도와 반치폭(Full-width half maximum)의 증가 정도를 보여주고 있다. (311) 면을 확대해 보았을 때, 피닝된 시편들의 반치폭이 피닝되지 않은 시편보다 증가된 것을 볼 수 있다. 이는 소성변형으로 인한 표면층의 결정립 미세화로 예측할 수 있다. 또한 피닝된 시편들의 피크들이 피닝되지 않은 시편의 피크에서 저각으로 이동된 것을 보아 표면층의 압축 잔류응력으로 인한 면간거리 감소의 영향으로 보인다. X선 회절 분석에서 반치폭의 증가는 소성변형으로 인한 결정립 크기 감소의 결과이며 피크의 이동은 피닝으로 인한 원자 수준의 격자 변형의 증가에 기인하게 된다[29,30]. 피닝된 시편들의 저각으로의 이동 정도를 보면 레이저 쇼크 피닝이 가장 컸으며 쇼트 피닝, 초음파 피닝 순서였고 반치폭의 증가 정도는 쇼트 피닝이 가장 컸으며 레이저 쇼크 피닝, 초음파 피닝 순서였다. X선 회절 분석으로 보았을 때, 표면 압축 잔류응력의 정도는 레이저 쇼크 피닝한 시편이 가장 클 것으로 예상되며, 쇼트 피닝한 시편, 초음파 피닝 시편 순서로 클 것으로 보인다. 또한, 표면 결정립의 크기는 쇼트 피닝한 시편이 미세할 것으로 예상되며, 레이저 쇼크 피닝한 시편, 초음파 피닝한 시편 순서로 작을 것으로 보인다.

Table. 4. 1. Peak shifting and peak broadening in (311) planes of XRD plot after peening.

Lattice plane(hkl)	Peening type	Peak position (2 $\theta$ ) (degrees)	FWHM (degrees)	Peak shifting	Increase ment in FWHM
(311)	Un-peened	78.46	0.11	-	-
	SP	78.23	0.35	0.22	0.25
	LSP	78.13	0.19	0.33	0.22
	UP	78.29	0.31	0.17	0.21

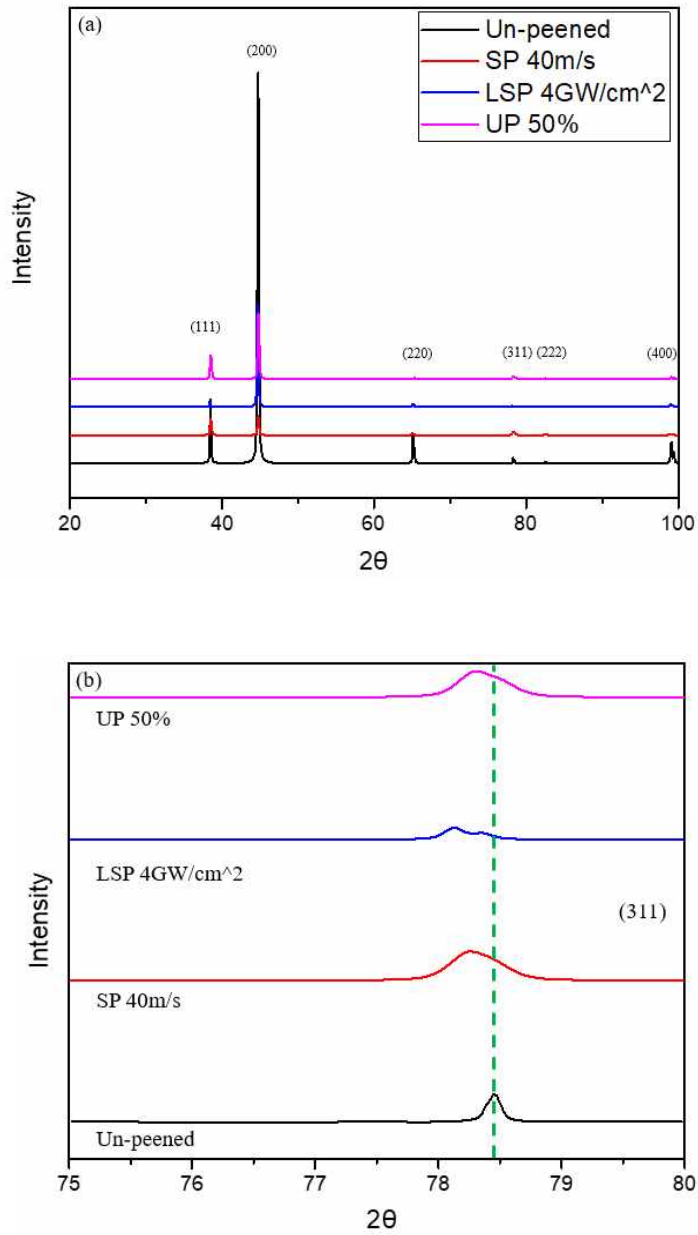


Fig. 4. 1. XRD patterns of the Al 6061: (a) X-ray diffraction profile at each peening methods and (b) diffraction peak of (311) crystal plane showing clear

Table. 4. 2는  $\cos \alpha$ 법을 사용한 잔류응력 측정용 X선 회절 분석 통해 측정된 표면 잔류응력과 반치폭 수치를 보여주고 있으며, Fig. 4. 3은  $\cos \alpha$ 법을 사용한 잔류응력 측정용 X선 회절 분석 통해 나타난 회절 면의 피크를 2D 데바이 고리 (Debye ring)와 3D 데바이 고리로 보여주고 있고, 바깥쪽 링은 (311) 면, 안쪽 링은 (222) 면이다. Table. 4. 2에서 피닝 된 시편 모두 피닝 되지 않은 시편의 표면 압축 잔류응력보다 높았으며, 레이저 쇼크 피닝 된 시편의 압축 잔류응력이 -123 MPa로 피닝 된 시편들과 비교했을 때 높았고 초음파 피닝 된 시편, 그리고 쇼트 피닝 된 시편 순서였다. 반치폭은 쇼트 피닝 된 시편이  $2.2^\circ$ 로 피닝 된 시편과 비교했을 때 컸으며, 레이저 쇼크 피닝 된 시편, 초음파 피닝 된 시편 순서였다. Fig. 4. 2는 측정된  $2\pi$  면적의 데바이 고리를 보여주고 있는데 쇼트 피닝 된 시편의 데바이 고리를 보면 Fig. 4. 3의 표면에 균일하고 미세한 결정립일 때의 데바이 고리를 나타내는 것처럼 (311) 면의 회절 세기가 균일하고 높게 올라온 것을 볼 수 있으며 (222) 면 또한 조금 올라왔다.  $2\pi$  면적 안에 결정립들이 많이 있다는 것을 의미하고 이는 결정립들이 미세하다는 것으로 볼 수 있다. 한편, Fig. 4. 2에서 레이저 쇼크 피닝 된 시편과 초음파 피닝 된 시편의 데바이 고리를 보면 Fig. 4. 3의 불균일하고 조대한 결정립일 때의 데바이 고리를 나타내는 것처럼 (311) 면의 회절 세기가 균일하지 않고 일부분만 올라왔다.  $2\pi$  면적 안에 결정립들이 많이 있지 않다는 것을 의미하며, 피닝 하지 않은 데바이 고리와 비교했을 때 조대한 결정립과 미세한 결정립들이 불균일하게 분포하는 것으로 볼 수 있다.

Table. 4. 2. Measured residual stress and FWHM by cos a method.

Peening methods	Residual stress(MPa)	FWHM (degrees)
Un-peened	-23	1.9
SP 40m/s	-99	2.2
LSP 4GW/cm <sup>2</sup>	-123	2.1
UP 50%	-106.5	2

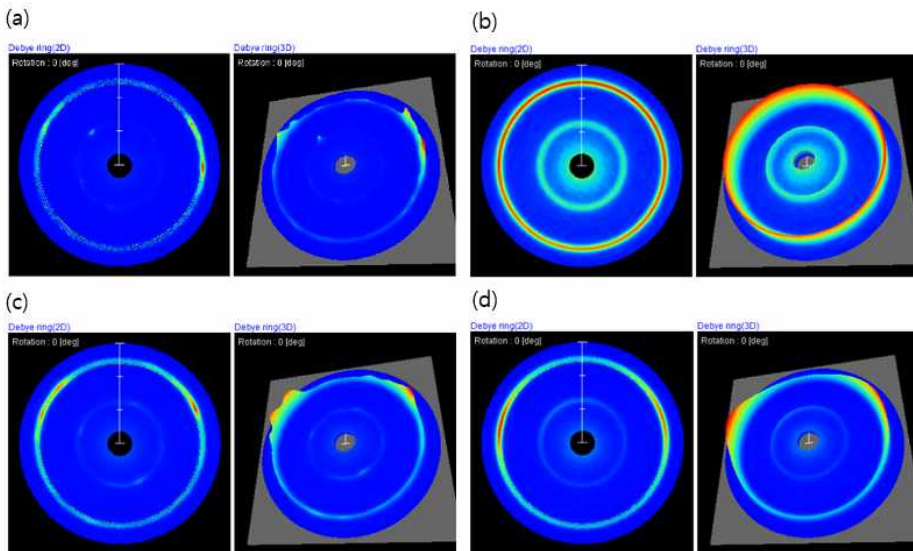


Fig. 4. 2. Debye ring at each surface peening methods: (a) un-peened, (b) shot peening 40m/s, (C) laser shock peening 4GW/cm<sup>2</sup> and (d) ultrasonic peening 50 %.

