

레이저 쇼크 피닝의 마이크로 충격파 측정 및 평가[§]

김주한^{*†} · 이우람^{**} · 김택구^{**} · 정성균^{*}

* 서울과학기술대학교 기계공학과, ** 서울과학기술대학교 NID 융합기술대학원 나노 IT 융합프로그램

Micro-Shockwave Measurement and Evaluation of Laser Shock Peening

Joohan Kim^{*†}, Woo Ram Lee^{**}, Teak Gu Kim^{**} and Seong Kyun Cheong^{*}

* Dept. of Mechanical Engineering, Seoul Nat'l Univ. of Science and Technology.

** Graduate School of NID Fusion Technology, Nano-IT Program, Seoul Nat'l Univ. of Science and Technology.

(Received May 23, 2011 ; Revised July 19, 2011 ; Accepted July 25, 2011)

Key Words: Laser Shock Peening (레이저쇼크피닝), Micro Shock Wave (마이크로 충격파)

초록: 본 연구에서는 레이저 쇼크 피닝으로부터 생성되는 마이크로 충격파를 정량적으로 측정하고 그 특성을 분석하였다. 레이저 쇼크 피닝은 금속 재료에서 압축 응력을 생성시키며 그 크기가 표면에서 극대화되는 특징을 가지고 있다. 펄스 Nd:YAG 레이저를 이용하여 스틸표면에 피닝 공정을 수행하였고 이에 따른 마이크로 충격파의 정량화 및 재료의 기계적 성질 변화에 대해 평가하였다. 실험적 접근으로 피에조소자를 사용하였으며 이를 통한 실제 충격파의 정량화를 제시하였다. 또한 재료 구조 특성, 재료 강도, 인장 시험 등의 기계적 특성을 분석하였다.

Abstract: Micro shockwaves are induced in laser shock peening and their effect on metal samples is presented. Laser shock peening produces maximized internal compressive stress on metal surfaces. This research evaluated the effects of micro shockwaves from laser shock peening with a pulsed Nd:YAG laser on steel samples, through the analysis of the mechanical properties of the samples. In the experiments, a piezo material was applied to measure the micro shockwaves and the hardnesses and micro tensile strengths of the samples were evaluated.

1. 서 론

기계적 재료에 있어 표면 처리 기술은 그 산업적 중요성 때문에 그 연구가 활발히 이루어져 왔다. 대부분의 재료의 피로균열은 표면에서 발생되기 때문에 이에 따른 개선책으로 효과적인 피로특성 향상 방법이 개발되어야 한다.⁽¹⁾ 피로강도와 수명을 향상시키기 위한 재료처리의 한가지 방법으로 쇼트 피닝이 일반적으로 연구 개발되어 왔다. 쇼트 피닝(Shot Peening)이란 작은 금속 불 입자를 재료 표면 위에 고속으로 조사하여 재료에 국부적 소성변형을 만들어 피로 등의 외부 반복하중이 가하여졌을 때 그 저항력을 높이는 가공법이다.⁽²⁾ 이

는 고속의 쇼트 불입자에 의해 유도된 충돌에너지가 재료의 표면에 소성변형을 일으키고 이에 의해 재료표면 가까이 압축잔류응력을 유발시켜 재료의 피로수명을 향상시키는 메카니즘을 가지고 있다.⁽³⁾ 쇼트피닝의 공정에 있어서 공정조건은 다양한 방법을 통해 연구되어야 하는데 이는 쇼트 피닝에 있어 단순 압축응력의 유도와 더불어 재료 표면의 형상변형, 가공경화, 미소크랙의 임의적 생성 등 부가적인 효과가 발생할 수 있기 때문이다.⁽⁴⁾ 또한 쇼트 피닝은 경제적인 공정으로 대량, 대면적의 재료를 일괄적으로 처리할 수 있는 장점이 있지만 그 압축잔류응력의 깊이가 상대적으로 제한적이며 재료부품에 있어 마이크로스케일의 컨트롤이 어려운 점이 존재한다.

