

## 금속표면 특성향상을 위한 laser peening 효과

정진만\*, 백성훈\*, 김정수\*, 이상배\*\*

\*한국원자력연구원, \*\*한국과학기술연구원

### The Laser Peening Effect for Improving the Surface Properties of Metals

Chin-Man Chung\*, Sung-Hoon Baik\*, Joung-Soo Kim\* and Sang-Bae Lee\*\*

\*Korea Atomic Energy Institute, \*\*Korea Institute of Science and Technology

#### ABSTRACT

The effect of a laser peening on the surface residual stress of SUS 304 was investigated using a second harmonic Nd:YAG laser beam. The energy density and the diameter of the laser beam were  $400 \text{ mJ/mm}^2$  and about 1mm, respectively. According to the test results, the effect of a laser peening for improving the surface residual stress was not big enough to induce a high compressive stress on the SUS 304 surface. This is thought to be attributed to the small radius of the laser beam used in this study, even though its energy density is big enough. From this study, it can be concluded that to induce a recognizably high compressive stress on a metal surface, the energy density as well as the size (diameter) of the laser beam should be large enough to generate surface plasma with a high energy to have a big impact to a metal surface.

**Key Words:** Laser, Peening, Residual stress improvement

#### 1. 서론

금속 재료에는 기계가공, 용접, 열처리 등에 의한 잔류응력이 존재하게 되는데, 금속 표면에 존재하는 잔류응력은 재료의 부식 및 파괴에 영향을 미친다[1]. 레이저 단조(Laser Peening)는 금속표면에 레이저 빔을 조사시켜 금속표면에 압축성 응력을 발생시킴으로써, 금속표면의 특성을 변화시켜 주는 표면처리 기술이다.

레이저 단조 방법은 짧고 강한 레이저 펄스 빔을 금속표면에 조사시킴으로써 금속 표면에 높은 압력의 플라즈마에 의한 소성변형(plastic deformation)을 일으키고, 이로 인한 압축 잔류응력이 생성되어 금속표면의 특성을 변화시키는 처리 방법이다. 이렇게 생성된 압축 잔류응력은 금속 표면에 균열의 생성과 성장을 억제하여 금속피로(fatigue) 특성과 응력부식균열(stress corrosion cracking)을 억제시켜 표면상태를 크게 개선시키는 것으로 알려져 있다.

레이저 단조 결과의 분석을 위한 잔류응력 측정은 일반적으로 X-선 회절법과 중성자 측정법, 그리고 홀드릴링(hole drilling method) 방법 등이 사용되는데[2], 본 연구에서는 측정방법으로 홀드릴링 방법을 사용하였다.

#### 2. 펄스 레이저에 의한 충격파 발생원리

레이저 단조 방법에서는 고에너지 레이저 펄스 빔을 금속표면에 집속하여 강한 충격파를 발생시킨다. 이러한 충격파를 금속표면에 전달하기 위해서, 우선 금속 표면을 물로 보호하고, 또한 금속 표면에 불투명한 페인트와 같은 물질을 입혀 열로 변환 에너지로부터 금속표면에 열영향이 나타나는 것을 막아주는 방법을 사용한다.

Fig. 1은 레이저 단조 방법을 나타낸 것으로, 물속에서 재료 표면에 레이저 빔을 조사시키게 되면

물속을 통과한 레이저 빔은 금속 표면이나 불투명한 층의 물질에서 흡수되고 증발되면서 플라즈마를 발생시킨다. 레이저 빔이 집속되어 생성된 플라즈마의 온도는 급격하게 상승되고, 이러한 플라즈마는 금속표면에서 고에너지 밀도( $\sim 200 \text{ J/cm}^2$ )를 발생시켜 압력이 급격하게 올라가게 되고 이로 인한 충격파가 금속 내부로 진행하게 된다.