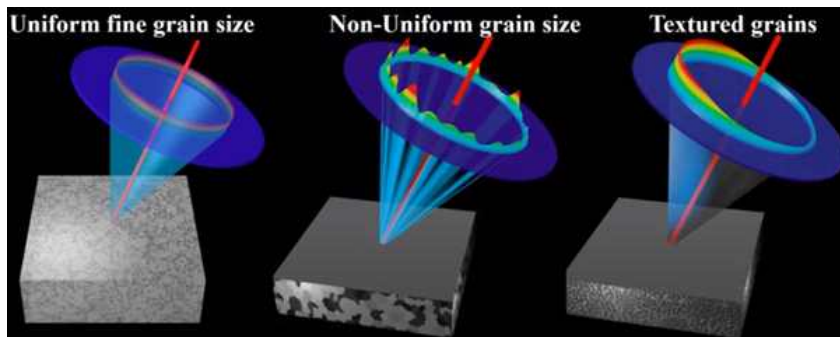


Fig. 4. 3. Debye ring for grain size[31].

Fig. 4. 4. 는 시편의 단면을 광학 현미경으로 관찰한 사진이다. Fig. 4. 4. (a)는 피닝되지 않은 시편으로 Al 6061 합금의 길고 조대한 결정립을 가지는 미세조직을 보여주고 있고, 쇼트 피닝된 시편인 Fig. 4. 4. (b)는 화살표로 표시한 부분인 표면층에 쇼트 피닝으로 인해 생긴 변형된 미세조직을 보여주었다. 레이저 쇼크 피닝된 시편인 Fig. 4. 4. (c)는 피닝되지 않은 시편의 길고 조대한 결정립의 미세조직과는 달리 동그랗고 작은 결정립을 갖는 미세구조를 볼 수 있었다. Fig. 4. 4. (d)는 초음파 피닝된 시편의 미세조직인데 시편 표면의 함몰이 단면의 미세조직을 관찰한 광학 현미경 사진에서 발견할 수 있었다. 피닝된 시편들은 표면층에 변형된 미세조직을 보였으며 특히 레이저 쇼크 피닝된 시편과 쇼트 피닝된 시편에서 볼 수 있었다. 피닝가공으로 변형된 미세조직으로 발달하게 되는 개략도를 Fig. 4. 5.에 나타내었다. 표면에 피닝을 하면서 충돌이 전위 면 및 크로스 슬립을 따라 전위 이동을 초래하게 되면서 조대한 결정립에 고밀도의 전위가 형성하게 되는데, 소성 변형의 정도가 증가하면 원래 조대한 결정립의 입계를 형성하던 고밀도의 전위는 소멸되고 다중 전단 밴드, 결정입계에서의 전위 축적 및 전위 형성이 된다. 전체 에너지를 최소화하기 위해 특정 응력 수준에서 전위 엉킴이 발생하며 이 전위 엉킴이 전위 소멸 및 재배열이 되는데, 이는 결정립을 분리하는 아입계(Subboundary)로 변형되어 아결정립(Subgrain)을 형성한다. 이러한 아결정립은 여전히 고밀도의 전위를 포함하고 아결정립에서 전위 발달은 추가 입자 미세화로 이어지게 된다[32].

Fig. 4. 6.는 시편의 단면을 후방 산란 전자 회절(Electron Backscatter Diffraction)로 IPF(Inverse Pole Figure) map으로 나타낸 것이며, Fig 4. 5.는 시편의 단면을 KAM(Kernal Average Misorientation) map으로 나타낸 것이다. Fig 4. 4.에서 시편의 단면인 IPF 맵을 보았을 때, 아랫부분은 시편 표면을 의미하며, 표면에서 약 70  $\mu\text{m}$  안의 결정립의 크기를 보았을 때 Fig. 4. 4.의 광학 현미경의 사진처럼만큼의 변형된 미세조직은 아니지만, 쇼트 피닝된 시편을 나타내는 (b)와 초음파 피닝된 시편을 나타내는 (c)에서 피닝 되지 않은 시편보다 작은 결정립이 표면에 있는 것을 볼 수 있다. 특히 쇼트 피닝이 초음파 피닝된 시편과 비교했을 때 극 표면 부 결정립이 작았다. 또한, Fig. 4. 7.의 KAM 맵에서 응력이 없다는 걸 보여주는 파란색에서 응력이 있다는 걸 보여주는 초록색이 피닝 하지 않은 시편인 (a)와 달리 피닝한 시편인 (b)와 (c)에서는 극 표면 부를 나타내는 아랫부분에 있는 걸 볼 수 있었는데 이는 피닝된 시편의 극 표면에 소성변형으로 인해 전위 밀도가 높은 것을 확인할 수 있다.



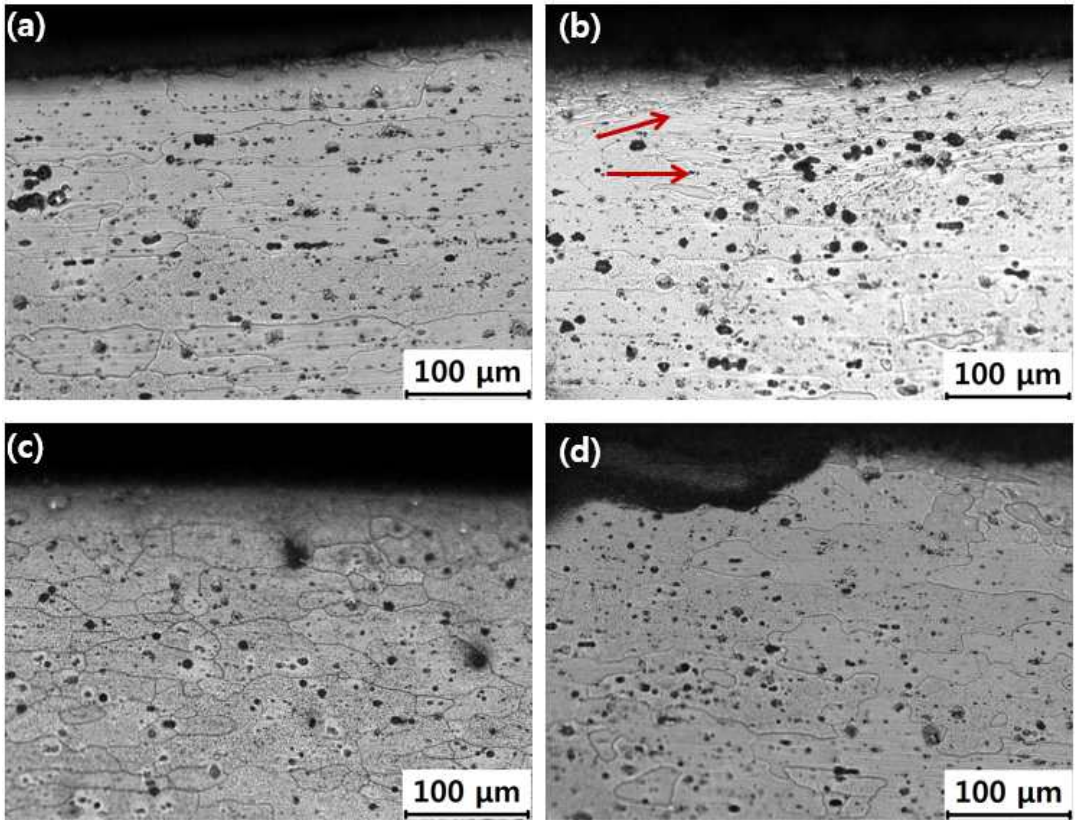


Fig. 4. 4. Optical micrographs of cross sectional (x200): (a) un-peened sample, (b) shot peening 40 m/s sample, (c) laser shock peening  $4\text{GW}/\text{cm}^2$  sample and (d) ultrasonic peening 50 % sample.

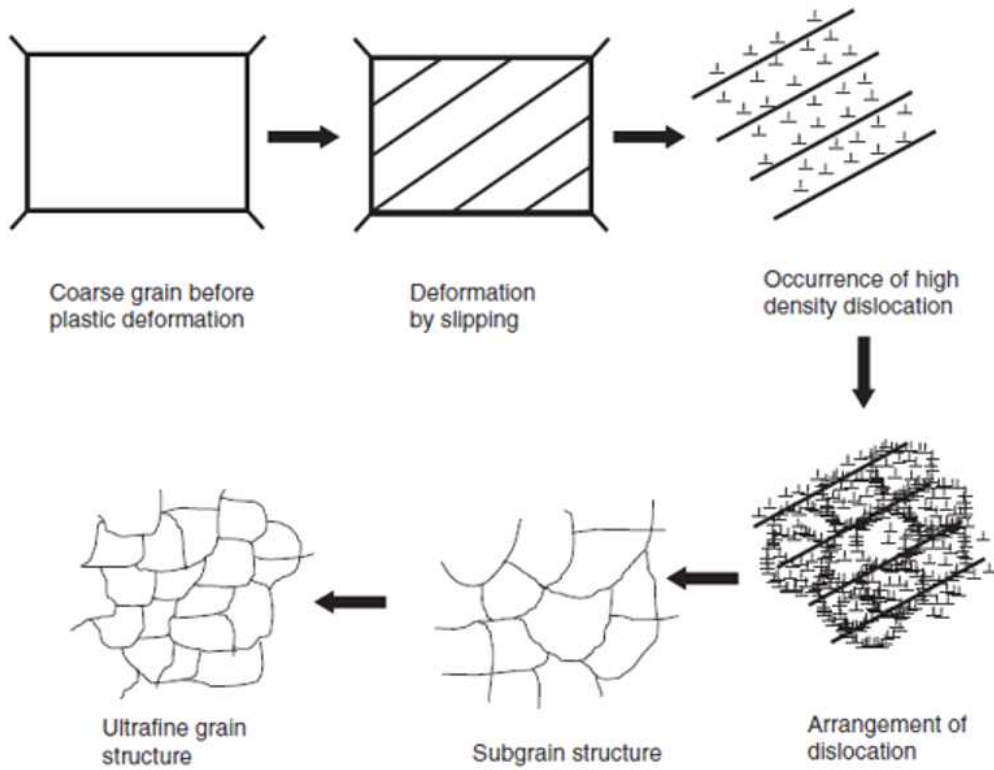


Fig. 4. 5. Schematic illustration of the grain refinement process of peening samples[32].