최근 이에 따른 개선책으로 레이저 쇼크 피닝(Laser Shock Peening)이라는 표면처리 기술이 다양한 순금속 및 합금의 피로 특성을 개선하는데 연구개발되고 있다. 레이저를 통한 재료가공의 경우 빔의 에너지가 열과 충격파의 형태로 재료에 전달

[§]이 논문은 2011년도 대한기계학회 마이크로나노공학 부문 춘계학술대회(2011. 5. 26.-27., BEXCO) 발표논문임

[†] Corresponding Author, joo Hankim@seoultech.ac.kr

© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

된다. 열에 의한 재료의 영향으로 급속한 가열 및 냉각에 의해 금속표면이 셀프퀵칭(self-quenching)의 부가적 효과를 얻을 수 있는데 이는 높은 경도를 갖는 조직 표면을 생성시킬 수 있고 이는 재료에 있어 미세변형이나 열응력의 방지의 효과가 있다. 레이저 쇼크 피닝은 단순 열적 효과와는 달리 레이저의 집중된 빔스팟을 재료표면에 조사시킬 때 발생하는 충격파를 이용하여 피닝의 효과를 유도하는 원리를 가지고 있다.⁽⁵⁻¹⁰⁾

레이저 쇼크 피닝은 마이크로 스케일의 레이저의 국지적 스폿(30~300 μm)에 의해 재료표면에 충격을 가함으로써 그 재료 단조의 효과를 만들어내기 때문에 그 재료처리 영역이 쇼트피닝에 비해 미세하다는 특징이 있지만 한편으로 핀포인트 가공이 필요한 부품에 있어서 선택적 가공을 손쉽게 할 수 있다는 장점이 부각될 수 있다. 이러한 레이저쇼크피닝의 경우 10 여년전부터 그 응용이 항공산업으로부터 적용되어 일부 고부가가치의 기계 부품에 주요 사용되어 왔으나 최근 들어 일반 미세 부품의 기계재료 특성 개선이라는 측면에서 그 중요성이 더해지고 있다.⁽¹¹⁾ 이와 관련된 최근 연구에서는 레이저 쇼크 피닝의 프로세스의 개선 및 레이저 쇼크 피닝의 효과를 검증하는 주제가 보고되고 있으나⁽¹²⁾ 레이저 쇼크 피닝의 효과를 정량적으로 확인할 수 있는 충격파의 측정 등은 이루어지지 않은 상태이다. 이러한 충격파는 나노초 단위의 마이크로 스케일의 영향으로 볼 수 있고 그 측정이 어려워 실제 이론적 접근으로 예측되어 왔다. 이에 본 논문에서는 레이저 쇼크 피닝에 의해 발생하는 마이크로 충격파를 피에조소자를 통해 측정하고 레이저 충격파에 의한 금속표면의 인장강도 및 내부에 경도를 측정하였으며 특히, 불투명 보호층과 레이저 파워조건에 따른 재료의 잔류응력 특성이 어떻게 영향을 미치는지 검토하였다.

2. 이론적 배경

Fig. 1 과 같이 고에너지 레이저 펄스 빔을 금속표면에 조사시키면 표면에서 재료의 어블레이션이 일어나면서 이에 대한 반작용으로 강한 마이크로 스케일의 충격파가 발생된다. 이러한 충격파는 모든 방향으로 전파되는 특성을 보여주지만 외부 환경 및 재료 임피던스에 따라 방향성을 지닐 수 있게 된다. 본 레이저 충격 피닝에 있어서 이러한 마이크로 충격파를 효율적으로 이용해야 하며 이는 재료쪽의 충격파를 키우는 것이 필요하다.

