

레이저 쇼크 피닝에 의한 2205 듀플렉스 스테인리스강의 표면 경도 향상과 표면 변화 관찰

임현택, 정희민, 김필규, 정성호[✉]

광주과학기술원 기전공학과

Improvement of Surface Hardness of 2205 Duplex Stainless Steel by Laser Shock Peening and Observations of Surface Changes

H. T. Lim, H. M. Jeong, P. K. Kim and SungHo Jeong[✉]

School of Mechatronics, Gwangju Institute of Science and Technology

Abstract

This work reports the results for laser shock peening of duplex stainless steel (22% Chromium - 5% Nickel) using a pulsed Nd:YAG laser (wavelength = 532nm, pulse width = 8ns). for the application to high-capacity pumps for seawater desalination plants. By properly selecting the process parameters such as laser intensity of 10GW/cm², laser pulse density of 75pulse/mm², and 100μm thick aluminum foil as an absorbent coating layer, the surface hardness of duplex stainless steel could be enhanced by 26%, from 256HV to 323HV with little changes in surface morphology and roughness. The depth of laser shock peened layer was measured to be around 2mm. The large enhancement of surface hardness is considered to have high practical importance in minimizing abrasive and corrosive deterioration of pump parts.

Keywords: Duplex stainless steel(듀플렉스 스테인리스강), Laser shock peening (레이저 쇼크 피닝), Hardness (경도)

1. 서론

레이저쇼크 피닝은 금속표면에 펄스 레이저를 조사할 때 발생하는 강력한 충격파(shock wave)를 이용하여 금속 재료의 기계적 성질을 향상시키는 기술로 레이저가 조사된 금속 재료의 표면 근처에 압축 잔류 응력이 생성되는 원리를 기반으로 한다. 레이저 쇼크 피닝시 재료의 표면에 조사된 레이저는 소재의 급격한 어블레이션과 이에 따른 고압의 플라즈마 발생을 유도하게 되며, 이때 발생한 고압의 플라즈마에 의해 충격파가 발생한다. 한편, 공기 중에서 레이저를 조사할 경우 발생한 레이저 플라즈마가 주변으로 쉽게 확산되어 금속표면에 강한 압력을 가하기 힘들다. 따라서 레이저 쇼크 피닝 공정에서는 레이저빔이 조사되는 금속표면을 투명한 매체로 둘러싸으로써 레이저빔은 쉽게 통과하면서도

플라즈마의 공기로의 확산을 억제하여 최대한 큰 압력이 금속표면에 작용할 수 있도록 하고 있으며, 대부분의 경우 비용과 사용상의 용이함 때문에 물을 투명 매체로 사용하고 있다.¹ 또한 재료 표면에 조사된 레이저 에너지의 흡수를 증가시키거나 어블레이션에 의한 금속 표면의 손상을 최소화하기 위해 대부분 시편을 보호막으로 코팅을 한다.² 코팅에 쓰이는 재료에는 알루미늄, 구리, 철 박판이나 유기 페인트 등이 사용되고 있다.^{3,4} 보호막을 사용할 경우 레이저 쇼크 피닝 전후에 표면조도의 차이가 거의 없어 원래의 표면품질을 유지하면서 기계적 특성을 향상시킬 수 있는 장점이 있다. 레이저 쇼크 피닝과 마찬가지로 재료의 표면에 강한 압력을 가하여 표면경도와 같은 기계적 성질을 향상시키는 기존 기술로 샷 피닝(shot peening)이 있다. 샷 피닝은 금속이나 세라믹 등으로 제조된 구슬을 재료 표면에 강한 힘으로 충돌시켜 압축잔류응력을 증가시키는 방식인데, 레이저 쇼크 피닝과 비교하였을 때 압축잔류응력이 발생하는 깊이가 얕아 피로파괴에

투고일 : 2011년 2월 25일 심사완료일 : 2011년 3월 13일
 게재승인일 : 2011년 3월 15일
 교신저자 : 정성호 ✉ shjeong@gist.ac.kr

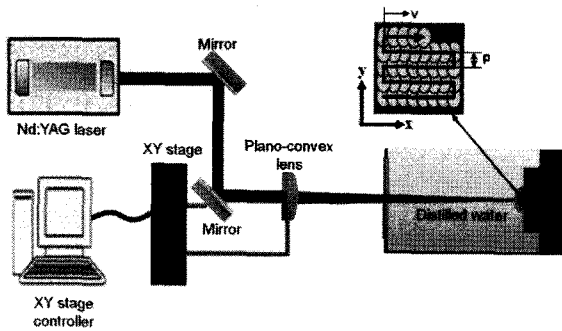


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental setup of laser shock peening.