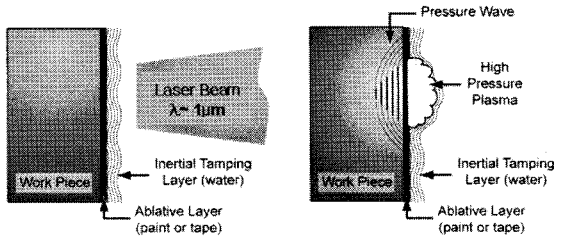


Fig. 1 Principle of Laser Peening.

레이저 단조에서는 표면에 물과 불투명 보호층을 동시에 사용하거나 물만을 사용하는 경우가 있는데, 물은 플라즈마의 팽창을 막아주는 역할을 하여 플라즈마의 압력이 물을 사용하지 않을 경우에 비하여 1000배 정도 증가된다. 레이저 단조 과정에서 노즐을 이용하여 물을 금속표면에 흐르게 하거나, 혹은 시편은 수조 안에 넣고 레이저빔을 조사시킬 수도 있다.

금속표면에 입힌 불투명한 물질은 레이저 빔에 의해 생성된 고온의 플라즈마를 막아주며, 금속표면과의 열적 접촉을 막아 주어 금속종류와 무관하게 일정한 단조 효과를 나타나게 하여준다. 일반적으로 불투명한 물질이 없는 금속표면에 레이저 빔을 직접 조사시키게 되면 고온의 플라즈마에 의해 금속표면이 변색되거나 얇은 용융층이 형성되는데, 이러한 용융층은 단조 효과를 감소시킨다. 금속표면에 입혀주는 보호막층은 주로 페인트, 접착제, 금속막 등을 사용할 수 있는데, 이런 얇은 막은 대체적으로 막이 없는 경우와 비슷하게 플라즈마 발생효과를 낸다.

레이저 단조에서 금속 내부로 진행되는 충격파는 금속의 기계적 특성을 강화 시켜준다. 충격파가 금속 내부로 진행하면서 금속 내부구조에 일차로 인장성 변형을 일으키고, 충격파가 사라지면서 압축성 변형을 만들어 준다. 금속 내부로 진행되는 충격파는 깊이에 따라 감소하게 되며, 따라서 깊이에 따라 소성 변형량도 감소하게 된다. 레이저 단조는 일반적으로 많은 산업현장에 사용되고 있는

shot peening 보다 충격파가 크기 때문에 압축성 잔류응력을 더 크고 깊게 만들 수 있는데, 압축성 잔류응력이 깊어질수록 금속의 기계적인 특성은 더욱 좋아지는 장점이 있다.

### 3. 실험 장치 및 방법

본 연구에서 구성한 레이저 단조실험 장치는 Fig. 2와 같다. 또한, 실험에 사용된 금속시편은 두께가 2.5 mm이고 크기가  $25 \times 75 \text{ mm}$  인 직사각형 SUS 304 스테인레스 스틸 재질이다.

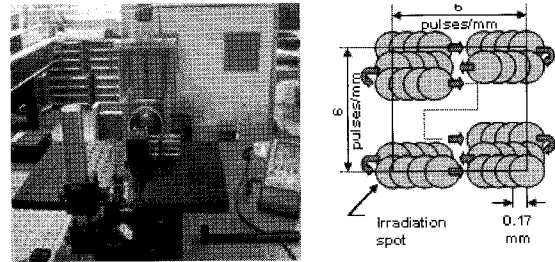


Fig. 2 Experimental equipment and process.

Fig. 2에 보는 바와 같이 금속시편은 지지대에 고정하여 수조 내에 잠기도록 하였고, 이 수조는 X-Y 이송기 위에 설치하여 스캐닝 하면서 시편 표면에 레이저 빔을 조사할 수 있도록 하였다. X-Y 이송기는 모터 구동에 의하여  $15 \times 15 \text{ mm}$  영역의 금속표면이 레이저 빔에 조사되도록 제어하여 주었다.