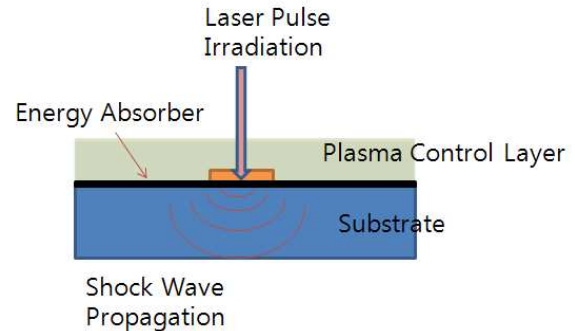


Fig. 1 Schematic of laser shock peening

이를 위해 구속층(confinement)이 공정에 필요하며 일반적으로 쉽게 적용될 수 있는 물이 사용된다. 물속에 담겨 있는 재료 표면에 레이저 빔을 조사하게 되면 물속을 통과한 레이저 빔이 금속표면이나 흡수막에서 흡수되어 플라즈마를 발생시킨다. 이때 구속층의 역할을 하는 물은 플라즈마의 팽창을 막아주는 역할을 하여 플라즈마의 압력이 물을 사용하지 않을 경우에 비하여 수배에서 수십배 정도 증가된다.⁽⁸⁾ 레이저 충격파 생성 과정에서 노즐을 이용하여 물을 금속표면에 흐르게 하거나, 혹은 시편을 수조 안에 넣고 레이저 빔을 조사시킬 수 있는 방법도 고안되고 있다.⁽¹³⁾

레이저 빔의 집속에 의해 생성된 플라즈마는 재료표면의 온도를 급격하게 상승시키며 이에 따른 압력파가 충격파의 형태로 재료내부로 진행하게 된다. 재료표면에서는 레이저 어블레이션으로부터 재료표면을 보호하고 충격파가 잘 발생되도록 하기 위해 페인트, 접착액 또는 박판 금속 흡수막을 재료표면에 코팅하는데 이는 금속표면을 물로부터 보호하고, 열로 변환 에너지의 열 영향을 최소화시키는 부가적인 역할을 한다. 일반적으로 흡수막이 없는 금속표면에 레이저 빔을 직접 조사하면 고온의 플라즈마에 의해 금속표면이 직접 가공되거나 용융층이 형성되는데 이는 실제 피닝의 효과를 감소시킬 수 있다. 또한, 막의 두께가 얇을 경우 막이 없는 경우와 비슷한 정도의 플라즈마 발생효과를 보이는 경향이 있다.⁽¹⁴⁾ 이러한 레이저빔에 의한 충격파 발생은 재료의 전자기파 흡수에 대한 해석으로 가정하여 접근할 수 있다.⁽¹⁵⁾ 전자기파가 어떤 물체표면에 입사할 때 물체에 있는 전하들과 상호작용을 한다. 파동이 부분적으로 흡수 또는 반사에 의해 복사압이 발생되게 된다. 어떤 물체의 운동량은 변화율을 작용한 힘의 크기와 같다는 뉴턴의 제 2 법칙과 파동이 운동량을 가지고 있다는 가정을 사용하면 고전 전자기 이론을 적용하여 표면에 작용하는 힘을 구하는 것이 대략

적으로 가능하다. 에너지 밀도에 따른 복사압은 식 (1)과 같다.⁽¹⁷⁾

$$P(t) = \frac{(1-R)I(t)}{c} \quad (1)$$

여기서, 에너지시간밀도(I), 반사율(R), 빛의 속도(c)로 표기가 가능하다.

레이저 빔의 에너지분포는 공간적, 시간적으로 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$P(x,t) = P(t) \exp\left(-\frac{r^2}{2r_0^2}\right) \quad (2)$$

여기서 r 은 레이저빔의 중심으로부터 거리이며 r_0 는 레이저빔의 반경이다. 이와 같은 관계식은 복사압과 레이저 에너지와의 관계를 통해 실제 레이저에 의해 변환될 수 있는 충격량을 예측하는데 유용히 쓰일 수 있다. 실제 피닝에 사용되는 에너지는 본 식에 의해 계산된 값보다는 작은 것으로 예상할 수 있는데 이것은 충격파에 의한 측정이 한쪽 방향만 가능하기 때문이며 양방향의 충격파 임피던스 측정이 어려운 점에서 발생하는 오차이다.