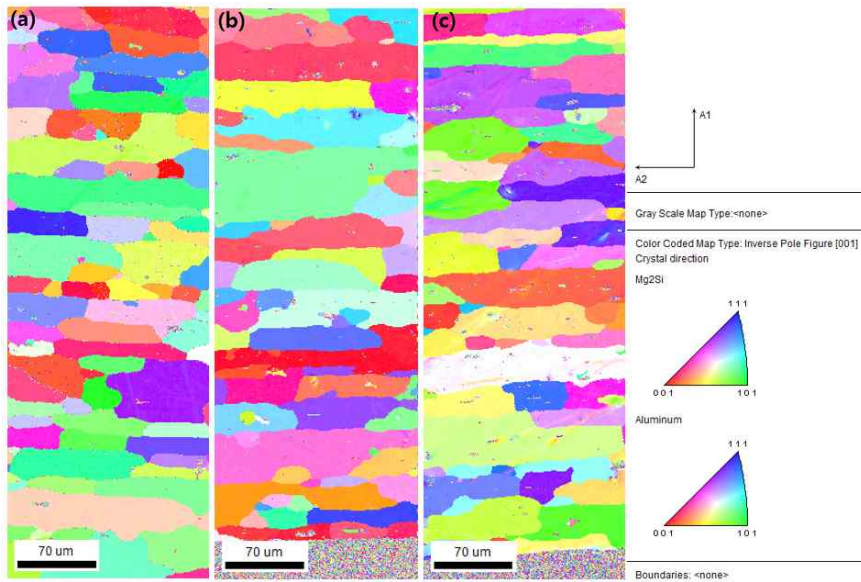


Fig. 4. 6. Cross-sectional inverse pole figure maps (EBSD) to demonstrate the microstructure: (a) un-peened sample, (b) shot peening 40m/s sample and (c) ultrasonic peening 50 % sample.

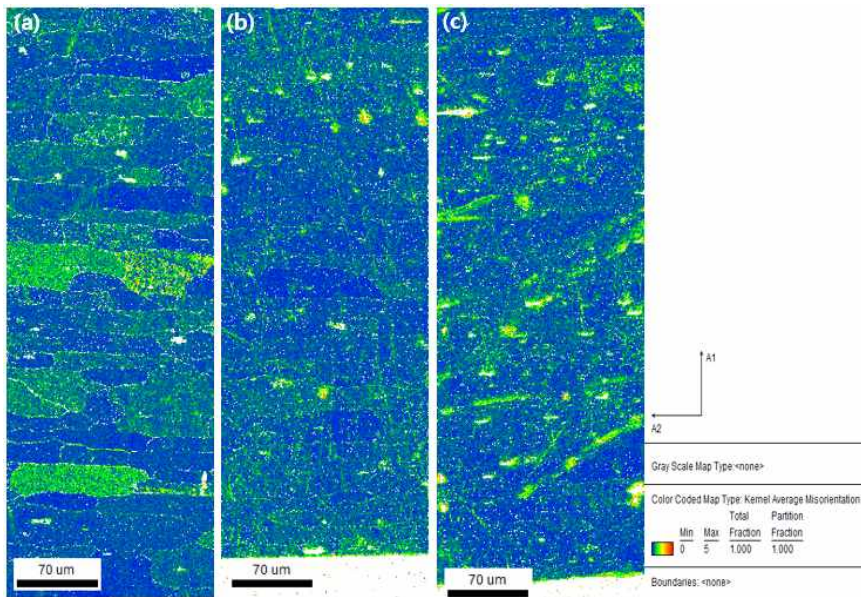


Fig. 4. 7. Cross sectional kernel average misorientation maps (EBSD) to demonstrate the microstructure: (a) un-peened sample, (b) shot peening 40 m/s sample and (c) ultrasonic peening 50 % sample.

Fig. 4. 8.과 Fig. 4. 9.는 시편들의 표면을 SEM(Scanning Electron Microscope)으로 55배와 500배의 배율로 찍은 이미지들이다. 피닝 되지 않은 시편인 (a)와 레이저 쇼크 피닝된 시편인 (c)의 표면 SEM 이미지가 다르지 않게 보인다. 쇼트 피닝된 시편인 (b)와 초음파 피닝된 시편인 (d)의 표면 SEM 이미지는 표면이 거칠어 보이며 요철이 보이고 특히 쇼트 피닝된 시편이 거칠어 보인다. 이는 공초점 현미경으로 표면 조도를 측정하여 정량적으로 나타내었다. Fig. 4. 9.에서 500배로 확대한 이미지를 보았을 때, 쇼트 피닝된 시편인 (b)는 표면 결함이 보이며 초음파 피닝된 시편인 (d)는 넓은 함몰을 볼 수 있었다.

Fig. 4. 10.은 시편 표면 지형에 대한 높낮이를 입체적으로 보여주고 있으며 Table 4. 3.은 Fig. 4. 10.의 측정 면적에 대한 높이 파라미터를 나타내었다. 측정 결과 피닝된 모든 시편의 높이 파라미터가 피닝 되지 않은 시편의 높이 파라미터보다 높았으며 피닝된 시편들과 비교해 보았을 때 레이저 쇼크 피닝된 시편이 가장 낮았다. Table 4. 3.를 보면 표면의 평균 높이를 나타내는 Sa에서 초음파 피닝된 시편이 제일 높았지만, 표면 봉우리의 최대 높이를 나타내는 Sp와 표면 계곡의 최대 높이를 나타내는 Sv, 그리고 Sp와 Sz를 더한 표면의 최대 높이를 나타내는 Sz는 쇼트 피닝된 시편이 가장 컸다. 따라서 쇼트 피닝된 시편의 표면 조도가 가장 거친 것으로 판단된다.

Fig. 4. 11.는 측정된 시편 표면의 면적의 어느 부분에서 거칠기 프로파일을 가지고 왔는지에 관한 데이터를 보여주고 있으며 Fig. 4. 10.에서 구한 거칠기 프로파일은 Fig. 4. 12.에 나와 있다. Fig. 4. 12.에 대한 거칠기 파라미터들은 Table 4. 4.에 나타내었다. 초음파 피닝된 시편에서 가장 낮은 거칠기 파라미터를 보이는데 이는 Fig. 4. 11. (d)에서 거칠기 프로파일을 측정된 직선을 보면 높이 차이가 없는 곳을 측정하여 그러한 결과가 나온 것으로 보인다. Table 4. 4.에서 편차를 나타내는 Rq를 보면 피닝 되지 않은 시편보다 초음파 피닝된 시편이 낮은 편차값을 보인다. 면적에 대한 높이 파라미터 결과처럼 거칠기 파라미터의 결과 쇼트 피닝된 시편이 가장 거칠었다. 거친 표면 조도는 부식에 악영향을 주며 피로 수명 저하의 원인이다[33]. Zhao 등은 표면 거칠기는 시편의 피로 강도에 중요한 영향을 미치는 요소라고 하였으며 시편의 피로 한계는 시편 표면의 품질이 향상됨에 따라 증가한다고 하였다. 동일한 하중 환경에서 피로 시험 시편의 마이크로 노치 주변의 높은 응력 영역의 응력 수준은 시편 표면 품질이 향상됨에 따라 감소하며, 즉 유효 손상 매개변수(응력장 강도)가 낮으며, 시편의 피로 한도는 동일한 하중 환경에서 모서

리 파단, 곡면 파단 및 평면 표면 파단 가능성이 차례로 감소한다고 하였다[34].