대한 저항력이 더 작으며 표면 조도 또한 더 큰 것으로 알려져 있다.⁵ 레이저 쇼크 피닝의 이러한 장점들이 알려지면서 많은 연구자들이 알루미늄과 스테인리스 강 등의 다양한 재료들을 대상으로 한 레이저 쇼크 피닝 효과와 응용분야에 대한 연구를 진행하고 있다.^{6,7}

한편 듀플렉스 강은 강도가 우수하고 내부식성이 강한 재료로, 특히 염소부식에 강한 특성을 지니기 때문에 해수 담수화 플랜트용 고압펌프 제작에 적합한 재료이다. 특히 고압펌프의 회전부품의 경우 마모와 부식에 동시에 노출되므로 레이저 쇼크 피닝 기술을 고압펌프의 회전 부품에 적용할 경우 부품의 내마모성과 내부식성을 증가시킴으로써 플랜트의 유지비 감소와 기계수명 증가라는 결과를 얻을 수 있을 것으로 기대 된다.⁸⁻¹⁰

본 연구에서는 듀플렉스 강의 레이저 쇼크 피닝에 대한 실험적 연구결과를 보고하였다. 레이저 에너지 밀도와 코팅 재료 등의 조건을 바꿔가며 레이저 쇼크 피닝 실험을 수행하고 소재의 표면경도가 최대로 향상되는 조건을 확인하였다. 또한 레이저 쇼크 피닝 전후의 표면조도를 비교하고, 피닝에 의해 생성된 경화층의 두께와 피닝 전후의 표면 미세조직 등을 관찰하였다.

2. 실험장치 및 방법

Fig. 1은 본 연구에 사용된 레이저 쇼크 피닝 실험장치의 개략적인 구성을 나타낸다. 시편은 정수된 물이 채워진 아크릴 챔버에 설치되어 있고, 실험용 레이저로는 Nd:YAG 레이저(Continuum, Powerlite II; 파장 = 532nm, 펄스폭 = 8ns, 최대펄스에너지 = 1.5J, 펄스 반복율 = 10Hz)를 사용하였다. 레이저빔의 직경은 11mm이며, 렌즈(초점길이 = 400mm)를 이용하여 시편표면에서의 초점크