3. 실험방법

본 연구에 사용된 시험편은 자동차 외장재에 많이 사용되는 STS304 이다. 시험편 크기는 Fig. 2 과 같이 10×20×0.3mm 로 제작하였다. 시험편은 레이저 충격 피닝 전에 불순물을 제거하기 위해 아세톤으로 표면을 세척하였다. 시험편의 화학 조성분은 Table 1 과 같다. 또한 흡수층은 50 μm 정도인 검정색 코팅제 사용하였다.

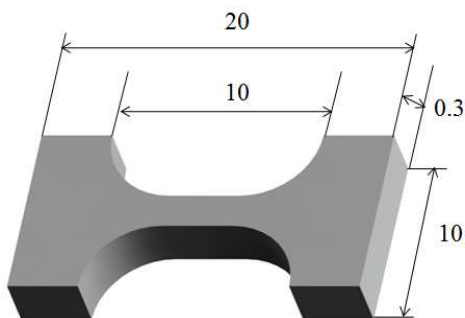


Fig. 2 Design of peening sample (mm)

플래시 램프 타입인 1.064 μm 파장 대역의 Nd:YAG 레이저가 소스로 사용되었다. 레이저의 펄스폭은 24 ns 을 가지고 있으며 펄스당 에너지는 최대 800 mJ 이다. 레이저 스폿의 크기는 500 μm 정도이며 이에 대해 수 GW/m² 의 펄스 압력을 발생하도록 실험 파라미터를 설정하였다. 레이저빔의 집속을 위해 초점거리 150 mm 인 집속렌즈를 사용하였고 모터라이즈 X-Y 이송 스테이지 위에 수조를 설치하여 시편이 수조와 함께 이송가능하도록 세팅하였다(Fig. 3).

레이저 쇼크 피닝에 있어서 충격파의 정량화는 실제 공정을 설계하고 해석하는데 중요하나 마이크로 스케일의 충격파 생성 및 전달로 인해 실제적인 측정은 이론적 계산보다 어렵다. 이와 같은 마이크로 충격파 측정의 연구는 속도 간섭계를 이용하여 측정하거나,⁽¹⁶⁾ 포토어쿠스틱(photo acoustic)

Table 1 Chemical compositions of STS304

Material	Elements (wt%)						
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
STS304	0.05	0.59	1.19	0.027	0.004	8.07	18.13

Table 2 Parameters of the laser setup

Instrument	Type
Laser	- Pulsed Nd:YAG laser - Pulse Energy : 800mJ
Beam Expander	×2 ~ ×8
Pulse width	24 ns
Objective Lens	×20
Optical Table	Size: 1,200 mm×1,800 mm×200 mm
Linear X stage	450 mm / 0.3 m/s
Linear Y stage	60 mm / 0.2 m/s
Motorized Z stage	8 mm / 0.2 m/s
Vision	FOV: 200 μm, IEEE1394 Camera
Mode	TEM ₀₀ Gaussian

