

# 레이저 피닝 잔류응력 개선

## Residual stress improvement by laser shot peening

한국원자력연구소 정진만, 고광훈, 이기태, 권성욱, 임창환

### I. 서론

레이저를 이용한 재질표면의 성능개선가공은 지난 수년간 실험실 및 일부 항공 및 원자력산업현장에서 수행되어 왔으며, 점차 실용화 사업에 이용이 확대되고 있는 추세이다. 최근에는 원자력 발전소 및 항공기 엔진의 수명연장에도 레이저 피닝방법이 사용되고 있다.

금속 표면에서 발생된 잔류 응력이 존재하면, 표면에 균열이 생성되고 진행된다. 표면처리 기술인 레이저 피닝은 표면에 레이저빔을 조사시킴으로서 금속표면의 특성을 변화시켜준다. 짧고 강한 레이저 펄스를 이용하여 금속표면에 레이저 빔을 조사하면, 금속표면에 발생하는 플라즈마의 높은 압력에 의해 소성변형이 일어난다. 소성변형은 압축성 잔류응력이 생성되어 금속표면의 물리적 특성이 변하게 된다.

압축성 잔류응력이 생성되면 균열의 생성과 진행을 억제하고, 금속의 피로특성과 응력부식균열 특성이 크게 향상된다. 본 연구에서는 레이저 빔을 이용한 피닝 실험 실험 장치, 그리고 이를 이용한 SUS 304 재질의 실험 결과에 대하여 기술한다.

### II. 레이저 피닝 개념

레이저 피닝효과는 고에너지 레이저 펄스빔을 금속표면에 집속하여 강한 충격파를 발생시킨다. 충격파를 효율적으로 생성하기 위해서는 금속표면에 레이저빔이 투과하지 못하도록 페인트와 같은 불투명한 물질을 입혀준다.

또한 레이저빔에 의하여 발생된 충격파를 금속표면에 잘 전달되도록 투명한 물을 이용하여 레이저빔을 투과시켜 주면, 충격파는 공기보다 물에서 강하게 금속쪽으로 전달한다. 이러한 금속표면에 두께층이 존재하도록 하여 그림 1과 같이 레이저빔을 조사시키게 되면 물속을 통과한 레이저 빔은 불투명 층의 물질에 의해 흡수되고 증발되어 플라즈마를 발생시킨다. 플라즈마 온도는 급격하게 상승되고 연속적으로 입사되는 레이저빔에 의해서 더욱 더 상승된다. 그러나 레이저빔에 투명한 물의 영향으로 고온의 플라즈마는 열적 팽창을 하는데 제한이 있다. 이러한 플라즈마의 압력은 급격히 올라가게 되고, 이로 인해 충격파가 발생되어 금속내부로 진행하게 된다.

금속내부로 진행되는 충격파는 금속내부로 진행하면서 내부에서 소성변형을 일으키고 결과적으로 압축성 인장강력을 만들어 준다. 금속 내부로 진행되는 충격파는 금

속깊이에 따라 기하급수적으로 감소하게 되면서 소성변형도 줄어들게 된다

레이저 피닝효과는 약 1 mm 정도로 일반적으로 많이 사용하는 200-300 um 이하의 기계식 피닝보다 더 효과적이다

### III. 레이저 피닝 가공 실험

본 연구에서 구성된 레이저 장치를 이용하여 레이저 피닝 실험을 수행하였다 그림 4는 펄스 폭이 8 nsec, 반복율 10Hz, 레이저 출력 400mW, spot size 약 1 mm인 레이저빔을 이용하여 레이저 피닝 실험을 수행하였다 금속표면의 레이저 빔 조사방식은 그림 2 와 같이 6 pulse/mm 속도로 주사하였다. 이는 36 mm/min 의 이동속도와 약 300 mJ/mm<sup>2</sup> 에너지를 공급하여 실험하였다

표 1 레이저 피닝 실험 조건

초점거리	200 mm	레이저 파장	532 nm
레이저 출력	400 mW	pulse width	8 nsec.
반복율	10 Hz		
규격	2t X 50mm X 200mm	제질	SUS 304

레이저 피닝 실험은 표 1과 같은 조건로 SUS 304 재질에 실험을 수행하였다. 집속된 레이저 빔을 이용한 피닝 실험은 사진 1 과 같이 수중에서 수행하였으며, 레이저 파장은 532 nm green 레이저를 사용하였으며, 레이저 빔은 광확대기(beam expander) 및 초점거리 200 mm의 집광렌즈를 통하여 금속 표면에 직경 1 mm 정도의 spot이 형성되도록 구성하였다 잔류응력 측정은 hole drilling method를 이용하여 측정하였다 [1]

사진 2 는 SUS 304 시편 피닝된 표면을 나타낸 것으로, 불투명층을 사용하지 않고 레이저 출력 조건을 달리하여 레이저 피닝 실험을 수행하였다 그림 3 에서는 불투명층인 알루미늄 테이프 없이 레이저 피닝을 수행하고 잔류응력을 측정한 결과이다 윗 곡선은 모재깊이별 응력 분포곡선이며, 아래곡선은 레이저 피닝처리후 분포곡선이다 측정결과에는 인장성 잔류응력(tensile residual stress)이 존재함을 알 수 있다. 이는 레이저 피닝 처리시 레이저 에너지에 의해서 금속표면이 많은 열영향을 받고 금속 증발에 의해 많이 손상되었음을 보여주는 것이다

사진 3 불투명체인 알루미늄 테이프가 존재한 표면에 레이저 출력에 의하여 패인 부분이 나타난 사진이다 레이저 충격파에 의하여 패인부분의 크기는 레이저 spot size 크기정도로 일정하게 나타난다 그림 4 값에서는 깊이에 따른 residual stress 값을 도