기(spot diameter)가 약 1.0-2.5 mm가 되도록 집속하였다. 실험 시편으로는 50mm × 50mm 크기에 두께 5mm로 방전가공으로 제작된 2205 듀플렉스 강(Industeel, 22.64% Cr, 5.48% Ni, 0.02% C, 1.89% Mn, 0.28% Si, 0.03% P, 3.07% Mo, 0.16% N, and balance Fe)을 사용하였으며 레이저 쇼크 피닝은 시편의 중심부근 10mm × 10mm 넓이의 영역에 수행되었다. 레이저 조사영역 내에서 레이저 빔은 X-Y 모터 구동형 정밀 이송장치를 이용하여 이송하였으며, 이때 시편표면에서의 레이저 펄스 밀도(Dp)는 $Dp = RR/(v \times p)$ 로 정의되며 여기서 RR 는 펄스 반복률, v 는 X축 방향의 이송 속도, p 는 Y축 방향 간격을 나타낸다. 레이저 쇼크 피닝시 발생하는 플라즈마의 압력은 사용하는 보호막의 종류에 따라 크게 달라질 수 있으며, 보호막을 사용함으로써 레이저조사 시 발생하는 시편의 손상이 방지되어 레이저 쇼크 피닝 이후 표면에 대한 추가적인 후처리 과정을 생략할 수 있게 한다. 본 연구에서는 세 종류의 보호막, 100 μ m 두께의 Al 박판(foil), 50 μ m 두께의 Fe 박판, 100 μ m 두께의 유기 검정 페인트를 사용하여 실험을 수행하고 그 결과를 관찰하였다. Al 박판과 Fe 박판의 경우 레이저 쇼크 피닝이 적용되는 넓이 주변에 양면 테이프를 이용하여 박판을 고정하고, 박판을 시편표면에 접촉시켜 박판과 시편사이에 유격을 제거 하였으며, 유기검정 페인트의 경우 시편 표면에 100 μ m 두께로 바른 이후 실온에서 건조시킨 후 실험을 수행하였다. 시편의 피닝 전후의 표면 미세조직은 광학 현미경(LEIKA, AG Reichert Division, 20x)을 이용하여 관찰하였으며, 표면 조도는 공초점 3차원 표면형상 측정기(Nanofocus, AGmSurf)를 이용하여 관찰하였다. 레이저 쇼크 피닝이 적용된 시편은 표면경도가 향상되는 것으로 알려져 있으며 본 실험에서는 피닝이 완료된 시편의 표면경도를 마이크로 비커스 경도 시험기(AKASHI, HM-112)를 이용하여 측정하였으며, 경도측정은 200g의 시험 중량을 5분간 가해주는 조건에서 실시되었다. 측정 정밀도 향상을 위해 Fig. 2에서와 같이 레이저 쇼크 피닝이 실시된 영역 내에서 6개 지점과 피닝이 실시되지 않은 영역 내에서 2개 지점에서 경도값을 측정한 후 각 영역에서의 측정값의 평균을 대표값으로 사용하였다. 실제 경도 측정에서 경도값은 마이크로 비커스 경도 시험기가 만들어낸 자국의 크기를 기준으로 계산하므로 측정 시 생성된 자국을 명확히 구분할 수 있도록 하기 위해 각 시편은 표면 조도를 평균 0.07 μ m 수준까지 연마하였다.

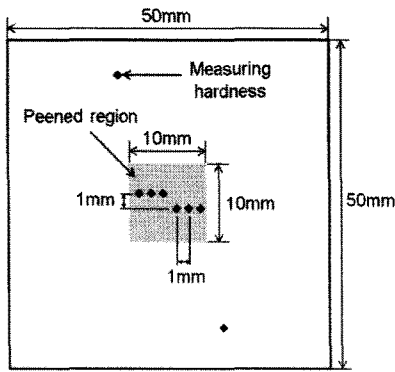


Fig. 2 Positions of surface hardness measurement on samples.

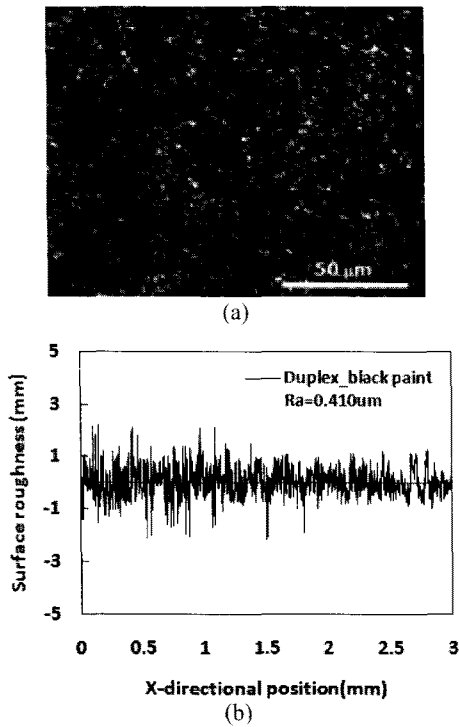


Fig. 3 Surface (a) morphology and (b) roughness of a laser-shock-peened duplex stainless sample using an organic black paint as the protective layer.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 표면조도

앞에서 언급한 바와 같이 레이저 쇼크 피닝은 레이저 어블레이션 시 발생한 강력한 레이저 플라즈마 압력에 의해 금속표면에 압축응력을 발생시키는 공정이므로, 재료의 표면이 어블레이션에 의한 손상을 입거나 플라즈마 압력에 의해 소성 변형을 일으켜 표면품질이 달라질 수 있다. 레이저 어블레이션에 의한 표면손상을 효과적으로 줄이기 위해서 보호막을 사용하며, 아울러 적절한

보호막의 선택은 반사율이 높은 금속표면에서의 레이저 에너지 흡수율을 향상시키는 역할을 하기도 한다. 현재 생산되고 있는 고출력 펌프 부속품의 표면 조도는 대략 $1.0\mu\text{m}$ 로 레이저 쇼크 피닝이 완료된 재료의 표면조도도 이 범위를 벗어나지 않도록 관리되어야 한다.