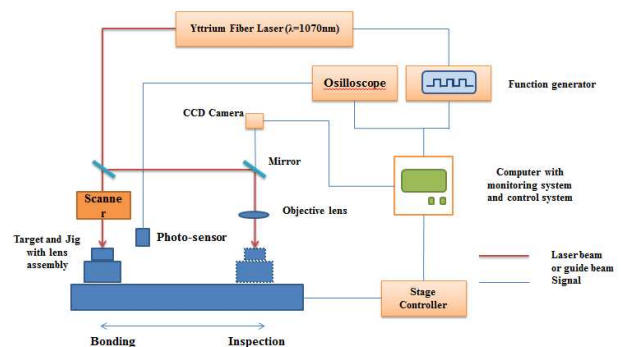


Fig. 3 Experimental setup

또는,⁽¹⁷⁾ 슈리엔가시화(Schlieren photograph)⁽¹⁸⁾를 적용한 방법이 연구 보고되었다. 이러한 연구들은 표면에서의 충격파를 정밀하게 간접적으로 측정하는 방법으로 여겨질 수 있으나 실제 재료의 충격파 침투 방향으로 충격파의 감쇄를 직접 측정하지는 못하는 단점이 있다. 본 연구에서는 피에조 소자위에 다양한 두께의 박막 구리층을 적층하고 흡수막 코팅을 입힌 후 레이저 빔을 조사하였고 피에조 소자에서 발생한 전압을 마이크로스코프를 통해 측정하여 실제 피닝공정에 있어서의 충격량을 측정할 수 있었다. 실험에 사용된 구리 박판에 크기는 10×10 mm 이며 그 박판의 두께를 50 ~ 800 μm까지 50 μm 단위로 증가시켜 실험하였다. 이는 시편의 깊이 방향으로 마이크로 충격파가 진행할 때 감쇄되는 양을 실험적으로 환산하기 위함이다. 이렇게 측정된 레이저 플루언스당 또는 박판의 두께당 전압은 각각 충격파의 압력으로 환산하여 결과를 간접적으로 분석할 수 있었다.

레이저 쇼크 피닝된 샘플들은 기계적 성질 변화를 관찰하기 위하여 마이크로 경도 측정기(402MVD, Wolpert Wilson Instruments)를 이용하여 깊이 방향의 경도 변화를 측정하였고 마이크로 인장 시험기(5800 series, Instron)를 통해 인장 강도를 확인하였다.

4. 결과 및 토의

4.1 레이저 유도 마이크로 충격량 측정

Fig. 4 는 레이저 에너지 300 ~ 500mJ 의 변화에 따른 마이크로 충격파의 측정된 압력을 얻은 결과이다. 마이크로 충격파의 크기는 레이저 플루언스의 증가에 선형적으로 증가되고 있음을 알 수 있다. 실제 측정된 수치는 복사압의 경우에 비교해볼 때, 약 50% 정도의 측정편차를 보이기 시작하며 에너지가 증가될수록 그 편차값이 크게 나타나고 있다. 이것은 시험편쪽의 압력만을 측정한 결과로 시험편 반대 방향 등의 손실된 복사압의 고려가 되어 있지 않기에 나타나는 수치로 해석되어질 수 있다. 재료의 깊이 방향으로 측정된 마이크로 충격파는 50 μm에서 약 222 MPa 의 압력을 측정할 수 있었으며 마이크로 충격파가 내부로 진행할 수록 그 값이 점점 감소하고 있음을 알 수 있다. 이는 실제 레이저 쇼크 피닝에 있어 표면에서의 충격량이 최대로 될 수 있음을 나타낸다. 또한 이 결과는 공기중에서 얻어진 측정결과로 실제 물속에서 한 것에 비교해 볼 때 구속층의 존재에 의해 그 충격량이 수배 이상 증가될 수 있음을 예상할 수 있다.