식하였으며, 아래곡선은 모재깊이별 응력 분포곡선이며, 윗곡선은 레이저 피닝처리후 분포곡선이다 레이저 피닝에 따른 효과는 500-800 um이상에서 50-60 MPa 정도의 효과가 있다

#### IV. 결과

레이저로 피닝처리를 할 때 투명층으로 사용되는 물을 사용하지 않을 경우, 즉 공기층에 레이저 빔으로 유도된 플라즈마는 금속표면으로부터 급격히 팽창한다 따라서 금속표면에 흡수된 레이저 에너지는 충격과가 생성된다할지라도 금속면으로 전달보다는 공기중으로 발산된다 따라서 금속표면에 할지라도 효과적으로 압축성 잔류응력을 만들어 낼 수 없다 참고로 문헌에 의하면 [2] 유체 투명층을 사용하지 않고 레이저 피닝을 수행한 경우 레이저 첨두출력 밀도가 24 TW/cm<sup>2</sup> 의 높을 출력에도 불구하고 레이저 피닝효과가 충분히 이루어지지 않았다고 보고되고 있다 일반적으로 레이저 첨두출력 밀도가 1 GW/cm<sup>2</sup> 이상의 출력에서 피닝효과가 나타나고 있다

추가적으로 투명체인 유체와 금속표면사이에 불투명층을 삽입하여 레이저 피닝 작업을 수행할 수 있다 불투명체 역할은 레이저 에너지로부터 금속표면에 열영향을 받지 않도록 하여 금속표면의 레이저 증발(laser ablation)이 생기지 않도록 하는 것이다. 그림 4 에서 스테인리스 304 재질의 금속표면에서는 충분한 압축성 잔류응력이 이루어진 것을 알 수 있다

불투명층을 사용하지 않고 레이저 출력 조건을 달리하여 레이저 피닝 실험을 수행하였다 그림 3 에서는 불투명층인 알루미늄 테이프 없이 레이저 피닝을 수행하고 잔류응력을 측정한 결과이다 측정결과에는 인장성 잔류응력(tensile residual stress)이 존재함을 알 수 있다. 이는 레이저 피닝 처리시 레이저 에너지에 의해서 금속표면이 많은 열영향을 받고 금속 증발에 의해 많이 손상되었음을 보여주는 것이다.

#### V. 참고문헌

- [1] J Lu (Ed.) Handbook of Measurement of Residual Stresses, Society for Experimental Mechanics, 1996
- [2] Chu JP, Rigsbee JM, Banas G, Lawrence FV, Elsayed-Ali He, Effects of laser-shock processing on the microstructure and surface mechanical properties of Hadfield manganese steel. Metallurgical and materials Transaction A 1995;26A 1507-17

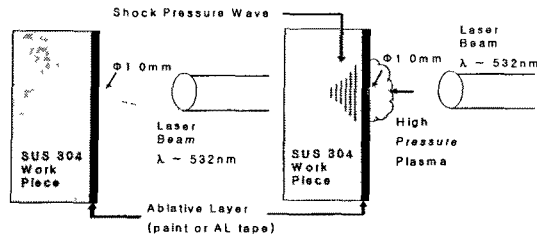


그림 1 금속표면의 레이저 피닝 PROCESS

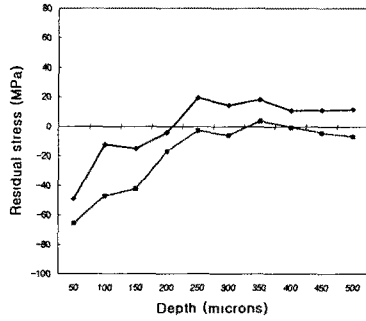


그림 3 피닝 효과가 없는 시편의 깊이별 잔류응력 분포도

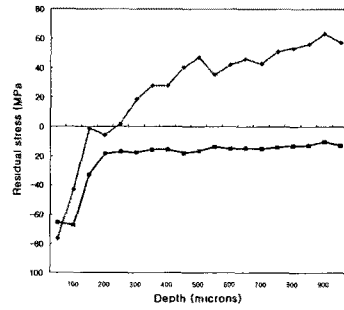


그림 4 피닝된 시편의 깊이별 잔류응력 분포도

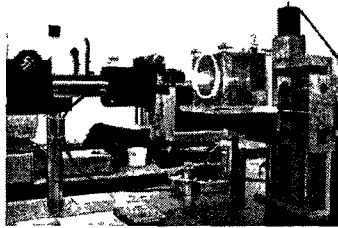


사진 1 레이저 피닝 실험장면

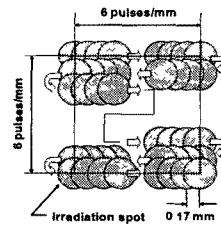


그림 2 레이저 빔 조사 방식

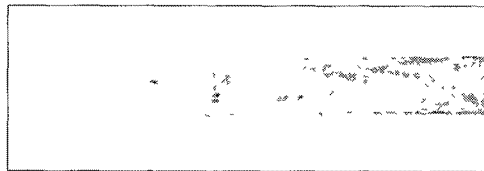


사진 2 SUS 304 계질의 레이저 피닝

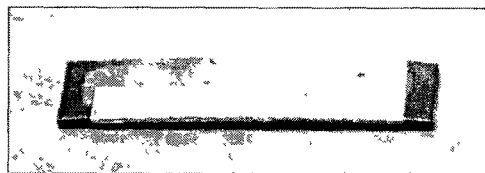


사진 3 불투명체 인 알루미늄 태웠이 존재한 레이저 피닝