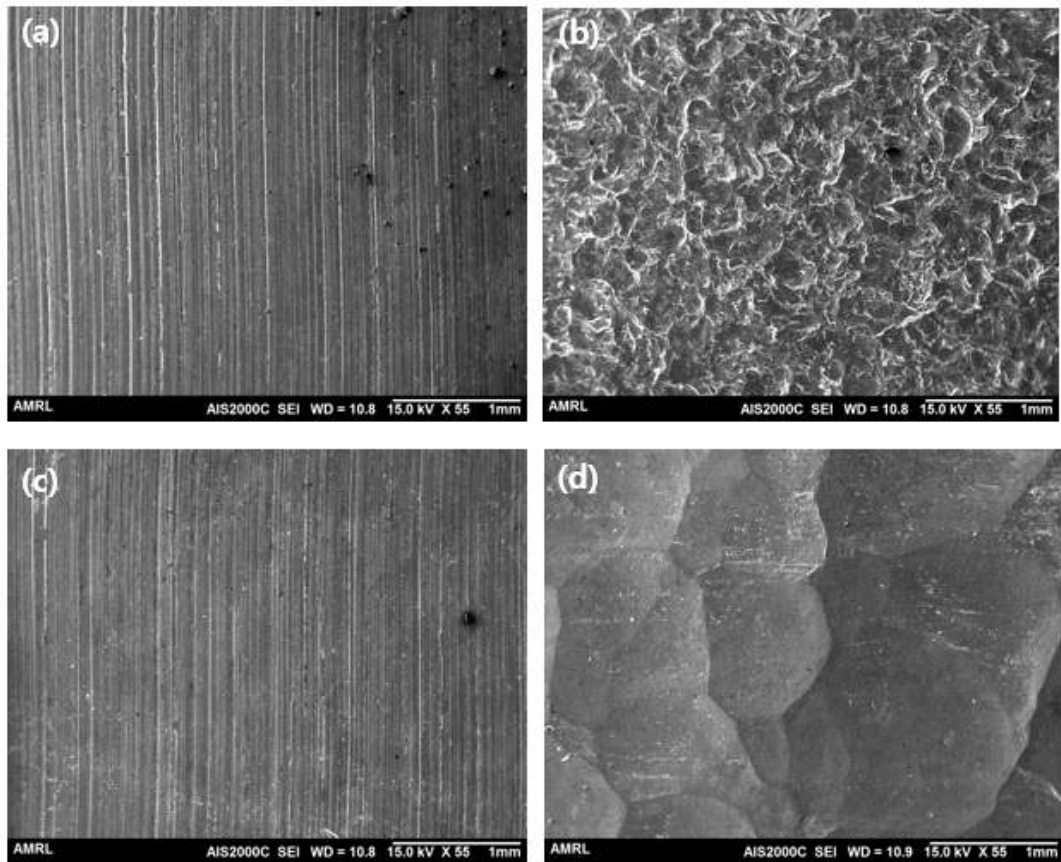


Fig. 4. 8. Surface morphology (x55) of Al 6061 specimens: (a) un-peened, (b) shot peening 40m/s, (C) laser shock peening 4GW/cm<sup>2</sup> and (d) ultrasonic peening 50 %.

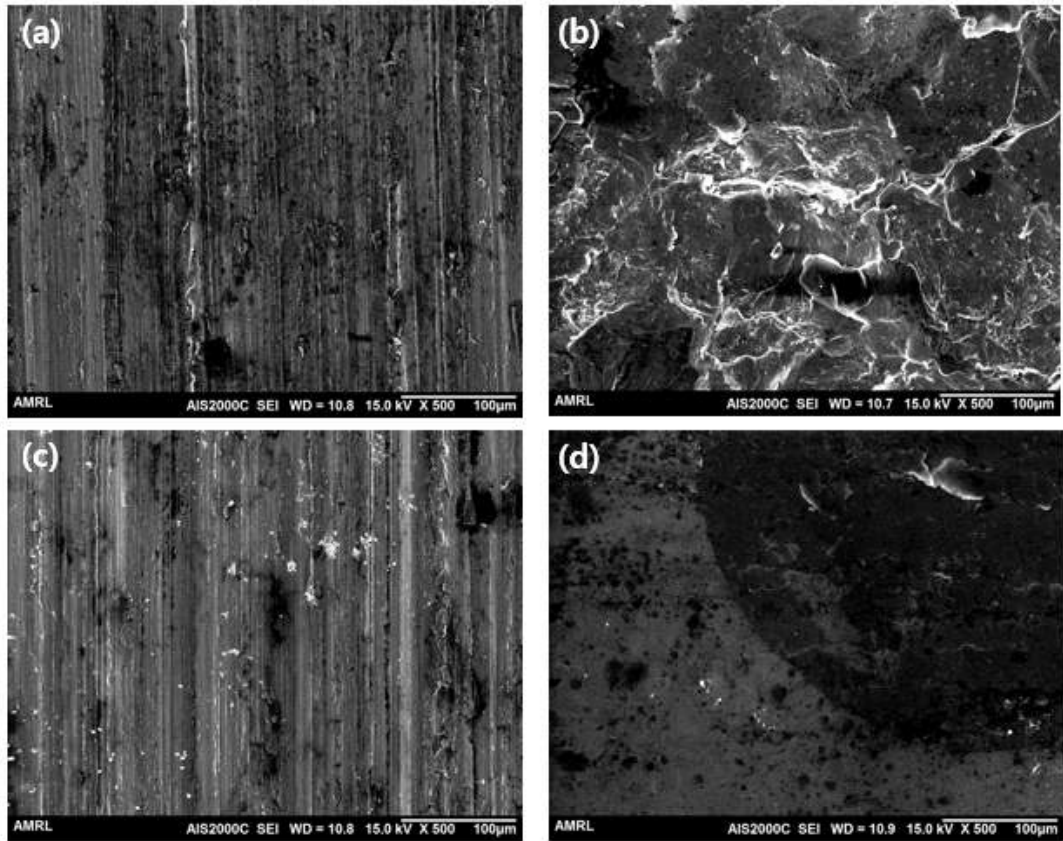


Fig. 4. 9. Surface morphology (x500) of Al 6061 specimens: (a) un-peened, (b) shot peening 40m/s, (C) laser shock peening 4GW/cm<sup>2</sup> and (d) ultrasonic peening 50 %.

Table. 4. 3. Surface height parameters.

Height parameters ( $\mu\text{m}$ )	Sa	Sq	Sp	Sv	Sz
Un-peened	6.51	7.74	27.6	37.3	65
SP 40m/s	11.9	15.0	87.9	94.3	182
LSP 4GW/cm <sup>2</sup>	11.1	12.8	52.7	40.6	93.3
UP 50%	14.8	17.3	39.9	61.1	101

Table. 4. 4. Surface roughness parameters.

Roughness parameters ( $\mu\text{m}$ )	Ra	Rq	Rp	Rv	Rz
Un-peened	1.80	2.51	4.94	12.4	17.3
SP 40m/s	4.24	5.11	12.7	13.9	26.7
LSP 4GW/cm <sup>2</sup>	2.01	2.63	8.67	9.60	18.3
UP 50%	1.51	1.57	5.56	6.29	11.9



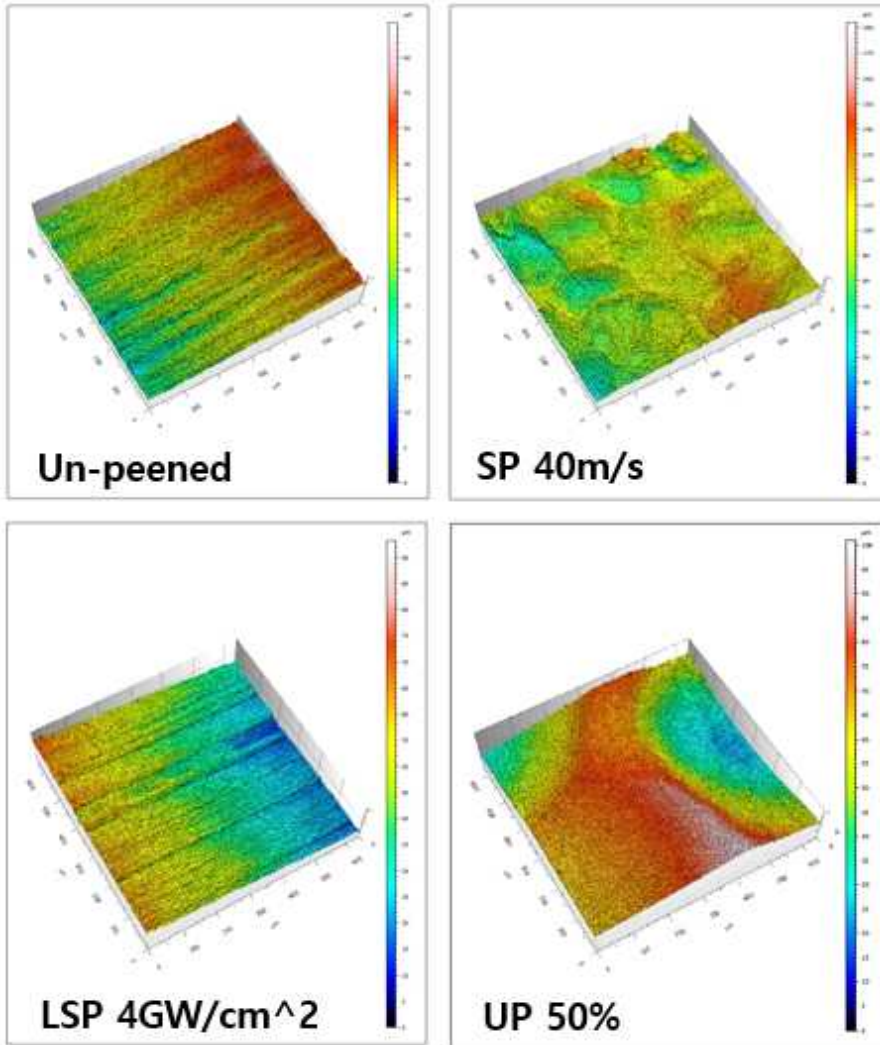


Fig. 4. 10. 3D surface topography(600  $\mu\text{m}$  x 600  $\mu\text{m}$ ).