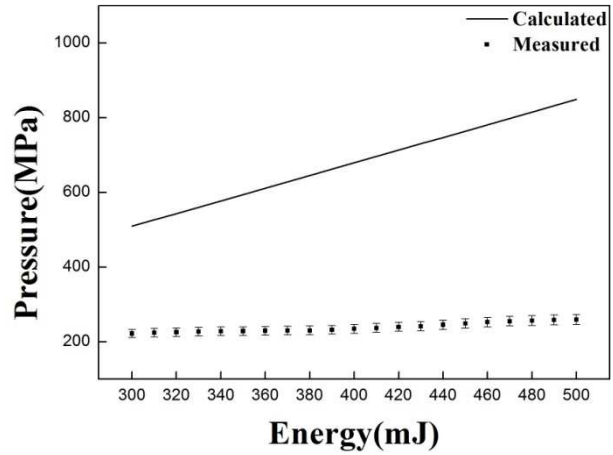


Fig. 4 Shock wave pressure as a function of laser energy

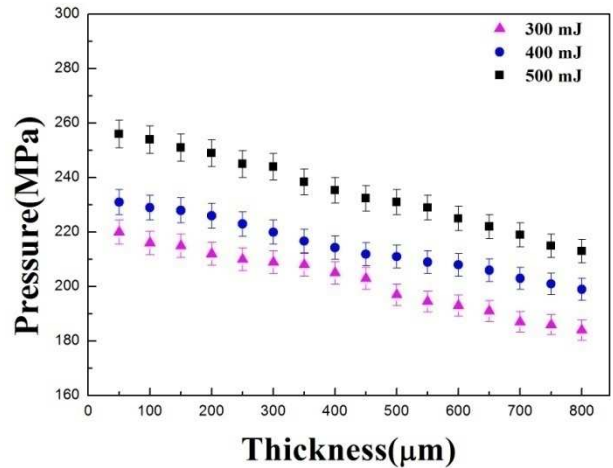


Fig. 5 Shock wave pressure as a function of depth from the laser treated surfaces

4.2 기계적 특성 변화

Fig. 6 는 경도시험 결과에 대한 그래프이다. 레이저 쇼크 피닝 공정 후 레이저의 조사된 표면으로부터 깊이 방향으로 경도 측정 하중은 50 g 으로 고정 후 경도시험을 하였다. 그 결과가 공시편은 평균 362 Hv 이며 가공되지 않은 시편은 평균 334 Hv 로 약 28 Hv 정도의 경도의 증가가 측정되었다. 이는 조직의 압축에 따른 경도의 증가로 예상된다.

Fig. 7 은 인장시험 결과에 대한 그래프이다. 11 개의 시편에 대한 인장시험을 수행한 결과, 가공된 시편은 평균 483 MPa 이며 가공안된 시편은 430 MPa 로 약 53 MPa 가량 인장강도가 향상되었다. 따라서, 레이저 쇼크 피닝은 재료의 인장 강도에 대해 관련된 개선 효과를 보이는 것으로 평가되었다.