본 연구에서는 레이저 쇼크 피닝시 대표적으로 많이 사용되고 있는 보호막 재료인 유기검정 페인트, 철(Fe) 박판, 알루미늄(Al) 박판을 이용하여 피닝 실험을 수행하였고 이때 시편 표면에서의 조도 변화를 관찰하였다. 먼저 Fig. 3(a)는 대략 $100\mu\text{m}$ 두께의 유기 검정 페인트로 코팅된 듀플렉스 강 시편의 레이저 쇼크 피닝 후의 표면 사진으로 시편의 표면이 어블레이션으로 인해 비교적 거친 굴곡을 이루고 있는 것을 알 수 있다. Fig. 3(b)는 이 시편의 실제 표면조도를 측정된 결과로 표면 조도는 평균 $0.4\mu\text{m}$ 로 피닝 전보다 약 5.8배 증가한 것으로 나타났으며, 최대 거칠기는 $2.17\mu\text{m}$ 로 나타났다. 실제 제품으로 생산되는 펌프 부속의 표면 조도가 대략 $1.0\mu\text{m}$ 인 점을 감안하면 유기 검정 페인트는 표면 조도 증가와 함께 표면 미세 조직의 상당한 변화를 야기하므로 보호막 재료로는 부적합 하다고 판단된다.

한편, Fig. 4(a)는 Al 박판을 보호막으로 사용하여 레이저 쇼크 피닝을 실시한 시편의 표면 사진을 보여주고 있다. 유기 검정 페인트의 경우와는 달리 시편 표면의 어블레이션 흔적은 거의 발견할 수 없으며, 원래의 표면연마 흔적이 관찰됨을 통해 표면의 변화가 거의 발생하지 않았음을 알 수 있다. Fig. 4(b)는 3차원 표면형상 측정기로 측정된 표면 조도를 나타내고 있는데, 평균값과 최대값이 각각 0.18 와 $1.20\mu\text{m}$ 로 측정되었다. 또한 같은 방식으로 Fe 박판을 보호막으로 사용하여 피닝을 수행한 결과 시편의 표면조도의 평균값과 최대값은 각각 0.19 와 $0.83\mu\text{m}$ 로 측정되었다. 이상의 결과에서 금속박판을 보호막으로 사용할 경우 표면품질 저하를 더 효과적으로 방지할 수 있음을 알 수 있다. 금속박판 중에서 Al 박판을 사용한 경우와 Fe 박판을 사용한 경우의 평균조도는 거의 차이가 없으며 최대값에서 Fe 박판을 사용한 경우가 약간 낮은 것으로 측정되었으나, 아래에서 설명하는 바와 같이 각 박판을 사용하였을 때의 표면경도 상승효과의 차이를 고려하여 본 연구에서는 Al 박판을 최적의 보호막 재료로 선정하였다.