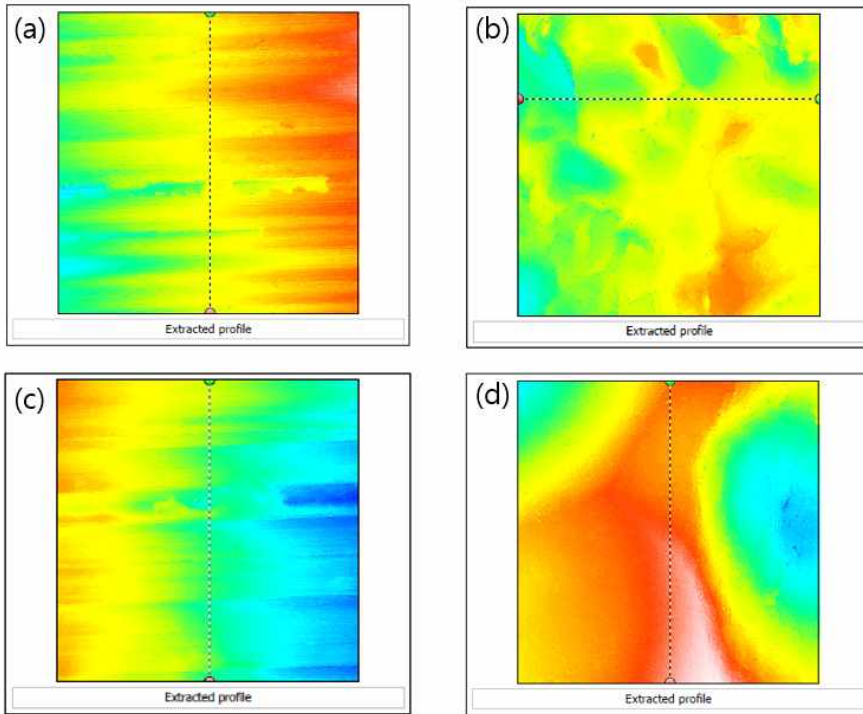


Fig. 4. 11. Extracted profile of surface roughness: (a) un-peened, (b) shot peening 40m/s, (C) laser shock peening 4GW/cm<sup>2</sup> and (d) ultrasonic peening 50 %.

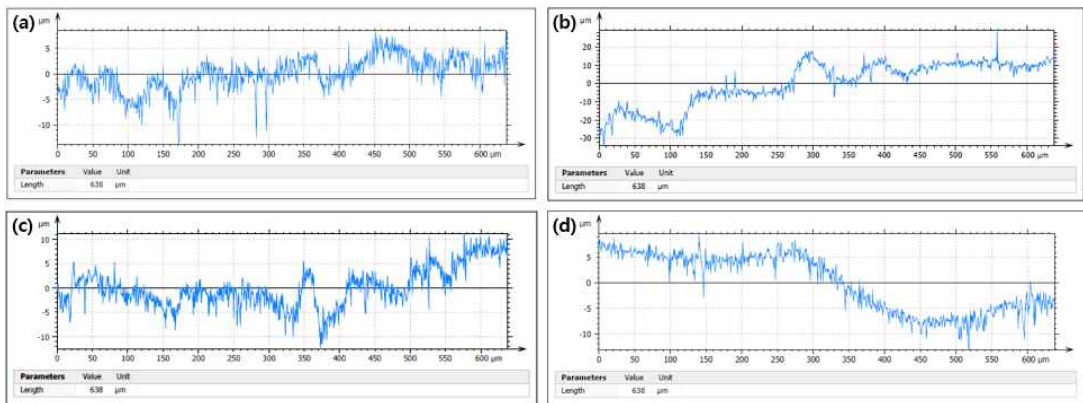


Fig. 4. 12. Profile of surface roughness: (a) un-peened, (b) shot peening 40m/s, (C) laser shock peening 4GW/cm<sup>2</sup> and (d) ultrasonic peening 50 %.

## 제 2 절 잔류응력 평가

Fig. 4. 13.는 시편 표면에서 깊이 방향으로의 잔류응력 측정 결과이다. 약 30 - 50  $\mu\text{m}$ 의 깊이일 때, 레이저 쇼크 피닝된 시편 -317 MPa, 쇼트 피닝된 시편 -187 MPa 그리고 초음파 피닝된 시편 -154 MPa로 표면층의 압축 잔류응력이 컸으며, 그중 레이저 쇼크 피닝된 시편에서 최대 압축 잔류응력 수치인 -317 MPa를 보였다. 약 400  $\mu\text{m}$ 의 깊이 이후에도 세 시편 모두 압축 잔류응력을 보이지만, 쇼트 피닝된 시편은 약 600  $\mu\text{m}$  근처에서 -23 MPa를 보이며 잔류응력 수치 0을 향해 가고 있지만, 레이저 쇼크 피닝된 시편과 초음파 피닝된 시편은 -100 MPa대의 압축 잔류응력을 보이며 그 이후의 깊이에서도 압축 잔류응력 수치를 보일 수 있다. Fig. 2. 6.를 보면 SKD61 강에 레이저 쇼크 피닝을 해서 깊이 방향으로의 잔류응력을 그래프이며, 약 2 mm의 깊이까지 압축 잔류응력을 보였다[24]. Xing 등은 12AlSi10Mg 합금에 초음파 피닝을 통해 약 2 mm의 깊이까지 압축 잔류응력을 보였다[9]. Qiao 등은 TiAl 합금에 레이저 쇼크 피닝을 하여 약 4 mm의 깊이의 압축 잔류응력을 보였다[35]. Turski 등은 오스테나이트 스테인리스 304 L 강에 쇼트 피닝, 레이저 쇼크 피닝, 초음파 피닝을 하였는데 쇼트 피닝의 경우 약 250  $\mu\text{m}$ 의 깊이에서 잔류응력이 0 MPa가 되었고 그 이후의 깊이에서는 인장 잔류응력을 보였으며, 레이저 쇼크 피닝은 약 2.5 mm의 깊이의 압축 잔류응력을 보였고, 초음파 피닝은 약 2 mm의 깊이의 압축 잔류응력을 보였다[36].

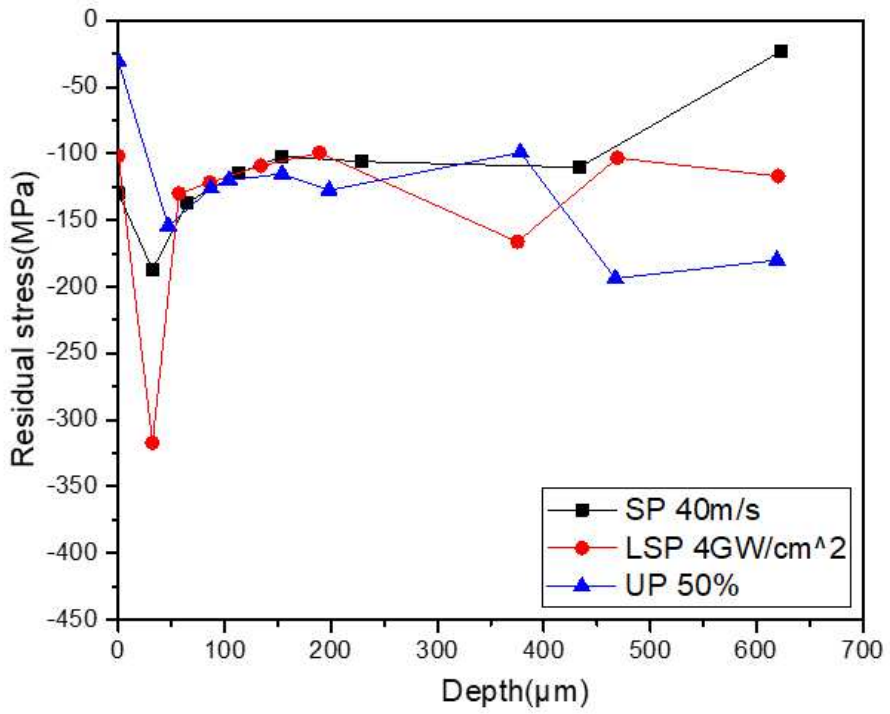


Fig. 4. 13. Variation of residual stress from surface to depth.