사용된 레이저는 펄스형 Q-switched Nd:YAG 레이저(Spectra Physics)로 입사조건은 펄스 에너지 400 mJ, 펄스 폭 8 ns, 반복율 10 Hz로 하였다. 초점거리 150 mm 인 집속 렌즈를 사용하여 초점면에서 spot 직경크기가 약 1 mm가 되도록 하였다. X-Y 이송기의 이송 속도를 조절하여 레이저 빔 직경의 약 80% 정도가 겹치도록 하여 단조 시편을 만들어, 임의의 한 점에서 약 4번의 레이저 펄스가 중첩되어 단조 영향을 받도록 실험하였다.

레이저 단조 처리된 금속표면의 잔류응력은 Fig. 3에 나타난 것처럼 홀드릴링 방법으로 측정하였다 [3]. 홀드릴링은 직경 1.6 mm의 작은 구멍을 금속 표면으로부터 깊이 1 mm까지 뚫으면서 구멍주변의 미세한 스트레인 변화를 90도 및 135도씩 배열된 3개의 스트레인 게이지(EA-13-062RE-120)로 측정

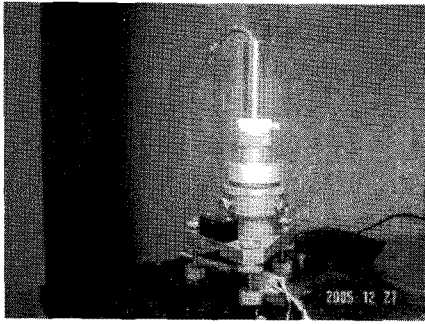


Fig. 3 Hole drilling machine.

하게 된다. 표면으로부터 깊이에 따른 스트레인 값을 측정하여 금속표면으로부터 깊이에 따른 스트레인 분포를 측정하고, RS-200 Milling guide from Measurement Group을 사용하여 잔류응력을 측정하였다. 이 때 측정되는 잔류응력은 평면시료의 표면에 평행한 radial 방향으로 작용하는 응력이다.

레이저 단조 처리를 할 때 보통 투명 보호층인 물을 사용하는데, 물을 사용하지 않을 경우 레이저 빔에 의해 유도된 플라즈마는 금속표면으로부터 급격히 팽창하며 충격파가 금속 표면으로 효과적으로 전달되지 않아 금속표면에 압축성 잔류응력을 만들어 낼 수 없다. 물을 사용하지 않고 레이저 단조를 한 경우 레이저 출력이 2.4 TW/cm<sup>2</sup>의 높은 출력일 때도 단조 효과가 충분히 이루어지지 않았다고 보고되고 있다. 일반적으로는 레이저 단조는 투명 보호층으로 물을 사용하고, 1 GW/cm<sup>2</sup> 이상의 출력에서 좋은 결과를 얻는 것으로 알려져 있다[4].

#### 4. 실험 결과 및 고찰

Fig. 4는 시편을 수조에 담그고, 불투명 보호층이 없는 상태에서 레이저 단조 실험을 한 후의 50 um 간격의 깊이별로 잔류응력을 측정한 결과이다. 실험 결과에서 보면 단조처리 전의 압축응력이 단조처리 후에 오히려 압축응력이 감소한 것을 알 수 있다 즉, 시료표면에 불투명 보호층이 없이 레이저 단조를 한 경우에는 시편표면에 인장 잔류응력(tensile residual stress)이 생성되어 표면특성을 악화시키는 결과를 가져오게 된다. 앞서 기술한 바와 같이 일반적인 레이저 단조를 수행하는데 불투명 보호층의 역할은 레이저 빔으로부터 금속표면에 열영향을 받지 않도록 하여

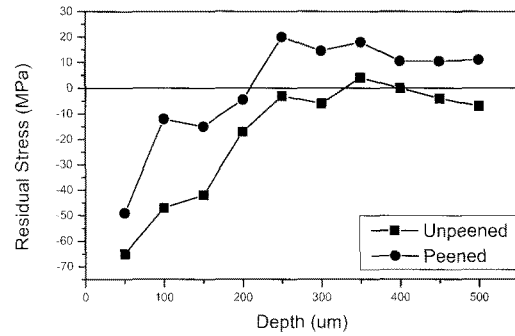


Fig. 4 Residual stress distribution without ablative layer in water. (depth VS residual stress)