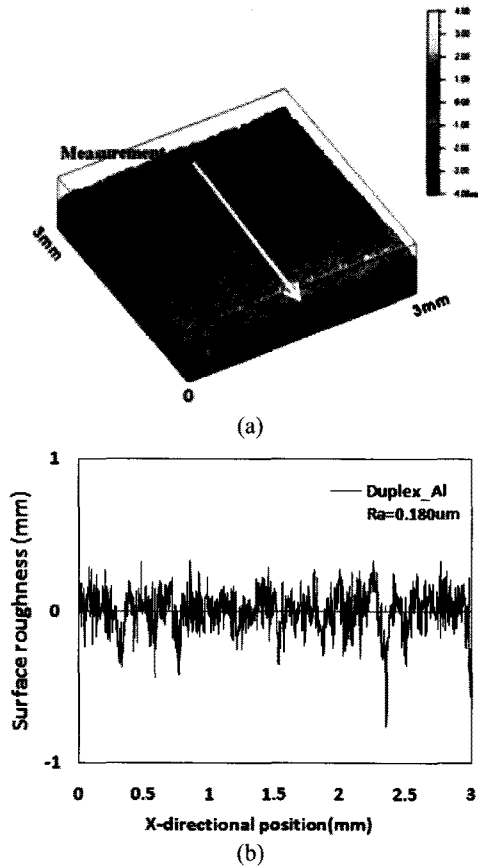


Fig. 4 (a) Three dimensional surface profile and (b) surface roughness of a laser-shock-peened duplex stainless sample using Al foil as the protective layer.

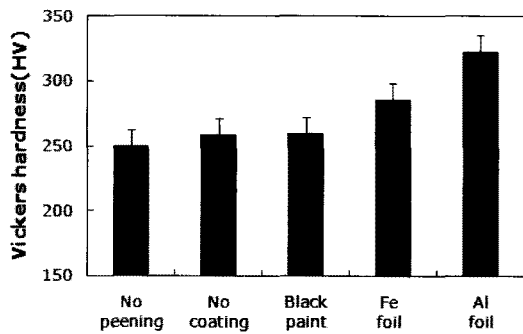


Fig. 5 Effects of the protective coating layer on the Vickers hardness.

3.2 표면경도

레이저 쇼크 피닝이 효과적으로 이루어진 재료의 경우 재료내부에 압축응력이 증가하며, 이는 표면경도의 증가, 내마모성 및 내부식성의 증가와 같은 재료의 기계화학적 특성의 변화로 나타난다. 따라서 표면경도 측정을 통해 레이저 쇼크 피닝이 얼마나 효과적으로 이루어졌는지 여부를 판단할 수 있다.

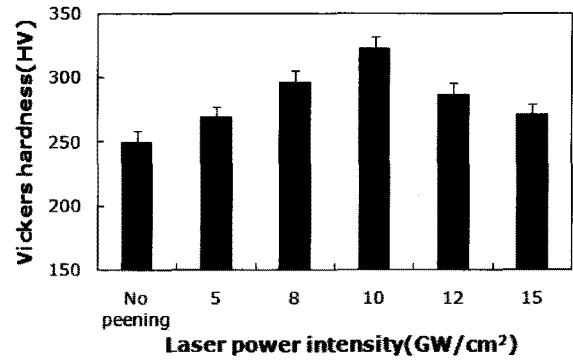


Fig. 6 Effects of laser intensity on the Vickers hardness.

Fig. 5는 각각의 다른 보호막을 사용하여 동일한 조건 (레이저 에너지강도 = 10GW/cm², 펄스밀도 = 75pulse/mm²)에서 레이저 쇼크 피닝을 수행한 시편의 표면경도 값을 보여주고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 사용하는 보호막의 종류에 따라 표면경도의 차이가 상당히 발생하며, Al 박판을 사용하였을 때 가장 높은 표면경도 상승률(26%)을 얻을 수 있었다. Fe 박판의 경우 표면 경도 상승률이 최대 약 15%로써 Al 박판을 이용한 경우보다 효과가 적은 것으로 나타났으며 유기 검정 페인트를 사용한 경우 거의 미미한 정도의 표면경도 상승이 관찰되었다. 한편 Fig. 5에서와 같이 보호막이 없을 경우 표면경도 상승효과가 거의 없을 뿐 아니라 평균표면조도도 10µm 이상으로 나타나 바람직하지 않은 것으로 판명되었다. 이상의 표면경도 측정결과와 위에서 설명한 표면조도 측정결과를 바탕으로 Al 박판이 듀플렉스 강의 레이저 쇼크 피닝시 가장 적합한 보호막 재료라고 판단된다.