### 제 3 절 기계적 특성 평가

Fig. 4. 14.은 시편 표면에서 깊이 방향으로의 미소 비커스 경도 측정 결과이다. 쇼트 피닝된 시편은 표면에서 세 시편 중 최대 경도 수치인 121 HV 보이지만 깊이 방향으로 들어갈수록 급격하게 경도가 감소하여 약 200  $\mu\text{m}$ 에서 피닝 되지 않은 시편의 경도 값인 약 80 HV 이하를 보인다. 초음파 피닝된 시편과 레이저 쇼크 피닝된 시편은 약 1 mm 이후의 깊이에도 피닝 되지 않은 시편의 경도 값보다 큰 경도 값을 보이며 약 2 mm에서 피닝 되지 않은 시편의 경도 값에 도달한 것을 볼 수 있다. 이는 제 3 장에 제 1 절 미세구조 평가에서 X선 회절 분석에서 반치폭의 증가와 제 3 장에 제 2 절 잔류응력 평가에서 깊이 방향으로 측정한 압축 잔류응력 수치처럼 피닝 후에 표면층에서부터 소성변형 인한 격자 변형과 전위 밀도가 높아져 변형 층의 생성이 이루어졌다. 변형 층의 두께가 쇼트 피닝은 얇지만, 초음파 피닝된 시편과 레이저 쇼크 피닝된 시편은 소성 변형된 깊이가 깊은 것을 알 수 있다. 강렬한 충격파를 생성하여 재료의 항복 강도를 훨씬 초과하는 수 GPa의 강도로 재료를 충돌하게 되면서 재료에 영구적인 변형을 생성하기 위해 전파될 때까지 에너지를 잃게 된다. 충격파 전파 후 표면은 압축 잔류응력을 형성하기 위해 탄성적으로 구속된다. 따라서 효과가 표면에서 약 1 mm 이상 침투하고 쇼트 피닝보다 훨씬 깊게 된다[37]. 또한, 쇼트 피닝 공정과 비교하였을 때 초음파 피닝은 단단한 불과 운동 에너지로 인해 표면 영역에서 더 큰 깊이로 소성 변형 및 압축 잔류응력을 유도한다[26]. 쇼트 피닝된 시편은 쇼트볼이 시편의 표면에 투사되면서 극 표면부에만 가공경화가 일어났고 내부로 들어갈수록 에너지의 전달이 작아져서 레이저 쇼크 피닝된 시편과 초음파 피닝된 시편보다 얇은 깊이에서 피닝되지 않은 시편의 경도 값으로 수렴하는 것으로 판단된다[16].

Fig. 4. 15.는 시편의 표면에서 깊이 방향으로의 경도를 나노 인덴테이션으로 시편 단면에서 측정한 결과이다. 피닝 된 시편의 경도가 약 10 - 60  $\mu\text{m}$  일 때 높게 나왔으며 깊이 방향으로 측정한 잔류응력 그래프인 Fig. 4. 13.에서 압축 잔류응력이 높은 깊이에서 나노 인덴테이션의 경도 값이 높았으며, 나노 인덴테이션으로 깊이 방향으로 측정한 경도의 그래프는 깊이 방향으로 측정한 잔류응력의 그래프의 반대 경향을 보여주고 있다. 쇼트 피닝된 시편은 표면 경도 값이 28 GPa로 가장 높았지만 약 200  $\mu\text{m}$ 의 깊이 이후에 초음파 피닝된 시편과 레이저 쇼크 피닝된 시편보다 경도 값이 낮은 경향을 보인다. 초음파 피닝된 시편을 다른 피닝 된 시편들

과 비교해 보았을 때 미소 비커스 경도와 같이 나노 인텐테이션으로 측정된 경도 값이 약 1 mm의 깊이에서도 높았다.

같은 경도를 측정하는 수단이지만 약간의 다른 경향을 보이는 이유로는 비커스 미소 경도기로는 하중을 100 gf를 주고 20  $\mu\text{m}$ 의 폭을 가진 압자로 측정하였고, 나노 인텐테이션에는 하중을 3 gf를 주고 20 nm의 폭을 가진 압자로 측정하게 되면서 차이가 나는 것으로 판단된다.

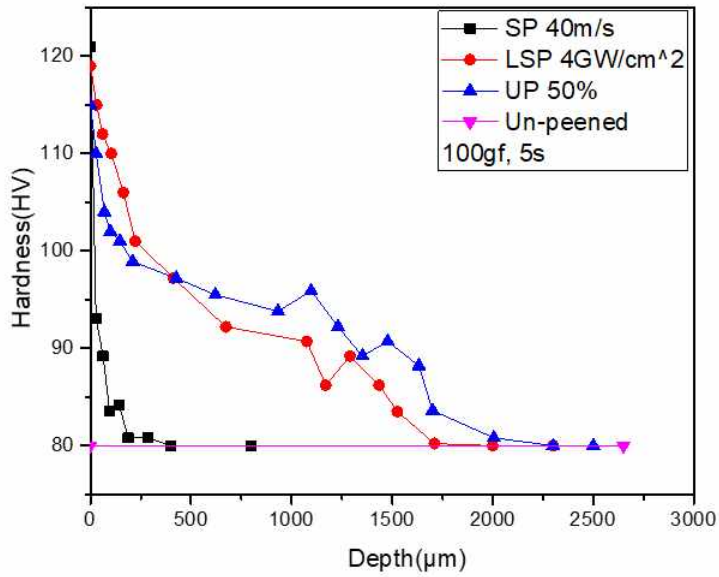


Fig. 4. 14. Variation of micro-Vickers hardness from surface to depth.

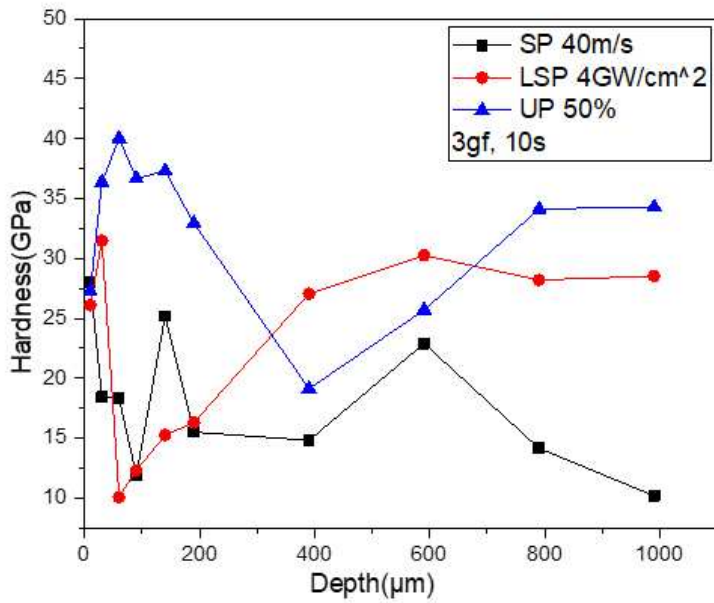


Fig. 4. 15. Variation of nano indentation hardness from surface to depth.

## 제 4 절 부식 특성 평가

Fig. 4. 16.는 시편들을 전기화학적 분극 실험을 수행하고 얻은 분극 곡선이며, 이 분극 곡선에 Tafel 외삽법을 사용하여 분극 곡선에 대한 부식 전위( $E_{corr}$ ) 및 부식 전류 밀도( $I_{corr}$ )를 구한 값과 부식 전류 밀도를 통해 구한 부식률(Corrosion Rate; CR)을 Table. 4. 5.에 나타내었으며 부식률은 다음과 같은 식으로 구할 수 있다.

$$CR = \frac{I_{corr}(E.W.)K}{Ad} \quad (4.1)$$

E.W.(Equivalent Weight)는 당량으로 Al 6061의 당량인 9 g, d는 밀도로 알루미늄 밀도인  $2.8 \text{ g/cm}^3$ , A는 측정 면적으로  $1 \text{ cm}^2$ , K는 mmpy를 구할 때 넣어야 하는 상수로 3272를 대입하여 부식률을 구하였다. 부식 전류 밀도는 중요한 값으로 부식 전위보다 부식 저항과 관련이 있다[38]. 부식률(CR)을 피닝되지 않은 시편과 비교하였을 때 쇼트 피닝된 시편은 8 %, 레이저 쇼크 피닝된 시편은 2 %, 초음파 피닝된 시편은 1 %의 수준으로 매우 크게 부식 특성이 향상되었다. 이는 피닝 가공에 의해 재료 내부에 생성된 압축 잔류응력의 영향과 표면에 있던 균열들이 닫혀져 부식에 대한 저항력이 더 높아진 걸로 볼 수 있다[39,40].

피닝한 시편들로 비교해 보았을 때 쇼트 피닝된 시편에서 부식 속도를 의미하는 부식 전류 밀도가 가장 높았으며, 레이저 쇼크 피닝된 시편, 초음파 피닝된 시편 순서였으며, 초음파 피닝된 시편과 레이저 쇼크 피닝된 시편과 비교해 보았을 때 차이가 나지 않는다고 볼 수 있다. 쇼트 피닝된 시편의 부식 전류 밀도가 높은 이유는 표면 조도의 영향이 가장 크다고 볼 수 있다. 제 3 장에 제 1 절에서 Fig. 4. 6.부터 Fig. 4. 8.의 SEM 이미지와 공초점 현미경으로 측정한 표면 조도에서 봤듯이 표면에 결함과 거친 표면 조도가 부식에 영향을 미친 것으로 보인다. 표면 불균일성 및 거칠기, 잔류응력, 전위 밀도 및 균열과 같은 표면 결함과 같은 요인들이 부식을 제어하는데 중요한 역할을 하는데 그중 표면 거칠기의 증가는 전체 표면적을 증가시켜 내식성을 저하시킨다[13,41-45]. Lee 등은 AISI 304 스테인리스강에 쇼트 피닝과 초음파 피닝을 사용하여 부식 거동을 연구하였는데 쇼트 피닝된 시편이 피닝하지 않은 시편보다 내식성이 낮았으며 초음파 피닝된 시편이 우수한 내식성을 나타내었으며 표면 거칠기의 영향을 보기 위해 쇼트 피닝 시편을 SiC로 최대 10 - 15  $\mu\text{m}$  깊이까지 연마한 다음 전기화학적 분극 실험을 다시 시행한 결



과 피닝되지 않은 시편보다 내식성이 우수했으며 결과적으로 쇼트 피닝의 내식성 저하의 주요 원인은 거칠기로 말하였다[46]. Walter 등은 표면 거칠기의 증가가 AZ91 마그네슘 합금에서 공식에 대한 저항성을 증가시키고 부동태화에도 영향을 미친다고 보고되었다[47]. 레이저 쇼크 피닝된 시편과 초음파 피닝된 시편은 표면에 적절한 표면 개질화 효과로 소성변형을 받아 금속 유동과 기공 폐쇄로 인해 부식 저항성을 향상시킨 걸로 볼 수 있다[9].