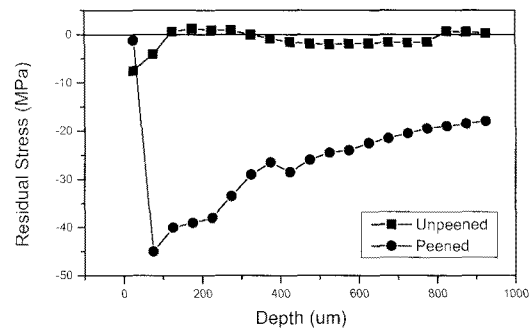


Fig. 5 Residual stress distribution with ablative layer in water. (depth VS residual stress)

레이저 증발(laser ablation)이 생기지 않도록 하는 것이다. Fig. 4의 결과에서는 불투명 보호층이 없이 레이저 단조 실험을 수행하고 잔류응력을 측정한 결과 압축 잔류응력이 감소하였는데, 이는 레이저 단조 처리과정에서 금속표면이 플라즈마에 의한 열영향을 많이 받고 표면 증발에 의해 많이 손상되었음을 보여주는 것이다.

Fig. 5의 결과는 불투명 보호층으로 알미늄 테이프를 사용하여 레이저 단조 실험을 한 경우의 잔류응력 분포이다. 실험 결과를 보면 레이저 단조효과를 명확히 확인할 수 있는데, 단조 전의 표면 압축잔류응력은 약 10 MPa로 시편의 깊이에 따라 거의 0 MPa의 잔류응력을 보였으나, 레이저 단조 후에는 표면부근의 압축응력이 45 MPa로 4배 이상의 단조효과를 보여 주고 있다. 또한 여기서 더 주목하여야 할 것은 단조효과가 1 mm 이상의 깊이에서도 나타나고 있다는 것이다. 이러한 단조효과는 shot peening이나 다른 방법에 의한 peening으로는 얻을 수 없는 것으로 레이저 단조의 우수성을 보여 주고 있다.

연속적으로 레이저 단조처리를 하게 되면 압축

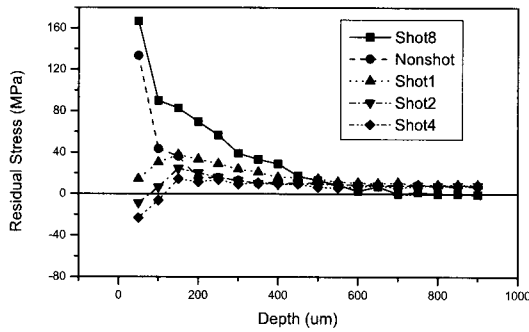


Fig. 6 Residual stress distribution after multiple peening process. (depth VS residual stress)

잔류응력을 더욱 더 깊게 만들 수 있다. Fig. 6은 한 번의 레이저 단조 처리를 한 경우부터 횟수를 늘려 연속적으로 8번 까지 단조 처리를 한 경우의 결과를 비교한 것이다. 이 결과에서 보면 단조 전의 시편표면 부근의 잔류응력이 높은 인장응력을 보여 주고 있다.

그런데 1차 단조 후의 표면 잔류응력은 거의 0에 가까운 응력을 보여주고 있다. 즉, 앞에서 언급하였듯이 우수한 레이저 단조효과를 보여 주고 있다. 또한 이 결과에서 보면 peening 회수가 증가하면 단조효과가 증가하여 4회 처리에서 가장 큰 압축응력을 보이고 있으나, peening 회수를 더 증가시킬 경우에는 오히려단조효과가 감소하여, 8회를 처리한 경우에는 단조처리를 하기 전의 응력 값에 접근하고 있음을 알 수 있다. 이는 여러 번의 단조 처리로 불투명 보호층이 플라즈마에 의해 제거된 후에는 금속 표면의 열영향으로 인장성 잔류응력이 발생하는 것으로 설명할 수 있다.