레이저 쇼크 피닝시 레이저 에너지강도는 피닝 효과에 가장 큰 영향을 미치는 변수 중 하나이다. Fig. 6은 Al 박막을 보호막으로 사용하고 레이저 펄스밀도를 75pulse/mm²로 고정한 상태에서 레이저 에너지 강도를 변화시켰을 때 시편의 표면 경도 변화를 보여준다. 대체로 낮은 에너지 영역에서는 레이저 에너지강도의 증가에 따라 표면경도도 증가하는 양상을 나타내며, 어느 정도 최적범위를 지나면 오히려 에너지강도가 증가함에 따라 표면경도가 감소함을 알 수 있다. Fig. 6의 각각의 레이저 에너지 강도에 따른 표면경도 상승률은 8GW/cm²에서 19%, 10GW/cm²에서 26%, 12GW/cm²에서 13%로 레이저 에너지 강도 10GW/cm²이 가장 최적의 조건이라고 볼 수 있다.

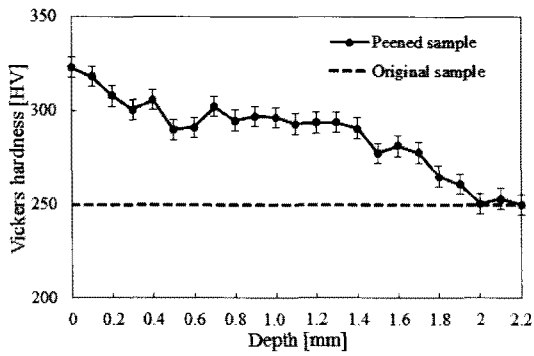
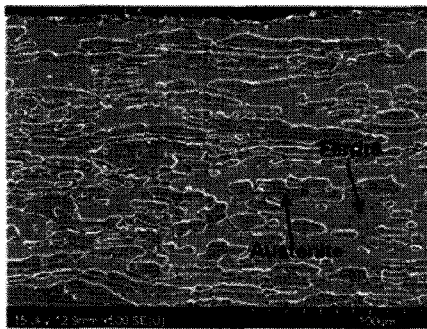
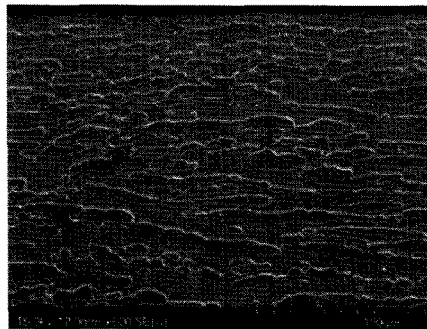


Fig. 7 Vickers hardness measured along the depth of laser-shock-peened samples. The peened sample was cut by half using electrodischarge machining for measurements.



(a)



(b)

Fig. 8 Cross-sectional micrographs of (a) unpeened and (b) peened duplex stainless steel samples.

레이저 쇼크 피닝이 슛 피닝에 비해 가장 유리한 장점 중 하나는 상대적으로 깊은 깊이까지 압축응력이 형성된다는 점이다. 깊이 방향으로 레이저 쇼크 피닝의 효과가 어느 정도까지 도달하였는지를 확인하기 위해 시편의 단면을 따라 경도를 측정하였으며 그 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 레이저 쇼크 피닝 전 재료의 경도는 250Hv이며, 그림에서 보는 바와 같이 재료의 경도상승이 대략적으로 깊이 방향으로 약 2.0mm 근처까지 이루어졌음을 알 수 있다. 이 결과는 슛 피닝과 비교 하였을 때 상당히 큰 값으로 슛 피닝의 경우 알루미늄 합금과 같은 금속의 경우 압축잔류응력이 형성되는 피닝층의 두

께가 0.25mm 이상이 되지 않는 것이 일반적이다.⁵ 표면 경화층의 두께가 작은 경우 경화층이 마모나 크랙에 의하여 손실되거나 표면처리 효과를 제대로 발휘하지 못할 가능성이 높다. Fig. 8(a),(b)는 각각 레이저 쇼크 피닝 전과 후의 시편의 단면 금속조직을 촬영한 현미경 사진 보여주고 있으며, 피닝 실험은 레이저 에너지 강도 10GW/cm², 레이저 펄스 밀도 75pulse/mm², Al 박판 보호막을 사용한 조건에서 실시되었으며 단면 촬영을 위해 시편은 30% 질산 용액에서 1.5V로 전해연마를 거쳤다. 듀플렉스강의 미세구조는 페라이트(ferrite)와 오스테나이트(austenite)로 구성되어 있으며, 두 구조의 비율이 대략적으로 1:1일 경우에 최상의 부식 저항성과 기계적 성질을 갖는다. 레이저가공 시 열적 효과에 의해 페라이트 구조가 증가할 수 있다고 알려져 있지만,¹¹ 피닝한 시편의 단면(Fig. 8(b))을 피닝 하지 않은 시편의 단면 (Fig. 8(a)) 과 비교하였을 때 거의 차이가 나지 않음을 알 수 있으며, 따라서 본 연구에서 적용한 레이저 쇼크 피닝 조건의 경우, 레이저 조사에 따른 열적 효과가 거의 발생하지 않았다고 볼 수 있다.