Table. 4. 5. The average value of current density, corrosion potential and corrosion rate of peening methods.

Peening methods	I <sub>corr</sub> ( $\mu\text{m}/\text{cm}^2$ )	E <sub>corr</sub> (mV)	CR(mmpy)	Improved CR(%)
Un-peened	4.73	-759.8	0.0498	100
SP 40m/s	0.38	-1088.5	0.0040	8
LSP 4GW/cm <sup>2</sup>	0.09	-897.2	0.0009	2
UP 50%	0.06	-936.5	0.0006	1

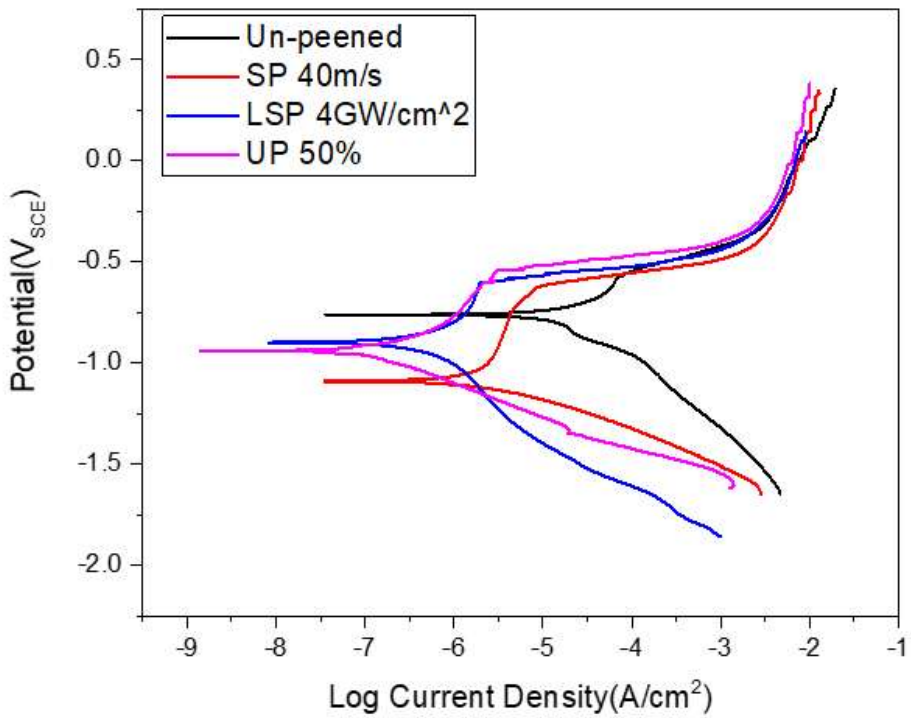


Fig. 4. 16. Polarization curves of peening methods.

## 제 5 장 결론

대표적인 표면 소성 가공 기술인 쇼트 피닝, 레이저 쇼크 피닝, 초음파 피닝을 통하여 재료의 표면 부에 생성되는 잔류응력 특성과 미세 구조 분석, 기계적 특성 및 부식 특성을 평가하였다. Al 6061 합금의 잔류응력 특성 평가 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 표면 소성 가공으로 피닝된 시편 모두 X선 회절에 의한 (311) 회절면의 반치폭이 증가되었으며, 피크가 저각으로 이동하였다. 이는 국부적인 강소성변형에 의한 결정립의 미세화와 격자 결함의 증가와 압축 잔류응력의 영향으로 나타난 것이며 데바이 고리, 광학 현미경 사진, 그리고 EBSD 분석이 이를 뒷받침해 준다.

2) 피닝 가공으로 인해 표면층에 큰 압축 잔류응력이 생겼지만 약 600  $\mu\text{m}$  깊이 근처에서 -117 MPa의 압축 잔류응력을 보이는 레이저 쇼크 피닝된 시편과 -180 MPa의 압축 잔류응력을 보이는 초음파 피닝된 시편과 다르게 쇼트 피닝된 시편은 -23 MPa를 보였다. 또한, 레이저 쇼크 피닝된 시편에서 최대 압축 잔류응력을 나타내었다.

3) 레이저 쇼크 피닝된 시편과 초음파 피닝된 시편은 급격한 경도 저하를 보이는 쇼트 피닝된 시편과 다르게 1 mm 이후의 깊이에도 피닝 되지 않은 시편보다 높은 경도 값을 보여 레이저 쇼크 피닝된 시편과 초음파 피닝된 시편의 경우 1 mm 이상의 깊은 소성 영역을 나타내었다.

4) 피닝된 시편 모두 피닝 되지 않은 시편보다 좋은 내식성을 보였는데 이는 표면층에 생성된 압축 잔류응력으로 인한 것으로 판단된다. 또한, 피닝된 시편들의 부식 전류 밀도를 비교해 보았을 때 쇼트 피닝된 시편이 높았는데 주요 원인은 거친 표면 조도와 표면 결함 때문이다.

## 참 고 문 헌

- [1] Lee, Sang-Gook.; Jo, Yong-Sang.; Heo, Gwang-Bum.; Geong, Gyeo-Jo.; Lee, In-Cheol. Development of Creep Damage an Residual Stress Measuring Techniques of the High-temperature Pipeline Materials Using Method. EPRI Technical Report. TR.96SS19.S1999.110 1999, 275-316.
- [2] Sulima, A. M.; Yevstigneev, M. I. Quality of Surface Layer and Fatigue Durability of Details Made from Heatproof and Titanium Alloys, Machine building Moscow 1974.
- [3] Wagner, L. Mechanical Surface Treatments on Titanium, Aluminum and Magnesium Alloys. Materials Science and Engineering: A 1999, 263, 210 - 216.
- [4] Dalaei, K.; Karlsson, B. Influence of Shot Peening on Fatigue Durability of Normalized Steel Subjected to Variable Amplitude Loading. International Journal of Fatigue 2012, 38, 75 - 83.
- [5] Chen, B.; Huang, B.; Liu, H.; Li, X.; Ni, M.; Lu, C. Surface Nanocrystallization Induced by Shot Peening and Its Effect on Corrosion Resistance of 6061 Aluminum Alloy. J. Mater. Res. 2014, 29, 3002 - 3-10.
- [6] Montross, C.; Wei, T.; Ye, L.; Clark, G.; Mai, Y. Laser shock processing and its effects on microstructure and properties of metal alloys: A review. Int. J. Fatigue 2006, 24, 1021 - 1036.
- [7] Peyre, P.; Fabbaro, R. Laser shock processing: A review of the physics and applications. Opt. Quant. Electron. 1995, 27, 1213 - 1229.
- [8] Park, J.; Yeo, I.; Jang, I.; Jeong, S. Improvement of Friction Characteristics of Cast Aluminum-Silicon Alloy by Laser Shock Peening. Journal of Materials Processing Technology 2019, 266, 283 - 291.
- [9] Xing, X.; Duan, X.; Jiang, T.; Wang, J.; Jiang, F. Ultrasonic Peening Treatment Used to Improve Stress Corrosion Resistance of AlSi10Mg Components Fabricated Using Selective Laser Melting. Metals 2019, 9, 103.
- [10] Mordyuk, B.N.; Prokopenko, G.I.; Vasylyev, M.A.; Iefimov, M.O. Effect of Structure Evolution Induced by Ultrasonic Peening on the Corrosion Behavior of AISI-321 Stainless Steel. Materials Science and Engineering: A 2007, 458, 253 -

261.

[11] Bae, Sang-Eun. Accelerated Corrosion Test Methodology and S-N Fatigue Behavior of Ultrasonic Peening of AH32 Steel. A Thesis for a Masterdom, Gyeongsang National University, Republic of Korea, 2011.

[12] Jeong, S.-G.; Kim, T.-H. A Study on the Optimum Shot Peening Condition for A17075-T6. Journal of the Korean Society for Aeronautical & Space Sciences 2003, 31, 63 - 68.

[13] Pandey, V.; Singh, J.K.; Chattopadhyay, K.; Srinivas, N.C.S.; Singh, V. Influence of Ultrasonic Shot Peening on Corrosion Behavior of 7075 Aluminum Alloy. Journal of Alloys and Compounds 2017, 723, 826 - 840.

[14] Suh, Chang-Min; Kim, Chul; Kim, T.J. VHCF Characteristics of A7075-T651 under Pressure Variation by Shot Peening Treatment. Journal of Ocean Engineering and Technology 2011, 25, 72 - 79.