본 실험에서는 금속표면에서 레이저 빔 직경을 약 1 mm로 하여 레이저 단조 실험을 수행하였다. 이는 레이저의 출력이 한정되어 있어, 레이저 빔의 출력 밀도를 1 GW/cm<sup>2</sup> 이상으로 높이기 위하여 광학계를 구성하였기 때문이다. 그러나 이와 같이 빔의 직경이 작게 되면 발생하는 충격파 에너지는 구면파의 에너지와 같은 1/r<sup>2</sup>의 비로 감소하게 된다. 따라서 단조의 깊이는 수백 μm 정도밖에 미치지 못하게 된다. 보통 충분한 효과로 판단하는 1 mm 정도 깊이까지 단조 효과를 보기 위해서는 높은 출력의 레이저를 사용하고, 레이저 빔 직경을 크게 하여 충격파를 평면파에 가깝게 만들어 깊이 침투할 수 있도록 해야 한다 [5]. 또한 본 연구에서는 레이저 빔의 펄스폭이 8 ns 였는데, 충격파의 효과를 충분히 하기 위해서

는 레이저 펄스폭을 길게 하는 것이 유리할 것으로 판단된다.

앞으로 레이저 빔의 에너지 밀도와 직경을 변화시키면서 peening을 하여 이러한 변수들이 금속표면에 유기되는 압축응력의 크기와 깊이에 미치는 영향을 좀 더 심도있게 연구하여 peening 최적공정을 설정할 예정이다. Laser peening 공정이 개발되면 실제로 국내가동 원자력발전소 핵심 부품소재에서 발생하고 있는 피로손상이나 응력 부식균열 손상을 방지 또는 억제하기 위하여 적용할 예정이다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 레이저 peening 효과에 대한 preliminary 연구결과로, SUS 304 재질에 펄스형 Nd:YAG 레이저 빔을 이용하여 레이저 단조 실험을 하고, 깊이에 따른 잔류응력 변화를 측정하였다. 물과 불투명 보호층을 사용하여 압축 잔류응력이 증가하는 단조 효과를 실험적으로 측정하였으며, 다중 단조 효과도 측정할 수 있었다. 본 실험에서는 에너지 밀도 약 400 mJ/mm<sup>2</sup>에서 레이저 빔의 직경이 약 1 mm가 되도록 광학계를 구성하여 단조 실험을 하였는데, 이 경우 에너지 밀도는 충분하나 레이저빔의 직경이 적어 단조효과 크기와 깊이가 제한적인 것으로 판단된다. 따라서 금속표면에서 압축응력의 크기와 깊이를 더 향상시키기 위해서는 레이저 빔의 에너지 밀도뿐 아니라 빔의 크기가 중요하며, 앞으로 레이저 출력과 빔의 직경을 변화시키면서 레이저 peening 공정의 최적화 연구를 수행하여, 원자력 발전소 부품소재의 수명향상에 적용할 예정이다.

#### 후 기

본 연구는 나노기술개발사업의 기술지원에 의하여 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

- 1) Suresh, S. and Giannakopoulos, A. E., 1998, "A New Method for Estimating Residual Stress

- by Instrumented Sharp Indentation,” *Acta Materialis*, Vol. 46, No, pp. 5755-5767.
- 2) ASTM 2002, Annual Book of ASTM Standards, v.03.01 no.E837-01, Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole Drilling Strain Gage Method.
  - 3) J. Lu (Ed.), *Handbook of Measurement of Residual Stresses*, Society for Experimental Mechanics, 1996.
  - 4) Chu J.P, Rigsbee J.M, Banas G, Lawrence F.V, Elsayed-Ali H.E, Effects of laser-shock processing on the microstructure and surface mechanical properties of Hadfield manganese steel. *Metallurgical and Materials Transactions A* 1995;26A:1507-17.
  - 5) Fabbro R, Peyre P, Berthe L, Sherperceel X. Physics and applications of laser-shock processing. *Journal of Laser Applications* 1998;10:265-79.