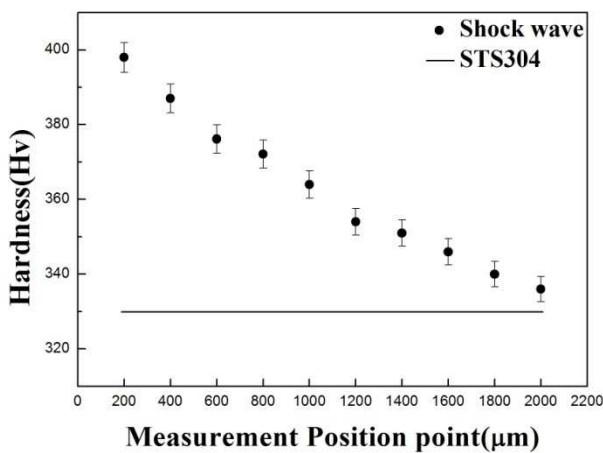


Fig. 6 Experimental results of hardness test

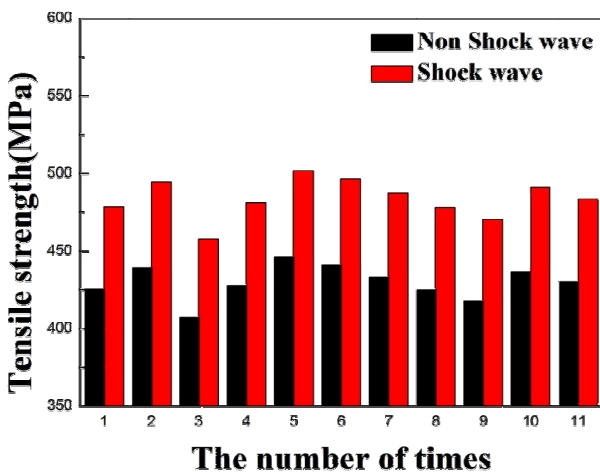


Fig. 7 Experimental results of tensile test

5. 결론

본 연구에서는 STS304를 사용하여 Nd:YAG 레이저로 레이저 충격파를 발생시켜 기계적 피닝을 수행하였다. 특히 피에조소자를 이용하여 두께 따른 마이크로 충격파의 정량적 해석이 가능하였으며 이를 모델링을 통해 검증할 수 있었다. 또한 레이저 쇼크 피닝된 시편의 내부경도시험, 인장시험을 통해 피닝의 효과를 검증할 수 있었다. 적절한 가공 파라미터에서 다음과 같은 금속의 기계적 성질이 개선되는 특성을 보였다. 요약된 결론은 다음과 같다.

(1) 레이저 쇼크 피닝에 있어 마이크로 충격파 모델링의 충격파 관련 압력과 실제 피에조소자를 이용하여 그 충격파를 측정된 결과 레이저 에너지 증가에 따라 그 압력도 증가되는 경향을 얻을 수 있었으며 이것은 실제 모델링의 경향과

일치한다.

(2) 레이저가 조사된 표면을 기준으로 깊이 방향으로 경도시험을 한 결과 피닝에 의한 경도 변화를 확인할 수 있었다.

(3) 재료의 인장강도시험에서는 인장강도가 약 53 MPa 향상되었고, 이는 레이저 쇼크 피닝을 통해 기계적 성질이 개선되었음을 간접적으로 나타낸 결과라 할 수 있다.

덧붙여, 향후 레이저 쇼크 피닝 시 재료표면에서의 손상을 최소화할 수 있는 개선된 레이저 피닝 공정 연구가 필요할 것으로 여겨진다.

후 기

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 일반연구지원사업 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2010-0009077).

참고문헌

- (1) Hu, Y., Yao, Z. and Hu, J., 2006, "3-D FEM Simulation of Laser Shock Processing," *Surface & Coatings Technology*, 201, Vol. 201, Issues 3-4, pp. 1426~1435.
- (2) Rhee, H. W. and Park, Y. S., 2004, "Distribution Characteristics of Residual Compressive Stresses Induced by Shot-peening in the Aircraft Structural Material," *Journal of the Korean Society of Precision Engineering* Vol. 21, No. 5, pp. 149~156.
- (3) Zhang, Y. K., Ren, X. D., Zhou, J. Z., Lu, J. Z. and Zhou, L. C., 2009, "Investigation of the Stress Intensity Factor Changing on the Hole Crack Subject to Laser Shock Processing," *Material and Design*, 30., Vol. 30, Issues 7, pp. 2769~2773.
- (4) Montross, C. S., Wei, T., Ye, L., Clark, G. and Mai, Y. W., 2002, "Laser Shock Processing and Its Effects on Microstructure and Properties of Metal Alloys: a Review," *International Journal of Fatigue* 24, Vol. 24, Issues 10, pp. 1021~1036.
- (5) Yang, S. Y., Choi, S. D., Kim, G. M., Jun, J. M. and Gong, B. C., 2010, "Characteristics of Strengthening for Thin Metals by Laser Beam," *Journal of Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 19, No. 2, pp. 216~223.
- (6) Rubio-Gonzalez, C., Gomez-Rosas, G., Ocana, J. L., Molpeceres, C., Banderas, A., Porro, J. and Morales, M., 2006, "Effect of an Absorbent Overlay on the Residual Stress Field Induced by Laser Shock