4. 결론

해수담수화 플랜트 펌프에 실제적으로 적용되는 듀플렉스 강의 레이저 쇼크 피닝 실험을 통해서, 레이저 쇼크 피닝 적용시 시편의 표면 경도가 26% 까지 향상됨을 확인하였다. 표면 경도 측정을 통해 확인한 레이저 쇼크 피닝의 효과는 레이저 변수에 의해 크게 영향을 받는 것으로 나타났으며, 듀플렉스 강 최적 피닝 조건은 레이저 에너지 강도 10GW/cm², 레이저 펄스 밀도 75pulse/mm²에서 Al 박판을 보호막으로 사용한 경우로 확인되었다. 최적 조건하에서 레이저 쇼크 피닝이 실시될 경우 경화층이 거의 2.0mm 정도까지 형성됨을 보였으며, 이상의 결과는 담수화용 펌프 부품의 내마모성 및 내부식성을 증가시키고 궁극적으로 펌프의 수명연장에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

- 1) K. Ding, L. Ye, "Laser shock peening performance and process simulation," Woodhead, Cambridge,

- pp. 19-23, 2006.
- 2) A.H. Clauer, B.P. Fairand, B.A. Wilcox, "Pulsed laser induced deformation in an Fe-3 Wt Pct Si alloy," *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 8, pp. 119-125, 1977.
 - 3) R. Fabbro, P. Peyre, L. Berthe, X. Scherpereel, "Physics and applications of laser-shock processing," *Journal of Laser Application*, Vol. 10, No. 6, pp. 265-279, 1998.
 - 4) C.S. Montross, V. Florea, M.V. Swain, "The influence of coatings on subsurface mechanical properties of laser peened 2011-T3 aluminum," *Journal of Materials Science*, Vol. 36, No. 7, pp. 1801-1807, 2001.
 - 5) A.H. Clauer, "Laser shock peening for fatigue resistance," *Proceedings of Surface Performance of Titanium*, The Metal Society of AIME, Warrendal, PA, pp. 217-230, 1996.
 - 6) 임현택, 이명화, 김필규, 박종복, 정성호, "레이저 피닝을 이용한 스테인리스강의 표면 경도 강화," *한국 레이저 가공학회지*, Vol. 12, No. 9, pp. 18-22, 2009.
 - 7) W. Reitz, "Laser shock peening solves many performance issues," *Surface Engineering*, Vol. 18, No. 1, pp. 1-3, 2002.
 - 8) H. Lim, M. Lee, P. Kim, J. Park, S. Jeong, "Improvement of surface hardness of duplex stainless steel by laser shock hardening for the application to seawater desalination pump," *Desalination and Water Treatment*, Vol. 15 No. 1-3, pp. 43-47, 2010.
 - 9) 임현택, 이명화, 김필규, 박종복, 정성호, "레이저 피닝을 이용한 스테인리스강의 표면 경도 및 내마모성 강화," *한국레이저가공학회 2009년도 추계학술발표대회 논문집*, pp. 38-44, 2009.
 - 10) 임현택, 이명화, 김필규, 정성호, "레이저 피닝을 이용한 스테인레스 강역 기계적 성능 향상," *한국 레이저 가공학회 2010년도 추계학술발표대회 논문집*, pp. 62-69, 2010.
 - 11) E. Capello, P. Chiarello, B. Previtali, M. Vedani, "Laser welding and surface treatment of a 22Cr-5Ni-3Mo duplex stainless steel," *Materials Science and Eng. A*, Vol. 351, No. 1-2, pp. 334-343, 2003.