[15] Moon, Myeong-Bae. A Study on Residual Stress and Microstructures with the Conditions of Shot Peening in 6061 Aluminium Alloy. A Thesis for a Masterdom, Seoul National University of Science and Technology, Republic of Korea, 2007.

[16] Cheong, Seong-Kyun; Nam, Ji-Hun; Kou, Dae-Lim; Ro, Seung-Nam .A Study on the Effect of Shot Peening on the Fatigue Life of Al 7075-T6 under Corrosion Environment. Journal of the Korean society for aeronautical & space sciences 2005, 33, 2, 60 - 66.

[17] Miao, H.Y.; Demers, D.; Larose, S.; Perron, C.; Lévesque, M. Experimental Study of Shot Peening and Stress Peen Forming. Journal of Materials Processing Technology 2010, 210, 2089 - 2102.

[18] Sharma, M. C. Assesment of Over Peening by time on Fatigue behavior of Spring Steel. Proc. of 6th International Fatigue Congress 1996, 1397.

[19] Iida, K. Dent and Affected Layer Produced by Shot Peening. Proc. of the 2nd International Conference on Shot Peening Chicago 1984, 283.

[20] Lee, Jong-Gyu; Kim, Jeong-Gyu. Influence of residual stress due to shot peening on fatigue strength and life. Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers. A. 1997, 21, 9, 1498-1506.

- [21] Nie, L.; Wu, Y.; Gong, H.; Chen, D.; Guo, X. Effect of Shot Peening on Redistribution of Residual Stress Field in Friction Stir Welding of 2219 Aluminum Alloy. *Materials* 2020, 13, 3169.
- [22] Kim, J.-D.; Kutsuna, M.; Sano, Y. Laser Peening Process and Its Application Technique. *Journal of Welding and Joining* 2016.
- [23] Fabbro, R.; Fournier, J.; Ballard, P.; Devaux, D.; Virmont, J. Physical Study of Laser produced Plasma in Confined Geometry. *Journal of Applied Physics* 1990, 68, 775 - 784.
- [24] Peyre, P.; Fabbro, R. Laser shock processing: a review of the physics and applications. *Optical and Quantum Electronics* 1995, 27, 1213-1229.
- [25] Malaki, M.; Ding, H. A review of ultrasonic peening treatment. *Materials & Design* 2015, 87, 1072 - 1086
- [26] Ortiz, A.L.; Tian, J.-W.; Shaw, L.L.; Liaw, P.K. Experimental Study of the Microstructure and Stress State of Shot Peened and Surface Mechanical Attrition Treated Nickel Alloys. *Scripta Materialia* 2010, 62, 129 - 132.
- [27] Process-UIT-SONATS-LD
- [28] NOMAD-Ultrasonic-Impact-Treatment-welds-improvement-SONATS-LD
- [29] Woo, W.; Balogh, L.; Ungár, T.; Choo, H.; Feng, Z. Grain Structure and Dislocation Density Measurements in a Friction-Stir Welded Aluminum Alloy Using X-Ray Peak Profile Analysis. *Materials Science and Engineering: A* 2008, 498, 308 - 313.
- [30] Mordyuk, B.N.; Milman, Yu.V.; Iefimov, M.O.; Prokopenko, G.I.; Silberschmidt, V.V.; Danylenko, M.I.; Kotko, A.V. Characterization of Ultrasonically Peened and Laser-Shock Peened Surface Layers of AISI 321 Stainless Steel. *Surface and Coatings Technology* 2008, 202, 4875 - 4883.
- [31] Tanaka, K. The Cosa Method for X-Ray Residual Stress Measurement Using Two-Dimensional Detector. *Mechanical Engineering Reviews* 2019, 6, 18-00378-18 - 00378.
- [32] Prakash, N.A.; Gnanamoorthy, R.; Kamaraj, M. Surface Nanocrystallization of Aluminium Alloy by Controlled Ball Impact Technique. *Surface and Coatings Technology* 2012, 210, 78 - 89.

- [33] Barsom, J.M.; Rolfe, S.T.; Fracture and Fatigue Control in Structure, Butterworth Heinemann 3rd Edition 1999. 163-192.
- [34] Zhao, B.; Song, J.; Xie, L.; Hu, Z.; Chen, J. Surface Roughness Effect on Fatigue Strength of Aluminum Alloy Using Revised Stress Field Intensity Approach. *Sci Rep* 2021, 11, 19279.
- [35] Qiao, H.; Zhao, J.; Gao, Y. Experimental Investigation of Laser Peening on TiAl Alloy Microstructure and Properties. *Chinese Journal of Aeronautics* 2015, 28, 609 - 616.
- [36] Turski, M.; Clitheroe, S.; Evans, A.D.; Rodopoulos, C.; Hughes, D.J.; Withers, P.J. Engineering the Residual Stress State and Microstructure of Stainless Steel with Mechanical Surface Treatments. *Appl. Phys. A* 2010, 99, 549 - 556.
- [37] Sano, Y.; Mukai, N.; Okazaki, K.; Obata, M. Residual Stress Improvement in Metal Surface by Underwater Laser Irradiation. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* 1997, 121, 432 - 436.
- [38] Zhang, X.G. Corrosion Potential and Corrosion Current. In *Corrosion and Electrochemistry of Zinc*; Springer: Boston, MA, U.S.A. 1996, 125 - 156.
- [39] Lifka, D.; Spowls, D.; Shot peening-A Stress Corrosion Cracking preventive for High Strength Aluminium Alloy, *Proc. Of the 26th annual Conference, NACE, U.S.A* 1970, 4-6.
- [40] Laplante, P.A. *What Every Engineer Should Know about Software Engineering; What every engineer should know*; Taylor & Francis: Boca Raton, 2007.
- [41] Aparicio, C.; Javier Gil, F.; Fonseca, C.; Barbosa, M.; Planell, J.A. Corrosion Behaviour of Commercially Pure Titanium Shot Blasted with Different Materials and Sizes of Shot Particles for Dental Implant Applications. *Biomaterials* 2003, 24, 263 - 273.
- [42] Hong, T.; Nagumo, M. Effect of Surface Roughness on Early Stages of Pitting Corrosion of Type 301 Stainless Steel. *Corrosion Science* 1997, 39, 1665

- 1672.

[43] Sasaki, K.; Burstein, G.T. The Generation of Surface Roughness during Slurry Erosion-Corrosion and Its Effect on the Pitting Potential. *Corrosion Science* 1996, 38, 2111 - 2120.

[44] Kumar, S.; Sharma, D.; Yadav, P.; Yadav, M. Experimental and Quantum Chemical Studies on Corrosion Inhibition Effect of Synthesized Organic Compounds on N80 Steel in Hydrochloric Acid. *Ind. Eng. Chem. Res.* 2013, 52, 14019 - 14029.

[45] Yadav, M.; Kumar, S. Experimental, Thermodynamic and Quantum Chemical Studies on Adsorption and Corrosion Inhibition Performance of Synthesized Pyridine Derivatives on N80 Steel in HCl Solution. *Surface and Interface Analysis* 2014, 46, 254 - 268.

[46] Lee, H.; Kim, D.; Jung, J.; Pyoun, Y.; Shin, K. Influence of Peening on the Corrosion Properties of AISI 304 Stainless Steel. *Corrosion Science* 2009, 51, 2826 - 2830.

[47] Walter, R.; Kannan, M.B. Influence of Surface Roughness on the Corrosion Behaviour of Magnesium Alloy. *Materials & Design* 2011, 32, 2350 - 2354.



## 감사의 글

먼저 실험실 들어온 2018년부터 무사히 잘 버틴 저 자신에게 박수를 주고 싶습니다(짜짜짜).

연구실에서의 생활적으로나 연구적으로 이끌어주시고 조언을 아낌없이 주셨던 김정석 교수님 감사합니다.

도움을 주셨던 김희수 교수님, 김선중 교수님, 장희진 교수님, 최병상 교수님 감사합니다.

가족보다 오랜 시간 실험실에 있으면서 동고동락하고 많은 도움을 주었던 성빈 오빠, 민석 오빠 정말 고생 많았고 동생이 툭툭대고 짜증 내도 다 웃으면서 받아줘서 고마웠고 앞으로 행복한 일들이 있으면 좋겠습니다. 내년엔 졸업할 승관 오빠 파이팅하고, 그다음 년엔 졸업할 신영이도 열심히 하고 실험실에 있는 동안 종종 투덜거렸는데 받아줘서 고맙고 졸업 무사히 하길 바랄게. 그리고 조언을 아끼지 않았던 원식 오빠도 감사합니다.

내가 힘들어할 때마다 옆에서 응원해 준 맛집 메이트 지혜, 엄마의 양아들 준수, 튼튼이 집사 현홍이 정말 고맙고 앞으로도 오래오래 우정하자. 그 외에도 숙현, 기선, 수빈, 한빛, 하연, 수행, 준화도 고마워.

그리고 마지막으로 저의 의견을 존중해 주고 부족함 없는 지원과 어떤 것을 하든 묵묵하게 지켜봐 주며 응원해 준 엄마랑 아빠에게 사랑하고 감사하다고 말하고 싶습니다. 지웅이는 군대에서 전역하면 목표를 갖고 살아갔으면 좋겠다.

제 곁에서 응원해 준 모든 분들 감사합니다!

2021년 12월

허채을