- Processing on Aluminum Samples,” *Surface Science*, Vol. 52, Issues 18, pp. 6201~6205.
- (7) Lu, J. Z., Zhang, L., Feng, A. X., Jinag, Y. F. and Cheng, G. G., 2009, “Effects of Laser Shock Processing on Mechanical Properties of Fe-Ni Alloy,” *Material and Design* 30, Vol. 30, Issues 9, pp. 5~8.
- (8) Braisted, W. and Brockman, R, 1999, “Finite Element Situation of Laser Shock Peening,” *International Journal of Fatigue* 21, Vol. 21, Issues 7, pp. 719~724.
- (9) Hammersley, G., Hackel, L. A. and Harris, F., 2000, “Surface Prestressing to Improve Fatigue Strength of Components by Laser Shot Peening,” *Optics and Laser in Engineering*, Vol. 34, Issues 4-6, pp. 327~337.
- (10) Yang, J. M., Her, Y. C., Han, N. and Clauer, A., 2001, “Laser Shock Peening on Fatigue Behavior of 2024-T3 Al Alloy with Fastener Hole and Stopholes,” *Material Science and Engineering*, Vol. 298, Issues 1-2, pp. 296~299.
- (11) Chung, C. M., Baik, S. H., Kim, J. S. and Lee, S. B., 2008, “The Laser Peening Effect for Improving the Surface Properties of Metal,” *Journal of KSLP*, Vol. 11, No. 3, pp. 5~8.
- (12) Kim, T. G., Cheong, S. K., Kim, J. H. and Song, C. S., 2009, “A Study on Improvement of Surface Properties for Titanium Alloy Using Laser-Induced Shock Waves,” *The Korean Society of Machine Tool Engineers Autumn Conference 2009*, pp. 226~230.
- (13) Scruby, C. B. and Drain, L. E., 1990, *Laser Ultrasonics*, Adam Hilger, New York, pp. 81~89.
- (14) Hatamleh, O., Lyons, J. and Forman, R. H., 2007, “Laser and Shot Peening Effects on Fatigue Crack Growth in Friction Stir Welded 7075-T7351 Aluminum Alloy Joint,” *International of Journal of Fatigue* 29, Vol. 29, Issues 3, pp. 421~434.
- (15) Choi, E. Y., Bhang, B. W., Son, S. K. and Cho, C. D., 2009, “A Study on Residual Stress for Al6061 Alloy by Laser Plasma Shock Peening (LPSP) Process,” *The Korean Society of Mechanical Engineers Spring Conference 2009*, pp. 552~556.
- (16) Celliers, P. M., Collins, G. W., Da Silva, L. B., Gold, D. M. and Cauble, R., “Accurate Measurement of Laser-Driven Shock Trajectories with Velocity Interferometry,” *Applied Physics Letters* Vol. 73, No. 10, pp.1320~1322.
- (17) Park, H. K., Kim, D., Grigoropoulos, C. P., Tam, A. C., 1996, “ Pressure Generation and Measurement in the Rapid Vaporization of Water on a Pulsed Laser Heated Surface,” Vol. 80, Issue 7, pp. 4072 ~ 4081.
- (18) Martí-López, L., Ocaña, R., Piñeiro, E., Asensio, A., 2011, “Laser Peening Induced Shock Waves and Cavitation Bubbles in Water Studied by Optical Schlieren Visualization,” *Original Research Article Physics Procedia*, Vol 12, pp. 442~451.
- (19) Hecht, E., 2001, *Optics*, Addison Wesley, 2001, USA, pp. 56~58.
- (20) Park, J. H., 2005, “The Next Generation Nano Shape Measurement System-AFM,” *Journal of the KSME*, Vol. 45, No. 3, pp. 44~48.
- (21) Baek, S. H., Cho, S. S. and Joo, W. S., 2009, “Response Surface Approximation for Fatigue Life Prediction and Its Application to Multi-Criteria Optimization With a Priori Preference Information,” *Trans. Of the KSME(A)* Vol. 33, No.2, pp. 114~126.